Comptes rendus de la 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures (novembre 2018)

English version

Proceedings of the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures (November 2018)

Bureau international des poids et mesures

Conférence générale des poids et mesures

26e réunion (13-16 novembre 2018)

Note sur l'utilisation du texte anglais (voir page 302)

Les comptes rendus de la Conférence générale des poids et mesures sont présentés en anglais en même temps qu'en français. Il n'en demeure pas moins que la version officielle, en particulier concernant les résolutions adoptées par la Conférence, est celle en langue française.

The proceedings of the General Conference on Weights and Measures are prepared in English as well as French. Please note, however, that the official version, particularly of the Resolutions voted by the Conference, is the French one.

Édité par le BIPM

Pavillon de Breteuil

F-92312 Sèvres Cedex

France

Conception graphique :

Monika Jost

Imprimé par : Imprimerie Agate, France

ISSN 1016-5893

ISBN 978-92-822-2276-8

Table des matières

Liste des délégués et des invités 11

Comptes rendus des séances, 13-16 novembre 2018 **29**

Ordre du jour **30**

Première séance – 13 novembre 2018 (matin)

1. Présentation des titres accréditant les délégués **33**
2. Ouverture de la réunion par M. le président de l'Académie des sciences, président de la CGPM **33**
3. Discours d'ouverture du représentant de Son Excellence M. le Ministre de l'économie et des finances de la République française **33**
4. Réponse de M. le Président du Comité international des poids et mesures **35**
5. Discours de M. le président de l'Académie des sciences de Paris **36**
6. Nomination du secrétaire de la CGPM **38**
7. Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter **38**
8. Approbation de l'ordre du jour **41**
9. Rapport du président du CIPM sur les travaux accomplis depuis la 25e réunion de la CGPM **41**
   - 9.1. États Membres et Associés **41**
   - 9.2. Actions résultant des Résolutions adoptées par la CGPM à sa 25e réunion **44**
   - 9.3. Situation actuelle concernant le CIPM MRA et les organisations régionales de métrologie **48**
   - 9.4. Le CIPM et ses Comités consultatifs **50**
   - 9.5. Relations internationales **51**
   - 9.6. Perspectives pour le futur **52**
   - 9.7. Conclusion **53**
10. Compte rendu du directeur du BIPM sur les principales réalisations du BIPM **54**
11. Le travail des Comités consultatifs pour accroître l'impact du CIPM MRA **57**
12. L'impact du CIPM MRA sur le continent américain **60**

Deuxième séance – 13 novembre 2018 (après-midi)

13. L'importance de la mesure pour les normes internationales **64**

14. Le rôle de l'infrastructure de la qualité dans le développement économique **65**

15. Le rôle de l'accréditation dans la dissémination de la traçabilité métrologique **66**

16. Sur l'importance d'une échelle de temps de référence pour la métrologie **69**

17. Rapport du président du CCTF **70**

    Résumé du rapport du CCTF **70**

    Domaine de compétence du CCTF **71**

    Stratégie **71**

    Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM **72**

    Perspectives à court terme et à long terme **74**

18. Présentation et vote du Projet de résolution B **76**

19. Rapport du président du CCL **77**

    Résumé du rapport du CCL **77**

    Domaine de compétence du CCL **78**

    Stratégie **78**

    Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM **81**

    Perspectives à court terme et à long terme **83**

20. Désignation des membres du Groupe de travail sur la dotation du BIPM **84**

Troisième séance – 14 novembre 2018 (matin)

21. La métrologie et l'infrastructure de la qualité à l'appui des objectifs de développement durable **85**

22. Renforcement des capacités en métrologie : applications dans le domaine des denrées alimentaires et de l'alimentation animale **86**

23. Partenariat avec le BIPM en matière de renforcement des capacités **89**

24. Soutenir le développement de la métrologie en Afrique **90**

25. Une stratégie à long terme pour le BIPM **92**

26. Présentation et vote du Projet de résolution C **98**

27. Programme de travail du BIPM proposé pour les années 2020 à 2023 **98**

28. Proposition concernant la dotation du BIPM pour les années 2020 à 2023 (Projet de résolution D) **101**

Quatrième séance – 14 novembre 2018 (après-midi)

29. Question des États Membres en situation d'arriérés **104**

30. Présentation et vote du Projet de résolution E **105**

31. La Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM **107**

Cinquième séance – 15 novembre 2018 (matin)

32. Rapport provisoire du Groupe de travail sur la dotation du BIPM **110**

33. Les nouvelles frontières de la métrologie en biologie **110**

34. Mesurer avec précision les isotopes pour un monde durable, plus sûr et plus sain **113**

35. La traçabilité en médecine de laboratoire : élément moteur de l'exactitude des résultats pour les patients **115**

36. Rapport du président du CCQM **118**

Résumé du rapport du CCQM **118**

Domaine de compétence du CCQM **119**

Stratégie **120**

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM **121**

Perspectives à court terme et à long terme **125**

37. La métrologie à l'appui de l'innovation en radiothérapie moléculaire **126**

38. Rapport du président du CCRI **128**

Résumé du rapport du CCRI **128**

Domaine de compétence du CCRI **129**

Stratégie **130**

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM **130**

Perspectives à court terme et à long terme **133**

Sixième séance – 15 novembre 2018 (après-midi)

39. Étalons et science de la mesure au service des technologies de surveillance des essais nucléaires **136**

40. Rapport de la présidente du CCAUV **139**

Résumé du rapport du CCAUV **139**

Domaine de compétence du CCAUV **139**

Stratégie **139**

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM **140**

Perspectives à court terme et à long terme **141**

41. Développer une vision commune de la métrologie scientifique et légale : la perspective de l'OIML **145**

42. Les défis métrologiques des technologies d'éclairage durables et efficaces **150**

43. Rapport du président du CCPR **153**

Résumé du rapport du CCPR **153**

Domaine de compétence du CCPR **153**

Stratégie **154**

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM **155**

Perspectives à court terme et à long terme **157**

Septième séance – 16 novembre 2018 (matin)

44. Ouverture de la séance **159**

45. Progrès réalisés concernant la révision du SI et rapport du président du CCU **160**

Résumé du rapport du CCU **161**

Domaine de compétence du CCU **162**

Stratégie **162**

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM **164**

Perspectives à court terme et à long terme **165**

46. Succès de la mesure de *k* et rapport du président du CCT **166**

Résumé du rapport du CCT **166**

Domaine de compétence du CCT **167**

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM **167**

Perspectives à court terme et à long terme **170**

47. Succès concernant les effets électriques quantiques et rapport du président du CCEM **171**

Résumé du rapport du CCEM **173**

Domaine de compétence du CCEM **173**

Stratégie **174**

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM **174**

Perspectives à court terme et à long terme **176**

48. Succès de la mesure de *h* et rapport du président du CCM **177**

Résumé du rapport du CCM **179**

Domaine de compétence du CCM **179**

Stratégie **179**

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM **179**

Perspectives à court terme et à long terme **181**

Séance publique

49. L'effet Hall quantique et le SI révisé **186**
50. Le rôle de la constante de Planck en physique **189**
51. Les horloges atomiques optiques – de nouvelles perspectives sur le monde quantique **194**
52. Mesurer à l'aide de constantes fondamentales ; comment fonctionnera le SI révisé **199**
53. Présentation du Projet de résolution A « Sur la révision du Système international d'unités (SI) » **202**
54. Vote du Projet de résolution A **204**

Huitième séance – 16 novembre 2018 (après-midi)

55. Explication de la procédure de vote ; présentation de la « présélection » de candidats à l'élection du CIPM et nomination des scrutateurs **205**
56. Approbation du texte définitif et vote du Projet de résolution D **206**
57. Élection du CIPM et élection de la Commission pour l'élection du CIPM **207**
58. Questions diverses **208**
59. Clôture de réunion **208**

Résolutions adoptées par la Conférence générale lors de sa 26e réunion 209

Sur la révision du Système international d'unités (SI) **210**

Sur la définition des échelles de temps **213**

Sur les objectifs du BIPM **215**

Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2020 à 2023 **217**

Sur les contributions arriérées des États Membres et la procédure d'exclusion **218**

Annexe A Convocation de la Conférence générale des poids et mesures (26e réunion) **221**

Annexe B Programme de travail et budget du Bureau international des poids et mesures pour les années 2020 à 2023 **241**

Liste des sigles utilisés dans le présent volume 551

Liste des délégués et des invités à la 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures

Réunie à Versailles du 13 au 16 novembre 2018
sous la présidence de M. Sébastien Candel
Président de l'Académie des sciences de l'Institut de France

Mesdames, Messieurs les délégués des États signataires de la Convention du Mètre et Associés à la Conférence générale des poids et mesures.

États Parties à la Convention du Mètre

(Le nom des chefs de délégation apparaît en gras et celui des chefs de délégation par intérim en italique ; le nom des membres du Comité international des poids et mesures est suivi d'un astérisque.)

Afrique du Sud

M. T. Demana, directeur principal, Infrastructure technique, Département du commerce et de l'industrie (DTI), Pretoria.

M. N.S. Mukhufhi, président-directeur général, National Metrology Institute of South Africa (NMISA), Pretoria.

M. C. Sehlapolo, directeur financier, NMISA.

M. M. Adams, ambassade d'Afrique du Sud en France, Paris.

Mme A. Chetty, DTI.

M. W. Louw*, directeur, Recherche et développement technologique, NMISA.

Allemagne

M. S. Schnorr, directeur général, ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (BMWi), Berlin.

M. O. Janssen, directeur, BMWi.

M. A. Höll, directeur adjoint de division, BMWi.

M. M. Kühne, conseiller, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig.

Arabie saoudite

M. S. Al-Kasabi, gouverneur, Saudi Standards, Metrology and Quality Organization, National Measurement and Calibration Center (SASO-NMCC), Riyad.

M. M. Al-Harthi, directeur général, SASO-NMCC, Riyad.

M. K. Al-Dawood, directeur, Département du temps et des fréquences, SASO-NMCC.

M. M. Al-Ghamdi, directeur, Département des masses, SASO-NMCC.

M. M. Al-Shahrani, assistant du gouverneur, SASO-NMCC

Argentine

M. H. Laiz*, directeur de la métrologie, de la qualité et de l'environnement, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Buenos Aires.

M. M. Verón Guerra, ambassadeur de la République argentine en France, Paris.

M. G. Taboada, ministre chef, Section des organisations internationales économiques de l'Ambassade de la République argentine en France.

Mme P. Ayelén Amigo, secrétaire d'ambassade, Section des organisations internationales économiques de l'Ambassade de la République argentine en France.

M. T. De Diego, chargé de projet, Section des organisations internationales économiques de l'Ambassade de la République argentine en France.

Australie

M. B. Warrington, directeur général par interim, chef métrologiste, National Measurement Institute, Australia (NMIA), Département de l'industrie, de l'innovation et de la science, Lindfield.

M. P. Fisk, ancien directeur général et chef métrologiste, NMIA.

Son Excellence B. Berne, ambassadeur d'Australie en France, Paris.

Son Excellence A. McKenzie, ambassadeur d'Australie auprès de l'UNESCO, Paris.

M. A. Cooke, conseiller, Department of Industry, Innovation and Science, ambassade d'Australie en Belgique, Bruxelles.

Autriche

M. G. Freistetter, ministère fédéral du Numérique et de l'Attractivité économique, Vienne.

M. R. Edelmaier, vice-président, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Vienne.

Belgique

M. H. Pirée, conseiller, responsable du service Étalons nationaux au sein de la division Métrologie, Service public fédéral Économie, PME, Classes moyennes et Énergie, Direction générale de la Qualité et Sécurité, Bruxelles.

Brésil

M. C.A. de Azevedo, président, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), Rio de Janeiro.

Son Excellence C. M. Cozendey, ambassadeur, délégué du Brésil auprès des organisations internationales économiques, ambassade du Brésil en France, Paris.

Mme D. Arruda Benjamin, ministre-conseiller, déléguée adjointe du Brésil auprès des organisations internationales économiques, ambassade du Brésil en France.

M. H. Siqueira Brandi, directeur, Métrologie scientifique et technologie, INMETRO.

M. M. Neves de Medeiros.

M. J.A. Da Paz Cruz, coordinateur général pour l'articulation internationale, INMETRO.

M. P. Mendoça Cavalcante, secrétaire, assitant du délégué du Brésil auprès des organisations internationales économiques, ambassade du Brésil.

Bulgarie

M. P. Ilchev, président par interim, Bulgarian Institute of Metrology (BIM), Sofia.

M. S. Nedialkov, directeur général, DG "National Center of Metrology", BIM.

Canada

M. A. Steele, métrologiste en chef du Canada et directeur général du Centre de recherche en métrologie, Conseil national de recherches du Canada (CNRC), Ottawa.

Mme G. Macdonald, directrice de recherche et développement, Métrologie pour les infrastructures de qualité, CNRC.

M. B. Wood, agent principal de recherche en métrologie, CNRC.

M. R. Green, chef d'équipe en métrologie, CNRC.

M. J. McLaren*, secrétaire du Comité international des poids et mesures (CIPM).

Chili

M. C. Ortiz, premier secrétaire, ambassade du Chili en France, Paris.

Chine

M. Qin Yizhi, vice-ministre, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China (SAMR), Beijing.

M. Xie Jun, directeur général, Département de la métrologie, SAMR.

M. Han Jianping, directeur général adjoint, Département de la coopération internationale, SAMR.

Mme Zheng Chunjing, directrice, Département de la coopération internationale, SAMR

M. Fang Xiang, directeur général, National Institute of Metrology (NIM), Beijing.

M. Duan Yuning*, vice-directeur général, NIM.

M. Li Tianchu, Fellow, NIM.

Mme Gao Wei, directrice, Département de la coopération internationale, NIM.

Colombie

M. E.A. Cristancho Pinilla, directeur général, Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM Colombia), Bogotá.

Croatie

M. D. Zvizdic, directeur, Croatian Metrology Institute (HMI), Zagreb.

Danemark

M. M. Kjær, directeur, Danish Fundamental Metrology (DFM), Lyngby.

Mme A. Radoor Abrahamsen, conseillère spéciale, Danish Safety Technology Authority, Esbjerg.

Égypte

M. M.A. M. Amer, président, National Institute of Standards (NIS), Le Caire.

Mme N. Emad Mahmoud Khaled, directrice, Direction des affaires internationales, NIS.

Espagne

M. J.M. Bernabé, directeur, Centro Español de Metrología (CEM), Madrid.

M. J. Á. Robles Carbonell, consultant technique, sous-directeur, Division scientifique et des relations institutionnelles, CEM.

Émirats arabes unis

Son Excellence A.A.Q. Al Maeeni, directeur général, Emirates Authority for Standardization & Metrology (ESMA), Abou Dabi.

Mme A. Albastaki Zainal, directrice, Département de la métrologie, ESMA.

Mme R.F. Al Ameri, directrice, Département pour l'accréditation nationale, ESMA.

États-Unis d'Amerique

M. W. Copan, sous-secrétaire au commerce chargé des questions relatives aux étalons et à la technologie et directeur du National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg.

M. J. Olthoff, directeur adjoint par interim, Programmes des laboratoires, NIST.

Mme B. Cordero, analyste financière, Office of Management Policy and Resources, International Organization Affairs Bureau, Département d'État, Washington D.C.

M. E. Lin, directeur, Laboratoire de mesure des matériaux, NIST.

M. W.E. May*, ancien directeur du NIST, vice-président du Comité international des poids et mesures (CIPM).

Mme C.M. Saundry, directrice, Office of International and Academic Affairs, NIST.

Fédération de Russie

M. S.S. Golubev, directeur-adjoint, Federal Agency for Technical Regulating and Metrology (Rosstandart), Moscou.

M. D.V. Gogolev, Rosstandart.

M. A.N. Pronin, directeur adjoint, Mendeleyev Institute for Metrology, Rosstandart (VNIIM), Saint-Pétersbourg.

M. L.F. Vitushkin, responsable du laboratoire de gravimétrie et projets avancés, VNIIM.

M. Y.A. Kustikov, directeur adjoint, VNIIM.

M. A.Y. Kuzin, directeur, All-Russian Scientific Research Institute for Metrological Service, Rosstandart (VNIIMS), Moscou.

M. F.V. Bulygin*, premier directeur adjoint, VNIIMS, Moscou.

M. L.K. Isaev, ancien membre du CIPM.

M. A.S. Baturin, directeur par interim, All-Russian Scientific Institute for Optical and Physical Measurements, Rosstandart (VNIIOFI), Moscou.

M. S.I. Donchenko, directeur, All-Russian Scientific Research Institute of Physical Technical and Radiotechnical Measurements, Rosstandart (VNIIFTRI), Moscou.

M. A.N. Schipunov, premier directeur adjoint général, directeur adjoint pour la science, VNIIFTRI.

Finlande

M. M. Heinonen, vice-président, VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Centre for Metrology / Mittatekniikan keskus (VTT MIKES), Espoo.

M. M. Merimaa, vice-président, Recherche, VTT MIKES.

M. T. Valkeapää, chef ingénieur, métrologie légale, Finnish Safety and Chemicals Agency, Helsinki.

France

Mme C. Lagauterie, cheffe du bureau de la métrologie, Ministère de l'économie et des finances, Paris.

M. T. Grenon, directeur général, Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Paris.

M. R. Stefanini, sous-directeur de la normalisation, de la réglementation des produits et de la métrologie, ministère de l'Économie et des Finances, Paris.

M. B. Van Maris, adjoint à la cheffe du bureau de la métrologie, ministère de l'Économie et des Finances, Paris.

Mme M. Chambon, directrice de la recherche et du développement, LNE.

M. F. Aidan, chef de pôle Affaires économiques et enjeux globaux, ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, Paris.

M. T. Desbets, conseiller politique, ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, Paris.

Mme M. Fayol, adjointe à la cheffe du bureau de la métrologie, ministère de l'Économie et des Finances, Paris.

M. L. Érard*.

M. N. Dimarcq, directeur adjoint, Observatoire de la Côte d'Azur, Nice.

M. P. Gaucher, chargé de mission physique-nanosciences, Direction générale pour la Recherche et l'Innovation, Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, Paris.

Grèce

Non représentée.

Hongrie

Mme Z. Szilágyi Nagyné , directrice, Département de la métrologie et de la supervision technique, Government Office of the Capital City Budapest (BFKH), Budapest.

Inde

M. A.K. Srivastava, secrétaire, Département de la consommation, New Delhi.

M. D.K. Aswal, directeur, CSIR-National Physical Laboratory (NPLI), New Delhi.

M. T.D. Senguttuvan, directeur, Planification, contrôle et évaluation, NPLI.

Indonésie

M. K.S. Achmad, vice-président, Mise en œuvre des normes et accréditation, National Standardization Agency of Indonesia (BSN), Jakarta.

M. M. Pinandito, directeur des services scientifiques, Research Center for Metrology-LIPI/Puslit Metrologi-LIPI (RCM-LIPI), Serpong.

M. G. Zaid, directeur, Centre de recherche et développement en métrologie, RCM-LIPI.

M. I. Hastori, assistant adjoint, Évaluation institutionnelle, ministère de la Réforme administrative et bureaucratique (Kemenpan PAN dan RB), Jakarta.

M. D.P. Januardhi Effyandono, directeur, Centre des accréditations de l'organisme d'inspection et du laboratoire, BSN.

Irak

Non représenté, excusé.

Iran (République islamique d')

M. K. Madanipour, président, Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI), Karaj.

M. H. Mohammadnabi, conseiller du président, ISIRI.

M. H.A. Asharieh Najafi, premier conseiller, ambassade de la République islamique d'Iran en France, Paris.

Irlande

Mme M. Buckley, directrice de la métrologie légale, National Standards Authority of Ireland, National Metrology Laboratory (NSAI NML), Dublin.

Israël

Mme N. Goldovsky, directrice, Laboratoire du temps et des fréquences, National Physical Laboratory of Israel (INPL), Jérusalem.

Italie

M. M. Fiorentino, directeur général, Direction générale pour le marché, la concurrence, la consommation, le contrôle et les normes techniques, ministère du Développement économique, Rome.

M. G. Capuano, responsable, Direction générale pour le marché, la concurrence, la consommation, le contrôle et les normes techniques - division XV « Instruments de mesure et métaux précieux », ministère du Développement économique, Rome.

M. D.S. Wiersma, président, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Turin.

M. P. de Felice, directeur, Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente - Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (ENEA-INMRI), Rome.

M. V. Fernicola, vice-président, Organisme national italien d'accréditation, Accredia, Rome.

Japon

M. T. Usuda*, directeur général, National Institute of Advanced and Industrial Science, National Metrology Institute of Japon (NMIJ/AIST), Tsukuba.

M. T. Kobata, directeur, Center for Quality Management of Metrology, NMIJ/AIST.

M. N. Saito, directeur, Bureau de la cooperation internationale, Center for Quality Management of Metrology, NMIJ/AIST.

M. M. Fukui, directeur adjoint, Metrology Police Office, Industrial Science and Technology Policy and Environment Bureau, ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI), Tokyo.

M. S. Toma, premier secrétaire, Affaires scientifiques, ambassade du Japon en France, Paris.

Kazakhstan

M. T. Tokanov, directeur général, Kazakhstan Institute of Metrology (KazInMetr), Astana.

M. N. Veretelnikov, directeur de laboratoire, KazInMetr.

M. M. Sauranbayev, conseiller, ambassade du Kazakhstan en France, Paris.

Kenya

M. H.K. Rotich, directeur, Métrologie et Essais, ministère de l'Industrie , du Commerce et des Coopératives, Kenya Bureau of Standards (KEBS), Nairobi.

M. D. Ondoro, responsable par interim de la métrologie, Métrologie et Essais, KEBS.

M. S. Mwachidagaya, deuxième conseiller, ambassade du Kenya en France, Paris.

Lituanie

M. R. Vaitkus, directeur, Département de la métrologie, Center for Physical Sciences and Technology (FTMC), Vilnius.

M. E. Naujalis, directeur, Laboratoire de chimie, Département de la métrologie, FTMC.

Malaisie

M. O. Zakaria, directeur principal, National Metrology Laboratory (NMIM), Sepang, Selangor.

Mexique

M. V.J. Lizardi Nieto, directeur général, Centro Nacional de Metrología (CENAM), Querétaro.

M. I.A. Castelazo Sinencio*, directeur général adjoint des services technologiques, CENAM.

Monténégro

Mme V. Asanović, directrice, Bureau of Metrology (BMM), Podgorica.

M. G. Vukoslavović, directeur adjoint, BMM.

Norvège

M. G. Samuelsen, directeur général, Norwegian Metrology Service, Justervesenet (JV), Kjeller.

M. H.A. Frøystein, directeur de département, JV.

Nouvelle-Zélande

M. F. Francois, directrice, Measurement Standards Laboratory of New Zealand (MSL), Lower Hutt.

Pakistan

Non représenté.

Pays-Bas

M. W. de Waal, conseiller en politique de coordination, ministère des Affaires économiques et de la Politique climatique, La Haye.

M. V. Fokkema, directeur général, VSL, Delft.

*M. G. Rietveld**, scientifique senior, VSL

Pologne

M. M. Dobieszewski, vice-président, Central Office of Measures/Glówny Urzad Miar (GUM), Varsovie.

M. M. Mikiel, spécialiste en chef, Département de la stratégie, GUM.

Portugal

Mme I. Godinho, directrice, Département de la métrologie, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica.

M. J. Alves de Sousa, directeur de division, Laboratoire national de métrologie, IPQ.

République de Corée

M. S.-R. Park, président, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon.

M. D.-I. Kang*, chercheur associé, KRISS.

M. Y.-K. Park, chercheur scientifique principal, KRISS.

M. S.-K. Kim, directeur, Division de la métrologie chimique et médicale, KRISS.

M. S. Kwon, directeur, Division des politiques et de la stratégie, KRISS.

M. K. Sung, chef, Bureau de la coopération internationale, KRISS.

Mme T.-Y. Hong, gestionnaire principale, Bureau de la coopération internationale, KRISS.

République dominicaine

Non représentée.

République tchèque

M. V. Pokorny, président, Czech Office for Standards, Metrology and Testing (UNMZ), Prague.

M P. Klenovsky, directeur général, Czech Metrology Institute (CMI), Brno.

M. J. Tesar, directeur, Division de la métrologie fondamentale, CMI.

Mme D. Provaznikova, troisième secrétaire, délégation permanente de la République tchèque auprès de l'OCDE, Paris.

Roumanie

Mme M. Buzoianu*, directrice scientifique, Institutul National de Metrologie (INM), Bucarest.

Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord

M. P.S. Hadley, directeur adjoint, Innovation for Infrastructure, Department for Business, Innovation and Skills (BIS), Teddington.

M. P.A. Thompson, directeur général, National Physical Laboratory (NPL), Teddington.

M. M.R Sené*, directeur général adjoint, NPL.

M. R.J. Gunn, responsable de l'international, NPL.

Serbie

Non représentée.

Singapour

M. T. Liew*, directeur exécutif, National Metrology Centre, Agency for Science, Technology and Research (A*STAR), Singapour.

Slovaquie

M. Z. Schreier, directeur, Département de la métrologie, Slovak Office of Standards, Metrology and Testing/Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo Slovenskej republiky (UNMS), Bratislava.

M. R. Kováč, directeur général, Slovak Institute of Metrology/Slovenský Metrologický Ústav (SMU), Bratislava.

M. J. Markovič, directeur général, Slovak Legal Metrology (SLM), Bratislava.

Slovénie

M. S. Kopač, directeur, Metrology Institute of the Republic of Slovenia (MIRS), ministère de l'Enseignement supérieur, de la Science et de la Technologie, Celje.

Suède

Mme M. Groth, directrice de département, Industrial Technnologies, Swedish Government Agency for Innovation Systems (Vinnova), ministère de l'Entreprise, Stockholm.

M. P. Åslund, responsable de programme, Vinnova.

M. J. Johansson, directeur, RISE Research Institutes of Sweden AB (RISE), Borås.

Suisse

M. P. Richard*, directeur, Institut fédéral de métrologie (METAS), Bern-Wabern.

M. G. Dudle, directeur-suppléant, METAS.

Thaïlande

Mme. A. Charoensook, directrice, National Institute of Metrology (Thailand) (NIMT), Pathum Thani.

Tunisie

M. L. Khedir, directeur général, Agence nationale de métrologie (ANM), Tunis.

M. M. Hammami, directeur général, Institut national de recherche et d'analyse physico-chimique (INRAP), Ariana-Tunis.

M. A. Mallat, directeur général, Laboratoire de Métrologie de la Direction générale des Transmissions et de l'Informatique (DEF-NAT), Tunis.

Turquie

M. N. Camuşcu, directeur général, Métrologie et normalisation, ministère de l'Industrie et de la Technologie, Ankara.

M. M. Cetintas, directeur, National Metrology Institute of Turkey (UME), Gebze-Kocaeli.

Ukraine

M. I. Brovchenko, vice-ministre, ministère du Développement économique et du Commerce, Kiev.

M. L. Vitkin, directeur, Département de la règlementation technique et de la métrologie, ministère du Développement économique et du Commerce, Kiev.

M. P. Neyezhmakov, directeur-général, National Scientific Centre "Institute of Metrology", Kiev.

M. I. Kuzmenko, directeur général adjoint, Métrologie, évaluation de la conformité des équipements de mesure et des activités scientifiques, State Enterprise "All-Ukrainian State Scientific and Production Center of Standardization, Metrology, Certification and Consumer Protection" (SE "Ukrmetrteststandard"), Kiev.

Uruguay

M. D. Volpe, directeur des analyses, des essais et de la métrologie, Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Montevideo.

Venezuela (République bolivarienne du)

Non représentée.

États et entités économiques associés à la Conférence générale

Albanie

Non représentée.

Azerbaïdjan

M. S. Mammadov, troisième secrétaire, ambassade d'Azerbaïjan en France, Paris.

Bangladesh

Non représenté.

Bélarus

M. D. Bartashevich, vice-président, State Committee for Standardization of the Republic of Belarus (Gosstandart), Minsk.

M. V. Hurevich, directeur, Belarusian State Institute of Metrology (BelGIM), Minsk

M. N. Zhagora, conseiller principal, BelGIM.

Bolivie (État plurinational de)

Non représenté.

Bosnie-Herzégovine

M. Z. Džemić, directeur général, Institute of Metrology of Bosnia and Herzegovina (IMBIH), Sarajevo.

Botswana

Non représenté.

CARICOM

Non représentée.

Costa Rica

Non représenté.

Cuba

Non représentée.

Équateur

Mme A. Moscoso, attachée de coopération, ambassade d'Équateur en France, Paris.

Estonie

Non représentée.

Ethiopie

M. D.C. Dare, ministre conseiller, ambassade d'Éthiopie en France, Paris.

Géorgie

M. D. Tkemaladze, directeur général, Georgian National Agency for Standards and Metrology (GEOSTM), ministère de l'Économie et du Développement durable, Tbilisi.

Mme N. Mikanadze, directrice de la métrologie, GEOSTM, Tbilisi.

Ghana

M. P. Date, directeur de la métrologie scientifique, Ghana Standards Authority (GSA), Accra.

Hong Kong, Chine

M. A.Y.K. Yan, directeur, the Government of the Hong Kong Special Administrative Region Standards and Calibration Laboratory (SCL), Wanchai.

Jamaïque

Non représentée.

Koweït

M. M. Eid Al Adwani, directeur général adjoint, Département des services industriels, Public Authority for industry (PAI), Safat.

Mme K. Ibrahim Abdullah.

Lettonie

Non représentée.

Luxembourg

M. C. Liesch, adjoint à la direction, Institut luxembourgeois de la normalisation, de l'accréditation, de la sécurité et qualité des produits et services (ILNAS), Luxembourg.

M. P. Kadok, directeur, Bureau luxembourgeois de métrologie, ILNAS.

Macédoine du Nord

Mme M. Mustafai, directrice, Bureau of Metrology (BOM), ministère de l'Économie, Skopje.

M. B. Ukali, Cabinet du ministre, ministère de l'Économie, Skopje.

Malte

Non représenté.

Maurice

Non représenté.

Mongolie

Non représentée.

Namibie

Non représentée.

Oman

Non représenté.

Ouzbékistan

M. D. Sattarov, directeur général, Uzbekistan Agency for Standardization, Metrology and Certification (UzSTANDARD Agency), Tashkent.

Son excellence S. Rustambaev, ambassadeur de la République d'Ouzbékistan en France, Paris.

M. A. Daminov, directeur, Uzbek National Institute of Metrology of Uzstandard Agency (UzNIM SE), Tashkent.

M. B. Allaev, spécialiste en chef, Bureau d'expertise légale et des relations internationales, UzSTANDARD Agency.

M. B. Paygamov, conseiller, ambassade d'Ouzbékistan en France.

Panama

Mme T. Valderrama, troisième secrétaire, ambassade de Panama en France, Paris.

Paraguay

Non représenté.

Pérou

M. C. Amézaga, ministre, ambassade du Pérou en France, Paris.

M. G. Guillén, ministre, ambassade du Pérou en France.

Mme E. Flores, conseillère, ambassade du Pérou en France.

Philippines

Non représentées.

République arabe syrienne

Non représentée.

République de Moldova

M. A. Melenciuc, directeur, National Metrology Institute of the Republic of Moldova (NMI (MD)), Chisinau.

M. S. Ceapa, directeur-adjoint, NMI (MD).

Seychelles

Non représentées.

Soudan

Mme M. Ali Babiker, Sudanese Standards and Metrology Organization (SSMO), Khartoum.

Sri Lanka

Non représenté.

Taipei chinois

Mme L.-H. Chen, directrice générale adjointe, Bureau of Standards, Metrology and Inspection, (BSMI), ministère des Affaires économiques, Hsinchu.

M. C.-D. Hsia, spécialiste technique principal, quatrième division, BSMI.

M. J.-R. Duann, vice-président principal, Industrial Technology Research Institute (ITRI), Hsinchu.

M. T.-Y. Lin, directeur général, Industrial Technology Research Institute, Center for Measurement Standards (CMS/ITRI), Hsinchu.

M. Y.-P. Lan, directeur de division, CMS/ITRI.

Mme F.-C. Chen, représentant, Bureau de l'Europe de l'Ouest, ITRI.

Tanzanie

M. J. Maganga, directeur, Département des essais et de l'étalonnage, Tanzania Bureau of Standards (TBS), Dar-es-Salaam.

M. J. Mahilla, responsable de l'assurance qualité (Métrologie), TBS.

Son Excellence S.W. Shelukindo, ambassadeur de Tanzanie en France, Paris.

Viet Nam

Non représenté.

Yémen

Non représenté.

Zambie

Non représentée, excusée.

Zimbabwe

Mme C. Zhanje, directrice, Consommation, ministère de l'Industrie et du Commerce, Harare.

M. R. Mafoti, président-directeur général, Scientific & Industrial Research & Development Centre (SIRDC), Harare.

M. M. Ranganai, directeur, Laboratoire national de métrologie, SIRDC.

M. T. Muwani, inspecteur régional, ministère de l'Industrie et du Commerce.

Ont assisté à la Conférence

M. B.D. Inglis*, président duComité international des poids et mesures (CIPM).

Mme M.L. Rastello*, membre du CIPM.

M. J. Ullrich*, vice-président du CIPM.

M. M. Milton, directeur, Bureau international des poids et mesures (BIPM), Sèvres.

Les représentants des organisations intergouvernementales et organismes internationaux suivants :

Agence internationale pour l'énergie atomique (AIEA) : M. M. Gröning[§].

Banque mondiale : M. A. Mikhnev[§].

Commission électrotechnique internationale (CEI), M. P. Sebellin (directeur du Département technique).

Commission internationale de l'éclairage (CIE) : M. Y. Ohno (président élu), M. P. Blattner, M. T. Bergen, Mme K. Nield (secrétaire générale).

International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC) : M. G. Beastall[§].

International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) : Mme M. Malmqvist Nilsson[§] (présidente).

Organisation internationale de normalisation (ISO) : M. S. Mujica Montes[§] (secrétaire général), M. S. Mac Curtain.

Organisation internationale de métrologie légale (OIML) : M. R. Schwartz[§] (président), M. P. Dixon, M. A. Donnellan, M. I. Dunmill, M. S. Patoray (directeur du Bureau international de métrologie légale - BIML).

Organisation des Nations unies pour le développement industriel (ONUDI) : M. B. Calzadilla-Sarmiento (directeur du Département du commerce, de l'investissement et de l'innovation), M. J.P. Davilla, Mme M. Kubiec-Dobosz.

Union astronomique internationale : Mme C. Capitaine.

Les intervenants invités suivants :

M. M. Cetintas, directeur, National Metrology Institute of Turkey (UME), Gebze-Kocaeli.

M. N. Dimarcq, directeur-adjoint de l'Observatoire de la Côte d'Azur, Nice.

M. X. Fang, directeur, National Institute of Metrology (NIM), Beijing.

M. G. Flux, Royal Marsden Hospital & Institute of Cancer Research / Université de Londres.

M. J. Marty, Organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE), Vienne.

[§] Également invité en tant qu'intervenant.

M. D. Moturi, président, Système intra-africain de métrologie (AFRIMETS).

M. W. Phillips, Fellow, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg.

M. M. Salit, JIMB/SLAC/Stanford.

M. J.-P. Uzan, directeur de recherche, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Institut d'astrophysique de Paris (IAP), Paris.

M. K. von Klitzing, Max Planck Institute, Stuttgart.

M. J. Ye, JILA, University of Colorado/NIST, Boulder.

Quelques membres du personnel du BIPM.

Comptes rendus de la 26e réunion

de la Conférence générale

des poids et mesures

13-16 novembre 2018

Ordre du jour

Première séance – 13 novembre 2018 (matin)

1 Présentation des titres accréditant les délégués

2 Ouverture de la réunion de la CGPM par M. le président de l'Académie des sciences, président de la CGPM

3 Discours d'ouverture du représentant de Son Excellence M. le Ministre de l'économie et des finances de la République française

4 Réponse de M. le président du Comité international des poids et mesures

5 Discours de M. le président de l'Académie des sciences de Paris

6 Nomination du secrétaire de la CGPM

7 Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter

8 Approbation de l'ordre du jour

9 Rapport du président du CIPM sur les travaux accomplis depuis la 25e réunion de la CGPM

10 Compte rendu du directeur du BIPM sur les principales réalisations du BIPM

11 Le travail des Comités consultatifs pour accroître l'impact du CIPM MRA

12 L'impact du CIPM MRA sur le continent américain

Deuxième séance – 13 novembre 2018 (après-midi)

13 L'importance de la mesure pour les normes internationales *(S. Mujica, ISO)*

14. Le rôle de l'infrastructure de la qualité dans le développement économique *(A. Mikhnev, Banque mondiale)*

15. Le rôle de l'accréditation dans la dissémination de la traçabilité métrologique *(M. Malmqvist Nilsson, ILAC)*

16. Sur l'importance d'une échelle de temps de référence pour la métrologie *(N. Dimarcq, CNRS)*

17. Rapport du président du CCTF

18. Présentation et vote du Projet de résolution B

19. Rapport du président du CCL

20. Désignation des membres du Groupe de travail sur la dotation du BIPM

Troisième séance – 14 novembre 2018 (matin)

21. La métrologie et l'infrastructure de la qualité à l'appui des objectifs de développement durable *(B. Calzadilla Sarmiento, ONUDI)*
22. Renforcement des capacités en métrologie : applications dans le domaine des denrées alimentaires et de l'alimentation animale *(X. Fang, NIM – Chine)*
23. Partenariat avec le BIPM en matière de renforcement des capacités *(M. Cetintas, Tübitak Ume – Turquie)*
24. Soutenir le développement de la métrologie en Afrique *(D. Moturi, AFRIMETS)*
25. Une stratégie à long terme pour le BIPM
26. Présentation et vote du Projet de résolution C
27. Programme de travail du BIPM proposé pour les années 2020 à 2023
28. Proposition concernant la dotation du BIPM pour les années 2020 à 2023 (Projet de résolution D)

Quatrième séance – 14 novembre 2018 (après-midi)

29. Question des États Membres en situation d'arriérés
30. Présentation et vote du Projet de résolution E
31. La Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM

Cinquième séance – 15 novembre 2018 (matin)

32. Rapport provisoire du Groupe de travail sur la dotation du BIPM
33. Les nouvelles frontières de la métrologie en biologie *(M. Salit, NIST – États-Unis d'Amérique)*
34. Mesurer avec précision les isotopes pour un monde durable, plus sûr et plus sain *(M. Gröning, AIEA)*
35. La traçabilité en médecine de laboratoire : élément moteur de l'exactitude des résultats pour les patients *(G. Beastall, IFCC)*
36. Rapport du président du CCQM
37. La métrologie à l'appui de l'innovation en radiothérapie moléculaire *(G. Flux, Royal Marsden Hospital and Institute of Cancer Research)*
38. Rapport du président du CCRI

Sixième séance – 15 novembre 2018 (après-midi)

39. Étalons et science de la mesure au service des technologies de surveillance des essais nucléaires *(J. Marty, OTICE)*
40. Rapport de la présidente du CCAUV

41. Développer une vision commune de la métrologie scientifique et légale : la perspective de l'OIML *(R. Schwartz, CIML)*
42. Les défis métrologiques des technologies d'éclairage durables et efficaces *(Y. Ohno, CIE)*
43. Rapport du président du CCPR

Septième séance – 16 novembre 2018 (matin)

44. Ouverture de la séance
45. Progrès réalisés concernant la révision du SI et rapport du président du CCU
46. Succès de la mesure de *k* et rapport du président du CCT
47. Succès concernant les effets électriques quantiques et rapport du président du CCEM
48. Succès de la mesure de *h* et rapport du président du CCM

Séance publique

49. L'effet Hall quantique et le SI révisé *(K. von Klitzing)*
50. Le rôle de la constante de Planck en physique *(J.-P. Uzan)*
51. Les horloges atomiques optiques – de nouvelles perspectives sur le monde quantique *(J. Ye)*
52. Mesurer à l'aide de constantes fondamentales ; comment fonctionnera le SI révisé *(W. Phillips)*
53. Présentation du Projet de résolution A « Sur la révision du Système international d'unités (SI) »
54. Vote du Projet de résolution A

Huitième séance – 16 novembre 2018 (après-midi)

55. Explication de la procédure de vote ; présentation de la « présélection » de candidats à l'élection du CIPM et nomination des scrutateurs
56. Approbation du texte définitif et vote du Projet de résolution D
57. Élection du CIPM et élection de la Commission pour l'élection du CIPM
58. Questions diverses
59. Clôture de réunion

Première séance – 13 novembre 2018

1. Présentation des titres accréditant les délégués

Comme requis dans la Convocation à la 26e réunion (2018) de la Conférence générale des poids et mesures (ci-après CGPM ou Conférence générale), les délégués ont dû présenter les titres d'accréditation remis par leur Gouvernement ou autorité concernée.

2. Ouverture de la réunion par M. le président de l'Académie des sciences, président de la CGPM

M. Sébastien Candel, président de l'Académie des sciences de Paris et président de la CGPM, ouvre la séance inaugurale de la 26e réunion de la CGPM le 13 novembre 2018. M. Candel souligne l'impact considérable qu'aura cette Conférence générale sur le développement de la métrologie au niveau mondial.

L'ouverture de la réunion est suivie d'une allocution prononcée par M. Courbe, directeur général, Direction générale des entreprises, au nom de Son Excellence M. le Ministre de l'Économie et des Finances de la République française.

3. Discours d'ouverture du représentant de Son Excellence M. le Ministre de l'Économie et des Finances de la République française

M. Courbe, directeur général, Direction générale des entreprises, prononce l'allocution suivante :

> « Monsieur le président de l'Académie des sciences, Monsieur le président du Comité international des poids et mesures, Monsieur le directeur du Bureau international des poids et mesures, Mesdames et Messieurs les délégués, Mesdames et Messieurs,
>
> Au nom de Bruno Le Maire, ministre de l'Économie et des Finances, et au nom du Gouvernement de la République française, j'ai le grand honneur et le plaisir de vous accueillir aujourd'hui à Versailles à l'occasion de l'ouverture de cette 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) qui se place sous le signe d'une révision majeure et historique du Système international d'unités (SI).
>
> En effet, cette 26e réunion sera l'occasion de vous prononcer sur l'adoption d'une résolution visant à redéfinir quatre des sept unités de base que compte le Système international d'unités. Cette révision va mettre un terme à l'usage de références matérielles pour définir le système d'unités.
>
> La France a le privilège d'être, depuis 1875, dépositaire de la Convention du Mètre signée à Paris par dix-sept États, dans le but d'établir une autorité mondiale dans le domaine de la métrologie, qui a été constituée déjà par le Bureau international des poids et mesures, et qui avait donné lieu à la création du système métrique décimal. Cette Convention, qui a créé l'une des plus anciennes organisations internationales, est aujourd'hui ratifiée par 60 États Membres et 42 États Associés. Notre réunion aujourd'hui montre la vigueur de cette organisation.

Aujourd'hui plus encore qu'hier, la métrologie est un facteur incontournable et indispensable d'une politique industrielle moderne et dynamique. Comme vous le savez, la métrologie favorise la production d'éléments comparatifs objectifs et partagés entre l'ensemble des acteurs d'une chaîne de valeur, depuis la recherche et développement jusqu'aux consommateurs, en passant par les producteurs ou encore les évaluateurs.

Conscient de cet enjeu pour toute politique économique et en particulier pour toute politique industrielle, le ministère de l'Économie et des Finances développe des actions en faveur du transfert des technologies de la métrologie fondamentale vers l'industrie, tant au niveau international que national.

Au niveau international, la coopération de tous les États impliqués est essentielle pour permettre de maintenir des concepts métrologiques communs d'excellence et on peut reconnaître aujourd'hui le rôle essentiel que joue le Bureau international des poids et mesures dans cette action permanente ; la Conférence qui nous réunit cette semaine va montrer la qualité et l'excellence des travaux réalisés ces dernières années dans le domaine de la métrologie.

Nous soutenons activement la recherche fondamentale qui est la base de cette discipline et je salue en particulier le travail réalisé par le LNE, le laboratoire national de métrologie et d'essais, qui effectue avec le soutien du ministère des recherches portant sur la détermination des constantes de Boltzmann et de Planck, dans la perspective de la redéfinition des unités de masse et de température, la redéfinition des unités étant l'objet de cette Conférence. Nous essayons aussi qu'au-delà des sujets plus classiques, cette recherche fondamentale se développe dans des domaines où la science de la mesure était sans doute insuffisamment intense, notamment dans des domaines comme l'environnement, le biomédical ou la recherche sur l'intelligence artificielle. Il nous semble que la métrologie doit investir ces domaines de manière résolue pour préparer l'avenir.

En effet, nous sommes entrés, notamment avec les disciplines que je viens de citer mais avec beaucoup d'autres, dans une ère où l'innovation se déroule à un rythme jamais atteints auparavant et c'est sans doute ce qui distingue la période économique, et industrielle en particulier, que nous vivons actuellement.

L'industrie, la recherche, l'économie et la société demandent au quotidien des mesures toujours plus précises au service d'innovations qu'elles attendent, mais aussi des mesures dans des champs plus larges, et la recherche doit se développer dans des situations de mesure extrêmes (les très hautes températures, la cryogénie, l'infiniment petit, le spatial, le numérique, etc.). L'exemple le plus classique mais le plus parlant est celui de la seconde, mesurée aujourd'hui à une précision de 10^{-16} ; le travail des laboratoires sur de nouvelles horloges optiques devrait permettre des mesures cent fois plus précises (soit à environ 10^{-18} près) et permettre ainsi en termes de géolocalisation de passer d'une précision du mètre à une précision du centimètre. On voit bien, et les médias l'ont bien retranscrit, l'impact majeur d'une telle évolution de la métrologie pour bâtir de grandes installations, améliorer la prédiction des mouvements terrestres, en particulier dans la détection précoce des séismes ou de l'activité volcanique, ou explorer l'univers. Parmi les applications moins connues, les progrès de la métrologie dans le domaine de la santé vont permettre, avec des analyses sanguines plus précises, de détecter plus précocement des maladies dégénératives, comme la maladie d'Alzheimer, des maladies orphelines, ou encore de connaître plus rapidement les conséquences de l'exposition à des perturbateurs endocriniens.

Ces quelques exemples illustrent bien l'impact de la métrologie dans notre vie quotidienne, dans la vie de nos concitoyens ; l'impact est également évident sur la compétitivité de notre industrie et sur la sécurité de notre société.

Le système d'unités doit donc être fiable, accessible et universel. L'universalité mais aussi la stabilité de ce système de mesure établi ont été depuis deux siècles des points essentiels pour garantir une dissémination efficace et durable des mesures. Dans les dernières décennies, ces mesures ont connu quelques évolutions avec les découvertes de la relativité générale, des lasers, de l'optique quantique qui ont permis de redéfinir la candela en 1954, puis la seconde en 1967 et le mètre en 1983. Ce sont les premières unités à avoir été totalement « dématérialisées » sur une échelle de temps de plusieurs décennies.

Aujourd'hui, le défi, l'étape historique qui s'ouvre avec cette Conférence est de faire évoluer les quatre unités du Système international qui restaient inchangées : l'ampère, le kelvin, la mole et le kilogramme.

Le kilogramme est encore matérialisé par la masse du prototype international du kilogramme en platine iridié, le grand *K*, gardé soigneusement au Bureau international des poids et mesures au Pavillon de Breteuil à Sèvres. Cette matérialisation unique rend les comparaisons délicates et contient une fragilité de nature à affecter sa pérennité. Intellectuellement et pratiquement, faire reposer la confiance du système métrique sur un artefact unique et non reproductible n'était pas satisfaisant.

C'est pourquoi l'adoption de nouvelles définitions pour ces quatre unités qui étaient matérialisées physiquement et qui seront désormais fondées sur des constantes physiques fondamentales ou sur des propriétés physiques de la matière sera une étape essentielle. Ainsi, la dématérialisation de toutes les unités fondamentales permettra d'assurer la stabilité à long terme, de garantir l'indépendance des mesures des influences externes et aussi d'aborder de nouveaux concepts en physique et en chimie.

Cette évolution du Système international d'unités que vous allez mettre en œuvre montre aussi la capacité de la communauté scientifique internationale à adapter en permanence les références métrologiques fondamentales aux besoins de la société et de l'industrie, en tenant compte le mieux possible des découvertes scientifiques et techniques et en intégrant les nouvelles technologies telles que celles liées au développement de la micro et de la nano-électronique qui sont des technologies très disruptives pour l'ensemble de l'économie.

Ces quelques mots pour vous dire l'importance que le Gouvernement français attache à la Conférence qui s'ouvre aujourd'hui et à cette étape historique que vous allez décider lors des travaux de cette semaine qui seront riches et intenses.

Je vous remercie et je vous souhaite à tous une excellente 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures. »

4. Réponse de M. le président du Comité international des poids et mesures

M. Inglis, président du Comité international des poids et mesures (ci-après CIPM), remercie M. Courbe pour l'allocution qu'il a donnée au nom de Son Excellence M. le Ministre de l'Économie et des Finances de la République française. Cette allocution de portée considérable a mis en lumière l'importance du travail effectué dans le domaine de la métrologie et, en particulier, de la métrologie

internationale. Le travail réalisé par la communauté de la métrologie et les décisions qui seront prises par la CGPM à sa 26e réunion auront une influence déterminante sur les sciences de la santé, l'environnement et les technologies émergentes, ainsi que sur de nombreuses autres activités. M. Inglis souligne que la métrologie a une grande dette envers la France qui, dès les débuts de la mise en place d'un système international de mesure, a eu un rôle précurseur dans l'établissement du système métrique, la signature de la Convention du Mètre et le dépôt des prototypes métriques. Par ailleurs, le cœur de la métrologie se situe à quelques pas de Paris : les encouragements et la reconnaissance du ministre et du Gouvernement français envers le BIPM soulignent le rôle important joué par la France. M. Inglis ajoute qu'il reste encore beaucoup à accomplir mais que la décision de redéfinir les unités du SI, qui devrait être adoptée par la CGPM, sera historique et célébrée par la communauté de la métrologie. Il remercie à nouveau M. Courbe pour son discours ainsi que le ministre pour ses propos avisés et conclut en précisant que le BIPM veillera à la mise en œuvre de ces recommandations.

5. Discours de M. le président de l'Académie des sciences de Paris

M. Candel, président de l'Académie des sciences de Paris et président de la CGPM, prononce l'allocution suivante :

« Monsieur le directeur général, Monsieur le président du CIPM, Monsieur le directeur du BIPM, Mesdames et Messieurs les délégués, chers collègues, Mesdames et Messieurs,

C'est un honneur de prendre la parole au cours de cette session en tant que président de l'Académie des sciences. C'est un privilège et aussi un plaisir pour moi de vous accueillir aujourd'hui à Versailles pour cette 26e Conférence générale des poids et mesures, une Conférence particulièrement importante dans l'histoire de la métrologie. Je suis heureux de voir autant de pays représentés par leur délégation que je remercie bien sincèrement pour leur participation.

Cette Conférence a été préparée avec soin et efficacité par le Bureau international des poids et mesures, organisation intergouvernementale créée par la Convention du Mètre. La principale mission du BIPM est d'assurer et de promouvoir la comparabilité et l'harmonisation mondiale des mesures en fournissant notamment un Système international d'unités cohérent.

Il y a quatre ans, en introduction à la 25e Conférence générale, le président de l'Académie des sciences de l'époque, Philippe Taquet, avait retracé l'évolution du système d'unités et avait montré avec beaucoup d'élégance comment on est passé d'une collection foisonnante d'unités disparates, que l'on peut généralement caractériser de baroques, à un système homogène et rationnel. Je me garderai de retracer ce parcours dont vous pourrez trouver les détails dans les actes de la 25e Conférence.

Je note cependant que l'évolution vers le système international a pour origine l'élan réformateur, universaliste et unificateur de la Révolution française. Il s'agissait alors de sortir du fouillis des unités. Dans sa séance du 1er août 1793, l'Assemblée nationale déclare qu'elle est satisfaite du travail déjà exécuté par l'Académie sur le système des poids et mesures, qu'elle en adopte les résultats pour établir un système dans toute la République pour l'offrir à toutes les nations. Le travail de l'Académie des sciences est reconnu par l'Assemblée et c'est ce travail qui fonde le nouveau système d'unités. Dans le cadre de la réception de ce soir à l'Académie des sciences, je raconterai brièvement la naissance du mètre en utilisant les documents conservés dans nos archives.

C'est la Convention du Mètre, 82 ans plus tard, en 1875, qui donne naissance au Bureau international des poids et mesures, une institution scientifique permanente créée par dix-sept nations signataires, le décret correspondant date de 1876.

Le choix du siège du BIPM, fixé à Paris, s'est porté sur le Pavillon de Breteuil dans le parc de Saint-Cloud où il se trouve encore aujourd'hui et que certains d'entre vous ont pu visiter dans l'après-midi d'hier.

Le BIPM fonctionne sous la direction et la surveillance du Comité international des poids et mesures, le CIPM, dont le président se trouve à mes côtés, opérant sous l'autorité de la Conférence générale des poids et mesures, la CGPM, que nous engageons aujourd'hui. Cette Conférence rassemble de façon périodique des délégués de tous les gouvernements contractants. La Convention stipule dans son article 4 que la présidence de la Conférence générale des poids et mesures est attribuée au président en exercice de l'Académie des sciences : c'est ce qui justifie mon intervention et qui m'honore bien évidemment.

Il y a quatre ans, dans le cadre de la 25e Conférence générale, Philippe Taquet, ancien président de l'Académie, indiquait qu'il n'était nullement spécialiste de métrologie et que la seule unité pour lui en tant que paléontologue, expert en évolution et grand connaisseur des dinosaures, était une unité de temps qui typiquement dans son domaine était de l'ordre du million d'années, environ 31 térasecondes.

N'étant pas moi-même spécialiste de la métrologie, j'ai suivi un programme de formation accélérée en participant cette année aux réunions du comité Science et Métrologie de l'Académie des sciences, présidé par Christian Bordé que j'aimerais remercier ainsi que tous les membres de ce comité pour leur aide.

Nous avons dans ce cadre mis en place plusieurs actions avec notamment un numéro spécial des Comptes rendus de l'Académie des sciences consacré à la métrologie, une séance le 4 décembre 2018 sur le nouveau Système international d'unités qui sera retransmise en streaming sur internet, et une séance d'histoire des sciences le même jour en soirée ouverte au grand public portant sur les changements d'étalons.

En tant qu'utilisateur du Système international dans le domaine de la physique, des sciences aéronautiques et spatiales, de la combustion, de l'énergie et de la propulsion, j'apprécie la cohérence interne du Système international.

Il y a d'ailleurs une unité qui m'intrigue, celle qui porte un nom étonnamment proche du mien, la candela. Vous aviez peut être noté cette ressemblance surprenante. À une lettre près, mon nom aurait été celui d'une unité fondamentale. Je dois avouer cependant que je n'ai jamais employée la candela dans mes travaux scientifiques. C'est une unité d'intensité lumineuse définie en watt par stéradian et principalement utile dans le domaine de la photométrie.

Le Système international a donc acquis une cohérence interne remarquable et apporté la nécessaire simplification dans la mise en œuvre des grands résultats de la science et dans les calculs techniques du domaine de l'ingénierie. Et pourtant, la confusion régnait encore il y a peu. C'est ainsi que dans les années 60, peu après la définition du Système international, le kilogramme-force n'avait pas complètement disparu de la littérature technique française. Il a été heureusement remplacé par le newton, ou plutôt le décanewton.

L'évolution qui va être réalisée au cours de cette Conférence peut étonner. Elle est pourtant une suite logique des évolutions successivement réalisées. Il s'agit de reformuler le Système en partant des constantes fondamentales de la physique, en remplaçant le dernier étalon physique, celui du kilogramme, par une définition s'appuyant sur la constante de Planck. Les idées qui

conduisent à ce changement sont anciennes mais c'est seulement dans le cadre de cette 26e réunion de la CGPM que cette transition va être conduite. De ce point de vue, cette Conférence constituera un événement majeur pour la métrologie mondiale.

Dans quatre jours, le 16 novembre, vous allez en effet voter pour une transformation radicale du Système international qui sert de base à la science et aux échanges économiques mondiaux. Par cette action, vous mettrez en place un système de mesure qui s'appuiera entièrement sur les constantes fondamentales de la nature. Les retombées de ce choix ne peuvent que favoriser les nouvelles technologies.

Cependant, un effort pédagogique devra être accompli pour permettre à tous de bien comprendre ce rapprochement avec les fondements qui unifient la nouvelle métrologie et d'en tirer bénéfice.

Une des caractéristiques de cette Conférence est de rassembler les nations autour d'un sujet scientifique commun, démontrant encore une fois, et il est bon de le souligner, que la science rapproche les peuples et favorise l'union. Au nom de l'Académie des sciences, je vous souhaite une excellente 26e Conférence générale, beaucoup d'interaction, d'échanges et de dialogues. »

6. Nomination du secrétaire de la CGPM

Le président de la CGPM propose que M. McLaren, secrétaire du CIPM, soit nommé secrétaire de la CGPM. M. McLaren est élu secrétaire de la CGPM par consensus.

7. Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter

En tant que secrétaire de la CGPM, M. McLaren souhaite la bienvenue aux délégués des États Membres participant à la 26e réunion de la CGPM. Après avoir examiné les titres accréditant les délégués, il procède à l'établissement de la liste des délégués chargés du vote au nom de leur Gouvernement et demande à chaque chef de délégation de confirmer la présence de la délégation. Cette liste, par ordre alphabétique, s'établit comme suit :

État Membre	Chef de délégation
Afrique du Sud	T. Demana
Allemagne	S. Schnorr
Arabie saoudite	S. Al-Kasabi
Argentine	H. Laiz
Australie	B. Warrington
Autriche	G. Freistetter
Belgique	H. Pirée
Brésil	C.A. De Azevedo
Bulgarie	P. Ilchev

Canada	A. Steele
Chili	C. Ortiz
Chine	Y. Qin
Colombie	E.A. Cristancho Pinilla
Croatie	D. Zvizdic
Danemark	M. Kjær
Égypte	M.A.M. Amer
Émirats arabes unis	A.A.Q. Al Maeeni
Espagne	J.M. Bernabé
États-Unis d'Amérique	W. Copan
Fédération de Russie	S. Golubev
Finlande	M. Heinonen
France	C. Lagauterie
Hongrie	Z. Nagyné Szilágyi
Inde	S.A.K. Srivastava
Indonésie	K. Achmad
Irlande	M. Buckley
Israël	N. Goldovsky
Italie	M. Fiorentino
Japon	T. Usuda
Kazakhstan	T. Tokanov
Kenya	H.K. Rotich
Lituanie	R. Vaitkus
Malaisie	O. Zakaria
Mexique	L.N. Lizardi Nieto
Monténégro	V. Asanovic
Norvège	G. Samuelsen
Nouvelle-Zélande	F. Francois
Pays-Bas	W. de Waal
Pologne	M. Dobieszewski
Portugal	I. Godinho
République de Corée	S.-R. Park
République islamique d'Iran	K. Madanipour
République tchèque	V. Pokorny

Roumanie	M. Buzoianu
Royaume-Uni de Grande Bretagne et d'Irlande du Nord	P.S. Hadley
Singapour	T. Liew
Slovaquie	Z. Schreier
Slovénie	S. Kopac
Suède	M. Groth
Suisse	P. Richard
Thaïlande	A. Charoensook
Tunisie	L. Khedir
Turquie	N. Camuşcu
Ukraine	I. Brovchenko
Uruguay	D. Volpe

Sur les 60 États Membres, 55 sont représentés. La majorité absolue requise pour le vote des résolutions est donc de 28.

M. McLaren souhaite également la bienvenue aux représentants de 19 des 42 États et entités économiques associés à la CGPM et donne lecture de la liste des Associés représentés, par ordre alphabétique : Azerbaïdjan, Belarus, Bosnie-Herzégovine, Équateur, Éthiopie, Géorgie, Ghana, Hong Kong (Chine), Koweït, Luxembourg, Macédoine du Nord, Ouzbékistan, Panama, Pérou, République de Moldova, Soudan, Taipei chinois, Tanzanie et Zimbabwe.

Il souhaite par ailleurs la bienvenue aux représentants des organisations intergouvernementales et organismes internationaux suivants :

- Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)
- Commission internationale de l'éclairage (CIE)
- International Electrotechnical Commission (IEC)
- International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)
- Organisation internationale de normalisation (ISO)
- International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)
- International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP)
- Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)
- Organisation internationale de métrologie légale (OIML)
- Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI)
- Union astronomique internationale (UAI)
- Union internationale des télécommunications (UIT)

8. Approbation de l'ordre du jour

Le président de la CGPM demande aux délégués s'ils ont des commentaires sur l'ordre du jour. En l'absence de commentaires, l'ordre du jour est adopté.

9. Rapport du président du CIPM sur les travaux accomplis depuis la 25e réunion de la CGPM (novembre 2014 à novembre 2018)

M. Inglis, président du CIPM, présente le rapport suivant.

« En vertu de la Convention du Mètre, j'ai le plaisir de vous présenter mon rapport sur les travaux accomplis depuis la 25e réunion de la CGPM qui s'est tenue en 2014. Des rapports sur les progrès effectués ont été présentés lors des réunions des représentants des États Membres et des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie qui ont été organisées au BIPM les 13 et 14 octobre 2015, les 24 et 25 octobre 2016 et les 18 et 19 octobre 2017. Mon intention n'est donc pas d'entrer dans les détails concernant les travaux accomplis mais de mettre en lumière les principales actions et réalisations. Des rapports plus détaillés vous seront présentés par le directeur du BIPM, les présidents des Comités consultatifs et les présidents de différents Sous-comités du CIPM.

États Membres et Associés

Je souhaite commencer mon rapport en souhaitant la bienvenue aux nouveaux États Membres et aux nouveaux Associés à la CGPM. Depuis la 25e réunion de la CGPM, cinq États ont accédé à la Convention du Mètre et six États sont devenus Associés à la CGPM ; un septième État est à nouveau devenu Associé après une brève absence. Le BIPM compte actuellement 60 États Parties à la Convention du Mètre et 42 Associés à la CGPM.

Nouvel État Membre (et date d'accession) :

- Émirats arabes unis (27 avril 2015)

États précédemment Associés qui sont devenus Membres (et date d'accession) :

- Lituanie (16 avril 2015)
- Slovénie (23 mars 2016)
- Monténégro (24 janvier 2018)
- Ukraine (7 août 2018)

Nouveaux Associés à la CGPM (et date d'association) :

- Azerbaïdjan (1er janvier 2015)
- Qatar (10 mars 2016)
- Sri Lanka (à nouveau Associé depuis le 17 août 2016)
- Éthiopie (1er janvier 2018)
- République-Unie de Tanzanie (1er janvier 2018)
- Koweït (23 mars 2018)

– Ouzbékistan (13 juillet 2018)

État Membre exclu (et date d'exclusion) :

– République dominicaine (1er janvier 2015)

État Associé exclu (et date d'exclusion) :

– Yémen (1er janvier 2018)

États Associés encouragés à accéder à la Convention du Mètre

Conformément à la Résolution 4 adoptée par la CGPM à sa 24e réunion (2011), dix Associés ont rempli les critères fixés : ils ont par conséquent été encouragés à accéder à la Convention du Mètre et ont vu leur souscription soumise à un mécanisme d'augmentation progressive. Il est rappelé qu'une fois qu'un Associé a été officiellement encouragé à devenir État Membre mais qu'il n'accède pas à la Convention du Mètre, sa souscription est augmentée tous les ans progressivement pendant une période de 5 ans jusqu'à atteindre un montant équivalent à 90 % de la contribution annuelle que cet État acquitterait s'il était État Membre. Dans l'ensemble, cette approche a bien fonctionné et un certain nombre d'accessions sont certainement à attribuer à ce mécanisme.

États Associés ayant un coefficient ONU inférieur ou égal à 0,02 %

En mettant en œuvre la pratique d'augmentation progressive des souscriptions des Associés afin de les encourager à accéder à la Convention du Mètre, le CIPM s'est inquiété du fait qu'un certain nombre d'États Associés aux plus faibles économies étaient susceptibles de renoncer au statut d'Associé ou d'être exclus. En outre, il a été considéré que les critères déclenchant ce mécanisme d'augmentation pouvaient décourager les États ayant les plus faibles quotes-parts dans le barème des Nations Unies à devenir Associés dans le futur. Ainsi, le CIPM a décidé en 2017 (Décision CIPM/106-20), lorsqu'il considère s'il est approprié pour un État Associé d'être encouragé à accéder à la Convention du Mètre et devenir État Membre, de prendre en considération les éléments suivants :

– être État Associé à la CGPM depuis au moins 5 ans,

– disposer d'un laboratoire national de métrologie ayant signé le CIPM MRA,

– avoir publié des résultats de comparaison dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés (KCDB),

– avoir enregistré au moins une aptitude en matière de mesures et d'étalonnages (CMC) dans la KCDB,

– avoir un pourcentage supérieur à 0,02 dans le « Barème des quotes-parts pour la répartition des dépenses des Nations Unies ».

Cette décision a amendé les critères précédemment adoptés par l'ajout du dernier point qui exempte effectivement les États les plus petits du mécanisme d'augmentation de la souscription. Le pourcentage de 0,02 % de l'ONU correspond à approximativement un cinquième du pourcentage des États Associés versant une souscription minimale et à un vingt-cinquième de celui des États Membres versant une contribution minimale.

En prenant cette décision, le CIPM était conscient que six Associés au coefficient inférieur à 0,02 % étaient déjà soumis au mécanisme d'augmentation de leur souscription, que trois autres étaient sur le point de voir leur souscription commencer à augmenter, et que des États Associés soumis au mécanisme avaient déjà des arriérés, un Associé ayant été exclu fin 2017. Le CIPM a par conséquent pris deux autres décisions (Décisions CIPM/106-21 et CIPM/106-22) afin de remédier à ces situations :

Décision CIPM/106-21 *Le CIPM décide qu'un État Associé à la CGPM qui ne remplit pas les critères fixés dans la Décision CIPM/106-20, qui a déjà été encouragé à accéder à la Convention du Mètre et qui par conséquent paye une souscription qui a été augmentée, verra sa souscription réduite au montant minimum fixé pour un État Associé. La réduction entrera en vigueur en 2018 et ne sera pas rétroactive.*

Décision CIPM/106-22 *Le CIPM demande au BIPM de travailler avec tout État Associé concerné par la Décision 106-21 et en situation d'arriérés afin de conclure un accord de rééchelonnement.*

Suite à la mise en œuvre de ces décisions, la situation actuelle concernant les États Associés encouragés à accéder à la Convention du Mètre et soumis à une augmentation de leur souscription est la suivante[1] :

États Associé	Date à laquelle les critères ont été remplis	Période d'augmentation de la souscription	
		Début	90 %
Belarus	2011	2013	2017
Costa Rica	2011	2013	2017
Cuba	2011	2013	2017
Équateur	2011	2013	2017
Lettonie	2011	2013	2017
Panama	2011	2013	2017
Viet Nam	2011	2013	2017
Estonie	mai 2014	2016	2020
Pérou	mai 2014	2016	2020
Philippines	décembre 2013	2016	2020

Effet des nouvelles accessions à la Convention du Mètre sur le calcul de la dotation

Lorsque la Convocation de la CGPM à sa 26e réunion a été publiée (en février 2018), quatre nouveaux États avaient accédé à la Convention du Mètre depuis la 25e réunion de la CGPM, ce qui augmente la dotation pour les années 2020 à 2023 d'un montant de 254 milliers d'euros par an.

Depuis la publication de la Convocation, un nouvel État a accédé à la Convention du Mètre (l'Ukraine en août 2018), ce qui entraîne une augmentation supplémentaire de la dotation. Toutefois, étant donné que cette augmentation est compensée approximativement par un ajustement à la baisse de la dotation en raison de l'exclusion prévue du Venezuela, il n'est pas proposé d'amender les chiffres présentés dans le Projet de résolution D suite à ces deux changements survenus après la publication de la Convocation.

Il est à noter que quatre des cinq nouveaux États Membres étaient précédemment Associés à la CGPM : ainsi, bien que la dotation soit augmentée d'environ 254 milliers d'euros par an, en termes de budget total, cela est compensé par une réduction d'environ 187 milliers d'euros par an du fait de la perte des souscriptions que ces États auraient versées s'ils étaient restés Associés.

Si l'on considère les revenus provenant des contributions des nouveaux États Membres et des souscriptions des nouveaux États Associés, en tenant compte de l'exclusion du Yémen en tant qu'Associé en janvier 2018 et de l'exclusion prévue du Venezuela, ainsi que de la nouvelle approche concernant les très petits États Associés, le BIPM a vu ses revenus baisser par rapport à ce qui était prévu et à ce qui a été présenté à la CGPM à sa 25e réunion en 2014.

[1] Conformément à la Résolution 4 adoptée par la CGPM à sa 24e réunion (2011), l'augmentation progressive et irréversible du montant de la souscription sera applicable au 1er janvier de la deuxième année suivant la décision du CIPM d'encourager l'Associé à adhérer à la Convention du Mètre.

Actions résultant des Résolutions adoptées par la CGPM à sa 25e réunion (2014)

Résolution 1 (2014) : Sur la révision à venir du Système international d'unités, le SI

Les conditions requises par la CGPM à sa 24e réunion (2011), confirmées à sa 25e réunion (2014), pour procéder à l'adoption d'une révision du SI sont désormais remplies.

Le CIPM (Décision CIPM/106-11) a autorisé le président du CIPM à transmettre au *Task Group for Fundamental Constants* de CODATA son accord concernant la publication des valeurs numériques finales des constantes définissant le SI révisé.

Un projet de résolution pour la 26e réunion de la CGPM concernant la redéfinition de quatre unités de base du SI a été préparé : il propose une révision du SI qui prendra effet à compter du 20 mai 2019.

Un projet de 9e édition de la *Brochure sur le SI* intitulée « Le Système international d'unités », ainsi qu'une mise à jour des mises en pratique, ont été approuvés par le CIPM à sa 106e session en octobre 2017. Ces documents ont été de nouveau examinés à sa 107e session en juin 2018 puis approuvés en octobre 2018. Ce sujet sera traité plus en détail dans le rapport du président du Comité consultatif des unités (CCU).

Promotion du SI

Le CIPM (Décision CIPM/104-10) a reconnu le besoin de lancer une campagne de sensibilisation concernant la révision du SI et a établi, par l'intermédiaire du CCU, un Groupe de travail sur la promotion du SI présidé par M. Ullrich, président du CCU. Ce groupe de travail comprend des experts en relations publiques des laboratoires nationaux de métrologie suivants : KRISS, LNE, NIST, NMIJ, NPL et PTB. La participation à ce groupe de travail a été limitée à certains laboratoires nationaux de métrologie et Comités consultatifs mais l'ILAC, l'ISO, l'OIML, l'IEC et la CIE y ont également été accueillis en tant qu'observateurs. Depuis, cinq autres laboratoires nationaux (CENAM, INMETRO, NIM, NMISA, VNIIM) ont rejoint le groupe de travail.

Les Comités consultatifs (Décision CIPM/105-25) ont élaboré une déclaration commune, destinée à toutes les parties prenantes, concernant les changements que devrait générer la révision du SI.

Résolution 2 (2014) : Sur l'élection du Comité international des poids et mesures

Élection du CIPM

Conformément à la Résolution 2 adoptée par la CGPM à sa 25e réunion (2014), l'ensemble des sièges du CIPM ont été déclarés vacants lors de la 25e réunion de la CGPM et une élection a été organisée afin de pourvoir les 18 sièges. Les membres élus se sont par conséquent réunis après la réunion de la CGPM et ont élu le bureau du CIPM (président, secrétaire et deux vice-présidents). Depuis, trois membres du CIPM ont démissionné de leurs fonctions et trois nouveaux membres ont été nommés de façon provisoire en décembre 2016 :

- H. Laiz (Argentine)
- M.L. Rastello (Italie)
- M. Sené (Royaume-Uni)

Les membres actuels du CIPM sont les suivants :

	Élection initiale	Dernière élection
Président		
B. Inglis (Australie)	7 août 2000	2014
Secrétaire		
J. McLaren (Canada)	6 mars 2006	2014
Vice-présidents		
W.E. May (États-Unis d'Amérique)	9 juin 2008	2014
J. Ullrich (Allemagne)	15 mai 2013	2014
Autres membres du CIPM		
F. Bulygin (Fédération de Russie)		2014
M. Buzoianu (Roumanie)		2014
I. Castelazo (Mexique)		2014
Y. Duan (République populaire de Chine)	8 mars 2010	2014
L. Érard (France)	13 septembre 2004	2014
D.-I. Kang (République de Corée)	12 décembre 2013	2014
H. Laiz (Argentine)		7 décembre 2016
T. Liew (Singapour)		2014
W. Louw (Afrique du Sud)	15 mai 2013	2014
M.L. Rastello (Italie)		7 décembre 2016
P. Richard (Suisse)		2014
G. Rietveld (Pays-Bas)		2014
M. Sené (Royaume-Uni)		7 décembre 2016
T. Usuda (Japon)	1er juillet 2012	2014

En reconnaissance de la contribution exceptionnelle qu'il a apportée aux activités du CIPM pendant de nombreuses années, le CIPM a nommé R. Kaarls membre honoraire du CIPM (Décision CIPM/104-12, mars 2015).

Sous-comités et Groupes de travail ad hoc du CIPM

Conformément à la volonté du CIPM d'optimiser son efficacité et de tirer parti des connaissances spécialisées de ses membres, le CIPM (Décision CIPM/104-21) a attribué des responsabilités à l'ensemble des membres du CIPM au sein de Sous-comités et Groupes de travail *ad hoc* du CIPM.

Sous-comité du CIPM sur la stratégie
Président : M.J.T. Milton
Membres : B.D. Inglis, T. Liew, W.E. May, J.W. McLaren, M.L. Rastello, G. Rietveld, J. Ullrich

Sous-comité du CIPM sur les finances
Président : M. Sené
Membres : Y. Duan, W. Louw, J.W. McLaren, M.J.T. Milton [directeur du BIPM], P. Richard

Commission consultative sur la Caisse de retraite
Président : L. Érard
Membres : T. Usuda [membre du CIPM], T. Grenon [expert], M.J.T. Milton [directeur du BIPM], C. Michotte [représentant du personnel], G. Petit [représentant du personnel], S. Solve [représentant du personnel], T. Witt [représentant des pensionnés], F. Rojas Ceballos [personnel de soutien du BIPM], C. Fellag Ariouet [personnel de soutien du BIPM]

Groupe de travail *ad hoc* du CIPM sur les conditions d'emploi
Président : J.W. McLaren
Membres : M. Buzoianu, I. Castelazo, L. Érard, M.J.T. Milton [directeur du BIPM], R.I. Wielgosz [représentant du personnel], secrétaire exécutif : F. Rojas Ceballos [conseiller juridique du BIPM]

Groupe de travail *ad hoc* sur la reproductibilité des données de recherche et autres questions connexes
Président : T. Liew
Membres : F. Bulygin, I. Castelazo, H. Laiz, M.L. Rastello, M. Sené, M.J.T. Milton [directeur du BIPM]

Sous-comité du CIPM sur l'attribution de distinctions
Président : F. Bulygin
Membres : T. Liew, D.-I. Kang

Groupe de travail du CIPM sur la promotion du SI
Président : J. Ullrich
Secrétaire : E. de Mirandés (secrétaire exécutive du CCU)
Membres : BIPM, CENAM, INMETRO, KRISS, LNE, NIM, NIST, NMIJ/AIST, NMISA, NPL, PTB, VNIIM, CCEM, CCM, CCQM, CCT, CCU
Observateurs : ILAC, ISO, OIML, IEC, CIE
Groupe d'experts en relations publiques :
F. Auty (NPL) [rapporteur], V. Morazzani (LNE), G. Porter (NIST), J. Simon (PTB)

Le CIPM a nommé, ou reconduit, les présidents des Comités consultatifs pour un mandat de quatre ans. Les présidents actuels sont les suivants :

- Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV) : T. Usuda
- Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM) : G. Rietveld
- Comité consultatif des longueurs (CCL) : I. Castelazo
- Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM) : P. Richard
- Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) : M.L. Rastello
- Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie (CCQM) : W.E. May
- Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI) : W. Louw
- Comité consultatif de thermométrie (CCT) : Y. Duan
- Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) : L. Érard
- Comité consultatif des unités (CCU) : J. Ullrich

Amendement au document « Critères et procédure pour l'élection du CIPM »

Sur la base de l'expérience acquise lors de première élection du CIPM qui a été organisée selon la nouvelle procédure, le CIPM a approuvé des amendements mineurs au document « Critères et procédure pour l'élection du CIPM » (septembre 2014) et a demandé à M. May, président de l'ancien Groupe de travail *ad hoc* sur les règles et les principes relatifs à la composition du CIPM, d'apporter des clarifications concernant le paragraphe intitulé « Étape 5 : Prise de fonctions du CIPM nouvellement élu ». Le document ainsi révisé est publié sur la page suivante du site internet du BIPM.

Annonce de décès

C'est avec une profonde tristesse que je vous fais part du décès en 2018 de deux précédents présidents du CIPM : Dieter Kind et Jean Kovalevsky. Ces anciens collègues ont dirigé de façon remarquable le CIPM et le BIPM et leur décès est une grande perte. Leurs nombreuses contributions à la métrologie internationale resteront longtemps dans nos mémoires.

Résolution 3 (2014) : Sur la Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM

Une Commission consultative du CIPM sur la Caisse de retraite a été mise en place le 16 octobre 2015 afin de remplacer le précédent Sous-comité du CIPM sur la Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM et l'assurance maladie. La Commission consultative ainsi créée comprend des représentants du personnel, un représentant des pensionnés, ainsi qu'un expert externe. La Commission consultative a pour objectif d'améliorer la gouvernance, la transparence et l'efficacité de la Caisse de retraite.

Suite aux recommandations de la Commission consultative et du CIPM, le BIPM a mis en œuvre des mesures visant à assurer la soutenabilité de la Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM. De nouveaux taux de cotisation et de nouvelles prestations sont entrés en vigueur au 1er janvier 2017.

Plus d'informations concernant les mesures prises afin de stabiliser la Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM et d'assurer sa soutenabilité à long terme seront données dans le rapport présenté par le président de la Commission consultative sur la Caisse de retraite, L. Érard.

Résolution 4 (2014) : Dotation du BIPM pour les années 2016 à 2019

Le CIPM a supervisé le budget et la performance financière du BIPM et les états financiers du BIPM ont été certifiés sans réserve par l'auditeur de 2015 à 2018. Le budget du BIPM a été respecté et des mesures importantes ont été prises afin de faire face aux défis financiers à venir, associés en particulier à la Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM. Cela traduit, de manière non négligeable, la compétence et le travail soutenu du directeur du BIPM et de son personnel. Plus d'informations à ce sujet seront données par le directeur du BIPM et par le président du Sous-comité du CIPM sur les finances, M. Sené.

Résolution 5 (2014) : Sur l'importance de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM

En réponse à la Résolution 5 adoptée par la CGPM à sa 25e réunion (2014), un atelier sur l'examen du CIPM MRA, auquel participaient des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie, des représentants des États Membres, des représentants des organisations régionales de métrologie, ainsi que d'autres parties prenantes concernées, s'est tenu les 13 et 14 octobre 2015. L'atelier a mis en évidence un certain nombre de sujets considérés comme critiques et a permis d'établir un Groupe de travail sur la mise en œuvre et le fonctionnement du CIPM MRA (composé de 19 membres et 3 invités) présidé par le président du CIPM. Suite à des discussions préliminaires, le Groupe de travail s'est réuni officiellement au BIPM les 14 et 15 mars 2016. Un rapport a été préparé et envoyé pour commentaire aux directeurs des laboratoires nationaux de métrologie le 2 juin 2016. Le rapport final, qui contenait 28 recommandations et sous-recommandations, a été présenté et approuvé lors d'une réunion des représentants des États Membres et des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie en octobre 2016. Afin d'assurer la mise en œuvre efficace des recommandations, le CIPM a proposé que soit créé un Groupe de travail *ad hoc* sur la mise en œuvre des recommandations établies lors de l'examen du CIPM MRA, présidé par le président du CIPM. Les représentants des États Membres et directeurs des laboratoires nationaux de métrologie ont soutenu cette proposition.

Le Groupe de travail *ad hoc* a identifié des actions spécifiques pour le BIPM, les Comités consultatifs, le Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM (JCRB), les organisations régionales de métrologie et les laboratoires nationaux de métrologie : ces actions ont été présentées lors de la réunion du JCRB et de celle des présidents des Comités consultatifs qui se sont tenues en mars et en juin 2017 respectivement. Le Groupe de travail *ad hoc* a également rendu compte des progrès effectués lors d'une réunion des représentants des États Membres et des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie en octobre 2017. L'avancée de la mise en œuvre des recommandations a été suivie et a fait l'objet d'un rapport lors de la réunion du JCRB et de celle des présidents des Comités consultatifs et des organisations régionales de métrologie qui se sont tenues en mars et en juin 2018 respectivement. Les progrès ont été tels qu'en juin 2018, le CIPM a pris la décision de mettre fin au Groupe de travail *ad hoc* considérant que ce dernier avait atteint ses objectifs.

Situation actuelle concernant le CIPM MRA et les organisations régionales de métrologie

Le CIPM MRA est hautement apprécié par les États Membres et demeure une responsabilité majeure du BIPM. Actuellement, 260 laboratoires participent au CIPM MRA : ils comprennent 100 laboratoires nationaux de métrologie et 156 laboratoires désignés, venant de 59 États Membres et 41 Associés, ainsi que quatre organisations internationales : l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), l'Agence spatiale européenne (ESA), le Centre commun de recherche (JRC) de la Commission européenne et l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

La maintenance de la base de données sur les comparaisons clés (KCDB) constitue une charge de travail constante pour le BIPM, avec un total de 260 laboratoires participant au CIPM MRA et plus de 25 000 aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs) et 1 600 comparaisons enregistrées dans la KCDB.

Base de données sur les comparaisons clés (KCDB) 2.0

À la suite de l'examen du CIPM MRA, l'une des actions clés incombant au personnel du BIPM a été de mettre à niveau la KCDB afin d'accroître l'efficacité et l'efficience de la gestion et du transfert des données enregistrées. C'est probablement l'action la plus importante découlant de l'examen du CIPM MRA et cette tâche n'est pas aisée car elle requiert de développer une base de données totalement nouvelle (appelée KCDB 2.0). Le BIPM a fait appel à des prestataires et des progrès significatifs ont été accomplis concernant le développement de cette nouvelle base de données. Parmi les nouvelles fonctionnalités figureront les éléments suivants :

- les projets de déclaration de CMCs des laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés seront directement enregistrés sur la plateforme dédiée et seront communiqués pour examen au président du comité technique pertinent de l'organisation régionale de métrologie concernée,
- l'examen intrarégional des CMCs sera intégré à la plateforme,
- le processus d'examen et celui de publication seront combinés,
- l'expérience utilisateur sera améliorée,
- il n'y aura pas de transfert manuel de données lors de l'examen ou de la publication.

La nouvelle base de données devrait être terminée et complètement opérationnelle à la fin de 2019.

GULFMET

La nouvelle organisation régionale de métrologie, GULFMET (*Gulf Association for Metrology*), progresse de façon satisfaisante suite à la décision prise par le CIPM à sa 104e session (Décision CIPM/104-38) de l'approuver de façon provisoire comme organisation régionale de métrologie selon les termes du CIPM MRA. Le principal défi de GULMET demeure les capacités limitées de la région.

Communication entre le JCRB, les organisations régionales de métrologie, les Comités consultatifs et le CIPM

L'un des points mis en évidence par l'examen du CIPM MRA a été le besoin d'améliorer la communication entre le JCRB, les organisations régionales de métrologie, les Comités consultatifs et le CIPM. À cette fin, le CIPM :

- a confié à un membre du CIPM la tâche d'assurer la liaison entre le JCRB et le CIPM et d'assister à toutes les réunions du JCRB,
- s'est engagé à organiser des réunions annuelles régulières des présidents des organisations régionales de métrologie et du bureau du CIPM. La quatrième réunion de ce type s'est tenue au BIPM les 18 et 22 juin 2018,
- a invité les délégués des organisations régionales de métrologie à assister à une réunion des présidents des Comités consultatifs le 19 juin 2018.

Des rapports complémentaires sur le CIPM MRA, son importance et son fonctionnement seront présentés par G. Rietveld et H. Laiz à un point ultérieur de l'ordre du jour.

Le CIPM et ses Comités consultatifs

Objectifs et stratégies des Comités consultatifs

L'examen du CIPM MRA a mis à jour des différences de fonctionnement et de stratégie entre les Comités consultatifs. Certaines différences se justifient par des raisons évidentes et valables alors que d'autres mériteraient d'être uniformisées et mises en commun. Afin de remédier à cela, le CIPM a décidé de réviser le texte du document CIPM-D-01 « *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops* » (Décision CIPM/106-16) en ajoutant le paragraphe suivant :

> Dans le but d'être informés des développements techniques et de l'évolution des besoins des parties prenantes dans les différents domaines de la métrologie, le CIPM dispose de Comités consultatifs dont les champs de compétence ont été convenus et dont les trois objectifs sont les suivants :
>
> – faire progresser l'état de l'art en offrant aux laboratoires nationaux de métrologie un forum mondial afin d'échanger des informations sur l'état de l'art et les meilleures pratiques,
>
> – définir de nouvelles possibilités afin que la métrologie ait un impact sur les défis mondiaux liés aux mesures, en facilitant le dialogue entre les laboratoires nationaux de métrologie et les parties prenantes nouvelles ou existantes,
>
> – démontrer et améliorer la comparabilité mondiale des mesures, en particulier en travaillant avec les organisations régionales de métrologie dans le cadre du CIPM MRA afin :
>
> o de planifier, conduire et superviser les comparaisons clés, et
>
> o de soutenir le processus d'examen des CMCs.

Le document CIPM-D-01 a été mis à jour en conséquence et publié en juillet 2018. Les stratégies des Comités consultatifs seront restructurées au fil du temps afin de refléter les objectifs nouvellement fixés. Ces derniers apparaissent déjà dans certains rapports et posters présentés lors de cette réunion de la CGPM.

Réunion des présidents des Comités consultatifs

Le CIPM a conscience que de nombreux défis métrologiques requièrent désormais une solution multidisciplinaire. Dans cette optique et en vue d'harmoniser l'approche stratégique des Comités consultatifs, le CIPM a commencé à organiser des réunions annuelles des présidents des Comités consultatifs, accompagnés de leur secrétaire exécutif, afin de discuter d'une approche collégiale, en particulier en ce qui concerne la mise en œuvre du CIPM MRA. La quatrième réunion des présidents des Comités consultatifs s'est tenue au BIPM les 19 et 20 juin 2018. Par ailleurs, suite à une recommandation du JCRB, le CIPM (Décision CIPM/106-27) a invité les représentants des organisations régionales de métrologie à assister au premier jour de la réunion des présidents des Comités consultatifs afin que les Comités consultatifs et les organisations régionales de métrologie puissent discuter et acquérir une compréhension commune de leurs responsabilités, ainsi que des questions techniques et des questions relatives aux systèmes qualité. Le CIPM examinera l'efficacité et les avantages d'une telle réunion et pourrait décider d'inviter de façon permanente les représentants des organisations régionales de métrologie à la réunion annuelle des présidents des Comités consultatifs.

Amendements concernant les règles pour être membre ou observateur de Comités consultatifs

Afin que les Comités consultatifs répondent au besoin de rester pertinents face à un nombre toujours croissant et de plus en plus varié d'États Membres, le CIPM (Décision CIPM/105-26) a révisé les règles pour devenir membre des Comités consultatifs de la façon suivante : chacun des États Membres a le droit d'avoir un laboratoire national chargé d'établir les étalons nationaux dans un domaine particulier qui participe en tant qu'observateur à une réunion du Comité consultatif concerné, en désignant un représentant (et seulement un), après en avoir fait officiellement la demande. Le Document CIPM-D-01 a été mis à jour en conséquence.

Autres participants lors des réunions des Comités consultatifs

Afin d'assurer une plus grande cohérence entre les Comités consultatifs et de s'aligner sur la pratique internationale, le CIPM (Décision CIPM/105-27) a décidé ce qui suit pour toutes les réunions des Comités consultatifs à compter de 2017 :

- il sera fait référence aux organisations internationales en tant qu'« organismes de liaison » et elles ne pourront plus bénéficier du statut de « membre » ;
- les personnes nominativement désignées devront avoir le statut d'« invité » ou « expert » et ne pourront en aucun cas être membres des Comités consultatifs.

Rappelant que le processus de prise de décision au sein des Comités consultatifs est fondé sur le consensus, le CIPM souligne que ce changement de nomenclature ne vise en aucun cas à amoindrir la reconnaissance vis-à-vis des « organismes de liaison », « invités » et « experts », ni à mettre en doute la précieuse contribution qu'ils apportent aux Comités consultatifs.

Relations internationales

Organisation internationale de métrologie légale (OIML)

Le personnel du BIPM travaille de façon encore plus étroite et efficace avec le personnel du Bureau international de métrologie légale (BIML) de l'OIML. La communauté de la métrologie légale a apporté une importante contribution à la révision du SI car l'incertitude devant être obtenue par notre communauté scientifique pour redéfinir le kilogramme était en grande partie liée aux besoins formulés par la communauté de la métrologie légale. Le personnel du BIPM fera à nouveau partie de l'équipe de rédaction qui travaillera à la révision de l'un des principaux documents de l'OIML, le document D 1 « Éléments pour une Loi de Métrologie ». Le personnel du BIPM et le BIML sont conjointement responsables de l'organisation de l'événement de promotion que constitue la Journée mondiale de la métrologie. Les deux organisations travaillent ensemble afin de transmettre une vision cohérente de la métrologie au niveau mondial et collaborent de manière extensive afin d'identifier les potentiels nouveaux États Membres et Associés et définir leurs besoins ; elles coopèrent aussi sur un grand nombre de questions administratives, telles que l'engagement de détachés, les services informatiques et la politique sur divers sujets.

Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM)

Le CIPM continue à être représenté au JCGM : Mme Buzoianu le représente actuellement au Groupe de travail 2 sur le VIM.

Réseau DCMAS (INetQI)

Le personnel du BIPM participe activement à ce réseau qui permet à dix organisations intergouvernementales et organismes internationaux d'échanger afin de promouvoir un système efficace de métrologie, d'accréditation et de normalisation dans les pays en développement. Le réseau a accompli des progrès majeurs ces dernières années. Le fait que les membres du réseau, ainsi que la Banque mondiale, aient approuvé une définition commune du terme « infrastructure de la qualité » représente une avancée importante. Par ailleurs, le réseau a estimé que disposer d'une infrastructure de la qualité satisfaisante était important pour tous les États et Entités économiques et pas seulement pour les pays en développement. Par conséquent, le réseau est en train de changer de nom pour devenir l'*International Network on Quality Infrastructure* (INetQI) et devrait amender ses termes de référence en temps utile. Plus d'informations seront données au sujet de l'importance de l'infrastructure de la qualité par le directeur du BIPM et par un certain nombre d'orateurs.

Renforcement des capacités et transfert des connaissances (CBKT)

Suite à la Résolution 4 adoptée par la CGPM à sa 25e réunion (2014) et aux discussions qui s'en sont suivies, le BIPM a lancé un programme de renforcement des capacités et de transfert des connaissances (CBKT) fondé sur le partenariat. L'objectif est d'accroître l'efficacité avec laquelle les États Membres et les Associés participent au système métrologique mondial. L'accent est ainsi mis sur le transfert d'expérience et de technologies aux pays qui ne disposent pas d'une infrastructure métrologique bien développée.

Au cours des 4 années passées, le programme CBKT a connu une croissance rapide et un indéniable succès. Douze projets ont été réalisés, quatre sont en cours et quatre sont programmés. Jusqu'à présent, 308 personnes venant de 83 pays couvrant les six organisations régionales de métrologie ont participé à diverses formations, dont 20 détachements au BIPM, et 13 détachements destinés à de jeunes scientifiques au sein de laboratoires nationaux de métrologie partenaires. Cinquante-six conférenciers invités venant de 27 pays ont partagé leur expérience. Huit laboratoires nationaux de métrologie et cinq organisations régionales de métrologie ont apporté des contributions volontaires sous diverses formes. Nous sommes particulièrement heureux de constater que les objectifs fixés pour ce programme CBKT ont été remplis. Un exemple, parmi de nombreux autres, est que l'Azerbaïdjan, la Namibie, la Zambie et le Zimbabwe ont publié leurs premières CMCs suite à leur participation à une formation du programme CBKT.

Le CIPM remercie tous les partenaires pour leur générosité et leur engagement. Pour le prochain programme de travail pour les années 2020 à 2023, le CIPM continue à encourager les États Membres, ainsi que les organisations internationales, les organismes privés et les fondations de continuer à apporter un soutien volontaire supplémentaire de toute sorte afin de soutenir des activités spécifiques liées à la mission du BIPM.

Perspectives pour le futur

En tant que président sortant du CIPM, je souhaiterais faire quelques commentaires généraux qui sont des pistes de réflexion et d'analyse :

- Le BIPM est une organisation unique qui offre des possibilités et des avantages uniques à ses États Membres.
- Le fait de maintenir les activités du BIPM à frais partagés apporte à chaque État un retour sur investissement élevé par rapport au coût d'investissement relativement faible.

– Au cours des années à venir, le CIPM et le personnel du BIPM seront confrontés à des défis majeurs pour maintenir le niveau d'activités attendu par la CGPM tout en faisant face à une augmentation des dépenses salariales et à des niveaux de dotation qui ne compensent pas ne serait-ce que l'inflation : cela n'est pas viable à long terme. Le CIPM et le personnel du BIPM ont été très actifs ces dernières années afin d'aider les États souhaitant participer aux activités du BIPM, en tant qu'États Membres ou Associés, à s'engager de façon efficace. Il faut rappeler que parmi les cinq nouveaux États Membres, quatre étaient précédemment Associés, ce qui signifie que leur accession apporte peu de ressources financières supplémentaires. De la même façon, la vaste majorité des potentiels nouveaux Associés ont de très faibles économies et leur participation aura un impact minimum sur les revenus du BIPM.

– Dans un monde où les demandes dans le domaine de la métrologie ne cessent d'évoluer, le BIPM sera confronté à des défis majeurs dans le futur. Le BIPM s'est toujours adapté à l'évolution des besoins et des demandes dans le domaine de la métrologie et je suis certain qu'il continuera à le faire. Toutefois, il est important que les États Membres reconnaissent le défi que cela constitue, qu'ils jouent un rôle actif et qu'ils considèrent les avantages, le retour sur investissement et le niveau nécessaire de dotation afin que le BIPM puisse fonctionner efficacement.

Conclusion

Les quatre années depuis la 25e réunion de la CGPM ont été très actives pour le CIPM et le personnel du BIPM avec l'examen du CIPM MRA, la restructuration de la Caisse de retraite, une coopération proactive avec les nouveaux États Membres et Associés, les activités en matière de relations internationales, la préparation de la révision proposée du SI, le programme CBKT couronné de succès, l'accomplissement du programme de travail et une gestion financière efficace. Le BIPM a certes été confronté à des défis de taille mais ces quatre années ont été les plus productives à tous points de vue et ont été couronnées de succès. Le mérite en revient pour une grande part à Martin Milton, directeur du BIPM, pour son leadership exceptionnel, et à son équipe de direction. Je remercie M. Milton, l'équipe de direction et l'ensemble du personnel du BIPM, qui travaille de façon soutenue, pour leurs efforts assidus, leur dévouement et leur engagement. Je n'ai jamais cessé d'être surpris par ce qui pouvait être réalisé au BIPM avec un personnel relativement peu nombreux mais dévoué.

Je saisis cette occasion pour remercier en particulier mes collègues du CIPM pour leur soutien, leur engagement permanent et leur travail intense au cours de ces quatre années et je tiens à remercier tous les membres externes des Comités consultatifs, groupes de travail et sous-comités sans lesquels nous ne pourrions fonctionner.

Enfin, lors de cette réunion de la CGPM, nous prévoyons d'assister à une étape historique de la métrologie avec la redéfinition de quatre des unités de base du SI à partir de constantes fondamentales. Cette révision du SI est l'aboutissement des nombreuses années de recherche que des scientifiques ont consacrées à ce sujet, dans de nombreux laboratoires à travers le monde, et c'est par conséquent le fruit de l'implication de nombreux individus. Je souhaite remercier tous ceux qui ont contribué à cette révision historique et les féliciter pour cette magnifique réussite ! »

Le président de la CGPM remercie M. Inglis. Il donne la parole à M. McLaren, secrétaire de la CGPM, pour un certain nombre d'annonces. M. McLaren suggère de modifier la façon de procéder concernant le vote des projets de résolution au cours de la réunion. Il est proposé de voter immédiatement après la discussion sur le projet de résolution en question, à l'exception du Projet de résolution D « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2020 à

2023 ». Ainsi, les votes se tiendraient : mardi pour le Projet de résolution B, mercredi pour les Projets de résolution C et E, et vendredi pour les Projets de résolution A (matin) et D (après-midi). Les votes auront lieu à main levée, à l'exception des Projets de résolution A et D qui se feront par appel nominal des États Membres.

L'élection du CIPM et celle de la Commission pour l'élection du CIPM (CEC) seront organisées l'après-midi du vendredi 16 novembre. Les candidatures pour siéger à la CEC resteront ouvertes jusqu'à la fin de la séance du mercredi 14 novembre et devront être transmises à M. Robert Gunn (Royaume-Uni), président de la Commission pour l'élection du CIPM.

10. Compte rendu du directeur du BIPM sur les principales réalisations du BIPM

M. Milton commence son compte rendu en précisant qu'après le rapport du président du CIPM, il souhaite présenter le travail effectué par le personnel du BIPM. Le BIPM compte 72 membres du personnel, parmi lesquels 25 titulaires d'un doctorat. Au cours de ces quatre dernières années, l'une des grandes initiatives a été d'accroître l'implication de détachés venant de laboratoires nationaux de métrologie, avec une moyenne de 13 équivalents temps plein travaillant avec le personnel du BIPM au sein des laboratoires du BIPM. Le personnel du BIPM soutient le travail des dix Comités consultatifs, en assurant le secrétariat exécutif de chacun, ainsi que 67 Groupes de travail.

Le BIPM fournit trois bases de données d'importance pour la métrologie mondiale : la base de données du BIPM sur les comparaisons clés (KCDB), qui contient 23 000 aptitudes de mesure reconnues ; la base de données du Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire (JCTLM), qui est très importante dans le domaine de la médecine de laboratoire ; et le registre international de ressources métrologiques (International Metrology Resource Registry - IMRR), une nouvelle initiative qui a été soutenue par le CIPM et développée au cours de ces quatre dernières années avec certains laboratoires nationaux de métrologie et qui sera une nouvelle ressource importante pour les laboratoires nationaux de métrologie.

Au cours des quatre années passées, le BIPM a accueilli en moyenne 2 300 participants chaque année lors de ses réunions. Au cours de la même période, on compte 526 participations de laboratoires nationaux de métrologie et de laboratoires désignés aux comparaisons et étalonnages du BIPM. L'importance du programme de renforcement des capacités et de transfert des connaissances (CBKT) pour le BIPM n'a cessé de croître, avec 16 nouveaux projets lancés dans ce domaine, tous étant financés par des laboratoires nationaux de métrologie partenaires. Douze de ces projets sont terminés et quatre en cours.

Le programme CBKT constitue l'une des réalisations majeures du BIPM depuis 2014. Le BIPM a été encouragé à commencer à travailler sur ce programme par la CGPM à sa 25e réunion (2014) en partant du principe que le programme serait soutenu financièrement par des partenaires. Le BIPM est reconnaissant envers les partenaires qui ont offert à la fois des ressources et des idées inspirantes pour les projets de renforcement des capacités. Les partenaires ont également contribué à identifier les communautés d'utilisateurs qui pourraient tirer parti de ce programme.

Les activités fondamentales de renforcement des capacités soutiennent le fonctionnement efficace du CIPM MRA et sont reconnues comme importantes et utiles pour l'ensemble des États Membres. Plus de 75 % des États Membres et Associés ont été impliqués dans des activités de renforcement des capacités depuis 2014, ce qui représente 308 personnes de 83 pays. Au total, 56 intervenants invités venant de 27 pays y ont participé. M. Milton remercie ces pays pour leur précieux soutien.

Huit laboratoires nationaux de métrologie ont apporté leur aide et des activités ont été organisées en collaboration avec les six organisations régionales de métrologie.

Le succès du programme CBKT peut être démontré par un certain nombre de résultats mesurables. L'un des objectifs du programme était d'équilibrer la charge de travail entre les laboratoires nationaux de métrologie en augmentant le nombre d'individus capables d'assumer des rôles de premier plan concernant les activités du CIPM MRA. Jusqu'à présent, 14 nouveaux présidents de comités techniques et groupes de travail d'organisations régionales de métrologie et 12 existants ont bénéficié du programme. L'objectif visant à accélérer l'intégration de nouveaux Associés en permettant à leur laboratoire national de réussir « dès la première fois » à publier des CMCs a été un succès. Cinq États qui étaient devenus Associés après 2010 ont ainsi réussi « dès la première fois » à publier des CMCs dans la KCDB, réduisant ainsi au minimum les délais ; cela constitue un résultat direct de leur implication au programme CBKT. L'objectif d'augmenter l'efficacité du CIPM MRA, qui a découlé de l'examen du CIPM MRA et qui est un but des activités de renforcement des capacités, a été atteint. Des données sur les délais concernant l'examen des CMCs montrent une augmentation de 10 % de la performance de l'examen des CMCs depuis le lancement du programme CBKT.

Outre les activités CBKT ayant pour objectif de soutenir le fonctionnement efficace du CIPM MRA, le BIPM mène des activités de renforcement des capacités dans ses laboratoires. Deux projets d'importance ont été lancés dans ce domaine depuis 2014. Le projet « Metrology for Safe Food and Feed » (Métrologie et sécurité des denrées alimentaires et des aliments pour animaux) permet aux laboratoires nationaux de métrologie de produire des calibrateurs et matrices de référence pour les mycotoxines, ainsi que des matériaux utilisés pour les essais d'aptitude, afin de soutenir les laboratoires d'essais de leur pays. Le projet « Metrology for Clean Air » (Métrologie pour l'air pur) permet aux laboratoires nationaux de métrologie de renforcer leurs aptitudes en matière d'étalonnages de gaz et de développer davantage leur infrastructure nationale afin de soutenir leur communauté de mesure de la qualité de l'air et des émissions de gaz. Le BIPM dispose d'un mécanisme spécifique pour suivre le succès de ses activités de renforcement des capacités en laboratoire. Après avoir pris part à ces projets, les participants retournent dans leur laboratoire d'origine afin de mettre en application les compétences et aptitudes acquises, puis ils effectuent une comparaison afin de démontrer leurs nouvelles aptitudes. Le directeur remercie les cinq laboratoires nationaux de métrologie qui ont soutenu les activités de renforcement des capacités en laboratoire : il s'agit du NIM (Chine), du NPL (Royaume-Uni), de la PTB (Allemagne), de TÜBİTAK UME (Turquie) et du NMISA (Afrique du Sud).

M. Milton poursuit en soulignant quelques principales réalisations du programme de laboratoire du BIPM. Parmi ces dernières figurent les progrès significatifs effectués au cours de ces quatre dernières années avec la balance de Kibble. En 2018, la balance de Kibble a commencé à fonctionner dans le vide de façon fiable, ce qui permet de réaliser des mesures avec une incertitude-cible de quelques 10^{-7}. Il est espéré que cette incertitude soit réduite à un niveau permettant de disséminer le kilogramme à l'aide de la balance de Kibble du BIPM au cours du prochain programme de travail (2020-2023). Dans les laboratoires de la chimie, les premières comparaisons de matériaux primaires de référence peptidiques ont été effectuées et contribuent à l'harmonisation mondiale des mesures du peptide C et au traitement du diabète. Au sein du Département des rayonnements ionisants, les premières comparaisons de mesure d'activité d'étalons du ^{11}C et du ^{64}Cu pour l'imagerie médicale ont commencé. En outre, un nouveau service de comparaison pour les États Membres dans le domaine de la dosimétrie a été établi en concluant un accord de collaboration afin d'utiliser l'accélérateur linéaire DOSEO à Saclay, à proximité du site du BIPM. Le Département du temps continue à améliorer la stabilité et l'exactitude du Temps universel coordonné (UTC) en intégrant à son calcul les données de récepteurs SDR (Software-Defined Radio), ce qui a permis de réduire les fluctuations diurnes à moins d'une nanoseconde.

Le directeur indique que M. Sené, président du Sous-comité du CIPM sur les finances, rendra compte plus en détail des finances et du fonctionnement du BIPM à un point ultérieur de l'ordre du jour. Il mentionne cependant en amont quelques données et faits majeurs. Les dépenses de fonctionnement du BIPM ont été rigoureusement contrôlées et sont inférieures au niveau de dépenses de 2013. Les dépenses liées aux détachements ont augmenté en raison de la volonté stratégique d'accroître la participation du personnel des laboratoires nationaux de métrologie au travail du BIPM. Ainsi, une partie du budget pour les dépenses de personnel a été utilisée pour soutenir du personnel ne faisant pas partie du BIPM. Le BIPM s'est adapté à une baisse des revenus faisant suite à une décision ayant pour effet de réduire la souscription de certains Associés, comme mentionné par le président du CIPM. Concernant le fonctionnement du BIPM, la rénovation du bâtiment de l'Observatoire, le plus ancien des laboratoires du BIPM, a été réalisée et de nouveaux équipements ont été installés afin d'accroître la capacité du BIPM à organiser des réunions.

Depuis la 25e réunion de la CGPM (2014), le BIPM a organisé un certain nombre d'ateliers dans le cadre du mandat qui lui a été confié en matière de transfert des connaissances. Tous les ateliers ont accueilli le nombre maximum de participants, le BIPM pouvant recevoir 120 participants. Un atelier commun au BIPM et à l'Organisation météorologique mondiale (OMM) intitulé « Global to urban scale carbon measurement » s'est tenu à l'OMM les 30 juin et 1er juillet 2015 et un atelier commun au BIPM et à l'Agence mondiale anti-dopage (AMA) intitulé « BIPM-WADA Symposium on Standards and Metrology in support of Anti-Doping Analysis » a eu lieu à l'AMA les 28 et 29 septembre 2016. Par ailleurs, le VIe symposium international sur les algorithmes pour les échelles de temps a été organisé du 9 au 11 septembre 2015 et un atelier intitulé « The Quantum Revolution in Metrology » s'est tenu au BIPM les 28 et 29 septembre 2017. En plus des ateliers sur site, plus de 400 participants ont assisté à l'atelier intitulé « Protein and Peptide Therapeutics and Diagnostics: Research and Quality Assurance (PPTD-2016) » organisé conjointement par le NIM (Chine) et le BIPM à Chengdu (Chine) du 1er au 3 juin 2016.

Le BIPM a renforcé ses liens avec un certain nombre d'organisations situées en France au cours des quatre années passées. Dans le cadre d'un accord commun, le Centre international d'études pédagogiques (CIEP), établissement public national situé à Sèvres sous la tutelle du ministère de l'éducation nationale, met à disposition des salles de réunion et des hébergements abordables pour les participants aux formations du programme de renforcement des capacités. Le BIPM fait partie des partenaires en France, avec le LNE et le CNES, d'un concours qui s'adresse aux établissements scolaires de langue française du monde entier et qui a pour thème « Mesures et unités du monde » en 2018 afin de marquer la révision historique du SI qui sera adoptée au cours de la présente réunion. En outre, le BIPM a travaillé avec le LNE afin de contribuer à l'organisation d'une exposition majeure sur la métrologie intitulée « Sur mesure, les 7 unités du monde » au Musée des arts et métiers à Paris. Le LNE est le partenaire principal de cette exposition.

Parmi les activités du BIPM en matière de relations internationales au cours des quatre années passées figure le renforcement de la relation de longue date avec l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML). Cette coopération intervient à divers niveaux et a pour objectif de coordonner les missions complémentaires des deux organisations afin de représenter la métrologie dans son ensemble. La collaboration du BIPM avec l'OIML se fait de plus en plus au niveau opérationnel ; le nouveau directeur du Bureau international de métrologie légal (BIML) sera reçu au BIPM en janvier 2019 lors de sa prise de fonctions et de nouvelles synergies opérationnelles seront identifiées, en particulier en ce qui concerne la façon de développer la mission des deux organisations. Le BIPM travaille de façon étroite avec l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et l'International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) et a contribué de façon considérable à la révision de la norme ISO/IEC 17025:2017 « Exigences générales concernant

la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais ». Le BIPM a représenté les intérêts de la communauté mondiale des laboratoires nationaux de métrologie, ainsi que la position du CIPM, lors de la révision de cette norme. Une nouvelle initiative a été lancée en coopération avec l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) afin de promouvoir le rôle de la mesure dans la réglementation internationale, en lien avec 50 autres organisations internationales. Par ailleurs, le BIPM a collaboré avec l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI) afin d'expliquer le rôle que pouvait avoir la métrologie afin de contribuer aux objectifs de développement durable tels que définis par les Nations Unies. Le BIPM a également été impliqué dans le changement de nom de l'ancien Réseau DCMAS qui se nomme désormais l'International Network on Quality Infrastructure (INetQI).

Le BIPM a mis en place de nouvelles stratégies concernant la réalisation de son programme de travail. En particulier, le NMIJ (Japon), avec le soutien d'une société japonaise, a contribué à l'établissement au BIPM d'un nouvel équipement de résonance magnétique nucléaire quantitative. Cette initiative a permis de réaliser des progrès concernant le programme de travail approuvé ; des scientifiques invités ont ainsi pris part aux activités de renforcement des capacités en lien avec la résonance magnétique nucléaire quantitative, ce qui a permis de publier un ensemble de nouvelles données de référence concernant la résonance magnétique nucléaire quantitative, à la demande des laboratoires nationaux de métrologie, pour le développement de la métrologie de l'analyse des composés organiques purs.

L'implication de détachés a également fait partie des nouvelles stratégies concernant la réalisation du programme de travail. Ainsi, quatre-vingt-cinq détachés venant de 26 pays ont été accueillis au BIPM depuis 2014, ce qui équivaut à 13 équivalents temps plein ayant soutenu la réalisation du programme de travail. Le directeur remercie les laboratoires nationaux de métrologie qui ont détaché des membres de leur personnel au BIPM.

En résumé, le directeur conclut que depuis 2014, le personnel du BIPM a fait progresser les projets de laboratoire, tel que cela était prévu dans le programme de travail. Parmi les principales réalisations figurent la balance de Kibble et les nouvelles aptitudes dans le domaine de la résonance magnétique nucléaire quantitative, l'impact étendu du rôle du BIPM en matière de relations internationales, le lancement de nouvelles initiatives concernant le renforcement des capacités et le transfert des connaissances, les améliorations en termes d'efficacité et les économies concernant le fonctionnement du BIPM, l'amélioration de l'efficacité de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM, ainsi que la coordination des processus qui soutiendront la redéfinition attendue des unités de base du SI.

Le président de la CGPM remercie M. Milton pour son compte rendu.

11. Le travail des Comités consultatifs pour accroître l'impact du CIPM MRA

M. Gert Rietveld, membre du CIPM et président du CCEM, développe les informations données par le président du CIPM (voir point 9 de l'ordre du jour, « Résolution 5 (2014) : Sur l'importance de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM ») et présente ainsi le travail mené par les Comités consultatifs au cours des quatre années passées pour accroître l'impact du CIPM MRA. Il commence par faire référence à la devise visionnaire « *à tous les temps, à tous les peuples* » énoncée pendant la Révolution française il y a plus de 200 ans. Cette devise est toujours pertinente pour la métrologie et de nombreux progrès ont été effectués pour atteindre cet idéal, parmi lesquels

l'établissement en 1999 de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM (CIPM MRA). Le CIPM MRA représente l'état de l'art concernant la devise « à tous les temps, à tous les peuples ». Un élément clé en la matière est que le CIPM MRA constitue la structure qui permet aux laboratoires nationaux de métrologie de démontrer l'équivalence internationale de leurs étalons de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage qu'ils émettent. Les aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs) des laboratoires participant au CIPM MRA en sont le résultat : elles sont reconnues internationalement (après examen et approbation par les pairs). Les CMCs approuvées ainsi que des informations techniques associées sont publiées dans la base de données du CIPM MRA ou base de données sur les comparaisons clés, la KCDB. Les CMCs sont étayées par des comparaisons clés qui permettent de comparer les aptitudes afin de prouver qu'elles correspondent à celles déclarées. Le CIPM MRA facilite ainsi l'universalité des mesures et leur reconnaissance au niveau mondial.

L'efficacité du CIPM MRA afin de faciliter le commerce et éliminer les obstacles au commerce est largement reconnue. Lors de la 25e réunion de la CGPM (2014), il a été convenu que la mise en œuvre du CIPM MRA requérait de considérables efforts. À la suite d'une discussion sur le fait de savoir s'il était possible de rationaliser son fonctionnement, la CGPM a adopté la Résolution 5 (2014) « Sur l'importance de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM ». Cette résolution note la nécessité de procéder à un examen de la mise en œuvre et du fonctionnement du CIPM MRA et invite les Comités consultatifs et le JCRB à poursuivre leurs efforts continus afin de rationaliser le fonctionnement du CIPM MRA, dans le cadre de la structure existante. Le Groupe de travail sur la mise en œuvre et le fonctionnement du CIPM MRA a par conséquent été établi, avec pour objectif d'atteindre la même qualité en fournissant moins d'efforts. Ce groupe de travail a formulé neuf recommandations dans des domaines clés, sous-divisées en 28 actions spécifiques. La KCDB du BIPM constitue la mise en œuvre pratique du CIPM MRA : 17 des 28 actions concernent la KCDB et, plus particulièrement, la visibilité des CMCs (3 recommandations), la participation aux comparaisons clés (3), le fait de contenir la prolifération des CMCs (5) et le processus d'examen des CMCs (6). Les onze autres actions sont liées aux Comités consultatifs du CIPM.

M. Rietveld évoque comment le Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM) a contribué à l'examen du CIPM MRA. L'une des préoccupations majeures du CCEM était la prolifération des CMCs et l'examen du CIPM MRA a permis d'étudier comment enrayer cette prolifération. L'une des principales solutions a été de mettre en place des tables détaillées d'incertitudes à partir des lignes de CMCs dans la KCDB, qui sont plus faciles à gérer, ce qui a eu pour résultat de réduire le nombre de CMCs dans le domaine de l'électricité et du magnétisme de 40 %, en passant de 7 100 CMCs en 2013 à 4 400 en 2018. M. Rietveld note qu'une réduction du nombre de CMCs n'est pas un objectif en soi car l'essentiel est d'être plus efficace et efficient et d'accroître l'impact des CMCs.

M. Rietveld présente brièvement le processus d'examen des CMCs. Actuellement, les CMCs de chaque organisation régionale de métrologie sont rassemblées dans un fichier Excel. Ce système fonctionne de façon satisfaisante pour les comités techniques qui ont peu de CMCs et lorsque les compétences techniques requises pour procéder à l'examen sont limitées. Dans le cadre du CCEM, le processus d'examen est différent : toutes les nouvelles CMCs sont initialement examinées au sein de l'organisation régionale de métrologie concernée (examen interne à l'organisation régionale de métrologie). Une fois cet examen achevé, les conclusions sont envoyées à d'autres organisations régionales de métrologie pour commentaires. Ce processus, en place depuis près de 15 ans, implique cependant encore de répéter le travail dans les différentes régions. Le CCEM a étudié comment optimiser le processus : ainsi, les CMCs sont désormais divisées en lots qui sont envoyés à certaines régions de sorte qu'il n'y ait qu'un seul examen pour chaque CMC. En 2015, le CCEM a décidé que certaines CMCs sont relativement simples et que les laboratoires qui les déclarent sont suffisamment

compétents pour qu'il ne soit pas nécessaire de procéder à un examen entre régions : le processus d'examen interne à l'organisation régionale de métrologie a permis de garantir la qualité de ces CMCs.

En résumé, avant 2011, chaque CMC en électricité et magnétisme était soumise à un « examen à 400 % », chacune des quatre organisations régionales de métrologie (de l'époque) procédant à l'examen de l'ensemble des CMCs. À partir de 2011, les CMCs en électricité et magnétisme ont été soumises à un « examen à 100 % », deux à quatre organisations régionales de métrologie procédant collectivement à l'examen de toutes les CMCs. Après 2015, un processus d'examen sélectif (examen inférieur à 100 %) fondé sur un échantillonnage de CMCs a été mis en place. Dans le cadre de cet examen sélectif, lors de la déclaration d'un ensemble de CMCs, le président du Groupe de travail du CCEM sur la coordination des organisations régionales de métrologie décide de la portée de l'examen interne, en fonction d'une série de critères. La décision finale concernant la portée de l'examen revient aux organisations régionales de métrologie.

M. Rietveld rappelle que le président du CIPM a mentionné, lors de sa présentation, le lancement de la KCDB 2.0 en 2019, ce qui constituera un changement majeur concernant l'impact du CIPM MRA. L'actuel processus de mise à jour de la KCDB repose sur un transfert manuel des données à l'aide de fichiers Excel, ce qui est chronophage et source d'erreurs. La KCDB 2.0 est une plateforme internet qui ne nécessitera plus de transfert manuel des données et assurera un formatage correct des CMCs. La KCDB 2.0 aidera à atteindre l'objectif de réussir « dès la première fois » à déclarer des CMCs dans la KCDB, ce qui permettra de réaliser d'importantes économies de temps.

Le CCEM a mis en œuvre une série de mesures afin d'améliorer l'impact et l'efficacité des comparaisons. Le principe des comparaisons est de vérifier, en faisant circuler des artéfacts entre laboratoires, que l'accord déclaré dans les CMCs est conforme à ce qu'il doit être. L'efficacité des comparaisons a été améliorée en réduisant, en fonction de certains critères, le nombre de laboratoires nationaux de métrologie impliqués. L'un des critères clés est que tout laboratoire d'une région qui participe à des comparaisons internationales doit être disposé à réaliser une comparaison régionale. En outre, les présidents des Comités consultatifs se sont mis d'accord afin de limiter les comparaisons aux grandeurs clés. Un plan stratégique a été développé pour les futures comparaisons et une formation du programme CBKT sur la conduite de comparaisons est considérée comme essentielle pour garantir que le plus grand nombre de laboratoires nationaux de métrologie puissent partager la responsabilité d'organiser des comparaisons.

Le BIPM joue un rôle important et constant dans le domaine des comparaisons en électricité et magnétisme qu'il va poursuivre car le CCEM s'oriente vers l'utilisation des étalons quantiques. La mise en œuvre des étalons quantiques requiert des comparaisons : le BIPM y contribue en effectuant des comparaisons sur site à l'aide, par exemple, des étalons transportables du BIPM de tension à effet Josephson en courant alternatif et continu et des étalons du BIPM à effet Hall quantique. M. Rietveld ajoute qu'une comparaison sur site du BIPM est une expérience d'apprentissage enrichissante pour tous les participants, y compris pour les laboratoires nationaux de métrologie expérimentés. Par ailleurs, une récente innovation a eu pour but d'améliorer l'efficacité des comparaisons : il s'agit de la comparaison organisée par le BIPM selon un « schéma en étoile »[2] (CCEM-K4), qui s'est achevée en un temps record, à savoir en moins de deux ans.

Pour conclure, le CIPM MRA est un véritable succès en ce qui concerne la réduction et l'élimination des obstacles au commerce. Une amélioration significative de l'efficacité et de l'impact du CIPM MRA a été obtenue en réduisant le nombre de CMCs par l'utilisation de tables d'incertitudes,

[2] Le « schéma en étoile » consiste en une série de comparaisons bilatérales menées en parallèle par les laboratoires nationaux de métrologie participants et le BIPM. Chaque participant a fourni des étalons de capacité électrique et le BIPM a servi de référence commune pour la comparaison. Les mesures de capacité étaient réalisées à 10 pF et, de façon facultative, à 100 pF. Tous les participants ont effectué des mesures aux deux valeurs.

en mettant en œuvre un processus d'examen des CMCs plus efficace, en améliorant la planification stratégique des comparaisons clés et en ayant recours aux comparaisons pilotées par le BIPM. L'efficacité du CIPM MRA fait l'objet d'un examen lors de la réunion annuelle des présidents des Comités consultatifs, ces derniers échangeant leurs expériences et suivant les progrès effectués par les Comités consultatifs pour améliorer l'efficacité du CIPM MRA. M. Rietveld termine sa présentation en rappelant que la KCDB 2.0 modifiera de façon majeure l'efficacité du CIPM MRA lorsqu'elle sera lancée en 2019.

Le président de la CGPM remercie M. Rietveld et ouvre la discussion.

Mme Chambon (France) observe que le travail effectué par les Comités consultatifs et le BIPM concernant l'examen du CIPM MRA et la KCDB est un grand pas en avant ; elle encourage les autres Comités consultatifs à utiliser l'approche des matrices qui constitue une avancée majeure pour la communauté des Comités consultatifs. Elle remercie la communauté mondiale de la métrologie pour le temps et le travail qui ont été consacrés à l'examen du CIPM MRA. M. Rietveld répond qu'il y a quatre ans, il avait quelques réserves et ne pensait pas que le groupe de travail sur le CIPM MRA, requis par la CGPM, et le rapport que ce dernier produirait auraient des résultats et contribueraient au processus d'examen. Toutefois, il est très satisfait du travail effectué non seulement par les Comités consultatifs mais aussi par les régions afin de faire progresser l'examen du CIPM MRA.

M. Érard (CIPM) demande si l'optimisation du processus d'examen des CMCs est liée à la publication de la nouvelle norme ISO/IEC 17025:2017 « Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais », qui introduit l'analyse des risques. M. Rietveld répond que le risque est un élément clé de cette nouvelle norme et qu'il a été pris en considération lors de l'optimisation du processus d'examen des CMCs.

M. Inglis (président du CIPM) évoque les étalons transportables à effet Hall quantique, mentionnés par M. Rietveld, qui sont utilisés pour réaliser des comparaisons sur site. Il observe que ces comparaisons ne sont pas faciles, ce qui souligne le savoir-faire du personnel des laboratoires du BIPM pour parvenir à développer ce type d'étalons. Il invite M. Rietveld à apporter des informations complémentaires quant au niveau de compétences requis pour étayer et effectuer ces comparaisons. M. Rietveld répond que les connaissances du personnel du BIPM sont fondamentales à la réussite de ces comparaisons. Ainsi, quel que soit l'endroit où le BIPM effectue une comparaison sur site, cette dernière constitue une expérience d'apprentissage pour l'ensemble des participants. Il ajoute que le programme de travail du BIPM pour les années 2020 à 2023 comprend une extension des étalons transportables à effet Hall quantique afin de couvrir des grandeurs en courant alternatif. M. Rietveld conclut en remerciant le personnel du BIPM pour son savoir et le soutien qu'il apporte au CCEM. Il salue les prochaines mesures prises par le BIPM afin de soutenir le CCEM et la métrologie de l'électromagnétisme.

12. L'impact du CIPM MRA sur le continent américain

M. Héctor Laiz, membre du CIPM et président de l'Inter-American Metrology System (SIM), présente les mesures prises au sein du SIM, l'organisation régionale de métrologie du continent américain, pour mettre en œuvre le CIPM MRA et appliquer les recommandations établies lors de l'examen du CIPM MRA. Il commence par citer la vision du SIM, à savoir être une organisation régionale de métrologie représentative, transparente, compétente et reconnue au niveau international, ainsi que sa mission, promouvoir et soutenir une infrastructure de mesure intégrée sur le continent américain qui permette à chaque laboratoire national de mesure membre de stimuler l'innovation,

la compétitivité, le commerce, la sécurité des consommateurs et le développement durable en participant efficacement à la communauté mondiale de la métrologie. Le SIM a trois objectifs stratégiques :

I. développer les laboratoires nationaux de métrologie sur le continent américain ;

II. bâtir une organisation régionale de métrologie solide ;

III. respecter les obligations qui incombent à une organisation régionale de métrologie selon les dispositions du CIPM MRA.

Neuf États Membres et huit Associés à la CGPM (parmi lesquels CARICOM qui représente onze laboratoires nationaux de métrologie) font partie du SIM. En outre, le SIM comprend dix-sept laboratoires signataires du CIPM MRA, parmi lesquels CARICOM. M. Laiz indique que le rôle des organisations régionales de métrologie selon le CIPM MRA est principalement d'examiner et approuver le système qualité des laboratoires nationaux de métrologie, de procéder à l'examen intra- et interrégional des CMCs et de mener à bien des comparaisons clés et supplémentaires afin d'étayer les CMCs. En novembre 2018, le SIM avait contribué à 4 727 des 25 221 CMCs enregistrées dans la KCDB. M. Laiz présente succinctement les comparaisons clés et supplémentaires du SIM.

M. Laiz mentionne que cinq des conclusions de l'examen du CIPM MRA revêtent une importance particulière pour le SIM : le CIPM MRA doit continuer à maintenir son haut niveau d'exigence en matière de qualité et d'intégrité afin de ne pas compromettre les efforts effectués depuis plus de 15 ans ; le CIPM MRA doit continuer à être ouvert et à reposer sur l'évaluation dûment démontrée et documentée des aptitudes entre les laboratoires nationaux de métrologie ; les efforts requis pour mettre en œuvre tous les aspects du CIPM MRA ne doivent pas augmenter au-delà du niveau actuel et doivent être réduits dès que possible et des mesures doivent être prises afin de répartir plus largement la responsabilité associée au CIPM MRA ; les procédures concernant les comparaisons clés et les CMCs doivent être élaborées sur mesure en fonction des risques et du niveau de complexité ; il est nécessaire de mettre à niveau la base de données de la KCDB et celle du JCRB à l'aide d'outils informatiques modernes. M. Laiz souligne que l'esprit d'ouverture est particulièrement important pour le SIM afin de s'assurer que le CIPM continue à intégrer des mécanismes permettant, et encourageant, la participation de laboratoires nationaux de métrologie « plus petits » et augmentant le nombre de laboratoires nationaux de métrologie qui participent au CIPM MRA et déclarent des CMCs.

Le SIM a encouragé les présidents et techniciens de groupes de travail de nouveaux laboratoires nationaux de métrologie au sein du SIM, impliqués dans le fonctionnement du CIPM MRA, à assister aux activités pertinentes de renforcement des capacités et de transfert des connaissances organisées par le BIPM. L'objectif est d'accroître l'efficacité du processus d'examen des CMCs afin de déclarer avec succès des CMCs « dès la première fois » et de parvenir à un partage plus équitable de la charge de travail. Ainsi, sept représentants du SIM ont participé à la formation de 2017 intitulée « Sound beginning in the CIPM MRA » (Première approche du CIPM MRA) et sept autres à la formation de 2016 intitulée « Leaders of Tomorrow » (Dirigeants de demain).

Le transport maritime et le transport aérien sont deux domaines où le CIPM MRA a eu un impact direct au sein du SIM. Avant l'établissement du CIPM MRA, l'administration fédérale de l'aviation des États-Unis (FAA – Federal Aviation Administration) exigeait une « traçabilité au NIST » pour toutes les mesures nécessaires à la maintenance des avions fabriqués aux États-Unis. Après la mise en place du CIPM MRA, la FAA a publié une réglementation qui reconnaît explicitement le CIPM MRA comme une source acceptable de traçabilité. Cela a été particulièrement important pour les signataires du CIPM MRA, comme l'Argentine qui compte plusieurs sociétés d'entretien d'avions. Avant cette réglementation, les sociétés argentines devaient envoyer leurs étalons au NIST

pour étalonnage : désormais, elles peuvent établir la traçabilité de leur résultat de mesure au laboratoire national de métrologie argentin car ce dernier a déclaré des CMCs enregistrées dans la KCDB. Un exemple plus récent de l'impact du CIPM MRA est lié au transport maritime de conteneurs. La Convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer (Convention SOLAS) a prescrit une exigence relative à la vérification de la masse brute des conteneurs en 2016 qui fixe des règles concernant la masse des conteneurs. Cette exigence a été introduite afin de réduire les accidents de transport maritime qui étaient causés par un chargement non équilibré des navires ; elle est en particulier importante pour le Panama en raison des navires porte-conteneurs empruntant le canal de Panama. Le laboratoire national de métrologie panaméen, le CENAMEP, a été reconnu comme un organisme technique compétent pour la mise en œuvre de cette exigence en raison des CMCs qu'il a déclarées et qui sont enregistrées dans l'Annexe C du CIPM MRA. Le CENAMEP est signataire du CIPM MRA depuis 2003.

M. Laiz indique que l'établissement d'une chaîne de traçabilité bien définie dans les normes concernant l'infrastructure de la qualité a eu un impact sur le continent américain. La récente modification de la norme ISO/IEC 17025:2017 inclut une annexe où la démonstration de la traçabilité métrologique est clairement expliquée pour l'application de la norme. Selon la norme ISO/IEC 17025, il est clair que la première source de traçabilité est celle d'un laboratoire national de métrologie qui a des CMCs enregistrées dans la KCDB. Cela est important car l'impact du CIPM MRA est à l'étude : il est nécessaire d'examiner la portée de la reconnaissance internationale de l'infrastructure de la qualité dans son ensemble. Le CIPM MRA est la base de la reconnaissance de toutes les activités de conformité et d'accréditation au niveau mondial.

Pour conclure, M. Laiz souligne que le CIPM MRA :

- a amélioré la qualité des étalons nationaux,
- a amélioré la qualité des services offerts par les laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés en établissant un processus clair d'examen de leur système qualité,
- a rendu visibles et transparentes les aptitudes de mesures des laboratoires nationaux de métrologie et des laboratoires désignés,
- a rendu inutiles les accords bilatéraux,
- a accru le transfert des connaissances et la confiance mutuelle entre les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires désignés,
- a contribué à l'élimination des obstacles techniques au commerce.

L'examen du CIPM MRA avait pour but d'améliorer son efficacité et de maintenir son haut niveau de qualité et d'ouverture.

Le président de la CGPM remercie M. Laiz et ouvre la discussion.

M. Inglis (président du CIPM) indique que l'un des défis majeurs du CIPM MRA et de la KCDB est de savoir comment gérer le risque. Il rappelle que la qualité d'une base de données se mesure à celle de son maillon le plus faible ; alors que le travail se poursuit pour réduire les efforts requis pour assurer l'intégrité de la KCDB, il est nécessaire de rester attentif au risque. Le défi est donc pour les Comités consultatifs de considérer à quelle fréquence les comparaisons doivent être répétées afin de s'assurer que les efforts fournis sont suffisants mais pas excessifs. Il demande à M. Laiz d'apporter des commentaires à ce sujet et de proposer comment réduire les efforts tout en assurant l'intégrité de la KCDB. M. Laiz répond qu'il est nécessaire, dans le cadre de l'organisation de comparaisons, de distinguer l'analyse des risques effectuée par les Comités consultatifs et celle réalisée par les

organisations régionales de métrologie. Un comité consultatif doit choisir des comparaisons clés en tenant compte de la portée de leurs résultats de sorte que les principaux champs de la métrologie soient couverts et afin de s'assurer que le taux de répétition reflète l'évolution de la technologie dans chaque domaine. Cela est différent pour les organisations régionales de métrologie qui doivent tenir compte du développement de la technologie mais aussi du développement des laboratoires nationaux de métrologie dans une région particulière. Il est parfois nécessaire d'organiser des comparaisons clés ou supplémentaires afin d'étayer de nouvelles aptitudes pour des laboratoires nationaux émergents dans une région donnée. Il mentionne M. Rietveld qui a observé, lors de sa présentation, que le CCEM réalise une analyse des risques afin d'évaluer à quel niveau de détail examiner les CMCs. Dans le cas d'une nouvelle CMC ou d'une CMC représentant un changement majeur par rapport aux aptitudes établies, il peut être procédé à un examen plus approfondi. Un examen moins rigoureux peut être effectué dans le cas d'une CMC reflétant l'état de l'art ou étant bien connue. M. Brandi (Brésil) observe que lorsqu'une analyse des risques est effectuée, une étude d'impact est également réalisée.

M. Khedir (Tunisie) demande si les stratégies du BIPM et du SIM sont complémentaires. M. Laiz répond que les activités du programme CBKT organisées par le BIPM, avec le soutien de laboratoires nationaux partenaires, sont en ligne avec la stratégie du SIM visant à obtenir une répartition plus équitable de la charge de travail associée au fonctionnement du CIPM MRA. Le SIM tire parti des outils développés par le programme CBKT du BIPM afin d'améliorer les aptitudes et l'efficacité des nouveaux présidents de groupes de travail. Par ailleurs, le SIM tire parti également du programme CBKT pour former des métrologistes venant de laboratoires nationaux qui sont en train de soumettre leurs premières CMCs afin de s'assurer qu'ils réussiront « dès la première fois » à déclarer leurs CMCs. M. Milton (directeur du BIPM) ajoute que les stratégies sont en effet complémentaires car le BIPM oriente ses activités de renforcement des capacités et en détermine les priorités en fonction des régions. Chaque région a une stratégie légèrement différente, de sorte que le BIPM travaille avec chaque organisation régionale de métrologie de façon différente. Le BIPM s'efforce de mettre en œuvre ce qui est requis par les régions afin d'avoir le plus large impact possible.

Le président de la CGPM clôt la première séance.

Deuxième séance – 13 novembre 2018 (après-midi)

Le président de la CGPM souhaite la bienvenue aux délégués pour la deuxième séance.

13. L'importance de la mesure pour les normes internationales

M. Sergio Mujica, Secrétaire général de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), donne une présentation invitée intitulée « L'importance de la mesure pour les normes internationales ». Le travail de l'ISO repose sur deux piliers fondamentaux : la coopération internationale et le consensus comme mécanisme de prise de décision. M. Mujica explique comment les partenariats sont essentiels au travail de coopération internationale de l'ISO, qui collabore avec plus de 700 organisations. La coopération de l'ISO avec le BIPM est très importante et les deux organisations collaborent à différents niveaux. Le BIPM collabore avec l'ISO « sur le terrain » par l'intermédiaire des Comités techniques de l'ISO (Comité pour les matériaux de référence, ISO REMCO, et Comité pour l'évaluation de la conformité, ISO CASCO), ainsi que par le biais de certains des Comités consultatifs du CIPM. Un objectif commun est de définir des vocabulaires similaires concernant leurs domaines de travail, en particulier en ce qui concerne les unités. À cette fin, l'ISO et le BIPM participent au Groupe de travail sur l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) et au Groupe de travail sur le Vocabulaire international de métrologie (VIM) du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM). C'est au sein des comités communs que se situe le plus haut niveau de collaboration : le BIPM et l'ISO coopèrent ainsi au sein du JCGM qui comprend huit organisations membres.

M. Mujica indique que l'ISO et le BIPM collaborent afin de définir l'infrastructure nationale de la qualité ; en 2017, une nouvelle définition a été adoptée par l'ancien Réseau DCMAS. Il observe que l'infrastructure nationale de la qualité joue un rôle dans la compétitivité et consiste en un système complexe de la qualité et de la conformité ; une infrastructure nationale faible représente un obstacle au commerce et au bien de la population. L'infrastructure nationale de la qualité repose sur la métrologie, la normalisation, l'accréditation, l'évaluation de la conformité et la surveillance du marché. L'ISO a conclu un accord de collaboration avec le BIPM, l'OIML et l'ILAC par le biais d'une déclaration commune sur la traçabilité métrologique.

L'un des messages clés concernant les normes internationales et la métrologie est le lien mutuellement pertinent qui existe entre ces deux domaines : la métrologie a besoin des normes lorsque des unités de mesure sont définies et lorsque des guides sur les mesures et processus sont élaborés, alors que les normes ont besoin de la métrologie pour déterminer les caractéristiques d'objets physiques. M. Mujica démontre ce lien à partir des résultats de recherche obtenu par le moteur de recherche de l'ISO : sur les 22 000 normes internationales de l'ISO, 639 résultats apparaissent pour le terme « metrology » (métrologie), 12 976 pour « measurement » (mesure) et 20 429 pour « testing » (essai).

L'utilisation de la métrologie par l'ISO s'illustre de diverses manières : de nombreuses normes de l'ISO requièrent des mesures exactes fondées sur le Système international d'unités (SI) ; la rédaction des normes ISO respecte un ensemble de directives, qui chargent les comités techniques d'utiliser les unités du SI ; le BIPM et l'OIML ont participé au Comité pour l'évaluation de la conformité (ISO CASCO) concernant la rédaction de la norme ISO/IEC 17025:2017 « Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais » ; la série de normes ISO 80000

« Grandeurs et unités » a été élaborée et mise à jour par le Comité technique ISO/TC 12 « Grandeurs et unités » et fournit le Système international de grandeurs (ISQ) dans divers domaines scientifiques. La Brochure sur le SI et la série de normes ISO 80000 ont été simultanément révisées par l'ISO/TC 12, le Comité consultatif des unités (CCU) et le CIPM afin d'assurer leur cohérence.

M. Mujica conclut en mentionnant les priorités les plus récentes de l'ISO et sa contribution à l'agenda mondial, à savoir les objectifs de développement durable des Nations Unies, le système commercial international et le fait d'établir une plateforme pour l'innovation.

14. Le rôle de l'infrastructure de la qualité dans le développement économique

M. Andrei Mikhnev, de la Banque mondiale, commence sa présentation invitée intitulée « Le rôle de l'infrastructure de la qualité dans le développement économique » en expliquant comment une infrastructure bénéfique permettant d'assurer la qualité des produits et services est un facteur déterminant pour permettre aux entreprises d'accéder aux marchés domestiques et étrangers et y être compétitives. Une telle infrastructure peut élargir leurs activités commerciales et leurs perspectives d'investissement et accroître leur productivité et l'innovation. Une infrastructure moderne de la qualité répond aux besoins des gouvernements, des entreprises et des consommateurs. M. Mikhnev note que l'infrastructure de la qualité est souvent une notion mal comprise car on peut croire, à tort, que le terme fait référence à la qualité des projets d'infrastructure, tels que les projets d'ingénierie civile. La Banque mondiale décrit l'infrastructure de la qualité comme un « écosystème » d'institutions publiques et privées, comprenant aussi les politiques, le cadre juridique et réglementaire pertinent et les pratiques nécessaires pour soutenir et renforcer la qualité, la sécurité et l'innocuité environnementale des biens, services et processus.

La Banque mondiale a publié plusieurs analyses portant sur différents aspects du développement économique. Récemment, en 2018, elle a publié un rapport intitulé « *Productivity Revisited: shifting paradigms in analysis and policy* », qui étudie le travail entrepris par de nombreux gouvernements dans le monde entier afin d'améliorer la productivité. Il est important de s'assurer que l'infrastructure de la qualité existante d'un pays contribue à la productivité ; sans infrastructure de la qualité, il serait difficile de garantir la concurrence sur les marchés internationaux. Un deuxième rapport intitulé « *Trouble in the making? The future of manufacturing-led development* » tire la conclusion qu'au lieu d'avoir pour objectif de fabriquer un produit *per se*, il vaudrait mieux se concentrer sur comment accroître les activités qui fournissent les caractéristiques souhaitées du produit et examiner si elles répondent aux besoins des consommateurs. Étant donné le développement de produits et processus de plus en plus complexes, il sera de plus en plus important pour faciliter les possibilités d'exportation d'apporter des améliorations aux systèmes de l'infrastructure de la qualité afin de certifier les normes de qualité. Toutefois, si les exigences en matière d'infrastructure de la qualité sont fixées à un niveau trop élevé, elles peuvent constituer des obstacles non tarifaires au commerce et au développement. Un troisième rapport intitulé « *The innovation paradox: developing-country capabilities and the unrealized promise of technological catch-up* » conclut que les pays qui ne sont pas en mesure d'innover dans leurs secteurs d'activité existants sont peu susceptibles de le faire dans de nouveaux secteurs d'activité. Le fait d'investir dans l'innovation uniquement ne permet pas de garantir le succès de produits innovants, sauf s'il existe des conditions essentielles d'innover, parmi lesquelles l'infrastructure de la qualité. L'utilisation de normes en matière d'innovation est un élément clé du système de l'infrastructure de la qualité. Les entreprises « de qualité plus élevée » obtiennent plus de succès si elles respectent des normes internationales plus strictes. De telles capacités sont cruciales

pour qu'une entreprise soit compétitive sur les marchés internationaux en termes de qualité. M. Mikhnev souligne l'impact de l'infrastructure de la qualité sur le commerce et la compétitivité.

M. Mikhnev décrit les trois domaines fondamentaux où l'infrastructure de la qualité a un impact : accroître l'accès au marché, améliorer la productivité d'une entreprise et protéger le bien public. De récentes études montrent que 44 % des entreprises ont dupliqué de manière conséquente les procédures d'essais afin de répondre aux exigences de marchés étrangers alors qu'elles avaient déjà répondu aux exigences nationales et que 68 % ont mentionné les coûts des essais et de la certification comme une raison importante de ne pas exporter. Cela met en lumière le fait qu'un système mondial adéquat d'acceptation et de reconnaissance de l'évaluation de la conformité est une étape importante pour supprimer les obstacles au commerce. Une étude menée au Royaume-Uni démontre que la réforme des normes a contribué à une croissance de 13 % de la productivité du travail.

Afin de tirer parti de ces connaissances et d'aider les pays en développement à construire une infrastructure de la qualité moderne et fonctionnelle, la Banque mondiale a développé la boîte à outils « QI reform toolkit » sur la réforme de l'infrastructure de la qualité, disponible sur le site internet de la Banque mondiale. Pour conclure sa présentation, M. Mikhnev souligne que la Banque mondiale est la plus grande organisation d'aide au développement, qui fournit des sources de financement et de savoir dans le monde entier. Il met l'accent sur le soutien qu'elle apporte pour réformer l'infrastructure de la qualité et confirme que le développement économique dépend fortement de la manière dont est mise en œuvre l'infrastructure de la qualité.

15. Le rôle de l'accréditation dans la dissémination de la traçabilité métrologique

Mme Merih Malmqvist Nilsson, présidente de l'International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), donne une présentation invitée intitulée « Le rôle de l'accréditation dans la dissémination de la traçabilité métrologique ». Elle indique que la communauté de l'infrastructure mondiale de la qualité doit rester pertinente pour les entreprises et suivre l'innovation technique, ce qui peut exiger de la communauté de se réinventer. La communauté de l'infrastructure de la qualité est toutefois très conservatrice et le domaine qui suscite l'innovation est la métrologie. Mme Malmqvist Nilsson estime que la métrologie a réinventé les produits et services qu'elle fournit et souligne son approche innovante par les changements radicaux proposés lors de cette 26e réunion de la CGPM. Toutefois, elle précise qu'en passant de la science pure aux produits et services commerciaux, les éléments moteurs peuvent également changer et ne plus être portés par la réussite scientifique mais par la réussite commerciale et financière. Cela se produit lorsqu'une vérification de faits par un tiers ou une attestation de compétence devient nécessaire. C'est également le cas lorsque l'accréditation entre dans le monde de la métrologie et de la dissémination de la traçabilité des mesures. L'accréditation crée un pont entre la définition scientifique des unités et les besoins commerciaux du marché.

La vision mondiale de l'ILAC est la suivante : « Accredited once, accepted everywhere » (Accrédité une fois, accepté partout). Cette vision contribue à éliminer les obstacles techniques au commerce et favorise le libre-échange. Le « produit » que l'ILAC fournit au marché est l'Arrangement de reconnaissance mutuelle (Mutual Recognition Arrangement, MRA), qui couvre les essais, l'étalonnage et l'inspection. En novembre 2018, le réseau de l'ILAC comprenait 153 organismes d'accréditation provenant de 126 économies différentes, représentant ainsi 95 % du PIB mondial, et le MRA de l'ILAC couvrait 68 000 laboratoires accrédités et 9 500 organismes d'inspection accrédités. Concernant la dissémination de la traçabilité, 84 signataires du MRA de l'ILAC sont impliqués dans le domaine des étalonnages. Ces 84 signataires ont accrédité 11 020 laboratoires

d'étalonnage conformément à la norme ISO/IEC 17025. Mme Malmqvist Nilsson observe que le MRA de l'ILAC renforce les évaluations par les pairs conduites par les sept organismes régionaux de coopération actuels.

Un protocole d'accord signé le 3 novembre 2001 marque le début officiel de la coopération entre l'ILAC et le BIPM. Ce protocole d'accord a été réaffirmé le 8 mars 2016 : il définit comment sont garanties la dissémination des unités sur le marché et l'utilisation de mesures traçables par l'industrie et les laboratoires. Le Groupe de travail commun au CIPM et à l'ILAC, qui se réunit chaque année au BIPM, est responsable de la mise en œuvre et de l'examen du protocole d'accord conclu entre le BIPM et l'ILAC. Ce Groupe de travail commun a publié plusieurs déclarations communes et la déclaration commune au BIPM, à l'OIML, à l'ILAC et à l'ISO sur la traçabilité métrologique (2011) sera de nouveau signée au cours de la 26e réunion de la CGPM. La déclaration révisée se fonde sur la déclaration tripartite de 2006 et présente les principes qui doivent prévaloir pour démontrer la traçabilité métrologique dans le cadre de l'acceptation internationale. Le BIPM et l'ILAC ont également publié un certain nombre de déclarations communes sur des sujets tels que l'accréditation des services d'étalonnage et de mesure des laboratoires nationaux de métrologie ou les aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs).

Mme Malmqvist Nilsson conclut sa présentation en observant que l'ILAC s'est employé à promouvoir activement la révision à venir du SI, ainsi que la Journée mondiale de l'accréditation (le 9 juin chaque année) et la Journée mondiale de la métrologie (le 20 mai chaque année). Elle ajoute que promouvoir le travail du BIPM et de l'OIML est essentiel car leur coopération contribue à éliminer les obstacles au commerce.

Le président de la CGPM remercie les conférenciers et ouvre la discussion.

Mme Céline Kauffmann (OCDE) fait une déclaration sur l'importance du travail du BIPM afin de mettre l'accent sur les messages transmis lors des précédentes présentations et de compléter leur contenu. Elle observe que la métrologie est importante, non seulement pour les pays en développement, mais aussi pour les pays membres de l'OCDE et, en général, pour tous les pays en ce qui concerne la qualité de la réglementation. Mme Kauffmann précise qu'elle vient de la partie de l'OCDE qui travaille avec les décisionnaires conseillant d'autres décisionnaires sur leur programme réglementaire ou sur les bonnes pratiques réglementaires, ainsi qu'avec d'autres entités, généralement des centres d'administration, qui supervisent le développement de projets de loi et de projets de réglementation technique. Elle indique que l'accent est de plus en plus sur la façon d'assurer l'interopérabilité des cadres réglementaires entre pays. Cela est particulièrement important car les personnes, produits, idées et données ne cessent de franchir les frontières, c'est pourquoi il est impossible pour les pays de réglementer de façon isolée. Les pays se doivent de coopérer par-delà les frontières en matière de réglementation et d'assurer l'interopérabilité afin d'améliorer l'efficacité et réduire les coûts pour le commerce et les opérateurs économiques. La base de ces discussions est de s'accorder sur les aspects scientifiques qui sous-tendent les méthodes de mesure communes afin de développer des réglementations clés. Le travail de l'OCDE et d'autres organisations fait ressortir certaines failles du cycle réglementaire concernant la mise en œuvre des réglementations. Mme Kauffmann observe que des pays peuvent développer leurs réglementations sans envisager la façon de les mettre en œuvre ni la manière de garantir leur conformité. C'est pourquoi le fait de disposer d'un système commun de mesure et de comprendre comment mesurer la conformité aux lois et réglementations est très important mais fait souvent défaut. L'OCDE mène un travail considérable concernant la qualité de la réglementation et, dans le domaine de la coopération réglementaire internationale, une plateforme a été mise en place avec 15 organisations internationales, dont le BIPM, l'ISO et l'ILAC, afin d'examiner la qualité des normes internationales et d'étudier les

questions métrologiques. L'OCDE procède à des examens par pays et la question de la métrologie est devenue un élément critique de la qualité réglementaire pour tous les pays, y compris les pays membres de l'OCDE. Mme Kauffmann conclut en répétant que sa déclaration témoigne de l'importance du travail du BIPM.

M. Candel, président de la CGPM, rappelle qu'il a été fait référence au cours de la présentation de M. Mikhnev (Banque mondiale) au paradoxe de l'innovation et demande plus d'explications à ce sujet. M. Mikhnev répond que le paradoxe de l'innovation souligne que, bien que de nombreux investissements soient faits en matière d'innovation, ces investissements seuls ne sont plus suffisants pour réussir, en particulier dans les pays en développement. L'investissement en soi, bien qu'important, ne permet pas toujours d'atteindre le résultat escompté. En outre, avec l'investissement vient la connaissance mais cela n'est souvent pas suffisant ; une augmentation de l'aide et des investissements dans l'innovation au niveau international serait nécessaire pour stimuler davantage l'innovation mais ce n'est pas toujours le cas. Il est donc important d'étudier les conditions sous-jacentes de l'innovation dans un pays particulier et la façon dont son système d'innovation est organisé, afin de déterminer si le « capital humain » est propice à l'innovation. À cet égard, les capacités de gestion sont désormais un facteur majeur et sont considérées comme des variables utilisées pour mesurer le succès de l'innovation.

Mme Mikanadze (Géorgie) demande quels outils sont disponibles auprès de la Banque mondiale, des organisations internationales et des gouvernements nationaux pour mieux étayer l'application des innovations existantes. M. Mujica (ISO) répond qu'en termes d'innovation, lorsque l'on parle de normes internationales, on se réfère à un ensemble de règles permettant d'assurer qu'un produit est adapté à l'utilisation qui doit en être faite. Il observe que lors de discussions avec les représentants de gouvernement, ces derniers affirment souvent que les normes internationales peuvent être un obstacle à l'innovation ; il peut être difficile de relier un ensemble de règles existant à une innovation conçue pour un usage différent. M. Mujica cite l'exemple récent du lancement des « toilettes réinventées », un projet de la Fondation Bill & Melinda Gates. Lors de voyages en Afrique, Bill Gates a découvert que 4,5 milliards de personnes n'ont pas accès à des installations sanitaires de base, ce qui conduit au décès de près de 500 000 enfants de moins de cinq ans chaque année. Il n'est pas possible de résoudre ce problème en utilisant la technologie existante car les ressources en eau ne seraient pas suffisantes. Par conséquent, la Fondation a mis à disposition 200 millions de dollars américains et a invité la communauté scientifique à réinventer les toilettes. Un certain nombre de solutions ont été développées mais elles se sont avérées trop onéreuses. La Fondation Bill & Melinda Gates a alors abordé le problème sous un autre angle et a suggéré qu'une norme internationale était nécessaire pour répondre à ce besoin de santé publique. Elle a donc travaillé avec l'organisme américain membre de l'ISO, à savoir l'American National Standards Institute (ANSI), afin d'élaborer une norme en collaboration avec la communauté mondiale de la normalisation. Il en a résulté une norme internationale prospective, dans le sens où la technologie pour des toilettes réinventées fonctionnelles n'existe pas aujourd'hui mais que l'on sait à quoi l'on veut parvenir. Il est espéré que cette norme internationale prospective permette de développer la technologie existante onéreuse afin d'en faire une solution plus abordable mais aussi de la compléter par de nouvelles inventions. M. Mujica conclut en observant que bien que les normes internationales puissent ne pas mener à toutes les innovations envisagées, elles constituent un outil important. M. Mikhnev ajoute que l'innovation ne fait pas simplement référence à de nouvelles technologies ; l'innovation vient de tous les domaines de la société. Dans de nombreux pays, il se peut qu'il n'existe pas de possibilités de mettre en place une technologie ou l'accès aux innovations technologiques peut ne pas être aussi aisé que dans les pays développés. Les innovations peuvent aller au-delà de la technologie et l'aspect fondamental du « capital humain » se fonde sur un concept qui favorise les besoins des consommateurs et qui est adapté aux besoins nationaux de chaque pays.

16. Sur l'importance d'une échelle de temps de référence pour la métrologie

M. Noël Dimarcq, directeur de recherche au CNRS (France), donne une présentation invitée intitulée « Sur l'importance d'une échelle de temps de référence pour la métrologie ». Il présente brièvement la nécessité de disposer d'une échelle de temps de référence, le Temps universel coordonné (UTC), et explique que les utilisateurs finaux ont besoin que leurs horloges soient synchronisées à une échelle de temps de référence commune pour de nombreuses applications, parmi lesquelles les transports, les télécommunications et les réseaux de distribution de l'énergie, les systèmes de positionnement par satellite (GPS), l'économie et les finances, ainsi que des applications scientifiques. La synchronisation des horloges est requise à différentes échelles, au niveau local, régional ou mondial. Par ailleurs, les horloges au sol doivent être synchronisées avec celles des satellites des systèmes globaux de navigation par satellite (GNSS). Différents niveaux de précision sont également nécessaires, de la seconde à la nanoseconde, en fonction des applications.

M. Dimarcq illustre l'importance pour la science de disposer d'une échelle de temps de référence en citant l'anomalie survenue en 2011 concernant des neutrinos qui avaient parcouru le trajet entre le CERN (Genève) et leur point d'arrivée à Gran Sasso (Italie) plus rapidement que la lumière. Le temps de propagation exact entre les deux laboratoires était connu d'après la distance. L'effet inattendu qui a été observé a été le suivant : les neutrinos sont arrivés plus vite que ne l'aurait fait la lumière, avec une différence de 20 mètres ou 60 nanosecondes. Cela indiquait que la vitesse des neutrinos était supérieure à celle de la lumière. Ce phénomène n'est pas possible, à moins de s'éloigner de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. Après d'importantes recherches afin de vérifier ce résultat, il s'est avéré que l'anomalie était en fait due à une erreur de synchronisation d'un instrument.

Un autre exemple concerne la synchronisation des réseaux, en particulier les systèmes globaux de navigation par satellite (GNSS). Le positionnement et le temps peuvent être déterminés à l'aide d'un récepteur GNSS en mesurant le temps de propagation entre des satellites et le sol. Ces satellites embarquent des horloges synchronisées et une erreur temporelle d'1 nanoseconde équivaut à une erreur de positionnement au sol de 30 cm. Bien que cela ne constitue pas un problème pour déterminer la position exacte d'un véhicule, lorsqu'un système GNSS est utilisé pour mesurer le mouvement de plaques tectoniques ou déterminer le niveau de la mer dans le cadre d'une surveillance à long terme, une erreur de positionnement inférieure à 1 cm est requise. L'exactitude du positionnement repose à la fois sur la synchronisation des horloges des satellites et sur l'estimation correcte du temps de propagation des signaux depuis les satellites jusqu'au sol. Différents types de systèmes GNSS existent actuellement, tels que le GPS, GALILEO et BeiDou, c'est pourquoi il est essentiel que ces divers systèmes soient synchronisés par rapport à la même échelle de temps de référence (UTC) afin d'assurer leur interopérabilité.

Dans le secteur financier, en particulier dans le cas des transactions mondiales à haute fréquence, des systèmes de transaction à réponse rapide sont requis afin de réduire au maximum les temps d'attente. L'exactitude de l'horodatage est essentielle afin d'éviter toute erreur ou fraude volontaire concernant les ordres d'achat. M. Dimarcq donne des exemples de problèmes générés par de telles erreurs de synchronisation ou fraudes. Ainsi, les organismes de réglementation du monde entier requièrent un horodatage précis et traçable à l'UTC afin d'éviter tout retard fictif.

M. Dimarcq décrit la méthode de synchronisation, de l'échelle internationale de temps de référence (UTC) calculée au BIPM jusqu'aux horloges des utilisateurs finaux, en passant par les échelles nationales de temps atomique et les horloges intermédiaires. Il explique les techniques de synchronisation depuis les horloges maîtresses vers les horloges asservies, qui se fondent sur le radio pilotage, les systèmes GNSS, les satellites de télécommunication géostationnaires et la fibre optique.

Il souligne qu'il est important de disposer de plusieurs techniques afin de vérifier les erreurs de synchronisation qui peuvent être causées par l'horloge ou par la liaison horaire.

La synchronisation entre horloges maîtresses et horloges asservies a ses limites en raison de la propagation du signal. Il est nécessaire de connaître le temps de propagation et d'atténuer ses fluctuations pour parvenir à une synchronisation exacte. Selon l'état actuel de l'art, l'exactitude de la synchronisation intercontinentale est approximativement d'1 nanoseconde. Des améliorations sont prévues avec de nouvelles techniques par satellites et avec les techniques utilisant la fibre. En outre, il est nécessaire de prendre en considération les effets relativistes. Les effets relativistes d'Einstein, s'ils ne sont pas corrigés, peuvent générer une erreur de 40 000 nanosecondes après 1 journée pour les horloges des satellites GNSS, ce qui équivaudrait à une erreur de positionnement de 12 km.

M. Dimarcq souligne l'importance de disposer d'une échelle de temps liée à la définition de l'unité de temps du SI. Par le passé, l'échelle de temps de référence était calculée à partir de la rotation de la Terre, qui n'est pas régulière. Depuis 1967, la seconde est réalisée à l'aide d'horloges primaires à césium. Actuellement, les horloges ultra-stables à césium refroidi par lasers présentent une exactitude d'environ 10^{-16}. M. Dimarcq explique ensuite comment le BIPM calcule l'échelle de temps de référence, UTC, ainsi que les différences entre UTC(k) et UTC, qui sont publiées chaque mois dans la *Circulaire T* du BIPM.

M. Dimarcq conclut en insistant sur le fait qu'il est indispensable de disposer d'une seule échelle de temps de référence internationale (liée à la seconde du SI) pour des applications stratégiques dans une large gamme de domaines. Il met l'accent sur le rôle central que joue le BIPM dans le calcul de l'UTC au niveau international et sur le besoin d'assurer la traçabilité de l'ensemble des échelles de temps nationales à l'UTC. La qualité remarquable de la réalisation de la seconde du SI (et de l'UTC) peut être attribuée aux horloges atomiques ultra-stables ; toutefois, les performances des horloges optiques dépassent désormais de deux ordres de grandeur celles des fontaines à césium à atomes refroidis, ce qui peut ouvrir la voie à une éventuelle redéfinition de la seconde.

17. Rapport du président du CCTF

M. Luc Érard, président du Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), présente son rapport sur les activités du CCTF depuis la 25e réunion de la CGPM (2014).

Résumé du rapport du CCTF

Le CCTF soutient activement les activités de recherche et de coordination concernant le développement d'étalons primaires et secondaires de fréquence, de techniques de comparaisons de temps et de fréquence, et d'algorithmes. Des efforts particuliers ont été consacrés au développement et à l'évaluation d'étalons secondaires de fréquence fondés sur des transitions optiques. Le CCTF a coordonné une comparaison clé, CCTF-K001.UTC, à partir de la réalisation de l'échelle de temps de référence internationale, l'UTC. Le CCTF a établi des liens étroits avec les communautés scientifiques et industrielles afin de promouvoir les avantages mutuels de l'utilisation d'une unique échelle de temps de référence et du développement de la métrologie du temps et des fréquences.

Domaine de compétence du CCTF

Le CCTF est en charge de la définition et de la réalisation de la seconde du SI, de la construction d'une échelle de temps de référence stable et exacte qui permette d'accéder à la seconde du SI et de réaliser un temps coordonnée afin de pouvoir dater les événements. Le CCTF promeut et soutient la recherche dans tous les domaines connexes par l'intermédiaire de ses neuf groupes de travail et soutient la comparabilité mondiale des mesures et la traçabilité à la référence internationale, l'UTC (Temps universel coordonné), réalisée au BIPM.

Le CCTF coopère avec des organisations internationales aux intérêts divers à l'égard de la métrologie du temps et des fréquences, qui couvrent un large éventail d'applications telles que la navigation par satellite à couverture globale, la datation horaire, la géodésie, l'astronomie et les télécommunications.

Stratégie

Le document de stratégie du CCTF a été préparé par le Groupe de travail du CCTF sur la stratégie, sous la direction du président du CCTF. La stratégie est disponible sur le site internet du BIPM.

La stratégie du CCTF suit les trois objectifs définis dans la Décision CIPM/106-16 :

- faire progresser l'état de l'art en offrant aux laboratoires nationaux de métrologie un forum mondial d'échange d'informations sur l'état de l'art et les meilleures pratiques,
- définir de nouvelles possibilités pour que la métrologie ait un impact sur les défis mondiaux liés aux mesures, en facilitant le dialogue entre les laboratoires nationaux de métrologie et les parties prenantes nouvelles ou existantes,
- démontrer et améliorer la comparabilité mondiale des mesures, en particulier en travaillant avec les organisations régionales de métrologie dans le cadre du CIPM MRA afin :
    - de planifier, conduire et superviser les comparaisons clés, et
    - de soutenir le processus d'examen des CMCs.

Le CCTF a identifié ses diverses parties prenantes, parmi lesquelles : les laboratoires nationaux de métrologie et autres laboratoires qui réalisent la seconde localement et maintiennent une échelle de temps, les organismes internationaux représentant des communautés d'utilisateurs, des fournisseurs de services, des services scientifiques, ainsi que des agences de réglementation. L'un des éléments clés de la stratégie du CCTF est d'assurer une communication efficace avec ces parties prenantes puisqu'elles fournissent au CCTF des retours et commentaires sur ses activités et sur l'impact du travail du BIPM.

Le document de stratégie met en lumière les activités fondamentales du CCTF pour le moyen terme et le long terme :

- conduire des études sur les échelles de temps pour différentes applications ; soutenir le développement de nouvelles applications pour atteindre une exactitude élevée des mesures de temps et, afin de tirer parti des avancées effectuées concernant les méthodes de dissémination du temps, continuer à développer des prédictions plus rapides de l'UTC ;
- intégrer de nouvelles méthodes de comparaison d'horloges et de dissémination du temps afin d'améliorer l'exactitude, réduire les coûts, faciliter l'accessibilité aux échelles de temps et permettre la coexistence avec d'autres utilisateurs de l'infrastructure ;
- développer une gamme d'étalons primaires transportables et de haute exactitude qui permettront de confirmer les performances de nouvelles méthodes innovantes de comparaisons d'horloges sur de longues distances ; cette activité sera importante car les étalons primaires de haute exactitude vont commencer à concurrencer les meilleures techniques disponibles de comparaison de temps et de fréquence ;

- développer des algorithmes pour les mesures de temps et de fréquence en s'attachant principalement à généraliser leur utilisation précise et leur compréhension ;
- promouvoir l'évaluation et la comparaison de la stabilité, de l'incertitude et de la reproductibilité des horloges optiques fondées sur le même ion et les mêmes espèces d'atomes, en vue de préparer la redéfinition à venir de la seconde ;
- encourager le BIPM à développer des comparaisons de temps fondées sur de multiples techniques et à mettre en œuvre des solutions rapides de prédiction de l'UTC ;
- suivre l'évolution des systèmes globaux de navigation par satellite (GNSS) et de leurs échelles de temps internes.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Depuis la 25e réunion de la CGPM (2014), le CCTF s'est réuni deux fois, en septembre 2015 et en juin 2017. La réunion de 2017 s'est exceptionnellement tenue deux ans après la précédente car l'objectif était de proposer à la CGPM à sa 26e réunion (2018) une résolution sur la définition des échelles de temps. En dépit de demandes officielles, une définition formelle n'a jamais été adoptée par la CGPM à ce sujet. Tous les groupes de travail du CCTF se sont réunis de façon régulière.

Les principales activités menées par le CCTF sont présentées ci-après.

- *Réalisation et utilisation des étalons primaires et secondaires*

  De nouvelles fontaines à césium ainsi que de nouveaux étalons de fréquence optiques utilisés comme représentations secondaires de la seconde ont été développés par les laboratoires nationaux de métrologie : sous la coordination du Groupe de travail du CTTF sur les étalons primaires et secondaires de fréquence, les résultats obtenus à l'aide de ces fontaines et étalons ont été transmis au BIPM pour le pilotage du Temps atomique international (TAI). En 2017, le BIPM a reçu les données de six fontaines à césium, deux étalons à faisceau de césium fonctionnant en continu comme des horloges, et trois étalons secondaires fondés sur des atomes de Rb et Sr. En 2018, les résultats de mesure d'une fontaine à césium supplémentaire et d'un nouvel étalon secondaire fondé sur l'atome de Sr ont également été intégrés.

- *Horloges optiques et fréquences recommandées*

  Différentes transitions atomiques optiques sont actuellement étudiées et des expériences de mesure de haute précision sont en cours ; elles sont fondées sur différentes espèces d'atomes et d'ions afin de démontrer qu'il est possible d'atteindre une exactitude de 10^{-18}. Le Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence a établi en 2017 une liste à jour des fréquences étalons recommandées comme représentations secondaires de la seconde.

- *Développement des liaisons par fibre optique et autres liaisons avancées pour les comparaisons de temps et de fréquence*

  Les liaisons par fibre optique (temporaires et permanentes) ont commencé à être opérationnelles entre les laboratoires du temps et permettent de tester les aptitudes de ces derniers en matière de comparaison de temps et de fréquence de très haute exactitude. En particulier, des développements rapides ont été réalisés par les laboratoires européens avec le soutien de l'EURAMET et le réseau de fibre optique se développe dans différentes parties du monde. Le BIPM évalue la possibilité d'utiliser la fibre optique pour le calcul de l'UTC et d'installer une connexion par fibre entre le BIPM et le réseau européen avec pour objectif de valider les techniques d'étalonnage GNSS.

La technique de comparaison bidirectionnelle de temps et de fréquences sur satellite a été améliorée par une nouvelle technique fondée sur un récepteur SDR (Software Defined Radio) actuellement en développement et en cours de test dans plusieurs laboratoires du temps. Les résultats obtenus jusqu'à présent concernant la chaîne de réception sont encourageants et le Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons bidirectionnelles de temps et de fréquence sur satellite a créé un sous-groupe afin de développer et tester cette technique par un travail de collaboration.

– *Amélioration des comparaisons de temps à l'aide des systèmes GNSS et étalonnage de ces systèmes*

L'existence de nouveaux systèmes GNSS, tels que le système européen Galileo et celui chinois BeiDou, ouvre la possibilité de comparaisons de temps multi-constellations qui seront utilisées par les laboratoires nationaux de métrologie et le BIPM pour les comparaisons d'horloges et serviront au calcul de l'UTC. Des essais sont en cours dans différents laboratoires.

Les fournisseurs de services GNSS collaborent directement avec certains laboratoires de temps afin d'étayer leurs propres systèmes de temps et leur synchronisation à l'UTC.

La coopération entre le BIPM et les organisations régionales de métrologie a été formalisée afin de maintenir l'étalonnage régulier des équipements GNSS utilisés pour le calcul de l'UTC, l'objectif étant de réduire au niveau mondial l'incertitude des comparaisons de temps en dessous de 2-3 ns. Des directives pour l'étalonnage des systèmes GNSS ont été préparées par le Département du temps du BIPM et distribuées aux organisations régionales de métrologie. Les campagnes d'étalonnages effectuées selon cette nouvelle organisation se poursuivent.

– *Amélioration des algorithmes pour le calcul de l'UTC et de l'UTC rapide*

Des améliorations continues concernant les algorithmes permettant de traiter les données d'horloges servant au calcul de l'UTC et de l'UTC rapide (UTCr) sont étudiées et testées au BIPM. L'algorithme pour l'UTCr a été modifié en 2017 afin que l'accord entre l'UTCr et l'UTC soit le plus proche possible. Depuis, la différence est restée inférieure à 2 ns. La solution hebdomadaire UTCr a été publiée de façon régulière depuis juin 2013.

Un effort important a concerné l'évaluation de l'incertitude des différences UTC - UTC(k) en prenant en considération les corrélations et les biais dus à l'absence d'étalonnage.

– *Promotion de l'utilisation de l'UTC comme unique échelle de temps de référence*

Le CCTF et le BIPM ont contribué de façon active aux discussions sur la possible modification de la définition de l'UTC. Le BIPM et plusieurs laboratoires nationaux de métrologie soutiennent les activités du Groupe de travail 7A de l'Union internationale des télécommunications, Secteur radiocommunications (UIT-R) ; ils ont notamment participé à la Conférence mondiale des radiocommunications de 2015 (CMR-2015) et travaillent ensemble afin de parvenir à une compréhension commune de l'intérêt de disposer d'une échelle de temps de référence unique.

Le BIPM et des laboratoires de temps contribuent également à l'International GNSS Committee des Nations Unies afin d'harmoniser les différents systèmes de temps et de navigation.

Défis et difficultés

Il est désormais prouvé qu'il est possible d'atteindre une exactitude de 10^{-18} pour la prochaine génération d'étalons de fréquence, c'est pourquoi il devient urgent et critique de développer des techniques de comparaisons de temps et de fréquence présentant les mêmes performances. Les techniques utilisant la fibre optique sont prometteuses mais présentent des difficultés intrinsèques pour établir des liaisons intercontinentales et des processus complexes et onéreux doivent être suivis pour obtenir des contrats de longue durée auprès des fournisseurs de fibre optique.

Un certain nombre de nouveaux laboratoires du temps ont été mis en place, en particulier dans les pays et économies en développement. Leur objectif est de disséminer les mesures de temps et de fréquences et de soutenir leurs besoins nationaux en termes d'étalonnage. Il est ainsi nécessaire de prendre en considération un besoin émergent en matière d'éducation et de renforcement des capacités pour que ces laboratoires puissent développer et mettre en œuvre de façon adéquate leur métrologie du temps et des fréquences.

De nombreuses applications qui ne concernent pas uniquement la gestion du temps nécessitent des échelles de temps : c'est le cas par exemple des systèmes GNSS ou de télécommunications. Il est difficile de limiter la prolifération de nouvelles échelles de temps, ce qui risque, avec l'existence du TAI, de l'UTC et de l'UTCr, de créer une certaine confusion, en particulier lorsque ces diverses échelles diffèrent d'un nombre entier de secondes.

Perspectives à court terme et à long terme

Les principaux domaines de recherche au cours de ces prochaines années devraient être les suivants :

- développement des étalons de fréquence optiques et de leurs applications, y compris leur intégration dans le calcul de l'UTC, découlant sur une possible redéfinition de la seconde ;
- test et développement de nouvelles techniques ou de techniques améliorées de comparaisons de temps et de fréquence permettant de disséminer la qualité des étalons de fréquence optiques sur de longues distances ;
- amélioration de la qualité et de la disponibilité de la référence internationale, l'UTC, et de son approximation nationale en temps réel réalisée par les laboratoires nationaux de métrologie afin de soutenir l'adoption et la reconnaissance au niveau international d'une échelle de temps de référence unique ;
- collaboration avec d'autres communautés scientifiques et industrielles afin d'identifier leurs besoins en matière de mesures de temps et de fréquence et pouvoir répondre aux défis en en tirant des avantages mutuels.

Données sur le CCTF

CCTF établi en 1956 sous le nom de Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), puis renommé CCTF en 1997

Président : L. Érard — Secrétaire exécutive : P. Tavella

Composition : 25 membres, 5 organismes de liaison, 4 observateurs

Réunions depuis la 25e réunion de la CGPM : 17-18 septembre 2015, 8-9 juin 2017

Neuf groupes de travail :
- Algorithmes pour les échelles de temps
- Coordination de la mise au point de techniques avancées de comparaison de temps et de fréquences
- Comparaisons de temps à l'aide de systèmes GNSS
- CIPM MRA
- Étalons primaires et secondaires de fréquence
- Stratégie
- Temps atomique international (TAI)
- Comparaisons bidirectionnelles de temps et de fréquence sur satellite
- Étalons de fréquence (Groupe de travail commun au CCL et au CCTF)

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s)
Comparaisons clés du CCTF (et comparaisons supplémentaires)	1, mensuelle	en continu (+1)	en continu
Comparaisons du BIPM	0	0	0
Études pilotes du CCTF	0	0	0
CMCs	776 CMCs dans 19 catégories de service publiées dans la KCDB		

Le président de la CGPM remercie M. Dimarcq et M. Érard pour leur rapport et demande s'il y a des questions.

M. Phillips observe que la relativité générale affecte le temps, ce qui permet de mesurer le potentiel de pesanteur. Comme le niveau moyen de la mer change, il demande quelles seraient les implications si le niveau moyen de la mer changeait de façon conséquente alors qu'il est possible de mesurer la fréquence à une exactitude de 10^{-18} et que l'effet de la relativité générale est de 10^{-16} par mètre. Il poursuit en posant la question de savoir comment le potentiel de pesanteur au niveau moyen de la mer serait affecté si le niveau de la mer monte, que les calottes glaciaires fondent et que la compression des sols varie. On s'attend à ce que l'évolution du niveau moyen de la mer soit de cet ordre de grandeur au cours du prochain siècle. M. Phillips demande quelle serait l'incidence sur ce que constitue une seconde. M. Érard répond que la seconde devrait être redéfinie avec une incertitude de fréquence de l'ordre de 10^{-18}, ce qui signifie que l'effet gravitationnel sera très important ; chaque fois qu'une horloge sera déplacée d'un mètre, cela aura un effet perceptible. Si la seconde est redéfinie et qu'une incertitude-type de 10^{-18} est obtenue, on n'aura plus seulement une horloge mais un altimètre. Il est important de prendre en considération l'effet relativiste par rapport au niveau de la mer. M. Dimarcq ajoute qu'il sera très important de redéfinir le concept de géoïde. Il observe que les horloges atomiques sont sensibles à l'altitude : ainsi, lorsqu'il est nécessaire de comparer des horloges à distance, il n'est pas possible de savoir si l'on est confronté à un décalage relativiste ou à un décalage d'horloge dû au fonctionnement intrinsèque de l'horloge. Il sera nécessaire de

développer un nouveau concept concernant une surface de référence, que ce soit le géoïde ou un équivalent. À moyen terme, il pourrait être important d'avoir des horloges atomiques dans l'espace car le potentiel gravitationnel peut y être contrôlé.

18. Présentation et vote du Projet de résolution B

M. Érard présente le Projet de résolution B « Sur la définition des échelles de temps ». Il indique que l'UTC est l'échelle de temps de référence pour la coordination mondiale du temps. L'UTC est la base du temps civil dans différents pays et est recommandé comme temps de référence dans plusieurs normes internationales, la plus récente étant la directive européenne MiFID II (2018) relative à l'horodatage des transactions financières. L'UTC est calculé par le BIPM en combinant les données de 450 horloges provenant de 80 laboratoires nationaux. Les approximations en temps réel d'UTC, dénommées UTC(k), sont réalisées et disséminées par les laboratoires du temps. L'UTC se fonde sur le Temps atomique international (TAI) et a été ajusté depuis le début des années 70 afin de tenir compte de la rotation de la Terre.

M. Érard ajoute qu'en dépit de plusieurs résolutions et recommandations, la CGPM n'a jamais adopté de définition officielle du TAI et de l'UTC. La Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 14e réunion (1971) demande au CIPM de donner une définition du TAI et de prendre les mesures nécessaires, en accord avec les organisations internationales intéressées, pour que les compétences scientifiques et les moyens d'action existants soient utilisés au mieux pour la réalisation de l'échelle du TAI, et pour que soient satisfaits les besoins des utilisateurs du TAI. Par ailleurs, le TAI a été défini par le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), actuellement dénommé CCTF, en 1970 et en 1980. La Recommandation S 2 (1970) mentionne que « [l]e Temps Atomique International est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau International de l'Heure sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde […]. » La CGPM a ensuite seulement pris note de cette recommandation. En 1980, cette définition a été améliorée par une déclaration du CCDS : « le TAI est une échelle de temps coordonnée définie dans un repère de référence géocentrique avec comme unité d'échelle la seconde du SI telle qu'elle est réalisée sur le géoïde en rotation. » Cependant, aucune résolution de la CGPM n'a fait suite à cette déclaration.

La CGPM à sa 15e réunion (1975) note que l'UTC est utilisé dans le monde entier et estime son emploi parfaitement recommandable (Résolution 5). Toutefois, cette résolution ne concerne que l'utilisation de l'UTC et ne couvre pas la définition de l'UTC ni celle du TAI. Depuis 1975, des systèmes de temps-coordonnée de référence ont été clairement définis dans le cadre de la relativité générale (Union astronomique internationale (UAI) 1991, 2000). Plusieurs organisations internationales utilisent des échelles de temps de référence dans leurs divers domaines d'application. L'Union internationale des télécommunications (UIT) a décidé en 2015 de renforcer la coopération du Secteur Radiocommunications de l'UIT (UIT-R) avec le BIPM afin d'étudier davantage les nombreux aspects des échelles de temps de référence. M. Érard ajoute que la mission du BIPM est d'assurer et de promouvoir la comparabilité mondiale des mesures, en fournissant notamment un système international d'unités cohérent. C'est pourquoi il est proposé de définir le TAI et l'UTC :

– Le Temps atomique international (TAI) est une échelle de temps continue produite par le BIPM à partir des meilleures réalisations de la seconde du SI. Le TAI est une réalisation du Temps terrestre (TT) ayant la même marche que TT, tel que défini par l'UAI dans sa Résolution B1.9 (2000).

– Le Temps universel coordonné (UTC) est une échelle de temps produite par le BIPM ayant la même marche que le TAI mais différant du TAI par un nombre entier de secondes seulement.

Ces définitions sont incluses au Projet de résolution B, dont le texte est disponible dans la Convocation de la Conférence générale des poids et mesures à sa 26e réunion (voir Annexe A). M. Érard précise qu'une modification mineure a été apportée au Projet de résolution B : le terme « décide » a été remplacé par « confirme ». Le Projet de résolution B, tel que proposé, a été approuvé par le CCTF lors de sa réunion de 2017 et par le CIPM lors de sa session de juin 2018 ; il a également été présenté au Groupe de travail concerné de l'UIT. À l'exception du remplacement d'un terme, il a ainsi été largement accepté.

Le président de la CGPM remercie M. Érard et passe au vote du Projet de résolution B. Il rappelle que les délégués sont parvenus à un accord général sur le texte du projet de résolution, avec une seule modification mineure (le terme « décide » a été remplacé par « confirme »). Le président de la CGPM procède au vote à main levée concernant le Projet de résolution B : ce dernier est adopté à l'unanimité comme Résolution 2 « Sur la définition des échelles de temps ».

19. Rapport du président du CCL

M. Ismaël Castelazo, président du Comité consultatif des longueurs (CCL), présente son rapport sur les activités du CCL depuis la 25e réunion de la CGPM (2014).

Résumé du rapport du CCL

Le CCL est responsable des questions concernant la définition et la réalisation du mètre, les mesures de longueur et d'angle, et la métrologie des coordonnées. Le CCL apporte également des conseils au CIPM dans le domaine de la métrologie des longueurs. En outre, le CCL est responsable de la mise en œuvre, dans le domaine des longueurs, de certains aspects du CIPM MRA, arrangement par lequel les laboratoires nationaux de métrologie reconnaissent mutuellement leurs mesures.

Le CCL maintient un portefeuille de comparaisons clés qui a été optimisé afin de couvrir la gamme la plus large possible de CMCs. Pour ce faire, le Groupe de travail du CCL sur le CIPM MRA a travaillé sur un vaste ensemble de documents d'orientation, protocoles de comparaison et modèles de rapport qui sont en libre accès. Le Groupe de travail du CCL sur la nanométrologie dimensionnelle a été très actif en termes de comparaisons visant à soutenir ce domaine, avec plusieurs comparaisons clés réalisées et d'autres en cours.

Le domaine des longueurs a une incidence majeure sur la plupart des activités humaines actuelles ; le CCL veille à ce que les besoins de la société, de la recherche et de l'industrie soient satisfaits, en établissant des collaborations avec les organisations et communautés d'utilisateurs pertinentes.

Concernant les perspectives d'avenir, le CCL s'oriente vers de nouveaux domaines tels les suivants : développer la nanométrologie dimensionnelle en 3D, soutenir le passage de l'industrie au balayage de surface sans contact (secteurs de la santé et de l'énergie), étendre la traçabilité de la métrologie en 3D à des dimensions plus grandes (aérospatiales, ingénierie civile de précision), compenser les effets d'indice de réfraction et les effets thermiques à différentes échelles, et résoudre les problèmes de traçabilité aux échelles nanométrique et subnanométrique (sciences avancées). La transition vers des mesures intégrées au processus de fabrication représente un changement de paradigme, qui s'écarte du rôle traditionnellement joué par les laboratoires d'étalonnage. Ces nouveaux domaines,

et les nouveaux besoins qu'ils feront naître, augmenteront la charge de travail du CCL et de ses membres dans les années à venir.

Domaine de compétence du CCL

Les activités du CCL comprennent les mesures pratiques de longueurs et d'angles (d'une seule dimension jusqu'à la 3D et de l'échelle subnanométrique jusqu'à des dizaines ou centaines de mètres) et les futurs étalons optiques de fréquence (pour la réalisation du mètre).

Le travail du CCL peut également porter sur des questions connexes telles que la science des surfaces à l'échelle nanométrique, les propriétés thermiques des artéfacts et instruments, la compensation de l'effet de réfraction pour la propagation des faisceaux optiques, la physique des lasers, l'optique, l'instrumentation, l'interférométrie, la conception mécanique, les logiciels mathématiques et le traitement de données, ainsi que la modélisation avancée. Ainsi, certaines activités du CCL recoupent celles de onze des quinze domaines techniques du Versailles Project on Advanced Materials and Standards (VAMAS) : une collaboration plus étroite avec le VAMAS est donc envisagée.

Stratégie

Afin d'assurer le plus haut niveau d'efficacité, le CCL est soutenu par quatre groupes de travail. Le Groupe de travail sur la stratégie supervise de façon régulière la révision de la stratégie du CCL et des documents associés ; il rassemble et rend disponibles les informations démontrant l'importance continue de la métrologie des longueurs. Le Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle a pour mission d'harmoniser les voies de traçabilité, la terminologie et les étalons de référence pour les utilisateurs des nanosciences. Le Groupe de travail sur le CIPM MRA assure la coordination des comparaisons clés et supplémentaires du CCL et des organisations régionales de métrologie ; il maintient des liens avec les organisations régionales de métrologie afin de s'assurer de la participation des laboratoires membres du CCL dans les comparaisons importantes dans le domaine des longueurs, ce qui permet de garantir la traçabilité et l'équivalence mondiales des mesures de longueur au plus haut niveau d'exactitude ; et il facilite le processus d'examen interrégional des CMCs. Par l'intermédiaire du Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence, le CCL coordonne le travail sur les nouvelles réalisations du mètre à l'aide d'étalons optiques de fréquence.

Le CCL a mis en place un certain nombre de groupes de discussion techniques, ouverts à des participants qui ne sont pas membres du CCL, où des spécialistes discutent des nouveaux étalons, des récents progrès scientifiques et des principales activités de recherche en cours aux niveaux régional et international dans le but d'optimiser l'échange d'informations et de soutenir la recherche coopérative.

En 2018, le CCL a révisé sa stratégie afin de prendre en considération les besoins actuels et à venir en métrologie des longueurs. Les conclusions du document de stratégie identifient de façon synthétique deux exigences générales pour les années à venir :

- anticiper les besoins à venir en termes d'instrumentation, de normalisation et de traçabilité dans les domaines émergents scientifiques et industriels, sur une grande variété d'échelles de longueur et selon diverses conditions de mesure ;
- atteindre l'efficacité maximale dans la mise en œuvre des procédures du CIPM MRA afin de réduire les coûts incombant aux laboratoires de métrologie dans toutes les régions tout en contribuant à assurer la reconnaissance mutuelle.

Futurs objectifs scientifiques

La métrologie dimensionnelle, traçable au mètre du SI, étaye dans le monde entier les secteurs de la fabrication, de l'assemblage et de la construction, de l'échelle du nanomètre (nanosciences) à l'échelle macroscopique du mètre (industrie automobile, santé, ingénierie de précision) et au-delà (aérospatiale, construction navale, relèvements pour la cartographie). Les entreprises impliquées dans le commerce international sont particulièrement attentives à la question de la traçabilité, en particulier lorsqu'elles s'approvisionnent dans le monde entier en composants et assemblages. La métrologie dimensionnelle traditionnelle constitue un domaine mature et bien établi et la révision du SI aura un impact minimum sur le travail du CCL. Les demandes des clients externes et les grands défis à relever (concernant la qualité de vie, les besoins énergétiques, la santé et l'environnement) définissent le programme de recherche des membres du CCL.

1. Continuer à améliorer et élargir l'accès aux réalisations pratiques du mètre

Il est nécessaire d'étudier, aux échelles nanométrique et subnanométrique (où les longueurs d'onde des étalons optiques de fréquence sont « trop grandes »), de nouvelles voies de traçabilité au mètre du SI tout en continuant les recherches en cours sur les réalisations du mètre par des mises à jour de la liste des fréquences étalons. Cela permettra d'améliorer l'exactitude des mesures et la traçabilité dans le domaine de la nanométrologie dimensionnelle, ce qui diminuera la dépendance de la nano-industrie vis-à-vis des processus « verticaux ».

Le Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle a étudié de nouvelles voies de traçabilité pour les mesures de longueur aux échelles nanométrique et subnanométrique. Lors de la réunion de 2016 du Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle, il est apparu clairement que le paramètre de réseau du silicium avait le potentiel de constituer une nouvelle voie de traçabilité, pour la microscopie électronique à transmission, la microscopie à force atomique et la métrologie des déplacements. Lors de la réunion de 2018 au BIPM, les trois voies de traçabilité pour la métrologie des longueurs à l'aide du paramètre de réseau du silicium mentionnées par CODATA ont été présentées. Pour générer et mesurer le déplacement, l'interférométrie à rayons x est utilisée. Des échantillons de silicium comprenant des anneaux empilés de régions planes à l'échelle atomique, séparés verticalement par une distance correspondant à l'espacement du réseau d_{111} du silicium (0,314 nm), ont été produits et peuvent être utilisés comme étalons de hauteur de marches pour la microscopie à force atomique ou la microscopie d'interférence optique. Pour la microscopie électronique à transmission, un comptage direct des atomes dans un pilier en silicium est possible. Ces propositions ont été présentées au CCL et seront intégrées à la mise en pratique révisée comme réalisations secondaires du mètre.

2. Apporter l'aide du CCL dans de nouveaux domaines

Le Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle a été proactif dans ce domaine en travaillant sur le paramètre de réseau du silicium qui est un élément essentiel pour l'industrie des semi-conducteurs. Parmi les autres bénéfices que la nanométrologie devrait apporter aux utilisateurs finaux figure l'amélioration de la compatibilité biologique des dispositifs nanométriques (médecine). Une série d'études pilotes a été menée avec succès puis ces études pilotes ont été renommées comparaisons supplémentaires du CCL. Il est prévu que le CCL lance d'autres études pilotes (sur les étalons à semi-conducteurs) et qu'il continue à apporter des conseils et contributions sur la normalisation ISO dans ce domaine :

- Nano 6 : comparaison de largeur de traits (silicium), achevée en 2017 ;
- Nano 1 : comparaison de photomasques, protocole technique en cours de préparation par la PTB et début de comparaison prévue en 2019 ;

- Comparaison sur les nanoparticules : comparaison achevée, pilotée par le CMS/ITRI et le NMIJ et impliquant sept méthodes de mesure et cinq échantillons (1 nano-or, 1 nano-argent et 3 latex de polystyrène) ;
- EURAMET 1239 : mesure de rugosité surfacique par microscopie à force atomique, comparaison reportée mais sur le point de commencer ;
- EURAMET 1242 : mesure de paramètres de rugosité aérienne, comparaison achevée en 2018 ;
- Comparaison de haute précision de planéité au-delà de 300 mm, comparaison en cours de discussion.

Le Groupe de discussion 6 sur la métrologie des mesures de coordonnées a analysé la question des CMCs qui reposent sur des mesures prises à l'aide de dispositifs polyvalents populaires, telles que les machines de mesure de coordonnées, ainsi que la question de la préférence de l'industrie pour des mesures optiques sans contact effectuées sur place (en dépit d'un manque de traçabilité et d'une exactitude moindre par rapport aux techniques de contact, ces mesures, du fait de leur rapidité, sont préférées par les utilisateurs). Ce sujet de discussion présente des avantages pour des utilisateurs dans le domaine de la production d'énergie (connecteurs pour les conduites de gaz et de pétrole, engrenages pour les éoliennes, écrans de confinement du plasma dans les réacteurs à fusion) et de la santé (validation de la tomographie à rayons x assistée par ordinateur, prothèses évoluées).

Bien que constituant un domaine de recherche bien établi pour de nombreux laboratoires nationaux de métrologie, la métrologie ou géodésie sur de longues distances représente un sujet relativement nouveau pour certains autres. Toutefois, ce domaine prend de l'importance (dans l'aérospatiale, la géodésie et les opérations de relèvement pour la cartographie, la vérification de la localisation par GPS, l'ingénierie civile, les projets scientifiques de grande envergure tels que le successeur au grand collisionneur de hadrons (LHC), les grands télescopes optiques). Les parties qui bénéficient des avancées dans ce domaine sont d'abord les entreprises fabriquant des produits de grande taille (comme dans l'aérospatiale et le nucléaire civil) où l'automatisation améliorée par la métrologie et la métrologie sur site permettront de diminuer la durée des cycles de fabrication et réduiront les coûts des composants onéreux nécessitant un long délai de production.

Futurs objectifs du CIPM MRA

Afin de réduire les coûts liés à la mise en place des procédures du CIPM MRA au sein du CCL et d'anticiper les problèmes que pourrait poser le soutien continu au CIPM MRA, le CCL a concentré son travail ces dernières années sur la mise en œuvre efficace du CIPM MRA. Ainsi, le CCL a développé, via son Groupe de travail sur le CIPM MRA, plusieurs stratégies afin de réduire la charge de travail liée au CIPM MRA pour les laboratoires membres du CCL tout en fournissant suffisamment de données pour étayer les CMCs. Depuis sa création, le CCL évalue quel sera l'impact du CIPM MRA pour ses membres en termes de temps et de ressources et s'efforce de réduire les inconvénients et les coûts liés à la mise en œuvre du CIPM MRA et au soutien continu du CCL en la matière. Ce travail continu a trois objectifs : réduire la charge de travail liée au pilotage de comparaisons, réduire le portefeuille de comparaisons clés et réduire la charge de travail des laboratoires membres du CCL. Le CCL a optimisé l'utilisation des données de comparaisons pour étayer les CMCS en établissant des classifications de compétences et en donnant aux laboratoires d'accréditation des orientations claires quant au nombre minimum de comparaisons requis, ce qui a permis de réduire le nombre de comparaisons et d'accroître la confiance vis-à-vis des données fournies par les laboratoires pour étayer les CMCs. Le Groupe de travail sur le CIPM MRA a également préparé un large éventail de guides pratiques, protocoles de comparaison et modèles de rapport qui peuvent être utilisés par les laboratoires pilotant des comparaisons clés et supplémentaires. Ces documents gratuitement disponibles viennent compléter les versions publiquement accessibles de presque tous les protocoles de comparaison du CCL et des organisations

régionales de métrologie. Le CCL est ainsi parvenu avec succès à répartir la charge de travail liée aux comparaisons, à réduire le temps de travail du personnel impliqué dans chaque comparaison, à accélérer le processus de finalisation des comparaisons et à obtenir la validation claire des CMCs à partir des résultats de comparaisons.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Principales activités

Depuis la précédente réunion de la CGPM, le CCL s'est réuni deux fois (selon un cycle d'une réunion tous les trois ans) et ses groupes de travail se sont réunis chacun trois ou quatre fois. En dehors du calendrier de réunions programmées, les groupes de discussion ont continué à être actifs et à rendre compte, lors des réunions du CCL, de leur travail concernant non seulement la planification des comparaisons mais aussi les récentes avancées techniques, les contributions à la mise en œuvre d'étalons, et les idées de projets de recherche collaborative.

Concernant le CIPM MRA, les recommandations formulées par le Groupe de travail du CCL sur le CIPM MRA ont été analysées et les actions suivantes ont été réalisées. Le Groupe de travail du CCL sur le CIPM MRA a préparé un large éventail de guides pratiques et de modèles de rapport qui pourront être utilisés par les laboratoires pilotant des comparaisons, l'objectif étant de réduire la charge de travail et les coûts afin que de nouveaux laboratoires proposent leurs services pour piloter des comparaisons. Au sein de l'EURAMET, plusieurs laboratoires qui ne sont pas membres du CCL ont commencé à utiliser ces modèles et documents et au moins un nouveau laboratoire a proposé de piloter une comparaison clé. Le Groupe de travail du CCL sur le CIPM MRA a anticipé la recommandation du Groupe de travail *ad hoc* du CIPM sur le rôle, la mission, les objectifs, la stabilité financière à long terme, la direction stratégique et la gouvernance du BIPM puisque les présidents des comités techniques des organisations régionales de métrologie sont membres *ex officio* du Groupe de travail sur le CIPM MRA depuis sa création.

Le sous-groupe de travail sur les CMCs et le DimVIM a révisé la liste de classification des services, le DimVIM, et a pris la responsabilité de sa maintenance. En dehors de la communauté des laboratoires nationaux de métrologie, le DimVIM est utilisé par les organismes de réglementation et d'autres fournisseurs de services car il présente pour la métrologie dimensionnelle une terminologie harmonisée en 14 langues (allemand, anglais, chinois, coréen, espagnol, finnois, français, grec, italien, japonais, portugais, tchèque, thaï et turc).

Les CMCs dans le domaine des longueurs sont enregistrées dans la KCDB comme des équations numériques alors que ce format n'est généralement pas utilisé dans les publications ou par les organismes d'accréditation, c'est pourquoi les CMCs ne sont pas conformes à l'approche utilisée par les organismes d'accréditation. La proposition faite par le CCL de passer aux équations aux grandeurs, qui deviendra techniquement réalisable avec la prochaine KCDB 2.0, a été approuvée par le CIPM. La charge de travail requise pour procéder à ce changement incombera principalement aux laboratoires nationaux de métrologie dont les CMCs prennent la forme d'équation : ces CMCs sont surtout présentes dans le domaine des longueurs (~850) et de la masse (~400) et on en compte quelques-unes en chimie.

Le CCL prépare la nouvelle mise en pratique de la définition du mètre, à l'aide d'un modèle commun et selon les informations présentées sur le site du BIPM pour les trois méthodes existantes de réalisation du mètre, ainsi que deux documents qui avaient été précédemment élaborés au sein du Groupe de travail sur le CIPM MRA. Le réseau de silicium est inclus dans la mise en pratique en tant que représentation secondaire du mètre, tel que suggéré par le Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle.

Étant donné que les laboratoires nationaux de métrologie sont encouragés à conserver un nombre minimum de CMCs nécessaires et que tout doublon doit être évité, une CMC flexible intitulée « Standards of 1D point-to-point dimensions » a été approuvée par le CCL. L'idée de base est que le même équipement puisse être utilisé pour étalonner différents étalons présentant une incertitude similaire, telle qu'une machine de mesure de coordonnées pour étalonner des étalons dont les mesurandes reposent sur une seule ligne droite. Comme la classification des services dans le domaine des longueurs du CCL (DimVIM) est organisée par étalon, et que l'utilisation de l'équipement précédemment mentionné requerrait des CMCs dupliquées, le document d'orientation CCL-GD-6 a été élaboré afin d'éviter toute confusion due à la coexistence de CMCs conventionnelles et flexibles.

Depuis la 25e réunion de la CGPM (2014), des membres du CCL ont participé à deux conférences : « MacroScale » et « NanoScale ». En outre, la liste des étalons optiques de fréquence utilisés pour réaliser le mètre et des représentations secondaires de la seconde a été mise à jour par le Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence puis adoptée par le CIPM après approbation du CCTF.

Des représentants des laboratoires membres du CCL et des groupes de travail du CCL participent aux comités nationaux et internationaux de normalisation. Cette collaboration porte essentiellement sur les normes ISO GPS (Spécification géométrique des produits). Parmi les comités clés internationaux auxquels le CCL participe figurent les suivants : ISO TC 213 (Spécifications et vérification dimensionnelles et géométriques des produits), ISO TC 60 (Engrenages), ISO TC 1 (Filetages), ISO TC 201 (SC9) (Microscopie par sonde à balayage), ISO TC 202 (Analyse par microfaisceaux), ISO TC 229 (Nanotechnologies), IEC TC 113 (Nanotechnologies) et API SC7 (Ressources concernant les jauges utilisées dans l'industrie du gaz et du pétrole).

Défis et difficultés

L'un des défis permanents du CCL consiste à étendre le SI à des échelles plus petites ou plus grandes tout en continuant à étayer les aptitudes existantes. Le CCL a déjà fait de l'échelle nanométrique une priorité en créant le Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle.

Un nouveau type de comparaisons interrégionales, similaire à une « comparaison virtuelle du CCL » mais avec une charge de travail et une planification moins importantes (en particulier pour les membres du CCL), a été développé et présenté au CIPM. Le second cycle de comparaisons clés est en préparation et sera composé à la fois de comparaisons classiques et de comparaisons entre organisations régionales de métrologie. La liaison des résultats de plusieurs comparaisons, en particulier lorsque la taille et les propriétés des artéfacts diffèrent d'une comparaison à l'autre, s'avère difficile et il n'est pas évident de savoir si ce travail de liaison des résultats est nécessaire aux utilisateurs finaux du CIPM MRA lorsqu'ils évaluent des CMCs. Il est aussi à noter que certaines comparaisons en métrologie dimensionnelle fournissent un grand nombre de données, ce qui rend plus difficile la présentation des résultats dans la KCDB, en particulier sous la forme de graphiques. Une comparaison de règles divisées (sur un ensemble limité de mesurandes) a généré 960 résultats pour un seul artefact. Le calcul de plus de 921 000 degrés d'équivalence par paires n'est ni pratique ni utile. Il est nécessaire de définir de meilleures métriques pour synthétiser de larges ensembles de données de comparaisons, permettre une comparaison probante des déclarations de CMCs et obtenir une meilleure présentation des résultats dans la KCDB.

Les machines de mesure de coordonnées sont de plus en plus utilisées dans l'industrie, alors même que les voies permettant d'assurer la traçabilité des mesures ainsi effectuées sont mal établies et que les CMCs concernant ces services posent problème. Ces questions font l'objet d'un vif débat au sein du Groupe de discussion sur la métrologie des coordonnées. Les machines de mesure de coordonnées sont utilisées de façon extensive dans l'industrie car elles permettent de mesurer une grande gamme

d'objets, la plupart étant utilisés pour des comparaisons clés. Un moyen d'exprimer les CMCs fondées sur l'utilisation de ces machines qui n'entre pas en conflit avec les CMCs actuellement publiées dans la KCDB a été trouvé, ce qui permet une application plus vaste du CIPM MRA. De façon similaire, il faut assurer la traçabilité des logiciels utilisés en métrologie dimensionnelle : certains membres du CCL réfléchissent à des catégories de CMCs dans ce domaine afin de répondre aux exigences des clients. Toutefois, réussir cette tâche dans le cadre du CIPM MRA est un défi, qui requerra probablement des discussions interdisciplinaires avec d'autres Comités consultatifs.

Perspectives à court terme et à long terme

À court terme, le travail des groupes de discussion se poursuivra lors du prochain cycle de comparaisons clés. Le développement des étalons dans le domaine de la nanométrologie et le lancement d'autres études pilotes, éventuellement sur des sujets interdisciplinaires (le thème des nanoparticules, par exemple, n'est pas uniquement un sujet dimensionnel), seront à l'ordre du jour des futures réunions du Groupe de travail sur la nanométrologie. La mise en place, au sein de certains laboratoires membres du CCL, d'activités sur la tomographie à rayons x assistée par ordinateur, considérée comme un outil de métrologie dimensionnelle, donnera lieu à de nouvelles études qui pourraient mener à de nouvelles CMCs étayées de façon appropriée. Il pourrait être nécessaire de coordonner l'aide à apporter aux laboratoires nationaux de métrologie dans la façon d'expliquer les nouvelles définitions du SI aux utilisateurs finaux. Des services dans le domaine de la métrologie sur de longues distances vont se développer et certains laboratoires membres du CCL, ainsi que le CCL, devront répondre aux besoins de vérification de ces services. Un autre défi consistera à conserver une certaine dynamique pour les activités liées au CIPM MRA car le CCL passe au second cycle de comparaisons clés mais de nouvelles techniques et de nouveaux travaux de recherche requièrent une réaffectation des ressources. Pour plusieurs laboratoires membres, la question de la réintégration de CMCs dans des domaines où il n'y a plus de comparaisons clés du CCL (c'est-à-dire où un sujet de comparaison a été abandonné) devra être étudiée.

Sur le plus long terme, il est probable que certains services traditionnels seront remplacés et que les groupes de discussion se concentreront sur d'autres thématiques ; cela s'accompagnera d'un autre défi qui sera de mettre en place un nouvel ensemble de comparaisons clés et de nouvelles séries de soumissions de CMCs pour les domaines émergents (tels que les services de tomographie à rayons x assistée par ordinateur). Il sera nécessaire de soutenir davantage les services sur site proposés aux clients (étalonnages en dehors des laboratoires) et de traiter les questions de traçabilité qui y sont associées.

Données sur le CCL

CCL établi en 1997 (CCDM, Comité consultatif pour la définition du mètre, de 1952 à 1997)

Président : I. Castelazo	Secrétaire exécutive : G. Panfilo
Composition :	24 membres et 4 observateurs
Réunions depuis la 25e réunion de la CGPM :	23-24 septembre 2015, 14-15 juin 2018

Quatre groupes de travail :	– Stratégie
	– Nanométrologie dimensionnelle
	– Étalons de fréquence (Groupe commun au CCL et au CCTF)
	– CIPM MRA
	  o Sous-groupe de travail sur les comparaisons clés
	  o Sous-groupe de travail sur les CMCs et le DimVIM
	  o Sous-groupe de travail sur la liaison des comparaisons

Neuf groupes de discussion

Activité en matière de comparaisons clés	Terminée(s)	En cours	Programmée(s) [2015-2019]
Comparaisons clés du CCL (et comparaisons supplémentaires)	7 clés 4 supplémentaires	2 clés	5
Comparaisons du BIPM	2	0	0
Études pilotes du CCL	0	0	1 [2017]
CMCs	1 071 CMCs dans 51 catégories de service publiées dans la KCDB		

20. Désignation des membres du Groupe de travail sur la dotation du BIPM

Le président de la CGPM ouvre ce point de l'ordre du jour et donne la parole à M. McLaren, secrétaire de la CGPM. Ce dernier rappelle qu'au cours d'une réunion de la CGPM, un Groupe de travail sur la dotation du BIPM est constitué et qu'il se réunit préalablement au vote du projet de résolution sur la dotation du BIPM. Le groupe de travail se réunira l'après-midi du mercredi 14 novembre. Le président et le secrétaire du CIPM ont établi de façon préliminaire une liste de 20 États Membres à contributions maximales, intermédiaires et minimales qui constitueraient le groupe de travail. Tout autre État Membre souhaitant prendre part au groupe de travail peut le rejoindre. La seule condition est que chaque État Membre ne pourra être représenté que par deux participants. M. McLaren donne lecture de la liste proposée : Allemagne, Arabie saoudite, Argentine, Australie, Brésil, Canada, Chine, Espagne, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, France, Italie, Japon, Kazakhstan, Mexique, Pays-Bas, République de Corée, Royaume-Uni, Suède et Suisse. Il répète que tout autre État Membre souhaitant participer à ce groupe de travail sera le bienvenu : la Nouvelle-Zélande est ainsi ajoutée.

Le président de la CGPM clôt la deuxième séance.

Troisième séance – 14 novembre 2018 (matin)

Le président de la CGPM souhaite la bienvenue aux délégués pour la troisième séance.

21. La métrologie et l'infrastructure de la qualité à l'appui des objectifs de développement durable

M. Bernardo Calzadilla Sarmiento, de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI), donne une présentation invitée intitulée « La métrologie à l'appui des objectifs de développement durable ». Il abordera le rôle de la métrologie pour soutenir le développement durable, l'approche de l'ONUDI concernant le développement de l'infrastructure de la qualité, la collaboration avec le BIPM et l'OIML, ainsi que le travail de l'ONUDI dans le domaine de la métrologie.

L'ONUDI considère l'infrastructure de la qualité comme un vecteur du développement durable. En 2018, l'ONUDI a coopéré avec l'ancien Réseau DCMAS afin de parvenir à une définition commune du terme « infrastructure de la qualité » dans le cadre des objectifs de développement durable. M. Calzadilla Sarmiento note que la métrologie est l'une des pierres angulaires de cette définition qui précise : « *It is a critical element in promoting and sustaining economic development, as well as environmental and social wellbeing. It relies on metrology, standardization, accreditation, conformity assessment, and market surveillance.* »[3] L'ONUDI estime que la métrologie est fondamentale aux systèmes de l'infrastructure de la qualité et essentielle pour la majorité des objectifs de développement durables. Cette reconnaissance du rôle de la métrologie a été renforcée en 2017 lorsque l'ONUDI, le BIPM et l'OIML ont collaboré afin de publier la brochure « *The role of Metrology in the context of the 2030 Sustainable Development Goals* » qui met en valeur l'importance de la métrologie pour atteindre les objectifs de développement durable. M. Calzadilla Sarmiento explique en détail comment la métrologie et les objectifs de développement durable permettent de répondre aux besoins des populations, protéger la planète et favoriser la prospérité.

M. Calzadilla Sarmiento explique en quoi consiste les partenariats de l'ONUDI et décrit comment l'ancien Réseau DCMAS a été étendu et renommé « International Network on Quality Infrastructure (INetQI) ». L'ONUDI et le BIPM font partie des dix partenaires d'INetQI, qui est au cœur du système de l'infrastructure de la qualité.

L'ONUDI a une approche systémique du développement de l'infrastructure de la qualité qui va au-delà des fonctions de l'infrastructure de la qualité afin de fournir une base solide pour la réglementation du marché et la protection du consommateur. Cette approche commence avec la gouvernance (en fournissant un cadre règlementaire et une politique qualité) et concerne les institutions de l'infrastructure de la qualité (la métrologie, la normalisation et l'accréditation), les services, les entreprises et finalement les consommateurs. L'approche de l'ONUDI est de bâtir un pont entre l'infrastructure de la qualité d'un côté et les entreprises et utilisateurs finaux de l'autre, afin de garantir une infrastructure de la qualité solide et durable ; dans de nombreux cas, l'infrastructure de la qualité est axée sur l'offre, sans une masse critique de demandes.

[3] Traduction du BIPM : « C'est un élément critique pour promouvoir et soutenir le développement économique ainsi que le bien-être environnemental et social. L'infrastructure de la qualité repose sur : la métrologie, la normalisation, l'accréditation, l'évaluation de la conformité et la surveillance du marché. »

Les dix partenaires d'INetQI ont développé une série de documents « Quality Policy Guiding Principles » sur les principes fondateurs de la politique qualité afin de parvenir à une approche plus cohérente du système de l'infrastructure de la qualité, de définir ce qui doit être volontaire et ce qui doit être réglementaire, et d'assurer l'optimisation des processus et du développement durable.

M. Calzadilla Sarmiento indique que l'ONUDI est très satisfaite de sa collaboration avec le BIPM et l'OIML. Le travail effectué dans le cadre de ce partenariat stratégique est le résultat d'un protocole d'accord signé en 2008 : ce protocole a pour objectif d'accroître l'impact du développement industriel sur la croissance économique, de réduire les obstacles techniques au commerce et de contribuer à l'intégration positive des pays en développement à l'économie mondiale.

L'ONUDI travaille avec le Système intra-africain de métrologie (AFRIMETS) afin d'organiser des écoles de métrologie. En 2011, 76 métrologistes de 31 pays africains ont été formés afin d'assurer la traçabilité de leurs mesures au niveau de leur économie locale et régionale. En 2014, 87 participants de 37 pays africains et d'Haïti ont suivi une formation sur divers aspects de la métrologie légale, 17 experts donnant des présentations au cours de diverses sessions. Un projet commun à l'ONUDI et à l'Agence norvégienne de coopération pour le développement (NORAD) a aidé l'AFRIMETS à développer une feuille de route stratégique et un plan de viabilité. L'ONUDI a donné des formations dans d'autres régions, comme des formations sur l'infrastructure de la qualité pour les pays de la région du Golfe à Bahreïn du 5 au 7 décembre 2016, et pour les pays des Caraïbes à Kingston (Jamaïque) du 13 au 17 mars 2017. En outre, l'ONUDI a mis en place un pôle de connaissances sur le commerce, les investissements et l'innovation, ainsi qu'une ressource d'apprentissage en ligne sur l'infrastructure de la qualité et le commerce, qui se fonde sur les précédentes expériences de formation de l'ONUDI.

M. Calzadilla Sarmiento décrit le travail de l'ONUDI dans le domaine de la métrologie. L'ONUDI compte plus de 40 années d'expérience dans le renforcement de la compétitivité par la conformité aux normes et aux critères de qualité. L'ONUDI est toujours choisie comme l'organisme principal des Nations Unies pour mettre en œuvre des actions de développement de l'infrastructure de la qualité. L'ONUDI est considérée comme un centre d'excellence en matière de renforcement des capacités commerciales et a contribué à l'établissement d'un certain nombre de laboratoires nationaux de métrologie dans le monde. L'ONUDI œuvre souvent en faveur de la mise en place de systèmes métrologiques de base dans des pays tels que le Sri Lanka, le Mozambique, le Nigéria et l'Irak.

Pour conclure, M. Calzadilla Sarmiento souligne que la révision du SI sera fondamentale pour la réalisation des objectifs de développement durable. En outre, le SI révisé, la métrologie et l'infrastructure de la qualité favoriseront l'innovation qui est au cœur de la « quatrième révolution industrielle ».

22. Renforcement des capacités en métrologie : applications dans le domaine des denrées alimentaires et de l'alimentation animale

M. Xiang Fang, directeur général du laboratoire national de métrologie chinois (NIM, Chine), commence sa présentation invitée intitulée « Renforcement des capacités en métrologie : applications dans le domaine des denrées alimentaires et de l'alimentation animale » en soulignant l'importance de la nourriture dans la culture chinoise et l'impact de la sécurité alimentaire sur la santé et le bien-être de chacun.

M. Fang présente un graphique de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) sur le PIB et la qualité de vie qui montre que le niveau de sécurité alimentaire d'un pays est corrélé à son niveau de développement économique et social. Au fur et à mesure que le PIB par habitant augmente, les préoccupations passent de la sécurité céréalière à la sécurité alimentaire et finalement à la nutrition et la santé. Le PIB par habitant de la Chine est passé de 156 dollars américains en 1978 (époque où la sécurité céréalière constituait la préoccupation majeure) à plus de 8 000 dollars américains en 2017, faisant de la Chine un pays à revenu intermédiaire. Le développement régional de la Chine est inégal, avec un PIB par habitant variant d'une région à l'autre. Par conséquent, la situation de risque alimentaire en Chine peut être plus complexe que dans tout autre pays, ce qui requiert une refonte complète et systématique du système de contrôle des denrées alimentaires et de l'alimentation animale en Chine, ainsi que la mise œuvre d'aptitudes de mesure robustes concernant les questions de sécurité alimentaire. Après des décennies de travail, un système national d'étalons de mesure dans le domaine de la sécurité alimentaire a été établi en Chine.

Un contrôle réussi et la mise en place d'un système national d'étalons dans le domaine de la sécurité alimentaire nécessitent un système de mesure analytique efficace. L'utilisation de matériaux de référence certifiés, auxquels une valeur de référence est assignée, joue un rôle clé et permet d'assurer la traçabilité des mesures au SI.

M. Fang donne deux exemples afin de démontrer la contribution directe du NIM aux initiatives de renforcement des capacités et de transfert des connaissances visant à améliorer les aptitudes d'essai nationales et à fournir des technologies permettant d'assurer la sécurité alimentaire. En 2008, le NIM a joué un rôle de premier plan après le scandale du lait en poudre pour nourrissons qui avait été contaminé à la mélamine par certaines marques chinoises : le NIM a réagi en développant des méthodes analytiques et des matériaux de référence certifiés et en conduisant des évaluations. Après cela, le NIM a contribué à la mise en place d'étalons nationaux et a participé à des comparaisons internationales de mélamine (CCQM-K103, mélamine dans du lait en poudre) et à des campagnes d'essai d'aptitudes. En 2009, l'Asia Pacific Metrology Programme (APMP) a reconnu que le rôle joué par le NIM à la suite du scandale illustrait comment la métrologie peut soutenir une économie nationale.

En 2015, lorsque la Chine a accueilli les 15es championnats du monde de l'Association internationale des fédérations d'athlétisme (IAAF), la limite maximale de clenbutérol dans la viande porcine, selon la norme nationale, était de 0,76 µg/kg. À l'époque, neuf laboratoires nationaux accrédités étaient en mesure de réaliser l'analyse pertinente et huit d'entre eux avaient obtenu des résultats acceptables. Lorsque la limite maximale de clenbutérol a été divisée par vingt pour atteindre 0,036 µg/kg, seulement deux laboratoires pouvaient obtenir des résultats acceptables et lorsque cette limite a encore été divisée par cent pour atteindre 0,0071 µg/kg, aucun laboratoire national accrédité ne pouvait avoir de résultats acceptables. La diminution par 100 avait été requise par l'IAAF. Suite à cela, le NIM a donné des formations aux laboratoires accrédités afin qu'ils puissent améliorer leurs technologies de mesure puis il a organisé des essais d'aptitudes. Sept des neuf laboratoires nationaux accrédités ont pu obtenir des résultats acceptables pour l'analyse du clenbutérol après les formations du NIM.

M. Fang indique que la sécurité alimentaire est l'une des priorités du développement national. Toutefois, les pays en développement sont confrontés à des défis considérables lorsqu'ils souhaitent déterminer avec exactitude la présence de substances toxiques, et en particulier de mycotoxines, dans les produits céréaliers. Il existe plus de 400 types de mycotoxines, qui sont des métabolites secondaires hautement toxiques produits par des champignons. Parmi ces 400 types, onze sont régulièrement trouvés dans des denrées alimentaires et des aliments pour animaux. L'OMS estime que plus de 25 % des grains et aliments pour animaux sont contaminés par des mycotoxines et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) estime que 8 % à 18 % des céréales en Asie et en Afrique sont perdues pendant la manutention et le stockage après la récolte

en raison du développement de champignons et de la contamination aux mycotoxines.

M. Fang décrit les défis que posent la mesure exacte des mycotoxines dans les aliments et insiste sur le fait que des mesures inexactes peuvent mettre des vies en danger. Plus de cent pays ont mis en place des limites réglementaires concernant les mycotoxines dans les denrées alimentaires et les aliments pour animaux afin de protéger la santé publique. Dans ce contexte, l'AFRIMETS a mis en évidence qu'il était nécessaire et urgent au niveau régional de disposer de matériaux de référence certifiés afin d'étayer les mesures exactes de présence de mycotoxines dans les aliments ; l'APMP et le SIM ont fortement soutenu ce besoin. Le BIPM a répondu à cet appel des pays en développement pour renforcer les capacités concernant les mesures des mycotoxines en lançant le projet « Metrology for Safe Food and Feed in Developing Economies » (La métrologie et la sécurité des denrées alimentaires et des aliments pour animaux au sein des économies en développement) en 2016. Dans le cadre de ce projet, le BIPM, le NIM, le NMISA (Afrique du Sud) et d'autres laboratoires nationaux de métrologie ont collaboré afin de conduire des activités de recherche sur des méthodes, des solutions de références et des matériaux de référence certifiés à matrices alimentaires. Le projet a été un véritable succès, 15 laboratoires nationaux de métrologie et trois organisations ayant participé au développement d'étalons de mesure et d'aptitudes pour l'analyse des mycotoxines. En outre, 16 scientifiques invités ont été détachés au BIPM pour des activités de transfert des connaissances liées à la production et à la caractérisation des calibrateurs pour les mycotoxines. Le NIM a activement participé à ce projet en envoyant des détachés au BIPM, en organisant des ateliers en Asie, en Afrique et en Amérique du Sud, en développant des matériaux de référence certifiés clés et en participant à la première comparaison interlaboratoire sur les mycotoxines (CCQM-K154a).

M. Fang indique que le NIM a obtenu le soutien du Ministère de la science et de la technologie (MOST, Chine) et de l'administration nationale de réglementation du marché (SAMR) concernant le projet « Research and Application of Measurement Standard and Technical System in Agro-product Safety (2017-2020) » (Recherche et application concernant un système technique d'étalons de mesure pour la sécurité des produits agroalimentaires). Ce projet se concentrera sur les techniques de mesure et les systèmes de traçabilité pour les mycotoxines dans les céréales et sera réalisé en collaboration avec le NIM, le BIPM, le NMISA et d'autres laboratoires nationaux de métrologie. Il ajoute que le NIM a aidé le Food Safety Focus Group (FSFG) de l'APMP qui a déterminé les priorités en matière de mesure des mycotoxines pour la sécurité des céréales.

M. Fang conclut que telles sont les collaborations générales en matière de renforcement des capacités et de transfert des connaissances. Concernant les mesures dans le cadre de la sécurité alimentaire, le BIPM agit en tant que coordinateur international efficace ayant pour objectif d'aider les économies en développement à intégrer des technologies de mesure avancées ; ces économies font à leur tour la promotion d'un développement plus équilibré des aptitudes de mesure entre les différentes régions et les pays. Le NIM continue à améliorer ses propres aptitudes de mesure et aide simultanément des pays en développement à renforcer leurs capacités. M. Fang ajoute que la métrologie dans le domaine de la sécurité alimentaire doit répondre aux défis suivants :

- comment acquérir plus de ressources, y compris des ressources humaines, des financements et des technologies, afin de soutenir les activités menées par différentes parties prenantes mondiales,
- comment promouvoir la communication et la collaboration avec des organisations internationales pertinentes, telles que l'OMS et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO),
- comment mieux exploiter les résultats des projets CBKT dans le cadre du développement d'étalons nationaux pertinents, afin de construire le système de mesure dans sa globalité et aider les gouvernements à élaborer leur législation et leur réglementation.

23. Partenariat avec le BIPM en matière de renforcement des capacités

M. Mustafa Cetintas, directeur de TÜBİTAK UME (Turquie), donne une présentation invitée intitulé « Partenariat avec le BIPM en matière de renforcement des capacités ». Il indique que TÜBİTAK UME a réalisé des progrès considérables en une période de temps relativement courte et évoque succinctement le développement du laboratoire national, depuis 1986 – date de son établissement en tant que centre national technique de physique et des étalons de mesure – jusqu'à aujourd'hui.

TÜBİTAK UME s'est engagé dans le renforcement des capacités et a bénéficié d'activités de partage ouvert des connaissances et de renforcement des capacités organisées par d'autres laboratoires nationaux de métrologie. L'engagement de TÜBİTAK UME dans le renforcement des capacités est motivé par un désir de « donner en retour à la communauté de la métrologie » et particulièrement aux laboratoires nationaux de pays en développement. TÜBİTAK UME a participé aux activités de renforcement des capacités de l'EURAMET depuis 2007 et a soutenu le développement de la nouvelle organisation régionale de métrologie, GULFMET, depuis 2012. Afin de souligner son engagement, TÜBİTAK UME a été l'un des premiers laboratoires nationaux à participer au programme CBKT du BIPM en détachant l'un des membres de son personnel pour contribuer au projet « Metrology for Safe Food and Feed in Developing Economies ».

En novembre 2016, TÜBİTAK UME a proposé d'organiser un programme de formations sur le long terme destinées aux chercheurs des laboratoires nationaux de pays en développement sans frais pour ces laboratoires, qui serait mené en pleine coopération avec le BIPM sous la forme d'une activité du programme CBKT. En juillet 2017, un accord de coopération a été signé entre le BIPM et TÜBİTAK UME pour un programme de deux ans. Le projet de stages entre le BIPM et TÜBİTAK UME comprend la possibilité pour le stagiaire de passer un à trois mois dans les laboratoires de TÜBİTAK UME afin de travailler à une activité de recherche de son choix. Les stages sont destinés à de jeunes chercheurs de laboratoires nationaux de métrologie venant de pays qui ont récemment signé le CIPM MRA ou qui le signeront dans un futur proche : ces stages comprennent un atelier de deux jours sur le CIPM MRA et l'infrastructure mondiale de la qualité animé par du personnel du BIPM. Cinquante-trois candidatures de 23 pays ont été reçues pour le premier cycle de stages en 2018. Dix candidats ont été sélectionnés : un de l'EURAMET, deux de COOMET, deux de GULFMET, quatre de l'AFRIMETS et un de l'APMP. M. Cetintas présente l'avis recueilli auprès de quatre participants concernant le premier cycle.

M. Cetintas indique que les participants bénéficient de la possibilité d'étudier un sujet d'intérêt tout en recevant les conseils d'un personnel de laboratoire expérimenté au sein de laboratoires bien équipés. Les participants peuvent également développer leur réseau ainsi que des relations professionnelles durables avec des métrologistes d'autres laboratoires nationaux de métrologie. Les participants peuvent appliquer les connaissances et compétences qu'ils ont acquises lors de leur stage au sein de leur laboratoire d'origine. TÜBİTAK UME contribue ainsi au développement de la métrologie mondiale et de la coopération entre les laboratoires nationaux de métrologie et met en valeur ses aptitudes et son infrastructure techniques. En outre, TÜBİTAK UME tire parti de la plus grande coopération avec les laboratoires nationaux de métrologie qu'il suscite et améliore les compétences d'enseignement et d'encadrement de son personnel. Le BIPM bénéficie du soutien reçu pour son programme CBKT et de l'amélioration de la coopération avec les laboratoires nationaux de pays émergents, qui sont incités à s'engager davantage au sein du système mondial de métrologie.

M. Cetintas annonce que les candidatures pour le second cycle de stages au sein de TÜBİTAK UME, organisé en 2019, sont ouvertes et que le programme commencera le 1er mars 2019. Il encourage le BIPM à poursuivre le programme CBKT et termine sa présentation en déclarant que l'information et

le savoir augmentent lorsqu'ils sont partagés.

Le président de la CGPM remercie les trois précédents conférenciers pour leur présentation et ouvre la discussion.

M. Phillips fait référence à la présentation de M. Fang sur la sécurité alimentaire et en particulier la sécurité céréalière. L'un des graphiques présentés indiquait en plus d'une contamination des céréales par des mycotoxines une contamination par des métaux lourds. M. Phillips demande comment des métaux lourds se retrouvent dans des céréales stockées. M. Fang répond que la contamination se fait par l'air et le sol. M. Date (Ghana) ajoute que les céréales sont contaminées par les métaux lourds au cours d'une manutention inappropriée après la récolte. Au Ghana, les céréales sont séchées en les répartissant sur le sol et si cela n'est pas effectué de façon adéquate, il peut y avoir une contamination par des métaux lourds.

M. Inglis salue la contribution du NIM (Chine) et de TÜBİTAK UME (Turquie) au programme CBKT du BIPM. Il précise que le programme CBKT a été tributaire des contributions des laboratoires nationaux de métrologie et que le NIST (États-Unis d'Amérique), en faisant une contribution très significative, avait permis de lancer le programme. M. Inglis mentionne les présentations de M. Fang et M. Cetintas qui ont donné des exemples de l'apport considérable et des bénéfices potentiels que peut apporter le programme CBKT.

La délégation indienne observe que les normes internationales en matière de denrées alimentaires sont élaborées par l'ISO et le Codex Alimentarius et demande quels types de normes sont produites par l'ISO et le Codex Alimentarius, s'il y a chevauchement ou si ces organisations œuvrent dans des domaines distincts. M. Wielgosz (BIPM) répond que le BIPM a des liens avec la Commission du Codex Alimentarius, en particulier avec le Comité sur les méthodes d'analyse et d'échantillonnage. Ce comité a pour rôle de décider quelles méthodes sont utilisées par le Codex Alimentarius et la communauté internationale. L'ISO agit comme un « développeur de méthodes » au sein de ce comité. Le Codex Alimentarius est l'organisme qui décide des méthodes qui seront utilisées au niveau international pour assurer la sécurité alimentaire. La communauté de la métrologie est également impliquée concernant les étalons de mesure utilisés dans certaines de ces méthodes. L'ISO est seulement un « développeur de méthodes » parmi plusieurs, ces méthodes pouvant être utilisées comme base pour des étalons dans le domaine de l'analyse des aliments.

24. Soutenir le développement de la métrologie en Afrique

M. Dennis Moturi, président de l'AFRIMETS, donne un aperçu de la métrologie en Afrique et rappelle brièvement l'histoire de l'AFRIMETS qui a commencé par un atelier inaugural à Midrand (Afrique du Sud) en mars 2006. L'AFRIMETS a pour mission de promouvoir le développement de la métrologie scientifique, industrielle et légale dans toute l'Afrique et de constituer une organisation régionale de métrologie à part entière. Pour des raisons pratiques, l'AFRIMETS est divisée en différentes organisations sous-régionales qui s'alignent sur les communautés économiques régionales existantes.

M. Moturi présente la Zone de libre-échange continentale africaine (ZLECAf), qui est une nouvelle initiative de l'Union africaine, et explique comment elle s'inscrit dans le contexte de l'AFRIMETS. L'accord ZLECAf est un accord de libre-échange qui a été signé à Kigali (Rwanda) le 21 mars 2018 par 44 des 55 membres de l'Union africaine ; en juillet 2018, cinq autres pays ont signé cet accord qui crée la plus vaste zone de libre-échange, en termes de pays participants, depuis la formation de l'Organisation mondiale du commerce (OMC). La ZLECAf rassemblera 55 pays, soit une population

totale de plus d'un milliard de personnes et un PIB total de plus de 3 400 milliards de dollars américains.

L'objectif de la ZLECAf est de créer un marché continental unique de biens et services, qui deviendrait une union douanière, et de relever les défis liés au fait que des pays africains sont membres de plusieurs communautés économiques régionales qui se recoupent. Le Kenya, par exemple, est membre de la Communauté d'Afrique de l'Est (CAE), du Marché commun de l'Afrique orientale et australe (COMESA) et de l'Autorité intergouvernementale pour le développement (IGAD). L'accord ZLECAf vise à établir une union douanière (90 % des lignes tarifaires pour parvenir à une exemption de droits dans un délai de cinq ans), un marché commun, une union monétaire et, enfin, une monnaie unique pour l'Afrique.

M. Moturi décrit comment la création de la ZLECAf entre dans le cadre de la métrologie. L'Union africaine requiert une infrastructure de la qualité fonctionnelle pour que la ZLECAf soit un succès ; le forum de la Pan-African Quality Infrastructure (PAQI - Infrastructure panafricaine de la qualité) répond à ce besoin. La PAQI consiste en quatre organisations « piliers » : l'Organisation africaine de normalisation (ORAN), la Commission électrotechnique africaine de normalisation (AFSEC), la Coopération d'accréditation africaine (AFRAC) et l'AFRIMETS. M. Moturi souligne que les mesures étayent les activités d'une infrastructure de la qualité saine et que l'un des impacts d'une infrastructure de la qualité en Afrique, par rapport à la ZLECAf, est d'accroître les possibilités commerciales.

M. Moturi indique que les pays africains qui sont devenus Membres du BIPM ou Associés à la CGPM ont augmenté de 2007 à 2018 et présente l'évolution de la métrologie scientifique au cours de la même période.

M. Moturi indique que le nombre de CMCs publiées dans la KCDB par des membres de l'AFRIMETS a augmenté de 535 en 2017 à 634 en 2018. Toutefois, il est plus significatif d'observer qu'en 2018, trois pays africains ont publié des CMCs pour la première fois : la Namibie, la Zambie et le Zimbabwe. Ces pays sont Associés à la CGPM et viennent s'ajouter aux quatre autres pays africains qui ont des CMCs enregistrées dans la KCDB et qui sont États Membres : l'Afrique du Sud, l'Égypte, le Kenya et la Tunisie. Les domaines d'intérêt pour la métrologie en Afrique sont le programme africain de matériaux de référence pour les denrées alimentaires et les aliments pour animaux, le renforcement des capacités métrologiques pour la sécurité alimentaire dans les économies en développement en partenariat avec le programme CBKT du BIPM, et le fait de réduire la chaîne de traçabilité en Afrique. Les installations d'essai accréditées bénéficient d'un soutien en termes de solutions d'étalonnage et par le biais de l'introduction de programmes d'essais d'aptitude. L'AFRIMETS aide des pays à améliorer leurs installations d'essai afin de soutenir la ZLECAf et compte mettre en place une base de données des services pour les laboratoires de métrologie (reconnaissance par les pairs des aptitudes pour le commerce).

M. Moturi conclut en soulignant que la métrologie en Afrique est désormais intégrée au système métrologique mondial et que l'AFRIMETS a contribué de façon considérable à ce résultat. L'AFRIMETS, ainsi que d'autres organisations de l'infrastructure de la qualité, jouent un rôle majeur dans la mise en œuvre de la Zone de libre-échange continentale africaine (ZLECAf). Il termine sa présentation en remerciant tous les partenaires qui ont apporté leur soutien à l'AFRIMETS au cours des années passées.

25. Une stratégie à long terme pour le BIPM

M. Takashi Usuda, membre du CIPM, donne une présentation intitulée « Une stratégie à long terme pour le BIPM » afin de présenter le contexte du Projet de résolution C « Sur les objectifs du BIPM ». Il rappelle brièvement les missions passées et actuelles exercées par le BIPM depuis la signature de la Convention du Mètre en 1875, ainsi que celles à venir.

M. Usuda rappelle le contenu de la Résolution 10 adoptée par la CGPM à sa 24e réunion (2011) « Sur le rôle, la mission, les objectifs, la stratégie à long terme et la gouvernance du BIPM » qui invitait le CIPM « à établir un Groupe de travail *ad hoc* présidé par le président du CIPM, incluant dans sa composition une représentation du CIPM, des États Parties à la Convention du Mètre (à contributions maximales, intermédiaires et minimales) et des laboratoires nationaux de métrologie, reflétant de manière adéquate l'ensemble des régions, ainsi que le directeur du BIPM, chargé de conduire un examen du rôle, de la mission, des objectifs, de la stabilité financière à long terme, de la direction stratégique et de la gouvernance du BIPM ». C'est ainsi qu'un Groupe de travail *ad hoc* sur le rôle, la mission, les objectifs, la stabilité financière à long terme, la direction stratégique et la gouvernance du BIPM a été mis en place et s'est réuni pour la première fois en mars 2012. Ce Groupe de travail a présenté ses conclusions au CIPM, aux États Parties à la Convention du Mètre et aux directeurs des laboratoires nationaux de métrologie en octobre 2012. Une synthèse des conclusions clés et les recommandations du Groupe de travail *ad hoc* figurent à l'Annexe 2 des Procès-verbaux de la 101e session du CIPM (2012). La Recommandation 1 du Groupe de travail *ad hoc* était de « *formuler une déclaration claire et succincte sur le rôle, la mission et les objectifs du BIPM, en se fondant sur les objectifs initiaux fixés par la Convention du Mètre réinterprétés à la lumière du 21e siècle* ». À la suite de cette recommandation, le CIPM a approuvé une déclaration sur la vision et la mission du BIPM en 2016 :

> *Le BIPM est l'organisation intergouvernementale créée par la Convention du Mètre ; ses États Membres agissent en commun en ce qui concerne les sujets liés à la science des mesures et aux étalons de mesure.*
>
> *La vision du BIPM est d'être universellement reconnu comme l'organisation de référence internationale concernant le système mondial de mesure.*
>
> *La mission du BIPM est de travailler au niveau international avec les laboratoires nationaux de métrologie de ses États Membres, les organisations régionales de métrologie, ainsi que ses partenaires stratégiques, et de tirer parti de son statut d'organisation internationale et impartiale pour promouvoir et faire avancer la comparabilité mondiale des mesures pour :*
>
> – *la découverte et l'innovation scientifique,*
> – *la production industrielle et le commerce international,*
> – *l'amélioration de la qualité de vie et la préservation de l'environnement.*

Le CIPM a également approuvé en 2016 les objectifs suivants pour le BIPM :

> *Représenter la communauté métrologique internationale afin d'en maximiser la reconnaissance et l'impact.*
>
> – *Coopération avec les organisations intergouvernementales pertinentes ainsi qu'avec d'autres organismes internationaux afin de développer les possibilités de tirer parti de la métrologie pour relever les défis mondiaux.*

Être un centre de collaboration scientifique et technique entre les États Membres, leur permettant de développer des aptitudes pour les comparaisons internationales de mesure, sur le principe des frais partagés.

- *Coordination des comparaisons internationales,*
- *Établissement d'étalons de référence appropriés pour les comparaisons clés internationales.*

Coordonner le système mondial de mesure, en garantissant la comparabilité et la reconnaissance au niveau international des résultats de mesures obtenus.

- *Coordination entre les États Membres et les organisations régionales de métrologie,*
- *Services techniques afin de soutenir l'infrastructure technique.*

M. Usuda explique les priorités qui ont été approuvées par le CIPM pour élaborer le programme de travail du BIPM pour les années 2020 à 2023, à savoir :

1. identifier les activités ayant la plus haute valeur ajoutée, requises par les États Membres ;
2. examiner le travail technique qui devra être effectué au BIPM dans le domaine de la métrologie en physique une fois la décision attendue de redéfinir quatre unités de base adoptée ;
3. équilibrer les ressources affectées aux trois objectifs stratégiques (relations internationales, collaboration technique et coordination) ;
4. développer un plan financier à long terme pérenne concernant le fonctionnement du BIPM afin de lui permettre de remplir sa mission jusqu'en 2025 ;

M. Usuda décrit le processus utilisé pour élaborer la stratégie à long terme du BIPM qui a été approuvée par le CIPM en octobre 2017. Cet exercice a été mené de façon transparente, le projet de stratégie ayant été soumis pour discussion lors de la réunion des représentants des États Membres et des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie de 2015, 2016 et 2017. Il a également fait l'objet de discussions lors de la réunion annuelle des présidents des organisations régionales de métrologie, lors des réunions du JCRB où le CIPM était représenté, et lors des réunions annuelles du bureau du CIPM avec l'OIML et l'ILAC.

Le plan stratégique du BIPM (2018-2019) et ses perspectives à long terme (jusqu'en 2025) comprennent les projets stratégiques détaillés qui couvrent les sept domaines d'activité du programme de travail du BIPM (quatre domaines scientifiques : la métrologie en physique, la métrologie du temps, la métrologie de la chimie et la métrologie des rayonnements ionisants, ainsi que le transfert des connaissances, les relations internationales et la coordination), ainsi que deux domaines de soutien (la communication et la promotion, les ressources humaines et l'infrastructure).

M. Usuda présente les principales activités du BIPM de 2014 à 2018, parmi lesquelles : le lancement de nouvelles initiatives dans le domaine du renforcement des capacités et du transfert des connaissances ; l'amélioration de l'efficacité de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM ; et une implication plus efficace auprès des États Membres et Associés dont le système de métrologie est émergent (« micro-CEEMS »). M. Usuda évoque certaines tendances externes et certains éléments moteurs qui auront une influence sur les priorités du BIPM dans le futur :

- La demande vis-à-vis d'une métrologie quantifiée et uniforme au niveau mondial continuera à augmenter dans des domaines tels que le commerce, l'environnement, la santé, la sécurité et les objectifs de développement durable.
- La demande de développement concernant l'infrastructure de la qualité augmentera afin de répondre aux besoins de l'industrie.

- Les aptitudes des organisations régionales de métrologie continueront à croître en fonction de leur taille, de leur contexte et de leurs ressources (CIPM MRA, programme scientifique, renforcement des capacités, forum ouvert).
- Les États Membres et Associés seront de plus en plus nombreux et les demandes des laboratoires nationaux de métrologie se diversifieront.
- Une priorité majeure pour la métrologie devrait être de prendre en considération l'adoption de technologies disruptives comme la mesure du carbone, la biologie, l'internet des objets, la mesure dynamique, l'incertitude.

M. Usuda mentionne certains changements stratégiques qui devraient intervenir dans le travail du BIPM après 2024 :

International

- Travailler de façon plus étroite avec l'OIML et d'autres organisations internationales.
- Soutenir les activités de renforcement des capacités dans chaque région et dans la langue choisie par chacune des régions.

Gouvernance et CIPM

- Renforcer le soutien apporté au travail des Comités consultatifs (et de leurs présidents).
- Apporter un plus grand soutien à des initiatives spécifiques définies par le CIPM.

Travail technique et scientifique

- Réduire le nombre de comparaisons réalisées, en se concentrant uniquement sur celles effectuées au plus haut niveau métrologique et suscitant la plus grande participation, ou celles pour lesquelles il existe une raison particulière pour qu'elles soient coordonnées par les laboratoires du BIPM.
- Contribuer aux discussions sur la révision du SI et à la mise en œuvre des changements associés.
- Participer à des programmes communs multilatéraux avec les laboratoires nationaux de métrologie des États Membres.

Travail de soutien

- Répondre à la demande accrue de réunions organisées au BIPM et assister les visiteurs et détachés.
- Assurer une dissémination de l'information plus rapide sur internet.

M. Usuda fait une synthèse de sa présentation en observant que :

- les activités du BIPM ont évolué de manière dynamique depuis la création de l'organisation ;
- les objectifs et priorités du BIPM sont clairement définis, sous la gouvernance du CIPM ;
- la stratégie a été élaborée de façon transparente, en s'appuyant sur un dialogue avec les représentants des États Membres et les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie ;
- le travail de laboratoire du BIPM est examiné avec soin par le CIPM afin d'en optimiser l'impact ;
- certaines nouvelles activités telles que le programme de renforcement des capacités et de transfert des connaissances ont été initiées dans le cadre du programme de travail pour les années 2016 à 2019 ;
- pour répondre de manière efficace aux futures tendances, des ressources supplémentaires seront nécessaires.

M. Usuda conclut sa présentation en déclarant que le BIPM a évolué, et qu'il doit continuer à évoluer, afin de répondre aux demandes de la communauté mondiale des laboratoires nationaux de métrologie tout en conservant à l'esprit la vision universelle « *à tous les temps, à tous les peuples* » à laquelle la métrologie devrait continuer à répondre.

Le président de la CGPM remercie M. Usuda et ouvre la discussion.

Mme Lagauterie (France) déclare : Je vous remercie M. Usuda pour la qualité de votre présentation, je remercie également l'ensemble du personnel, le directeur, le CIPM, pour la qualité des échanges que nous avons depuis de nombreuses années et des informations qui nous sont données via le site et via des communications. De considérables progrès ont été réalisés depuis la première CGPM à laquelle j'ai participé en 2011 et cela doit être reconnu. Nous avons bien étudié tous les documents qui ont été remis au cours des dernières années, des derniers mois, etc., et cela va toujours dans le bon sens. C'est la raison pour laquelle, sans aucune restriction, le gouvernement français va soutenir le Projet de résolution C sur le développement des objectifs du BIPM.

M. Golubev (Fédération de Russie) déclare : Merci Monsieur le Président. Avant tout, je souhaite vous remercier, M. Usuda, ainsi que l'ensemble du CIPM pour la stratégie. Je souhaite déclarer que nous soutenons la stratégie. Ensuite, je souhaite préciser que la Fédération de Russie a formulé la proposition X ou F pour la Conférence. De nombreuses discussions se sont tenues lors de la réunion informelle de lundi, ainsi qu'hier et aujourd'hui. Nous les accueillons favorablement et espérons qu'elles ont été utiles. Lors de ces discussions préalables, il a été discuté de modifier la Résolution C afin d'établir un groupe de travail qui examinerait le problème de la gouvernance au BIPM ainsi que des problèmes liés. Désormais, je peux annoncer que nous sommes disposés à décider de retirer notre Résolution X et à ne pas changer l'actuelle Résolution C. Si le CIPM organise le groupe de travail d'États Membres, c'est ce que nous souhaitons. Ce qui est positif est que le résultat de ce groupe de travail concernant l'examen du problème de la gouvernance du BIPM et des projets liés sera présenté lors de la prochaine conférence, la 27e réunion. Dans ce cas, nous sommes disposés à soutenir cette Résolution C.

M. Candel (président de la réunion de la CGPM) répond : Nous comprenons que vous avez formulé une proposition mais que celle-ci est retirée. Ce que vous suggéré est d'avoir un groupe de travail qui serait établi par le CIPM et ferait une proposition pour la 27e réunion de la Conférence.

M. Golubev (Fédération de Russie) clarifie sa déclaration : Ce groupe de travail devrait être constitué de membres des États signataires, c'est une idée.

M. Inglis (président du CIPM) poursuit : Je souhaiterais revenir aux commentaires formulés par notre délégué de la Fédération de Russie. Je le remercie, ainsi que la Fédération de Russie, de retirer leur Résolution X proposée. Je pense que les comptes rendus devraient consigner de façon scrupuleuse ce qui est demandé. Je pense que laisser cette question en suspens jusqu'à la prochaine CGPM pourrait être quelque peu trop long. Personnellement, je préférerais que le CIPM traite cette question et qu'il rende compte de ses conclusions lors de la prochaine réunion des représentants des États Membres et des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie.

M. Milton (directeur du BIPM) ajoute : Puis-je simplement clarifier Monsieur le Président que la prochaine réunion que vous évoquez aura lieu en octobre ? Le CIPM ne se réunit qu'une seule fois entre maintenant et octobre, donc le défi est de taille.

M. Inglis (président du CIPM) répond : Je pense que reporter la question et dire « nous rendrons compte de nos conclusions sur cette question lors de la prochaine Conférence générale » serait trop long pour pouvoir agir ; nous allons forcément devoir prendre une décision ou clore le sujet. Je pense que nous devons traiter cette question.

M. Golubev (Fédération de Russie) ajoute : Je souhaite clarifier ma suggestion. Premièrement, j'ai déclaré que je souhaitais que ce groupe de travail rende compte de ses conclusions à la prochaine CGPM. Je pense que ces questions entrent dans le cadre des autres responsabilités de la CGPM. Ensuite, le rapport peut ne pas prendre la forme d'une décision ou de quelque chose de la sorte. C'est un rapport, c'est ce que je veux voir dans les comptes rendus, si cela semble approprié.

M. Inglis (président du CIPM) précise : Ma préoccupation concerne l'établissement ou l'organisation du groupe de travail. Laissons cela de côté. Vous dites que vous souhaiteriez un groupe de travail mais je pense que vous devez charger le CIPM d'établir ce groupe de travail et de mettre en route le processus.

M. Richard (Suisse) formule le commentaire suivant : Tout d'abord, j'apprécie beaucoup le travail du BIPM et je vous remercie pour le Projet de résolution C que nous approuverons avec grand plaisir. Je souhaiterais avoir des éclaircissements concernant le rôle du groupe de travail proposé. Pour ma part, les termes de référence ne sont absolument pas clairs. Est-ce que les conclusions du groupe de travail porteront sur le contenu de la Résolution X, qui va être retirée, ou sur autre chose ?

M. Steele (Canada) déclare : Premièrement, je souhaite remercier Takashi Usuda pour cette excellente présentation. Je pense que vous avez mentionné nombre des progrès réalisés au cours de la décennie passée ou depuis ces dernières réunions de la CGPM. Je salue en particulier la transparence, l'ouverture et l'approche participative que nous avons collectivement adoptées, non seulement le CIPM mais aussi les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie et les représentants des États afin d'instaurer un dialogue sur ces questions en constante évolution et ayant une portée très large. J'encourage ce type d'initiative et certaines des discussions suscitées par la Fédération de Russie. Retirer le projet de résolution permet de mettre de côté la question de la gouvernance, de la terminologie et de la désignation de l'organisation, ce que j'accueille favorablement et je remercie la délégation russe pour cela. J'espère que la voie que vous avez ouverte afin de coopérer avec les nations par le biais de leur laboratoire national et de leurs représentants sur ces questions, avec la CGPM, sous la supervision du CIPM, sera poursuivie. Je pense que tout un chacun se félicite de cette approche. En prenant la perspective d'un laboratoire, je souhaiterais partager, en tant que responsable d'un autre laboratoire national de métrologie de taille modérée et dans le cadre d'un environnement en constante évolution, les difficultés liées au fait de perdre des compétences approfondies dans un ou deux domaines. Je me réjouis de rechercher des domaines où les compétences peuvent être rapidement mises en œuvre pour traiter de nouveaux problèmes tout en étant prêt à former la prochaine génération de métrologistes dans ces nouveaux domaines. Je comprends les défis que Martin Milton a dû relever et je le soutiens sans réserve. C'est dans ce contexte stratégique que j'accueille favorablement la stratégie que vous avez présentée. Je prévois qu'il en sera de même concernent le programme de travail. Je pense que nous n'aurons aucun problème à accueillir et soutenir pleinement la Résolution C, dans ce nouveau contexte d'ouverture en matière de discussion et de gouvernance.

M. Copan (États-Unis d'Amérique) observe : Je souhaite juste ajouter quelques commentaires et apporter mon soutien vis-à-vis de l'esprit sous-tendant la Résolution C. Je pense que de grands progrès ont été réalisés. M. Usuda les a présentés ce matin de manière convaincante, merci beaucoup pour cette présentation de la stratégie et des progrès accomplis. Je souhaite dire qu'il est important pour nous désormais d'examiner la modernisation de la CGPM, du BIPM, du CIPM et de toutes les relations entre les organisations. Je soutiens totalement l'idée d'avoir un groupe de travail sous la responsabilité du CIPM afin d'examiner les processus clés, les points de décision, les relations entre les parties et en particulier l'implication des États Membres et des laboratoires nationaux de métrologie qui représentent cette magnifique organisation. Je suis convaincu également que nous avons là une formidable occasion d'accroître la clarté et la transparence et de mutualiser les forces au sein de la communauté des laboratoires nationaux de métrologie dans un monde de plus en plus

complexe. Je me réjouis de poursuivre cet esprit de collaboration, comme cela a été clairement souligné dans les documents de stratégie présentés ce matin.

M. Janssen (Allemagne) annonce : Je souhaite d'abord, M. Usuda, vous remercier pour votre présentation qui était très claire. Vous avez clarifié en quoi consiste la stratégie du BIPM. Nous soutenons également la proposition d'établir un groupe de travail chargé de formuler, pour la prochaine réunion de la Conférence générale, des recommandations quant aux pratiques et à la gouvernance appropriées dans les limites de la Convention du Mètre. La recommandation sur la gouvernance devrait être axée sur les principes de clarté, de transparence et de pérennité. Nous demandons également au CIPM de soutenir et organiser ce processus et les États Membres.

Mme Lagauterie (France) déclare : Comme mon collègue suisse, je souhaiterais que nous disposions d'éléments concernant ce groupe de travail. En tous les cas, pour la France, nous avons un véritable souci. Il ne faut clairement pas qu'il soit lié au Projet de résolution X puisque ce Projet de résolution X proposait un changement de nom de l'organisation et des changements de structure qui après confirmation du Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères au titre de la déposition de la Convention ne peuvent pas être faits par des décisions de la CGPM mais nécessiteraient une ouverture de la Convention et de nouvelles négociations du traité. Donc il doit être clair que dans les termes de référence de ce groupe de travail ne figurent pas de discussion sur le nom de l'organisation ou les grandes structures de l'organisation telles qu'elles sont fixées par la Convention.

M. Ortiz (Chili) précise : Comme c'est la première fois que je prends la parole, je voudrais exprimer mes remerciements pour la convocation de cette réunion aujourd'hui. Concernant le processus de vote pour cette résolution, je souhaiterais Monsieur le Président que vous apportiez des clarifications sur les termes de référence qui ont été mentionnés par plusieurs délégations, en particulier en ce qui concerne le statut de ces termes de référence par rapport à la résolution que nous allons voter. Je souhaiterais ces éclaircissements.

M. Thompson (Royaume-Uni) ajoute : Merci au CIPM et à M. Usuda pour cette présentation très claire. Nous soutenons la résolution. Avec un tel groupe de travail, les termes de référence sont absolument essentiels et les définir doit constituer la première tâche. Je voudrais suggérer au CIPM, lors de sa première réunion, d'élaborer un projet de termes de référence que l'ensemble des États Membres pourraient ensuite commenter ; telle serait la marche à suivre.

Mme Buckley (Irlande) déclare : Premièrement, je souhaite remercier le conférencier pour son excellente présentation concernant la résolution C et dire que nous soutenons pleinement l'évolution du BIPM. Je suis quelque peu perplexe concernant l'introduction de ce qui semble être une nouvelle résolution que nous n'avons pas eu l'occasion d'examiner en détail avant d'assister à la réunion. Je dirais que nous avons été pris de court. J'estime que nous devons faire preuve de prudence s'il est décidé de former un groupe de travail car nous devons clairement comprendre quels sont les termes de référence et ce qui en est attendu. J'ai entendu des expressions telles que « gouvernance de l'organisation » et je dois dire que je m'inquiète de l'utilisation de ces termes. Je comprends qu'il est parfois nécessaire pour une organisation de procéder à son propre examen. Ce n'est pas le fait de devoir examiner attentivement les termes de référence qui me pose problème mais le fait que ce sujet soit mis sur la table à ce stade.

M. Bernabé (Espagne) fait la déclaration suivante : Je suis vraiment préoccupé par ce groupe de travail. Je partage les inquiétudes clairement formulées par la France et je soutiens pleinement la déclaration faite par sa représentante.

M. Candel (président de la réunion de la CGPM) conclut : Je pense que nous pouvons passer à la Résolution C. Nous allons examiner cette résolution puis nous procéderons au vote.

26. Présentation et vote du Projet de résolution C

M. Usuda annonce que le texte du Projet de résolution C « Sur les objectifs du BIPM » est disponible depuis début 2018 (voir Annexe A). Le président de la CGPM procède à un vote à main levée : le Projet de Résolution C est adopté à l'unanimité, sans abstention, comme Résolution 3 « Sur les objectifs du BIPM ».

27. Programme de travail du BIPM proposé pour les années 2020 à 2023

M. Milton présente des propositions concernant le programme de travail pour les années 2020 à 2023. Il remercie le CIPM pour sa collaboration positive et constructive au cours des quatre années passées afin d'élaborer la stratégie. La stratégie a servi de point de départ à l'élaboration du programme de travail proposé pour les années 2020 à 2023, conformément à la mission confiée par le CIPM au BIPM. Il rappelle que M. Usuda a déjà expliqué en détail le processus suivi pour fixer les objectifs du BIPM (voir point 25 de l'ordre du jour). Un plan financier a été développé parallèlement au programme de travail. M. Sené, président du Sous-comité du CIPM sur les finances, présentera lors du prochain point de l'ordre du jour le plan financier (voir point 28 de l'ordre du jour).

Le directeur précise que les activités du BIPM continuent à se fonder sur le travail réalisé par le personnel dans tous les secteurs de l'organisation en matière de relations internationales, de coordination et de collaboration technique. Les activités techniques du BIPM, qui ont été examinées avec le CIPM, sont limitées à celles où le BIPM a un rôle spécifique et où il apporte un soutien direct au plus grand nombre d'États Membres. Le programme de travail proposé comprend des estimations concernant le personnel, les ressources et les dépenses nécessaires pour effectuer 66 tâches différentes. Le BIPM prévoit d'être en mesure de réaliser l'ensemble de ces tâches, à l'exception de deux investissements à long terme qui étaient inclus au projet soumis à une consultation initiale et qui ont été retirés du programme lors de la phase d'estimation détaillée des coûts. Pour chacun des quatre domaines scientifiques, le directeur prend comme exemple deux tâches en particulier pour illustrer le contenu du programme de travail pour les années 2020 à 2023.

En métrologie en physique, le BIPM disséminera le kilogramme à partir de la balance de Kibble du BIPM. Le BIPM coordonnera la comparaison des réalisations primaires du kilogramme, ce qui constitue une étape essentielle du nouveau système concernant l'unité de masse. En outre, le BIPM organisera une nouvelle comparaison d'étalons de tension à effet Josephson en courant alternatif.

En métrologie du temps, le BIPM intégrera au calcul de l'UTC des données de fréquence de haute exactitude obtenues à partir d'horloges optiques, ce qui constitue une étape importante vers une redéfinition de la seconde fondée sur des horloges optiques. Par ailleurs, le BIPM automatisera les protocoles de traitement des données afin d'optimiser le calcul de l'UTC et augmenter le nombre de laboratoires qui participent à l'UTC rapide ; l'augmentation visée est de 10 %.

En métrologie en chimie, le BIPM coordonnera la mise en œuvre de nouvelles valeurs pour les sections efficaces UV d'absorption de l'ozone par 25 laboratoires nationaux de métrologie à travers le monde qui jouent un rôle central afin d'établir la traçabilité des mesures mondiales de l'ozone troposphérique. Le BIPM travaillera avec ces laboratoires nationaux afin de mettre en œuvre les résultats de mesure des sections efficaces d'absorption de l'ozone qui ont été obtenus par le BIPM lors du précédent programme de travail. Le nombre de noyaux faisant l'objet d'un document de référence « Internal Standard Reference Data » sera triplé. Les documents ainsi produits sont publiés

après avoir été examinés par un groupe spécialisé de laboratoires nationaux de métrologie au sein du CCQM et permettront une plus grande application, parmi les laboratoires nationaux, des techniques de résonance magnétique nucléaire quantitative dans la caractérisation de matériaux chimiques utilisés comme étalons.

En métrologie des rayonnements ionisants, le BIPM prévoit de doubler le nombre de laboratoires nationaux de métrologie participant aux comparaisons clés et étalonnages des étalons primaires qui étayent la dosimétrie en radiothérapie pour 11 000 accélérateurs cliniques dans le monde. Ce travail sera effectué dans le cadre d'un accord conclu entre le BIPM et la plateforme DOSEO, située à proximité du site du BIPM, permettant ainsi au BIPM d'accéder aux dernières technologies. Par ailleurs, le BIPM lancera le Système international de référence (SIR) de nouvelle génération afin de comparer des étalons de radionucléides émetteurs de rayonnement gamma, utilisés pour des applications dans les domaines de la médecine nucléaire et de la surveillance de l'environnement. À cette fin, le BIPM aura recours à de nouvelles technologies de mesure à faible courant qui ont été utilisées pour les étalons électriques quantiques et pour les aptitudes de mesure à faible courant et haute précision dans les laboratoires nationaux de métrologie.

Dans le domaine des relations internationales, le BIPM continuera à parler d'une seule voix au nom de la métrologie en travaillant en collaboration étroite avec l'OIML. Par ailleurs, le BIPM continuera à défendre les intérêts de la communauté des laboratoires nationaux de métrologie, de façon à ce que les membres d'autres organisations internationales tirent le meilleur bénéfice au niveau national des ressources métrologiques nationales disponibles pour accomplir leur mission. Les relations techniques avec les organisations internationales se font par le biais des Comités consultatifs. Par exemple, l'AIEA participe au CCQM, l'UIT au CCTF, et l'International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) au CCRI.

Dans le domaine de la coordination, le travail du BIPM concerne la mise en œuvre de trois bases de données mondiales importantes. La base de données du BIPM sur les comparaisons clés (KCDB) fait la promotion de la reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie. La base de données du Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire (JCTLM) soutient les mesures de diagnostic *in vitro* dans le monde entier et une nouvelle initiative récente vise à promouvoir les bénéfices de ce travail et à commencer une activité de transfert des connaissances. La base de données du registre international de ressources métrologiques (International Metrology Resource Registry - IMRR), qui est une référence centrale des données et des services de données détenus par la communauté internationale de la métrologie, sera étendue. Ce registre de ressources dans les laboratoires nationaux de métrologie, fondé sur une plateforme développée par le NIST, offre des possibilités extraordinaires. De nombreux laboratoires nationaux ont indiqué leur souhait d'être impliqués à cette initiative qu'il considère comme une occasion de développer cette ressource, à partir de l'investissement déjà réalisé.

Le directeur indique, concernant le programme de renforcement des capacités, que le BIPM propose de continuer les activités fondamentales afin d'augmenter le nombre de laboratoires nationaux de métrologie en mesure de contribuer au CIPM MRA et de pouvoir assumer des responsabilités dans le domaine. En outre, le BIPM assurera des formations afin que les Associés qui participent au CIPM MRA pour la première fois puissent intégrer le système sans subir d'importants délais en raison d'un manque d'informations, de connaissances ou de formation sur le travail lié au CIPM MRA. Il est proposé qu'au moins 420 membres du personnel de laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés participent à des formations fondamentales du programme de renforcement des capacités et de transfert des connaissances de 2020 à 2023.

Le programme technique proposé de renforcement des capacités du BIPM se compose entièrement de projets financés par des partenaires. Les activités techniques de renforcement des capacités sont développées avec des partenaires, organisations régionales de métrologie et groupes de laboratoires nationaux qui collaborent avec le BIPM pour mettre en œuvre les projets. Un nouveau projet technique de renforcement des capacités est proposé dans le domaine de la chimie afin de soutenir les laboratoires nationaux de métrologie qui développent une aptitude métrologique dans le domaine de la chimie clinique visant à améliorer l'exactitude des soins dispensés aux patients. Le BIPM prévoit d'étendre aux autres départements scientifiques du BIPM le modèle du programme technique de renforcement des capacités afin qu'il soit le plus largement utilisé. Il offrira par exemple des possibilités de renforcement des capacités visant à améliorer la qualité des données soumises pour le calcul de l'UTC, à soutenir les nouveaux laboratoires nationaux coordonnant des comparaisons d'étalons électriques quantiques et ceux impliqués dans la dissémination de l'unité de masse, et à coopérer avec les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires désignés travaillant dans le domaine de la dosimétrie et des radionucléides via des projets et ateliers communs. L'objectif est d'accueillir 40 détachés dans les laboratoires du BIPM sur la période 2020-2023, ce qui représente un total de 170 mois-personne. En outre, le BIPM prévoit d'accueillir 100 participants à des ateliers techniques.

Le directeur conclut sa présentation en soulignant que les activités proposées sont ambitieuses et que leur réalisation dépend du travail de scientifiques invités. Il indique que M. Sené expliquera davantage pourquoi les scientifiques invités constituent désormais une part importante des capacités du BIPM. Des scientifiques invités et des spécialistes travailleront avec le personnel du BIPM afin d'exécuter ce programme de travail. Cette participation accrue des scientifiques invités augmente non seulement la capacité de l'organisation mais réduit également les coûts. Certaines activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances ne pourront être réalisées que si des partenariats sont trouvés mais toutes impliquent de collaborer avec les régions. Enfin, le BIPM continuera à favoriser la collaboration technique et scientifique entre les États Membres, en mettant à disposition les capacités de ses laboratoires pour des comparaisons internationales de mesure, sur le principe des frais partagés.

Le président de la CGPM remercie le directeur du BIPM et ouvre la discussion.

M. Phillips fait référence à l'intégration des étalons de fréquence optiques et indique qu'il existe un large consensus sur le fait que la seconde devrait être redéfinie car les laboratoires utilisent essentiellement une définition de la seconde *de facto* fondée sur des étalons optiques de plus haute qualité. Il annonce être étonné de l'existence d'une feuille de route concernant une possible redéfinition de la seconde car il a entendu parler de dates allant de 2025 à après 2030 et demande s'il y a une position officielle à ce sujet. Le directeur répond que le CCTF a en effet une position officielle et dispose d'une feuille de route qui se focalise sur quatre ou cinq critères qui devront être remplis concernant la performance des horloges optiques et leur comparaison. Il sera également nécessaire d'étudier comment il sera possible d'intégrer les données d'horloges optiques au système des échelles de temps, ce qui est l'objet du travail du BIPM. Le directeur indique que la communauté mondiale de scientifiques travaillant sur les horloges optiques devra décider à quel moment les critères définis par le CCTF pourront être remplis.

28. Proposition concernant la dotation du BIPM pour les années 2020 à 2023 (Projet de résolution D)

M. Martyn Sené, membre du CIPM et président du Sous-Comité sur les finances, précise que sa présentation portera sur la gestion financière et la performance financière du BIPM de 2016 à 2019, ainsi que sur la composition du budget proposé concernant la dotation du BIPM pour les années 2020 à 2023. Des informations détaillées sur ces thématiques ont été fournies aux États Membres préalablement à la réunion de la CGPM dans le document « *Principaux progrès réalisés depuis la 25e réunion de la CGPM (2014) et notes à l'appui de la dotation proposée pour les années 2020 à 2023* ». Ces sujets ont également fait l'objet de discussions préliminaires lors de la réunion informelle qui s'est tenue lundi 12 novembre. Des discussions complémentaires se tiendront lors de la réunion du Groupe de travail sur la dotation du BIPM qui se réunira mercredi 14 novembre.

M. Sené précise qu'il est important de noter les points suivants. Le Sous-comité du CIPM sur les finances a félicité le directeur du BIPM et son équipe pour leur gestion financière satisfaisante et prudente lors de chacune des années du programme de travail de 2016 à 2019. M. Sené indique que les états financiers pour les deux premiers exercices de la période ont été présentés et audités dans les délais prévus, puis déclarés « en bonne santé » et certifiés sans réserve. Les auditeurs ont toutefois soulevé la question des engagements à long terme de la Caisse de retraite. C'est une question que le CIPM et le directeur du BIPM, soutenus par la Commission consultative sur la Caisse de retraite (CCCR), ont cherché à résoudre. M. Érard, qui préside la CCCR, rendra compte de cela lors du point 30 de l'ordre du jour.

M. Sené présente les données financières en indiquant les revenus et dépenses pour les années 2016 à 2019. Ces données se composent des résultats audités pour 2016 et 2017, des résultats estimés pour 2018 et des données du budget examiné par le Sous-comité du CIPM sur les finances et approuvé par le CIPM pour 2019. La performance et les prévisions jusque fin 2019 sont meilleures que le budget approuvé présenté lors de la 25e réunion de la CGPM (2014) du fait de la bonne gestion des dépenses. M. Sené note que de nombreuses discussions ont concerné les réalisations impressionnantes du programme de travail du BIPM et son impact. D'un point de vue financier, il est à noter que le BIPM a exécuté ce programme de travail alors que la dotation approuvée par la CGPM à sa 25e réunion n'avait pas été augmentée. Cependant, les produits pour 2019 seront inférieurs à ceux prévus lors de la dernière réunion de la CGPM : en effet, le travail consistant à attirer de nouveaux Membres et Associés a été largement contrebalancé par la décision de ne pas soumettre au mécanisme d'augmentation de leur souscription certains États Associés dont le système de métrologie est émergents, appelés « micro-CEEMS », tel qu'indiqué par le président du CIPM (voir point 8.1 de l'ordre du jour).

M. Sené évoque la participation accrue de détachés au travail du BIPM, qui constitue une manière rentable d'exécuter le programme de travail du BIPM et augmente la participation des États Membres et leur soutien. Il ajoute qu'une approche stratégique planifiée a été adoptée concernant le budget et les dépenses d'investissement. Le BIPM, en consultation avec le CIPM, a élaboré une stratégie et un plan à long terme pour ces dépenses, l'objectif étant de soutenir les laboratoires, de lisser les coûts sur plusieurs années et de réduire le risque de dépenses inattendues.

Dernier point concernant la dotation pour les années 2016 à 2019, les dépenses générales de fonctionnement ont été bien contrôlées. Les dépenses de fonctionnement représentent les frais de fonctionnement courants du BIPM (total des dépenses moins les investissements). De 2013 à 2016, les dépenses de fonctionnement ont connu une baisse continue, du fait d'un certain nombre d'économies et d'améliorations de l'efficacité réalisées par le directeur du BIPM et son équipe.

En 2017, les dépenses de fonctionnement ont augmenté mais étaient encore inférieures au niveau de 2013 ; elles devraient rester stables d'ici fin 2019. Toutefois, les possibilités de réaliser des économies supplémentaires étant limitées et l'inflation en Europe étant estimée à la hausse, le coût lié au maintien d'un laboratoire durable capable d'assumer son rôle devrait augmenter.

M. Sené présente le budget proposé pour les années 2020 à 2023. Il souligne quelques points et précise que des données détaillées ont été communiquées dans les documents envoyés préalablement à la réunion. Le budget proposé pour les années 2020 à 2023 repose sur la stratégie qui a été présentée lors du point 24 de l'ordre du jour, ainsi que sur une estimation détaillée des coûts du programme de travail qui a été mentionnée par le directeur du BIPM au point 25. Le budget a été développé à partir d'une estimation détaillée des coûts du programme de travail.

M. Sené réaffirme que le CIPM continuera à demander au BIPM de réaliser des économies d'efficacité supplémentaires. Le BIPM continuera à planifier avec soin les dépenses liées aux bâtiments et les dépenses d'investissement sur le long terme. Lorsque cela sera possible, le BIPM cherchera par ailleurs à avoir recours à des équipements hors site. Le directeur du BIPM a évoqué l'exemple de l'utilisation de l'équipement DOSEO à Saclay (voir point 25 de l'ordre du jour), qui a permis de conserver une aptitude importante du BIPM et a amélioré les services apportés aux États Membres dans le domaine critique de la radiothérapie, tout en économisant, d'un point de vue financier, un investissement de plusieurs millions d'euros pour l'acquisition d'un accélérateur.

Il sera nécessaire d'effectuer des versements continus à la Caisse de retraite. Comme M. Érard l'évoquera au point 31 de l'ordre du jour, le CIPM et le BIPM chercheront le juste équilibre entre le coût actuel et les engagements à long terme que cela représente pour les États Membres.

Le programme de travail du BIPM pour les années 2020 à 2023 se fonde sur le recours continu à des recrutements de personnes en contrat à durée déterminée et sur une augmentation du nombre de détachés au BIPM. M. Sené présente les dépenses de personnel pour les années 2020 à 2023, ainsi que le nombre de mois-personne déployés dans chacun des départements du BIPM. Plus de détails sont disponibles dans le document « Programme de travail du BIPM pour les années 2020 à 2023 » qui présente les ressources nécessaires en personnel et les coûts pour chaque activité et service fourni. Il est estimé que les détachés pour la période 2020-2023 contribueront à 20 % de l'exécution du programme de travail du BIPM, ce qui représente une participation majeure et rentable. Le recours à des détachés est toutefois limité par deux facteurs. Le premier est la nécessité d'équilibrer les avantages du recrutement de détachés et le développement des nouvelles idées qu'ils apportent avec l'exigence de maintenir une aptitude de long terme au BIPM. Deuxièmement, il existe un nombre maximum de personnes que le BIPM peut physiquement accueillir dans ses locaux.

M. Sené indique que dans le contexte de cette utilisation efficace des fonds, le Projet de résolution D propose une augmentation composée modérée de la dotation. Il poursuit en décrivant la valeur ajoutée qu'apporterait cette augmentation « inférieure à l'inflation » qui permettrait au BIPM d'évoluer et qui vise le long terme. Cette augmentation composée repose sur la stratégie qui consiste à prendre en considération les tendances à plus long terme concernant les priorités des États Membres, à tenir compte des développements de la métrologie et à assurer la stabilité financière à long terme du BIPM.

Fondée sur la stratégie et traduisant les priorités des États Membres, l'augmentation (composée) de 1 % permettra de soutenir les activités fondamentales du programme CBKT. M. Sené évoque les discussions qui se sont tenues sur la grande valeur du programme CBKT, à la fois pour les États dont le système de métrologie est émergent mais aussi pour les autres États Membres en réduisant la charge de travail et donc le coût de participation au CIPM MRA : cela constitue un retour sur investissement indéniable pour l'ensemble des États Membres. M. Sené ajoute que le programme

CBKT reposera sur une base plus solide puisque ses activités fondamentales ne dépendront plus de partenariats.

L'augmentation (composée) proposée de 1 % de la dotation permettra de recruter trois membres du personnel. Au cours des années 2020 à 2023, le BIPM estime qu'il y aura cinq vacances de poste dues à des départs à la retraite et à la fin de contrats à durée déterminée, ce qui réduira le nombre de membres du personnel de 72 à 67. Il est proposé de pouvoir trois de ces vacances de poste.

L'augmentation proposée de la dotation permettra au BIPM de se préparer pour le programme de travail qui commencera en 2024 car les besoins et les priorités des États Membres changent, traduisant ainsi les défis et les évolutions auxquels le monde est soumis. D'autres membres du personnel du BIPM partiront à la retraite et les finances du BIPM sont sous pression, ce qu'il est prudent de prendre en considération et de traiter avec mesure. La dotation pour les années 2016 à 2019 était une dotation sans augmentation, ce qui a été compensé par des économies d'efficacité concernant les dépenses de fonctionnement. Bien que le CIPM continue à espérer des économies de la part du BIPM, les possibilités de contrer l'inflation seront limitées.

M. Sené indique que le fonctionnement annuel sous-jacent du BIPM sera probablement en déficit à la fin du prochain programme de travail (2020-2023). Du fait des réserves de trésorerie, cela ne devrait pas être une préoccupation mais il serait prudent pour le CIPM et le directeur du BIPM d'envisager des solutions, telles qu'avoir recours à des postes partagés entre le BIPM et d'autres organismes, trouver un équilibre entre les recrutements permanents et ceux à durée déterminée, externaliser certaines tâches et redéfinir les priorités en matière de postes. Il observe qu'il serait utile pour le BIPM de disposer d'un budget modéré pour commencer une réorganisation limitée afin d'envisager l'avenir avec confiance. M. Sené ajoute qu'il a apporté des changements dans un certain nombre d'organisations du secteur public comme du secteur privé : il précise que procéder à des changements dans une organisation engendre certes des coûts mais que repousser ces changements est généralement encore plus onéreux.

M. Sené termine sa présentation en recommandant aux États Membres d'approuver le Projet de résolution D. Il ajoute que les notes à l'appui de la dotation proposée comportent d'autres scénarios, l'un avec une augmentation réduite et l'autre sans augmentation de la dotation. Même si ces scénarios permettraient de réaliser les activités fondamentales du programme de travail, ils n'apporteraient pas l'augmentation modérée nécessaire pour permettre au BIPM d'évoluer afin de répondre à tous les futurs besoins des États Membres. Le Projet de résolution D soutiendra un programme de travail qui permettra au BIPM de servir au mieux les intérêts des États Membres et de s'adapter pour pouvoir répondre de manière durable à l'évolution de leurs besoins.

Le président de la CGPM remercie M. Sené et précise que les questions relatives à la dotation pourront être discutées lors de la réunion du Groupe de travail sur la dotation du BIPM qui se tiendra le mercredi 14 novembre. Il clôt la troisième séance.

Quatrième séance – 14 novembre 2018 (après-midi)

Le président de la CGPM souhaite la bienvenue aux délégués pour la quatrième séance.

29. Question des États Membres en situation d'arriérés

M. James McLaren, secrétaire du CIPM et secrétaire de la CGPM, commence par présenter de façon succincte la situation générale concernant les arriérés : grâce au travail de nombreux membres du personnel du BIPM, la situation actuelle est très satisfaisante, comparée au passé. Deux États Membres, le Pakistan et la Tunisie, ont une année d'arriérés, pour 2017, ce qui équivaut à environ 1 % de la dotation de l'année 2017.

On ne compte aucune contribution due pour les années antérieures à 2017, à l'exception des arriérés de la République bolivarienne du Venezuela pour les années 2013 à 2018. En 2012, le Venezuela a versé un montant de 1 848 euros, soit 3 % de la contribution qu'il devait régler. Ainsi, le Venezuela comptabilise presque sept années d'arriérés, pour un total de 558 000 euros. Le personnel du BIPM a essayé à de nombreuses reprises de résoudre cette situation, notamment par de nombreuses tentatives afin de trouver un accord, mais tous les efforts ont été infructueux.

La procédure définie dans la Résolution 8 « Sur les contributions arriérées des États Membres » adoptée par la CGPM à sa 23e réunion (2007) a été suivie en ce qui concerne le Venezuela et les efforts diplomatiques en vue de l'obtention d'un accord ont été engagés. Par conséquent, le CIPM à sa session de juin 2018 (Décision CIPM/107-05) a décidé de recommander à la CGPM de prendre une décision, lors de sa 26e réunion, quant à l'exclusion de la République bolivarienne du Venezuela conformément à l'article 6 du Règlement annexé à la Convention du Mètre et conformément à la Résolution 8 adoptée par la CGPM à sa 23e réunion.

La décision CIPM/107-05 (juin 2018) est la suivante : « *Le CIPM note que la République bolivarienne du Venezuela ne s'est pas acquittée de ses contributions depuis six années. Conformément à la Résolution 8 adoptée par la CGPM à sa 23e réunion (2007), une notification officielle a été adressée à cet État Membre l'invitant à exécuter ses obligations financières et lui rappelant la procédure régissant le recouvrement des contributions arriérées et l'exclusion. Le CIPM recommandera à la CGPM à sa 26e réunion de prendre une décision quant à l'exclusion de la République bolivarienne du Venezuela conformément à l'article 6 du Règlement annexé à la Convention du Mètre.* »

M. McLaren indique que la proposition d'exclure la République bolivarienne du Venezuela est ouverte à la discussion. Il suggère que les comptes rendus de la présente réunion de la CGPM prenne note de la recommandation faite par le CIPM dans sa décision CIPM/107-05 de juin 2018 et que la CGPM approuve cette recommandation.

Le président de la CGPM demande si les délégués ont des commentaires ou des questions. En l'absence de commentaires, la CGPM approuve la décision suivante à main levée, avec cinq abstentions : « *La CGPM prend note de la recommandation du CIPM formulée dans la Décision CIPM/107-05 de juin 2018. La CGPM entérine cette recommandation et décide, au vu de la persistance de l'État à ne pas exécuter ses obligations financières, d'exclure la République bolivarienne du Venezuela en tant qu'État Partie à la Convention du Mètre avec effet immédiat.* » Les États Membres qui se sont abstenus sont les suivants : l'Argentine, le Brésil, la Croatie, l'Italie et la Suède.

30. Présentation et vote du Projet de résolution E

M. Barry Inglis, président du CIPM, présente le Projet de résolution E « Sur les contributions arriérées des États Membres et la procédure d'exclusion ». Il observe que la CGPM vient de procéder à un vote concernant le Venezuela, conformément aux exigences de la Résolution 8 (2007) (voir point 29 de l'ordre du jour). Toutefois, la Résolution 8 (2007) ne résout pas de façon claire la question des États Membres en situation d'arriérés, c'est pourquoi elle doit être complétée par le Projet de résolution E. M. Inglis explique ensuite le fondement de la nouvelle résolution.

M. Inglis fait référence à l'article 6 (1921), du Règlement annexé à la Convention du Mètre :

> *6. Si un État est demeuré trois années sans effectuer le versement de sa contribution, celle-ci est répartie entre les autres États, au prorata de leurs propres contributions. Les sommes supplémentaires, versées ainsi par les États pour parfaire le montant de la dotation du Bureau, sont considérées comme une avance faite à l'État retardataire, et leur sont remboursées si celui-ci vient à acquitter ses contributions arriérées.*
>
> *7. Les avantages et prérogatives conférés par l'adhésion à la Convention du Mètre sont suspendus à l'égard des États déficitaires de trois années.*
>
> *8. Après trois nouvelles années, l'État déficitaire est exclu de la Convention, et le calcul des contributions est rétabli conformément aux dispositions de l'article 20 du présent Règlement.*

Une interprétation littérale de l'article 6 implique qu'il ne devrait pas être nécessaire pour la CGPM de prendre une décision à chaque fois que la question de l'exclusion se pose pour un État en situation d'arriérés. M. Inglis explique davantage la procédure d'exclusion prévue par l'article 6 alinéas 6 à 8 (1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre. En résumé, les avantages et prérogatives sont suspendus après trois années d'arriérés, l'État est exclu après six années d'arriérés et aucune décision n'est requise de la part de la CGPM. En d'autres termes, au cours des trois premières années de défaut de paiement, aucune contribution n'est versée au BIPM par l'État débiteur. Au cours des trois années suivantes, les contributions sont réparties entre les États Membres. En l'absence d'exclusion après ces six années, la situation d'arriérés peut se poursuivre sur de plus longues périodes. La Résolution 8 (2007) a été adoptée dans l'objectif de suivre cette procédure. Toutefois, on a pu constater que sa formulation introduit une étape supplémentaire à la procédure d'exclusion qui n'était pas prévue, à savoir qu'une recommandation doit être faite à la CGPM lors de sa prochaine réunion afin qu'elle approuve l'exclusion. Cette étape est celle qui a été suivie dans le cas de l'exclusion de la République bolivarienne du Venezuela.

M. Inglis observe que, même si la Résolution 8 (2007) avait pour objectif de résoudre certaines questions, elle a également suscité un certain nombre de difficultés. En effet, les dispositions de la Résolution 8 prêtent à confusion car il n'est pas certain à partir de quel moment l'exclusion d'un État doit avoir effectivement lieu étant donné que la date d'une réunion de la CGPM peut ne pas nécessairement coïncider avec la fin de la période de six ans d'arriérés. En outre, la Résolution 8 (2007) prévoit que la notification formelle invitant l'État Membre débiteur à exécuter ses obligations financières n'est adressée qu'après six années de contributions arriérées bien que l'article 6 alinéa 8 du Règlement annexé indique clairement « l'État déficitaire est exclu de la Convention » après six ans. Ainsi, cette disposition de la Résolution 8 (2007) fait débuter une période supplémentaire de négociation qui peut repousser l'exclusion au-delà de six ans. Une autre clause de la Résolution 8 (2007) permet au CIPM de conclure un accord de rééchelonnement avec l'État débiteur : par conséquent, le temps nécessaire pour parvenir à conclure un accord de rééchelonnement peut prolonger la période d'arriérés au-delà de six années. M. Inglis ajoute que la Résolution 8 fait

référence à la CGPM : « *l'exclusion est notifiée par la Conférence générale à l'État Membre, par l'intermédiaire du ministère des Affaires étrangères de la République française*. » Il observe que la CGPM n'accomplit pas de formalités administratives, ces dernières étant du ressort du CIPM.

M. Inglis explique que l'objectif du Projet de résolution E « Sur les contributions arriérées des États Membres et la procédure d'exclusion » est de clarifier la situation et d'appliquer pleinement l'article 6 du Règlement annexé, de sorte qu'après six années d'arriérés l'exclusion soit automatique. Il rappelle qu'à la suite de la réunion informelle qui s'est tenue le lundi 12 novembre, deux suggestions de modifications éditoriales ont été effectuées et il invite les délégués à lui faire part de leurs commentaires avant de procéder au vote du Projet de résolution E. Le texte complet du Projet de résolution E est disponible dans la Convocation de la Conférence générale des poids et mesures à sa 26e réunion (voir Annexe A).

Le président de la CGPM remercie MM. McLaren et Inglis pour leur présentation et ouvre la discussion.

M. Rietveld (membre du CIPM) précise que le CIPM a discuté du fait de savoir qui est effectivement responsable d'exclure un État Membre débiteur et certains membres du CIPM se sont abstenus ou ont voté contre le projet de résolution proposé. Il ajoute qu'en tant que membre du CIPM, il ne souhaite pas exclure d'États car il s'agit d'une question très délicate. Il indique que l'essence du premier point des « décide » du Projet de résolution E est simplement d'appliquer ce qui est déjà dans la Convention du Mètre : « *le CIPM appliquera l'article 6 alinéa 8 du Règlement annexé* ». Selon lui, ce premier point propose que le CIPM mette en œuvre ce que les gouvernements ont déjà décidé ensemble. Par conséquent, chaque fois que le CIPM est mentionné dans le Projet de résolution E (dans les « décide » et dans le premier point modifié des « confirme »), cela signifie que le CIPM met simplement en œuvre ce qui a déjà été décidé et approuvé par les États Membres. M. Rietveld souhaite être parfaitement clair concernant ce point : exclure un État Membre n'est pas une décision du CIPM ou de ses membres individuels. M. Inglis remercie M. Rietveld pour cette clarification.

M. Steele (Canada) partage les observations de M. Rietveld. Il indique qu'au cours de la réunion informelle du lundi 12 novembre, l'un des sujets discutés concernait la question de procédure liée à cette situation d'attente incertaine pour les États avant que ne se tienne la prochaine réunion de la CGPM où sera prise la décision quant à l'exclusion effective d'un État. M. Steele demande s'il est possible que la CGPM soit informée à l'avance des États qui sont potentiellement en situation d'arriérés et d'obtenir un accord *de facto* anticipé quant à l'exclusion. M. Steele convient que cette période d'attente incertaine, qui peut durer un certain temps, est source de confusion. Il partage également l'avis de M. Rietveld par rapport au fait que le CIPM devrait simplement appliquer une décision de la CGPM.

M. Milton (directeur du BIPM) répond qu'à la suite de toute exclusion, l'information est transmise à l'ensemble des États Membres par le Ministère français de l'Europe et des affaires étrangères. Il demande au conseiller juridique de confirmer que la CGPM n'existe que lorsqu'elle est convoquée, c'est pourquoi elle ne peut prendre une décision quant à l'exclusion d'un État Membre tel que requis par la Résolution 8 (2007) que lorsqu'elle est convoquée. M. Rojas Ceballos (conseiller juridique du BIPM) indique que la CGPM est l'organe plénier décisionnel du BIPM, formé de délégués de tous les États Membres. En principe, la CGPM n'exerce son mandat conformément à l'article 3 de la Convention du Mètre que lorsqu'elle est convoquée (c'est-à-dire au moins une fois tous les six ans). Les délégués des États Membres assistant à la réunion de la CGPM représentent les positions de leur gouvernement respectif lorsqu'ils votent les résolutions, conformément à la Convention du Mètre et à son Règlement annexé. Comme précédemment mentionné, le CIPM doit œuvrer conformément à la volonté des États qui ont signé, et accédé à, la Convention du Mètre, en vue d'appliquer ses dispositions, dont l'article 6 alinéa 8 de son Règlement annexé. Le CIPM se réunit plus fréquemment que l'organe plénier, la CGPM. Il n'est donc pas surprenant que l'organe qui exerce la direction et la

surveillance exclusive du BIPM soit celui qui mette en œuvre les résolutions adoptées par la CGPM, y compris celles liées aux arriérés des États Membres comme le Projet de résolution E.

M. Zvizdic (Croatie) déclare pleinement comprendre l'objectif proposé par le Projet de résolution E car seules deux étapes seraient alors nécessaires avant l'exclusion d'un État alors qu'actuellement on en compte trois, ce qui correspond à une période de plusieurs années au cours desquelles aucune décision n'est prise. Il rappelle les observations qu'il a faites lors de la 24e réunion de la CGPM (2011), lorsque l'exclusion de quatre pays était considérée. Sa proposition avait été acceptée et certains de ces pays sont restés États Membres. Il ajoute que si un État ne paie pas sa contribution, les autres États Membres doivent partager le coût. M. Zvizdic rappelle aux délégués que si un État Membre est exclu, le coût doit aussi être partagé. Il conclut en indiquant que tout doit être fait pour que les États restent Parties à la Convention du Mètre.

M. Inglis répond que tout est mis en œuvre pour que les États restent Membres et précise qu'un État Membre débiteur est informé lorsqu'il atteint trois années d'arriérés. Il souligne que la situation des États Membres est suivie de près par le BIPM qui engage constamment avec eux d'intenses négociations afin qu'ils demeurent Parties à la Convention du Mètre. Il répète que ces actions doivent avoir lieu bien avant qu'un État débiteur n'atteigne les six ans d'arriérés. Après six années d'arriérés, l'exclusion devrait être automatique.

M. Zvizdic (Croatie) ajoute qu'il devrait exister une provision pour les pays qui ne sont pas en mesure de payer leur contribution en raison de circonstances exceptionnelles, comme lors de périodes de conflit. M. Inglis répond qu'il ne voit de raison pour lesquelles la CGPM ne pourrait pas examiner des cas individuels en cas de circonstances exceptionnelles comme celles-ci. Toutefois, il souligne que les États Membres doivent être conscients des règles et doivent les respecter.

Le président de la CGPM procède au vote du Projet de résolution E à main levée. Le Projet de résolution E est adopté à l'unanimité comme Résolution 5 « Sur les contributions arriérées des États Membres et la procédure d'exclusion ».

M. Steele (Canada) soulève un point de procédure et mentionne qu'il n'est pas sûr des règles suite à l'adoption de la Résolution 5 (2018). Il demande si la Résolution 5 abroge la précédente résolution, qui est mentionnée dans les « considérant » comme « Résolution 8 adoptée par la CGPM à sa 23e réunion », et si tel est le cas, comment cela doit-il être mis en œuvre ou si la Résolution 5 modifie simplement la procédure. M. Inglis répond que selon lui, la Résolution 8 (2007) ne devrait pas être abrogée car certaines parties doivent être conservées. Selon l'avis juridique, il n'est pas nécessaire d'abroger en totalité la Résolution 8 (2007) car cette dernière comprend certains éléments clés qui doivent être préservés, telles ceux liés au règlement des arriérés avant de pouvoir rejoindre l'organisation et ceux concernant le paiement d'une contribution d'entrée. La Résolution 5 (2018) vient par conséquent compléter la Résolution 8 (2007) et les deux résolutions doivent être lues conjointement. En cas d'incompatibilité ou de désaccord entre ces deux résolutions, les dispositions de la Résolution 5 (2018) doivent prévaloir.

31. La Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM

M. Érard, président de la Commission consultative sur la Caisse de retraite (CCCR), indique que sa présentation portera sur les actions prises à la suite de la Résolution 3 (2014) « Sur la Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM », parmi lesquelles la mise en œuvre de différentes propositions visant à assurer la stabilité financière à long terme de la Caisse de retraite ainsi que la voie à suivre.

M. Érard rappelle que dans la Résolution 3 (2014), la CGPM invitait le CIPM :

- *à mettre en œuvre les plans qu'il a élaborés afin d'assurer la soutenabilité de la Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM tout en continuant à examiner la question des passifs sur le long terme,*
- *à tenir informés les États Membres des conclusions des études actuarielles sur les actifs et les passifs de la Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM, par le biais des publications financières habituelles du CIPM et lors de la prochaine réunion de la CGPM.*

Depuis l'adoption de cette résolution, plusieurs réunions ont été organisées en 2015 et ont mené à l'établissement de la Commission consultative sur la Caisse de retraite (CCCR) (Décision CIPM/104-33). La création de cette commission consultative, dont la mission porte exclusivement sur les questions relatives aux pensions, est conforme à la politique suivie dans les autres organisations internationales. La CCCR, qui est un Sous-comité du CIPM, s'est réunie six fois depuis son établissement. Elle comprend parmi ses membres trois représentants du personnel, un représentant des pensionnés, trois membres du CIPM, le directeur du BIPM et, lorsque nécessaire, un expert externe nommé par le CIPM. M. Érard précise qu'en tant que président de la CCCR, il a rendu compte au bureau du CIPM des travaux accomplis et que la CCCR a dûment soumis ses recommandations au CIPM lorsque cela s'est avéré nécessaire.

M. Érard présente un graphique montrant une projection des actifs de la Caisse de retraite de 2016 à 2056 ; ce graphique a été élaboré par l'actuaire, Mercer. M. Érard rappelle que l'étude actuarielle réalisée par Mercer a recommandé, afin de conserver les mêmes prestations de retraite définies, d'augmenter par palier les cotisations des membres du personnel du BIPM pour atteindre 19,8 % ou 18,8 % du salaire brut en fonction de leur date de recrutement, avant ou après le 1er janvier 2010 (Section pré-2010 ou Section post-2010). Il rappelle que l'étude actuarielle recommandait aussi que les membres du personnel recrutés après le 1er janvier 2017 paient une cotisation fixe de 15 % du salaire brut (Section post-2017) mais avec des prestations servies moindres par rapport aux deux autres sections.

M. Érard indique que les propositions faites par Mercer ont fait l'objet de discussions avec le personnel du BIPM et la direction du BIPM, et qu'elles ont été évaluées par la CCCR. Suite à une consultation approfondie, le CIPM a approuvé en octobre 2016 les mesures recommandées (Décisions CIPM/105-5 et CIPM/105-6). Il est à noter que ces mesures ont été complétées par une contribution du BIPM à la Caisse de retraite équivalant à 46 % de la masse salariale, ainsi que d'une contribution supplémentaire du BIPM à la Caisse, d'un montant de 400 000 euros en 2017 puis de 150 000 euros par an les années suivantes, prélevée sur les réserves dans le but d'assurer aux membres (et anciens membres) du personnel la garantie de leurs droits à long terme.

M. Érard rappelle également que les recommandations actuarielles comprennent l'introduction d'un « point applicable aux pensions » et d'un gel des pensions pour une durée de cinq ans. Ainsi, en octobre 2017, le CIPM a décidé à l'unanimité d'introduire un « point applicable aux pensions » qui ne serait pas révisé en 2018 et 2019 (Décision CIPM 106-07). Seul un gel de deux ans a été mis en place alors que Mercer avait proposé un gel de cinq ans. M. Érard informe les délégués de la CGPM que deux retraités ont fait appel de cette décision auprès du Tribunal administratif de l'Organisation internationale du travail (TAOIT).

M. Érard rappelle enfin que l'un des points discutés lors de la 25e réunion de la CGPM (2014) était que les actifs de la Caisse de retraite ne devaient pas baisser sur une période de trente ans. Il observe qu'une politique d'investissement prudente est appliquée et que Mercer a été chargé de conduire en 2017 une étude concernant la stratégie d'investissement.

M. Érard conclut sa présentation en évoquant les prochaines étapes concernant la Caisse de retraite du BIPM. Une étude actuarielle sera réalisée en 2019 : elle permettra d'examiner l'efficacité des options prises pour assurer la stabilité à long terme de la Caisse de retraite, d'évaluer si le gel du point des pensions est toujours requis, d'évaluer si d'autres mesures doivent être prises, et d'étudier l'impact éventuel de la politique contractuelle d'engagements de durée déterminée. Enfin, la CCCR réalisera un examen continu de la performance financière des actifs de la Caisse de retraite.

Le président de la CGPM remercie M. Érard pour sa présentation très claire et ouvre la discussion.

M. Inglis (président du CIPM) indique que l'examen de la Caisse de retraite a constitué un défi pour toutes les personnes qui y ont été impliquées. Néanmoins, les consultations constructives auprès du personnel et auprès des organes représentant le personnel ont permis de réaliser des progrès. M. Inglis constate que les membres du personnel sont en droit d'être préoccupés par la réduction de certaines prestations définies mais, sur le long terme, il est dans leur intérêt que le BIPM adopte les mesures recommandées par l'actuaire afin d'assurer la stabilité de la Caisse de retraite.

Le président de la CGPM clôt la quatrième séance.

Cinquième séance – 15 novembre 2018 (matin)

Le président de la CGPM souhaite la bienvenue aux délégués pour la cinquième séance.

32. Rapport provisoire du Groupe de travail sur la dotation du BIPM

M. Inglis, président du Groupe de travail sur la dotation du BIPM, présente un rapport succinct sur les discussions qui se sont tenues le mercredi 14 novembre. Il rappelle que 26 États Membres étaient représentés au cours de cette réunion et qu'à la suite de discussions, ces États Membres ont fait part de leur intention de vote concernant le Projet de résolution D « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2020 à 2023 ». Vingt-et-un États Membres sur les 26 représentés lors de la réunion du groupe de travail ont indiqué qu'ils comptaient voter en faveur du Projet de résolution D et cinq qu'ils s'abstiendraient. Aucun État Membre n'envisageait de voter contre.

M. Inglis incite les délégués à réfléchir à ce résultat avant de se prononcer sur le Projet de résolution D vendredi 16 novembre. Il leur rappelle que si un État Membre vote contre le Projet de résolution D, cela aurait de graves conséquences car la dotation ne pourrait rester telle qu'elle est proposée et il serait nécessaire de convoquer à nouveau une Conférence générale en 2019.

33. Les nouvelles frontières de la métrologie en biologie

M. Marc Salit, du NIST, fait une présentation invitée intitulée « Les nouvelles frontières de la métrologie en biologie ». Il commence par expliquer le contexte de la formation de la Joint Initiative for Metrology in Biology (JIMB, Initiative conjointe de métrologie en biologie), une collaboration entre le NIST et l'Université de Stanford qui en sont les partenaires fondateurs. Le JIMB a été fondé afin d'établir un nouveau type de partenariat entre le monde universitaire, le gouvernement et l'industrie afin de soutenir les sciences de la vie et les biotechnologies au 21e siècle. L'objectif est d'offrir un centre de collaboration pour la science de la mesure et les étalons dans le domaine des technologies en « omique » et de la biologie synthétique. Le JIMB se concentre sur la maîtrise opérationnelle de la matière vivante au niveau de la cellule par le biais du principe d'organisation « Measure, Model, Make » (mesurer, modéliser, fabriquer), dans les domaines de la génomique et de la biologie synthétique, ainsi qu'en mesurant tout ce qui se trouve à l'intérieur de la cellule. M. Salit souligne que le JIMB ne travaille pas dans les domaines métrologiques des propriétés des biomatériaux, du diagnostic médical, de la biothérapeutique, de la médecine régénérative et de l'imagerie diagnostique.

M. Salit présente un schéma simplifié du fonctionnement d'une cellule : on a premièrement le génome, dont le support est l'ADN, puis le transcriptome, qui détermine comment la cellule crée de l'activité, et enfin le protéome, qui est le matériau constituant la cellule et ce qui l'entoure. Ces trois entités biomoléculaires sont les grands ensembles moléculaires qui contiennent l'information génétique, déterminent l'activité et sont caractéristiques du vivant. Une approche systématique est actuellement utilisée pour mesurer ces mesurandes extrêmement multiplexés de systèmes hétérogènes dont la dynamique et les interactions sont complexes. M. Salit indique qu'une cellule vivante est une composition de ces interactions et qu'elle est gouvernée par la biophysique.

Les mesures dans le domaine de la biologie ont connu une révolution en 2006 suite à la publication de l'article intitulé « Accurate multiplex polony sequencing of an evolved bacterial genome »[4]. Après cette publication, le laboratoire de George Church à la Harvard Medical School décida d'utiliser des caméras CCD (dispositif à transfert de charge) pour observer, en parallèle, les réactions biochimiques sur un substrat plan à l'aide d'un microscope. Ce travail a permis de développer des séquenceurs d'ADN nettement améliorés et a réduit de façon considérable le coût du séquençage de l'ADN ; un génome humain peut désormais être séquencé pour moins de 1 000 dollars américains. M. Salit note que la recherche en biosciences offre de très vastes possibilités et est soumise à une très forte compétition. Le budget le plus récemment affecté aux National Institutes of Health aux États-Unis s'élève à environ 39 milliards de dollars américains par an, ce qui est significativement plus important que le budget de n'importe quelle autre agence scientifique.

M. Salit présente une feuille de route de l'état actuel des aptitudes de mesure concernant le génome, le transcriptome, le protéome et le métabolome et observe que davantage de travail reste à faire, notamment en termes de communication avec les parties prenantes. La communauté de la métrologie en biologie collabore avec d'autres communautés afin de développer des références pour des protocoles dans des domaines tels que la représentation des données, l'échange des données, les exigences et spécifications, les matériaux d'étalonnage, les matériaux et données de validation et de référence. La communauté de la métrologie en biologie a trouvé cela plus efficace de travailler en partenariat avec des chercheurs qui ont des préoccupations similaires en termes de comparabilité, compatibilité, validité et véracité de leur travail et d'introduire les outils de la métrologie en chimie dans le domaine de la biologie génomique.

Jusqu'à présent, cette stratégie a été fructueuse mais seulement en travaillant en partenariat avec les parties prenantes. M. Salit note que la communauté de la métrologie en biologie a effectué des progrès satisfaisants au niveau du génome et donne un aperçu des futurs développements. Des essais réglementaires permettent de déterminer quels éléments du génome sont incorporés au transcriptome et quels éléments de l'ADN sont transcrits en ARN. La prochaine étape est de déterminer comment l'ARN est traduit en protéine et comment cette protéine agit pour générer le métabolisme et l'activité biologique. Des investissements importants ont été réalisés pour mettre au point les essais et les mesures et développer des outils, au cours de cette phase. M. Salit espère un effort de coordination mondial de la part du JIMB pour intégrer la métrologie à cette initiative dès le départ.

M. Salit mentionne le projet ENCODE, qui consiste à établir une encyclopédie des éléments de l'ADN et qui rassemble un consortium mondial de chercheurs afin de développer des méthodes pour identifier les éléments fonctionnels de l'ADN génomique. Le consortium a développé des exigences et spécifications pour décrire ce que doit être un essai et les chercheurs s'intéressent aux matériaux d'étalonnage. Actuellement, ENCODE dispose de nombreuses références partagées mais pas en ce qui concerne l'étalonnage : le consortium étudie comment utiliser les références partagées pour créer des matériaux de validation et des stratégies de validation.

M. Salit observe qu'en s'inspirant de la métrologie en chimie, il est possible de développer des matériaux de référence utilisables en biologie. Il cite les exemples des matériaux de contrôle de l'External RNA Control Consortium (ERCC) pour les mesures quantitatives (spike-ins du transcriptome) et des mesures qualitatives des génomes humains du Genome in a Bottle (GIAB) : ces matériaux de référence ont été créés par des partenariats de consortiums puis ils ont été largement adoptés car ils répondent à des besoins spécifiques en matière de mesure au niveau du génome.

M. Salit donne des détails techniques sur les contrôles de l'ERCC et observe que l'application

[4] Shendure, J. et al, (2005). Accurate multiplex polony sequencing of an evolved bacterial genome. *Science*, **309**(5741), 1728-1732.

efficace du système a été facilitée par l'utilisation d'un logiciel d'analyse appelé « erccdashboard ». Ce dernier permet d'effectuer des mesures de la performance indépendantes de la technologie qui montrent des différences de performance selon les expériences, les laboratoires et les procédures de mesure. Ce logiciel permet d'effectuer des mesures ou analyses quantitatives de type « chimie analytique » et de déterminer les « bonnes » performances de laboratoires par rapport aux « mauvaises » performances.

Le consortium Genome in a Bottle (GIAB) produit et dissémine des matériaux de référence du génome humain. Il crée des échantillons de référence et des matériaux de validation partagés qui permettent d'évaluer, de démontrer, d'améliorer et d'optimiser les technologies. Par ailleurs, le consortium a développé un tableau de bord de référence avec ses parties prenantes au Global Alliance for Genomics and Health (GA4GH) et répond aux besoins des développeurs de technologie, des autorités de réglementation et des équipes de recherche clinique.

M. Salit présente brièvement la future orientation des technologies génomiques en prenant l'exemple du séquençage par nanopore d'une molécule unique. Cette technologie utilise des nanopores protéiques pour séquencer l'ADN. De longs brins d'ADN sont déroulés par une enzyme et passés à travers un pore protéique qui génère un signal électrique proportionnel au nucléotide ADN : cette technique donne une lecture de la séquence sous-jacente. Le séquençage par nanopore ne donne pas des résultats aussi exacts que le séquençage de lectures courtes, qui fournit des données concernant quelques centaines de nucléotides, mais les résultats actuellement obtenus sont spectaculaires.

M. Salit indique que les cellules simples peuvent être envisagés comme des « atomes de la biologie ». Actuellement, dans le domaine de la génomique à partir d'une cellule simple, les chercheurs commencent à réaliser des mesures de cellules simples. Au lieu de mesurer des collections hétérogènes de millions de cellules en une seule fois, ce qui constitue principalement ce que la génomique a effectué depuis ses débuts, il est désormais possible d'étudier une par une des populations de cellules. M. Salit prend pour exemple le fait de construire un atlas de la cellule humaine à l'aide du séquençage des ARN sur cellules uniques. Un graphique des tissus et de leurs profils d'expression des gènes, à partir de mesures d'échantillons comprenant des populations de cellules hétérogènes et de deux tissus (cortex frontal et hippocampe), a d'abord été développé. En utilisant les données des cellules simples et en comparant comment les différents individus d'un groupe de 22 cadavres coïncident, il a été possible de démontrer que des cellules particulières ont des signatures particulières, propres à chacune d'entre elles.

M. Salit conclut sa présentation en proposant aux laboratoires nationaux de métrologie, lorsqu'ils établissent des programmes de métrologie en biologie, de ne pas simplement se concentrer sur les besoins immédiats mais de se demander ce qu'il faut connaître pour créer une technologie biologique robuste qui réponde aux exigences de la société et des économies dans le monde. Il ajoute qu'un réel travail en métrologie doit être réalisé dans le domaine des indicateurs et de la comparabilité à partir de l'analyse des données.

Le président de la CGPM remercie M. Salit et ouvre la discussion.

M. Phillips se déclare intrigué par l'analyse statistique qui a permis d'examiner la différence entre un « bon laboratoire » et un « mauvais laboratoire » en termes de faux positifs et vrais positifs. Il demande à M. Salit s'il sait ce que ces laboratoires font différemment et si ces outils peuvent aider les « mauvais laboratoires » à atteindre le niveau des « bons laboratoires ». M. Salit répond qu'il est en effet possible d'utiliser ces outils à cet effet. C'est un processus complexe de passer de l'échantillon biologique au comptage de l'expression du gène ; ces outils permettent aux chercheurs d'analyser les sources de variabilité et d'évaluer leur ordre de grandeur relative.

M. Ullrich (membre du CIPM) rappelle que le prix Nobel de médecine en 2014 récompensait des travaux dans le domaine de la biologie structurelle. Il observe que la traçabilité est un concept pratique mais rarement utilisé comme fondement de l'infrastructure de la qualité et des réglementations dans le monde. Il estime que les besoins de la communauté de la biologie devraient ainsi faire l'objet de discussions.

M. Candel (président de la CGPM) demande ce que signifie le terme « metrology of completeness of databases » (métrologie de l'exhaustivité des bases de données) qui apparaît dans la présentation de M. Salit. M. Salit répond que l'essentiel de l'interprétation des données du génome provient de la comparaison à une base de données ou une base de connaissances et qu'on observe pour le moment d'importants écarts. La plupart de la population des génomes qui a été observée et archivée dans des bases de données concerne des personnes d'origine européenne. La base génétique d'une maladie n'est pas seulement une question eurocentrée mais les bases ne contiennent pas encore suffisamment de données concernant la diversité. Par ailleurs, certaines maladies rares sont sous-représentées dans les bases de données. C'est pourquoi il est difficile d'évaluer la confiance qui peut être accordée à un résultat lorsque celui-ci est comparé à la base de données. D'autres activités impliquent d'étudier tout le séquençage clinique du génome. Lorsqu'un génome est obtenu à partir d'un échantillon clinique, la question est de savoir comment il devrait être analysé et comment il devrait être annoté de façon fonctionnelle et utilisé dans les bases de données. En menant ces activités, il devrait être possible de comprendre le niveau de confiance, la provenance et la fiabilité de ces données de sorte qu'elles puissent être comparées dans le futur lorsque ce variant génomique particulier réapparaît dans une autre personne.

34. Mesurer avec précision les isotopes pour un monde durable, plus sûr et plus sain

M. Manfred Gröning, de la Division des Laboratoires de l'environnement de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), commence par rappeler la devise de l'AIEA « L'atome pour la paix et le développement ». Il précise que sa présentation se concentrera sur les développements récents et qu'il donnera quelques exemples du travail de l'AIEA visant à aider ses États Membres à utiliser de manière pacifique les techniques nucléaires et visant à remédier à des problèmes particuliers complexes.

M. Gröning retrace l'historique du réseau de laboratoires secondaires d'étalonnage pour la dosimétrie de l'AIEA, fondé en 1976 en association avec l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Le réseau fournit des services d'étalonnage pour les dosimètres utilisés pour mesurer les rayonnements et il est important que les résultats de mesure soient traçables au SI. Le BIPM a contribué à assurer la qualité des services fournis par l'AIEA à ses États Membres depuis 1987. En outre, le BIPM participe au Comité scientifique du réseau de laboratoires secondaires d'étalonnage pour la dosimétrie qui examine les questions soulevées au sein du réseau. L'AIEA a signé le CIPM MRA en 1999 et compte actuellement 26 CMCs.

M. Gröning présente le programme d'audits dosimétriques de l'AIEA et de l'OMS pour le réseau de laboratoires secondaires d'étalonnage pour la dosimétrie. Lors d'un audit, un dosimètre passif est envoyé à un laboratoire secondaire du réseau pour qu'il soit irradié selon des conditions de référence jusqu'à atteindre une dose déterminée. Ce dosimètre irradié est ensuite envoyé au laboratoire de dosimétrie de l'AIEA qui compare la dose de rayonnements administrée au dosimètre à celle déterminée : cela permet de vérifier l'exactitude des étalonnages réalisés par le réseau de laboratoires secondaires d'étalonnage pour la dosimétrie. La traçabilité des mesures effectuées au laboratoire de dosimétrie de l'AIEA est évaluée et garantie par comparaison aux laboratoires de dosimétrie primaires tels que le BIPM. Ce dernier fournit depuis plus de 20 ans des irradiations de référence

pour les audits dosimétriques de l'AIEA et de l'OMS. Avec un niveau de performance à 1 % près, le laboratoire de dosimétrie de l'AIEA propose des services adaptés.

M. Gröning rappelle qu'en 2012, l'AIEA et le BIPM ont signé un protocole d'accord afin de définir leurs principaux domaines de coopération. Il souligne que la collaboration concernant les étalons de mesure et les matériaux de référence est un domaine relativement nouveau où les deux organisations ont établi des liens forts. Il cite l'analyse élémentaire de traces et les données nucléaires, en notant que la coopération se fait avec le CCQM pour l'analyse élémentaire de traces (éléments toxiques ou métaux toxiques dans les algues) et avec le CCRI pour les données nucléaires (évaluations des données de désintégration et sections efficaces élargies) : la coopération dans ces deux domaines pourrait être étendue dans le futur.

M. Gröning aborde ensuite le sujet principal de sa présentation, à savoir la coopération concernant la mesure de radionucléides et de rapports isotopiques stables. L'AIEA travaille dans ce domaine depuis plus de 50 ans, en fournissant des matériaux de référence pour différentes disciplines et différents domaines scientifiques dans le monde entier. L'AIEA dispose ainsi de plus d'une centaine de ces matériaux de référence, couvrant le domaine de l'analyse des isotopes stables, de la radioactivité environnementale, des mesures effectuées sur le terrain, de l'analyse élémentaire de traces et de la détermination des contaminants organiques. Ces matériaux de référence, qui peuvent être aussi bien des échantillons d'eau que des étalons de riz brun, contribuent à mesurer la radioactivité de faible intensité dans les produits alimentaires, comme le thon, ou dans l'environnement, comme les sédiments marins.

M. Gröning explique ce qui constitue un isotope stable et comment il est possible de mesurer à l'aide de la spectrométrie de masse le rapport entre un isotope stable et différents nucléides dans n'importe quel matériau naturel. Il cite l'exemple de l'oxygène dans l'eau : l'isotope stable est ^{16}O mais un isotope mineur, ^{18}O, est également trouvé dans les échantillons d'eau des océans à un rapport de 1/500. La variation totale dans les systèmes naturels du rapport isotopique $^{18}O/^{16}O$ est seulement d'environ 10 % dans le monde entier. C'est pourquoi des mesures de haute précision sont nécessaires pour tirer parti de ces légères différences isotopiques. Des mesures exactes de la composition isotopique en oxygène des précipitations au niveau mondial peuvent fournir de riches informations sur l'origine, l'âge et la vulnérabilité de la contamination des nappes phréatiques. Le matériau de référence utilisé est l'eau océanique moyenne normalisée de Vienne (VSMOW2) : il a été préparé à partir d'échantillons naturels et a une incertitude totale concernant la composition isotopique de l'oxygène de l'ordre de 0 ± 0,02 ‰. Par ailleurs, sa composition isotopique est utilisée pour la réalisation des cellules étalons à point triple qui sont la base de l'Échelle internationale de température de 1990.

M. Gröning évoque ensuite le sujet de la surveillance du dioxyde de carbone atmosphérique. Il précise que le marbre de Carrare AIEA-603 est l'étalon pour les mesures des rapports isotopiques du carbone au niveau mondial et que sa valeur est déterminée avec une incertitude extrêmement faible. Cet étalon est utilisé pour mesurer par spectrométrie de masse tout matériau qui contient du carbone. Il y a environ 10 ans, une nouvelle technologie est apparue pour mesurer le CO_2 qui reposait sur l'absorption de la lumière laser infrarouge par le CO_2 et permettait de déterminer sa composition isotopique. Toutefois, cette nouvelle approche requérait d'utiliser des gaz au lieu de carbonates en poudre. Par ailleurs, du fait d'importantes différences concernant la composition isotopique du CO_2 gazeux, il est nécessaire d'en déterminer avec précision la composition isotopique.

Le BIPM a fourni et publié des stratégies d'étalonnage pour mesurer le rapport isotopique d'instruments optiques[5] afin de résoudre ce problème : ces stratégies comprennent notamment la

[5] Flores E., Viallon J., Moussay P., Griffith D.W.T., Wielgosz R.I., Calibration strategies for FT-IR and other isotope ratio infrared spectrometer instruments for accurate $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ measurements of CO_2 in air, *Anal. Chem.*, 2017, **89**(6), 3648-3655.

caractérisation des étalons requis à cette fin. Pour évaluer la comparabilité des étalons isotopiques de CO_2, une comparaison des rapports isotopiques du CO_2, CCQM-P204, sera conduite et coordonnée par le BIPM et l'AIEA en 2020. Les échantillons de comparaison sont en cours de préparation par le BIPM à l'aide d'un équipement de haute précision de mélange des gaz (le générateur de mélanges de gaz de référence pour les isotopes stables du BIPM) et des mesures sont effectuées par rapport à l'étalon AIEA-603 de l'AIEA. M. Gröning explique comment les mesures exactes des rapports isotopiques du carbone dans le CO_2 atmosphérique peuvent être utilisées pour surveiller les changements des niveaux de CO_2, les phénomènes de circulation générale et d'assimilation océanique/biosphérique de CO_2, et pour déterminer si l'augmentation des niveaux de CO_2 est de source naturelle ou humaine. Le Groupe de travail du CCQM sur les rapports isotopiques qui a été nouvellement créé permettra de continuer cette coopération entre l'AIEA et le BIPM dans l'intérêt d'une surveillance mondiale de l'environnement.

M. Gröning note que les signatures isotopiques stables sont utiles dans le cadre d'autres problèmes environnementaux, tels que la protection des habitats et espèces menacés. Il est par exemple possible de déterminer si un bois provient d'une concession forestière ou de sources illégales, ou encore de vérifier l'origine de l'ivoire dans le cadre de la Convention sur le commerce international des espèces en danger (CITES) : désormais, cinq laboratoires peuvent faire la différence entre deux échantillons d'ivoire à partir de leur signature isotopique.

M. Gröning conclut sa présentation en mentionnant le réseau des laboratoires d'analyse pour la mesure de la radioactivité dans l'environnement (ALMERA). L'AIEA coordonne ce réseau de 177 laboratoires, désignés par les gouvernements de 89 de ses États Membres, dans le domaine de la préparation aux situations d'urgence. Ces laboratoires sont capables de fournir de l'aide dans le cadre de situations d'urgence environnementales impliquant des radionucléides. L'AIEA apporte son soutien à 400 laboratoires en conduisant des vérifications annuelles indépendantes de leur compétence dans l'analyse de radionucléides environnementaux. L'AIEA fournit aussi des ensembles d'échantillons pour les radionucléides environnementaux (eau, composés organiques et sols). M. Gröning conclut que la coopération entre l'AIEA et le BIPM est précieuse. Il existe de nombreux aspects où des organisations ne peuvent agir seules mais, en coopérant, elles peuvent donner du sens à la science dans l'intérêt de leurs États Membres.

35. La traçabilité en médecine de laboratoire : élément moteur de l'exactitude des résultats pour les patients

M. Graham Beastall, qui représente l'International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC) au Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire (JCTLM), présente la médecine de laboratoire. Le coût mondial des soins de santé a été estimé à environ 8 200 milliards de dollars américains ; environ 2,5 % de ce montant, soit 200 milliards de dollars américains, correspondent au coût de la médecine de laboratoire. Ce montant peut également être subdivisé : le coût effectif des réactifs et des équipements représente un tiers de ce montant, le reste correspondant aux coûts de personnel et aux frais généraux. Il est estimé qu'environ 35 milliards de tests de diagnostic *in vitro* sont réalisés chaque année et qu'il existe 4 000 tests de diagnostic *in vitro* différents. Par ailleurs, tous ces chiffres augmentent de 5 % par an.

M. Beastall indique qu'un pourcentage élevé des décisions cliniques se fonde sur des données provenant de la pathologie et de la médecine de laboratoire, qui ont par conséquent un rôle central. Jusqu'à 70 % de l'ensemble des décisions cliniques peuvent reposer sur des données venant de la

médecine de laboratoire dans certains cas et de certains paramètres cliniques, pour un coût inférieur à 3 % du budget total des soins de santé. La médecine de laboratoire joue un rôle central car elle contribue à identifier les facteurs de risques et les symptômes, diagnostiquer les maladies, déterminer le traitement approprié et en évaluer l'efficacité. La médecine de laboratoire fait partie de l'équipe multidisciplinaire au centre des soins de santé et cette influence implique la responsabilité de fournir un service de qualité élevée.

En termes de méthodes en médecine de laboratoire, certains mesurandes sont structurellement simples et disponibles à leur état pur, comme le glucose. La plupart des mesurandes sont complexes et souvent hétérogènes, comme les virus ; l'étalonnage d'une méthode devient alors un véritable défi. Par ailleurs, plus d'une centaine de sociétés de diagnostics dans le monde produisent des réactifs pour le diagnostic *in vitro* et chacune utilise ses propres étalons. Par conséquent, il existe souvent toute une variété de méthodes pour un même mesurande : le même échantillon d'un patient peut donner des résultats différents en utilisant des méthodes différentes. Cette variabilité des résultats de mesure entre les méthodes peut entraîner des résultats incorrects des analyses des patients, des diagnostics erronés, des résultats cliniques insatisfaisants et peut porter atteinte à la sécurité des patients. M. Beastall cite l'exemple de la mesure de l'hémoglobine A2 (HBA_2), biomarqueur important pour détecter un porteur de la thalassémie β : le fait de déterminer si un patient est porteur d'une thalassémie β dépend de la méthode spécifiquement utilisée.

M. Beastall observe que la traçabilité en médecine de laboratoire peut contribuer à remédier à cette situation et donne des explications sur la chaîne de traçabilité métrologique. La traçabilité métrologique est la propriété d'un résultat de mesure selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'étalonnages dont chacun contribue à l'incertitude de mesure. Ainsi, la traçabilité dépend à la fois des matériaux de référence certifiés et des méthodes et procédures de mesure de référence. Pour les mesurandes structurellement simples (substance s à analyser), il est possible d'obtenir des matériaux de référence primaires de substance pure ; pour les mesurandes plus complexes, il peut ne pas être possible de disposer de substances pures. Les procédures de mesure de référence primaires se fondent sur des méthodes de mesure physique, comme la spectrométrie de masse par dilution isotopique. Ainsi, pour les matériaux ou étalons de référence ainsi que pour les méthodes ou procédures de mesure de référence, il existe une hiérarchie des étalons du fabriquant de produits de diagnostic *in vitro* jusqu'au matériau ou substance pure de référence primaire.

Cette hiérarchie permet d'établir une chaîne de traçabilité métrologique. Au bas de la chaîne se trouve un service de médecine de laboratoire de routine où les résultats d'un patient sont obtenus à l'aide d'une méthode de laboratoire courante. Cette méthode de laboratoire courante est fournie par un fabricant de produits de diagnostic *in vitro* qui a eu recours à un étalon du fabriquant de produits de diagnostic *in vitro*, à un étalon maître et à différentes procédures de mesure afin d'établir la valeur des étalons. En fonction du mesurande, il est possible d'aller plus haut dans la chaîne de traçabilité jusqu'à un laboratoire national de métrologie ou un laboratoire de référence qui peut disposer d'un étalon secondaire, d'un étalon primaire et de matériaux de référence primaires, ainsi que de procédures de mesure de référence primaires et secondaires. Si des matériaux purs, des matériaux de référence primaires ou secondaires ne sont pas disponibles, il peut être nécessaire d'utiliser des étalons conventionnels, dans l'idéal des étalons conventionnels internationaux, qui peuvent ne pas être traçables au SI, ou des procédures de mesure de référence conventionnelles internationales.

M. Beastall souligne que l'importance de la traçabilité en médecine de laboratoire a été reconnue dans la Directive européenne 98/79/CE relative aux dispositifs médicaux de diagnostic *in vitro* de 1998 : « La traçabilité des valeurs attribuées aux matériaux d'étalonnage et/ou matériaux de contrôle doit être garantie par des procédures de mesure de référence existantes et/ou des matériaux de

référence disponibles de niveau supérieur. » Cette directive a été remplacée en 2017 par le Règlement (UE) 2017/746 relatif aux dispositifs médicaux de diagnostic *in vitro* : « 9.3. Lorsque les performances des dispositifs dépendent de l'utilisation de matériaux d'étalonnage et/ou de contrôle, la traçabilité métrologique des valeurs assignées à ces matériaux est garantie par des procédures de mesure de référence adaptées et/ou des matériaux de référence adaptés de rang supérieur. »

La directive originelle confrontait les fabricants de méthodes de diagnostic *in vitro* au défi d'appliquer la traçabilité métrologique aux méthodes de diagnostic *in vitro* qu'ils fabriquaient pour la médecine de laboratoire. En réponse, la communauté mondiale de la médecine de laboratoire s'est rassemblée et a créé en 2002 le Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire (JCTLM). Les trois membres fondateurs étaient les suivants : le BIPM, l'IFCC et l'ILAC. Le JCTLM compte actuellement 49 membres de 14 pays. Ses membres comprennent des laboratoires nationaux de métrologie, des organismes d'évaluation externe de la qualité, des instances professionnelles et des fabricants de diagnostics *in vitro*. Le BIPM en assure le secrétariat et apporte son expérience en métrologie.

M. Beastall présente le travail du JCTLM : il maintient une base de données mondiale des matériaux, méthodes et services de référence ; il coordonne le processus de désignation et d'examen des données ; il participe aux groupes de travail de l'ISO sur les systèmes de référence, qui sont responsables des normes internationales ; il diffuse des nouvelles et des ressources librement disponibles sur la traçabilité en médecine de laboratoire ; il organise une réunion scientifique biennale. Il ajoute que la base de données du JCTLM contient 289 matériaux de référence certifiés, 194 procédures de mesure de référence et 176 services de mesure de référence concernant une large gamme de différents systèmes d'analyse.

M. Beastall indique que les laboratoires nationaux de métrologie fournissent des matériaux de référence d'ordre supérieur (matériaux purs et matrices) afin d'étayer l'industrie du diagnostic *in vitro* ; actuellement, 95 % des matériaux de référence certifiés de la base de données du JCTLM sont fournis par des laboratoires nationaux de métrologie. Par ailleurs, le BIPM sert d'organisme d'évaluation externe de la qualité pour les laboratoires nationaux de métrologie car il coordonne des comparaisons clés, envoie des échantillons de matériaux purs aux laboratoires nationaux afin que ces derniers leur assignent une valeur et procèdent à des comparaisons, et utilise ses propres laboratoires pour assigner de manière indépendante une valeur aux matériaux. Il cite la comparaison clé CCQM-K115, pureté du peptide C, qui fait partie de la série de comparaisons clés de matériaux primaires de référence peptidiques, comme un exemple de comparaison de peptides purs coordonnée par le BIPM pour les laboratoires nationaux de métrologie.

M. Beastall conclut sa présentation en soulignant que la population mondiale de 7,7 milliards de personnes est en droit que penser que toutes les méthodes existantes d'analyse donneront les mêmes résultats, c'est pourquoi les parties prenantes doivent se coordonner pour relever ce défi. Il ajoute que coordonner au niveau mondial 4 000 mesurandes différents est un vrai défi et que le JCTLM a par conséquent un bel avenir devant lui.

Le président de la CGPM remercie les conférenciers pour leurs présentations et ouvre la discussion.

M. Phillips indique qu'il est particulièrement intéressé par la traçabilité en médecine de laboratoire car son épouse, désormais à la retraite, était technicienne de laboratoire : sa carrière a couvert l'époque où les tests étaient réalisés à l'aide de méthodes de référence par des professionnels très expérimentés jusqu'à l'époque des tests effectués par des machines. Tout au long de sa carrière, elle aurait conseillé de ne jamais prendre de décision médicale à partir d'un unique test de laboratoire. Il demande si la situation est différente aujourd'hui. M. Beastall répond en prenant l'exemple du

cholestérol. Il existe un programme de standardisation du dosage du cholestérol depuis près de 30 ans. Quelle que soit la méthode utilisée où que ce soit dans le monde, le résultat obtenu sera compatible de 2 à 3 %. Il est désormais reconnu que cette standardisation des mesures du cholestérol dans le monde a contribué de façon majeure à réduire les maladies cardiovasculaires. Ainsi, pour de nombreuses entrées de la base de données du JCTLM, il est possible de connaître quelles sont les méthodes acceptables et si une seule mesure est suffisante ; pour d'autres entrées, toutefois, il ne faudra pas prendre une décision médicale à partir d'un unique résultat de laboratoire.

M. Candel (président de la CGPM) fait référence à une diapositive de la présentation de M. Gröning montrant un graphique où les niveaux de CO_2 atmosphérique augmentaient en même temps que le $\delta^{13}C$ diminuait. Il demande quelle conclusion peut être tirée de cette donnée et ce que cela traduit concernant le CO_2. M. Gröning répond que le CO_2 produit par les combustibles fossiles est pauvre en ^{13}C, contrairement au CO_2 atmosphérique. Le résultat est qu'une plus grande quantité de CO_2 provenant des combustibles fossiles entre dans le système au fil du temps et que le réservoir atmosphérique de CO_2 se dilue progressivement dans le ^{13}C. Le changement est de l'ordre de 1 ppm sur 40 ans : le réservoir associé aux plantes et aux océans est vaste comparé aux émissions de CO_2 provenant des combustibles fossiles, qui sont relativement faibles. Toutefois, cela a un impact majeur car ces émissions ne peuvent pas être compensées : seule la moitié des émissions de CO_2 peuvent être absorbées par la biosphère ou les océans et on ne sait pas quelle sera la situation dans le futur. Un plus grand nombre de stations de surveillance permettraient de mieux comprendre la situation en ayant une meilleure détermination de la provenance des émissions à un niveau régional.

M. Phillips observe que les améliorations en dosimétrie concernant les rayonnements de faible niveau sont impressionnantes. Il ajoute que le sujet d'un seuil concernant les effets nocifs des rayonnements a toujours fait l'objet d'une polémique. Il demande à M. Gröning si les améliorations qui ont été réalisées en termes d'exactitude et de fiabilité de la dosimétrie de faible niveau en particulier ont pu contribuer à résoudre certaines de ces controverses de longue date. M. Gröning répond que la question est tellement complexe qu'il n'existe pas de réponse unique. Jusqu'à présent, les données statistiques sur les effets des rayonnements de faible niveau sont insignifiantes.

36. Rapport du président du CCQM

M. Willie May, président du Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie (CCQM), présente son rapport sur les activités du CCQM depuis la 25e réunion de la CGPM (2014).

Résumé du rapport du CCQM

Le CCQM, qui a pour responsabilité la métrologie en chimie et biologie, rend compte dans le présent rapport de ses activités de 2015 à 2018. Le CCQM a mis à jour et publié en 2018 son document de stratégie qui définit les défis clés que le CCQM doit relever dans son domaine de compétence vaste et complexe. Le CCQM gère un ensemble de 170 comparaisons clés, ainsi que plus de 130 études pilotes, par le biais de onze groupes de travail permanents et de groupes *ad hoc* supplémentaires qui sont mis en place selon les besoins. Le Groupe de travail sur la bioanalyse a été divisé en trois groupes de travail distincts sur l'analyse des protéines, l'analyse des acides nucléiques et l'analyse cellulaire, qui ont tous désormais mis en œuvre des programmes de comparaisons actifs. Un groupe de travail sur les rapports isotopiques a été établi afin de répondre aux besoins des parties prenantes et un sous-groupe de travail sur les mesurandes définis par une méthode a été mis en place

afin de développer des critères permettant d'évaluer quels mesurandes définis par une méthode parmi ceux en nombre croissant devraient être couverts par les activités du CCQM.

De 2015 à 2018, le CCQM a lancé 48 comparaisons clés du CCQM et 11 études pilotes indépendantes, dont 9 comparaisons clés et une étude pilote coordonnées par le BIPM. Ce nombre de comparaisons, en baisse par rapport au nombre prévu dans le précédent document de stratégie, correspond aux 16 nouvelles comparaisons que le CCQM envisage de lancer chaque année ; il reflète les améliorations en termes d'efficacité effectuées depuis l'adoption au sein du CCQM d'un modèle de comparaisons clés fondées sur les compétences fondamentales qui se concentre sur l'évaluation des compétences maintenues par les laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés afin de fournir des services à leurs clients.

Le CCQM a activement consulté la communauté mondiale de la chimie au sujet de la redéfinition de la mole et a collaboré avec l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) afin de formuler une nouvelle définition de la mole qui soit acceptable à la fois pour la communauté des métrologistes et pour celles des professionnels.

Le CCQM continue à être un forum d'échange d'informations sur les activités techniques. Au cours de ces cinq dernières années, les groupes de travail du CCQM ont organisé seize ateliers afin d'échanger des informations sur les activités de recherche et développement en métrologie en chimie et biologie. Le document de stratégie du CCQM pour 2017-2026 répertorie 25 articles publiés à la suite de comparaisons du CCQM dans des revues pratiquant l'examen collégial.

Le large éventail d'activités couvertes par le CCQM est illustré par les onze études d'impact présentée dans son document de stratégie : ces études décrivent les bénéfices et l'impact de mesures traçables au SI et internationalement équivalentes pour la santé, la surveillance de l'environnement, la sécurité alimentaire, l'énergie et la fabrication de pointe.

Domaine de compétence du CCQM

Le CCQM est responsable de développer, améliorer et documenter l'équivalence des étalons nationaux (matériaux de référence certifiés et méthodes de référence) pour les mesures en chimie et en biologie. Il vise à faire progresser l'état de l'art de la science de la mesure dans les domaines de la chimie et de la biologie et à travailler avec les parties prenantes afin de promouvoir et accroître l'impact de la métrologie en chimie et biologie. Il conseille le CIPM sur les sujets relatifs aux mesures en chimie et en biologie, ainsi que sur les activités scientifiques du BIPM.

Les objectifs du CCQM sont les suivants :

- faire progresser l'état de l'art pour la métrologie en chimie et biologie (notamment en contribuant à l'établissement d'un système reconnu au niveau international d'étalons de mesure, de méthodes et d'équipements nationaux pour les mesures en chimie et biologie et en servant de forum pour l'échange d'informations sur les programmes de services en recherche et métrologie, ainsi que sur d'autres activités techniques, des membres du CCQM et de ses observateurs, ce qui permet d'établir de nouvelles possibilités de collaboration) ;
- établir des relations avec de nouvelles parties prenantes et avec celles existantes (en facilitant le dialogue entre les laboratoires nationaux de métrologie et les parties prenantes afin de définir de nouvelles voies pour s'assurer de l'impact de la métrologie en chimie et biologie) ;
- démontrer la comparabilité mondiale des mesures en chimie et biologie (en promouvant la traçabilité au SI et, lorsque la traçabilité au SI n'est pas encore réalisable, à des références acceptées au niveau international et en contribuant à la mise en œuvre et au fonctionnement du CIPM MRA dans le domaine des mesures en chimie et biologie).

Stratégie

Le document de stratégie du CCQM pour les années 2017 à 2026 a été publié le 17 janvier 2018 : il a été élaboré à la suite d'un examen complet et d'une révision du précédent document couvrant les années 2013 à 2023, dont la dernière version avait été publiée en juillet 2014. La liste détaillée des comparaisons prévues de 2017 à 2026 continue à être mise à jour par le CCQM tous les six mois.

Le changement majeur a été de restructurer le document de stratégie afin de refléter les objectifs généraux qui ont été définis pour l'ensemble des Comités consultatifs, à savoir : faire progresser l'état de l'art de la science de la mesure ; établir des relations avec de nouvelles parties prenantes et avec celles existantes ; démontrer la comparabilité mondiale des étalons de mesure.

Le CCQM a continué à répondre aux trois défis clés identifiés dans le premier document de stratégie et a ainsi obtenu les résultats suivants :

- en réponse à l'exigence de maintenir un programme de comparaisons efficace, efficient et gérable, le CCQM a continué à développer et mettre en œuvre l'approche fondée sur les compétences fondamentales en matière de comparaisons clés, ce qui a permis de réduire à 16, au lieu des 19 précédemment programmées, le nombre prévu de comparaisons requises chaque année afin d'étayer les aptitudes des laboratoires nationaux de métrologie ;
- en réponse à l'exigence de tenir compte des nouveaux domaines émergents et en constante évolution, le CCQM a établi des groupes de travail actifs sur l'analyse des protéines, l'analyse des acides nucléiques et l'analyse cellulaire, dont les activités et comparaisons ont été clairement définies, et il a créé un nouveau groupe de travail sur les mesures des rapports isotopiques ;
- en réponse à l'exigence d'améliorer l'efficacité du processus de production et d'examen des CMCs, le CCQM a mis en œuvre les recommandations établie lors de l'examen du CIPM MRA, notamment en commençant à mettre en place des CMCs à large portée, et a constaté une réduction du taux de croissance du nombre total de CMCs en chimie/biologie.

Le CCQM continuera à servir de forum pour l'échange d'informations sur les activités de recherche de pointe en métrologie. Les mécanismes mis en place pour atteindre cet objectif comprennent :

- des présentations techniques faisant partie des activités des groupes de travail du CCQM,
- des ateliers spécifiques consacrés à la recherche scientifique de pointe en métrologie organisés au sein des groupes de travail du CCQM,
- des ateliers portant sur un domaine particulier organisés par le CCQM,
- le soutien apporté aux ateliers par les organisations régionales de métrologie, les laboratoires nationaux de métrologie et les parties prenantes (par exemple, l'atelier « Protein and Peptide Therapeutics and Diagnostics (PPTD-2018) » a été organisé par le BIPM, le NIM et le JCTLM).

Le CCQM a une longue expérience de l'organisation d'ateliers en collaboration avec des parties prenantes ou des groupes sectoriels car cela lui permet de comprendre leurs besoins en termes de résultats de mesure traçables et exacts et d'orienter en conséquence les activités des groupes de travail du CCQM (et si besoin créer de nouveaux groupes de travail). Par ailleurs, plusieurs ateliers organisés par le BIPM ont permis de rencontrer des parties prenantes d'importance pour le CCQM :

- atelier du BIPM intitulé « Global to Urban Scale Carbon Measurements », organisé le 30 juin et le 1er juillet 2015 ;
- atelier BIPM-NIM intitulé « Protein and Peptide Therapeutics and Diagnostics », organisé du 1er au 3 juin 2016 et du 10 au 12 octobre 2018 ;

– symposium BIPM-OMM intitulé « Standards and Metrology in support of Anti-Doping », organisé les 28 et 29 septembre 2016.

Le CCQM continuera à travailler avec des parties prenantes internationales en organisant des ateliers spécialisés ; lorsqu'une plus grande collaboration est nécessaire, le CCQM invitera ces parties prenantes à participer aux réunions des groupes de travail du CCQM (par exemple, AIEA, OMM, OMS/NIBSC, pharmacopées nationales et régionales telles que l'USP et l'EDQM) ou du CCQM (par exemple, IUPAC, OMM, AMA, Codex Alimentarius, OMS, IFCC, ENFSI, ISO/REMCO, ILAC, VAMAS).

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Comparaisons et CMCs

Au total, 61 laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés (50 en 2012) de 48 pays (39 en 2012) déclarent des CMCs en chimie et biologie. Le nombre total de CMCs en chimie et biologie enregistrées dans la KCDB du BIPM est de 6 412 en octobre 2018, contre 5 718 en 2014. De 2015 à 2018, afin d'étayer ces aptitudes, le CCQM a lancé 48 comparaisons clés du CCQM et 11 études pilotes indépendantes, dont 9 comparaisons clés et une étude pilote coordonnées par le BIPM.

Études d'impact et implication des parties prenantes

Onze études de cas sont présentées dans le document de stratégie du CCQM pour les années 2017 à 2026 afin de souligner l'impact des activités du CCQM et leurs liens avec les parties prenantes. Les bénéfices et l'impact qu'apporte le fait de disposer de mesures équivalentes au niveau international sont décrits par exemple pour les domaines suivants :

– santé,
– surveillance de l'environnement,
– sécurité alimentaire,
– énergie,
– fabrication de pointe,
– redéfinition des unités du SI.

Les comparaisons menées par les groupes de travail du CCQM ont contribué, par exemple, aux réalisations suivantes :

– *Améliorer l'exactitude et l'assurance qualité des mesures de la vitamine D dans le monde*. La comparaison clé CCQM-K132 a permis aux laboratoires de métrologie de démontrer leurs aptitudes concernant la mesure des métabolites de la vitamine D dans deux mélanges de sérum différents. Tous les participants ont démontré leur aptitude à déterminer le principal métabolite, 25(OH)D3, à des niveaux d'environ 25 ng/g avec un coefficient de variation (ou écart-type relatif) de 3 %. Cette comparaison a permis d'étayer des programmes critiques concernant la production de matériaux de référence certifiés et la fourniture complémentaire de valeurs de référence pour les systèmes d'assurance externe de la qualité pour la vitamine D, qui a été décrite comme la vitamine de la décennie en raison d'une liste croissante d'effets néfastes sur la santé en cas de carence. La vitamine D est actuellement étudiée pour ses possibles liens avec certains problèmes de santé tels que le diabète, l'hypertension, des maladies auto-immunes, des maladies des os ou certains types de cancer. Des taux élevés de vitamine D peuvent être toxiques et provoquer divers symptômes, et il a été avancé qu'un excès de vitamine D pourrait endommager les reins.

C'est pourquoi, au cours de la décennie passée, les essais concernant la vitamine D ont augmenté au niveau mondial.

– *Soutenir la normalisation des diagnostics du diabète*. La comparaison clé CCQM-K115 a permis à neuf laboratoires nationaux de métrologie de comparer leurs aptitudes concernant l'assignation de valeur aux matériaux de référence primaires pour le peptide C, un biomarqueur de la production naturelle d'insuline. Cette comparaison a étayé le développement d'un système de mesure de référence pour les mesures du peptide C, qui contribue à la standardisation au niveau mondial des mesures pour les dispositifs de diagnostic *in vitro* et à l'amélioration du diagnostic et de la prise en charge du diabète, maladie qui touche à l'heure actuelle plus de 450 millions d'adultes dans le monde.

– *Soutenir les réglementations afin d'améliorer la qualité de l'eau*. La pollution chimique due aux résidus pharmaceutiques dans l'approvisionnement en eau est une menace pour l'environnement aquatique et la santé humaine et ce phénomène est devenu l'un des problèmes d'environnement majeurs au cours des récentes décennies. La comparaison clé CCQM-K126 porte sur les méthodes de référence des mesures de produits pharmaceutiques dans l'eau de surface, en se concentrant sur la carbamazépine, à des niveaux pertinents par rapport aux limites réglementaires. Ce travail a permis de disposer de méthodes d'évaluation exactes pour mesurer les substances dangereuses dans les eaux de surface et il a été mis en évidence que ces méthodes sont des outils indispensables pour préserver l'environnement et protéger la santé publique. Avec l'augmentation de la réutilisation et du recyclage de l'eau, l'évaluation des niveaux de composés, tels que les produits pharmaceutiques dans l'eau, continuera à être une priorité. Les laboratoires qui ont démontré avec succès leurs aptitudes lors de cette comparaison disposeront d'une référence internationale pour étayer les services qu'ils sont en mesure d'offrir concernant des gammes plus vastes de contaminants similaires dans l'approvisionnement en eau.

– *Fournir de nouveaux étalons pour surveiller les émissions de gaz à effet de serre et leurs sources*. L'équivalence de la prochaine génération d'étalons de CO_2 dans l'air est le sujet des comparaisons clés CCQM-K120.a et b, au cours desquelles 46 étalons ont été comparés. Cette comparaison contribue au développement de la prochaine génération d'étalons de gaz à effet de serre, auxquels sera assignée une valeur pour la fraction molaire et le rapport isotopique du CO_2 et dont la matrice correspondra aux compositions atmosphériques, afin d'offrir aux fabricants d'instruments et aux scientifiques spécialistes de l'atmosphère les étalons requis pour surveiller les fractions molaires et les rapports isotopiques du CO_2 avec exactitude et en temps réel. Les activités menées ont permis d'améliorer l'état de l'art en métrologie, de fournir une référence pour la comparabilité et de soutenir les laboratoires nationaux de métrologie afin qu'ils travaillent dans l'objectif de répondre aux besoins des parties prenantes, ce qui permettra d'identifier les sources et puits de carbone à l'échelle locale, régionale et mondiale et de contribuer à comprendre leur impact relatif sur les concentrations atmosphériques.

– *Soutenir la sécurité alimentaire*. Le CCQM a coordonné une comparaison clé spécifique, CCQM-K103, sur la mélamine dans la poudre de lait afin de démontrer l'aptitude des laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés à fournir des mesures exactes des traces de mélamine dans le lait et la poudre de lait. La mélamine (triamino-2-4-6-triazine-1-3-5) est un produit à teneur élevée en azote qui a été ajouté de façon malhonnête à des produits alimentaires afin d'augmenter leur teneur apparente en protéines. Les scandales liés à la mélamine suite à son adjonction dans de la nourriture pour animaux en 2007 aux États-Unis et dans de la poudre de lait en 2008 en Chine ont eu des conséquences importantes. Après ces crises, la détermination de la présence de mélamine

dans les aliments est devenue l'une des mesures de routine les plus importantes des laboratoires d'analyse de denrées alimentaires. La comparaison clé a permis de garantir la comparabilité de procédures de mesure de référence utilisées internationalement pour produire des matériaux de référence certifiés pour les laboratoires d'analyse de denrées alimentaires. En outre, plusieurs laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés ont coordonné des programmes d'essais d'aptitude concernant la présence de mélamine dans les produits laitiers et ont assigné des valeurs de référence à des échantillons afin de fournir aux participants une référence indépendante pour évaluer l'exactitude de leurs mesures. La mélamine peut être une substance chimique compliquée à détecter et quantifier, c'est pourquoi des outils tels que les matériaux de référence à matrice et les programmes d'essais d'aptitude sont essentiels pour assurer la qualité de ce type de mesures. La mélamine constitue toujours un contaminant qui est surveillé de façon continue par l'industrie alimentaire et les activités du CCQM ont contribué à garantir qu'il existe une infrastructure métrologique efficace et reconnue au niveau international pouvant étayer ce contrôle.

– *Soutenir l'utilisation de produits alternatifs au gaz naturel*. Étant donné que les ressources en gaz naturel déclinent au niveau mondial, l'intérêt vis-à-vis de l'exploitation de produits alternatifs à l'utilisation du gaz naturel conventionnel grandit. Ces produits comprennent par exemple les biogaz, le biométhane et les biogaz liquéfiés. Ces gaz doivent être analysés avec exactitude en ce qui concerne leur composition avant de pouvoir être injectés dans un réseau national de gaz, à la fois pour calculer leur valeur énergétique et pour éviter toute présence d'impuretés qui pourraient endommager les appareils. La comparaison clé CCQM-K112 porte sur le biogaz, un produit de remplacement naturel au gaz. Le biogaz est très riche en dioxyde de carbone et azote et contient habituellement de 0,3 à 0,6 % d'oxygène et environ 1 % d'hydrogène. Les résultats de la comparaison clé ont souligné les défis que représentait la mesure de la fraction molaire d'oxygène dans les gaz et cette comparaison permettra d'améliorer les méthodes et étalons pour leur caractérisation.

– *Soutenir le développement de cellules solaires de prochaine génération*. La comparaison clé CCQM-K129 a permis aux laboratoires nationaux de métrologie de démontrer l'exactitude des méthodes d'analyse de surface fondées sur la méthode de « comptage du nombre total » afin de caractériser avec exactitude les films multi-alliage de nouvelle génération. Le film étudié, Cu(In,Ga)Se2 (CIGS), est un matériau prometteur pour les cellules solaires de prochaine génération. Récemment, un rendement de conversion de 22,6 % a été obtenu à l'aide de cellules solaires à base de CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Le marché des cellules solaires à couche mince devrait atteindre 30 milliards de dollars américains d'ici 2024. Toutefois, l'analyse du film CIGS est très difficile car c'est un film multi-alliage avec une distribution en profondeur non uniforme de ses constituants. Les aptitudes en matière de mesure et d'étalonnage développées par les laboratoires nationaux de métrologie et prouvées par la comparaison clé peuvent désormais être mises en œuvre pour l'analyse des films sur couche mince d'une variété de films multi-alliage utilisés dans diverses industries de pointe.

– *Soutenir la redéfinition des unités du SI et les mesures exactes de la constante d'Avogadro*. La constante d'Avogadro, N_A, peut être déterminée à partir de mesure de la masse, du volume, du paramètre de réseau cristallin et de la masse molaire d'une sphère de silicium. L'une des exigences clés concernant la détermination de la masse molaire est de mesurer la composition isotopique absolue du silicium. La masse molaire est calculée en multipliant les fractions molaires par les masses atomiques relatives des trois isotopes naturels du silicium (^{28}Si, ^{29}Si, ^{30}Si). Les mesures isotopiques du silicium ont constitué un défi expérimental complexe. La comparaison clé CCQM-P160 a facilité les travaux de recherche collaboratifs

concernant les mesures des rapports isotopiques du silicium et a notamment nécessité les activités suivantes : sélectionner un solvant optimal pour la dissolution du silicium et pour les mesures par spectrométrie de masse à plasma induit couplée à l'ablation laser (ICP-MS) ; comprendre la disparité énorme de quantité de matière entre le ^{28}Si et les deux autres isotopes ; résoudre les interférences instrumentales lors de la détermination des très bas niveaux de ^{29}Si et de ^{30}Si ; corriger le biais instrumental de masse (étalonnage et détermination du facteur de correction K) entre les trois isotopes ; élaborer une méthodologie pour gérer les données ICP-MS afin d'obtenir une incertitude relative pour la masse molaire du cristal de silicium inférieure à 1×10^{-8}. Les résultats de ce travail ont été intégrés aux mesures les plus récentes de la constante d'Avogadro.

Amélioration de l'état de l'art de la science de la mesure

Le CCQM continue à être un forum d'échange d'informations sur les activités techniques. Au cours de ces cinq dernières années, les groupes de travail du CCQM ont organisé seize ateliers afin d'échanger des informations sur les activités de recherche et développement concernant les mesures et étalons en chimie et biologie menées par les laboratoires nationaux de métrologie dans des domaines variés. Par ailleurs, les activités de recherche et développement ont été stimulées par des comparaisons, soit lors de la phase de préparation, souvent par le laboratoire de coordination développant et caractérisant des échantillons adéquats afin de démontrer la compatibilité des aptitudes de mesures, soit après des comparaisons qui avaient permis de développer des méthodes et aptitudes afin de réduire les incertitudes de mesure. Le document de stratégie du CCQM pour les années 2017 à 2026 répertorie 25 articles publiés à la suite de 21 comparaisons du CCQM dans des revues pratiquant l'examen collégial.

Redéfinition des unités du SI

Les activités du CCQM concernant la redéfinition des unités du SI ont été conduites par le Groupe de travail *ad hoc* du CCQM sur la mole, qui a rédigé la mise en pratique de la définition de la mole. La communauté de la chimie a continué à être impliquée et consultée au sujet de cette redéfinition de la mole. Un symposium sur la mole s'est tenu parallèlement à la réunion de l'American Chemical Society (ACS) organisée à Boston en août 2015 afin de promouvoir davantage les changements proposés. Les contacts étroits avec l'IUPAC se sont poursuivis. Le rapport technique de l'IUPAC intitulé « A critical review of the proposed definitions of fundamental chemical quantities and their impact on chemical communities »[6] a été publié en 2017. Ce rapport technique donne une appréciation globale positive de la redéfinition de la mole, fondée sur un nombre d'entités spécifiées (généralement des atomes ou des molécules) qui ne dépendra plus de l'unité de masse, le kilogramme. Des propositions concernant la formulation exacte de la redéfinition ont été soumises par l'IUPAC au CCQM qui les a intégrées dans sa recommandation au CCU ; ces propositions ont également été synthétisées dans la publication « Definition of the mole (IUPAC Recommendation 2017) »[7]. Les activités du CCQM, y compris la consultation étendue auprès de la communauté internationale de la chimie, devraient conduire à une redéfinition de la mole et, par conséquent, de la grandeur « quantité de matière », qui sera mieux comprise par la communauté scientifique dans son

[6] Marquardt R., Meija J., Mester Z., Towns M., Weir R., Davis R., Stohner J., A critical review of the proposed definitions of fundamental chemical quantities and their impact on chemical communities (IUPAC Technical Report), 2017, *Pure Appl. Chem.* **89**(7), 951-981.

[7] Marquardt R., Meija J., Mester Z., Towns M., Weir R., Davis R., Stohner J., Definition of the mole (IUPAC Recommendation 2017), 2018, *Pure Appl. Chem.*, **90**(1), 175-180.

ensemble, tout en s'assurant que l'exactitude des mesures en chimie et biologie est maintenue et que la redéfinition n'engendrera pas de changement d'amplitude.

Perspectives à court terme et à long terme

Le document de stratégie du CCQM récemment mis à jour fournit le programme complet des activités du CCQM à court terme et à plus long terme. Les recommandations établies lors de l'examen du CIPM MRA ont été prises en considération dans le document de stratégie et le concept des CMCs à large portée est petit à petit mis en œuvre. L'évolution du nombre total de CMCs devra être surveillée en continu et devrait se stabiliser si le taux de couverture (pourcentage) des services des laboratoires nationaux de métrologie par les CMCs devient un indicateur clé de performance.

Données sur le CCQM

CCQM établi en 1993

Président : W.E. May	Secrétaire exécutif : R.I. Wielgosz
Composition :	24 membres, 6 organismes de liaison et 11 observateurs
Réunions depuis la 25e réunion de la CGPM :	20-21 avril 2015, 21-22 avril 2016, 27-28 avril 2017, 19-20 avril 2018
Onze groupes de travail :	– Analyse cellulaire – Analyse électrochimique et des méthodes classiques – Analyse des gaz – Analyse inorganique – Rapports isotopiques – Comparaisons clés et qualité des CMCs – Analyse de l'acide nucléique – Analyse organique – Analyse des protéines – Analyse de surface – Stratégie
Un groupe de travail *ad hoc* :	– Groupe de travail sur la mole

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)/En cours	Programmée(s)
Comparaisons clés du CCQM	172	12 par an
Comparaisons en continu du BIPM	1	1
Études pilotes (indépendantes) du CCQM	134	4 à 5 par an
CMCs	6 412 CMCs dans 67 catégories de service publiées dans la KCDB	

Le président de la CGPM remercie M. May et ouvre la discussion.

M. Phillips demande des clarifications sur la raison pour laquelle l'American Chemical Society n'a pas soutenu, au départ, la proposition de changement de la définition de la mole. M. May répond que certaines des objections venaient de la communauté universitaire et portaient sur des préoccupations quant au fait de savoir comment enseigner la nouvelle définition à des étudiants. Des discussions et interventions au sein de la communauté de la métrologie ont permis de résoudre ce problème.

37. La métrologie à l'appui de l'innovation en radiothérapie moléculaire

M. Glenn Flux, du Royal Marsden Hospital and Institute of Cancer Research, commence sa présentation par des messages clés : la discipline de la médecine nucléaire permet d'observer par imagerie la fonction d'organes et elle est utilisée pour diagnostiquer des tumeurs malignes. La radiothérapie moléculaire est un domaine du traitement du cancer qui a recours de façon systématique aux rayonnements ionisants. L'harmonisation internationale des mesures d'activité est critique pour garantir des procédures sûres et efficaces et sert de base aux essais cliniques. M. Flux ajoute que la radiothérapie moléculaire est en pleine révolution, avec une augmentation rapide de la disponibilité des produits radioactifs, des traitements et des méthodes d'administration. Cela laisse envisager des avantages significatifs pour les soins de santé. Des étalons pour de nouveaux produits radiothérapeutiques sont en cours de développement et la recherche sur les mesures de l'activité *in vivo* vise à calculer les doses de rayonnement administrées aux tumeurs et aux organes pour chaque patient individuel.

La médecine nucléaire utilise des radionucléides qui sont injectés au patient afin de se déposer dans des tissus sélectionnés et apporter des informations sur le fonctionnement de ces tissus. Alors que les techniques conventionnelles des rayons x et de la tomodensitométrie permettent d'obtenir des informations détaillées sur l'anatomie d'un organe, la médecine nucléaire permet de connaître comment l'organe fonctionne ; par exemple, les reins sont observés par imagerie à l'aide du ^{99m}Tc et les tumeurs sont diagnostiquées à l'aide de fluorodésoxyglucose. La radiothérapie moléculaire repose sur le fait que si une petite quantité de l'activité d'un traceur peut donner des informations sur la façon dont fonctionne un organe en s'y déposant de façon sélective, il est possible d'administrer une plus grande quantité d'un agent thérapeutique de haute énergie pour éradiquer ce tissu. Par conséquent, la radiothérapie moléculaire permet de traiter un cancer ou, dans certains cas, une maladie bénigne à l'aide de produits radiopharmaceutiques. Cette technique est utilisée couramment pour traiter des maladies bénignes de la thyroïde ou un cancer de la thyroïde. Par ailleurs, la radiothérapie moléculaire est utilisée pour traiter des métastases osseuses du cancer de la prostate, des tumeurs neuroendocriniennes, des tumeurs du foie et des neuroblastomes touchant les enfants. De nouveaux traitements apparaissent pour les cancers du sein et du poumon. La radiothérapie moléculaire est le seul traitement médical qui permet une imagerie *in vivo* du produit pharmaceutique en temps réel.

M. Flux déclare que les possibilités offertes par la radiothérapie moléculaire sont vastes : une analyse de marché réalisée par MEDraysintell en 2015 prédisait que le marché des produits radiopharmaceutiques augmenterait de 26 % par an entre 2014 et 2020. Par ailleurs, on a récemment assisté à un certain nombre d'acquisitions à haute valeur ajoutée de sociétés radiopharmaceutiques.

On observe actuellement un changement de paradigme concernant les traitements, de la pratique existante qui consiste à traiter en fonction du niveau d'activité administré à un traitement qui dépend de la dose de rayonnement. Ce changement permet de prendre en considération la biocinétique qui varie très fortement d'un patient à l'autre. Par exemple, deux patients reçoivent chacun 7 400 mégabecquerels d'un radionucléide : bien qu'ils reçoivent la même activité, le radionucléide sera distribué différemment dans leur corps et sera administré selon un modèle très différent de dose de rayonnement. En général, les doses de rayonnement administrées aux organes sains varient d'un ordre de grandeur et les doses administrées aux tumeurs varient de deux ordres de grandeur. La dosimétrie interne connaît des développements continus afin de normaliser les doses de rayonnement administrées aux patients. L'objectif est de traiter les patients de manière personnalisée en ce qui concerne les doses de rayonnement administrées, ce qui est une pratique courante en radiothérapie par faisceau externe.

M. Flux reconnaît le rôle joué par le CIPM MRA pour assurer l'harmonisation internationale des mesures d'activité. Le CIPM MRA garantit que les étalons primaires de radioactivité sont équivalents dans différents pays et que les patients reçoivent la même activité. Il ajoute qu'un nouveau système d'analyse de l'incertitude en métrologie de la dosimétrie pour la radiothérapie moléculaire a été récemment conçu et qu'un article a été publié à ce sujet[8]. Il mentionne également la question de s'assurer que les images médicales soient quantitatives en médecine nucléaire afin de pouvoir déterminer, à partir de ces images, la distribution du radionucléide dans le corps. L'une des difficultés est que les caméras gamma de médecine nucléaire sont conçues pour de petites quantités d'émetteurs de rayonnement gamma aux basses énergies pour un diagnostic « qualitatif ». L'imagerie thérapeutique requiert une imagerie « quantitative » des radionucléides de haute activité aux hautes énergies. Ces caméras doivent donc être étalonnées pour convertir les comptages obtenus en mesures absolues de l'activité et pour corriger les « temps morts » en cas de taux de comptage supérieur à ce que peut gérer le système. C'est une tâche complexe qui requiert une normalisation des essais effectués sur plusieurs centres. Actuellement, des initiatives visent à harmoniser les caméras au sein des centres européens : MRTDosimetry (métrologie pour la mise en œuvre clinique de la dosimétrie en radiothérapie moléculaire) et MEDIRAD (implications de l'exposition médicale à de faibles doses). Le consortium MRTDosimetry, piloté par le NPL (Royaume-Uni), a comparé les aptitudes de mesure concernant le ^{90}Y et le ^{177}Lu de différents centres et gère un essai de dosimétrie de l'^{131}I effectué dans plusieurs centres, connu sous le nom de SELIMETRY. Cet essai étudie un produit appelé Selumetinib utilisé pour exprimer le symporteur de l'iodure de sodium chez les patients qui ne sont plus avides d'iode. MEDIRAD est un projet du programme Horizon 2020 étudiant les effets des rayonnements à faible dose.

M. Flux conclut sa présentation par une étude de cas concernant le traitement d'une patiente âgée de 22 ans atteinte d'un neuroblastome, qui est un cancer du système neuroendocrinien observé chez les enfants et les jeunes adultes. Avant de recevoir un nouveau traitement, la patiente a essayé toutes les formes de chimiothérapie, chirurgie et radiothérapie. Un nouveau protocole a été développé et est en phase d'essais cliniques au niveau européen. Le protocole traite la tumeur en fonction de la dose de rayonnement administrée dans la moelle osseuse, qui est l'organe limitant la dose. On a administré au total 58 GBq de ^{131}I méta-iodobenzylguanidine (mIBG), ce qui correspond à une activité huit fois supérieure par rapport à un traitement sans dosimétrie. La patiente a très bien toléré le traitement et, sept mois plus tard, était en complète rémission, ce qui est inédit.

Le président de la CGPM remercie M. Flux et ouvre la discussion.

M. Phillips demande s'il est possible de faire un lien entre la variabilité entre les patients et le génotype, ou un autre élément qui pourrait être identifié avant de commencer une thérapie. M. Flux répond que de nombreux travaux sont en cours afin d'identifier et de caractériser les génotypes et de personnaliser l'administration des produits pharmaceutiques mais aucun ne porte encore sur la relation entre la variabilité et le génotype ; ce sera la prochaine étape. La première étape consiste à savoir quelles sont les doses de rayonnement et de parvenir à les normaliser.

[8] Gear J.I. et al, EANM practical guidance on uncertainty analysis for molecular radiotherapy absorbed dose calculations, *Eur. J. Nucl.Med. Mo.l Imaging*, 2018.

38. Rapport du président du CCRI

M. Wynand Louw, président du Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI), présente son rapport sur les activités du CCRI depuis la 25e réunion de la CGPM (2014).

Résumé du rapport du CCRI

Le CCRI a pour mission de coordonner et soutenir la métrologie dans le domaine des rayonnements ionisants et l'ensemble de ses applications. Le travail du CCRI contribue à garantir que les rayonnements ionisants peuvent être utilisés en toute sécurité et de manière efficace dans les domaines de la santé, de la sécurité et de la santé environnementales, de l'industrie nucléaire et de la défense. Chaque année, la métrologie des rayonnements ionisants est utilisée pour 4 millions de patients atteints d'un cancer, 4 milliards de patients soumis à un diagnostic par rayons x et à des examens de médecine nucléaire, et 11 millions de travailleurs exposés aux rayonnements ionisants. Des mesures exactes sont également essentielles pour assurer la stérilisation efficace des appareils médicaux (40 % des instruments médicaux à usage unique sont stérilisés par rayonnements ionisants) et garantir la qualité des substances traitées par rayonnements. Le travail du CCRI étaye l'ensemble de ces applications, en veillant à l'exactitude des mesures de dose de rayonnements et de l'activité.

La pierre angulaire du travail du CCRI est l'organisation de comparaisons afin de démontrer l'équivalence des étalons nationaux de mesure, de sorte que les États Membres puissent étalonner avec exactitude les instruments de détection des rayonnements et vérifier les doses de rayonnement et l'activité auxquelles sont exposés les patients, les travailleurs et le public. Le CCRI travaille en étroite coopération avec le Département des rayonnements ionisants du BIPM qui fournit les installations scientifiques pour plus de 60 % des comparaisons en métrologie des rayonnements ionisants.

La stratégie du CCRI pour les années 2013 à 2023 a notamment pour objectif de développer des étalons pour de nouvelles applications, d'améliorer l'efficacité du système de mesure international concernant la métrologie des radionucléides et réduire les coûts pour toutes les parties prenantes en mutualisant l'utilisation d'installations. Parmi les principales réalisations du CCRI au cours des quatre années passées figurent les suivantes :

- Un nouvel étalon de dose absorbée dans l'eau dans les faisceaux de rayons x aux moyennes énergies a été développé pour des comparaisons avec les laboratoires nationaux qui disposent d'étalons pour la radiothérapie utilisant cette gamme d'énergie.
- Le modèle établi de comparaisons s'est poursuivi, avec 37 comparaisons concernant la dosimétrie des rayonnements et 21 pour les radionucléides à longue durée de vie, au BIPM. Des comparaisons ont également été achevées pour la première fois pour certains radionucléides à courte durée de vie utilisés pour l'imagerie médicale (^{11}C et ^{64}Cu).
- Le défi qui consiste à établir la traçabilité internationale pour la dosimétrie de photons à hautes énergies (à l'aide d'accélérateurs linéaires) a été relevé. Le BIPM a pris les dispositions nécessaires pour avoir accès à un accélérateur situé sur un nouveau centre de recherche local (DOSEO) ; un service de comparaisons a ainsi été établi et des mesures réalisées dans le cadre de comparaisons avec deux laboratoires nationaux de métrologie.
- L'organisation du CCRI a été rationalisée et les règles pour être membre du CCRI ont été alignées avec celles des autres Comités consultatifs. Tous les laboratoires nationaux de métrologie disposant d'installations importantes dans le domaine de la métrologie des rayonnements ionisants participent désormais au CCRI. Par ailleurs, la durée des réunions bisannuelles a été diminuée de 20 jours en 2014 à 10 en 2016 et devrait encore être réduite en 2019.

- Un numéro spécial de *Metrologia* sur l'évaluation des incertitudes dans les mesures d'activité des radionucléides a été publié, ainsi que le volume 8 de la *Monographie BIPM-5, Table of Radionuclides*. Le CCRI a joué un rôle clé afin de s'assurer de l'adoption de nouvelles données pour la dosimétrie des rayonnements : ces données sont publiées dans le rapport « *ICRU Report 90* ». Un article de synthèse visant à aider les laboratoires nationaux de métrologie à adopter ces nouvelles données a été publié dans *Metrologia*.
- Le CCRI a mis davantage l'accent sur les activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances, en mettant en place un programme de détachements et de visites au BIPM, en participant à des conférences et ateliers tels ceux organisés par l'AIEA, et en organisant de nouveaux ateliers.

Le nombre de CMCs dans le domaine des rayonnements ionisants reste stable avec près de 4 000 CMCs mais ce grand nombre peut être synonyme d'une charge de travail considérable pour le personnel des laboratoires nationaux de métrologie en charge des examens périodiques des CMCs. Le CCRI continue à étudier des approches qui permettraient de réduire cette charge de travail tout en respectant les principes du CIPM MRA. Tout changement ne doit pas réduire la qualité des CMCs mais doit assurer l'équilibre entre les besoins des grands et des petits laboratoires nationaux de métrologie. Un concept de CMCs « représentatives », où le nombre de services pouvant être couvert par une unique CMC est augmenté, est en cours d'examen.

Une nouvelle stratégie a été développée pour le CCRI afin de prendre en considération les exigences que susciteront les développements technologiques, tels que de nouvelles méthodes de radiothérapie et de nouveaux médicaments pour la radioimmunothérapie, ainsi que les préoccupations liées au risque potentiel que représentent pour l'environnement les grandes quantités de déchets radioactifs qui résulteront du démantèlement d'anciens sites nucléaires.

Domaine de compétence du CCRI

La vision du CCRI est celle d'un monde où les rayonnements ionisants sont utilisés au bénéfice de l'humanité, avec l'assurance que les risques associés sont contenus par des mesures exactes et scientifiquement rigoureuses. Sa mission est de discuter, encourager, permettre et coordonner le développement, la comparaison et la promotion d'étalons de mesure nationaux dans le domaine des rayonnements ionisants. Le CCRI a pour objectif de permettre à tous les utilisateurs de rayonnements ionisants de réaliser des mesures à un niveau d'exactitude qui convient à leur usage, en collaborant avec ses parties prenantes afin d'être le porte-voix de ses clients.

Le travail du CCRI concerne toutes les applications des rayonnements ionisants, y compris la dosimétrie pour la radioprotection, la radiothérapie et la stérilisation des appareils médicaux, la métrologie des radionucléides pour la médecine nucléaire et la protection de l'environnement. Tous les rayonnements ionisants entrent dans le champ de compétence du CCRI : les particules alpha et beta, les rayons gamma et x, les électrons, les protons et les ions plus lourds, ainsi que les neutrons.

Les principales tâches du CCRI et les services qu'il fournit sont les suivants :

- organiser et effectuer des comparaisons dont les résultats, y compris les valeurs de références approuvées de comparaisons clés, sont publiés dans des *Technical Supplements* de *Metrologia ;*
- apporter des conseils aux laboratoires nationaux de métrologie, aux laboratoires désignés et aux organisations régionales de métrologie sur les CMCs et les comparaisons ;
- superviser les systèmes de référence internationaux pour la métrologie des radionucléides ;
- superviser les étalons de mesure internationaux pour la dosimétrie des rayonnements ;

- publier des monographies sur les données de décroissance nucléaire et contribuer à des numéros spéciaux de *Metrologia* ;
- participer à des conférences et réunions ;
- contribuer au transfert des connaissances, par exemple en facilitant des détachements et visites au BIPM et en organisant des ateliers.

Stratégie

La stratégie à long terme du CCRI a été le sujet de discussion d'un atelier sur la stratégie le 21 juin 2017 qui a conduit à créer le Groupe de travail *ad hoc* du CCRI sur la stratégie. Ce groupe de travail s'est réuni pour la première fois le 16 mars 2018.

Conformément à la vision du CCRI, la nouvelle stratégie pour les années 2018 à 2028 vise à disposer d'un système de mesure international inclusif pour les rayonnements ionisants. Les principaux objectifs de la stratégie du CCRI sont les suivants :

– améliorer la comparabilité mondiale des mesures en effectuant des comparaisons plus accessibles et plus efficaces, en augmentant la portée des comparaisons pour répondre à de nouvelles exigences, en réduisant le besoin de comparaisons de grande envergure sur le long terme, et en optimisant l'utilisation des ressources au sein des laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés, ainsi qu'au BIPM ;
– renforcer les capacités de petits laboratoires nationaux de métrologie en organisant des ateliers de transfert des connaissances et en augmentant le nombre de détachements et visites au BIPM par des partenariats avec les laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés, ainsi qu'avec des organismes de liaison tels que l'AIEA,
– faire progresser l'état de l'art sur des questions prioritaires qui présentent de l'intérêt pour les laboratoires nationaux de métrologie, en soutenant l'organisation de projets de recherche communs ciblés.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Le CCRI s'est réuni deux fois depuis la 25e réunion de la CGPM : le 17 mai 2015 et les 29 et 30 juin 2017. Ces deux réunions ont été présidées par M. Wynand Louw.

Le CCRI a été rationalisé en 2016-2017. Les trois sections du CCRI, qui couvrent la dosimétrie des rayonnements, la métrologie des radionucléides et la métrologie des neutrons, fonctionnent désormais sous les auspices du CCRI en tant que groupes de travail. Les groupes de travail techniques (tels que les groupes de travail sur les comparaisons clés) continuent à rendre compte de leurs activités à la section dont ils dépendent ; le Groupe de travail *ad hoc* du CCRI sur la stratégie et le Groupe de travail du CCRI sur les CMCs en collaboration avec les organisations régionales de métrologie rendent compte au CCRI. Les premières réunions selon cette nouvelle structure se sont tenues en 2017 sur 10 jours au total (au lieu de 20 jours en 2014). Il est prévu de rationaliser davantage les réunions en 2019 afin qu'elles ne durent qu'une semaine.

Le CCRI travaille en étroite coopération avec le personnel du BIPM pour réaliser les comparaisons et contribuer à piloter des projets de développement. Cette collaboration permet de réduire la charge de travail des laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés concernant l'organisation des comparaisons et de faciliter les activités de transfert des connaissances.

Principales activités

Comme indiqué lors de la 25e réunion de la CGPM, le nombre de CMCs dans le domaine des rayonnements ionisants reste relativement stable, avec environ 4 000 CMCs. Relativement peu de

nouvelles CMCs sont déclarées chaque année mais la nécessité de procéder à des examens périodiques de l'ensemble des CMCs est synonyme, du fait de leur grand nombre au total, d'une lourde charge de travail pour certains laboratoires nationaux de métrologie, selon les spécificités du processus d'examen de l'organisation régionale de métrologie concernée. Ainsi, la mise en œuvre des conclusions de l'examen du CIPM MRA a fait l'objet de discussions approfondies. Des efforts sont déployés afin de simplifier l'interprétation des CMCs ; il s'agit notamment d'essayer de trouver un équilibre entre les intérêts de plus grands laboratoires nationaux de métrologie, qui ont besoin de réduire la complexité du processus d'examen des CMCs, et les besoins de plus petits laboratoires nationaux de métrologie, où des liens directs aux services peuvent être aisément établis dans le cadre actuel. Le CCRI a discuté de directives mais davantage de travail doit être accompli à ce sujet.

Des progrès ont été effectués concernant la mise en œuvre d'une stratégie claire en matière de comparaisons. Un cycle de comparaisons a été convenu et des procédures mises en place afin de s'assurer qu'une comparaison peut être utilisée pour étayer plusieurs CMCs (la matrice des méthodes de mesure utilisée en radioactivité en est un exemple). Le cycle régulier de comparaisons en dosimétrie des rayonnements se poursuit, avec 37 comparaisons de 2013 à 2018, ce qui permet aux laboratoires nationaux de métrologie de démontrer de façon continue l'exactitude de leurs étalons primaires.

L'une des préoccupations du CCRI ces dernières années a été d'établir un fondement solide pour la traçabilité des mesures de dosimétrie pour la radiothérapie utilisant des accélérateurs. Dans le domaine de la radiothérapie, les accélérateurs remplacent rapidement les sources scellées de haute activité : il existe déjà 12 000 accélérateurs en fonctionnement contre 2 000 sources scellées et la demande en matière de comparaisons et d'étalonnages ne cesse de croître. Un accord a été conclu entre le BIPM et un centre de recherche français, DOSEO, afin que le BIPM ait accès à un accélérateur linéaire : l'étalon primaire du BIPM a ainsi été utilisé pour calibrer les faisceaux disponibles sur l'équipement de DOSEO et un service de comparaisons a été lancé en 2017. La proximité géographique de DOSEO a permis au personnel du BIPM de mettre en place un service de comparaisons sans perte d'exactitude ou d'efficacité. Deux laboratoires nationaux de métrologie, le KRISS (République de Corée) et METAS (Suisse), ont déjà participé à une comparaison.

Un certain nombre de laboratoires nationaux de métrologie ont développé des étalons primaires de dose absorbée dans l'eau dans les faisceaux de rayons x aux moyennes énergies. Afin de satisfaire aux besoins de comparaison et validation des étalons de ces laboratoires nationaux de métrologie, un nouveau service fondé sur l'étalon primaire à parois d'air existant a été mis en place au BIPM. Une nouvelle comparaison clé, BIPM.RI(I)-K9, a été approuvée par la Section I du CCRI et enregistrée dans la KCDB. La première comparaison avec la PTB (Allemagne) a été achevée en 2017 et la seconde avec le LNE-LNHB (France) est en cours.

Les comparaisons d'étalons de radionucléides émetteurs de rayonnement gamma se sont poursuivies à l'aide du Système international de référence (SIR) et de son instrument de transfert (SIRTI). Le SIR et le SIRTI constituent des outils bien établis et pratiques pour démontrer l'équivalence des mesures, ce qui permet de réduire la nécessité d'organiser des comparaisons de grande envergure ; le CCRI a approuvé des mises à jour des valeurs de référence de comparaisons clés pour 16 radionucléides, qui intègrent pour la première fois les résultats des comparaisons du ^{99m}Tc et du ^{18}F à l'aide du SIRTI.

Le SIR a joué un rôle important afin de démontrer l'équivalence des étalons primaires du ^{223}Ra, un nouvel agent thérapeutique : ce radionucléide est particulièrement difficile à étalonner et la comparaison effectuée a permis aux laboratoires nationaux de métrologie de valider leurs étalons, ce qui étaye le déploiement de nouveaux médicaments au niveau mondial.

Le SIR n'est pas adapté pour des radionucléides de courte durée de vie car ces derniers se désintègrent au cours du voyage vers le BIPM. Toutefois, l'imagerie diagnostique en médecine nucléaire utilise des produits radiopharmaceutiques fondés sur ce type d'isotopes à courte durée de vie. Le CCRI a donc contribué au développement d'un instrument transportable, l'instrument de transfert du SIR (SIRTI), qui peut être utilisé dans les laboratoires nationaux de métrologie pour les comparaisons. Le SIRTI a été utilisé à l'ANSTO (Australie), au CNRC (Canada), au NIST (États-Unis), au POLATOM (Pologne) et au NMISA (Afrique du Sud) et a servi, pour la première fois, à comparer des étalons du ^{11}C et du ^{64}Cu. Une stratégie concernant l'utilisation du SIRTI a été approuvée par le Groupe de travail de la Section II sur les comparaisons clés : les radionucléides prioritaires ont été identifiés et de nouvelles campagnes de mesures seront lancées lors du programme de travail pour les années 2020 à 2023.

Le CCRI a coordonné la publication d'un numéro spécial de *Metrologia*, **52**(3), sur l'évaluation des incertitudes dans les mesures d'activité des radionucléides. Cette publication porte sur l'estimation des incertitudes dans le domaine de la métrologie des radionucléides et comprend des articles pertinents pour les cliniques de médecine nucléaire (chambres d'ionisation) et les laboratoires de surveillance de l'environnement (spectrométrie des rayonnements gamma). L'article sur la spectrométrie des rayonnements gamma est cité dans un projet de norme ISO portant sur ce sujet et sera par conséquent utilisé dans les laboratoires d'essais du monde entier.

De nouvelles valeurs recommandées pour les grandeurs de base liées à l'interaction des rayonnements avec la matière pour la dosimétrie des rayonnements ont également été publiées (ICRU Report 90, *Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications*). Les travaux de recherche réalisés au BIPM ont contribué de façon importante à la publication de ces nouvelles recommandations. Le CCRI a veillé à promouvoir l'utilisation de ces nouvelles données auprès des métrologistes et des communautés d'utilisateurs, en particulier par l'intermédiaire de la publication par le BIPM d'un article de synthèse dans *Metrologia*, 2018, **55**(4)[9] afin que les estimations de la dose administrée aux patients s'appuient sur les meilleures données scientifiques disponibles.

Un autre volume de la *Monographie BIPM-5* (Volume 8, 2016) sur les données de décroissance nucléaire a été publié : il couvre les données recommandées de 32 radionucléides. Les données de décroissance sont évaluées par le groupe international Decay Data Evaluation Project, dirigé par le LNE-LNHB (France), auquel participent des laboratoires du monde entier ; la publication de ces données sous la forme d'une monographie du BIPM garantit que les laboratoires nationaux de mesure (et par là-même la plupart des laboratoires de mesure) adoptent ces données. Ce travail a contribué à harmoniser les mesures de l'activité des radionucléides : avant la publication de cette monographie du BIPM, les laboratoires utilisaient des valeurs différentes, extraites de diverses publications et bases de données.

Un programme de transfert des connaissances est en place depuis longtemps : des participants aux comparaisons et étalonnages en dosimétrie travaillent souvent en coopération avec le personnel du BIPM afin de réaliser les mesures requises ; c'est le cas notamment du personnel des laboratoires suivants : ENEA-INMRI (Italie), ININ (Mexique), SCK•CEN/LNK (Belgique), SMU (Slovaquie), KRISS (République de Corée), METAS (Suisse) et CNRC (Canada). Ce programme a été complété par des détachements au BIPM sur des projets de plus long terme.

Un atelier commun au CCRI et au CCEM s'est tenu au NIST en septembre 2018 afin de discuter des possibilités d'utiliser de nouvelles technologies de mesure des faibles courants pour les instruments

[9] Burns D., Kessler C., Re-evaluation of the BIPM international dosimetry standards on adoption of the recommendations of ICRU Report 90, *Metrologia*, 2018, **55**(4), R21-R26.

de la métrologie des radionucléides. Vingt délégués des communautés de la métrologie des radionucléides et de la métrologie de l'électricité ont participé à cet atelier qui a permis de conclure que deux approches semblaient prometteuses. Le compte rendu de l'atelier sera publié dans les *NIST Conference Proceedings* et une étude portant sur l'une des techniques commencera au BIPM en 2019. Si cette nouvelle technologie peut être utilisée avec succès, elle pourrait permettre aux laboratoires nationaux de métrologie de remplacer leurs systèmes électroniques obsolètes et de réduire leur dépendance vis-à-vis des sources radioactives scellées pour les chambres d'ionisation.

Défis et difficultés

Le fait de maintenir le système international de mesure tel qu'il est présente deux défis réglementaires externes. En premier lieu, l'expédition de sources radioactives à des fins de comparaison peut être très complexe et chronophage en raison de multiples réglementations, d'un manque d'harmonisation et d'une réglementation excessive de la part des autorités responsables des transports. Cela s'applique en particulier aux comparaisons d'émission de sources neutroniques mais les expéditions de sources radioactives sont également concernées. Des travaux sont en cours pour résoudre ces problèmes, dans la mesure du possible, en mettant par exemple en place un service de comparaison sur demande pour les radionucléides émetteurs de rayonnement beta similaire au SIR. Ce projet comporte ses propres défis techniques : des comparaisons d'essai menées en 2014 et 2017 ont donné des résultats non cohérents. Le projet a repris au BIPM en septembre 2018, avec le soutien d'une équipe dédiée d'experts du LNE-LNHB, de POLATOM, de la PTB et du NPL, l'objectif final de simplifier les comparaisons de radionucléides importants ayant des applications en médecine nucléaire justifiant les efforts requis.

Le second défi concerne les réglementations de plus en plus strictes concernant l'utilisation de sources scellées de haute activité. De telles sources sont utilisées en dosimétrie (pour produire des faisceaux de photons fiables pour les comparaisons) et en radioactivité (pour vérifier la reproductibilité des mesures dans les chambres d'ionisation). L'approche adoptée est de partager des ressources, dès que cela est possible : l'irradiateur au ^{137}Cs a été fermé au BIPM afin de respecter ces réglementations et le travail de transfert de l'étalon du BIPM à l'AIEA a commencé. Le faisceau de ^{137}Cs fournit un point de comparaison essentiel pour les étalons de radioprotection : le service continuera à être conduit par le personnel du BIPM à l'aide de l'étalon primaire du BIPM et l'augmentation des incertitudes due à ce transfert devrait être négligeable pour la dosimétrie de la radioprotection. Il s'agit par ailleurs de trouver des substituts pour les anciennes sources scellées utilisées en métrologie des radionucléides ; un projet commun à l'IRA, au NPL et au LNE-LNHB a été lancé afin de construire des sources de ^{166m}Ho pour remplacer les sources de ^{226}Ra pour le SIR et les instruments similaires utilisés dans les laboratoires nationaux de métrologie.

Perspectives à court terme et à long terme

À court terme, le CCRI se concentrera sur les questions clés dans le domaine des rayonnements ionisants (s'assurer de l'efficience et de l'efficacité des processus d'examen des CMCs, réduire le nombre de comparaisons de grande envergure et réduire la dépendance vis-à-vis des sources scellées).

À plus long terme, les éléments moteurs de la métrologie des rayonnements ionisants resteront forts et feront apparaître de nouveaux besoins en matière de comparaison ou de nouveaux besoins scientifiques :

- extension de l'utilisation de nouvelles techniques de radiothérapie (y compris la protonthérapie), conduisant à la nécessité de disposer de nouveaux étalons primaires pour la dosimétrie et d'organiser les comparaisons associées,
- accroissement continu de l'utilisation des examens médicaux de diagnostic,

- préoccupations concernant les questions de radioprotection pour les travailleurs, les patients et le grand public,
- miniaturisation des appareils électriques les rendant plus vulnérables aux effets des dommages causés par les rayonnements,
- nouvelles applications industrielles des irradiations à des niveaux de dose élevés,
- développement de nouveaux produits radiopharmaceutiques thérapeutiques (radioimmunothérapie), requérant des étalons primaires et des techniques primaires de comparaison des étalons de radionucléides,
- augmentation des activités liées au démantèlement d'anciens sites nucléaires, aux tests de la qualité des sols ainsi qu'aux réglementations plus strictes concernant les radionucléides naturels, ce qui conduira à une augmentation du besoin de comparaisons de radionucléides à très longue durée de vie,
- métrologie pour la prochaine génération de centrales nucléaires, y compris les réacteurs à fusion,
- demandes de mesures de haute exactitude afin de caractériser des échantillons de matériaux radioactifs illicites (criminalistique nucléaire).

Enfin, le CCRI s'attend à un développement de liens plus étroits avec l'AIEA qui constitue la plus grande organisation internationale dans le domaine des rayonnements ionisants.

Données sur le CCRI

CCRI créé en 1958 (CCEMRI, Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants de 1958 à 1999)

Président : W. Louw	Secrétaire exécutif : S. Judge
Composition :	8 membres, 3 organismes de liaison et 14 observateurs
Réunions depuis la 25e réunion de la CGPM :	17 mai 2015, 29-30 juin 2017
Trois sections:	– Section I Rayons x et gamma, particules chargées – Section II Mesure des radionucléides – Section III Mesures neutroniques
Sept groupes de travail :	– Groupe de travail *ad hoc* du CCRI sur la stratégie – Groupe de travail sur les CMCs en collaboration avec les organisations régionales de métrologie – Groupe de travail sur les étalons en curiethérapie – Groupe de travail sur les comparaisons clés (Section I) – Groupe de travail sur les comparaisons clés (Section II) – Groupe de travail sur les comparaisons clés (Section III) – Groupe de travail sur l'extension du SIR aux émetteurs de rayonnement bêta

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s) [2019-2023]
Comparaisons clés du CCRI (et comparaisons supplémentaires)	8+(0)	4+(6)	1 par an (Section II)
Comparaisons du BIPM	51	14 (dosimétrie) 26 (radioactivité)[10]	20 par an
Études pilotes du CCRI	0	4	1 (étude pilote pour l'ESIR)
CMCs	3 985 CMCs publiées dans la KCDB		

Le président de la CGPM remercie M. Louw et ouvre la discussion.

M. Phillips demande des éclaircissements sur les rayonnements neutroniques, qui deviennent de plus en plus courants, et sur la métrologie associée, qui devient plus importante. Il rappelle que les détecteurs de neutron utilisent le ^{3}He : étant donné qu'il devient de plus en plus difficile de trouver du ^{3}He à des fins de recherche, M. Phillips demande comment cette pénurie affecte les détecteurs de neutrons. M. Louw soumet la question à M. Judge qui, conscient de la pénurie, indique que des efforts continus sont déployés pour remplacer les détecteurs ^{3}He par d'autres techniques.

M. Milton (directeur du BIPM) évoque, en lien avec la présentation donnée par M. Gröning, l'exigence d'uniformisation des étalons des mesures de la radioactivité environnementale. Il demande quelles sont les mesures nécessaires pour lancer une activité du CCRI dans ce domaine et susciter une activité appropriée dans les laboratoires nationaux de métrologie. M. Judge répond qu'une réunion du Groupe de travail sur les comparaisons clés se tiendra bientôt afin de discuter de ce sujet. L'une des questions est l'acceptabilité mondiale des matériaux de référence, en particulier pour le démantèlement nucléaire car la plupart des centrales électriques dans le monde arrivent à la fin de leur vie utile. Il existe une plus grande variété de radionucléides qui devront être mesurés dans une plus grande variété de matrices différentes. La question de savoir comment le CCRI et le BIPM peuvent contribuer à renforcer la confiance du public et des utilisateurs envers les matériaux de référence est un élément que le BIPM explorera, l'objectif étant de lancer un nouveau service de comparaison au cours du prochain programme de travail. M. Gröning ajoute que cette question est liée au réseau ALMERA de l'AIEA qui a été fondé en réponse à l'intérêt porté par les États Membres de l'AIEA pour la création de matériaux de référence pour les déchets contaminés des centrales nucléaires. L'AIEA étudie la possibilité de créer de tels matériaux de référence et cela pourrait être l'objet d'une future coopération.

M. Candel (président de la CGPM) demande si des travaux de recherche pertinents portent sur l'exposition du personnel navigant aux rayonnements lors des vols en haute altitude. M. Louw répond que les mesures de dose pour ce type d'exposition suscitent actuellement de l'intérêt. Un projet est en cours à iThemba (Afrique du Sud) pour établir un faisceau de référence à 200 MeV. Il ajoute que des faisceaux de 60 MeV à 200 MeV sont utilisés pour l'étalonnage des dosimètres qui servent à ce type de contrôle et il est important que des systèmes soient en place pour contrôler de manière exacte la dose.

Le président de la CGPM clôt la cinquième séance.

[10] L'expression « en cours » signifie que des mesures ont été réalisées et que le rapport est en cours.

Sixième séance – 15 novembre 2018 (après-midi)

Le président de la CGPM souhaite la bienvenue aux délégués pour la sixième séance.

39. Étalons et science de la mesure au service des technologies de surveillance des essais nucléaires

M. Julien Marty, de l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE), commence par remercier M. Milton de l'avoir invité à donner cette présentation, ainsi que M. Usuda pour son soutien continu vis-à-vis des activités de l'OTICE. Il cite l'Article 1 du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE) : « Chaque État partie s'engage à ne pas effectuer d'explosion expérimentale d'arme nucléaire ou d'autre explosion nucléaire et à interdire et empêcher toute explosion de cette nature en tout lieu placé sous sa juridiction ou son contrôle. » Ouvert à la signature le 24 septembre 1996 aux Nations Unies, le traité est presqu'universel puisque 184 pays l'ont signé. Cependant, il ne peut pas entrer en vigueur car cela requiert qu'il soit ratifié par les 44 États détenant des installations nucléaires, listés dans l'annexe 2 du traité : huit de ces États n'ont pas encore ratifié le traité. Par conséquent, le nom complet de l'organisation est à l'heure actuelle la Commission préparatoire de l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaire, bien qu'on l'appelle simplement l'OTICE.

Le rôle de l'OTICE est de mettre en place un régime de vérification et de promouvoir l'universalité du traité. Établie à Vienne, la Commission préparatoire se compose de deux principaux organes : un organe plénier rassemblant l'ensemble des États signataires (PrepCom) et le Secrétariat technique provisoire qui compte plus de 260 membres du personnel de plus de 70 pays.

M. Marty explique que le régime de vérification repose sur quatre composantes. La première est le Système de surveillance international (International Monitoring System, IMS), constitué d'un réseau mondial de 337 stations de surveillance qui envoient des données quasiment en temps réel au Centre international de données (International Data Centre, IDC) à Vienne. La deuxième composante est le mécanisme de consultation et de clarification. Si le Système de surveillance international observe une non-conformité potentielle, les États Membres se consulteront et pourront faire une demande de clarification à l'État Membre concerné. La troisième composante consiste en des inspections sur place pour lever tout doute en cas de non-conformité potentielle. Les mesures de confiance qui permettent d'éviter toute mauvaise interprétation de données et de soutenir l'étalonnage des outils de surveillance constituent la dernière composante.

M. Marty précise que sa présentation se concentrera sur le Système de surveillance international (IMS). Ce système qui comprend 337 stations repose sur quatre technologies : les mesures sismiques (170 stations d'écoute souterraine), les mesures hydroacoustiques (11 stations d'écoute sous l'eau), les infrasons (60 stations d'écoute au-dessus du sol) et les radionucléides (80 stations de détection d'émissions radioactives potentielles). Au total, 88 % des stations de l'IMS ont été certifiées et envoient des données au Centre international de données. M. Marty présente brièvement comment le réseau de surveillance et les quatre technologies fonctionnent.

L'objectif principal de l'OTICE est de détecter les essais nucléaires. M. Marty prend l'exemple d'un essai nucléaire qui a été effectué le 3 septembre 2017. Cet essai a été détecté par 134 stations du Système de surveillance international de l'OTICE au moyen des techniques sismiques,

hydroacoustiques et infrasons. Comme le nombre de stations de l'IMS augmente, l'exactitude de la localisation s'améliore : ainsi, concernant l'essai nucléaire de 2017, la localisation était exacte à 6,7 km près.

L'OTICE peut détecter d'autres événements « non nucléaires ». Comme l'OTICE suit des exigences très strictes en matière de disponibilité et d'égalité des données, elle fournit un ensemble précieux de données géophysiques qui peuvent être utilisées pour des applications civiles. Le Centre international de données a localisé 556 337 événements sismo-acoustiques entre février 2000 et novembre 2017. L'application civile la plus connue est l'émission d'alerte aux tsunamis. L'OTICE a conclu un accord avec 14 centres d'alerte aux tsunamis afin de partager des données en temps réel et un processus spécifique a été mis en place pour qu'une alerte soit lue 10 minutes après la détection en temps réel d'un tremblement de terre qui pourrait générer un tsunami. Les applications civiles de la technologie des infrasons comprennent la détection des éruptions volcaniques, qui est importante pour l'industrie aéronautique afin d'éviter que les panaches de cendre n'endommagent des avions. La technologie infrason a l'avantage sur la technologie par satellite de pouvoir détecter les panaches de cendres même en cas de couverture nuageuse dense. L'OTICE a conclu un accord avec l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) et les Centres d'avis de cendres volcaniques (Volcanic Ash Advisory Centers, VAACs) qui font partie du projet ARISE (Atmospheric Dynamics Research InfraStructure in Europe) financé par l'Union européenne afin de partager des alertes aux nuages de cendre fondées sur les données du réseau de stations infrasons. Le projet ARISE utilise également des données de l'OTICE pour mieux comprendre la dynamique de l'atmosphère moyenne afin d'améliorer les prévisions météorologiques et ajuster les modèles atmosphériques actuels. En outre, le réseau des stations infrasons permet de surveiller les bolides explosant dans l'atmosphère en améliorant les statistiques concernant les objets géocroiseurs pénétrant dans l'atmosphère.

M. Marty souligne l'importance du réseau de surveillance des radionucléides et cite l'utilisation qui en a été faite après l'accident de Fukushima le 11 mars 2011. Les premières traces de radionucléides en provenance du site ont été détectées par le réseau de surveillance des radionucléides de l'IMS et des données ont été partagées avec les États signataires le 13 mars 2011. Des comptes rendus ont été communiqués aux États signataires le 15 mars 2011 et des observations sur les radionucléides ont été partagées le 17 mars 2011.

Le principal sujet de l'OTICE reste la détection des essais nucléaires, ce qui requiert un système de mesure des mouvements du sol ou des variations de pression aussi exact que possible. Il est essentiel pour la crédibilité de l'organisation que ses données soient fiables. M. Marty donne des précisions sur les étalons qui existent pour les différentes technologies et souligne le besoin de disposer de CMCs validées pour les mesures effectuées par les systèmes de surveillance infrasons, sismiques et hydroacoustiques de l'IMS. Pour y parvenir, le soutien de la communauté mondiale de la métrologie sera nécessaire. Concernant la technologie de surveillance des radionucléides, des CMCs sont déjà disponibles. Treize des 16 laboratoires d'analyse des radionucléides de l'IMS ont déjà été certifiés, y compris quatre laboratoires ayant des aptitudes en matière de gaz rares. Des étalons sont utilisés pour tester les compétences des laboratoires d'analyse des radionucléides de l'IMS et pour étalonner ses stations.

Le président de la CGPM remercie M. Marty et demande si les microphones pour la surveillance hydroacoustique sont placés dans le canal SOFAR (Sound Fixing and Ranging channel) et, si tel est le cas, si cela signifie qu'ils sont à 900 mètres en dessous du niveau de la mer. M. Marty répond que le canal SOFAR est une couche d'eau horizontale dans l'océan à la profondeur de laquelle la vitesse du son est à son minimum : sa profondeur dépend de la latitude et donc de la localisation de la station. Il confirme que ces microphones seront à plusieurs centaines de mètres sous la surface de l'océan.

M. Candel pose une autre question sur le fait de savoir comment la position d'une explosion est déterminée à partir des données provenant des appareils et quelle est l'incertitude concernant la localisation. M. Marty répond que lors de la réception de données, elles sont d'abord vérifiées pour s'assurer de leur qualité puis authentifiées. Les données de chaque station sont ensuite traitées et catégorisées afin de filtrer les explosions venant d'autres sources de donnée. L'étape finale est d'utiliser ces données pour construire un événement.

M. Louw (CIPM) demande si les instruments de mesure des divers sites sont étalonnés par le pays où ils se trouvent, en supposant que le pays dispose de cette aptitude. M. Marty observe qu'une procédure différente est utilisée en fonction de la technologie. Dans le cas de la technologie sismique ou infrason, l'OTICE a recours à un laboratoire de référence : par exemple, les instruments de détection infrasons sont étalonnés par Sandia National Laboratories (États-Unis d'Amérique) ou par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA, France). Ces laboratoires sont ceux qui ont actuellement le plus haut niveau d'exigence métrologique et les détecteurs de l'OTICE leur sont envoyés pour étalonnage de façon régulière ; ces instruments sont ainsi appelés « détecteurs en or ». Ces détecteurs sont ensuite utilisés pour étalonner d'autres détecteurs qui voyagent entre l'OTICE et la station. L'OTICE exige que ses systèmes de mesure soient étalonnés au moins une fois par an pour toutes ses stations.

M. Henson (membre du personnel du BIPM) mentionne les équipements de mesure des radionucléides et demande s'il est utile de contrôler plus d'un radionucléide car la variation temporelle et spatiale dépend des propriétés du radionucléide. M. Marty répond que l'IMS surveille de nombreux isotopes différents, en particulier ceux des gaz rares, le xénon étant l'un des principaux.

M. Sung (République de Corée) demande ce qu'il se passe si des signataires de l'OTICE ne respectent pas les règles de l'OTICE et comment est financé le travail de l'OTICE car l'IMS semble être un réseau onéreux. M. Marty répond que l'OTICE fournit des informations à ses États Membres à la suite d'un événement suspicieux. Il incombe ensuite aux États Membres, réunis aux Nations Unies, de prendre une décision, en se fondant sur des informations purement techniques, quant au fait d'imposer ou non des sanctions mais ce n'est pas le rôle de l'OTICE. Concernant le financement, il provient des contributions qui sont versées par les 184 États Membres de l'OTICE et déterminées à partir du barème des Nations Unies. L'IMS est considérée être une solution rentable de surveillance des essais nucléaires par rapport à d'autres technologies, telles que les systèmes satellites.

Un membre de la délégation tunisienne demande des éclaircissements concernent deux points. Le premier concerne le fait que, dans le domaine des technologies hydroacoustiques, l'OTICE dispose d'étalons primaires mais non de CMCs. Le second porte sur l'impact de la révision du Système international d'unités (SI) sur les résultats étant donné que des mesures de haute exactitude sont requises. M. Marty répond que, dans le domaine des technologies hydroacoustiques, la question des étalons primaires est liée à la bande de fréquence. L'OTICE dispose d'étalons primaires dans certaines bandes de fréquences mais pas toutes. La bande qui présente un intérêt pour l'OTICE n'est pas complètement couverte par des CMCs. Par ailleurs, la révision du SI aura des conséquences au plus haut niveau métrologique mais un impact limité sur les mesures car la mise en œuvre de la mesure elle-même ne sera pas changée.

40. Rapport du président du CCAUV

M. Takashi Usuda, président du Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV), présente son rapport sur les activités du CCAUV depuis la 25e réunion de la CGPM (2014).

Résumé du rapport du CCAUV

Le CCAUV couvre les grandeurs dans les domaines de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations, qui tous sont concernés par des ondes mécaniques dans différents supports (air, eau et solides) et dans différentes structures (composants de machine, véhicules, bâtiments, et même tissus et corps humains). Bien que les unités de mesure utilisées dans les domaines du CCAUV ne soient pas des unités fondamentales du Système international d'unités (SI), elles ont un lien direct avec la santé et la sécurité publiques car leurs applications ont un impact dans la vie quotidienne. Le processus de planification stratégique suivi par le CCAUV a permis de dégager des axes clairs concernant ses futures activités et a mis en lumière l'importance et le caractère prioritaire que revêtent les domaines de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations pour les parties prenantes du CCAUV.

Domaine de compétence du CCAUV

La mission du CCAUV est de conseiller le CIPM sur tous les sujets et questions scientifiques qui ont des répercussions sur la métrologie dans le domaine des ondes mécaniques : l'acoustique (A), les ultrasons et l'acoustique dans l'eau (U) et les vibrations (V). Le CCAUV identifie et organise les comparaisons clés requises dans ces quatre domaines pour établir la comparabilité mondiale des mesures et leur traçabilité au SI. Par ailleurs, le CCAUV sert de référence et de réseau à la communauté diversifiée de l'acoustique, des ultrasons, des vibrations et de l'acoustique dans l'eau lorsqu'il s'agit de discuter des résultats des derniers travaux de recherche sur des domaines émergents et lorsqu'il s'agit de fixer des objectifs communs et d'établir des collaborations entre les laboratoires nationaux et désignés des États Membres ou avec d'autres organismes pertinents.

Stratégie

En 2017, le CCAUV a révisé sa stratégie afin de définir les besoins métrologiques actuels et à venir pour les applications de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations. Étant donné que le BIPM ne mène aucune activité dans ces domaines, la planification ne concerne que les laboratoires nationaux de métrologie, les laboratoires désignés, et leurs parties prenantes. Le document de stratégie publié par le CCAUV présente une étude détaillée de chacune de ses disciplines.

Le CCAUV a désormais atteint le niveau où il conduit des répétitions de comparaisons clés en même temps qu'il en considère de nouvelles. Les comparaisons dans les domaines de l'acoustique, des ultrasons, des vibrations et de l'acoustique dans l'eau sont parvenues à maturité et les répétitions de comparaisons prévalent désormais. En outre, ces comparaisons clés répétées sont caractérisées par un champ d'application élargi qui couvre des domaines de fréquences plus vastes et qui prend en considération les demandes en constante évolution des utilisateurs.

Afin de pouvoir offrir un travail de la plus haute qualité et efficacité, le CCAUV est assisté par ses trois groupes de travail. Le Groupe de travail sur la stratégie supervise de façon régulière la révision de la stratégie du CCAUV et des documents associés, et suit le développement et l'évolution des domaines scientifiques pertinents. Le Groupe de travail sur la coordination des organisations régionales de métrologie est chargé, entre autres, de remédier aux obstacles concernant l'examen interrégional des aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs) et d'harmoniser les

processus d'examen régionaux des CMCs. Le Groupe de travail sur les comparaisons clés examine les protocoles et rapports de comparaisons clés internationales et coordonne les comparaisons clés avec les organisations régionales de métrologie afin d'assurer la qualité des données publiées.

Le CCAUV suit les développements de domaines et applications connexes, tels que le travail sur la nouvelle définition du kelvin et la métrologie des matériaux sous l'angle de la propagation des ondes acoustiques. Il maintient des relations étroites avec les comités techniques de l'International Electrotechnical Commission (IEC) et de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), deux organisations ayant le statut d'organisme de liaison au sein du CCAUV. Le CCAUV a commencé à dialoguer avec la Commission préparatoire de l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE) au sujet de la traçabilité des infrasons et des vibrations à basse fréquence pour le Système de surveillance international (IMS) de l'OTICE.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Le CCAUV s'est réuni deux fois depuis la 25e réunion de la CGPM (2014). Tel que recommandé par le Groupe de travail *ad hoc* sur le rôle, la mission, les objectifs, la stabilité financière à long terme, la direction stratégique et la gouvernance du BIPM en 2012, les présidents des comités techniques concernés des organisations régionales de métrologie ont été invités à assister aux réunions du CCAUV et à participer aux réunions des groupes de travail sur la stratégie et les comparaisons clés.

Le CCAUV a pris part à l'examen du CIPM MRA. L'une des principales activités du CCAUV et de ses groupes de travail a été d'appliquer les recommandations formulées par le Groupe de travail *ad hoc* du CIPM sur la mise en œuvre des recommandations établies lors de l'examen du CIPM MRA.

Le Groupe de travail sur les comparaisons clés produit des documents d'orientation sur la façon d'effectuer des comparaisons clés dans le cadre du CCAUV.

La liste des catégories de services a été mise à jour en accord avec le CCM afin d'y ajouter la chaîne de mesure de la force et les transducteurs de force pour les mesures ou essais modaux d'impédance et de mobilité mécaniques.

Principales activités

Le CCAUV se réunit tous les deux ans. Les métrologistes dans le domaine de l'acoustique, des ultrasons, des vibrations et de l'acoustique dans l'eau représentent une communauté diversifiée et géographiquement disséminée. Ainsi, les réunions du CCAUV ne concernent pas seulement la collaboration en matière de comparaisons mais elles constituent aussi un forum mondial où les participants peuvent décrire leurs travaux de recherche les plus récents et rendre compte des progrès effectués dans des domaines pertinents ; ces réunions permettent de créer et maintenir des contacts avec d'autres experts et facilitent les discussions sur les questions en cours. Les réunions donnent également l'occasion d'avoir des échanges scientifiques et de faire des présentations thématiques sur les sujets métrologiques actuels de pointe pour le CCAUV.

La charge de travail du CCAUV concernant l'examen des CMCs n'a pas été importante jusqu'à présent mais il est prévu de suivre une approche fondée sur l'analyse des risques pour examiner les CMCs dans le futur. Le processus de planification des comparaisons clés doit être discuté avec soin afin d'optimiser les ressources nécessaires pour répondre aux besoins des parties prenantes.

Certaines comparaisons clés matures ont atteint un niveau où leur répétition, généralement conduite après un cycle de 10 ans, permet d'évaluer ces comparaisons mais aussi d'étendre leur plage d'étalonnage. Le document de stratégie a permis de définir le calendrier et les périodes de répétition

sur le long terme. Le CCAUV a mis en œuvre l'approche visant à limiter la participation aux comparaisons clés des comités consultatifs qui ont recours à des étalons voyageurs de façon séquentielle. En général, 10 à 15 laboratoires participants (2 à 3 par organisation régionale de métrologie) participent à des comparaisons clés de comités consultatifs pour une période d'un an.

Un groupe de travail *ad hoc* a examiné la façon d'exprimer les CMCs (concernant par exemple les unités, les domaines d'incertitude) afin d'obtenir une meilleure cohérence et a présenté ses conclusions à la coordinatrice de la KCDB.

Le CCAUV a décidé que les pilotes de comparaison devraient inclure aux documents relatifs à une comparaison clé des paragraphes qui donneraient une indication générale de la portée de la comparaison clé et seraient soumis à l'approbation du Groupe de travail sur les comparaisons clés. Cela permettrait d'interpréter les comparaisons clés et supplémentaires aussi largement qu'il est raisonnablement applicable afin d'indiquer la couverture des CMCs.

En 2016, le CMS/ITRI (Taipei chinois) est devenu observateur du CCAUV et METAS (Suisse) est devenu membre du CCAUV.

Défis et difficultés

Contrairement à de nombreux autres Comités consultatifs, le CCAUV n'entretient pas d'unité de base du SI mais utilise des unités dérivées (composées de plusieurs unités de base) ou l'unité sans dimension, le décibel. Ainsi, il est nécessaire dans les domaines de l'acoustique, des ultrasons, des vibrations et de l'acoustique dans l'eau de fournir des mesures traçables pour une large gamme d'unités.

La redéfinition prévue de quatre unités de base du SI n'aura pas d'impact immédiat sur la métrologie de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations mais permettra de répondre aux exigences à venir en matière d'amélioration de l'exactitude. Un système métrique cohérent concernant les grandeurs mécaniques et électromagnétiques est indispensable pour améliorer les capteurs inertiels qui sont fondés sur des étalonnages des capteurs à microsystèmes électromécaniques.

Les comparaisons menées pour établir la traçabilité sont effectuées en faisant circuler entre les participants des étalons voyageurs, tels que des microphones, des hydrophones ou des accéléromètres. Cette façon de procéder qui est inévitable dans les domaines de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations est souvent chronophage, puisqu'un participant doit attendre que le précédent ait terminé sa comparaison, et que la conservation de la qualité des artéfacts affecte de façon critique les résultats de la comparaison globale. Malheureusement, des problèmes de transport ont régulièrement lieu et ils sont souvent exacerbés par les procédures de douane nationales, ce qui peut compromettre l'état des instruments fragiles et sensibles impliqués dans la comparaison.

Perspectives à court terme et à long terme

Surveillance de l'environnement

Les futures évolutions dans le domaine de la métrologie pour le son dans l'air peuvent être groupées sous quatre catégories principales en matière de technologies émergentes : a) infrastructure métrologique, capteurs et instruments ; b) évaluation et conservation de l'audition ; c) bruit émis par des produits et des machines ; d) évaluation du bruit environnemental. Le dénominateur commun pour ces quatre catégories est l'objectif visant à mieux comprendre et à réduire l'impact du bruit sur l'homme et son environnement.

Chaque domaine de développement a un impact significatif sur la population humaine, les activités industrielles, le design industriel, l'urbanisme, la santé et la sécurité, ainsi que la protection de

l'environnement. Il existe différentes situations où les applications positives du son et les stratégies de réduction du bruit sont étroitement liées. Les bénéfices de la surveillance de l'environnement s'étendent à tous les domaines de la société, des populations urbaines à celles rurales.

Un autre aspect à considérer est la surveillance des événements hautement dynamiques, tels que l'activité sismique, et des explosions contrôlées, telles que l'exploitation minière et la démolition de structures construites par l'homme. De tels événements ont un impact sur l'environnement et, dans certains cas, ces sources de bruit peuvent être d'importance vitale pour la sécurité globale. Dans ce contexte, un sous-ensemble d'activités de surveillance de l'environnement, qui ont des applications permettant de soutenir la surveillance des traités internationaux d'interdiction des essais nucléaires, nécessite d'établir la traçabilité acoustique à de très basses fréquences.

Les techniques d'acoustique dans l'eau sont des méthodes de choix pour la plupart des applications maritimes qui ont recours à l'imagerie et la communication à distance, ainsi que la cartographie en mer. Les techniques fondées sur des ondes électromagnétiques ne sont pas adaptées à ces applications car elles sont limitées en raison du haut niveau d'absorption dans l'eau.

Un autre facteur clé de la surveillance de l'environnement est le problème de l'exposition de la vie marine à la pollution sonore. L'impact du bruit acoustique émanant des activités humaines présente des risques sans précédent pour la durabilité d'espèces marines fondamentales, pour la biodiversité, pour les écosystèmes et pour la santé générale des océans. Du fait de ce problème croissant, des réglementations ont été mises en place.

Des études sur le changement climatique effectuées dans l'océan ont recours à l'acoustique pour sonder les océans, par exemple pour suivre les changements dans l'acidification des eaux et pour détecter des suintements de méthane ou des fuites de CO_2 de sites de capture et de stockage du carbone situés dans les fonds marins.

Médecine et diagnostic

Les applications médicales et diagnostiques concernent tous les âges de la vie, de la naissance (dépistage néonatal) à la vieillesse (conservation de l'audition).

Toute perte d'audition peut entraîner une dégradation importante de la qualité de vie, en provoquant un isolement social, des tensions familiales ou des problèmes professionnels pour les adultes. Chez les enfants, un trouble de l'audition peut affecter la capacité de communication, l'alphabétisation, la réussite scolaire, ainsi que le développement social et psychologique. C'est pourquoi des programmes de santé nationaux investissent massivement dans le diagnostic (en mettant en place des programmes de dépistage) et la rééducation (à l'aide d'appareils auditifs).

Le soutien apporté par la métrologie à l'audiologie objective est un prérequis fondamental à l'utilisation étendue de cette technologie, qui a le potentiel pour devenir la technologie de diagnostic standard dans le futur. Afin d'améliorer les méthodes visant à déterminer des valeurs de référence pour l'oreille pour fixer les seuils auditifs, il est nécessaire d'élaborer de nouvelles méthodes d'étalonnage traçables aux étalons nationaux et d'étudier la relation par rapport aux seuils auditifs comportementaux, qui doivent être définis pour de nouveaux écouteurs.

Thérapie et diagnostics : Après les rayons x, les ultrasons sont la seconde technique d'imagerie la plus couramment utilisée en médecine. On compte dans le monde entier 250 000 instruments de diagnostic à ultrasons et 250 millions d'examens effectués chaque année. Dans les pays développés, la plupart des fœtus seront soumis à deux examens obstétriques, au minimum, au cours d'une grossesse normale. Les applications de diagnostic où la sécurité est une question sensible seront un moteur pour continuer à développer des outils métrologiques et des modèles de prédiction améliorés.

Un certain nombre de ces applications impliquent de générer des sorties acoustiques plus importantes.

De nouvelles applications thérapeutiques des ultrasons continueront à faire leur apparition, permettant de mettre en œuvre les concepts d'administration de médicaments fondés sur les ultrasons de haute intensité ou la cavitation et sur une utilisation plus extensive de techniques d'ultrasons focalisés de haute intensité ou d'ultrasons thérapeutiques de haute intensité. L'exploitation du potentiel clinique de ces méthodes requiert le développement de la métrologie, à la fois pour les grandeurs existantes et pour celles qui émergent. Afin de libérer le potentiel des ultrasons thérapeutiques et mieux évaluer la sécurité des applications de diagnostic, la métrologie joue un rôle essentiel dans le développement et la validation des méthodes servant à déterminer la dose d'ultrasons requise.

Les facteurs clés de l'évaluation de la sécurité des applications médicales des ultrasons reposent sur des méthodes d'estimation *in vivo* des niveaux ultrasonores et de ses implications en termes de bioeffets. Les mesures dans ce domaine vont certainement avoir de plus en plus d'applications, notamment en ce qui concerne l'évaluation des solutions de protéines ou celle des nanoparticules.

Ingénierie et production

Les capteurs, ainsi que les instruments utilisés pour en extraire des résultats probants, étayent toutes les mesures acoustiques, depuis la réalisation et la dissémination de l'étalon primaire jusqu'à l'évaluation de l'audition, les mesures du bruit ou la description de la qualité sonore. Dans de nombreux cas, l'innovation en matière de capteurs et instruments peut constituer un moteur du développement de l'instrumentation acoustique. Ainsi, le potentiel d'exploitation des synergies en partenariat avec le secteur des produits de consommation, où la demande en microphones dépasse désormais deux milliards d'unités chaque année, est immense. Du fait de la prolifération des capteurs peu onéreux, il est désormais possible de gérer activement les performances acoustiques de produits sophistiqués et d'opérations sans fil, intelligentes et autonomes. Par exemple, le contrôle de l'état de machines, de véhicules, d'infrastructures ferroviaires et même d'appareils domestiques pourrait être mis en place afin de maintenir les performances acoustiques inhérentes aux produits, en optimisant leur efficacité opérationnelle ou simplement en surveillant le niveau de bruit produit. Ces applications requièrent de nouvelles techniques métrologiques telles que l'auto-étalonnage à distance de capteurs et de réseaux de capteurs, la reconnaissance acoustique de signature et la prise de décision fondée sur des paramètres multiples.

Les applications industrielles des ultrasons sont extensives car les ultrasons sont couramment utilisés comme un moyen d'apporter des changements macroscopiques dans les matériaux, que ce soit en plein cœur des matériaux ou à leur surface. Le nettoyage par ultrasons est l'application la plus répandue dans l'industrie, notamment pour les instruments chirurgicaux et dentaires. Il est nécessaire de développer des méthodes de mesure à large bande permettant de corriger les non-uniformités spatiales des distributions de champ acoustique et de contribuer à mieux en comprendre les facteurs d'influence. Cela permettra de mettre en place d'autres applications des ultrasons de haute puissance de façon économiquement viable pour une large gamme de secteurs techniques de l'industrie tels que l'alimentation (contrôle de la cristallisation, pasteurisation), de la pharmacie (contrôle de la taille des particules) et de la production de biocarburants.

L'activité métrologique émergente concernant la mesure dynamique des grandeurs mécaniques, telles que la force et le couple, a révélé un domaine totalement nouveau où l'accélération linéaire et l'accélération angulaire deviennent des grandeurs fondamentales pour la traçabilité des grandeurs dérivées. L'un des secteurs les plus connus est celui des crash-tests automobiles pour lequel les mesures dynamiques sont fondamentales. Malgré l'existence d'étalons internationaux largement acceptés, les résultats ne sont pas, dans de nombreux cas, strictement comparables en raison de

l'absence d'étalonnages adéquats et d'un manque de connaissances approfondies de la métrologie dynamique. L'infrastructure métrologique actuellement en place pour les grandeurs mécaniques dynamiques, à savoir les vibrations et les chocs, accuse un retard important par rapport à l'infrastructure établie pour les mesures de l'accélération.

Applications émergentes concernant les capteurs à microsystèmes électromécaniques

La traçabilité des mesures de l'accélération au cours d'un choc est requise par la recherche, l'industrie, la médecine et l'armée. Le défi est de couvrir une large gamme d'applications avec un nombre réduit de techniques d'étalonnage et de méthodes efficaces. Les accéléromètres à microsystèmes électromécaniques ont d'abord été utilisés dans les applications automobiles de détection de collision et de contrôle des airbags. Dans ce domaine, les accéléromètres mesurent en continu l'accélération de l'automobile. La courbe d'accélération est intégrée afin de déterminer si un changement important de vitesse a eu lieu et, s'il excède un seuil prédéterminé, l'airbag est déclenché. La décision de déclencher les airbags doit être prise en une milliseconde et cette opération doit être extrêmement fiable car toute erreur peut conduire à un décès ou la perte d'un membre. Parmi les applications automobiles des accéléromètres figurent également le contrôle dynamique du véhicule, la détection de retournement, des systèmes antivol, des systèmes de frein de stationnement électronique et des systèmes de navigation du véhicule. Puisque la vie humaine est en jeu si ces systèmes ne fonctionnement pas bien, les accéléromètres sont testés, étalonnés et subissent des tests exhaustifs de fiabilité.

Le développement de véhicules autonomes progresse rapidement. En 2018, aucun véhicule totalement autonome n'était autorisé sur les voies publiques. Les spécifications des accéléromètres relatives au guidage inertiel de véhicules autonomes seront les plus strictes possibles par rapport aux autres applications mentionnées précédemment : en effet, en cas de perte du signal GPS, la position du véhicule doit être déterminée par le système de guidage inertiel sur une période de temps pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de minutes. La conception actuelle des accéléromètres et gyroscopes capacitifs à microsystèmes électromécaniques pourrait ne jamais satisfaire aux exigences requises pour une conduite totalement autonome et pourrait nécessiter de remplacer les systèmes capacitifs par des systèmes optiques.

Société et sécurité au travail

Le bruit produit par diverses sources telles que les transports (routiers, ferroviaires, aériens), les usines industrielles et les fermes éoliennes, le voisinage, les événements sportifs et de divertissement, nuit à l'environnement et à la qualité de vie.

Les exigences en matière de traçabilité et de reconnaissance mutuelle des résultats de mesures sont nécessaires à la sécurité des travailleurs. La réponse humaine aux vibrations mécaniques, domaine dans lequel le concept de dose est appliqué, constitue un problème et l'audition est couramment mise en danger du fait d'une exposition excessive au bruit produit par l'homme. Les actions visant à réduire ces risques requièrent d'importantes dépenses chaque année. L'évaluation à grande échelle de l'exposition au bruit des travailleurs ou des individus nécessitera de développer de nouvelles approches et des instruments innovants.

Les transducteurs de vibrations à basse fréquence sont très utilisés pour surveiller les tremblements de terre. La demande de systèmes de surveillance des tremblements de terre s'est accrue suite à un certain nombre d'incidents majeurs. Des capteurs spéciaux assurent la traçabilité de milliers de sismomètres et de centaines de stations d'observation du Réseau sismographique mondial (Global Seismographic Network, GSN) qui alerte immédiatement la population, ce qui requiert des étalonnages à des fréquences très basses.

Données sur le CCAUV

CCAUV établi en 1998	
Président : T. Usuda	Secrétaire exécutive : G. Panfilo
Composition :	18 membres, 2 organismes de liaison et 12 observateurs
Réunions depuis la 25e réunion de la CGPM :	25-27 novembre 2015, 20-22 septembre 2017
Trois groupes de travail :	− Comparaisons clés − Coordination des organisations régionales de métrologie − Stratégie

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s)
Comparaisons clés du CCAUV (et comparaisons supplémentaires)	15	3	13
Comparaisons clés des organisations régionales de métrologie (et comparaisons supplémentaires)	26	2	-
Comparaisons du BIPM	0	0	0
Études pilotes du CCAUV	4	0	5
CMCs	1 174 CMCs dans 51 catégories de service publiées dans la KCDB		

Le président de la CGPM remercie M. Usuda et demande s'il y a des questions.

M. Flux (Royaume-Uni) demande, au sujet du bruit, si l'on dispose de plus d'informations non seulement sur le volume mais également sur la fréquence du bruit car la quantité de bruit augmente, tout comme le niveau de stress auquel l'homme est soumis. La question de savoir s'il y a un lien entre les deux revient souvent. Il demande si le CCAUV travaille sur l'effet des niveaux de bruit et de leurs fréquences. M. Usuda répond que la perception du bruit est une grandeur physiologique. Les hommes perçoivent le bruit qui est transmis dans l'air mais l'oreille humaine n'est pas un capteur linéaire. La caractéristique n'est pas linéaire mais dépend des circonstances. Les métrologistes doivent étudier la linéarité du capteur lui-même puis, dans un second temps, la perception, c'est-à-dire comment le son est perçu par le corps humain.

41. Développer une vision commune de la métrologie scientifique et légale : la perspective de l'OIML

M. Roman Schwartz, président du Comité international de métrologie légale (CIML), félicite le BIPM et le CIPM pour leurs réalisations ces dernières années et, en particulier, pour le succès de la préparation de la décision historique qui sera prise le 16 novembre 2018 afin de rendre le SI encore meilleur et d'assurer sa pérennité. L'Organisation internationale de métrologie légale (OIML) salue cette avancée historique à laquelle elle a participé dès le début en tant que partie prenante représentant la métrologie pratique et légale.

M. Schwartz présente brièvement l'histoire de l'OIML, ainsi que son travail. L'OIML est une organisation intergouvernementale qui a été créée en 1955 par 23 États. Selon les termes de l'accord de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) relatif aux obstacles techniques au commerce

(OTC), l'OIML est un « organisme international à activité normative » ; par conséquent, les publications de l'OIML doivent être appliquées, s'il y a lieu, par tous les signataires de l'accord sur les obstacles techniques au commerce lors de l'élaboration de règlements techniques. L'OIML compte actuellement 62 États Membres et 65 Membres Correspondants. M. Schwartz décrit la structure de l'OIML et note que l'actuel directeur du Bureau international de métrologie légale (BIML), M. Stephen Patoray, partira à la retraite le 1er janvier 2019 et sera remplacé par M. Anthony Donnellan. La mission de l'OIML est de permettre aux économies de mettre en place des infrastructures de métrologie légale mutuellement compatibles et internationalement reconnues, dans tous les domaines dont les gouvernements sont responsables, tels ceux qui facilitent le commerce, établissent une confiance mutuelle et harmonisent les niveaux de protection du consommateur à l'échelon mondial.

L'OIML revêt une importance particulière pour les organismes de réglementation car elle développe des modèles de réglementation, normes techniques et documents internationaux pertinents destinés à être utilisés par les autorités de métrologie légale et les fabricants et étayant l'accord OTC de l'OMC. M. Schwartz cite pour illustrer ses propos le document D 1:2012 *Éléments pour une Loi de Métrologie*, le Document D 2:2007 *Unités de mesure légales* et le Document D 9:2004 *Principes de la surveillance métrologique*. Le Document D 2:2007 va être modifié suite à la décision de réviser le SI qui va être prise au cours de la 26e réunion de la CGPM. L'OIML a mis en place un comité commun, qui inclut le BIPM, afin de superviser les changements apportés au document.

M. Schwartz évoque les priorités actuelles de l'OIML, qui comprennent ses activités techniques courantes et la volonté d'augmenter la rapidité et l'efficacité de son travail technique. L'OIML souhaite faire mieux connaître son nouveau Système de Certification (OIML-CS) auprès de ses parties prenantes et répondre aux besoins des pays et économies dotés de systèmes de métrologie émergents (CEEMS). L'une des grandes priorités est d'encourager une coopération plus étroite avec d'autres organisations internationales, notamment le BIPM, afin de promouvoir la métrologie en tant que composante essentielle d'une infrastructure de la qualité saine dans une économie moderne. M. Schwartz ajoute que l'OIML est confrontée aux défis de la numérisation de l'économie et de la société du fait de la mondialisation et doit en examiner les impacts sur la métrologie légale, et la métrologie en général, afin que la mission de l'OIML conserve son importance dans le futur. M. Schwartz présente les activités techniques de l'OIML et leur pertinence pour les fabricants. L'OIML formule des recommandations et élabore des documents qui harmonisent au niveau international les exigences métrologiques et techniques concernant les instruments de mesure. L'OIML encourage l'innovation et soutient le commerce local d'instruments de mesure, harmonise les procédures d'essai et facilite l'harmonisation des essais et certifications. En outre, l'OIML permet la reconnaissance mutuelle des données d'essai qui est à la base des systèmes de certification.

Le nouveau Système de Certification de l'OIML (OIML-CS) a été développé dans l'objectif de soutenir le commerce mondial des instruments de mesure, la vision de l'OIML étant « mesuré une fois, accepté partout ». L'OIML-CS a été lancé le 1er janvier 2018 : c'est un système de certification unique fondé sur les normes ISO/IEC 17025 et ISO/IEC 17065, ainsi que sur les Recommandations de l'OIML. Il remplace l'Arrangement d'acceptation mutuelle de l'OIML et couvre actuellement 19 catégories d'instruments de mesure ; 18 catégories supplémentaires devraient être ajoutées entre 2019 et 2020.

M. Schwartz évoque ensuite le développement d'une vision commune de la métrologie scientifique et légale. Le BIPM et l'OIML sont deux organisations distinctes dans le domaine de la métrologie, partageant des missions complémentaires, augmentant leur collaboration et représentant ensemble l'ensemble de la métrologie légale, industrielle et scientifique. Il cite un extrait du projet de programme de travail pour les années 2020 à 2023 : « La coopération entre le personnel du BIPM et le Bureau international de métrologie légale (BIML) a été de plus en plus étroite ces dernières années et cette

tendance se poursuit. Les deux organisations, dont les missions sont complémentaires, présentent désormais une description intégrée de l'infrastructure mondiale de la métrologie et de ses avantages. » Il ajoute qu'un message clé de cette collaboration est qu'« ensemble nous sommes forts ».

M. Schwartz décrit l'infrastructure mondiale de la qualité et le rôle joué par le BIPM et l'OIML, en soulignant que les organisations en charge de la métrologie, de la normalisation et de l'accréditation peuvent être considérées comme les fondations d'une infrastructure nationale de la qualité ou de l'économie d'un pays. Ces fonctions sont souvent la partie invisible de l'iceberg ; il est ainsi vital, en particulier dans le cas de la métrologie, d'avoir des activités de promotion et sensibilisation. Parmi ces fonctions figurent les activités du BIPM, qui assure la traçabilité au SI et la reconnaissance mutuelle des certificats d'étalonnage ; celles de l'OIML, qui fournit des normes harmonisées et réglementations légales et qui assure la reconnaissance mutuelle dans le domaine des essais de type et de la certification ; celles de l'IEC et de l'ISO, qui fournissent des normes harmonisées dans tous les domaines pertinents ; et celles de l'ILAC et de l'IAF, qui fournissent des procédures harmonisées concernant la compétence des laboratoires d'essais et des organismes de certification.

M. Schwartz cite les dénominateurs communs entre le travail du BIPM et celui de l'OIML :

- assurer la confiance dans les résultats de mesure,
- garantir la traçabilité des mesures,
- promouvoir le libre-échange, en éliminant les obstacles techniques au commerce (OTC de l'OMC),
- réduire les coûts et la charge de travail qui incombent aux parties prenantes du marché,
- promouvoir des mesures de sensibilisation concernant l'importance de la métrologie et apporter des informations aux décisionnaires,
- collaborer avec la communauté mondiale du renforcement des capacités en matière d'infrastructure de la qualité.

En examinant ces dénominateurs communs, il n'est pas surprenant selon M. Schwartz que le BIPM et l'OIML aient développé depuis plusieurs années une excellente collaboration. Les deux organisations ont ainsi établi de bonnes relations, sans signer de protocole d'accord bilatéral. Un protocole d'accord trilatéral, signé en 2008, existe entre le BIPM, l'OIML et l'ONUDI. Des réunions bilatérales et multipartites se tiennent chaque année au plus haut niveau hiérarchique et, en 2018, la révision de la *Déclaration commune du BIPM, de l'OIML, de l'ILAC et de l'ISO sur la traçabilité métrologique* a été discutée. En outre, des réunions périodiques avec les directeurs du BIML et du BIPM et leur personnel cadre sont organisées pour traiter de sujets techniques et organisationnels d'intérêt commun. Le BIPM et l'OIML collaborent également dans le cadre de l'initiative commune de la Journée mondiale de la métrologie, dont le site internet est hébergé par l'OIML.

Par ailleurs, le BIPM et l'OIML collaborent au réseau DCMAS, qui est en train d'être renommé INetQI. Le BIPM participe au Groupe consultatif sur les questions concernant les CEEMS de l'OIML et contribue à la révision du Document OIML D1 *Éléments pour une Loi de Métrologie*. L'OIML participe au Groupe de travail 1 du JCGM sur le GUM, au Groupe de travail 2 du JCGM sur le VIM et au CCU. En outre, les membres du BIML ont donné des présentations lors de formations du BIPM de renforcement des capacités et de transfert des connaissances.

Du point de vue de l'OIML, il existe un certain nombre de façons de renforcer la coopération entre les deux organisations et de partager une vision commune. Le BIPM et l'OIML devraient se focaliser sur leurs dénominateurs communs et leurs « points forts ». M. Schwartz observe qu'il y a toujours une possibilité de s'améliorer et que les deux organisations pourraient étudier les domaines de travail technique communs présentant un intérêt mutuel. Il existe des possibilités d'envisager une approche « holistique » afin de promouvoir de façon conjointe et cohérente la métrologie (scientifique,

industrielle et légale) comme un élément clé de l'infrastructure de la qualité saine nécessaire à une économie moderne. Le BIPM et l'OIML pourraient développer des activités communes concernant les CEEMS et le renforcement des capacités et le transfert des connaissances et avoir recours à la nouvelle boîte à outils « QI reform toolkit » publiée par la Banque mondiale (voir point 14 de l'ordre du jour). Enfin, il est possible de mettre en place conjointement une plateforme d'e-learning et de développer davantage le portail web commun au BIPM et à l'OIML.

M. Schwartz conclut sa présentation en suggérant de créer un groupe commun afin d'étudier les possibilités de renforcer la coopération entre les deux organisations. Il indique que les nombreux points communs et dénominateurs communs, ainsi que les futurs défis que devront relever les deux organisations prouvent qu'il est possible d'établir des liens plus étroits entre la métrologie légale et la métrologie scientifique.

Le président de la CGPM remercie M. Schwartz et ouvre la discussion.

M. Inglis (président du CIPM) remercie M. Schwartz pour sa présentation et déclare au nom du CIPM que le CIPM est favorable à la création d'un groupe de travail commun qui mettrait l'accent sur la métrologie. M. Milton (directeur du BIPM) rappelle les propos de M. Schwartz « ensemble nous sommes forts » et fait référence à la partie de sa présentation résumant les activités communes qui existent déjà entre le BIPM et l'OIML, ce qui souligne la diversité de la coopération. M. Milton remercie M. Patoray pour leur collaboration étroite et positive au cours des six dernières années et note que nombre des activités communes décrites dans la présentation ont commencé ou ont rapidement pris de l'ampleur au cours de ces six années. Il présente ses meilleurs vœux à M. Patoray à l'occasion de son départ à la retraite et indique que lui-même et le personnel du BIPM se réjouissent de travailler avec M. Donnellan, prochain directeur du BIML.

M. Milton rappelle par ailleurs que M. Schwartz a souligné les dénominateurs communs et les points forts des deux organisations. Il est extrêmement encourageant que ces points forts soient différents, ce qui peut être la base d'une plus grande synergie : l'OIML mène à bien des activités qui ne font pas partie de la mission du BIPM et le BIPM mène à bien des activités qui n'entrent pas dans le mandat de l'OIML. Cela confirme que la collaboration peut être renforcée et que les deux organisations peuvent, ensemble, devenir plus fortes.

M. Laiz (Argentine) estime qu'un point fort de la collaboration dans le futur devrait être lié à la numérisation de la métrologie qui est un domaine qui a une influence sur la métrologie légale et scientifique. M. Schwartz en convient et observe qu'il faut étudier les conséquences d'une transformation numérique et évaluer ce que cela signifie pour la métrologie légale et scientifique. Cela pourrait notamment consister à examiner comment intégrer des aptitudes d'étalonnage et d'essais électroniques dans un instrument de mesure dès sa conception.

M. Copan (États-Unis d'Amérique) remercie M. Schwartz pour sa présentation et fait référence à l'un des domaines mis en exergue, à savoir l'importance de promouvoir la métrologie en général afin que tous les États Membres, lors de discussions, aient la même compréhension de ce qu'est la métrologie et soutiennent la métrologie. Il est clair que dans de nombreux domaines, la métrologie est principalement tenue pour acquise. M. Copan demande à M. Schwartz s'il a des recommandations pour le groupe de travail commun afin de mieux faire connaître la métrologie. M. Schwartz répond que cela dépendra fortement de chaque pays. La communauté devra trouver des moyens pour mieux faire connaître la métrologie en étant créative et en saisissant les opportunités offertes par le biais d'ateliers et conférences, et en demandant à être invitée à certaines réunions. Les métrologistes devront apprendre à sortir de leurs laboratoires et à promouvoir la science de la mesure.

M. Patoray (directeur du BIML) observe que lorsque l'on se réfère à la métrologie légale ou à la métrologie scientifique, il s'agit en définitive de métrologie. Ainsi, la communauté de la métrologie fait partie d'un plus grand ensemble qui est celui de l'infrastructure de la qualité. Il n'est pas possible de simplement combiner la métrologie, il est nécessaire de combiner également ces autres aspects et de penser à l'infrastructure mondiale de la qualité comme un tout.

M. Henson (BIPM) réagit aux commentaires de M. Copan. Il convient qu'une partie du travail de la communauté de la métrologie n'est pas complètement visible et donne deux exemples. L'OIML et le BIPM ont le statut d'observateur au Comité OTC de l'OMC, ce qui leur permet de s'adresser à un public qui n'est pas le public conventionnel de la métrologie mais qui est néanmoins un public très influent. Si une seule des deux organisations était représentée lors d'une réunion du Comité OTC, elle devrait représenter l'autre. Maintenant que le BIPM et l'OIML sont tous deux représentés, le système fonctionne bien. Un autre exemple, comme mentionné dans la déclaration faite par la représentante de l'OCDE (voir les commentaires du point 15 de l'ordre du jour), est la plateforme internationale en matière de coopération réglementaire, qui consiste en un groupe de plus de 50 organismes internationaux de réglementation. Cette initiative permet au BIPM et à l'OIML d'apporter un soutien technique et d'accroître la visibilité de la communauté des laboratoires nationaux de métrologie et de son infrastructure. Le rôle du BIPM est largement de promouvoir l'utilisation du SI et l'infrastructure des laboratoires nationaux de métrologie et des organisations régionales de métrologie dans le monde. Un travail considérable est accompli en la matière mais il n'est pas toujours aussi visible qu'il devrait l'être. Pour conclure, M. Henson se montre confiant par rapport au fait de trouver d'autres occasions d'accroître la visibilité de la métrologie de façon plus stratégique dans le futur.

M. Warrington (Australie) observe que les laboratoires qui bénéficient de cette collaboration peuvent en apprendre plus de la communauté internationale et du partenariat entre métrologie légale et scientifique. M. Schwartz répond qu'en matière de coopération internationale, des discussions sont en cours en Europe entre l'European Association of National Metrology Institutes (EURAMET) et la Coopération européenne en métrologie légale (WELMEC) afin d'accroître leur synergie. Il ajoute que bien que l'OIML et le BIPM soient des organisations distinctes et complémentaires, il est toujours utile de mieux comprendre le travail de l'autre et de continuer à coopérer de façon étroite, mutuellement et avec la communauté internationale. Il encourage ainsi une meilleure compréhension de l'autre partie de la métrologie (qu'elle soit scientifique ou légale). Cela aura des répercussions bénéfiques sur l'ensemble de la communauté de la métrologie et renforcera le rapprochement de la métrologie légale et de la métrologie scientifique. M. Warrington souligne que les deux champs sont complémentaires mais, en réalité, il n'existe qu'une seule communauté de la métrologie et chaque partie se doit de comprendre l'autre. Meilleure est cette compréhension, meilleure sera la promotion de la métrologie comme partie intégrante de l'infrastructure de la qualité, en particulier à l'ère du tout numérique. M. Schwartz répond qu'il est important que la transformation numérique de la métrologie, concernant à la fois les étalonnages et les essais, soit gérée de manière complémentaire et cohérente. Il est nécessaire qu'un concept soit développé par le BIPM et l'OIML, ainsi qu'au niveau régional. M. Schwartz observe que pour que la métrologie conserve sa pertinence, la communauté de la métrologie doit développer cette compréhension et cette coopération.

M. Dudle (Suisse), en tant que président de WELMEC, obverse qu'en Europe, EURAMET est responsable de la métrologie technique et WELMEC de la métrologie légale. Il y a près de 18 mois, les deux organismes ont décidé de mettre en place un groupe de travail commun, similaire à celui proposé pour l'OIML et le BIPM, afin d'étudier les domaines où pourrait être établie une plus grande collaboration. L'objectif de WELMEC et de l'EURAMET est d'accroître la visibilité de leur travail. M. Dudle indique qu'il n'existe qu'une seule communauté de la métrologie dont la mission vis-à-vis

de ses parties prenantes est d'augmenter sa visibilité et de renforcer son image. M. Dudle salue la proposition présentée par l'OIML et le BIPM.

Mme Lagauterie (France) remercie M. Swchartz pour sa présentation. Elle précise qu'elle est également membre du CIML pour la France et qu'elle partage les commentaires du président de WELMEC, où elle représente aussi la France. La présentation de l'OIML a souligné les dénominateurs communs, tel que le travail sur la traçabilité ; Mme Lagauterie souhaite cependant évoquer les particularités de la métrologie légale. Elle cite les parties prenantes de la métrologie légale qui peuvent être communes, tels que les fabricants qui sont les clients des laboratoires nationaux et laboratoires de certification. La métrologie légale a une garantie à apporter pour protéger les consommateurs et les différentes parties qui sont intéressées par les mesures qui sont réalisées pour des raisons légales avec certains instruments de mesure. Contrairement à la métrologie scientifique et industrielle, où il est de l'intérêt des opérateurs que les instruments soient utilisés correctement et en toute fiabilité, la métrologie légale est confrontée aux questions de fraudes, de conditions d'utilisation, de manipulations contraires, etc., et par conséquent elle étaye les suites juridiques à y donner, comme l'imposition d'amendes et la suppression d'agréments.

42. Les défis métrologiques des technologies d'éclairage durables et efficaces

M. Yoshihiro Ohno, président de la Commission internationale de l'éclairage (CIE), commence par présenter brièvement la CIE qui est un organisme scientifique international de normalisation dans le domaine de la lumière et de l'éclairage fondé en 1913. La CIE est reconnue par l'ISO, l'International Electrotechnical Commission (IEC) et le CIPM et compte 37 Comités nationaux et trois Comités nationaux associés qui couvrent tous les continents. Par ailleurs, la CIE gère 120 comités techniques. Un protocole d'accord a été signé entre la CIE et le CIPM le 2 avril 2007 afin de clarifier les responsabilités de chacun, le CIPM étant responsable des unités et la CIE de la définition des spectres d'action. La CIE et le BIPM se consultent sur les questions liées aux grandeurs, aux unités et à la métrologie en matière de rayonnement optique. En outre, la CIE a le statut d'observateur au sein du CCU.

M. Ohno évoque l'éclairage à semi-conducteurs et les défis métrologiques associés. Il rappelle l'histoire des diodes électroluminescentes (LED). Les LED rouges et jaunes ont été inventées dans les années 60 mais c'est l'invention des LED bleues par MM. Nakamura, Amano et Akasaki au Japon en 1994, pour laquelle ils ont remporté le prix Nobel de physique en 2014, qui a permis de produire des LED blanches pour l'éclairage. M. Ohno observe que l'efficacité des LED devrait s'améliorer davantage pour atteindre 300 lumens par watt, ce qui est trois fois supérieur aux lampes fluorescentes qui constituent pour le moment les sources d'éclairage les plus efficaces. Il ajoute que, par rapport aux sources d'éclairage traditionnelles, les LED présentent d'autres avantages tels que leur longue durée de vie, leur éclairage maximal instantané et leur facilité d'utilisation.

On s'attend à ce que de nombreuses sources d'éclairage actuelles soient remplacées par des LED et cette transition vers un éclairage à semi-conducteurs ne consommant que peu d'énergie est appelée la troisième révolution de l'éclairage. Cette tendance aura un impact positif considérable sur la consommation mondiale d'énergie et sur les émissions de gaz à effet de serre. Selon des statistiques américaines, l'éclairage représente actuellement environ 20 % de la consommation électrique et près de 8 % de la consommation totale d'énergie. Le développement des LED blanches se poursuit et des produits d'une efficacité de 200 lumens par watt sont désormais disponibles. Des améliorations concernant l'efficacité des LED sont prévues, ce qui permettra d'augmenter les économies d'énergie.

Les répercussions attendues concernant les économies d'énergie incitent les gouvernements du monde entier à adopter des programmes et réglementations visant à promouvoir l'éclairage LED de haute qualité et à faible consommation d'énergie. M. Ohno présente les différentes réglementations concernant l'éclairage à faible consommation d'énergie qui existent en Chine, en Europe, au Japon et aux États-Unis d'Amérique. Chaque région a ses propres exigences concernant la performance minimale en lumens per watt, la durée de vie ou la qualité de la couleur. Il note qu'il est nécessaire d'harmoniser au niveau international les méthodes d'essai et l'accréditation ; bien que le commerce international de produits d'éclairage à faible consommation d'énergie soit considérable, les régions utilisent différentes méthodes d'essais et différents rapports d'essais qui ne sont pas compatibles et qui ne sont pas acceptés entre les diverses régions. La solution idéale serait de disposer d'une méthode d'essai internationale concernant l'éclairage à semi-conducteurs, qui serait utilisée dans toutes les régions et tous les pays. L'accréditation pourrait alors être mutuellement reconnue et les essais d'aptitudes partagés. Cela réduirait considérablement les coûts associés au commerce international pour l'industrie de l'éclairage à semi-conducteurs.

La CIE a publié en 2015 la norme internationale CIE S 025:2015 *Test method for LED lamps, LED luminaires and LED modules* (Méthodes d'essais pour les lampes, luminaires et modules LED) : elle constitue une avancée pour atteindre cet objectif. Cette norme a été développée sur une période de quatre ans et vise à être utilisée dans les réglementations sur l'éclairage à semi-conducteurs et dans le cadre de l'accréditation de laboratoires d'essais. Le travail d'élaboration de la norme a été effectué conjointement avec le Comité technique 169/Groupe de travail 7 du Comité européen de normalisation (CEN), qui a produit la norme européenne harmonisée EN 13032-4 Lumière et éclairage – Mesures et présentation des données photométriques des lampes et luminaires - Partie 4 : Lampes, modules et luminaires LED. La CIE a fait la promotion de la norme par le biais d'activités de renforcement des capacités pour l'industrie et en proposant des tutoriels et des ateliers pratiques afin de tester les produits LED par rapport à la norme CIE S 025:2015. M. Ohno observe qu'un effort d'éducation supplémentaire concernant les incertitudes de mesure est nécessaire, en particulier pour l'industrie. Parmi d'autres publications récentes figurent la norme CIE 226:2017 *Optical Measurement of High-Power LEDs* (Mesure optique des LED à haute puissance) et la norme CIE 227:2017 *High Speed Testing Methods for LEDs* (Procédures de mesure à grande vitesse des LED).

M. Ohno indique que les défis métrologiques concernant les LED, les lampes LED et les luminaires LED sont nombreux. Les produits LED présentent des caractéristiques très différentes par rapport aux sources d'éclairage traditionnelles et requièrent des méthodes d'essais et des directives de mesure spécifiques, notamment en ce qui concerne la variation de l'incertitude. Une comparaison internationale interlaboratoire de mesures de lampes LED, impliquant 110 laboratoires, a été réalisée par l'Agence internationale de l'énergie (IEA 4E SSL Annex IC 2013). Cette étude a été entreprise afin de déterminer le niveau d'accord ou de variation des mesures de produits d'éclairage à semi-conducteurs. Dans le cas du flux lumineux et de la chromaticité, on a observé de grandes variations, des résultats aberrants ainsi qu'une variation des incertitudes, ce qui souligne l'existence d'un problème.

L'un des défis concernant l'éclairage à semi-conducteurs est la question de la qualité de la couleur. La norme « CIE Color Rendering Index » (Indice de rendu des couleurs) qui était en place ne répondait pas aux besoins du domaine de l'éclairage à semi-conducteurs de sorte qu'une nouvelle norme, CIE 2017 Colour Fidelity Index (CIE 224:2017) (Indice de fidélité des couleurs), a été publiée en 2017. Les effets non visuels de la lumière sont également à l'étude. La vision peut être divisée entre les effets visuels, comme la reconnaissance d'image et les couleurs, et les effets non visuels comme la régulation (circadienne) de l'état de veille et de sommeil, la vigilance et le confort, et la fatigue des yeux. L'œil humain compte cinq photorécepteurs, parmi lesquels les cellules ganglionnaires intrinsèquement photosensibles (ipRGC), découvertes le plus récemment et ne

participant pas directement à la vision. Ces photorécepteurs peuvent entraîner une réduction de mélatonine lorsqu'ils sont excités par de la lumière dans la région bleue du spectre. Du fait de la meilleure connaissance des effets non visuels de la lumière, des travaux de recherche sont conduits sur « l'éclairage sain », notamment sur la meilleure lumière contribuant à la qualité du sommeil, sur l'éclairage optimal des bureaux pour soutenir la productivité et sur la quantité de lumière requise pour une vie saine. En outre, la CIE a travaillé au Projet de norme internationale DIS 026: 2018 *CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light* (Système de la CIE dans le domaine de la métrologie des rayonnements optiques concernant les réponses à la lumière influencées par les IpRGC). Cette norme définit les spectres d'action pour les ipRGC et les quatre autres photorécepteurs (cônes L, cônes M, cônes S et bâtonnets) et définit les grandeurs mesurées en unités SI à l'aide de ces spectres d'action.

M. Ohno observe que les futurs travaux de la CIE en photométrie seront de développer « l'illuminant normé de la CIE pour les LED ». Les instruments photométriques sont actuellement étalonnés à l'aide de l'illuminant A de la CIE, qui est étalonné par rapport à une lampe étalon à incandescence. Lorsque l'illuminant A est utilisé pour mesurer des produits LED, des erreurs de non-correspondance spectrale surviennent. La proposition est de développer un « illuminant L de la CIE », à l'aide d'une source étalon LED (Source L), par rapport auquel seraient étalonnés les instruments photométriques servant à mesurer les produits LED. Il est espéré que cela réduirait les incertitudes d'un facteur quatre à cinq.

M. Ohno indique que la monographie BIPM de 1983 « Principes régissant la photométrie » est en cours de révision et que le document *Basis of Physical Photometry* (CIE 18.2-1983) (Les bases de la photométrie physique), développé par le Comité technique commun à la CIE et au CCPR (JTC-2), est en cours d'approbation. Le document du BIPM fait un lien entre la définition du SI de la candela et la fonction d'efficacité lumineuse spectrale $V(\lambda)$. La définition du SI ne faisant pas référence aux spectres d'action et aux fonctions d'efficacité lumineuse spectrale, c'est un document fondamental pour la photométrie. Toutefois, il définit notamment la fonction $V(\lambda)$ concernant les conditions photopiques (lumineuses) et la fonction $V'(\lambda)$ pour les conditions scotopiques (d'adaptation à l'obscurité). La réponse de l'œil humain varie graduellement entre ces conditions mais rien n'a été défini. Cela a incité la CIE et le CCPR à réviser le document « Principes régissant la photométrie » afin qu'il couvre les conditions mésopiques (crépusculaires), ce qui est particulièrement important pour l'éclairage des rues. L'éclairage urbain à base de LED qui utilisera la fonction mésopique aura une bien meilleure efficacité par rapport à d'autres types d'éclairage urbain tels que les lampes sodium haute pression.

M. Ohno conclut sa présentation en précisant que la révolution de l'éclairage est en cours et qu'elle permettra de réaliser de conséquentes économies d'énergie au niveau mondial. La CIE soutient la métrologie et la science de l'éclairage à semi-conducteurs. De nombreux travaux de recherche et de normalisation sont réalisés et d'autres normes sont nécessaires dans le domaine en constante évolution de l'éclairage à semi-conducteurs. M. Ohno souligne que la coopération de la CIE avec d'autres organisations est très importante et il encourage d'autres pays et organisations à participer à ce travail.

Le président de la CGPM remercie Ohno et précise qu'il n'acceptera qu'une seule question, faute de temps.

M. Phillips rappelle qu'il est possible d'acheter des LED qui, selon leurs caractéristiques, ont différentes températures de couleur et qui semblent en effet produire une lumière plus chaude ou plus froide. Il demande comment l'efficacité lumineuse des LED change en fonction de la température de couleur et s'il y a une relation simple entre les deux. M. Ohno répond que les LED aux températures de couleur les plus élevées sont plus efficaces que celle avec une température de couleur plus chaude car l'utilisation de phosphore rouge dans ces dernières réduit leur efficacité. Il ajoute que cela pourrait changer dans le futur avec l'émergence de nouvelles technologies.

43. Rapport de la présidente du CCPR

Mme Maria Luisa Rastello, présidente du Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR), présente son rapport sur les activités du CCPR depuis la 25e réunion de la CGPM (2014).

Résumé du rapport du CCPR

Établi sous le nom de Comité consultatif de photométrie en 1933 puis étendu au domaine de la radiométrie en 1971, le CCPR est désormais responsable de la métrologie dans le domaine de la lumière, depuis les mesures connues jusqu'aux domaines de recherche très avancés. Les activités des 23 membres du CCPR reflètent cette dualité. Un groupe de travail du CCPR a pour mission de surveiller le bon déroulement des dix comparaisons clés qui ont été identifiées il y a presque vingt ans et un certain nombre de forums de discussion permettent de suivre les défis et besoins dans tous les secteurs qui tirent parti des connaissances les plus pointues dans le domaine de la lumière, tels que la cryptographie quantique pour les applications de sécurité ou les radiomètres de haute exactitude à bord des satellites pour les systèmes d'observation de la Terre.

Depuis la 25e réunion de la CGPM (2014), les membres du CCPR ont contribué à la révision du SI qui sera proposée à la CGPM à sa 26e réunion (2018). Outre la reformulation de la définition de la candela, les membres du CCPR ont pris part aux efforts généraux de la communauté métrologique visant à améliorer les processus permettant de démontrer la comparabilité mondiale des mesures (examen du CIPM MRA) : ils ont ainsi rédigé des documents d'orientation sur la façon de conduire des comparaisons internationales, ils ont partagé leurs vues sur les traitements statistiques et logiciels permettant d'améliorer le calcul des degrés d'équivalence, et ils ont lancé des comparaisons dans des domaines complexes, tels que les étalons pour la métrologie à faible flux de photons.

Domaine de compétence du CCPR

Les responsabilités du CCPR sont les suivantes :

- conseiller le CIPM sur tous les sujets liés à la photométrie et à la radiométrie,
- établir la comparabilité mondiale des mesures en photométrie et radiométrie en promouvant la traçabilité à l'unité photométrique du SI, la candela, et à ses unités dérivées pour les grandeurs photométriques et radiométriques,
- contribuer à l'établissement d'un système d'étalons de mesure nationaux reconnu au niveau international pour la photométrie et la radiométrie et au développement de méthodes et équipements radiométriques absolus,
- participer à la mise en œuvre et au fonctionnement du CIPM MRA en ce qui concerne la photométrie et la radiométrie,
- examiner les incertitudes des aptitudes en matière de mesure et d'étalonnage pour la photométrie et la radiométrie, publiées sur le site internet du BIPM, et conseiller le CIPM en la matière,
- servir de forum d'échange d'informations sur les activités photométriques et radiométriques des membres et observateurs du CCPR,
- établir de nouvelles possibilités de collaboration en photométrie et radiométrie.

Afin de s'acquitter de ses responsabilités, le CCPR a mis en place trois groupes de travail : un groupe de travail dont la mission est de discuter de la stratégie du CCPR, notamment en ce qui concerne les grandeurs et unités ; un groupe de travail qui surveille la façon dont les comparaisons clés sont conduites ; et un groupe de travail qui coordonne les déclarations et l'examen des aptitudes en matière de mesure et d'étalonnage.

Stratégie

La stratégie développée par les membres du CCPR afin de couvrir les responsabilités précédemment mentionnées est décrite dans le document de stratégie du CCPR, qui a été récemment mis à jour afin de couvrir les années 2017 à 2027. Une synthèse de cette stratégie est donnée ci-dessous.

Établissement de la comparabilité mondiale des mesures

Le CCPR a défini sa stratégie afin de développer et maintenir le CIPM MRA dès que ce dernier a été mis en œuvre. En particulier, le CCPR coordonne les comparaisons clés internationales conduites afin d'évaluer les compétences déclarées par les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires désignés concernant les étalons nécessaires pour étayer la photométrie, les propriétés optiques des détecteurs et sources, les propriétés optiques des matériaux et des fibres optiques. Le CCPR a identifié six mesurandes clés (éclairement énergétique, sensibilité spectrale, intensité lumineuse, flux lumineux, transmission spectrale régulière et réflexion spectrale diffuse), ce qui a conduit à mettre en place dix comparaisons clés afin de couvrir les différents domaines spectraux. Un premier cycle de comparaisons s'est achevé en 2014 et le deuxième cycle, qui consiste à répéter chaque comparaison sur une période moyenne de 10 ans, a commencé.

Les comparaisons clés organisées par le CCPR sont limitées, en nombre de participants, à environ 12 laboratoires membres. Le CCPR permet aux organisations régionales de métrologie de coordonner des comparaisons clés subséquentes pour les laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés dans leurs régions afin de démontrer la comparabilité des mesures avec un grand nombre de laboratoires.

Les organisations régionales de métrologie sont également invitées à coordonner des comparaisons régionales d'étalons de mesure pour des grandeurs supplémentaires en photométrie et radiométrie : ces comparaisons régionales concernent par exemple des radiomètres absolus, la luminance énergétique spectrale, le flux énergétique spectral, les grandeurs colorimétriques et les grandeurs liées aux fibres optiques telles que l'atténuation des capteurs de puissance.

Échange d'informations et promotion

Les laboratoires membres du CCPR sont régulièrement invités à présenter leurs développements les plus avancés afin d'identifier les besoins dans de nouveaux domaines et effectuer des comparaisons pilotes lorsque requis. Lors de chaque réunion du CCPR, les membres fournissent des rapports écrits rendant compte de leurs activités en photométrie et radiométrie : ces rapports ont été publiés en 2016 sur les pages internet du CCPR (documents du CCPR de 2016). Depuis 2016, les réunions du CCPR ont été réorganisées afin d'intégrer trois discussions sur les défis techniques qui ressortent de présentations données par certains délégués. En 2016, ces trois discussions ont eu pour thème la métrologie à faible flux de photons, les sources LED, ainsi que l'observation de la Terre et le climat.

Des forums de discussion sont également créés lorsqu'un nouveau thème se dégage. Ils comprennent généralement des membres du CCPR mais peuvent s'étendre à des universitaires ou à des personnes travaillant en entreprise, si nécessaire. L'objectif est d'identifier les défis, les besoins en matière de coopération et, finalement, les nouvelles comparaisons. Actuellement, le CCPR compte quatre forums de discussion : fibre optique, métrologie à faible flux de photons, métrologie terahertz et utilisation de sources LED blanches pour la photométrie. Les forums de discussion travaillent par voie électronique ou organisent des réunions satellites parallèlement à des conférences.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Conseiller le CIPM et promouvoir la traçabilité à la candela

Au cours de ces quatre dernières années, le CCPR a participé au processus de consultation mené par le Comité consultatif des unités concernant la révision de la Brochure sur le SI. Il a mis en œuvre les décisions prises avant 2014 concernant la reformulation de la définition de la candela, qui sera soumise à la CGPM à sa 26e réunion (2018), et a développé la nouvelle mise en pratique qui a été publiée dans *Metrologia* en 2015.

Le CCPR a également collaboré avec les représentants de la Commission internationale de l'éclairage (CIE) afin de mettre à jour le document *Principes régissant la photométrie*, qui comprend des informations sur toutes les grandeurs et unités photométriques et sur les fonctions d'efficacité lumineuse spectrale normalisées de la CIE pour la vision photopique et scotopique (lumière du jour et nuit noire). Depuis la première version de ce document en 1983, des études conduites par la CIE ont permis de définir des fonctions pour la vision mésopique (crépuscule) qui ont été ajoutées. La nouvelle version a également été harmonisée par rapport à la révision du SI et il a été convenu de la publier dans *Metrologia* en mai 2019, simultanément à la publication de la Brochure sur le SI.

Assurer la comparabilité mondiale des mesures

Conformément à la politique du CCPR, les comparaisons internationales de grandeurs clés actuellement conduites par le CCPR sont des répétitions de l'ensemble des dix comparaisons effectuées lors du premier cycle. Une comparaison a été achevée et son rapport a été publié en 2017, trois autres comparaisons sont en cours. Les organisations régionales de métrologie ont réalisé cinq comparaisons afin de démontrer la comparabilité des mesures d'un plus grand nombre de laboratoires dans le monde. La comparaison clé CCPR-K4 en est un bon exemple car elle a été menée par le CCPR avec 17 participants et achevée en 2000 puis elle a été suivie de comparaisons régionales ces dernières années qui ont impliqué 19 participants supplémentaires. Le deuxième cycle de cette comparaison est en cours au niveau du CCPR.

Par ailleurs, des comparaisons supplémentaires ont été menées au sein des organisations régionales de métrologie afin d'étayer les mesures liées à l'utilisation de la fibre optique : ainsi, la sensibilité en puissance des fibres optiques a fait l'objet de la comparaison APMP.PR-S2 de l'APMP.

Enfin, suite à des discussions ayant commencé avant 2014 dans un sous-groupe spécifique du CCPR, la première comparaison clé dans la région spectrale de l'infrarouge lointain a été réalisée par trois laboratoires nationaux de métrologie et ses résultats publié dans un journal à comité de lecture (*IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, **6**(5), 2016). Cette comparaison représente une étape importante car elle favorisera considérablement le développement commercial de l'instrumentation et des capteurs pour la détection à distance, de l'imagerie à rayonnements terahertz, des télécommunications à haute vitesse et de la spectroscopie dans le domaine temporel.

Améliorations apportées au CIPM MRA

À la suite de la Résolution 5 adoptée par la CGPM à sa 25e réunion (2014), un examen du CIPM MRA a été entrepris par le Groupe de travail du CIPM sur la mise en œuvre et le fonctionnement du CIPM MRA et l'ensemble des Comités consultatifs ont été impliqués dans ce travail. Le CCPR a ainsi participé à cet examen, en y consacrant un certain nombre de discussions lors de ses réunions et en organisant des ateliers sur ce sujet. Les membres du CCPR ont partagé leurs meilleures pratiques avec d'autres Comités consultatifs et ont amélioré leurs propres procédures concernant la façon de conduire des comparaisons internationales, déclarer des aptitudes de mesure et

examiner ces déclarations d'aptitudes.

Comparaisons internationales

De 2009 à 2014, le CCPR a rédigé un certain nombre de documents d'orientation afin d'harmoniser la façon de conduire les comparaisons, à la fois au niveau du CCPR et au sein des organisations régionales de métrologie. Un document sur les comparaisons supplémentaires au sein des organisations régionales de métrologie est en préparation depuis 2014 et sera publié. En parallèle, l'accent a été mis sur les outils statistiques et logiciels permettant de contribuer à mettre en œuvre les principes développés dans les lignes directrices.

Aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs)

Il a été décidé au cours de la 23e réunion du CCPR (2016) d'étendre le mandat du président du Groupe de travail sur les CMCs de 2 à 4 ans afin que son président dispose de plus de temps pour suivre et terminer les tâches confiées au groupe de travail. En conséquence, deux importants documents d'orientation concernant l'examen des CMCs ont été mis à jour en 2017 et 2018 ; ils sont disponibles sur les pages internet du CCPR (documents Services in PR et Supporting evidences for CMCs in PR). Certaines règles ont été clarifiées et la procédure d'examen des CMCs devrait désormais être plus efficace.

Ateliers

Depuis la 25e réunion de la CGPM (2014), deux ateliers ont été organisés afin de discuter du meilleur traitement mathématique des résultats de comparaisons (en 2015 et 2017). La décision de rédiger un autre document d'orientation a ainsi été prise et le logiciel adéquat pour effectuer les calculs requis a été sélectionné et partagé entre les membres du CCPR comme un outil destinés aux laboratoires chargés de coordonner des comparaisons. L'objectif est d'harmoniser le traitement des comparaisons mais également de réduire la charge de travail des laboratoires pilotes.

Par ailleurs, un atelier sur les besoins métrologiques en matière de fibre optique a eu lieu simultanément à la 23e réunion du CCPR (2016). Au cours de cet atelier, il a été décidé de mener une comparaison pilote sur la sensibilité de puissance de la fibre optique à l'aide d'un radiomètre cryogénique couplé à de la fibre optique, afin de répondre aux besoins de communication par fibre optique.

Lors de l'atelier intitulé « Quantum Revolution in Metrology » organisé au BIPM en septembre 2017, un certain nombre de membres du CCPR ont été très actifs au cours de la session sur les mesures pour les faibles flux de photons et la radiométrie avec des sources de photons intriqués. Cela reflète l'intérêt considérable que suscite le fait de disposer de meilleurs étalons dans le régime des faibles flux de photons, les applications en cryptographie quantique et photo-bio-photonique étant prometteuses.

Défis et difficultés

La communauté de la métrologie à faible flux de photons commence à devenir importante. Comme les propriétés de la lumière dans ce domaine extrême sont complètement différentes de celles classiques, il est nécessaire d'effectuer davantage de travaux de recherche et développement pour disposer de mesures à faible flux de photons traçables au SI.

Concernant les unités et leur définition, un débat est toujours en cours au sein du CCPR concernant le choix de l'unité de base, des suggestions ayant été faites selon lesquelles le lumen pourrait être un meilleur choix que la candela. Alors que cela n'aurait que peu d'impact sur la nature et le type de comparaisons réalisées en soutien au CIPM MRA, la communauté de la photométrie et de la

radiométrie serait impactée par un changement concernant les définitions et les relations de la chaîne de traçabilité.

Perspectives à court terme et à long terme

À court terme, le portefeuille existant de comparaisons clés est considéré comme approprié pour répondre aux besoins de la communauté de la photométrie et de la radiométrie mais, dans les deux prochaines décennies, des comparaisons s'étendant à différentes régions spectrales deviendront nécessaires. Par exemple, l'industrie des semiconducteurs requiert des mesures traçables au SI des rayonnements ultraviolets extrêmes. Le domaine des rayonnements aux hautes énergies requiert des étalons radiométriques dans le domaine des rayons x. La radiométrie dans l'infrarouge moyen et lointain est devenue plus importante car elle permet d'accroître l'exactitude des observations de la Terre et du climat. Les rayonnements terahertz ont trouvé des applications commerciales dans la détection à distance. Pour permettre l'extension du domaine du mesurande, diverses activités visant à valider les méthodes et l'équivalence de chaque laboratoire devront suivre.

Nombre des domaines considérés dans le document de stratégie sont hautement multidisciplinaires et il est établi que les spécialistes de la photométrie et de la radiométrie doivent travailler en étroite coopération avec des spécialistes d'autres domaines techniques plus proches de ces applications. Les demandes de collaboration avec d'autres organisations internationales seront plus fortes ces prochaines années. Il sera nécessaire de travailler étroitement avec la communauté de l'observation de la Terre en établissant des liens avec les agences spatiales et leurs organisations internationales, telles que le Comité sur les satellites d'observation de la Terre (CEOS) et le Groupe sur l'observation de la Terre (GEO). Dans l'industrie des écrans et de l'éclairage, il est nécessaire d'améliorer la fiabilité des sciences et techniques liées à la vision et à la cognition humaines afin de permettre une meilleure conception des produits et un meilleur contrôle des processus. Par exemple, les nouveaux écrans de réalité virtuelle susciteront des besoins vis-à-vis de la métrologie qui iront au-delà des étalons de mesure actuels en photométrie. Dans le domaine médical, le développement d'instruments biophotoniques quantitatifs pour le diagnostic et le traitement nécessite des spécialistes des mesures des rayonnements optiques afin de collaborer à des travaux multidisciplinaires avec des spécialistes de la biologie, de la santé et des sciences de la vie. Le CCPR doit mettre en relation des spécialistes scientifiques avec des experts de l'industrie en organisant des activités communes avec des organisations internationales pertinentes telles que la Commission internationale de l'éclairage (CIE) et la Society for Information Display (SID) afin de promouvoir le développement d'étalons de mesure qui répondent aux demandes urgentes.

Données sur le CCPR

CCPR établi en 1933

Présidente : M.L. Rastello	Secrétaire exécutive : J. Viallon
Composition :	23 membres, 2 organismes de liaison et 3 observateurs
Réunions depuis la 25e réunion de la CGPM :	22−23 septembre 2016
Trois groupes de travail :	− Comparaisons clés − CMCs − Stratégie

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s) [période]
Comparaisons clés du CCPR (et comparaisons supplémentaires)	10 comparaisons clés, 3 supplémentaires, 3 avant MRA, 1 répétition, 4 bilatérales	1 comparaison clé	5 comparaisons clés (toutes des répétitions), 1 bilatérale [jusqu'en 2022]
Comparaisons du BIPM	3	0	0
Études pilotes du CCPR	3	2	3
CMCs	1 345 CMCs dans 85 catégories de service publiées dans la KCDB		

Le président de la CGPM remercie Mme Rastello et clôt la sixième séance.

Septième séance – 16 novembre 2018 (matin)

Le président de la CGPM souhaite la bienvenue aux délégués pour la septième séance qui est publique.

44. Ouverture de la séance

M. Candel, président de la CGPM, ouvre la séance en prononçant l'allocution suivante :

« Chers Présidents, chers Directeurs, chers délégués, chers collègues, chers lycéens, chers étudiants, Mesdames et Messieurs,

C'est avec beaucoup de plaisir que j'ouvre la séance publique de cette 4e journée de la Conférence générale des poids et mesures, je le fais au nom de l'Académie des sciences. En effet, la tradition veut que la CGPM soit présidée par le président en exercice de l'Académie des sciences et c'est l'honneur qui m'échoit. Cette tradition est liée à la naissance du mètre il y a un peu plus de deux cents ans, en 1799. En effet, c'est l'initiative prise par les académiciens Jean-Charles Borda, Marie Jean Antoine Condorcet, Joseph Louis Lagrange, Pierre Simon Laplace et Gaspard Monge qui est à l'origine de la définition du mètre à partir de la mesure du quart du méridien terrestre. Ce sont les mesures de distance par triangulation, réalisées par Jean-Baptiste Delambre et Pierre François Méchain, qui ont débouché sur la valeur du mètre. C'est donc un immense privilège de prendre la parole dans ce cadre et je suis bien conscient de l'honneur qui m'est fait.

Vous savez que cette 26e Conférence marque un véritable tournant dans la définition des unités du Système international. L'évolution engagée au cours de cette Conférence peut étonner. Elle s'inscrit pourtant comme la suite logique des évolutions successivement réalisées. Le Système d'unités est reformulé en partant des constantes fondamentales de la physique et en remplaçant le dernier étalon matériel, celui du kilogramme, par une définition s'appuyant sur la constante de Planck. Les concepts qui sont à la base de ce changement sont anciens et pourtant c'est seulement maintenant que cette transition va être réalisée.

Cette Conférence apparaîtra dans l'histoire comme un événement majeur pour la métrologie mondiale. Les nouvelles définitions des unités du Système international seront adoptées dans ce cadre. Cette transition sera plus profonde que toutes celles qui ont eu lieu depuis la création du système par la Révolution française. Le Système international sera plus cohérent et plus en harmonie avec la physique quantique et relativiste, comme avec les techniques les plus récentes en interférométrie des ondes de matière. Il se rapprochera également du système d'unités naturelles de Planck tout en faisant appel aux technologies les plus pointues de métrologie quantique.

Le vote d'aujourd'hui réalisera une transformation radicale du Système international qui sert à la science et aux échanges économiques mondiaux. Par cette action, les délégués de la CGPM mettront en place un système de mesure qui s'appuiera entièrement sur les constantes fondamentales de la nature. Ce choix ne pourra que favoriser les nouvelles technologies. Il faudra cependant développer un effort pédagogique considérable pour permettre à tous de bien comprendre ce rapprochement avec les fondements qui unifient la métrologie et d'en tirer bénéfice.

C'est d'ailleurs cet objectif qui est poursuivi aujourd'hui, avec l'ouverture de cette séance au public et sa diffusion en webcast.

Je vous souhaite une matinée passionnante et passe la parole à Joachim Ullrich, vice-président du CIPM. Merci. »

45. Progrès réalisés concernant la révision du SI et rapport du président du CCU

M. Joachim Ullrich, président du Comité consultatif des unités (CCU), fait le point sur les progrès réalisés concernant la révision du SI puis présente son rapport sur les activités du CCU depuis la 25e réunion de la CGPM (2014).

M. Ullrich présente brièvement les changements proposés dans la révision du SI. Dans le SI révisé, les valeurs numériques des constantes définissant le SI ont été fixées. Les équations de la physique et les constantes définissant le SI permettent ainsi de réaliser les unités et, en particulier, les unités de base. Cette révision du SI, qui se fonde sur la compréhension actuelle de la nature, est valable pour tous les temps et toutes les civilisations de l'univers. Lorsqu'en 1900, Max Planck formula la loi de Planck, postulant ainsi l'existence de la constante de Planck pour expliquer le spectre observé du rayonnement du corps noir, il écrivit qu'à l'aide des constantes physiques fondamentales, il est possible d'établir des unités de longueur, de temps, de masse et de température, qui conservent nécessairement leur validité pour tous les temps et toutes les civilisations, même extraterrestres et non humaines : c'est proprement ce qui est proposé dans la révision du SI. La vision de Planck était une vision théorique, qui est désormais devenue réalité. Deux articles fondateurs, publiés en 2005[11] et 2006[12], ont posé les bases des redéfinitions : après 13 années de travail, de nombreuses recommandations du CIPM et résolutions de la CGPM, ainsi que sept réunions du CCU, la communauté de la métrologie est parvenue à produire le Projet de résolution A « Sur la révision du Système international d'unités (SI) ». Les États Membres et les Associés représentent 98 % du PIB mondial de sorte que le vote sur la révision du SI sera véritablement une étape charnière pour la communauté mondiale de la mesure et une pierre angulaire de l'infrastructure internationale de la qualité.

M. Ullrich donne quelques exemples afin d'illustrer comment les équations de la physique combinées aux constantes définissant le SI permettent de réaliser les unités en général et les unités de base en particulier. Il est important de noter que lorsqu'une meilleure expérience ou technologie sera développée, il sera possible d'obtenir une meilleure réalisation sans devoir changer la définition de l'unité concernée ; il n'existe donc plus de limite imposée par la définition elle-même. La précision ultime avec laquelle on pourra compter le nombre d'atomes dans une sphère de silicium sera de l'ordre d'un atome, ce qui équivaut à une incertitude relative de quelques 10^{-26} et, s'il était possible de compter les électrons individuels dans le cas de l'ampère, l'incertitude relative serait de quelques 10^{-19}. Les nouvelles définitions ne sont limitées que par la quantification de la nature.

La révision du SI représente certes un changement considérable mais n'aura aucune incidence sur la vie quotidienne. Des efforts considérables ont été déployés afin d'assurer la continuité, l'harmonisation et la stabilité du nouveau système. Il a ainsi été nécessaire de s'assurer que les valeurs des constantes définissant le SI étaient mesurées de la façon la plus exacte possible dans le cadre de l'ancien SI. Cela permet de garantir qu'elles peuvent servir de base aux nouvelles définitions

[11] Mills I.M., Mohr P.J., Quinn T.J., Taylor B.N., Williams E.R., Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come, *Metrologia*, 2005, **42**(2), 71-80.

[12] Mills I.M., Mohr P.J., Quinn T.J., Taylor B.N., Williams E.R., Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005), *Metrologia*, 2006, **41**(1), 227-246.

tout en assurant la continuité des deux systèmes.

M. Ullrich déclare que la révision historique du SI est l'aboutissement d'un effort millénaire de l'humanité pour établir des unités de mesure. Le système d'unités a commencé il y a plusieurs milliers d'années en se fondant sur des artéfacts pour le volume, la longueur ou la masse, et il atteint désormais son point culminant avec le concept le plus abstrait qui puisse être pensé pour définir les unités, que l'on qualifie parfois de SI quantique. Ce système sera valide pour tous les temps et pour toutes les civilisations, partout dans l'univers, comme imaginé par Max Planck et concrétisé par un grand nombre d'ingénieux chercheurs. Le SI révisé permettra d'étayer ce que l'on appelle parfois la seconde révolution quantique, ainsi que l'innovation scientifique et industrielle, au bénéfice de l'humanité entière.

Résumé du rapport du CCU

Le CCU, créé en 1964, conseille le CIPM sur tous les sujets relatifs à l'objectif majeur et la tâche la plus importante de la Convention du Mètre, à savoir établir, maintenir et disséminer aux États Membres et Associés à la CGPM un Système international d'unités, le SI, à la pointe de la métrologie. Les États Membres et Associés représentent au total près de 100 pays, soit plus de 97 % de la puissance économique mondiale.

Afin de remplir sa mission, le CCU prend conseil auprès de ses membres et parties prenantes, d'associations, de commissions et comités internationaux, ainsi que d'organisations intergouvernementales et organismes internationaux, avec lesquels il entretient des liens ; il travaille par ailleurs en étroite collaboration avec les autres Comités consultatifs et les laboratoires nationaux de métrologie.

Le défi le plus récent que le CCU a dû relever a été de guider, coordonner et étayer scientifiquement le changement fondamental qui a été envisagé concernant le SI afin d'adopter la révision du SI. Au lieu de reposer sur des artéfacts, des propriétés matérielles ou des définitions idéalisées, le système révisé devrait se fonder sur les valeurs numériques fixées d'un ensemble cohérent de constantes définissant le SI et sur l'établissement de procédures pour réaliser les unités, à savoir les mises en pratique.

Depuis l'adoption par la CGPM à sa 24e réunion (2011) de la Résolution 1 « Sur l'éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI », le CCU a concentré ses activités sur la préparation de la révision du SI, en particulier en élaborant un projet de 9e édition de la Brochure sur le SI, la publication du BIPM la plus largement utilisée. La version finale du projet est désormais achevée et accessible au public. Par ailleurs, une infographie sur le SI révisé a été conçue par le CCU, un logo a été élaboré par un sous-groupe de travail du CIPM présidé par le président du CCU, et des mesures ont été prises afin d'informer le grand public au sujet de la révision du SI.

Le document de stratégie du CCU pour les années 2013 à 2023 a été préparé en février 2014 puis il a été révisé et amélioré lors de la réunion du CCU de juin 2016. La stratégie du CCU sera de nouveau examinée dans son ensemble après l'adoption de la révision du SI, lors de la réunion du CCU qui sera organisée en octobre 2019.

Afin de répondre à une demande d'orientation, le Groupe de travail du CCU sur les angles et grandeurs sans dimension, créé en juin 2014, s'est réuni pour la première fois en février 2015. Les discussions de ce groupe de travail se sont focalisées sur la pertinence d'ajouter le radian comme nouvelle unité de base du SI et sur le traitement des grandeurs appelées « sans dimension » dans le projet de 9e édition de la Brochure sur le SI. Après de nombreuses discussions, le groupe de travail n'est parvenu à un consensus sur aucun de ces sujets, c'est pourquoi il a été décidé que le radian et les grandeurs sans dimension seraient traités, dans la 9e édition de la Brochure sur le SI, de la même façon que dans la 8e édition, conformément aux résolutions de la CGPM en vigueur.

Domaine de compétence du CCU

Le travail du CCU porte sur les thèmes suivants :

- faire évoluer et améliorer le Système international d'unités, le SI ;
- conseiller le CIPM sur les unités de mesure en général ;
- fournir des informations et conseils sur les unités et leur utilisation, au-delà du CIPM, à un large éventail d'organismes, associations, commissions et comités internationaux, ainsi qu'à des personnes contactant le BIPM à cette fin.

Afin de remplir sa mission, le CCU prend conseil auprès de ses membres et parties prenantes, d'associations, de commissions et comités internationaux, ainsi que d'organisations intergouvernementales et organismes internationaux, avec lesquels il entretient des liens ; il travaille par ailleurs en étroite collaboration avec les autres Comités consultatifs et les laboratoires nationaux de métrologie.

Le CCU a pour responsabilité de préparer les éditions successives de la Brochure sur le SI, y compris de son Résumé, ainsi que de tout autre document de synthèse sur le SI destiné aux laboratoires de métrologie, industries, universités et enseignants, ou au grand public. La Brochure sur le SI, qui en est aujourd'hui à sa 8e édition (2006), est la publication du BIPM la plus importante et la plus largement utilisée. Elle est le fruit du travail d'un grand nombre de personnes, au BIPM et en dehors du BIPM, et sa production requiert un niveau élevé de connaissances et d'expérience scientifiques. Le CCU apporte le plus grand soin à la préparation du texte, en prenant en considération non seulement la précision du sens du texte mais aussi le fait que la Brochure sur le SI est traduite dans de nombreuses autres langues et qu'elle est utilisée par des personnes dont la langue maternelle n'est ni le français ni l'anglais. Au cours des années passées, le CCU a préparé la 9e édition de la Brochure sur le SI qui comprend les définitions révisées des unités de base du SI. Si, tel que cela est prévu, les nouvelles définitions sont approuvées par la CGPM à sa 26e réunion en novembre 2018, la nouvelle édition de la Brochure sur le SI sera publiée le 20 mai 2019, le jour même de la mise en œuvre officielle de la révision du SI.

Stratégie

Conformément à la mission qui lui a été confiée de conseiller le CIPM sur tous les sujets portant sur les unités de mesure et, en particulier, sur le SI, le CCU a mis en place ces dernières années une stratégie visant à redéfinir les unités de base afin de répondre aux besoins croissants de l'industrie, de la société et de la science.

Cet objectif a conduit à développer un « SI révisé » qui se fonde désormais sur deux éléments clés :

(i) le fait de fixer les valeurs numériques d'un ensemble cohérent de « constantes définissant le SI »,

(ii) l'établissement de procédures de réalisation des unités, à savoir les mises en pratique.

La révision du SI, qui s'appuie sur la Résolution 1 (2014) adoptée par la CGPM à sa 25e réunion et qui devrait être approuvée en novembre 2018 par la CGPM à sa 26e réunion, comprend de nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole. Le principal défi que le CCU a dû relever ces dernières années a été de guider, coordonner et étayer scientifiquement le changement fondamental du SI afin d'adopter la révision du SI.

Ainsi, la stratégie du CCU pour parvenir à l'adoption du SI révisé repose sur les principes directeurs suivants :

I. Assurer la continuité et la praticabilité du SI.

II. Assurer la cohérence, la stabilité et le fondement scientifique solide du SI.
Par exemple, les limites d'incertitude et la cohérence des résultats obtenus à partir des expériences de la balance de Kibble et de celles utilisant des sphères de silicium, telles que requises par le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), ont été des conditions clés pour décider de réviser le SI. Ces deux types d'expériences ont permis de déterminer la constante de Planck *h* ou, de façon équivalente, d'établir la relation entre le kilogramme et la future constante le définissant, *h*. Parallèlement, la cohérence des résultats de ces expériences avec ceux des expériences sur le « triangle métrologique quantique » garantit la cohérence des réalisations de l'ampère et donc des unités électriques, fondées sur la constante de von Klitzing et la constante de Josephson.

III. Veiller à ce que la réalisation des unités permette constamment de répondre aux besoins croissants de l'industrie, de la société et de la science au plus haut niveau technologique.

La nouvelle approche offre les avantages suivants :

- toutes les unités du SI peuvent être directement réalisées à partir d'une combinaison adéquate de constantes définissant le SI, sans distinction entre les unités qu'elles soient de base ou dérivées, même si le concept d'unités de base sera conservé pour des raisons historiques et pratiques ;
- une unité peut être réalisée à l'aide d'expériences fondamentalement différentes (par exemple, le kilogramme peut être réalisé, à un niveau macroscopique, à l'aide d'une balance de Kibble ou de sphères de silicium et, à un niveau microscopique, à l'aide de la mesure de la vitesse de recul d'un atome qui absorbe un photon ou de la mesure de la longueur d'onde de de Broglie), ce qui permet de conduire des comparaisons clés sans, ou avec peu de, corrélation ;
- les unités sont définies et peuvent être réalisées sur l'échelle entière et pas seulement, comme pour le kelvin selon sa définition actuelle, à partir de deux points fixes, ce qui requiert interpolations et extrapolations ;
- toute unité peut être réalisée avec, en principe, une exactitude qui sera de plus en plus élevée à mesure que la science et la technologie progresseront car les définitions n'imposent pas de limites aux mises en pratique.

Dans les années à venir, de nouvelles suggestions concernant les réalisations des unités à partir des constantes de définition vont émerger, tout comme de nouvelles propositions concernant les mises en pratique. Le CCU suivra ces évolutions, en veillant à la cohérence du SI dans sa globalité et en conseillant le CIPM sur le plan scientifique, en étroite collaboration avec les Comités consultatifs impliqués.

Une feuille de route détaillée concernant la redéfinition du kilogramme prévue en 2018 a été élaborée par le CCM en collaboration avec le CCU puis approuvée par le CIPM à sa 103e session en mars 2014. Elle comprend des exigences spécifiques concernant la qualité des résultats d'expériences nécessaire pour fixer la valeur numérique de la constante de Planck. Des exigences similaires ont été requises par les autres Comités consultatifs concernés par la révision du SI. Au cours des dernières années, des progrès considérables ont été accomplis, ce qui a permis de remplir les critères qui avaient été fixés, de sorte qu'un projet de résolution pour l'adoption de nouvelles définitions a été préparé pour la 26e réunion de la CGPM et qu'il devrait être adopté en novembre 2018.

Au cours des années suivant la révision du SI, les nouvelles définitions devraient encore être au cœur de l'attention du public, c'est pourquoi le CCU et son président poursuivront leur travail visant à expliquer le SI révisé et le rendre de plus en plus accepté.

La stratégie du CCU sera révisée lors de la prochaine réunion du CCU, en octobre 2019, une fois que la révision du SI aura eu lieu et sera pleinement mise en œuvre. Un nouveau Groupe de travail du CCU sur la stratégie a été établi à cette fin. Parmi les nouvelles tâches que le CCU devrait assumer figure l'éventuelle redéfinition à venir de la seconde, dont l'évolution sera supervisée en collaboration étroite avec le Consultatif du temps et des fréquences (CCTF).

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Principales activités

Ces dernières années, l'activité la plus importante du CCU a été de préparer la révision du SI, qui est l'objet du Projet de résolution A de la 26e réunion de la CGPM (2018).

Parmi les réalisations du CCU figurent les suivantes :

- Le projet de 9e édition de la Brochure sur le SI qui décrit le SI révisé a été finalisé et publié sur le site internet du BIPM. Au cours de ces dernières années, le projet de Brochure sur le SI a été disponible pour commentaires auprès des membres du CCU, des laboratoires nationaux de métrologie et du public le plus large possible ; ainsi, il a été possible de suivre l'évolution du projet de Brochure sur le SI sur les pages en accès libres du site internet du BIPM. Tous les commentaires formulés sur les versions consécutives ont été recueillis et pris en considération pour élaborer la version finale.
- En janvier 2014, le président du CCU a reconstitué l'équipe de rédaction de la 9e édition de la Brochure sur le SI qui avait été mise en place lors de la 21e session du CCU en juin 2013. La nouvelle équipe de rédaction s'est réunie en juin 2015 afin d'examiner les commentaires reçus concernant les projets des trois premiers chapitres de la 9e édition. La version de la Brochure sur le SI qui a ensuite été préparée par l'équipe de rédaction a été publiée pour commentaires. Le projet de Brochure sur le SI a été terminé en novembre 2018, sa traduction en français est en cours.
- Un groupe de travail du CCU a été créé afin d'examiner le sujet des angles et grandeurs sans dimension dans le SI qui requiert des orientations concernant l'utilisation des unités et l'expression des valeurs des grandeurs. Les termes de référence de ce nouveau groupe de travail, ainsi que sa composition et sa présidence, ont été approuvés par le CCU. Le groupe de travail s'est réuni pour la première fois au siège du BIPM en février 2015 afin de formuler des conseils sur la présentation des unités des grandeurs sans dimension, parmi lesquelles les grandeurs dont la valeur est déterminée par comptage, et afin de discuter de la pertinence d'inclure le radian comme une unité de base du SI. Le groupe de travail a discuté en profondeur de ces sujets, sans parvenir toutefois à un consensus sur l'un ou l'autre des thèmes abordés. Par conséquent, lors de la réunion suivante du CCU, il a été décidé de ne pas apporter de modifications à la 9e édition de la Brochure sur le SI concernant les sujets liés aux angles et aux grandeurs sans dimension. Le texte de la nouvelle Brochure respecte ainsi l'ensemble des résolutions qui ont été prises par le passé par la CGPM concernant le radian et les grandeurs sans dimension.
- Le président, qui préside le Groupe de travail du CIPM sur la promotion du SI, a dirigé le travail visant à élaborer un logo pour le SI révisé. Le logo du SI a été officiellement approuvé et peut être téléchargé à partir des pages en accès libre du site internet du BIPM.

– Le document de stratégie du CCU, qui est en vigueur depuis février 2014, est en cours de révision par le Groupe de travail du CCU sur la stratégie, qui a récemment été mis en place, afin de clarifier la mission du CCU après l'adoption et la mise en œuvre de la révision du SI. Le nouveau document de stratégie sera approuvé par le CCU en octobre 2019. L'une des principales tâches du CCU devrait être de superviser les progrès effectués afin de redéfinir la seconde. Ce travail sera dirigé par le CCTF et les étapes du processus de redéfinition ont déjà été fixées dans une feuille de route établie par le CCTF, qui prévoit une possible adoption d'une redéfinition de la seconde au moment de la CGPM en 2030.

Défis et difficultés

L'un des défis que le CCU a dû relever a concerné la mise en œuvre du SI révisé car convaincre les communautés impliquées de la nécessité d'abandonner les artéfacts et prototypes a constitué une tâche exigeante. À cet effet, le CCU continuera à fournir des conseils afin d'assurer une transition harmonieuse de l'actuel SI au SI révisé.

À la suite d'une décision du CIPM, le CCU ainsi que les autres Comités consultatifs ont révisé en 2018 leur composition et leur lien avec les organismes de liaison. Le CCU continuera à travailler de façon étroite avec l'ensemble de ses membres et organismes de liaison, en les impliquant tous, ainsi que leurs parties prenantes, aux discussions afin de parvenir à un consensus et obtenir un appui total.

Perspectives à court terme et à long terme

À court terme, la 9e édition de la Brochure sur le SI et son Résumé seront publiés, en anglais et en français, et officiellement adoptés le 20 mai 2019, jour de la mise en œuvre du SI révisé.

Le CCU suivra avec attention la transition au SI révisé afin d'assurer un changement harmonieux.

À long terme, les efforts du CCU consisteront principalement à suivre les développements qui permettront de redéfinir la seconde. En outre, le CCU surveillera les progrès scientifiques qui pourraient avoir un effet sur la réalisation des unités du SI et mettra l'accent sur les définitions fondamentales du VIM, celles directement liées au SI révisé telles que les définitions des termes « unité », « mesure » et « traçabilité ».

Données sur le CCU

CCU établi en 1964	
Président : J. Ullrich	Secrétaire exécutive : E. de Mirandés
Composition (depuis 2018) :	11 membres, 10 organisations internationales ayant le statut d'organismes de liaison, aucun observateur, deux membres à titre personnel, un membre honoraire
Réunions depuis la 25e réunion de la CGPM :	15-16 juin 2016, 5-6 septembre 2017
Deux groupes de travail :	– Angles et grandeurs sans dimension dans le SI – Stratégie

46. Succès de la mesure de *k* et rapport du président du CCT

M. Yuning Duan, président du Comité consultatif de thermométrie (CCT), fait le point sur les succès de la mesure de *k* puis présente son rapport sur les activités du CCT depuis la 25e réunion de la CGPM (2014).

Les mesures en thermométrie jouent un rôle essentiel dans une société durable : ils ont notamment un impact sur la surveillance du réchauffement climatique, les économies d'énergie, la production industrielle et le commerce équitable, la santé, la sécurité et la recherche. De nombreuses techniques et procédures de contrôles reposent sur des mesures de température et d'humidité fiables. L'unité de température thermodynamique, le kelvin, est actuellement définie comme la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Cette définition se fonde ainsi sur la façon dont un matériau spécifique, l'eau, et sa composition isotopique influence la température thermodynamique du point triple de l'eau. Par ailleurs, la composition isotopique de l'eau varie selon le lieu.

Ces dernières années, les scientifiques ont déployé des efforts considérables pour redéfinir le kelvin et le CCT a joué un rôle unique et important en coordonnant ce travail. Le kelvin redéfini se fondera sur une valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann *k*, et non plus sur la température du point triple de l'eau. La redéfinition proposée du kelvin ouvrira la voie à de futures améliorations. Une définition indépendante de toutes contraintes matérielles et technologiques permettra de tirer parti des développements futurs qui feront naître de nouvelles technologies plus précises de mesure de la température, en particulier en ce qui concerne les températures extrêmes.

L'essentiel de la recherche scientifique visant à redéfinir le kelvin a consisté à déterminer la valeur de *k* à l'aide de quatre méthodes primaires : la thermométrie acoustique à gaz, la thermométrie à bruit thermique, la thermométrie à gaz par mesure de la constante diélectrique et la thermométrie par mesure de la largeur Doppler. En 2017, CODATA a accepté les résultats de mesure de trois méthodes (la thermométrie acoustique à gaz, la thermométrie à bruit thermique et la thermométrie à gaz par mesure de la constante diélectrique) et a publié une nouvelle valeur numérique de *k* en 2018.

Suite aux travaux novateurs réalisés par l'ensemble de la communauté de la thermométrie, les critères et conditions qui avaient été fixés pour redéfinir le kelvin ont pu être remplis, c'est pourquoi le moment est venu de redéfinir le kelvin. Avec l'élaboration d'une nouvelle mise en pratique de la définition du kelvin, la redéfinition n'aura que peu ou pas d'impact immédiat sur les mesures pratiques de température ainsi que sur leur traçabilité.

Résumé du rapport du CCT

Le CCT est responsable de la métrologie dans les domaines de la température, de l'humidité et des grandeurs thermophysiques[13]. La stratégie du CCT a été mise à jour en 2017 et les récentes activités du CCT se sont concentrées sur la redéfinition du kelvin. Le CCT ne prévoit pas de lancer de nouvelles comparaisons clés dans un futur proche mais seulement de répéter des comparaisons.

Une connaissance exacte et précise de la température est essentielle pour les sciences, la technologie et l'industrie, domaines dans lesquels il s'agit d'être précis et de repousser les limites. La métrologie de la température et de l'humidité joue un rôle important dans les études sur le climat tandis que la mesure des grandeurs thermophysiques fournit des données essentielles qui permettent de limiter les coûts liés à la consommation d'énergie. Bien que la thermométrie soit considérée par certains comme une science mature, elle est confronté à de nouveaux défis.

[13] Les grandeurs thermophysiques décrivent le comportement thermique de la matière : il s'agit par exemple de la conductivité thermique ou de l'isolation thermique.

Domaine de compétence du CCT

Le CCT conseille le CIPM sur tous les sujets scientifiques qui présentent de l'intérêt pour la métrologie des températures, de l'humidité et des grandeurs thermophysiques. Il sert par ailleurs de référence et de réseau à la communauté diversifiée de la thermométrie afin de fixer des objectifs communs et d'établir des collaborations entre les laboratoires nationaux de métrologie, les laboratoires désignés des États Membres ou d'autres organismes pertinents. Il assure la continuité, la fiabilité et l'exactitude d'une échelle internationale de température commune et promeut les meilleures pratiques. Il identifie et organise des comparaisons clés dans les domaines qu'il couvre afin d'assurer la comparabilité mondiale des mesures et leur traçabilité au SI et afin de garantir la qualité des données fournies.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Le CCT et la redéfinition du kelvin

Le kelvin est actuellement défini par la température du point triple de l'eau, à savoir la température où la glace, l'eau et la vapeur d'eau coexistent. La mesure de cette température est réalisée à l'aide d'une cellule en verre ou en quartz contenant de l'eau. L'incertitude associée à cette mesure a pu être améliorée grâce à une meilleure compréhension de l'influence de la composition isotopique de l'eau, acquise suite à la comparaison clé internationale CCT-K7. Cependant, la définition du kelvin est toujours liée à un dispositif qui limite la précision et la réalisation de mesure de températures extrêmement basses ou élevées.

Une redéfinition du kelvin s'appuyant sur la constante de Boltzmann a été au cœur de la réunion du CCT de juin 2017 et ce dernier a joué un rôle important dans la coordination des travaux pour y parvenir. Cette nouvelle définition est fondée sur une constante invariante qui n'est pas seulement universellement accessible mais qui permettra aussi d'améliorer la précision des mesures dans le futur en fournissant une référence intrinsèquement stable pour les générations futures. Des progrès substantiels ont été réalisés par un grand nombre de laboratoires nationaux de métrologie. Les différentes techniques et réalisations utilisées pour déterminer à un niveau de précision élevé la constante de Boltzmann, k, constante qui relie la température à l'énergie, sont la base pour disposer d'une valeur robuste. Des approches très différentes ont été développées avec succès pour atteindre ce but commun : détermination précise de la vitesse du son, techniques tirant parti des propriétés thermiques de la constante diélectrique, mesure de la température liée au bruit électrique ou détermination de la largeur Doppler des fréquences optiques.

La collaboration internationale des laboratoires impliqués a été indispensable pour obtenir une analyse claire des résultats. Les deux conditions proposées par le CCT afin de pouvoir redéfinir le kelvin étaient les suivantes :

- une incertitude-type relative de la valeur ajustée de k inférieure à 1×10^{-6}, et
- une détermination de k fondée sur au moins deux méthodes fondamentalement distinctes qui permettent d'obtenir, chacune, au moins un résultat présentant une incertitude-type relative inférieure à 3×10^{-6}.

Ces conditions ont été remplies. En outre, pour la première fois, l'incertitude de la constante de Boltzmann est inférieure à celle de l'échelle de température appliquée, ce qui indique qu'il est désormais opportun de redéfinir le kelvin. L'ajustement spécial de CODATA de 2017 fournit la valeur exacte :

$$k = 1{,}380\ 649\ 10^{-23}\ \mathrm{J/K}.$$

En prévision de la nouvelle définition du kelvin, une nouvelle mise en pratique décrivant comment la définition doit être réalisée, a été préparée et est disponible sur le site internet du BIPM. Elle comporte un document principal, accompagné d'un certain nombre d'annexes qui donnent des informations techniques détaillées sur les étalons primaires et des directives sur la façon de réaliser le kelvin par la mesure de la constante de Boltzmann et en évaluant l'incertitude associée. Cette mise en pratique n'est pas seulement un guide mais représente également la thermométrie actuelle à son plus haut niveau, fruit de décennies d'expérience. C'est également un excellent résultat du travail du CCT.

L'échelle de température EIT-90 n'est à l'heure actuelle pas affectée par la redéfinition. Un document en version électronique intitulé « *Guide to the realization of the ITS-90* » a été rédigé en 2017 et est disponible sur le site internet du BIPM. Il est disponible sur le site internet du BIPM et constitue un manuel unique pour les thermométristes ; il a été préparé sous les auspices du CCT.

Un numéro spécial de *Metrologia* sur la constante de Boltzmann a été publié en 2015.

Les différents instruments primaires développés pour déterminer la constante de Boltzmann sont désormais utilisés pour mesurer la température thermodynamique sur une large plage de températures afin d'établir la différence par rapport à l'échelle de température actuelle, l'EIT-90. Cette phase devrait durer jusqu'au milieu des années 2020 et fera ressortir le besoin d'une nouvelle échelle de température.

Stratégie

En 2012, le CCT a effectué une analyse approfondie de son travail depuis la mise en œuvre du CIPM MRA et a établi des prévisions concernant l'impact de celui-ci. Cette analyse a été mise à jour et publiée en 2017 sur le site internet du BIPM. Le plan stratégique du CCT donne un aperçu des besoins présents et à venir de la métrologie dans le domaine thermique. Étant donné qu'aucune activité de métrologie des températures n'est réalisée au BIPM, le plan stratégique du CCT concerne les laboratoires nationaux de métrologie, les laboratoires désignés, ainsi que leurs parties prenantes.

Les domaines majeurs concernant les besoins des parties prenantes sont le secteur de l'énergie, le changement climatique, le réchauffement de la planète, l'industrie manufacturière à haute valeur ajoutée, la santé et la sécurité, l'industrie de l'électronique et des matériaux, la science et la recherche.

Aucune augmentation du nombre de comparaisons clés n'est prévue à l'heure actuelle. Les comparaisons permettant de démontrer la comparabilité des aptitudes de mesure en thermométrie sont parvenues à maturité et l'activité de comparaison concerne surtout des répétitions de comparaisons clés.

Le CCT compte sept groupes de travail. Il est par ailleurs soutenu par un certain nombre de sous-groupes de travail qui ont une durée de vie limitée en fonction des objectifs à atteindre et du temps requis pour y parvenir.

Comparaisons et groupes de travail

Plusieurs comparaisons du CCT ont été achevées depuis la 25e réunion de la CGPM (2014). En particulier, la première comparaison clé dans le domaine de l'humidité a été réalisée et les résultats publiés en 2015. La première comparaison supplémentaire du CCT dans le domaine interdisciplinaire des grandeurs thermophysiques s'est achevée et son rapport final a été publié en 2016. Des répétitions de comparaisons sont en cours, notamment concernant la réalisation de l'EIT-90 à l'aide de thermomètres à résistance de platine étalon. Une répétition de la comparaison concernant la réalisation du point triple de l'eau est programmée pour 2019. Le CCT a identifié sept comparaisons clés répertoriées dans le tableau ci-après.

Le CCT est soutenu par des groupes de travail qui étudient les questions concernant les comparaisons clés, les aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs) et la stratégie ; ces groupes de travail sont eux-mêmes secondés par les groupes de travail sur la thermométrie par contact et sans contact, l'humidité et l'environnement. Les récents résultats des groupes de travail du CCT sont synthétisés dans le document de stratégie du CCT. Il a été mis fin en 2017 aux sous-groupes de travail qui ont rempli leurs objectifs concernant la redéfinition du kelvin et la rédaction de la mise en pratique. Un nouveau sous-groupe sur les technologies émergentes a été créé afin d'étudier de nouvelles possibilités d'auto-étalonnage et d'équipements de plus petite taille. Ces nouvelles possibilités sont le résultat de recherches sur la physique quantique, qui va probablement modifier le paysage de la thermométrie. Le nouveau sous-groupe a pour mission de réaliser une enquête sur le domaine de la physique quantique et d'en rendre compte au CCT lors de sa prochaine réunion qui devrait se tenir en 2020.

	Comparaisons clés du CCT		**Répétitions**
CCT-K1	Réalisation de l'EIT-90 entre 0,65 K et 24,6 K		
CCT-K2	Réalisation de l'EIT-90 entre 13,8 K et 273,16 K		
CCT-K3	Réalisation de l'EIT-90 entre 83,8 K et 933,4 K	**CCT-K9**	Réalisations de l'EIT-90 entre 83,8 K et 692,7 K
CCT-K4	Comparaison des réalisations locales de mesure du point de congélation pour l'aluminium et l'argent		
CCT-K5	Réalisation de l'EIT-90 entre 961 °C et 1 700 °C	**CCT-K10**	Réalisations de l'EIT-90 entre 961 °C et 3 000 °C
CCT-K6	Humidité : température des points de rosée et de congélation (-50 °C à 20 °C)	**CCT-K8**	Humidité : température des points de rosée (30 °C à 95 °C)
CCT-K7	Cellules à point triple de l'eau	**CCT-K11**	Répétition prévue en 2019

Relations avec des organismes internationaux

Depuis 2015, le CCT, par l'intermédiaire de son Groupe de travail sur l'environnement, est représenté au sein des équipes d'experts de la Commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). De façon réciproque, la CIMO a participé au Groupe de travail du CCT.

Le CCT entretient des échanges actifs avec l'International Association on Properties of Water and Steam (IAPWS) sur les questions d'humidité.

Par ailleurs, la conférence TEMPMEKO donne l'occasion de faire des présentations au niveau international : celle la plus récente s'est tenue à Zakopane (Pologne) en 2016.

Réunion du CCT en 2017

Le CCT s'est réuni les 1er et 2 juin 2017 au BIPM à la suite des réunions de ses groupes et sous-groupes de travail. Un certain nombre de laboratoires nationaux de métrologie, qui n'étaient ni membre ni observateur officiel du CCT mais venant d'États Membres du BIPM, ont assisté à cette réunion : INM (Colombie), INTiBS (Pologne), NIS (Égypte) et SASO-NMCC (Arabie saoudite). Le président de chaque comité technique en thermométrie au sein des organisations régionales de

métrologie a été invité à cette réunion du CCT. Le CMI (République tchèque) a présenté sa candidature pour devenir membre du CCT, ce qui a été approuvé par le CIPM en 2017.

Une liste des actions et décisions prises lors de cette réunion est disponible sur le site internet du BIPM et le rapport de la réunion a été publié.

Perspectives à court terme et à long terme

Une connaissance exacte et précise de la température est essentielle dans tous les domaines scientifiques dont les frontières doivent être repoussées. La redéfinition du kelvin stimulera en particulier la mise en place d'une nouvelle échelle de température, tâche particulièrement importante pour le CCT.

Dans l'industrie de la métallurgie et de la céramique, une conception thermique fiable permettant le contrôle de la production repose sur des données thermophysiques concernant le transfert et le stockage de la chaleur (conductivité thermique, capacité calorifique et diffusion thermique). Des améliorations en termes d'isolation thermique sont synonymes de considérables réductions des coûts dans le monde entier et d'une réduction de la consommation mondiale de l'énergie.

Parvenir à une définition de l'humidité relative qui soit cohérente avec le SI est un grand défi et implique une large communauté d'utilisateurs. Par ailleurs, des avancées dans le domaine de l'humidité sont requises pour étayer les mesures industrielles dans divers gaz tels que le dioxyde de carbone, l'hydrogène et des mélanges de gaz combustibles.

À plus long terme, augmenter la puissance des ordinateurs par le biais de l'informatique quantique constitue un secteur industriel à fort potentiel de croissance qui repose sur des mesures thermométriques exactes à très basses températures.

Le climat et la météorologie sont des domaines prioritaires pour le CCT. La température et l'humidité sont des grandeurs fondamentales requises dans un large éventail de recherches sur le changement climatique. La comparabilité des observations météorologiques et leur traçabilité à des étalons de mesure internationaux doivent être améliorées.

De nouvelles technologies permettent de produire des appareils de thermométrie de petite taille, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles applications. Le CCT anticipe ce progrès.

Le CCT doit faire face à plusieurs défis. La nouvelle définition à venir du kelvin est claire et cohérente pour la communauté scientifique mais abstraite pour la plus grande partie de la communauté des utilisateurs : parvenir à rendre ce concept plus accessible, par exemple pour les écoliers et étudiants, constitue un défi.

Les comparaisons visant à établir la traçabilité métrologique sont effectuées en faisant voyager entre les participants des appareils sensibles ou des matériaux de référence. Cette façon de procéder est inévitablement chronophage et des problèmes de transport ont régulièrement lieu. D'autres problèmes sont liés aux procédures de douane, aux réglementations ou à des questions de sécurité.

Enfin, la thermométrie est considérée par nombre de personnes comme une science « ancienne » et peu d'étudiants choisissent cette voie. Un sujet de préoccupation est de savoir comment maintenir le savoir existant dans cette discipline spécifique, non seulement dans le domaine de la métrologie mais aussi dans le secteur manufacturier car la thermométrie est un élément fondamental pour la science et la technologie de haute précision. Il incombe à la communauté de la thermométrie de communiquer de façon plus claire sur l'importance de cette discipline.

Données sur le CCT

CCT établi en 1937

Président : Yuning Duan	Secrétaire exécutive : Susanne Picard
Composition :	24 membres et un observateur
Réunion depuis la 25e réunion de la CGPM :	1–2 juin 2017
Sept groupes de travail :	− Comparaisons clés − Coordination des CMCs − Stratégie − Thermométrie par contact − Thermométrie sans contact − Humidité − Environnement
Cinq sous-groupes de travail :	− Technologies émergentes − Guide en thermométrie − Grandeurs thermophysiques − CMCs en thermométrie sans contact − Incertitudes des cellules à points fixes à haute température en thermométrie sans contact

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s) [2019-2022]
Comparaisons clés du CCT (et comparaisons supplémentaires)	14 + (1)	9 + (2)	1
Comparaisons du BIPM[14]	0	0	0
Études pilotes du CCT	3	0	3
CMCs	2 688 CMCs en thermométrie publiées dans la KCDB (au 1er septembre 2018)		

47. Succès concernant les effets électriques quantiques et rapport du président du CCEM

M. Gert Rietveld, président du Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM), fait le point sur les succès concernant les effets électriques quantiques puis présente son rapport sur les activités du CCEM depuis la 25e réunion de la CGPM (2014).

Après avoir évoqué l'importance des mesures électriques au quotidien, M. Rietveld présente l'actuelle définition de l'ampère : « L'ampère est l'intensité d'un courant électrique qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur. » M. Rietveld souligne que cette définition ne mentionne pas l'électron. La mise en pratique de cette définition ne peut en aucun cas être meilleure que la réalisation du kilogramme fondée sur le prototype international du kilogramme : cela constitue un défi pour le CCEM qui s'est efforcé d'améliorer la définition de l'ampère pendant de nombreuses années.

[14] L'une des comparaisons terminées du CCT a été pilotée par le BIPM.

M. Rietveld note que des étalons quantiques de tension (effet Josephson) et de résistance (effet Hall quantique) existent mais qu'ils ne peuvent être reliés au SI qu'avec une exactitude de quelques 10^{-7}, alors que l'accord relatif entre les étalons quantiques de tension ou de résistance est meilleur que 10^{-10} et 10^{-9} respectivement. Cela a constitué un élément moteur pour changer la définition de l'ampère. Les récents développements dans le domaine des étalons quantiques, tels que les étalons de tension à effet Josephson en courant alternatif et les étalons utilisant l'effet Hall quantique dans le graphène, devraient permettre d'élargir leur gamme d'applications.

Certains des laboratoires membres du CCEM travaillent au développement d'un étalon quantique de courant fondé sur la manipulation d'électrons individuels. L'idée sous-jacente est que s'il est possible de manipuler un seul électron, il sera possible d'offrir une meilleure base à la définition de l'ampère. Un étalon de transport mono-électronique permettrait d'appliquer une certaine fréquence qui ferait se déplacer les électrons du dispositif, un par un. De récents progrès dans le domaine du transport mono-électronique ont permis d'atteindre une exactitude d'environ 2×10^{-7}.

M. Rietveld présente la balance de Kibble et explique le rôle qu'elle a joué dans la révision du SI. La balance de Kibble permet de compenser la force exercée par la gravité sur une masse par une force électrique. L'équation de Kibble compare le watt mécanique et le watt électrique (produit de la tension et du courant), ce qui permet d'établir un lien entre la masse macroscopique m et la constante de Planck h en mesurant les grandeurs électriques à l'aide d'étalons quantiques.

En fixant les valeurs numériques de la constante de Planck h et de la charge élémentaire e, les unités électriques sont de nouveau cohérentes avec le SI ; toutefois, les valeurs de h et e ne correspondront pas parfaitement aux valeurs conventionnelles de 1990 et le CCEM sera le seul Comité consultatif qui devra gérer les conséquences de faibles changements d'amplitude dus à la révision du SI. Le changement sera de 0,1 partie par million pour le volt et de 0,02 partie par million, donc inférieur, pour l'ohm. La nouvelle définition de l'ampère est la suivante : « L'ampère, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e, égale à $1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$ ». M. Rietveld précise que le CCEM a publié des articles et mené des actions de sensibilisation auprès de la communauté de ses parties prenantes afin d'expliquer comment gérer ces changements d'amplitude. Ces changements ne seront pas détectables pour les utilisateurs industriels, même si les laboratoires nationaux de métrologie ou les industries exploitant des étalons quantiques devront suivre les directives du CCEM concernant la mise en œuvre du SI révisé (document « CCEM Guidelines for Implementation of the Revised SI »).

M. Rietveld observe que l'avancée de la science de la mesure dépend avant tout de personnes. La communauté de la métrologie repose sur les découvertes de Brian Josephson et Klaus von Klitzing, à savoir l'effet Josephson et l'effet Hall quantique, qui sont la base de toutes les mesures électriques du CCEM. Il mentionne également Bryan Kibble, qui a joué un rôle crucial dans l'invention d'une balance du watt à bobine mobile, désormais appelée balance de Kibble, qui a permis d'établir le lien entre les étalons électriques et mécaniques. M. Rietveld remercie tous les scientifiques de la communauté de l'électricité et du magnétisme qui continuent à s'appuyer sur leur héritage et leurs inventions pour accomplir de nouveaux progrès et augmenter l'exactitude et l'applicabilité des mesures. Il se déclare fier d'être le président de cette vibrante communauté de chercheurs exceptionnels.

M. Rietveld conclut en remerciant les gouvernements qui ont apporté leur soutien financier et moral pour faire avancer les travaux sur les étalons quantiques et faciliter le travail sur la balance de Kibble. Il remercie en particulier tous les gouvernements qui ont investi dans le développement de balances de Kibble et qui continuent à le faire. La communauté de l'électricité et du magnétisme a opéré un

tournant quantique il y a trente ans, ce qui constituait la meilleure chose à faire ; toutefois, un problème demeure. La communauté de l'électricité et du magnétisme n'est pas totalement dans le SI : elle y est à 0,1 partie par million près. Ce problème ne peut être résolu de manière isolée. M. Rietveld indique que toutes les mesures ont été prises par les États Membres pour remédier à cette situation et qu'à l'exception d'un soutien moral et financier, c'est un vote en faveur de la révision du SI qui est ainsi requis.

Résumé du rapport du CCEM

Le CCEM couvre un domaine très vaste fondé sur un grand nombre d'étalons de mesure permettant de réaliser plusieurs unités dérivées et rapports de grandeurs électriques sur un grand domaine de fréquences. Depuis la 25e réunion de la CGPM, des mesures significatives ont été prises afin d'accroître l'impact et l'efficacité du CIPM MRA dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, principalement par une planification plus stratégique des comparaisons, par la mise en œuvre de matrices dans la présentation des CMCs et par l'introduction d'un processus d'examen plus efficace des CMCs. Le BIPM a continué à étayer la comparabilité mondiale des mesures dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, notamment par son programme de comparaisons clés en continu.

À la suite des conclusions de l'atelier du CCEM sur les futurs défis de la métrologie électrique organisé en 2017, une première discussion sur la révision de la stratégie du CCEM a permis de définir les nouvelles priorités pour le futur. Lors de la prochaine réunion du CCEM en mars 2019, une nouvelle stratégie du CCEM, fondée sur les conclusions de l'atelier, fera l'objet de discussions.

Au cours des quatre années passées, les efforts scientifiques ont principalement été consacrés à faire avancer les méthodes électriques de réalisation du kilogramme afin de préparer la révision proposée du SI. Un projet de mise en pratique a été élaboré pour l'unité électrique de base du SI, l'ampère, et les unités dérivés du SI une fois que le SI aura été révisé. Étant donné que la révision du SI impliquera un faible changement d'amplitude pour les mesures de tension et de résistance et pour les grandeurs dérivées associées, des directives du CCEM concernant la mise en œuvre du SI révisé ont été préparées afin d'aider la communauté de l'électricité à gérer ce changement d'amplitude.

Domaine de compétence du CCEM

Le CCEM a pour responsabilité d'apporter des conseils au CIPM sur tous les sujets se rapportant aux étalons de mesure dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, ainsi que sur les activités relatives à l'électricité et au magnétisme du programme de travail du Département de la métrologie en physique du BIPM.

L'électricité est omniprésente dans notre vie quotidienne et la métrologie électrique couvre un vaste domaine qui implique de nombreuses grandeurs et requiert de nombreux étalons de mesure d'unités dérivées. Il s'agit par exemple de mesurer une tension, un courant, une résistance, une capacité, une inductance, une puissance, un rapport de transformation, un transfert courant continu/courant alternatif, l'intensité d'un champ électrique ou magnétique, des facteurs d'antennes, des paramètres de répartition des radiofréquences (paramètres S). Dans de nombreux cas, ces grandeurs couvrent un très large intervalle de valeurs (des nanovolts aux mégavolts par exemple) et de fréquences (depuis le courant continu jusqu'aux radiofréquences), et nécessitent l'utilisation de différentes techniques selon l'intervalle sur lequel elles sont mesurées.

En raison des technologies très différentes requises dans les domaines des basses fréquences et des radiofréquences, le travail technique du CCEM est pris en charge par deux groupes de travail distincts : celui sur les basses fréquences et celui sur les radiofréquences.

Stratégie

L'actuel document de stratégie du CCEM a été développé en 2013 et se concentre sur deux points principaux : les futurs défis techniques en électromagnétisme et les besoins à venir en matière de comparaisons clés. Au début du processus d'examen de la stratégie du CCEM, un atelier sur les futurs défis de la métrologie électrique a été organisé le 23 mars 2017. Cet atelier a couvert les principaux thèmes et défis suivants (certaines présentations sont disponibles sur les pages internet du CCEM) :

- la technologie quantique,
- les laboratoires nationaux de métrologie et la métrologie sur puce,
- le nanomagnétisme et l'électronique de spin,
- les mesures électriques pour les dispositifs micro / nanoélectroniques,
- la métrologie électromagnétique à haute fréquence (des radiofréquences aux terahertz),
- la puissance électrique et les smart grids (réseaux électriques intelligents).

À la suite de cet atelier, la synthèse du document de stratégie du CCEM a été mise à jour afin de refléter les conclusions de l'atelier. Une part importante de la stratégie du CCEM est d'améliorer davantage l'efficacité et l'efficience du CIPM MRA par une planification stratégique des comparaisons clés, l'optimisation des examens des CMCs et la mise en œuvre des recommandations du Groupe de travail *ad hoc* du CIPM sur la mise en œuvre des recommandations établies lors de l'examen du CIPM MRA. La stratégie complète du CCEM est en cours d'examen et sera discutée au cours de la prochaine réunion du CCEM, les 28 et 29 mars 2019.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Principales activités

Deux réunions du CCEM se sont tenues entre 2015 et 2018, les 12 et 13 mars 2015 et du 22 au 24 mars 2017. Les rapports des réunions du CCEM, ainsi que la plupart des présentations et documents de travail, sont disponibles sur les pages internet du CCEM.

Lors des réunions du CCEM de 2015 et 2017, l'attention s'est focalisée sur les sujets liés aux constantes fondamentales et à la révision du SI. Le Groupe de travail du CCEM sur l'utilisation de mesures électriques pour contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme a présenté l'état de l'art au niveau mondial sur les balances du watt et leurs résultats de mesure concernant la constante de Planck h. Ce groupe de travail a par ailleurs organisé des réunions régulières rassemblant les scientifiques travaillant sur les expériences de balances du watt, en y invitant des représentants de la communauté de l'expérience d'Avogadro, afin de discuter en profondeur de sujets techniques. Le CCEM a fortement soutenu la proposition de renommer les balances du watt « balances de Kibble », en hommage à Bryan Kibble, l'inventeur de cet instrument essentiel pour la révision à venir du SI.

Le Groupe de travail du CCEM sur les projets de modifications au SI a rédigé deux documents importants. D'une part, un projet de mise en pratique a été élaboré pour l'unité électrique de base du SI, l'ampère, et les unités dérivés du SI une fois que le SI aura été révisé. D'autre part, étant donné que le SI révisé impliquera un faible changement d'amplitude pour les mesures de tension et de résistance et pour les grandeurs dérivées associées, des directives du CCEM concernant la mise en œuvre du SI révisé ont été préparées afin d'aider la communauté de l'électricité à gérer ce changement d'amplitude. Ces documents ont fait l'objet de discussions lors des réunions du CCEM et leur version finale a été approuvée par les membres du CCEM pour publication sur le site internet du BIPM.

Lors des réunions du CCEM, d'autres discussions sur la révision du SI ont porté sur le travail mené par le CCU, notamment la mise à jour de la 9e édition de la Brochure sur le SI (qui comprend la nouvelle définition de l'ampère), et sur les rapports du Task Group on Fundamental Constants de CODATA.

D'autres discussions importantes au sein du CCEM ont eu pour objet les progrès réalisés par les trois autres groupes de travail du CCEM, les comptes rendus sur le programme de travail des laboratoires d'électricité du BIPM, l'examen de la stratégie du CCEM et la façon d'améliorer l'efficacité du CIPM MRA.

En 2013, le CCEM était le Comité consultatif ayant le plus grand nombre de CMCs (environ 7 100) enregistrées dans la KCDB, ce qui reflète l'ampleur du domaine que couvre la métrologie de l'électromagnétisme. Toutefois, lors des cinq années qui ont suivi, les laboratoires nationaux de métrologie, encouragés par le Groupe de travail du CCEM sur la coordination des organisations régionales de métrologie, ont intégré de manière cohérente les matrices dans la présentation de leurs CMCs, réduisant ainsi le nombre de CMCs déclarées dans le domaine de l'électricité et du magnétisme de presque 40 % pour passer en dessous de 4 400 en novembre 2018. Cela a conduit à une diminution significative du travail de gestion des CMCs du CCEM et a simultanément permis aux utilisateurs de la KCDB, qui contient ces CMCs, de disposer d'une meilleure vue d'ensemble des CMCs.

De 2013 à 2018, le Groupe de travail du CCEM sur la coordination des organisations régionales de métrologie a optimisé le processus d'examen des CMCs. Toutes les CMCs en électricité et magnétisme continuent à être examinées au sein des organisations régionales de métrologie (examen régional). L'examen entre régions, toutefois, a considérablement été optimisé : au lieu que *toutes* les autres organisations régionales de métrologie procèdent à l'examen *complet* des CMCs d'une organisation régionale donnée, l'examen de ces CMCs est désormais divisé entre les organisations régionales de métrologie. Certaines CMCs relativement faciles peuvent même ne pas être sélectionnées par le président du Groupe de travail sur la coordination des organisations régionales de métrologie pour l'examen interrégional. La robustesse du processus d'examen entre les organisations régionales de métrologie est toujours garantie car n'importe quelle organisation régionale de métrologie est en droit de procéder à l'examen d'une CMC qui ne lui a pas été assignée pour examen par le président du Groupe de travail sur la coordination des organisations régionales de métrologie.

Depuis la 25e réunion de la CGPM, le CCEM a approuvé trois comparaisons clés du CCEM et 10 comparaisons clés des organisations régionales de métrologie ; il a examiné 15 comparaisons supplémentaires des organisations régionales de métrologie. Les laboratoires d'électricité du BIPM ont effectué 26 comparaisons bilatérales au cours de cette période.

La première série de comparaisons clés en électricité et magnétisme est achevée et un plan de programmation de comparaisons pour une seconde série a été élaboré avec soin. Dans le domaine des mesures aux basses fréquences, la liste existante de comparaisons clés est considérée comme appropriée (avec quelques modifications mineures de certains paramètres) et il a été décidé de répéter ces comparaisons au cours des dix prochaines années. Dans le domaine des mesures aux radiofréquences, il est généralement impossible de répéter l'ensemble des comparaisons du fait de ressources limitées et du très grand nombre de grandeurs. Le CCEM a donné une plus haute priorité aux comparaisons dans les bandes de fréquences qui n'ont pas encore été couvertes. Dans les deux domaines, des listes des futures comparaisons ont été établies jusqu'en 2022. Les premières nouvelles comparaisons ont été lancées.

L'une de ces comparaisons est la comparaison clé CCEM-K4 de capacité, pour laquelle un nouveau schéma de comparaison a été mis à l'essai : ainsi, tous les laboratoires nationaux de métrologie participants ont envoyé leurs étalons voyageurs au BIPM pour mesure. Ce « schéma en étoile » a permis de conduire la comparaison de manière très efficace : la durée totale, du début de la comparaison au rapport final approuvé, a été inférieure à deux ans, ce qui constitue un record dans le domaine de l'électricité et du magnétisme. Ce résultat n'aurait pas été possible sans l'engagement pris par le BIPM d'effectuer toutes les mesures et de coordonner l'ensemble des aspects logistiques.

La politique du CCEM consistant à mettre l'accent sur la science lors de ses réunions a été renforcée : les intervenants sont invités à faire des présentations sur les nouveaux développements métrologiques dans le domaine de la métrologie électrique. F. Schopfer (LNE) a ainsi donné une présentation sur les progrès réalisés concernant des étalons de résistance de Hall quantifiée à base de graphène accessibles aux utilisateurs, P. Hale (NIST) a parlé de la caractérisation des formes d'ondes et W. Poirier a évoqué le travail du LNE sur la réalisation pratique quantique de l'ampère. En outre, un atelier scientifique sur les futurs défis de la métrologie électrique a été organisé le 23 mars 2017 et six intervenants invités y ont participé. Il a été décidé de tenir un atelier scientifique similaire lors de la prochaine réunion du CCEM en 2019.

Le SCL (Hong Kong) et le NIS (Égypte) sont devenus observateurs au sein du CCEM en 2015 et 2017, respectivement, et le CENAM (Mexique) est devenu membre en 2015.

Défis et difficultés

Le CCEM doit répondre de façon adéquate aux nouveaux défis métrologiques dans le domaine de l'électricité et du magnétisme. À cette fin, la stratégie du CCEM sera révisée et mise à jour afin d'identifier les défis. En outre, des ateliers scientifiques seront organisés afin d'avoir une meilleure compréhension de ces défis et de parvenir à une approche efficace commune pour les relever.

L'efficacité des comparaisons clés reste un défi pour la communauté de l'électricité et du magnétisme. Suite au succès de la comparaison clé CCEM-K4, la question de savoir si un « schéma en étoile » similaire pourrait être utilisé pour d'autres comparaisons sera étudiée. Cela dépendra très certainement de la disponibilité des étalons voyageurs adéquats et de celle d'un coordinateur souhaitant être le laboratoire central du schéma en étoile et réalisant la plus grande majorité des mesures.

Le CCEM continuera à suivre la mise en œuvre efficace du CIPM MRA au cours des prochaines années. Actuellement, un examen des catégories de CMCs dans le domaine des hautes tensions est en cours afin de mieux les concilier avec l'état de l'art dans ce domaine et avec la pratique industrielle. Le processus d'examen des CMCs a été considérablement amélioré mais requerra des adaptations complémentaires. La mise en place de la KCDB2.0 au cours de l'année suivant la 26e réunion de la CGPM sera un progrès majeur pour le CCEM mais le CCEM devra y prêter une attention particulière et s'assurer d'une transition harmonieuse de l'ancienne à la nouvelle KCDB.

Perspectives à court terme et à long terme

Il est attendu que la révision du SI qui devrait être adoptée par la CGPM à sa 26e réunion donne une impulsion au développement des étalons quantiques car ils deviendront des réalisations directes des unités du SI. La tendance concernant ces étalons quantiques est de développer des systèmes compacts et simples, également faciles à utiliser pour les parties prenantes de l'industrie. Par ailleurs, le développement potentiel d'un étalon quantique de courant électrique ouvre de nouvelles possibilités passionnantes concernant la réalisation des unités du SI ; les progrès en la matière ont déjà été très significatifs au cours de ces quatre dernières années. La prolifération des étalons quantiques renforcera la pertinence des comparaisons bilatérales sur site d'étalons de tension à effet Josephson en courant continu et alternatif et d'étalons de résistance de Hall quantifiée menées par le BIPM.

La révision du SI requerra par ailleurs le développement de balances du watt fonctionnant en routine, ce qui nécessitera le développement d'étalons électriques plus économiques et plus fiables présentant les incertitudes les plus faibles possibles. Le besoin en matière de mesures électromagnétiques de précision afin de réaliser l'unité de masse, non seulement au niveau du kilogramme mais également pour des masses inférieures, exigera du CCEM qu'il continue à assumer son rôle en la matière.

Deux domaines qui évoluent rapidement et qui présentent des défis métrologiques en électricité et magnétisme ont déjà été mentionnés dans les comptes rendus de la 25e réunion de la CGPM : il s'agit

des réseaux électriques intelligents et du domaine des radiofréquences et des microondes. Ces deux domaines seront particulièrement suivis par le CCEM afin de garantir une réponse adéquate de la communauté de l'électricité et du magnétisme. L'atelier scientifique qui sera organisé parallèlement à la 31e réunion du CCEM en 2019 sera consacré aux radiofréquences et aux micro-ondes, avec la participation de représentants de l'industrie et de spécialistes des radiofréquences qui donneront un aperçu des développements les plus récents en la matière.

Données sur le CCEM

CCEM établi en 1927 (sous le nom de CCE, Comité consultatif d'électricité)

Président : G. Rietveld	Secrétaire exécutif : M. Stock
Composition :	25 membres et 3 observateurs
Réunions depuis la 25e réunion de la CGPM :	12-13 mars 2015, 22-24 mars 2017
Cinq groupes de travail :	– Coordination des organisations régionales de métrologie – Grandeurs aux basses fréquences – Grandeurs aux radiofréquences – Projets de modifications au SI – Utilisation de mesures électriques pour contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme

Activité en matière de comparaison	Terminée(s)	En cours	Programmée(s)
Comparaisons clés du CCEM (et comparaisons supplémentaires)	48[15]	6	20
Comparaisons du BIPM	1	9 (en continu)	9 (en continu)
Études pilotes du CCEM	0	1	2
CMCs	4 374 CMCs dans 194 catégories de service publiées dans la KCDB		

48. Succès de la mesure de *h* et rapport du président du CCM

M. Philippe Richard, président du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), fait le point sur les succès de la mesure de *h* puis présente son rapport sur les activités du CCM depuis la 25e réunion de la CGPM (2014).

Après avoir souligné l'importance du kilogramme et de ses unités dérivées dans la vie quotidienne, M. Richard rappelle que le prototype international du kilogramme est très soigneusement conservé au BIPM depuis près de 130 ans. Toutefois, le prototype international du kilogramme a ses limites : il permet la réalisation du kilogramme seulement au niveau de la valeur nominale de 1 kg ; il n'est pas possible de contrôler sa stabilité intrinsèque ; il peut être endommagé lors de son utilisation et il peut être contaminé à sa surface. Pour ces raisons, la nécessité de trouver une meilleure solution pour définir le kilogramme s'est imposée au fil du temps.

[15] dont 18 approuvées pour l'équivalence provisoire, avant 1999.

M. A. Danjon, président du CIPM à l'époque de la 11e réunion de la CGPM, déclarait en parlant du prototype international du kilogramme : « Il faut bien avouer que son invariabilité tient un peu du miracle. En pratique, on ne l'utilise que rarement de peur de l'altérer. Il y a là une faiblesse du système métrique à laquelle les métrologistes devront tôt ou tard porter remède. » Le miracle mentionné par le président du CIPM en 1960 aura ainsi duré plus de 130 ans.

Le CCM a suivi le processus de redéfinition du kilogramme et les progrès effectués dans les différents laboratoires depuis des dizaines d'années. Afin de gérer ce changement, le CCM a fixé des conditions à remplir et des recommandations à suivre avant de procéder à la redéfinition. Le CCM a également mis en place une feuille de route pour accompagner au mieux tous les acteurs vers le chemin de la redéfinition. M. Richard rappelle qu'il a déjà présenté une version précédente de cette feuille de route lors de la 25e réunion de la CGPM (2014).

M. Richard évoque brièvement la détermination de la constante de Planck *h*. La CGPM à sa 25e réunion (2011) a retenu *h* comme constante fondamentale de la physique à utiliser pour définir le futur kilogramme. Un certain nombre d'améliorations ont été réalisées depuis. En particulier, il existe deux types d'expérience qui ont relevé le défi de la détermination la plus exacte de cette constante. La première est la balance de Kibble, aussi connue sous le nom de balance du watt. Selon la revue *Nature*[16], la balance de Kibble est l'une des cinq expériences de la physique les plus difficiles au monde. On peut par exemple la comparer à un niveau de difficulté similaire à celle qui consiste à identifier le boson de Higgs. Trois balances de Kibble différentes dans des pays différents ont directement contribué à fixer la valeur finale de *h*, en comparant d'un côté la puissance électrique et d'un autre côté la puissance mécanique dans un système mécanique compliqué. Plusieurs autres expériences supplémentaires sont maintenant pratiquement terminées ; elles seront prêtes pour la réalisation du kilogramme en 2019. Le second type d'expérience consiste à compter les atomes dans une sphère de silicium et, en particulier, à déterminer la masse volumique d'un cristal de silicium à l'aide de rayons x (XRCD). Elle est aussi appelée « expérience d'Avogadro ». Ainsi, deux types d'expériences fondamentalement différentes, la balance de Kibble et l'expérience d'Avogadro, ont contribué ensemble à la fixation de la valeur finale de *h* qui définira le kilogramme une fois redéfini.

Il est important de rappeler les conditions que le CCM avait fixées et les recommandations qui devaient être suivies avant de procéder à la redéfinition du kilogramme. Il s'agissait de garantir la cohérence des résultats des différentes expériences, de garantir un niveau d'incertitude aussi bas que possible pour la détermination de *h*, de garantir le chemin de traçabilité le plus court possible entre le kilogramme prototype international et *h*, de définir clairement les procédures pour la réalisation du kilogramme dans la mise en pratique et d'assurer leur compatibilité avec les principes du CIPM MRA. En conclusion, le CCM, le CCU, le CCEM et le CIPM ont constaté que toutes les conditions qui avaient été fixées par chacun des comités étaient globalement remplies, ce qui ouvrait la voie à la décision de redéfinir le kilogramme.

M. Richard souligne que grâce à une excellente planification et des efforts intenses, le CCM et l'ensemble de la communauté de la métrologie ont atteint leur objectif de relier le kilogramme à *h*. Il décrit les principaux avantages du kilogramme révisé. Parmi les plus importants, la stabilité à long terme de l'unité est maintenant garantie. La nouvelle définition ouvre également la voie à des améliorations futures des réalisations du kilogramme, fondées sur *h*, avec l'amélioration des instruments et avec la possibilité de créer de nouvelles méthodes de réalisation différentes. Par ailleurs, la nouvelle définition permet la réalisation de l'unité en tout lieu et ceci à différentes valeurs nominales. Elle permet également aux unités électriques de réintégrer le SI (voir point 47 de l'ordre du jour).

---

[16] Jones N., Frontier experiments: Tough science, five experiments as hard as finding the Higgs, 2012, *Nature*, **481**(7379), 14-17.

Résumé du rapport du CCM

Le CCM dispose de groupes de travail actifs qui couvrent des domaines métrologiques variés, tels que la réalisation de l'unité de masse, la dissémination de l'unité de masse, la masse volumique et la viscosité, la force et le couple, la pression et le vide, le débit de fluides, la dureté et l'accélération gravitationnelle. Le Groupe de travail du CCM sur la stratégie et la coordination du MRA a pour objectif de fournir des orientations quant à la coordination et à l'harmonisation de ces activités.

La plus grande part de l'activité du CCM consiste actuellement à préparer la transition de l'actuelle définition du kilogramme à une nouvelle définition en suivant une feuille de route élaborée afin d'organiser le travail requis. Toutefois, tous les groupes de travail du CCM ne sont pas concernés par ce changement mais tous ont pour mission d'améliorer les aptitudes techniques existantes ou de développer de nouvelles aptitudes.

Domaine de compétence du CCM

Les activités du CCM concernent les questions liées aux comparaisons d'étalons de masse par rapport au prototype international du kilogramme, aux éléments ayant une répercussion sur la définition et la réalisation de l'unité de masse, à l'établissement de l'équivalence internationale entre les laboratoires nationaux pour la masse et pour un certain nombre de grandeurs apparentées (masse volumique, pression, force, débit de fluides, viscosité, dureté, accélération gravitationnelle), ainsi que les conseils donnés au CIPM sur les activités précédemment mentionnées.

Stratégie

Une révision importante de la stratégie du CCM a été réalisée par le Groupe de travail sur la stratégie et la coordination du MRA en 2017. Le plan stratégique du CCM pour les années 2017 à 2027, ainsi que son résumé, sont disponibles sur les pages du CCM du site internet du BIPM.

Les principaux thèmes, défis et actions décrits dans le document de stratégie sont les suivants :

- coordonner la transition de l'actuelle définition à la nouvelle définition du kilogramme ;
- assurer la dissémination cohérente de l'unité de masse après sa redéfinition ;
- suivre les développements techniques dans les domaines du CCM qui ne sont pas directement affectés par la redéfinition du kilogramme ;
- améliorer l'efficacité du fonctionnement du CCM en définissant des plans d'actions clairs et une méthode structurée de rédaction des comptes rendus ;
- améliorer davantage l'efficience et l'efficacité des examens des comparaisons clés et des CMCs en mettant en œuvre les recommandations clés établies lors de l'examen du CIPM MRA ;
- encourager des vues communes entre les comités consultatifs et avoir pour objectif une coordination améliorée du travail entre les comités consultatifs.

Plusieurs de ces points sont présentés dans les sections suivantes.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Principales activités

Deux réunions du CCM se sont tenues entre 2015 et 2018, l'une les 26 et 27 février 2015 et l'autre les 18 et 19 mai 2017. Les rapports des réunions du CCM et la majorité des présentations et documents de travail sont disponibles sur les pages internet du CCM. Les progrès effectués pour chacune des tâches comprises dans la feuille de route élaborée conjointement par le CCM et le CCU, à partir de la feuille de route du CCM de 2013, ont été passés en revue au cours de ces réunions. Ces réunions ont par ailleurs permis de constater les progrès accomplis au sein du CCM concernant la rédaction de la version finale

de la mise en pratique de la définition du kilogramme et la formulation de deux recommandations du CCM, en particulier la Recommandation G 1 (2017) du CCM pour une nouvelle définition du kilogramme en 2018. Cette recommandation a été officiellement présentée au CIPM et approuvée.

En prévision de la redéfinition du kilogramme, une campagne d'étalonnage des masses avec le prototype international du kilogramme a été réalisée au BIPM. Une étude pilote d'étalonnage d'étalons de masse de 1 kg à l'aide des futures expériences de réalisation du kilogramme a été effectuée avec succès. Les résultats de la campagne d'étalonnage et de l'étude pilote ont été publiés dans *Metrologia* et sont disponibles sur les pages internet du CCM. La première comparaison clé des réalisations du kilogramme, une fois l'unité de masse redéfinie, est en cours d'organisation.

Un numéro spécial de *Metrologia* sur la réalisation, la conservation et la dissémination du kilogramme a été coordonné par le Groupe de travail sur la réalisation du kilogramme. Les premières contributions ont été publiées en ligne en 2016. Ce numéro spécial contient des articles techniques sur la mise en pratique de la nouvelle définition du kilogramme. Une note succincte sur la procédure de dissémination du kilogramme après sa redéfinition a été rédigée. Un document d'orientation plus détaillé, destiné aux membres du CCM et aux laboratoires nationaux de métrologie, est en cours de rédaction. Une déclaration commune des Comités consultatifs sur la révision proposée du SI est disponible, tout comme une déclaration du CCM sur la redéfinition du kilogramme. Un nouvel onglet répertoriant des liens concernant la future redéfinition du kilogramme a été créé sur la page internet du CCM. Par conséquent, l'ensemble des documents clés mentionnés précédemment, ainsi que d'autres documents sur cet important changement, sont aisément accessibles.

En 2015 et 2016, le président du CCM a tenu divers séminaires et donné des présentations afin de promouvoir et mieux faire connaître la redéfinition du kilogramme, en Allemagne, en Chine et au Japon, ainsi que lors de la conférence internationale NCSLI de 2015 aux États-Unis et lors la 21e conférence internationale IMEKO de 2015 en République tchèque.

Un Sous-groupe de travail sur les phases de la dissémination du kilogramme après sa redéfinition a été créé par le président du CCM au début de 2018. Le sous-groupe s'est réuni pour la première fois en juillet 2018 au cours de la CPEM (Conference on Precision Electromagnetic Measurements). Les termes de référence et la composition des groupes de travail du CCM ont été révisés. Les groupes de travail disposent désormais de termes de référence communs couvrant les comparaisons clés et les CMCs et incluent dans leur composition, en tant que membres de droit, les présidents des comités régionaux ou leurs représentants. En outre, deux groupes de travail ont changé leur nom afin de mieux refléter les activités qu'ils menaient et les questions qu'ils examinaient.

Le NIS (Égypte) est devenu observateur du CCM en 2015 et le DFM (Danemark) est devenu membre en 2017.

Une importante activité du CCM depuis la 25e réunion de la CGPM en 2014 a été de fournir des conseils au cours de l'examen complet du CIPM MRA. Par ailleurs, le CCM a identifié que des directives et des modèles supplémentaires étaient nécessaires afin d'améliorer l'efficience de l'examen des comparaisons clés et des CMCs au sein du CCM. Le document du CCM sur l'approbation et la publication des rapports finaux des comparaisons clés et supplémentaires (« CCM Guidelines for approval and publication of the final reports of key and supplementary comparisons ») a été révisé. Les révisions effectuées apportent pour l'essentiel des clarifications concernant la production des rapports de comparaisons et leur impact sur les déclarations de CMCs. Un modèle de rapport pour les comparaisons clés comprenant des explications et exemples détaillés a été créé. Le document du CCM sur la déclaration et l'examen des CMCs (« CCM Guidelines for Submission and Review of CMCs ») a été achevé. Ce document récapitule les principes généraux permettant une approche efficiente et efficace de l'examen des CMCs au sein du CCM. Des documents spécifiques d'orientation,

qui s'appliquent aux mesurandes, sont en cours de développement par les groupes de travail du CCM. Tous ces documents d'orientation sont publiquement accessibles sur les pages internet du CCM. En outre, un examen de l'ensemble des comparaisons du CCM a été conduit : ainsi, 33 comparaisons clés du CCM ont été étudiées. Des directives sont nécessaires sur les méthodes appropriées de calcul des valeurs de référence des comparaisons clés, sur des graphiques ou modèles logiciels utiles pour calculer ces valeurs de référence et sur la façon de traiter les conséquences de l'instabilité d'étalons de transfert. Un logiciel de calcul de consensus du NIST est actuellement testé par les groupes de travail du CCM concernant le calcul de la valeur de référence d'une comparaison clé.

Défis et difficultés

La communauté des masses est confrontée à des défis majeurs liés à la mise en œuvre de la redéfinition du kilogramme après son adoption en novembre 2018. Les différentes communautés qui ont des préoccupations légitimes à ce sujet devant être prises en considération sont les suivantes : les laboratoires nationaux de métrologie qui ont mis au point une réalisation appropriée de la nouvelle définition du kilogramme ; ceux travaillant sur une telle réalisation ; tous les autres laboratoires nationaux de métrologie ; la communauté de la métrologie légale ; les fabricants de balances et de poids ; la communauté des organismes de réglementation ; les enseignants en science ; ainsi que le public intéressé.

La question la plus fondamentale est celle de la gestion des différentes phases de la dissémination du kilogramme une fois redéfini, en particulier de la phase de dissémination à l'aide d'une valeur de consensus tel que requis par la Recommandation G 1 (2017) du CCM et sa transition pour passer à une dissémination à partir des réalisations individuelles. Un certain nombre de questions techniques doivent être résolues, telles que le calcul de la valeur de consensus et le fait de réduire la dispersion des résultats obtenus à l'aide des expériences de réalisation.

Les activités du CCM couvrent une large communauté d'intérêts, comme le reflète la diversité de ses groupes de travail techniques. Seul un petit nombre de ces groupes de travail sont profondément concernés par la redéfinition du kilogramme, c'est pourquoi il est important de prêter attention à d'autres thèmes majeurs tels que la métrologie des mesures dynamiques de force et de pression ou les nouveaux instruments spécifiques à d'autres domaines techniques.

D'autres difficultés plus courantes doivent également continuer à être examinées. Il s'agit par exemple de réduire les retards qui peuvent survenir lors de la conduite de comparaisons clés et lors de la production des rapports de leurs résultats.

Perspectives à court terme et à long terme

À la fin de l'année 2019, le CCM aura tenu sa 17e réunion (16-27 mai 2019) à la suite des réunions de la plupart de ses groupes de travail (organisées plus tôt la même semaine), dont celui sur la stratégie et la coordination du MRA. Les principaux objectifs de cette réunion plénière du CCM sont les suivants :

- approuver le document d'orientation détaillé sur la procédure de dissémination du kilogramme après sa redéfinition,
- approuver le protocole de la première comparaison clé des réalisations primaires de la nouvelle définition du kilogramme,
- nommer/renommer l'ensemble des présidents des groupes de travail.

Comme pour les 15e et 16e réunions du CCM, il sera demandé à chaque membre du CCM de rédiger un rapport succinct sur les activités scientifiques pertinentes ayant été menées et de le transmettre à la secrétaire exécutive du CCM préalablement à la réunion. Un changement par rapport à la pratique établie sera d'organiser une demi-journée de réunion qui sera consacrée aux nouvelles activités et évolutions dans des domaines métrologiques d'intérêt pour le CCM.

D'ici la fin de 2020, le CCM espère achever la première comparaison clé des réalisations primaires de l'unité de masse, le kilogramme, et calculer la première valeur de consensus pour la dissémination de l'unité de masse.

Sur le long terme, c'est-à-dire à compter de 2022, le CCM espère renforcer l'infrastructure sur laquelle se fondera la nouvelle définition du kilogramme en contribuant à atteindre les objectifs suivants :

- gérer la phase de dissémination à partir de la valeur de consensus et la transition à la dissémination fondée sur les réalisations individuelles de l'unité de masse ;
- réduire la dispersion des résultats obtenus à l'aide des réalisations de l'unité de masse ;
- garantir la disponibilité permanente d'un nombre suffisant de réalisations primaires de l'unité de masse ;
- garantir le maintien au BIPM d'un ensemble d'étalons de masse afin de faciliter la dissémination de l'unité de masse ;
- développer des appareils permettant de réaliser le kilogramme à partir de la constante de Planck qui soient moins onéreux et plus facilement manipulables (et également des appareils fondés sur de nouvelles idées, autres que la balance de Kibble et la méthode XRCD) et utilisés par les laboratoires nationaux de métrologie ;
- développer des instruments commerciaux pour la réalisation du kilogramme et ses sous-multiples qui seront utilisés dans les laboratoires nationaux de métrologie à court terme et par un nombre de plus en plus important d'utilisateurs finaux sur le plus long terme ;
- continuer à développer les activités scientifiques et techniques des groupes de travail du CCM conformément à la stratégie du CCM et aux plans d'action de ses groupes de travail.

Données sur le CCM

CCM établi en 1980	
Président : P. Richard	Secrétaire exécutive : H. Fang
Composition :	23 membres et 6 observateurs
Réunions depuis la 25e réunion de la CGPM :	26-27 février 2015, 18-19 mai 2017
Neuf groupes de travail :	− Stratégie et coordination du MRA − Réalisation du kilogramme − Dissémination du kilogramme − Masse volumique et viscosité − Force et couple − Pression et vide − Débit de fluides − Dureté − Gravimétrie

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s)
Comparaisons clés du CCM (et comparaisons supplémentaires)	91	8	4
Comparaisons du BIPM	0	0	0
Études pilotes du CCM	2	4	1
CMCs	2 802 CMCs dans 36 catégories de service publiées dans la KCDB		

Le président de la CGPM remercie les présidents des Comités consultatifs pour leur rapport et ouvre la discussion.

M. Phillips observe qu'une redéfinition de la seconde sera nécessaire et il est clair qu'il est possible de réaliser des mesures de temps et de fréquence bien meilleures que celles permises par la présente définition du SI. Cela a déjà été le cas au cours de l'histoire du SI ; des changements de technologie ont permis de mieux mesurer des éléments que les définitions ne le permettaient. Ces nouvelles définitions proposées vont changer cette situation : les définitions devraient être valables en permanence et les améliorations technologiques permettront d'améliorer leurs réalisations. Il estime que ce n'est pas le cas actuellement pour le temps et que ça pourrait ne pas être le cas pour la seconde, même avec la redéfinition proposée. M. Ullrich répond que la communauté de la métrologie attend avec intérêt la redéfinition de la seconde. Actuellement, la fréquence utilisée dans la définition de la seconde est celle qui peut être réalisée avec la plus grande exactitude. La masse de l'électron aurait pu être utilisée pour définir le temps mais fournirait une incertitude insuffisante. Le SI est un système pratique au sein duquel la seconde est le seul élément qui peut être davantage amélioré.

Mme Lagauterie (France) remercie les conférenciers pour la qualité de leur présentation et souhaite ajouter un complément d'information. Elle souligne les efforts réalisés concernant la balance de Kibble par le laboratoire national de métrologie de trois États : le NIST pour les États-Unis, le CNRC pour le Canada et le LNE pour la France.

Un délégué remercie les conférenciers pour leur présentation. Il mentionne le théorème d'incomplétude de Gödel, qui est un théorème fondamental de la logique mathématique. Le théorème indique que rien ne peut être universel et vrai en même temps, ce qui signifie que ce système, même à présent, ne peut être universel et vrai. Il observe que des discussions avec M. Quinn et M. Ullrich ont permis de conclure que le SI révisé ne durerait pas de façon indéfinie mais qu'il fonctionnerait pour une longue période et qu'il est bien meilleur que l'actuel SI, comme cela a été démontré en profondeur par les conférenciers. M. Ullrich répond que bien que cela soit fondamentalement correct, les définitions du kilogramme, de l'ampère et des unités électriques se fondent désormais sur la nature quantique de l'environnement. Il ajoute que quelles que soient les théories qui se développeront dans le futur, il ne sera pas possible de mesurer une masse macroscopique à une incertitude inférieure à un atome. Il pourra être possible de mesurer de plus faibles masses, par exemple la masse de l'électron, et ça pourrait être aussi le cas pour le courant. Les nouvelles définitions ont été élaborées de façon à pouvoir avoir recours à des réalisations améliorées.

M. Louw (président du CCRI et membre du CIPM) indique qu'aucune des unités utilisées par la communauté des rayonnements ionisants ne sont redéfinies *per se* lors de cette réunion. Le domaine des rayonnements ionisants mesure le taux de désintégration en becquerels, qui est « par seconde », mais utilise bien le kilogramme. Il rappelle les discussions sur les matériaux de référence pour la surveillance de l'environnement (voir point 39 de l'ordre du jour) et observe qu'il est nécessaire pour déterminer et contrôler la radioactivité des sols et de l'eau d'avoir des méthodes de préparation fondées sur la masse. La redéfinition du kilogramme a ainsi des répercussions importantes sur la médecine nucléaire et la surveillance de l'environnement. Il demande au président du CCM s'il peut donner un exemple pratique de la façon dont la redéfinition du kilogramme va influencer ces types de mesures de masse, en considérant qu'après la redéfinition, l'actuel prototype international du kilogramme aura une incertitude d'environ 10 µg. Il demande comment cela influencera en pratique la détermination de la masse. M. Richard répond que c'est une question complexe qui nécessite de comprendre la future dissémination du kilogramme. Il n'y aura pas de différence notable dans l'utilisation pratique du kilogramme et de nombreux laboratoires nationaux de métrologie ont déjà les aptitudes de mesure requises, avec l'exactitude nécessaire voire meilleure. Pour des applications spécifiques, il deviendra possible d'avoir une stabilité absolue du kilogramme sur de longues périodes, ce qui est un avantage. Il sera également possible de réaliser directement le kilogramme à

l'aide d'instruments spécifiques. Par exemple, pour les très faibles masses, il sera possible, en principe, d'entrer la valeur de *h* dans un instrument et d'obtenir une réalisation pratique, ce qui est aussi un avantage pour d'autres communautés. Frank Härtig (PTB) ajoute que l'un des défis de la nouvelle définition du kilogramme est de déterminer de très faibles masses. La limite des instruments de mesure actuels est de l'ordre de plusieurs microgrammes. Si un instrument amélioré est développé et qu'il permet de peser de plus faibles masses, cela sera désormais possible avec la nouvelle définition proposée. M. Ullrich indique que la nouvelle définition du kilogramme permet de mesurer des masses atomiques à un haut niveau d'exactitude, par exemple à l'aide d'expériences de la mesure du recul atomique. La difficulté concerne les masses qui sont entre ce niveau et le kilogramme. Il ajoute que c'est un défi technique et il est confiant envers le fait que de nouveaux dispositifs seront développés et permettront de remédier à cette situation. Il rappelle que les balances de Kibble sont aussi conçues pour pouvoir effectuer la pesée de très faibles masses et qu'il y aura probablement d'autres innovations dans le futur. M. Richard déclare qu'il est actuellement possible de réaliser le kilogramme au niveau de 1 kg en utilisant le prototype international du kilogramme conservé à Sèvres. Cela est plus difficile lorsque l'on descend aux sous-multiples 500 g, 200 g, 100 g et ainsi de suite, jusqu'à 1 mg. Dans certains laboratoires, il est possible de mesurer jusqu'à 0,1 mg. Toutefois, à chaque échelon, il y a une certaine perte d'exactitude et il n'est pas possible, à l'heure actuelle, d'aller en deçà de 0,1 mg.

M. Usuda (Japon et membre du CIPM) évoque les commentaires concernant le fait que le succès de la révision du SI n'aurait pas été possible sans le soutien du gouvernement de chaque État Membre. La révision du SI n'est pas un but en soi ; c'est le point de départ de nouveaux travaux et M. Usuda espère que les gouvernements continueront à apporter leur soutien. M. Henson (BIPM) saisit cette occasion pour remercier les gouvernements pour leurs investissements et les enjoint de nouveau à poursuivre dans cette voie. Il souligne qu'investir dans le BIPM est l'un des meilleurs investissements qu'un gouvernement puisse faire. L'histoire a prouvé que les améliorations apportées au Système international d'unités ont permis de faire avancer de façon formidable les technologies, cela a notamment permis le développement de la navigation GPS, d'internet et des systèmes bancaires modernes. Chaque fois que des aptitudes de mesure sont améliorées grâce à des développements, cela fait progresser l'innovation technologique.

M. Himbert (France) souligne que le défi que constitue le fait d'enseigner les changements au SI à des étudiants, quel que soit leur niveau, demeure. Des efforts considérables ont déjà été effectués afin d'expliquer les raisons de la révision du SI et la nature de ce changement, et il est important de relever le défi de l'enseignement du SI qui repose sur deux aspects. Le premier est de promouvoir le SI auprès du grand public, en tout lieu, même si, comme cela a été mentionné, les redéfinitions représentent un changement significatif qui n'aura pas d'impact dans la pratique. En outre, la publicité qui est faite autour des redéfinitions constitue une occasion formidable de faire connaître à un grand nombre de personnes le concept de « monde quantique ». M. Ullrich partage l'avis de M. Himbert et indique que le CIPM a mis en place un Groupe de travail du CIPM sur la promotion du SI visant à atteindre cet objectif. Il remercie les laboratoires nationaux de métrologie et tous ceux qui ont contribué à cet effort de promotion et observe que les informations sur les activités de promotion sont disponibles sur le site internet du BIPM. Il convient qu'il est utile de faire passer le message concernant la nature quantique de notre monde. M. Mukhufhi (Afrique du Sud) ajoute qu'un projet est en cours en Afrique du Sud visant à collaborer avec les universités, qui ont l'enseignement dans leur programme, mais le but est aussi de collaborer avec des élèves du secondaire ou des élèves encore plus jeunes.

M. Frøystein (Norvège), en qualité de président de l'EURAMET, appuie les observations faites par Mme Lagauterie, M. Usuda et le président du CCEM en remerciant les laboratoires nationaux de

métrologie et les gouvernements du monde entier. En tant que président de l'EURAMET, il remercie en particulier l'Union européenne et les États Membres du Programme européen de recherche en métrologie (European Metrology Research Programme - EMRP) qui existe depuis 2007. L'EMRP est une initiative commune en cours qui consacre des ressources considérables à la recherche métrologique, non seulement en ce qui concerne le développement fondamental du SI mais aussi l'innovation industrielle et la métrologie visant à résoudre certains des grands défis dans le domaine de la santé, de l'environnement et de l'énergie. Il précise que la collaboration concernant ces projets s'étend à des partenaires venant d'autres parties du monde.

Séance publique

Le président de la CGPM ouvre la partie de la séance publique qui est retransmise en direct en webcast. Il présente la courte vidéo intitulée « Scientists to vote on Metric Makeover », qui est diffusée aux délégués. Il donne ensuite l'allocution suivante :

> « C'est avec un immense plaisir que j'ouvre la séance publique qui sera retransmise en webcast et qui sera donc disponible dans le monde entier. Je suis très heureux de mentionner que nous avons dans cet auditorium les éminents délégués de quelques 60 États, un certain nombre de présidents, directeurs et scientifiques de laboratoires prestigieux, la presse et des étudiants d'université ou du secondaire.
>
> Je suis Sébastien Candel de l'Académie des sciences. La Conférence générale des poids et mesures, cette conférence, est traditionnellement présidée par le président de l'Académie en exercice et c'est un grand honneur d'assumer cette fonction. Cette tradition a été adoptée en raison du rôle majeur qu'a joué l'Académie des sciences afin de définir le mètre et mettre en place ce qui allait devenir le système métrique. La définition du mètre est liée aux noms de Condorcet, de Borda, Lagrange, Laplace, Monge et à ceux de Delambre et Méchain. Ces deux scientifiques ont en effet mesuré le quart du méridien terrestre et cette mesure a ensuite été utilisée pour définir le mètre, qui a été présenté à l'Assemblée nationale en 1799 sous la forme d'un étalon en platine iridié dédicacé « à tous les temps, à tous les peuples ».
>
> Près de 75 ans plus tard, en 1875, la Convention du Mètre a établi le BIPM, le Bureau international des poids et mesures. Le directeur du BIPM se trouve à ma droite. La principale mission du BIPM est d'assurer et de promouvoir la comparabilité et l'harmonisation mondiale des mesures, notamment en fournissant un Système international d'unités cohérent. Le président du CIPM est à ma gauche. Le BIPM, représenté ici par le directeur, et les délégués participant à cette conférence vont procéder à un changement historique du Système international d'unités.
>
> Nous sommes désormais au dernier jour de la 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures. Ce jour va constituer un tournant dans la définition des unités du système international. Ce changement peut être surprenant mais il s'inscrit dans la suite logique des changements précédemment apportés au SI. Le Système international d'unités, le SI, va être reformulé en partant des constantes fondamentales de la physique. Cela lui conférera davantage de cohérence et d'harmonie par rapport à la physique quantique et relativiste et aux technologies métrologiques quantiques les plus avancées.
>
> Ce webcast se compose de quatre conférences d'honneur qui seront données par : Klaus von Klitzing, lauréat du prix Nobel de physique en 1985, de l'Institut Max Planck à Stuttgart, Allemagne ; Jean-Philippe Uzan de l'Institut d'astrophysique de Paris, directeur de recherche au CNRS ; Jun Ye de JILA à Boulder, Colorado, États-Unis d'Amérique ; et William Phillips,

lauréat du prix Nobel de physique en 1997, du National Institute of Standards and Technology à Gaithersburg, États-Unis d'Amérique.

Avant de laisser la parole à Klaus von Klitzing, je souhaite préciser qu'après ces conférences d'honneur, le directeur du BIPM, Martin Milton, présentera le projet de résolution sur la révision du Système international d'unités puis il sera procéder au vote. Permettez-moi d'abord de demander à Klaus von Klitzing de venir à la tribune.

Klaus von Klitzing est un physicien allemand connu dans le monde entier pour sa découverte de l'effet Hall quantique entier qui lui a valu le prix Nobel de physique en 1985.

M. von Klitzing a publié son premier article sur les semi-conducteurs en 1971. Il a conduit des travaux de recherche sur les effets des champs magnétiques intenses sur les semi-conducteurs à l'Université de Würzburg où il a obtenu en 1972 son doctorat sur les propriétés galvanomagnétiques du tellure dans des champs magnétiques intenses sous la direction de Gottfried Landwehr. Il a poursuivi ses travaux de recherche au Laboratoire Clarendon de l'Université d'Oxford de 1975 à 1976, ce qui lui a permis d'avoir accès aux équipements requis. Pour cette même raison, il est parti travailler au Laboratoire des champs magnétiques intenses de l'Institut Max von Laue-Paul Langevin à Grenoble, France, de 1979 à 1980. C'est au sein de ce laboratoire qu'il a découvert les valeurs quantiques de l'effet Hall ainsi que la constante de von Klitzing

$$R_K = h / e^2 = 25\,812{,}807\,449(86)\Omega.$$

De 1980 à 1984, il a travaillé à l'Université de Munich puis il est devenu en 1985 directeur de l'Institut Max Planck de recherche sur l'état solide à Stuttgart.

L'importance de la découverte de von Klitzing en 1980 a immédiatement été reconnue par la communauté scientifique. Ses expériences ont permis à d'autres scientifiques d'étudier les propriétés conductrices de composants électroniques avec une extraordinaire précision. Ses travaux ont également contribué à déterminer la valeur précise de la constante de structure fine et d'étalons pertinents pour la mesure de la résistance électrique. Klaus von Klitzing, merci. »

49. L'effet Hall quantique et le SI révisé

M. Klaus von Klitzing commence par déclarer qu'il a donné de nombreuses conférences plénières mais que celle qu'il présente à la CGPM constitue l'un des points marquants de sa carrière scientifique car le 16 novembre 2018 est un jour historique pour la métrologie. La communauté de la métrologie a l'occasion de faire devenir réalité la vision de Max Planck sur la physique quantique qu'il a expliquée dans un ouvrage publié en 1900. Cet ouvrage comprend un chapitre sur les constantes fondamentales dont est extraite la phrase suivante : « *It offers the possibility of establishing units for length, mass, time and temperature which are independent of specific bodies or materials and which necessarily maintain their meaning for all time and for all civilizations, even those which are extra-terrestrial and nonhuman, constants which therefore can be called fundamental physical units of measurement.* » M. von Klitzing précise que Max Planck sera au centre de sa présentation et que l'année 2018 marque le centenaire du prix Nobel de physique décerné à Max Planck. Il existe un lien étroit entre les lauréats du prix Nobel et la métrologie : la réalisation de mesures de haute précision peut mener à de nouvelles découvertes.

M. von Klitzing indique que la révision du Système international d'unités est parfois citée comme la plus grande révolution en métrologie depuis la Révolution française qui a conduit à l'instauration du système métrique et à celle plus renommée du mètre et du kilogramme. Il est bien connu que le SI compte sept unités de base (la seconde, le mètre, le kilogramme, le kelvin, l'ampère, la candela et la mole) mais, pour les non-scientifiques, il n'est pas toujours évident que l'ensemble des grandeurs des domaines de la chimie, de la physique aux hautes énergies ou de la biologie puisse être relié à ces sept unités de base. Ces unités de base doivent ainsi reposer sur des fondements solides. Jusqu'à aujourd'hui, le kilogramme était fondé sur un prototype, le kelvin sur le point triple de l'eau et l'ampère sur la force entre des conducteurs parallèles traversés par un courant électrique. Le 16 novembre 2018 va marquer un profond changement pour ces unités.

M. von Klitzing rappelle deux étapes majeures de la révision du SI, à savoir la publication de l'article « Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come » en 2005 et la réunion « The new SI: units of measurement based on fundamental constants » organisée à la Royal Society à Londres les 24 et 25 janvier 2011, lors de laquelle il a été discuté du fait de redéfinir le kilogramme en fixant la valeur numérique de la constante de Planck, ainsi que l'ampère, le kelvin et la mole en fixant respectivement les valeurs numériques de la charge élémentaire, de la constante de Boltzmann et de la constante d'Avogadro. Il ajoute que la communauté de la métrologie a consacré du temps et des efforts considérables au cours des dix années passées, voire plus, afin de trouver de nouvelles méthodes pour relier les expériences et les unités utilisées dans ces expériences aux constantes fondamentales. La découverte du laser a permis d'effectuer des mesures de haute précision de la vitesse de la lumière et depuis 1983, la valeur de la vitesse de la lumière a été fixée, ce qui a constitué un point de départ pour la révision du SI.

M. von Klitzing évoque de nouveau Max Planck et son idée originale d'unités naturelles, les « unités de Planck » (la longueur, la masse, le temps et la température de Planck), et son utilisation de la constante de Boltzmann pour expliquer le rayonnement du corps noir. En dépit de valeurs qui n'étaient pas utiles pour des applications pratiques, telles que 10^{32} kelvins ou 10^{-33} centimètres, les unités de Planck avaient des applications pratiques et établissaient une relation pratique entre les constantes fondamentales et les unités. La communauté de la métrologie est désormais prête à mettre en place un nouveau système de mesure fondé sur des constantes de la nature et ces constantes joueront un rôle essentiel.

M. von Klitzing évoque le point principal de sa présentation, l'effet Hall quantique et le SI révisé, en se concentrant sur les unités électriques. L'effet Hall quantique et l'effet Josephson constituent ensemble un élément moteur de la révision du SI fondée sur des constantes de la nature. Le travail novateur de Brian Josephson est fondamental en ce qui concerne les unités électriques quantiques. À l'âge de 23 ans, Brian Josephson a fait une découverte théorique très importante, permettant une nouvelle réalisation d'une tension exacte ; son article « *Possible new effects in superconductive tunnelling* »[17] a été publié en 1962. Il a reçu le prix Nobel de physique en 1973 pour sa prédiction théorique des propriétés des super courants à travers une barrière tunnel, en particulier les phénomènes habituellement connus sous le nom d'effets Josephson.

La découverte de Josephson a ouvert la voie à une nouvelle façon de produire des tensions exactes et a constitué le premier phénomène quantique dans le domaine de l'électricité qui pouvait être utilisé pour la métrologie. Cela a été une découverte fondamentale et des expériences ont été effectuées pour déterminer son universalité. En utilisant différents matériaux, il a été observé que des tensions peuvent être reproduites à un niveau de 10^{-16}. Avant la découverte de l'effet Josephson, la tension électrique utilisée en métrologie était produite à l'aide d'une cellule étalon électrochimique. Grâce à

[17] Josephson B.D., "Possible new effects in superconductive tunnelling", *Phys. Lett*., (1962), 1(7), 251-253.

l'effet Josephson, il a été possible d'améliorer les mesures de plusieurs ordres de grandeur. Toutefois, quatre représentations différentes du volt existaient car la France, les États-Unis d'Amérique, l'URSS et le reste du monde avaient chacun fixé une valeur différente de la constante de Josephson $K_J = 2e/h$ (où e est la charge élémentaire et h la constante de Planck) à partir d'une comparaison à l'aide de leur propre cellule électrochimique. Le Comité consultatif d'électricité (CCE, désormais le CCEM) a recommandé l'utilisation d'une même valeur pour tous les pays et une nouvelle valeur « conventionnelle », $K_{J\text{-}90}$, a été adoptée par la CGPM à sa 18e réunion (1990). Aujourd'hui, la communauté de la métrologie va aller encore plus loin en intégrant au SI les valeurs numériques de e et h qui auront été fixées.

M. von Klitzing décrit comment il a découvert l'effet Hall quantique lorsqu'il travaillait à Grenoble (France) en 1980. Cette découverte a permis la mise au point d'un nouveau type de résistance électrique ayant une valeur fixe égale à la constante de von Klitzing $R_K = h/e^2 \approx 25812\ \Omega$ et lui a permis de recevoir le prix Nobel de physique en 1985. M. von Klitzing souligne que toutes les résistances de Hall quantifiée, utilisant divers matériaux tels que le silicium, l'arséniure de gallium ou le graphène, donnent la même valeur comprenant dix chiffres significatifs minimum lorsqu'elles sont comparées entre elles. Toutefois, seuls huit chiffres peuvent être mesurés avec l'actuel SI. Les exigences afin d'observer l'effet Hall quantique sont de disposer d'un système bidimensionnel d'électrons et de forts champs magnétiques. Avant la découverte de l'effet Hall quantique, l'étalon de résistance électrique dans la plupart des laboratoires nationaux de métrologie était maintenu à l'aide de résistances bobinées ; les différentes résistances bobinées devaient être transportées au BIPM pour des comparaisons occasionnelles. L'utilisation de résistances de Hall quantifiées dans les laboratoires nationaux a permis d'éliminer le besoin de se rendre au BIPM pour étalonner ces résistances bobinées. L'effet Hall quantique a également permis de mesurer pour la première fois la valeur absolue de la dérive de résistances bobinées par rapport à un étalon quantique stable.

La CGPM à sa 18e réunion (1987)[18] a considéré que de nombreux laboratoires nationaux utilisaient l'effet Josephson et l'effet Hall quantique pour conserver respectivement des représentations du volt et de l'ohm car ceux-ci offraient les meilleures garanties de stabilité à long terme. En outre, la CGPM a considéré qu'en raison de l'importance de la cohérence entre les unités de mesure des diverses grandeurs physiques, les valeurs attribuées à ces représentations devaient être autant que possible en accord avec le SI. Enfin, le CIPM a recommandé en 1988 que soit adoptée, par convention, pour la constante de von Klitzing, R_K, la valeur $R_{K\text{-}90} = 25\,812{,}807\ \Omega$ exactement ; que cette valeur soit utilisée à partir du 1er janvier 1990, et non auparavant, par tous les laboratoires qui fondent sur l'effet Hall quantique leurs mesures de résistance électrique ; et qu'à partir de cette même date tous les autres laboratoires ajustent la valeur de leurs étalons de référence pour la mettre en accord avec $R_{K\text{-}90}$. Le CIPM estimait par ailleurs qu'aucun changement de cette valeur recommandée de la constante de von Klitzing ne serait nécessaire dans un avenir prévisible. M. von Klitzing ajoute que ce futur prévisible prend fin ce jour, 16 novembre 2018, et il espère que le vote sur le Projet de résolution A sera positif. Le SI révisé conduira à un changement de la valeur de R_K de 17×10^{-9} en valeur relative, ce qui ne sera perceptible que par les laboratoires nationaux de métrologie. Il indique qu'après la révision du SI, il sera possible d'améliorer la qualité des voltmètres et ohmmètres, c'est pourquoi il est favorable à cette révision du SI qui permettra d'éviter tout futur saut des unités.

M. von Klitzing note qu'après la révision du SI, les unités quantiques pour l'ohm et le volt seront unifiées avec les unités du SI, qui intégreront les valeurs fixées de e et h. La valeur de $R_K = h/e^2$ sera alors fixée et sera compatible avec le SI révisé. La décision d'adopter des valeurs conventionnelles pour la constante de Josephson $K_{J\text{–}90}$ et la constante de constante de von Klitzing $R_{K\text{–}90}$ qui avait été

[18] Résolution 6 adoptée par la CGPM à sa 18e réunion (1987).

prise par le CIPM (1988, Recommandations 1 et 2) à la demande de la CGPM (Résolution 6 adoptée par la CGPM à sa 18e réunion, 1987) pour l'établissement des représentations du volt et de l'ohm à l'aide des effets Josephson et Hall quantique, respectivement, sera abrogée.

Une application inattendue des unités quantiques électriques a été leur contribution à la réalisation du kilogramme électronique fondé sur une valeur fixée de la constante de Planck. Lors de l'utilisation d'une balance de Kibble, le poids du kilogramme est compensé par une force électromagnétique. Cette force électrique est mesurée à l'aide de l'effet Hall quantique et de l'effet Josephson : il existe une relation directe entre la constante de Planck et la masse. L'effet Hall quantique est donc non seulement important pour les étalons électriques mais il l'est également pour au moins l'une des méthodes de réalisation du kilogramme selon sa nouvelle définition. En conclusion, M. von Klitzing se dit impatient d'assister au vote du Projet de résolution A et note que les constantes de la nature sont la base la plus stable qui soit pour un système universel d'unités pour tous les temps, pour tous les peuples.

Le président de la CGPM remercie M. von Klitzing pour sa présentation.

Le président de la CGPM présente la deuxième conférence d'honneur qui porte sur le rôle de la constante de Planck en physique. Elle sera donnée par M. Jean-Philippe Uzan, chercheur français en physique théorique, directeur de recherche à l'Institut d'astrophysique de Paris et au Centre national de la recherche scientifique (CNRS). M. Uzan est diplômé de l'École des Mines de Paris et a obtenu son doctorat à l'Université d'Orsay. Ses travaux de recherche sur la physique fondamentale et la cosmologie portent en particulier sur les théories de la gravité, la construction de modèles cosmologiques et une description de l'univers primordial. Jean-Philippe Uzan a publié plus de 120 articles dans des revues scientifiques spécialisées et a donné de nombreuses conférences dans le monde entier. Il a par ailleurs écrits deux monographies et est l'auteur de nombreux ouvrages. Il a été distingué de plusieurs prix, dont le prix Paul Langevin de la Société française de physique et le prix Georges Lemaître.

Outre ses activités de recherche, M. Uzan est très connu pour son travail de vulgarisation scientifique auprès du grand public et des enfants en particulier. Ses livres pour enfants ont été traduits en chinois, italien, coréen et espagnol. Il est co-fondateur d'un festival scientifique destiné aux enfants et participe à de nombreux projets pédagogiques. Il s'intéresse également à la relation entre art et science : il a ainsi participé à la création d'une pièce mise en scène par Étienne Pommeret et il a créé, en s'inspirant de ses idées concernant la musique et la cosmologie, l'installation musicale Vostok en collaboration avec Eddie Ladoire et Joep van Lieshout.

50. Le rôle de la constante de Planck en physique

M. Jean-Philippe Uzan précise qu'en tant que théoricien, il utilisera dans sa présentation la langue de la physique théorique pour expliquer les constantes fondamentales et leur importance et comprendre leur rôle en physique. Il rappelle que M. von Klitzing a précédemment présenté la constante de Planck et son lien au kilogramme. Le Système international d'unités révisé, tel qu'il est proposé, dérive les unités de base des valeurs numériques d'un ensemble de constantes fondamentales de sorte qu'au final, toutes les unités sont liées à une horloge. Cette idée n'est pas nouvelle car c'était déjà l'approche qui avait été choisie en 1983 pour définir le mètre à partir de la seconde en fixant la valeur numérique de la vitesse de la lumière. Dans la pratique, la révision du SI est un tournant majeur : des artéfacts « concrets » ou des systèmes physiques sont abandonnés et remplacés par des constantes fondamentales, qui constituent un concept plus abstrait, en particulier pour le grand public.

M. Uzan précise que sa présentation apportera des clés sur la nature de ces constantes et qu'il expliquera pourquoi certaines constantes ont été choisies comme références. Il prendra pour exemple la constante de Planck afin d'illustrer comment le statut d'une constante est en fait lié à notre compréhension de la physique.

La tendance générale pour définir les unités a été de les relier à des objets connus considérés alors comme ceux les plus fondamentaux. Cela a été mis en évidence en 1870 par James Clerk Maxwell en prenant l'exemple du mètre. Maxwell a affirmé que les propriétés de la Terre n'étaient pas suffisamment stables pour définir le mètre et a proposé d'utiliser les propriétés de ce qu'il pensait être à l'époque les éléments les plus fondamentaux de la nature : les atomes qu'il appelait « molécules ». En effet, comme Maxwell l'explique, si une structure est réellement fondamentale, elle ne peut changer dans le temps. Elle est impérissable et inaltérable.

Toutefois, plus on en apprend sur la nature, plus il devient clair que ce qui était considéré comme fondamental à une époque ne l'est pas en réalité. Les atomes eux-mêmes ne sont pas des objets fondamentaux : ils sont composés de protons et de neutrons et ces particules sont elles-mêmes constituées de quarks. Seul l'avenir dira si ces structures sont fondamentales ou non. La science ne fournit que des descriptions temporelles qui évoluent en permanence. Il ne sera jamais possible de prouver que les chercheurs ont découvert la théorie la plus fondamentale qui soit. Heureusement, dans la pratique, cela n'est pas un problème tant qu'il est possible de comprendre clairement le domaine de validité des théories utilisées, c'est-à-dire lorsque ces théories donnent une description satisfaisante et exacte de la nature. Les constantes sont-elles aujourd'hui les objets les plus fondamentaux et pourquoi ? Pour répondre à cette question, il est nécessaire de définir ce qu'est une constante.

La définition du dictionnaire (***Constante*** *: PHYS., Valeur numérique de* ***certaines*** *grandeurs permettant de caractériser un corps. Grandeur particulière dont la valeur est fixe (masse et charge de l'électron, vitesse de la lumière,* ***par ex.****) et qui joue un rôle* ***central*** *dans les théories physiques*) reconnaît le rôle central des constantes dans les lois de la nature. Elle ne donne pas d'explication sur leur nature et leurs principales caractéristiques, qui est de posséder une valeur fixe. C'est en fait la raison pour laquelle elles sont appelées « constantes ». Pour un physicien, cette définition soulève des questions : combien de constantes existent ? Sont-elles toutes de même nature ou existe-t-il des constantes plus importantes ou fondamentales que d'autres ? Quels rôles jouent-elles dans les lois de la nature ? Peuvent-elles varier ? Selon le dictionnaire, la réponse est « non » par définition.

M. Uzan précise que la seule façon de connaître la nature des constantes est l'expérimentation et que la nature d'une constante ne devrait pas être imposée par une définition. Les physiciens ont mené des expériences pour tester si ces constantes sont invariantes en laboratoire et dans l'univers, tout au moins dans la limite de l'exactitude de leurs expériences. Les définitions devraient toujours suivre les propriétés de la nature et non l'inverse. Le fait de définir des concepts est une tâche inévitable de la physique théorique, sans laquelle les théories ne pourraient reposer sur des fondements solides.

Les constantes dépendent d'un cadre théorique et, sans une définition claire, il est nécessaire d'examiner où l'on trouve ces constantes, par exemple dans les ouvrages scientifiques. Quand on consulte les livres de physique de différentes époques, il devient clair que : les constantes apparaissent (par exemple, la constante de Planck apparaît en 1900), elles peuvent être expliquées par rapport à d'autres constantes (comme pour la masse du proton), elles peuvent disparaître (par exemple, la constante de Joule, qui exprime la proportionnalité entre chaleur et travail, a disparu lorsque l'on a compris que chaleur et travail étaient simplement deux formes d'énergie, mesurées en joules), elles peuvent devenir une unité (par exemple, la vitesse de la lumière en 1983). Cela souligne une caractéristique essentielle : les constantes fondamentales sont intimement liées aux théories de la physique. Il est impossible d'évoquer les constantes fondamentales sans parler des théories de la physique.

La communauté scientifique définissant l'ensemble des théories avec lesquelles elle travaille, une bonne définition d'une constante fondamentale serait « tout paramètre qui n'est pas déterminé par cet ensemble de théories » car ces théories ne permettent pas de prédire les valeurs des constantes et doivent être mesurées. L'hypothèse selon laquelle elles sont constantes est étayée par la reproductibilité des expériences qui confirment ces théories. Si l'on observait une variabilité des constantes, il serait nécessaire d'envisager une extension du cadre théorique au sein duquel ces paramètres sont dynamiques, probablement au prix de l'introduction de nouvelles constantes.

M. Uzan mentionne qu'il existe deux types de constantes : les constantes sans dimension et les constantes avec unités. Les constantes sans dimension, comme le rapport entre la masse du proton et la masse de l'électron, sont simplement des nombres qui apparaissent dans les lois de la nature. Ces nombres sont essentiels, bien que non expliqués, et le fait de changer leur valeur change les phénomènes physiques. Pour ce qui est des constantes avec unités, leur valeur numérique est totalement contingente. Comme l'a formulé Max Planck en 1900, les constantes avec unités peuvent être utilisées pour définir un système d'unités. Par exemple, pour définir le mètre, le kilogramme, la seconde et le kelvin, quatre constantes fondamentales sont requises. Planck suggère qu'il est nécessaire de supposer la valeur de quatre constantes (la vitesse de la lumière, la constante de gravitation, la constante de Planck et la constante de Boltzmann) comme étant égale à 1 puis de définir un ensemble d'unités fondamentales. M. Uzan précise les limites qui existent de nos jours à avoir recours aux idées formulées par Planck. C'est également ce que permet d'atteindre le SI révisé, à deux légères différences près : premièrement, on ne peut pas utiliser la constante de Newton (dont la mesure n'est pas du tout satisfaisante) et on ne peut pas fixer la valeur des constantes choisies à 1 car il est nécessaire d'assurer la continuité par rapport aux précédentes définitions d'unité.

Afin de définir le mètre, le kilogramme, le kelvin et l'ampère, quatre constantes sont nécessaires. M. Uzan indique que des critères spécifiques doivent être utilisés pour sélectionner les constantes nécessaires à la définition d'unités. Les constantes doivent être universelles afin de ne pas être réduites à un seul phénomène. Elles doivent être fondamentales dans le sens où il n'existe rien de plus fondamental qui permette de les obtenir. En outre, il doit y avoir un certain pragmatisme expérimental : il doit être possible de mesurer les constantes en laboratoire à l'aide de techniques dédiées.

M. Uzan illustre l'histoire des constantes en prenant pour référence l'histoire de la constante de Planck, qui a initialement été proposée en 1900. Pour comprendre son évolution, il est nécessaire de comprendre ce qu'est le rayonnement du corps noir, à savoir le rayonnement émis par un corps en équilibre thermique dans un four à une température donnée. À l'époque, de nombreux débats ont eu pour objet la forme du spectre d'énergie de ce rayonnement en fonction de la longueur d'onde et de la température du four. Au début du 20e siècle, Max Planck propose une formule pour exprimer le spectre d'énergie en fonction de la longueur d'onde λ du rayonnement, ce qui implique deux paramètres C et C' qui peuvent être déterminés par des expériences. Toutefois, Planck doit justifier la forme du spectre. Il expose ainsi ses travaux le 14 décembre 1900 à la Société allemande de Physique et publie un article[19] avec l'intention de reproduire la formule qu'il a découverte pour le spectre en se fondant sur deux postulats. Le premier est qu'il a utilisé la définition de l'entropie proposée par Boltzmann en 1877 afin de relier la grandeur thermodynamique macroscopique, entropie, à la nature microscopique du rayonnement. Planck introduit une constante, k, désormais connue sous le nom de constante de Boltzmann : c'est la première fois que cette constante apparaît dans la littérature. Le second postulat concerne l'échange d'énergie entre la matière et le rayonnement. Planck part de l'hypothèse qu'il a lieu par petits « paquets d'énergie », qui seront ultérieurement appelés « quantas ». Il utilise une relation de proportionnalité entre ces éléments d'énergie *epsilon* ε et la fréquence *nu* ν, ce qui requiert une

[19] Planck, M. (1901). "Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum". *Annalen der Physik.* **309**(3): 553–563.

constante h puisque l'énergie est exprimée en joules et la fréquence en hertz. Une constante dimensionnée est nécessaire, c'est la constante de Planck. Cette équation $\varepsilon = h\,\nu$ ne comporte pas de nombre et est seulement justifiée par le fait qu'elle permet à Planck de retrouver son spectre du corps noir. Il n'existe pas de motivation théorique à cela. Planck observe ensuite que h et k sont des constantes universelles et, à la fin de son article, il dérive leur valeur numérique.

À cette époque, le concept de Planck fait controverse. Certains considèrent la constante de Planck comme un moyen efficace de décrire l'interaction entre la matière et le rayonnement et qu'elle peut être dérivée d'une meilleure compréhension de ce phénomène. D'autres pensent que la constante de Planck a une signification profonde et qu'elle révèle une nouvelle propriété de la nature. L'universalité de la constante de Planck, h, est étayée en 1905 par Einstein qui avance que la lumière (qui est un rayonnement) devrait être décrite comme un fluide d'éléments d'énergie régis par la relation de Planck. Non seulement les échanges d'énergie sont quantifiés mais aussi les paquets d'énergie qui constituent la lumière. Ces idées sont révolutionnaires à une époque où la description de la lumière comme une onde électromagnétique selon la théorie de Maxwell faisait consensus, aussi bien théoriquement qu'expérimentalement. Max Planck avait considéré que les quantas concernaient simplement l'échange d'énergie entre la matière et le rayonnement. L'hypothèse d'Einstein au sujet de la nature de la lumière a eu pour conséquence de permettre de comprendre l'effet photoélectrique. Robert Milikan vérifie expérimentalement en 1914 la prédiction d'Einstein, ce qui permet d'obtenir une nouvelle mesure de la constante de Planck. C'est en 1926 que le mot « photon » est inventé. Arthur Compton démontre en 1923 la diffusion des photons X par des électrons telle des particules. Il leur attribue une impulsion, démontrant ainsi la nature particulière du rayonnement électromagnétique : la lumière est constituée d'un certain type de particules. Cela représente un grand changement puisque l'on passe de la question de savoir comment la matière et le rayonnement interagissent à la compréhension du fait que le rayonnement et la lumière ont une double nature.

L'universalité de h continue à être étayée au-delà de l'électromagnétisme et de la lumière lorsqu'en 1924 Louis de Broglie propose que toute particule soit associée à une onde. Les propriétés de la particule (énergie et impulsion, E et p) et celles de l'onde (fréquence et longueur d'onde, ν et λ) sont reliées par la constante de Planck. Cela marque le début d'un nouveau concept, le concept de fonction d'onde, qui est au cœur de la mécanique quantique. La constante de Planck a permis de relier des grandeurs physiques qui n'avaient auparavant aucune similitude : des énergies sont mesurées en joules et des fréquences en hertz et elles ne peuvent être reliées sans un facteur de conversion.

En parallèle, on a compris que h avait des applications dans le domaine de la mécanique quantique. Planck suggère au cours du Conseil Solvay à Bruxelles (Belgique) en 1911 que h est le quantum d'action, c'est-à-dire l'unité élémentaire dans l'espace des phases. C'est un concept abstrait qui a permis d'établir une connexion entre les mondes quantique et classique et qui a ouvert la voie à une nouvelle formulation de la mécanique quantique, développée par Richard Feynman dans les années 40 et 50. En 1927, Werner Heisenberg s'interroge sur la validité des concepts classiques courants (tels que celui de la trajectoire) et démontre l'existence d'une incertitude intrinsèque à toute mesure qui provient de la nature quantique du monde. L'amplitude typique de cette incertitude quantique est déterminée par $h/(2\pi)$. La théorie quantique est ce qu'on appelle une « théorie du cadre » dans le sens où toute théorie de la physique doit être quantique. En tant que telle, la théorie quantique fait de h une constante réellement universelle car elle apparaîtra dans la description quantique de tout phénomène physique.

M. Uzan observe que l'évolution de la constante de Planck est liée à l'évolution de la compréhension de la physique ; il en va de même pour toute constante. La vitesse de la lumière partage une histoire similaire. Il a été prouvé que la vitesse de la lumière n'était pas illimitée par Ole Rømer, astronome à l'Observatoire de Paris. Maxwell a ensuite compris que c'était également la vitesse de la propagation

de toute onde électromagnétique dans le vide. En 1905, Einstein a développé le concept central de relativité restreinte, qui est une synthèse des notions d'espace et de temps ayant conduit au nouveau concept d'espace-temps. La relativité restreinte est une autre théorie du cadre, de sorte que la vitesse de la lumière peut être considérée comme l'une des constantes les plus fondamentales aux côtés de la constante de Planck. La charge de l'électron est également une charge de l'unité et elle caractérise la force de l'interaction électromagnétique. La constante de Boltzmann est liée aux concepts d'entropie et de température, qui apparaissent pour des systèmes comptant un grand nombre de particules.

M. Uzan indique qu'une constante ne peut être conceptualisée en dehors d'un cadre théorique. Il est toujours nécessaire de préciser les théories de la physique qui sont considérées pour décrire la nature aujourd'hui. Les constantes ne peuvent être que mesurées, elles permettent de forger de nouveaux concepts et elles sont dynamiques dans la façon d'envisager la physique. M. Uzan rappelle qu'il a fait la distinction entre deux types de constantes : celles dimensionnées et celles sans dimension. Les premières peuvent être utilisées pour définir des unités, c'est ce qui a été fait avec la vitesse de la lumière, la constante de Planck, la constante de Boltzmann et la charge électrique. Les valeurs numériques des constantes fondamentales sans dimension sont très importantes car elles sont simplement des nombres et la valeur de ces nombres est importante pour comprendre quantitativement des phénomènes physiques.

M. Uzan se pose la question de savoir si ces constantes fondamentales, ces nombres sans dimension, conservaient la même valeur au cours de toute l'histoire de l'univers. Par ailleurs, est-il assuré que la constante de structure fine, le rapport entre la masse de l'électron et la masse du proton, conserve la même valeur au cours de l'histoire de l'univers ? Il conclut que ces constantes n'ont pas changé de plus d'une fraction d'1 % au cours de toute l'existence de l'univers et qu'elles ne changent pas de plus de quelques 10^{-16} par an de nos jours. Cela est très important car cela améliore la confiance que nous avons dans les théories de la physique et constitue un test du principe d'équivalence au cœur de la théorie de la gravitation : la relativité générale.

Pour conclure, M. Uzan souligne que la révision du SI est une entreprise humaine : il ne sera jamais possible d'atteindre la théorie la plus fondamentale de la nature mais à chaque fois que les scientifiques comprennent mieux la nature, ils doivent trouver une représentation du monde qui se fonde sur les théories et concepts les plus fondamentaux. Seules la théorie, l'expérimentation et l'utilisation d'un langage prudent et précis permettront d'atteindre cet objectif et soulignent l'importance de la valeur de la science pour la société et l'importance de la pensée rationnelle pour guider les scientifiques et métrologistes dans leurs décisions. M. Uzan termine sa présentation en citant Antoine de Lavoisier dans son *Traité élémentaire de chimie* rédigé en 1789 : « […] comme ce sont les mots qui conservent les idées et qui les transmettent, il en résulte qu'on ne peut perfectionner le langage sans perfectionner la science, ni la science sans le langage et que quelque certains que fussent les faits, quelques justes que fussent les idées qu'ils auraient fait naître, ils ne transmettraient encore que des impressions fausses, si nous n'avions pas des expressions exactes pour les rendre. »

Le président de la CGPM remercie M. Uzan pour sa présentation.

Il présente le troisième conférencier d'honneur, Jun Ye, dont la présentation s'intitule « Les horloges atomiques optiques – de nouvelles perspectives sur le monde quantique ». M. Ye est membre du laboratoire national de métrologie américain, le National Institute of Standards and Technology, NIST, et membre de JILA, organisme géré conjointement par le NIST et l'Université du Colorado, Boulder. Au cours de ses 20 ans de carrière au NIST et au JILA, il est devenu l'un des pionniers les plus reconnus au monde dans le domaine des lasers, de la prochaine génération d'horloges atomiques expérimentales et de gaz quantiques ultra-froids. Ses travaux soulignent les liens devenant de plus en

plus importants entre précision, mesure et contrôle de l'état quantique, à partir duquel de nombreuses technologies quantiques seront développées. M. Ye a inventé les premières horloges atomiques expérimentales au monde qui fonctionnent à des fréquences optiques et qui ont une multitude d'applications.

51. Les horloges atomiques optiques – de nouvelles perspectives sur le monde quantique

M. Jun Ye déclare que c'est un grand honneur d'être invité à donner une présentation en ce jour historique. Le développement des horloges atomiques optiques ouvre de nouvelles perspectives quant à la compréhension des technologiques du futur, qui permettront par exemple de contrôler le temps ultra-long de cohérence de champs électromagnétiques, de construire la prochaine génération de capteurs quantiques ou de pouvoir faire de la physique à l'aide d'expériences peu encombrantes. Il note que même si la redéfinition de la seconde n'est pas au cœur des discussions de la 26e réunion de la CGPM, le sujet est certainement envisagé pour le futur. Par ailleurs, presque toutes les unités, qu'elles soient de base ou dérivées, peuvent être reliées au temps.

M. Ye indique que la redéfinition des unités à partir de lois fondamentales de la nature ouvre la voie à de nouvelles découvertes. Les unités sont fondées sur ce qu'on appelle le « modèle standard », qui permet d'expliquer la plupart des éléments qui peuvent être observés ou expliqués dans l'univers mais qui n'est cependant pas complet. Il prend pour exemple l'énergie noire, que l'on sait exister mais dont la composition reste inconnue, et la matière et l'antimatière qui sont asymétriques dans l'univers. Ces éléments ne peuvent pas être expliqués par le modèle standard. Les unités du SI sont désormais reliées à l'un des modèles les plus précis et éprouvés, même si ce modèle est incomplet. Par ailleurs, la communauté scientifique comprend désormais des phénomènes jusqu'alors inconnus comme les ondes gravitationnelles : il est possible d'exploiter cette découverte sous la forme d'un appareil de mesure et d'utiliser les ondes gravitationnelles comme un « télescope » pour étudier l'univers. Ainsi, selon M. Ye, si la communauté de la métrologie continue à progresser, et s'il devient possible de construire un réseau d'horloges atomiques à un niveau d'incertitude relative de quelques 10^{-21} ou 10^{-22}, ces horloges deviendront un outil qui permettra à la communauté scientifique d'étudier ce qui reste inconnu, comme l'énergie noire.

M. Ye présente brièvement les échelles de temps, en commençant par le « pendule quantique » qui est le terme donné au temps nécessaire à un électron pour tourner en orbite autour d'un noyau, soit une période d'environ 10^{-15} seconde ou une femtoseconde. À l'autre extrémité de l'échelle se trouve l'âge de l'univers, qui est d'environ 15 milliards d'années ou 10^{18} secondes. L'échelle de temps de la physique quantique microscopique à l'échelle de temps macroscopique de l'univers couvre 33 ordres de grandeur de 10^{-15} à 10^{18} et la moyenne géométrique est de 30 secondes. En prenant l'exemple des atomes de strontium, le temps de cohérence pour le pendule quantique peut durer jusqu'à trois minutes, ce qui est similaire à l'échelle de temps de la moyenne géométrique entre l'âge de l'univers et une seule période de son pendule quantique. Cela signifie que lorsqu'un pendule quantique commence à osciller, il a un facteur de qualité de 10^{17} et la période d'oscillation est extrêmement rapide : le pendule quantique oscille une fois toutes les 10^{-15} seconde. Il est possible de suivre cette période pendant 160 secondes. Cela donne la possibilité de compter la période à un facteur de qualité de 10^{17}. Dans la même situation avec un pendule classique, qui bat une fois par seconde, le pendule oscillerait pendant toute l'existence de l'univers. Tel est le fondement du pendule quantique qui est utilisé pour construire une horloge.

M. Ye présente les principes de certitude quantique et d'incertitude quantique. La métrologie fait des progrès considérables, en grande partie en raison du fait que l'interaction entre ces certitudes et incertitudes vient des principes mécaniques quantiques. Dans le cas des orbites d'électrons autour du noyau, on sait avec certitude que ces orbites sont quantifiées et qu'il y a une échelle discrète d'énergie séparant les différentes orbites d'électrons. L'échelle d'énergie est extrêmement bien décrite, elle est définie par nature. Si l'on part du principe que les constantes fondamentales ne changent pas dans l'ensemble de l'univers, la fréquence de ces orbites peut être considérée comme une constante. Étant donné que des mesures physiques sont réalisées avec exactitude, tout le monde devrait dériver la même fréquence. Si une population est placée dans l'état non-excité ou dans l'état excité, il est possible d'effectuer des mesures de grande exactitude d'un seul photon, d'un seul électron ou d'un seul atome.

Ce qui est incertain, et qui détermine l'incertitude de mesure, c'est lorsqu'une population est en superposition cohérente entre l'état non-excité et l'état excité car elle n'est plus dans un état mécanique quantique stationnaire. Il existe une phase dynamique qui évolue entre l'état non-excité et l'état excité. Lorsqu'une mesure est réalisée et que la superposition cohérente se réduit à un état de mesure particulier, et lorsque l'on essaie de déterminer si l'atome est dans l'état excité ou dans l'état non-excité, c'est à ce moment que l'incertitude apparaît. C'est le principe d'incertitude d'Heisenberg qui peut être utilisé pour décrire la réduction du paquet d'onde ou la relation de perméation du moment cinétique. Il en résulte que cette phase peut être utilisée comme une horloge. Comme la phase évolue autour du plan équatorial à mesure que l'atome est placé en superposition cohérente, il y aura un peu d'imprécision et donc une incertitude de mesure qui est dictée par le principe d'incertitude mécanique quantique.

M. Ye note que les états internes qui sont exploités sont parfaitement certains en raison des structures de niveau d'énergie certaines. Toutefois, il existe des degrés externes de liberté tels que le bruit de phase quantique. Les lasers sont normalement utilisés pour mesurer à quelle vitesse les électrons se déplacent autour du noyau : c'est le « pendule quantique ». Une difficulté vient du fait que les atomes se déplacent et ont un effet Doppler. Lorsque le laser prend une mesure des atomes, il peut transmettre un moment photonique à l'atome. Les incertitudes sont liées à la façon de mesurer le pendule quantique.

Une révolution est actuellement en cours afin d'introduire la certitude quantique dans le système de mesure et prendre en compte tous les degrés de liberté, y compris ceux cinétiques. Cela nécessite de comprendre comment les atomes se déplacent dans l'espace et comment ils interagissent. Il est nécessaire de s'assurer que tous les degrés de liberté sont quantifiés afin que les mesures ne soient plus limitées par des techniques analogiques, tels que l'effet Doppler ou des décalages de fréquence dus, par exemple, aux interactions des atomes. Si l'on parvient à cela, il devrait être possible de développer des milliers ou plusieurs centaines de milliers de pendules quantiques, qui oscilleront tous de manière synchrone. Les mesures seront améliorées de la racine carrée du nombre de pendules quantiques qu'il est possible de mesurer en même temps. M. Ye observe que c'est le principal point de cette présentation, pouvoir à la fois mesurer les degrés internes de liberté et contrôler ceux externes en se fondant sur le cadre de la certitude mécanique quantique. Ces facteurs peuvent être combinés pour permettre d'atteindre la « limite quantique standard » lorsque des atomes sont utilisés pour construire des horloges atomiques. Mesurer les « tic-tac » de ces pendules quantiques nécessite d'avoir recours à des lasers sensibles présentant un temps de cohérence d'une échelle de 160 secondes, comme précédemment mentionné. Le développement de ces lasers a nécessité de nombreuses années d'efforts par des pionniers comme John Hall et Theodore Hänsch ; des travaux sont toujours en cours afin d'améliorer la stabilité de ces lasers.

Actuellement, deux lasers à la PTB et deux au JILA utilisent des structures cristallines de silicium pour soutenir deux miroirs, ce qui donne les lasers les plus stables possible. En utilisant un photodétecteur commun, un signal de battement à 8 millihertz a été mesuré entre les lasers de la PTB et ceux de JILA. La fréquence est de l'ordre de 10^{15} hertz, ce qui fournit une stabilité du laser de 4×10^{-17}. Traduit en « temps de cohérence », cela est équivalent à une onde optique qui pourrait être cohérente pendant presque une minute ; sur une échelle de longueur, cela correspondrait à une longueur de cohérence d'un dixième de la distance entre la Terre et le Soleil. Cette technologie, tout comme l'invention des peignes de fréquence par Theodore Hänsch et John Hall, a permis une numérisation cohérente de tout le spectre électromagnétique, du domaine visible à celui des micro-ondes. Cette technologie permettra de mesurer les oscillations du pendule quantique de l'atome et de transposer cette information dans le domaine des micro-ondes afin de pouvoir l'utiliser comme base pour une horloge.

M. Ye passe ensuite des lasers aux atomes. Des travaux novateurs dans les années 80 et 90 ont permis de développer des systèmes de refroidissement des lasers, ce qui a permis de refroidir des atomes qui étaient à température ambiante à un milliardième de cette température en quelques centaines de millisecondes. Une fois ces atomes refroidis, ils peuvent être capturés à l'aide de la technologie des « pinces optiques » mise au point par Arthur Ashkin et ses collègues dans les années 70. Il est possible d'utiliser le champ laser, de polariser des atomes puis de les capturer au foyer du rayon laser. Le principe sous-jacent est que des changements d'énergie hétérogènes spatialement indépendants sont créés dans la structure atomique originale.

Il a été nécessaire de modifier cette technologie pour utiliser deux états quantiques afin de construire une horloge atomique. Un piège optique a été conçu de sorte que lorsque les atomes ont été capturés dans des « puits de lumière », les décalages de fréquence de l'état non-excité et de l'état excité aient exactement la même forme. Même si les atomes ont été capturés au sein de cette structure hétérogène concernant la lumière, la différence de fréquence entre les deux états d'énergie demeure constante. Pouvoir maintenir ces atomes pour tirer parti de leur long temps de cohérence est un concept important. La forme la plus simple de capture est d'utiliser le rayon laser dans une dimension et de le refléter à l'aide d'un miroir pour former une onde stationnaire. Les ventres sont là où les atomes sont capturés. Cela ressemble à une « pile de crêpes » où chaque ventre peut avoir une dizaine d'atomes capturés et ces atomes peuvent être utilisés comme les atomes d'horloges atomiques.

M. Ye décrit le principe de la quantification de l'effet Doppler, en soulignant ce qu'il a précédemment mentionné : tout devrait être quantique dans la nature. Les atomes sont refroidis à 1 µK et il est nécessaire de mesurer la largeur spectrale. À cette température, la largeur spectrale est d'environ 40 kHz, ce qui représente l'élargissement Doppler d'un atome à 1 µK sondé par la lumière. Si les atomes sont placés dans le puits quantifié, l'atome peut toujours se déplacer. Si le puits est assez peu profond, il peut encore montrer un effet tunnel. Lorsque l'on examine le spectre atomique, il montre déjà un certain effet dû au fait que les atomes commencent à être localisés par des puits individuels. Si les puits sont rendus plus profonds, la transition de la porteuse centrale ne contient plus d'effet dû au mouvement. L'effet Doppler est encore présent mais il est complétement absorbé par les bandes latérales. Les bandes latérales proviennent du fait que les états cinétiques des atomes sont désormais totalement quantifiés. Lorsque les atomes sont refroidis à des états cinétiques très bas, ils peuvent absorber des photons pour aller dans la direction où les états cinétiques n'augmentent pas ni ne diminuent, tel que cela est le cas lors de la transition de la porteuse ; cela est dépourvu de tout effet cinétique.

Lorsque les degrés de liberté cinétiques sont quantifiés, l'effet Doppler disparaît. C'est le « contrôle de l'état quantique », base de la nouvelle génération d'horloges atomiques optiques où les degrés de liberté internes et externes sont totalement séparés. Il est possible de réaliser des mesures de façon à

ce que, lorsque contrôler un seul état quantique avec exactitude sera réalisable, il deviendra possible d'utiliser de multiples atomes. Le fait de pouvoir construire plusieurs centaines de milliers de pendules quantiques permettra d'améliorer la précision des mesures du temps de la racine carrée du nombre de particules utilisées. Il pourra être possible de construire des horloges présentant une incertitude de l'ordre de 2×10^{-18}.

M. Ye observe que dans le domaine optique, les horloges au strontium et à l'ytterbium de JILA et du NIST à Boulder, Colorado, ont été comparées jusqu'à 3×10^{-18}. Il ajoute qu'une amélioration pour atteindre un niveau de 10^{-20} est réalisable avec davantage de quantification. Les degrés de liberté cinétiques ont été quantifiés sur la direction Z, comme expliqué précédemment. Une autre quantification dans les directions X et Y permettrait de quantifier la manière dont les atomes interagissent. Lorsqu'une dizaine d'atomes dans une « pile de crêpes » particulière interagissent, ils peuvent générer pour les uns et les autres des décalages de fréquence. Si ces atomes peuvent être quantifiés, la certitude quantique peut être utilisée afin de résoudre les problèmes d'effets systématiques.

M. Ye décrit les derniers travaux effectués à l'aide des réseaux optiques tridimensionnels, l'horloge à gaz de Fermi 3D. Cette technique utilise un gaz quantique dégénéré de fermions chargé dans des réseaux optiques afin de quantifier tous les degrés de liberté. L'idée repose sur le principe d'exclusion de Pauli : si les atomes ont été refroidis à des températures suffisamment basses, il devrait être possible de produire des atomes qui occupent chacun un emplacement. Ainsi, les degrés de liberté X, Y et Z, ainsi que la façon dont les atomes interagissent, peuvent être complètement quantifiés. Le dispositif utiliserait un million d'atomes dans 100 cellules × 100 cellules × 100 cellules en hauteur avec un temps de cohérence de 160 secondes. Cela donnerait une horloge avec une précision de 3×10^{-20} à une seconde. En établissant la moyenne sur 100 secondes, cela donnerait une sensibilité où il est possible d'« entendre » les ondes gravitationnelles produites par l'horloge optique.

M. Ye présente brièvement les récents progrès effectués concernant l'horloge à réseau optique tridimensionnel. Des atomes sont chargés dans un réseau optique tridimensionnel : lorsqu'une analyse spectroscopique des bandes latérales cinétiques est réalisée, il est possible de voir que les trois degrés de liberté cinétiques sont tous quantifiés. Trois bandes latérales sont observées : elles assurent la transition de l'état fondamental mécanique quantique à l'état excité mécanique quantique. Elles sont toutes quantifiées en termes de degrés de liberté électroniques et de degrés de liberté cinétiques. Le ^{87}Sr a 10 états de spin différents et, dans ce type de cas, il n'est pas possible d'avoir un atome par emplacement car les atomes avec différents états de spin nucléaires sont des particules que l'on peut distinguer. C'est pourquoi ces atomes n'ont pas à obéir au principe d'exclusion de Pauli. Il est possible d'avoir de multiples atomes occupant le même site du réseau avec différents spins nucléaires.

Lorsque le spectre d'énergie d'une telle transition d'horloge est observé, il s'avère qu'il existe une transition de la porteuse qui est dépourvue d'effets cinétiques. Lorsque ces atomes interagissent, ils peuvent produire un très important décalage de fréquence. Deux configurations différentes sont possibles : EG+ et EG−. C'est comme lorsque des atomes d'hydrogène se rencontrent, ils peuvent être sous l'état lié ou non-lié, en fonction de la configuration des spins nucléaires. Les états intriqués peuvent être créés entre deux atomes par « pilotage ». Par exemple, EG+ signifie que les deux spins nucléaires sont anti-symétrisés et les deux spins électroniques symétrisés et vice-versa. L'interaction elle-même est pleinement quantifiée. L'interaction n'est plus due à des perturbations autour de la porteuse et l'interaction est bien distincte de la porteuse. La transition de la porteuse n'a pas d'effet Doppler ni d'interaction atomique. Toutefois, ce n'est pas strictement le cas ici car, au niveau de 10^{-20}, d'autres interactions atomiques apparaissent, ce qui ouvre des perspectives pour de nouvelles découvertes. Avec ces systèmes, un temps de cohérence de six secondes a été atteint et un facteur de qualité de 8×10^{15}. Un temps de cohérence de 160 secondes n'a pas encore été atteint en raison de la

diffusion des photons causée par la lumière qui confine les atomes dans le piège, ce qui limite le temps de cohérence. La solution est de construire un réseau moins profond. M. Ye rappelle que c'est un réseau optique tridimensionnel et illustre la solution à l'aide de deux puits. Avec deux atomes confinés dans deux puits, si les puits sont fabriqués moins profonds, ces atomes peuvent toujours être piégés jusqu'à 100 secondes. Lorsque des lasers sont utilisés pour exciter les transitions, le fait qu'il existe un espace entre le réseau et la longueur d'onde du laser de l'horloge, qui n'est pas du même ordre, permet de détecter un changement de phase entre les deux puits. Les deux atomes peuvent alors être distingués.

Les récentes technologies permettent de configurer le réseau de sorte que les deux sites du réseau s'éloignent l'un de l'autre et s'adaptent exactement aux multiples entiers de la longueur d'onde du laser de l'horloge. Dans ce cas, lorsque les transitions sont initiées, les atomes, quel que soit l'endroit où ils se trouvent, « oscillent » toujours de manière synchronisée. Cela permet de maintenir le caractère indiscernable entre ces atomes et l'effet tunnel sera facilité. L'effet de diffusion de la lumière, qui génère un temps de vie limité, sera éliminé.

M. Ye conclut sa présentation en observant que dans un réseau 3D, les couches d'atomes sont seulement à 10 microns d'écart. Pour 10 microns, le décalage du spectre vers le rouge est de 10^{-21}. Si le niveau de 10^{-21} est atteint, lorsque les atomes sont placés en superposition cohérente entre la couche supérieure et la couche inférieure, les ondes de de Broglie s'étendront sur tout le réseau optique 3D. Dans ce cas, le temps n'est pas bien défini car ce « temps propre » est en réalité différent dans le réseau. C'est très différent d'un gradient de champ magnétique dans le sens où un gradient de champ magnétique agit uniquement sur le spin. L'effet gravitationnel est universel ; il agit à la fois sur les degrés de liberté des spins et les degrés de liberté externes. M. Ye suggère à la communauté scientifique d'examiner comment la cohérence quantique survivra à des situations telles que celle-ci. Il termine sa présentation en observant que les progrès dans le domaine des horloges atomiques ouvriront la voie à de nouveaux domaines de recherche.

Le président de la CGPM remercie M. Ye pour sa présentation.

La dernière conférence d'honneur « Mesurer à l'aide de constantes fondamentales ; comment fonctionnera le SI révisé » sera donnée par M. William Phillips, « Fellow » du NIST. M. Phillips a été colauréat du prix Nobel de physique en 1997 pour ses recherches sur les méthodes de refroidissement et le confinement d'atomes par laser. Il dirige le groupe « Laser Cooling and Trapping » de la division « Quantum Measurement » du laboratoire de mesure physique du NIST et est professeur émérite à l'Université du Maryland. Il est membre du « Joint Quantum Institute » et co-directeur d'un centre sur les frontières de la physique, financé par la « National Science Foundation », qui étudie les phénomènes quantiques dans divers sous-domaines de la physique. M. Phillips et ses collègues ont mis au point les techniques permettant de réaliser la première horloge à fontaine atomique, fonctionnant sur le principe proposé par Jerrold R. Zacharias. Les horloges atomiques, telles que réalisées dans d'autres laboratoires, sont devenues les étalons primaires du temps pour la conservation de l'heure au niveau international. Le président de la CGPM donne la parole à M. Phillips.

52. Mesurer à l'aide de constantes fondamentales ; comment fonctionnera le SI révisé

M. William Phillips remercie le président de la CGPM et déclare que c'est un réel plaisir et un honneur pour lui d'intervenir en ce jour historique. Il observe que la conférence qu'il va donner aurait pu s'intituler « comment peut-on définir un système d'unités en définissant les valeurs de certaines des constantes fondamentales de la nature ? »

M. Phillips note que la communauté de la métrologie est à la veille d'un moment historique puisque le 20 mai 2019, date de la Journée mondiale de la métrologie, le monde assistera à la plus grande révolution dans le domaine de la mesure depuis la Révolution française. Cette révolution consistera à modifier le Système international d'unités afin que toutes les unités de base du SI soient définies en fixant les valeurs de constantes fondamentales de la nature. Afin de comprendre comment cela est possible, M. Phillips retrace brièvement l'historique de l'unité de longueur car le mètre est déjà défini à partir d'une constante de la nature. Les premières mesures de longueur prenaient pour étalon des parties du corps humain, comme la coudée ou le pied. Cela était très pratique mais ces unités étaient peu cohérentes. Une solution pour remédier à ce problème a été d'utiliser un corps particulier, celui du roi ou du pharaon, comme étalon. Dans l'Égypte ancienne, ce système a bien fonctionné et de façon étonnamment moderne. La longueur de l'avant-bras du pharaon a été consacrée « coudée royale » et servait de référence pour un étalon fabriqué à partir de granit. Ceux construisant les pyramides devaient étalonner une fois par mois leurs étalons en bois par rapport à cet étalon en granit. Les pyramides ont été construites avec une grande précision : les lignes de base étaient identiques à 0,025 % près et étaient perpendiculaires à 12 secondes d'arc près. Cela constitue un incroyable exploit métrologique. Des artéfacts similaires à ceux égyptiens ont été utilisés partout en Europe au Moyen Âge, et même ultérieurement, et servaient d'étalons pour une ville en particulier : toutefois, ils étaient différents d'une ville à l'autre.

Cette variété d'étalons était un problème courant et l'un de ceux que les métrologistes de la Révolution française souhaitaient notamment résoudre. Pendant la Révolution française, l'idée du mètre, à savoir un objet qui pourrait être la mesure de toutes choses, s'est forgée dans l'esprit d'égalité et de fraternité de l'époque, et cet objet serait disponible pour tout un chacun (*À tous les temps, à tous les peoples*). Le mètre a été défini comme un dix-millionième de la distance du pôle à l'équateur le long du méridien passant par Paris. Néanmoins, il fallut sept années à Delambre et Méchain pour réussir à effectuer cette mesure : l'unité de longueur fut ainsi concrétisée par le « mètre des Archives », dans le même esprit que la coudée égyptienne dans le sens où la définition du mètre était un artéfact primaire, servant de référence pour étalonner des étalons de travail secondaires.

Cette idée a continué à être suivie après la signature de la Convention du Mètre en 1875, lorsqu'un nouvel artéfact du mètre a été produit. Cet artéfact avait une forme différente, la distance entre deux traits sur une barre en platine iridié étant considérée comme équivalente à un mètre. Il est apparu que cet étalon n'était pas approprié car il était difficile dans la pratique de déterminer ce qui constituait le milieu d'un trait. En outre, on s'est rendu compte que l'utilisation du prototype du mètre ne permettait pas d'effectuer des mesures de longueur aussi exactes qu'avec une technique fondée sur la longueur d'onde de la lumière. Cette exactitude était obtenue plus facilement à l'aide d'un interféromètre, un dispositif permettant de mesurer des longueurs à une exactitude d'une fraction d'un millionième de mètre. La longueur d'onde de la lumière devint *de facto* un étalon utilisé dans le monde entier comme définition du mètre, même si elle ne constituait pas la définition du SI. En 1960, année de l'invention du laser, le mètre a été redéfini comme un certain nombre de longueurs d'onde de la lumière produite par une lampe à krypton. Toutefois, la pureté de la lumière du krypton s'est avérée insuffisante par rapport à l'exactitude des mesures de longueur effectuées par les métrologistes à l'aide de la lumière laser.

Les lasers, comme le laser à hélium-néon qui est un laser rouge asservi sur une transition particulière de la molécule d'iode, sont devenus *de facto*, mais de façon non officielle, des étalons de longueur, alors même que la définition du SI reposait sur le krypton. Une fois encore, il est devenu clair que la définition du mètre du SI devait être changée. Le choix évident aurait été de sélectionner la longueur d'onde du laser à hélium-néon asservi à l'iode pour définir le mètre. En lieu et place, la communauté de la métrologie a effectué un choix radical et pérenne : définir la vitesse de la lumière. La Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 17e réunion (1983) définit le mètre comme la longueur du trajet parcouru par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde. Cela fixe effectivement la vitesse de la lumière. La vitesse de la lumière c est égale à la longueur d'onde de la lumière λ multipliée par la fréquence f selon la relation :

$$c = \lambda f.$$

Cela signifie que pour toute lumière, si la fréquence est déterminée, la longueur d'onde peut alors être déduite. Cette définition repose sur les améliorations apportées aux lasers et aux mesures de fréquence, telles celles réalisées par Jan Hall et Theodore Hänsch : ces derniers ont ainsi reçu le prix Nobel de physique en 2005 afin de reconnaître leur développement de la spectroscopie laser de précision, y compris la technique des peignes de fréquence optique.

M. Phillips qualifie la définition du mètre de belle et brillante et estime que la CGPM est sur le point d'apporter la même beauté à la définition du kilogramme. Il retrace brièvement l'historique de la mesure des masses. Pendant l'Antiquité, la masse était définie par des artéfacts ou par des étalons fabriqués. À l'évidence, la difficulté concernant de tels étalons est qu'ils ne sont pas universels ; des copies sont requises. Dans le même esprit révolutionnaire que celui ayant prévalu pour établir une nouvelle définition du mètre, fondée sur l'idée que le mètre était la mesure de toutes choses, un kilogramme est défini vers 1793 comme la masse d'un décimètre cube d'eau, soit un litre. Le concept était satisfaisant, à l'exception du fait que le volume d'eau change en fonction de la température et qu'il n'est pas aisé de mesurer avec exactitude un litre d'eau. En raison de cette difficulté, la définition fut changée, un artéfact en platine devenant le kilogramme des Archives, marquant ainsi un retour à l'ancienne pratique d'utiliser des artéfacts. Après la signature de la Convention du Mètre en 1875, un nouvel artéfact du kilogramme, le prototype international du kilogramme, est fabriqué en platine iridié. La définition actuelle est la suivante : le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. Aujourd'hui, au 21e siècle, l'unité de masse est un artéfact, un prototype en métal fabriqué au 19e siècle à partir d'un objet lui-même fabriqué au 18e siècle. Cette définition fondée sur un artéfact est imparfaite car la définition de l'unité de masse est celle de la masse d'un objet. La masse de cet objet pourrait varier mais on a établi comme une loi qu'elle ne pouvait pas changer. Si la masse du prototype international du kilogramme venait à changer, tout le reste dans l'univers changerait également de masse.

M. Phillips observe que la masse du prototype international du kilogramme a en effet changé. Une comparaison du prototype international du kilogramme par rapport à plusieurs autres prototypes de masse fabriqués de la même manière a montré une variation de masse de plusieurs microgrammes sur une période de plusieurs années. Bien sûr, la masse du prototype international lui-même ne devrait pas changer puisqu'elle est par convention la définition du kilogramme : telle est la situation à laquelle il faut remédier. La même approche que celle suivie pour définir le mètre doit être appliquée pour pallier ce dilemme : pour définir le mètre, il a été nécessaire de définir la vitesse de la lumière. Concernant la redéfinition du kilogramme, c'est la constante de Planck qui a été choisie. M. Philipps explique la raison pour laquelle utiliser l'une des équations les plus célèbres de l'histoire, $E = mc^2$. E est l'énergie d'un objet au repos, m la masse au repos et c la vitesse de la lumière.

Dans une seconde équation, $E = hf$, E est l'énergie d'un photon (une particule de lumière), qui est égale à la constante de Planck h, multipliée par la fréquence de la lumière f. En combinant ces deux équations, il est possible de définir la masse :

$$E = mc^2 = hf = E$$

$$m = hf/c^2$$

m serait la variation de la masse d'une particule lorsqu'elle est émise par un photon de fréquence f, qui peut être mesuré. Définir la constante de Planck h permet de définir la masse.

Il n'est pas possible de peser des photons avec suffisamment d'exactitude, c'est pourquoi l'une des solutions est d'avoir recours à une balance de Kibble (balance du watt), un appareil électromécanique inventé par Bryan Kibble. Dans une balance ordinaire, la masse est mesurée en équilibrant la force gravitationnelle d'un côté de la balance et la force gravitationnelle d'une masse inconnue de l'autre côté de la balance. Une méthode similaire peut être utilisée pour mesurer la force créée par une bobine traversée par un courant dans un champ magnétique. La force gravitationnelle sur cette masse peut être mise en correspondance avec la force électromagnétique créée par la bobine. C'est ainsi que l'ampère est défini, comme la force produite par des conducteurs placés dans un champ magnétique.

Cette définition de l'ampère pose cependant un problème : elle est peu pratique. Il est très difficile de déterminer la nature exacte de ce champ magnétique. Kibble a surmonté ce problème en suggérant que la tension induite dans la bobine pouvait être mesurée lorsqu'elle se déplace dans le champ magnétique. La mesure de cette tension permet d'obtenir suffisamment d'informations sur le champ magnétique pour définir le courant. Si les métrologistes disposaient d'une autre façon de définir le courant, par exemple en utilisant des constantes électriques quantiques, la définition pourrait être intervertie pour définir la force et deviendrait ainsi une définition de la masse. C'est l'idée de l'approche de la balance de Kibble concernant une nouvelle définition du kilogramme.

La balance de Kibble fonctionne selon deux phases. La phase de déplacement consiste à déplacer la bobine dans le champ magnétique pour produire une tension. Le courant passe alors dans la bobine dans la phase de pesée, ce qui permet de mesurer la force. Ce mode opératoire permet d'obtenir l'expression suivante :

$$mgv = IV$$

où mg est la force mesurée lors de la phase de pesée, v la vitesse au cours de la phase de déplacement, I le courant lors de la phase de pesée et V la tension lors de la phase de déplacement. Chaque côté de l'expression exprime une puissance : puissance mécanique d'une force par la vitesse à gauche et puissance électrique d'un courant par la tension à droite. Si ces deux types de puissance sont les mêmes, comme ils doivent l'être, cette équation peut être résolue pour déduire la masse qui est égale à la puissance électrique divisée par l'accélération de la gravité, multipliée par la vitesse.

$$m = IV/gv$$

M. Phillips explique que cette équation est liée à la constante de Planck du fait des méthodes quantiques utilisées pour mesurer le courant et la tension à l'aide de l'effet Hall quantique et de l'effet Josephson. Ainsi, on obtient une tension qui est proportionnelle à $h/2e$ en raison de l'effet Josephson et un courant qui est proportionnel à e en raison de l'effet Hall quantique et de l'effet Josephson qui sont utilisés pour établir le courant. La valeur de la charge élémentaire sera fixée pour définir l'ampère dans le SI révisé. La masse est proportionnelle à la constante de Planck car les charges élémentaires e s'annulent.

M. Phillips précise que la balance de Kibble du NIST permet de réaliser le kilogramme à quelques 10^{-8}, avec une exactitude meilleure que la variation du prototype international du

kilogramme due à une contamination de surface. Il ajoute que l'avantage que présente le fait de redéfinir le kilogramme à l'aide de la constante de Planck est que cela ne limite pas les métrologistes à une seule méthode de réalisation du kilogramme. Une autre méthode repose sur l'utilisation d'une sphère de silicium. Mesurer la constante de réseau et tous les autres paramètres d'une sphère de silicium constitue une autre façon de déterminer la valeur de la constante de Planck. La cohérence des différentes méthodes de réalisation du kilogramme assoit la confiance des métrologistes vis-à-vis de la révision du SI. Le travail effectué afin de réaliser le kilogramme à l'aide de balances de Kibble et de sphères de silicium a été un effort de la communauté mondiale de la métrologie.

Après le vote sur le Projet de résolution A, la définition de l'ampère changera : l'ampère ne sera plus défini en fonction des forces entre des conducteurs mais à l'aide de la charge élémentaire e ; l'ampère pourra être réalisé par comptage d'un certain nombre d'électrons par seconde mais cela ne sera pas assez satisfaisant pour concurrencer l'utilisation de l'effet Hall quantique et de l'effet Josephson comme façon de réaliser l'ampère selon sa nouvelle définition. Étant donné que les valeurs numériques de e et h seront fixées, $2e/h$ et h/e^2 seront exacts, ce qui permettra d'utiliser les effets Hall quantique et Josephson pour mesurer toutes les grandeurs électriques. Comme mentionné précédemment, l'un des avantages que cela présente est de disposer au sein du SI d'un ensemble unifié d'unités électriques.

M. Phillips conclut sa présentation en citant deux autres unités, la mole et le kelvin. La mole était précédemment la quantité de matière avec un nombre d'entités égal au nombre d'atomes de ^{12}C dans 12 g de ^{12}C. Après la révision du SI, la mole deviendra un nombre fondé sur la valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro N_A. Le kelvin, précédemment 1/273,16 du point triple de l'eau, sera défini à l'aide de la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann k.

M. Phillips observe que la Révolution française a permis de mettre en place le système métrique, le mètre étant la mesure d'une longueur et le kilogramme la mesure d'une masse. La Convention du Mètre constitue un accord international au sujet de ces unités. Conformément à la décision prise par la CGPM à sa 26e réunion, ce sera le 20 mai 2019, jour de l'anniversaire de la signature en 1875 de la Convention du Mètre, que le monde assistera à la plus grande révolution concernant les unités de mesure depuis la Révolution française, les définitions des unités s'affranchissant de leur dépendance à des étalons de mesure. Toutes les unités de base du Système international d'unités seront définies en fixant les valeurs numériques des constantes fondamentales de la nature.

Le président de la CGPM remercie M. Phillips pour sa présentation. Il demande ensuite à M. Milton (directeur du BIPM) de présenter le Projet de résolution A « Sur la révision du Système international d'unités (SI) ».

53. Présentation et vote du Projet de résolution A « Sur la révision du Système international d'unités (SI) »

Le directeur du BIPM prononce l'allocution suivante :

« M. le président de la CGPM, M. le président du CIPM, chers représentants de nos 60 États Membres, chers représentants de nos 42 États et Entités économiques associés, Mesdames et Messieurs,

Vous vous êtes réunis à Versailles pour la 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures et avez pu prendre connaissance du travail effectué par les laboratoires nationaux de métrologie du

monde entier afin qu'il soit possible de proposer une révision des unités de base du Système international d'unités, le SI.

Le Comité international des poids et mesures (CIPM) a rédigé le texte de ce projet de résolution dont l'objectif est de mettre en œuvre de nouvelles définitions. Le projet a été soumis aux États Membres il y a neuf mois. Le texte complet est disponible sur le site internet du BIPM et a pu être examiné par tout un chacun. Le projet de résolution faisant trois pages, je ne vais pas le lire en entier.

« La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

considérant

– *qu'il est essentiel de disposer d'un Système international d'unités (SI) uniforme et accessible dans le monde entier, pour le commerce international, l'industrie de haute technologie, la santé humaine et la sécurité, la protection de l'environnement, les études sur l'évolution du climat, ainsi que la science fondamentale qui étaye tous ces domaines,*
– *que les unités du SI doivent être stables sur le long terme, auto-cohérentes et réalisables dans la pratique, en étant fondées sur la description théorique actuelle de la nature, au plus haut niveau,*
– *que les conditions requises par la CGPM à sa 24e réunion (2011), confirmées à sa 25e réunion (2014), pour procéder à l'adoption d'une telle révision du SI sont désormais remplies,[…] »*

Vous avez entendu que la proposition de réviser le SI consiste à fonder le SI sur des constantes fondamentales. Nous allons demander aux États Membres d'approuver l'utilisation de ces constantes, ce qui permettra de disposer d'un nouveau système d'unités stable. Il a été convenu que ces changements prendraient effet l'année prochaine, à compter du 20 mai 2019, date de la Journée mondiale de la métrologie. Je vais vous faire lecture des valeurs numériques fixées des constantes fondamentales qui sont l'objet de ce vote et qui doivent être approuvées comme fondement du système international.

« [La CGPM] ***décide*** *qu'à compter du 20 mai 2019, le Système international d'unités, le SI, est le système d'unités selon lequel :*

– *la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé,* $\Delta\nu_{Cs}$*, est égale à 9 192 631 770 Hz,*
– *la vitesse de la lumière dans le vide, c, est égale à 299 792 458 m/s,*
– *la constante de Planck, h, est égale à* $6{,}626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ *J s,*
– *la charge élémentaire, e, est égale à* $1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ *C,*
– *la constante de Boltzmann, k, est égale à* $1{,}380\ 649 \times 10^{-23}$ *J/K,*
– *la constante d'Avogadro,* N_A*, est égale à* $6{,}022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ *mole*$^{-1}$*,*
– *l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence* 540×10^{12} *Hz,* K_{cd}*, est égale à 683 lm/W. »*

M. le président de la CGPM, je pense que nous pouvons désormais passer au vote. »

54. Vote du Projet de résolution A

Le président de la CGPM remercie M. Milton et annonce que le vote du Projet de résolution A « Sur la révision du Système international d'unités (SI) » se fera par appel nominal des États Membres par M. McLaren, secrétaire de la CGPM, chaque État Membre devant se prononcer pour ou contre. M. McLaren ajoute que les 54 États Membres représentés seront appelés à voter par ordre alphabétique. Un carton portant le nom de l'État a été fourni au chef de chaque délégation et le nom de chacun des États Membres sera annoncé, d'abord en français puis en anglais : le chef de la délégation devra ensuite lever son carton puis voter en prononçant « Yes » ou « Oui ». Tout État Membre souhaitant voter contre ou s'abstenir devra simplement garder le silence.

Suite au vote, le Projet de résolution A « Sur la révision du Système international d'unités (SI) » est adopté à l'unanimité comme Résolution 1 « Sur la révision du Système international d'unités (SI) ».

Le président de la CGPM remercie les délégués et clôt la septième séance.

Huitième session – 16 novembre 2018 (après-midi)

Le président de la CGPM souhaite la bienvenue aux délégués pour la huitième séance.

55. Explication de la procédure de vote ; présentation de la « présélection » de candidats à l'élection du CIPM et nomination des scrutateurs

M. McLaren, en tant que secrétaire de la CGPM, rappelle aux délégués que deux élections doivent avoir lieu : l'une concernant le CIPM et l'autre concernant la Commission pour l'élection du CIPM (CEC). Il demande à M. Gunn (Royaume-Uni), président de la CEC, de présenter la procédure. M. Gunn explique que l'élection du CIPM est une procédure vitale afin de s'assurer de mettre en place un CIPM « approprié » pour faire avancer la métrologie au cours de la prochaine période de quatre ans. Il rappelle que la CEC a été créée au cours de la 25e réunion de la CGPM (2014) afin de superviser la procédure d'élection qui avait été approuvée lors de cette réunion. La 26e réunion de la CGPM est donc la première réunion où la CEC est impliquée dans le processus d'élection des 18 membres du CIPM. M. Gunn explique la procédure d'élection du CIPM : un appel à candidatures est lancé auprès des États Membres puis les candidatures sont évaluées par le CIPM, en fonction des considérations générales fixées pour être membre du CIPM et selon les compétences et qualités personnelles nécessaires, afin de pouvoir fournir une liste des candidats répondant aux critères. Le CIPM établit une liste de candidats recommandés qui, dans leur ensemble, permettraient au CIPM de remplir sa mission de la façon la plus efficace possible au cours de la prochaine période de quatre ans. Cette liste de candidats est transmise à la CEC pour examen, avec les dossiers de candidature. M. Gunn précise que la CEC a reçu une liste de très bons candidats et que tous les candidats inscrits sur les bulletins de vote ont les qualifications et l'expérience requises pour siéger au CIPM.

M. Gunn observe que la CEC a salué le travail accompli par le CIPM et a convenu que la liste transmise permet de mettre en place un CIPM efficace et efficient ; toutefois, la CEC a souhaité examiner une question en particulier, à savoir l'équilibre géographique au sein du CIPM. Ainsi, outre les compétences et l'expérience requises, la CEC a étudié la distribution géographique des États Membres, la diversité de tailles des États Membres et leur contribution financière. La CEC considère qu'il existe de nombreuses manières de prendre en considération ces facteurs. Néanmoins, la CEC qui sera nouvellement élue devra poursuivre ce travail avec le CIPM afin de définir ensemble les critères adéquats pour assurer une représentation régionale équitable au sein du CIPM, avant la prochaine élection lors de la 27e réunion de la CGPM.

M. Gunn rappelle, par souci de transparence, que la CEC a discuté en détail de la question de l'éligibilité. Au moment où les candidatures ont été closes, certaines des formalités administratives concernant l'accession de l'Ukraine n'étaient pas totalement terminées. Toutefois, l'Ukraine est devenue État Membre le 7 août 2018, avant la fin des délibérations de la CEC et bien avant cette élection du CIPM, c'est pourquoi la CEC, afin d'équilibrer la représentation régionale, a pris en considération le candidat ukrainien. M. Gunn ajoute qu'il est important d'être transparent sur ce point car certains délégués de la CGPM pensent que si l'accession n'était pas achevée au moment des candidatures, ils pourraient remettre en question l'éligibilité du candidat ukrainien. Pour la CEC, il n'y a pas de doute quant à l'éligibilité du candidat ukrainien mais c'est une question que les délégués de cette CGPM pourraient soulever.

À la suite de ses délibérations, la CEC recommande de procéder à l'élection des 18 candidats signalés sur les bulletins de vote par un astérisque. Ces 18 candidats ont été présélectionnés par la CEC car ils formeraient un CIPM efficace, efficient et représentatif.

M. Gunn rappelle que lors de la 24e réunion de la CGPM (2011), il avait évoqué la nécessité d'assurer une véritable élection. C'est pourquoi il précise que même si la CEC recommande cette présélection de candidats éligibles, les délégués sont libres de voter pour les candidats de leur choix parmi ceux indiqués sur le bulletin de vote. Le bulletin de vote contient ainsi 22 noms et il est demandé aux délégués de sélectionner les 18 personnes qu'ils souhaitent élire. Tout bulletin comptant plus de 18 noms sélectionnés sera considéré comme nul.

M. Gunn conclut sa présentation en observant que quatre scrutateurs se sont portés volontaires pour superviser les élections : il s'agit de Mme Buzoianu (Roumanie), M. Francois (Nouvelle-Zélande), Mme Gao (Chine) et Mme Guliyeva (BIPM). Les scrutateurs feront le décompte des votes, récuseront tout vote ne respectant pas les règles et fourniront la liste des candidats élus.

M. McLaren donne des explications quant à l'élection des membres de la CEC. II observe qu'il supervisera cette élection car M. Gunn a fait part de son intention de présenter à nouveau sa candidature. Il est demandé aux délégués de ne pas voter pour plus de sept candidats sur le bulletin de vote pour l'élection de la Commission. Il ajoute que deux bulletins de vote vont être distribués, l'un pour l'élection du CIPM, l'autre pour l'élection de la Commission pour l'élection du CIPM. Chacun des États Membres sera invité à déposer ses bulletins de vote dans les urnes appropriées lors du vote par appel nominal.

56. Approbation du texte définitif et vote du Projet de résolution D

Le texte de chaque projet de résolution est disponible dans la Convocation de la Conférence générale des poids et mesures à sa 26e réunion (Annexe A).

Le texte du Projet de résolution D est affiché à l'écran. M. McLaren demande si des États Membres ont l'intention de voter contre le projet de résolution avant de procéder au vote par appel nominal des États Membres ayant le droit de vote. Il ajoute que selon les indications données par les 26 États Membres ayant participé au Groupe de travail sur la dotation du BIPM, les votes devraient être constitués de votes positifs ou d'abstentions. Il rappelle qu'un seul vote négatif conduira à un rejet de la résolution et nécessitera de convoquer une réunion extraordinaire de la CGPM en 2019 pour établir le budget. Aucune délégation ne semble avoir l'intention de voter contre le projet de résolution.

Au cours du vote, la délégation turque fait remarquer que le montant de la dotation pour l'année 2022 est supérieur de 2 000 euros au montant indiqué dans la Convocation. Après discussion, il est convenu que le montant de la dotation en 2022 est de 12 606 892 euros. Il est précisé que la dotation pour les années 2020 à 2023 soumise au vote comprend une augmentation composée annuelle de 1 %.

Le Projet de résolution D est adopté comme Résolution 4 « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2020 à 2023 » avec cinq abstentions : l'Argentine, l'Autriche, l'Espagne, les États-Unis d'Amérique et la République tchèque. Le montant de la dotation en 2022 sera corrigé pour être équivalent à 12 606 892 euros.

M. Steele (Canada) pose une question de procédure concernant le dernier vote. Il observe que les délégués ont voté le projet de résolution, comme cela est généralement le cas, mais le texte comprend

une note explicative qui précise la dotation de base et mentionne les pays ayant accédé. Il souligne que la note explicative la plus récente compte un pays supplémentaire ayant accédé avant le vote et fait état d'une probable exclusion. Si cette note explicative est intégrée aux comptes rendus de la réunion et à la résolution, il demande que la note soit mise à jour afin de fournir les informations les plus récentes, et pas seulement les informations disponibles au moment de l'envoi de la convocation. Si cette note n'est pas dans le document officiel, il retire sa demande. Il préfère que la mise à jour soit effectuée pour que les informations correspondent à la situation au jour du vote. M. Henson (BIPM) en convient et indique que la note devra être supprimée ou mise à jour pour refléter la situation au moment du vote. Il suggère de supprimer cette note explicative.

57. Élection du CIPM et élection de la Commission pour l'élection du CIPM

L'élection du CIPM et celle de la Commission pour l'élection du CIPM ont eu lieu conformément à la procédure énoncée au point 55 de l'ordre du jour. Les résultats sont comme suit :

Élection du CIPM

M. Gunn annonce les résultats de l'élection du CIPM.

Candidat	Nationalité	Votes
Bulygin, F.	russe	44
del Campo Maldonado, D.	espagnole	45
Castelazo, I.	mexicain	45
Dimarcq, N.	français	48
Duan, Y.	chinois	48
Laiz, H.	argentin	46
Liew, T.	singapourien	47
Louw, W.	sud-africain	51
Neyezhmakov, P.	ukrainien	33
Olthoff, J.	américain	49
Park, S.-R.	sud-coréen	49
Rastello, M.L.	italienne	53
Richard, P.	suisse	46
Rietveld, G.	néerlandais	46
Sené, M.	britannique	47
Steele, A.	canadien	48
Ullrich, J.	allemand	52
Usuda, T.	japonais	52

M. Gunn déclare les 18 candidats, tels que recommandés par la Commission pour l'élection du CIPM, dûment élus au CIPM.

Élection de la Commission pour l'élection du CIPM

M. McLaren annonce les résultats de l'élection de la Commission pour l'élection du CIPM. Les candidats élus sont les suivants :

Candidat	**Affiliation**
Gunn, R.	NPL (Royaume-Uni)
Hoell, A.	Ministère de l'économie (Allemagne)
Jun, X.	Administration nationale de réglementation du marché (Chine)
Lagauterie, C.	Ministère de l'économie (France)
Miki, Y.	NMIJ/AIST (Japon)
Mukhufi, N.	NMISA (Afrique du Sud)
Saundry, C.	NIST (États-Unis d'Amérique)

58. Questions diverses

Mme Chambon (France) remercie les cinq membres sortants du CIPM – Mme Buzoianu, M. Érard, M. McLaren, M. May et M. Inglis – pour leur excellent travail.

Le président de la CGPM remercie le personnel du BIPM et tous ceux impliqués dans l'organisation de la réunion pour leur travail. Le directeur du BIPM souhaite remercier en particulier Mme Fellag Ariouet pour avoir géré l'équipe responsable de coordonner la 26e réunion de la CGPM et d'en assurer le bon déroulement. Mme Fellag Ariouet fait également partie de l'équipe en charge de l'organisation de l'exposition majeure « *Sur mesure, les 7 unités du monde* » au Musée des arts et métiers à Paris. Le président de la CGPM remercie l'ensemble des conférenciers ; il ajoute qu'en tant que personne ne faisant pas partie de la communauté de la métrologie, cela a été un réel plaisir pour lui de présider cette réunion et qu'il a beaucoup appris. Le président de la CGPM remercie les interprètes pour leur travail intense, ainsi que l'ensemble des délégations et des personnes qui ont participé à cette réunion et qui en ont assuré le succès. Il constate que cette réunion a été très fructueuse à tous points de vue. Enfin, il remercie le président du CIPM, M. Barry Inglis, le directeur du BIPM, M. Martin Milton, et le secrétaire, M. James McLaren.

M. May remercie M. Candel au nom de l'ensemble des délégués d'avoir accepté de présider cette réunion ; M. Inglis confirme les propos de M. May en soulignant que M. Candel a présidé de façon remarquable cette 26e réunion.

59. Clôture de la réunion

Le président de la CGPM clôt la 26e réunion de la CGPM.

Résolutions adoptées par la
Conférence générale des poids et mesures
lors de sa 26e réunion (2018)

Résolution 1

Sur la révision du Système international d'unités (SI)

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

considérant

- qu'il est essentiel de disposer d'un Système international d'unités (SI) uniforme et accessible dans le monde entier, pour le commerce international, l'industrie de haute technologie, la santé humaine et la sécurité, la protection de l'environnement, les études sur l'évolution du climat, ainsi que la science fondamentale qui étaye tous ces domaines,
- que les unités du SI doivent être stables sur le long terme, auto-cohérentes et réalisables dans la pratique, en étant fondées sur la description théorique actuelle de la nature, au plus haut niveau,
- qu'une révision du SI visant à satisfaire ces exigences a été proposée dans la Résolution 1 adoptée à l'unanimité par la CGPM à sa 24e réunion (2011), qui expose en détail une nouvelle façon de définir le SI à partir d'un ensemble de sept constantes, choisies parmi les constantes fondamentales de la physique et d'autres constantes de la nature, à partir desquelles les définitions des sept unités de base sont déduites,
- que les conditions requises par la CGPM à sa 24e réunion (2011), confirmées à sa 25e réunion (2014), pour procéder à l'adoption d'une telle révision du SI sont désormais remplies,

décide qu'à compter du 20 mai 2019, le Système international d'unités, le SI, est le système d'unités selon lequel :

- la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$, est égale à 9 192 631 770 Hz,
- la vitesse de la lumière dans le vide, c, est égale à 299 792 458 m/s,
- la constante de Planck, h, est égale à $6{,}626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- la charge élémentaire, e, est égale à $1{,}602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- la constante de Boltzmann, k, est égale à $1{,}380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- la constante d'Avogadro, N_{A}, est égale à $6{,}022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol^{-1},
- l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{cd}, est égale à 683 lm/W,

où les unités hertz, joule, coulomb, lumen et watt, qui ont respectivement pour symbole Hz, J, C, lm et W, sont reliées aux unités seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela, qui ont respectivement pour symbole s, m, kg, A, K, mol et cd, selon les relations Hz = s^{-1}, J = kg m^2 s^{-2}, C = A s, lm = cd m^2 m^{-2} = cd sr, et W = kg m^2 s^{-3}.

prend acte des conséquences de la révision du SI concernant les unités de base du SI, énoncées dans la Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 24e réunion (2011), et les confirme dans les annexes de la présente résolution, qui ont même force que la résolution elle-même,

invite le Comité international des poids et mesures (CIPM) à publier une nouvelle édition de la *Brochure sur le SI*, « Le Système international d'unités », contenant une description complète du SI révisé.

Annexe 1. Abrogation des précédentes définitions des unités de base

Il résulte de la nouvelle définition du SI décrite ci-dessus qu'à compter du 20 mai 2019 :

- la définition de la seconde en vigueur depuis 1967/68 (13e réunion de la CGPM, Résolution 1) est abrogée,
- la définition du mètre en vigueur depuis 1983 (17e réunion de la CGPM, Résolution 1) est abrogée,
- la définition du kilogramme en vigueur depuis 1889 (1ère réunion de la CGPM, 1889, 3e réunion de la CGPM, 1901), établie à partir de la masse du prototype international du kilogramme, est abrogée,
- la définition de l'ampère en vigueur depuis 1948 (9e réunion de la CGPM), établie à partir de la définition proposée par le CIPM (1946, Résolution 2), est abrogée,
- la définition du kelvin en vigueur depuis 1967/68 (13e réunion de la CGPM, Résolution 4) est abrogée,
- la définition de la mole en vigueur depuis 1971 (14e réunion de la CGPM, Résolution 3) est abrogée,
- la définition de la candela en vigueur depuis 1979 (16e réunion de la CGPM, Résolution 3) est abrogée,
- la décision d'adopter les valeurs conventionnelles de la constante de Josephson K_{J-90} et de la constante de von Klitzing R_{K-90}, prise par le CIPM (1988, Recommandations 1 et 2) à la demande de la CGPM (18e réunion de la CGPM, 1987, Résolution 6) pour l'établissement des représentations du volt et de l'ohm à l'aide des effets Josephson et Hall quantique, respectivement, est abrogée.

Annexe 2. Statut des constantes utilisées antérieurement dans les anciennes définitions

Il résulte de la nouvelle définition du SI décrite ci-dessus, et des valeurs recommandées dans l'ajustement spécial de 2017 du *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA), sur lesquelles se fondent les valeurs des constantes choisies pour définir le SI, qu'à compter du 20 mai 2019 :

- la masse du prototype international du kilogramme, $m(K)$, est égale à 1 kg avec une incertitude-type relative égale à celle de la valeur recommandée de h au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir $1{,}0 \times 10^{-8}$; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la perméabilité magnétique du vide, μ_0, est égale à $4\pi \times 10^{-7}$ H m^{-1} avec une incertitude-type relative égale à celle de la valeur recommandée de la constante de structure fine α au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir $2{,}3 \times 10^{-10}$; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la température thermodynamique du point triple de l'eau, T_{TPW}, est égale à 273,16 K avec une incertitude-type relative presque égale à celle de la valeur recommandée de k au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir $3{,}7 \times 10^{-7}$; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la masse molaire du carbone 12, $M(^{12}C)$, est égale à 0,012 kg mol^{-1} avec une incertitude-type relative égale à celle de la valeur recommandée de $N_A h$ au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir $4{,}5 \times 10^{-10}$; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale.

Annexe 3. Les unités de base du SI

La nouvelle définition du SI décrite ci-dessus, fondée sur les valeurs numériques fixées des constantes choisies, permet de déduire la définition de chacune des sept unités de base du SI à l'aide d'une ou plusieurs de ces constantes, selon les cas. Les définitions qui en découlent, qui prendront effet à compter du 20 mai 2019, sont les suivantes :

- La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1}.
- Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c, égale à 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en m/s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.
- Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h, égale à $6{,}626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à kg $\mathrm{m}^2\ \mathrm{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.
- L'ampère, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e, égale à $1{,}602\,176\,634 \times 10^{-19}$ lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.
- Le kelvin, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k, égale à $1{,}380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en J K^{-1}, unité égale à kg $\mathrm{m}^2\ \mathrm{s}^{-2}\ \mathrm{K}^{-1}$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h, c et $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.
- La mole, symbole mol, est l'unité de quantité de matière du SI. Une mole contient exactement $6{,}022\,140\,76 \times 10^{23}$ entités élémentaires. Ce nombre, appelé « nombre d'Avogadro », correspond à la valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro, N_{A}, lorsqu'elle est exprimée en mol^{-1}.
  La quantité de matière, symbole n, d'un système est une représentation du nombre d'entités élémentaires spécifiées. Une entité élémentaire peut être un atome, une molécule, un ion, un électron, ou toute autre particule ou groupement spécifié de particules.
- La candela, symbole cd, est l'unité du SI d'intensité lumineuse dans une direction donnée. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{cd}, égale à 683 lorsqu'elle est exprimée en lm W^{-1}, unité égale à cd sr W^{-1}, ou cd sr $\mathrm{kg}^{-1}\ \mathrm{m}^{-2}\ \mathrm{s}^3$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h, c et $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.

Résolution 2

Sur la définition des échelles de temps

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

considérant que

- la Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 14e réunion (1971) demande au CIPM de donner une définition du Temps atomique international (TAI),
- aucune définition exhaustive et autonome du TAI n'a été établie de façon officielle par le CIPM,
- le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) a proposé, dans sa Recommandation S2 (1970), une définition du TAI qui a été complétée en 1980 par une déclaration du CCDS,
- la CGPM, lors de sa 15e réunion (1975), a constaté que le Temps universel coordonné (UTC), dérivé du TAI, est à la base du temps civil et a estimé son emploi parfaitement recommandable,

reconnaissant que

- la mission du BIPM est d'assurer et de promouvoir la comparabilité mondiale des mesures, en fournissant notamment un système international d'unités cohérent,
- l'Union astronomique internationale (UAI) et l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), avec l'Association internationale de géodésie (AIG), ont pour responsabilité de définir des systèmes de référence pour les applications spatiales et terrestres,
- l'Union internationale des télécommunications – Secteur des radiocommunications (UIT-R) a pour responsabilité de coordonner la dissémination des signaux de temps et de fréquence et de formuler des recommandations pertinentes,
- le Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS), un service de l'UAI et de l'UGGI, a pour responsabilité de fournir les informations requises afin de relier les systèmes de référence terrestre et céleste, parmi lesquelles : les mesures variant dans le temps de l'angle de rotation de la Terre, UT1 - UTC ; la prédiction de faible précision d'UT1 - UTC transmise par les signaux de temps, DUT1 ; et les données permettant de décider et d'annoncer l'insertion des secondes intercalaires,

notant que

- la Résolution A4 (1991) de l'UAI définit, dans ses Recommandations I et II, le Système de référence géocentrique comme un système de coordonnées spatio-temporelles pour la Terre dans le cadre de la théorie de relativité générale, et nomme, dans sa Recommandation III, le temps-coordonnée de ce système de référence le « Temps-coordonnée géocentrique (TCG) »,
- la Résolution A4 (1991) de l'UAI définit en outre, dans sa Recommandation IV, le Temps terrestre (TT) comme un autre temps-coordonnée dans le Système de référence géocentrique, différant du TCG par une marche constante, l'unité d'échelle de TT étant choisie de sorte qu'elle s'accorde avec la seconde du SI sur le géoïde,
- la Résolution B1.9 (2000) de l'UAI redéfinit TT comme une échelle de temps qui diffère du TCG par une marche constante : $d\mathrm{TT}/d\mathrm{TCG} = 1 - L_G$, où $L_G = 6{,}969290134 \times 10^{-10}$ est une constante de définition (la valeur numérique de L_G a été choisie pour se conformer à la

valeur de W_0 = 62636856,0 m^2s^{-2} pour le potentiel de pesanteur sur le géoïde tel que recommandé par la Commission spéciale 3 de l'AIG en 1999),

– la redéfinition de TT en 2000 a introduit une ambiguïté entre TT et le TAI car le CCDS avait déclaré en 1980 que le TAI avait « comme unité d'échelle la seconde du SI telle qu'elle est réalisée sur le géoïde en rotation » alors que la définition de TT ne fait pas référence au géoïde,

déclare que

– le TAI est une échelle de temps continue produite par le BIPM à partir des meilleures réalisations de la seconde du SI et que c'est une réalisation de TT comme défini dans la Résolution B1.9 (2000) de l'UAI,
– pour la conversion du temps propre d'une horloge en TAI, le décalage relativiste de fréquence est calculé par rapport à la surface équipotentielle W_0 = 62636856,0 m^2s^{-2} du potentiel de pesanteur de la Terre, adoptée de façon conventionnelle, en conformité avec la constante L_G définissant la marche de TT,
– tel qu'indiqué dans la Résolution A4 (1991) de l'UAI, TT - TAI est égal à 32,184 s exactement au 1er janvier 1977, 0h TAI au géocentre, pour assurer une continuité de TT avec le temps des éphémérides,
– l'UTC produit par le BIPM, fondé sur le TAI, est l'unique échelle de temps recommandée comme référence internationale et qu'il est à la base du temps civil dans la plupart des pays,
– l'UTC diffère du TAI seulement par un nombre entier de secondes, tel que publié par le BIPM,
– les utilisateurs peuvent dériver l'angle de rotation de la Terre en appliquant à l'UTC les valeurs observées ou prédites d'UT1 - UTC, telles que fournies par l'IERS,
– l'UTC fournit un moyen de mesurer les intervalles de temps et de disséminer l'étalon de fréquence pendant les intervalles qui ne comprennent pas de secondes intercalaires,
– la traçabilité à l'UTC est obtenue par l'intermédiaire des réalisations locales en temps réel maintenues par les laboratoires participant au calcul de l'UTC, dénommées « UTC(k) » où « k » identifie un laboratoire particulier,

confirme que

1. le Temps atomique international (TAI) est une échelle de temps continue produite par le BIPM à partir des meilleures réalisations de la seconde du SI. Le TAI est une réalisation du Temps terrestre (TT) ayant la même marche que TT, tel que défini par l'UAI dans sa Résolution B1.9 (2000),
2. le Temps universel coordonné (UTC) est une échelle de temps produite par le BIPM ayant la même marche que le TAI mais différant du TAI par un nombre entier de secondes seulement,

et recommande

– à toutes les organisations et unions concernées de prendre en compte ces définitions et de travailler ensemble afin de parvenir à une compréhension commune des échelles de temps de référence, de leur réalisation et de leur dissémination, l'objectif étant d'examiner les limites actuelles de l'amplitude maximale d'UT1 - UTC afin de répondre aux besoins des communautés d'utilisateurs actuelles et à venir,
– à toutes les organisations et unions concernées de travailler ensemble pour améliorer davantage l'exactitude de la prédiction d'UT1 - UTC et sa méthode de dissémination afin de satisfaire les futures exigences des utilisateurs.

Résolution 3

Sur les objectifs du BIPM

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

considérant,

- l'utilisation mondiale du système métrique, désormais dénommé le Système international d'unités (SI),
- la Résolution 3 adoptée par la CGPM à sa 21e réunion (1999), considérant que tous les États, et pas uniquement ceux qui sont Parties à la Convention du Mètre, s'engagent dans des mesures liées au commerce qui doivent être traçables au SI,
- la Résolution 4 adoptée par la CGPM à sa 22e réunion (2003), considérant combien il est souhaitable d'augmenter le nombre des États Membres et des Associés afin d'accroître l'impact et les avantages de la participation à l'Arrangement de reconnaissance mutuelle (CIPM MRA) rédigé par le Comité international des poids et mesures (CIPM),
- la mise en œuvre des meilleures pratiques en matière de communication, de transparence et de gouvernance suite à l'adoption de la Résolution 10 par la CGPM à sa 24e réunion (2011) sur le rôle, la mission, les objectifs, la stratégie à long terme et la gouvernance du Bureau international des poids et mesures (BIPM),
- la Résolution 4 adoptée par la CGPM à sa 25e réunion (2014) sur la dotation du BIPM pour les années 2016 à 2019, qui prie instamment les États Membres, ainsi que les organisations internationales, les organismes privés et les fondations de continuer à apporter un soutien volontaire supplémentaire de toute sorte afin de soutenir des activités spécifiques liées à la mission du BIPM, en particulier celles qui faciliteront la participation aux activités du BIPM d'États dont le système métrologique est émergent,

notant

- l'importance de l'utilisation du SI pour favoriser l'innovation et répondre aux besoins industriels et sociétaux,
- le rôle que continuera à assumer le BIPM après la révision du Système international d'unités (SI),
- le succès du CIPM MRA et la mise en œuvre des recommandations établies lors de son récent examen,
- le rôle fondamental de la métrologie dans l'infrastructure internationale de la qualité et l'importance de la reconnaissance internationale des mesures pour l'évaluation de la conformité,
- l'intérêt croissant à participer aux activités du BIPM, en particulier de la part d'États dont le système métrologique est émergent,

accueille favorablement

- la stratégie et les objectifs révisés du BIPM, approuvés par le CIPM, permettant une planification au-delà du cycle de quatre ans du Programme de travail du BIPM et conduisant à une utilisation optimale des ressources, y compris des investissements dans le personnel, l'infrastructure et les équipements,
- le développement d'une vision stratégique à long terme qui, associée à un processus de planification consolidée, étaye le développement du Programme de travail du BIPM en consultation avec les États Membres,

- les efforts continus du BIPM afin qu'un plus grand nombre d'États participent à ses activités,
- la reconnaissance d'une définition commune concernant l'infrastructure de la qualité par la Banque mondiale et les dix organisations intergouvernementales et organismes internationaux formant le réseau de métrologie, d'accréditation et de normalisation pour les pays en développement (Réseau DCMAS), dont le BIPM,

confirme

que les objectifs du BIPM sont les suivants :

- représenter la communauté métrologique internationale afin d'en maximiser la reconnaissance et l'impact,
- être un centre de collaboration scientifique et technique entre les États Membres, leur permettant de développer des aptitudes pour les comparaisons internationales de mesure, sur le principe des frais partagés,
- coordonner le système mondial de mesure, en garantissant la comparabilité et la reconnaissance au niveau international des résultats de mesures,

que la mission et les objectifs du BIPM sont étayés par son travail dans les domaines suivants :

- le renforcement des capacités, avec pour objectif de parvenir à un équilibre global des aptitudes métrologiques des États Membres,
- le transfert de connaissances, qui permet de garantir que le travail du BIPM a le plus grand impact possible.

Résolution 4

Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2020 à 2023

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

considérant

- l'importance croissante du travail du Bureau international des poids et mesures (BIPM), dans tous les États Membres, pour le commerce international, l'innovation dans le secteur industriel, la surveillance du changement climatique, la santé humaine et la médecine, l'alimentation et la médecine légale,
- le fait que le BIPM est reconnu comme l'organisation intergouvernementale scientifique experte dans le domaine de la métrologie, ainsi que la valeur ajoutée et l'optimisation des coûts que le travail du BIPM apporte aux États Membres sur les plans technique et économique,
- la façon dont le BIPM continue d'adopter les meilleures pratiques de gestion et d'améliorer l'efficacité de son fonctionnement,
- la Résolution 7 adoptée par la CGPM à sa 16e réunion (1979), établissant le principe de détermination de la dotation de base,

notant

- la situation financière mondiale actuelle et les contraintes financières auxquelles les États Membres continuent d'être soumis,

accueille favorablement

- le soutien de toutes sortes apporté au BIPM par les laboratoires nationaux de métrologie, en particulier par voie de détachement de membres de leur personnel auprès du BIPM, ainsi que le soutien concernant le programme du BIPM de renforcement des capacités et de transfert des connaissances,

décide que

- la dotation annuelle du BIPM, telle que définie à l'article 6 (1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre, sera fixée de façon à ce qu'elle corresponde, pour les États Parties à la Convention du Mètre au moment de la 26e réunion de la CGPM, à :

12 356 526 euros en 2020

12 480 091 euros en 2021

12 604 892 euros en 2022

12 730 941 euros en 2023

encourage

- les États Membres, ainsi que les organisations internationales, les organismes privés et les fondations à continuer à apporter un soutien volontaire supplémentaire de toutes sortes afin de soutenir des activités spécifiques liées à la mission du BIPM, en particulier celles qui facilitent la participation aux activités du BIPM de pays qui ne disposent pas d'une infrastructure métrologique bien développée.

Résolution 5

Sur les contributions arriérées des États Membres et la procédure d'exclusion

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

rappelant

– l'article 6, alinéas 6 à 8 (1921), du Règlement annexé à la Convention du Mètre selon lequel : « *6. Si un État est demeuré trois années sans effectuer le versement de sa contribution, celle-ci est répartie entre les autres États, au prorata de leurs propres contributions. Les sommes supplémentaires, versées ainsi par les États pour parfaire le montant de la dotation du Bureau, sont considérées comme une avance faite à l'État retardataire, et leur sont remboursées si celui-ci vient à acquitter ses contributions arriérées.*

  7. Les avantages et prérogatives conférés par l'adhésion à la Convention du Mètre sont suspendus à l'égard des États déficitaires de trois années.

  8. Après trois nouvelles années, l'État déficitaire est exclu de la Convention, et le calcul des contributions est rétabli conformément aux dispositions de l'article 20 du présent Règlement. »

– la Résolution 8 adoptée par la CGPM à sa 23e réunion (2007) sur les contributions arriérées des États Membres, qui établit une procédure concernant les États qui ne respectent pas leurs obligations financières,

observant que

– les alinéas 6 et 7 de l'article 6 du Règlement annexé prévoient que, bien que les avantages et prérogatives des États débiteurs de trois années soient suspendus, les contributions de ces États demeurent dues,
– la pratique historique a toujours été d'appliquer les alinéas 6 et 7 de l'article 6 du Règlement annexé,

notant que

– la pratique historique s'est écartée des dispositions de l'alinéa 8 de l'article 6 du Règlement annexé en ne procédant pas à l'exclusion des États Membres qui avaient des contributions arriérées depuis plus de six ans et en ne rétablissant pas le calcul des contributions,
– la pratique historique a conduit à ce que certains États Membres voient leurs avantages et prérogatives suspendus pendant des périodes considérablement supérieures aux trois ans prévus dans le Règlement annexé, entraînant l'accumulation de leurs arriérés et la répartition qui s'en est suivie de leurs contributions entre les autres États Membres,
– la Résolution 8 adoptée par la CGPM à sa 23e réunion (2007) a mis en place une procédure régissant l'exclusion d'un État Membre débiteur qui requiert une décision de la CGPM : par conséquent, la période de suspension des avantages et prérogatives précédant l'exclusion dépend du calendrier des réunions de la CGPM et les États Membres débiteurs peuvent donc ne pas être traités de façon équitable,
– la Résolution 8 (2007) traite en partie des questions soulevées par la pratique historique,

considérant que

- la clarté de la procédure et le traitement équitable des États Membres sont des questions de bonne gouvernance et sont bénéfiques à toutes les parties,
- le Comité international des poids et mesures (CIPM), en tant qu'organe de surveillance permanent du BIPM, pourrait appliquer l'article 6 alinéa 8 du Règlement annexé en temps opportun,

décide que

- le CIPM appliquera l'article 6 alinéa 8 du Règlement annexé,
- le CIPM traitera des cas où la pratique historique a conduit à l'accumulation d'arriérés,

confirme que

- le CIPM notifiera toute exclusion au Ministère français de l'Europe et des Affaires étrangères, qui informera à son tour l'État exclu ainsi que l'ensemble des États Membres,
- un État Membre exclu ne peut de nouveau accéder à la Convention du Mètre que si le reliquat de ses contributions arriérées a été acquitté,
- conformément à l'article 11 de la Convention du Mètre, cet État Membre doit acquitter une contribution d'entrée dont le montant est égal à sa première contribution annuelle.

Annexe A

Convocation
Conférence générale des poids et mesures (CGPM) 26e réunion

La présente Convocation constitue l'invitation officielle faite aux Gouvernements des États Parties à la Convention du Mètre de nommer des délégués à la 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) qui se tiendra

du mardi 13 au vendredi 16 novembre 2018

au **Palais des Congrès de Versailles**,

10 rue de la Chancellerie,

78000 Versailles, Yvelines, France.

Ce document comprend un ordre du jour provisoire, ainsi que les projets des résolutions présentées par le Comité international des poids et mesures (CIPM) à la CGPM.

Les Gouvernements des États Membres sont priés de communiquer au directeur du Bureau international des poids et mesures (BIPM) la composition de leur délégation au plus tard deux semaines avant l'ouverture de la réunion, c'est-à-dire avant le 30 octobre 2018.

Il est demandé aux États Membres de faire connaître au CIPM aussi rapidement que possible, de préférence avant le 1er octobre 2018, les propositions qu'ils souhaitent soumettre à la CGPM afin que ces propositions puissent être transmises à l'ensemble des États Membres.

Le programme complet de la réunion de la CGPM, ainsi que les documents y afférents, seront disponibles sur le site internet du BIPM qui sera mis à jour au cours de la préparation de la réunion de la CGPM afin de présenter les informations et documents les plus récents : www.bipm.org/fr/cgpm-2018/.

Constitution de la Conférence générale des poids et mesures

« Le Bureau international* fonctionnera sous la direction et la surveillance exclusives d'un *Comité international des poids et mesures***, placé lui-même sous l'autorité d'une *Conférence générale des poids et mesures****, formée de délégués de tous les Gouvernements contractants. »

Extrait de la Convention du Mètre (1875) : article 3

« La Conférence générale, mentionnée à l'article 3 de la Convention, se réunira à Paris, sur la convocation du Comité international, au moins une fois tous les six ans.

Elle a pour mission de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour la propagation et le perfectionnement du Système métrique, ainsi que de sanctionner les nouvelles déterminations métrologiques fondamentales qui auraient été faites dans l'intervalle de ses réunions. Elle reçoit le Rapport du Comité international sur les travaux accomplis […].

Les votes, au sein de la Conférence générale, ont lieu par États ; chaque État a droit à une voix.

Les membres du Comité international siègent de droit dans les réunions de la Conférence ; ils peuvent être en même temps délégués de leurs Gouvernements. »

Extrait du Règlement annexé à la Convention du Mètre (1875) : article 7

---

* Mentionné souvent dans ce document comme BIPM ou Bureau international des poids et mesures.

** Mentionné souvent dans ce document comme CIPM ou Comité international.

*** Mentionnée souvent dans ce document comme CGPM ou Conférence générale.

Lieu et dates des séances de la 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures

Toutes les séances se tiendront au

Palais des Congrès de Versailles

10 rue de la Chancellerie, 78000 Versailles, France

avec interprétation simultanée en français et en anglais.

Première séance,	mardi 13 novembre 2018	de 9 h 00 à 12 h 30
Deuxième séance,	mardi 13 novembre 2018	de 14 h 00 à 17 h 30
Troisième séance,	mercredi 14 novembre 2018	de 9 h 00 à 12 h 00
Quatrième séance,	mercredi 14 novembre 2018	de 13 h 00 à 14 h 30
Cinquième séance,	jeudi 15 novembre 2018	de 9 h 00 à 12 h 00
Sixième séance,	jeudi 15 novembre 2018	de 13 h 30 à 17 h 30
Septième séance,	vendredi 16 novembre 2018	de 9 h 00 à 13 h 00
Huitième séance,	vendredi 16 novembre 2018	de 14 h 10 à 16 h 00

Groupe de travail sur la dotation du BIPM

La CGPM établira un Groupe de travail sur la dotation du BIPM qui se réunira au Palais des Congrès de Versailles le mercredi 14 novembre 2018 de 15 h 00 à 17 h 00.

Une réunion informelle sur le programme de travail du BIPM et la dotation correspondante, présidée par le président du CIPM, se tiendra au BIPM le lundi 12 novembre 2018 à 9 h 30. Le président du CIPM établira une liste d'États Membres qui seront invités à désigner des représentants pour participer à cette réunion informelle. Ces États seront choisis de façon à inclure des États versant des contributions maximales, intermédiaires et minimales et à refléter de manière adéquate l'ensemble des régions.

Une fois la liste des États Membres invités ayant confirmé leur participation à la réunion informelle publiée sur le site internet du BIPM, des dispositions pourront être prises pour pouvoir accueillir un nombre limité d'États supplémentaires. Les représentants des États Membres qui n'ont pas été initialement invités mais qui souhaitent participer à la réunion informelle doivent contacter par courriel le secrétaire du CIPM, James W. McLaren (mclarenjw@sympatico.ca).

Pour de plus amples informations sur cette réunion informelle, les États Membres sont priés de contacter par courriel le secrétaire du CIPM, James W. McLaren, et de consulter la page concernée du site internet du BIPM.

Merci de noter qu'en raison de contraintes pratiques pour organiser la réunion informelle et afin d'assurer l'efficacité des discussions, la participation sera limitée à deux personnes maximum par État Membre.

Les délégués auprès de la CGPM seront invités à visiter les laboratoires du BIPM le lundi 12 novembre 2018 à partir de 14 h 00.

1er février 2018

Pour le Comité international des poids et mesures
Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex

Le Secrétaire,
J. W. McLaren

Le Président,
B. D. Inglis

Ordre du jour provisoire de la 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures

1 Présentation des titres accréditant les délégués

2 Ouverture de la réunion

3 Discours de Son Excellence M. le Ministre de l'Europe et des Affaires étrangères de la République française

4 Réponse de M. le Président du Comité international des poids et mesures

5 Discours de M. le Président de l'Académie des sciences de Paris, Président de la CGPM

6 Désignation du Secrétaire de la CGPM

7 Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter

8 Approbation de l'ordre du jour

9 Rapport de M. le Président du CIPM sur les travaux accomplis depuis la 25e réunion de la CGPM

10 Présentations des représentants d'organisations intergouvernementales et d'organismes internationaux

11 Rapport sur les relations avec les organisations intergouvernementales et les organismes internationaux

12 Désignation des membres du Groupe de travail sur la dotation du BIPM

13 Révision du Système international d'unités (voir Projet de résolution A)

14 Définition des échelles de temps (voir Projet de résolution B)

15 Objectifs du BIPM (voir Projet de résolution C)

16 Programme de travail du BIPM proposé et dotation correspondante

- 16.1 Programme de travail du BIPM proposé pour les années 2020 à 2023
- 16.2 Dotation annuelle proposée (voir Projet de résolution D)

17 États Membres en situation d'arriérés et procédure d'exclusion (voir Projet de résolution E)

18 Rapports des présidents des Comités consultatifs

19 Proposition des délégués

20 Séance ouverte

21 Vote des résolutions

22 Élection du CIPM

23 Questions diverses

24 Clôture de la réunion

Liste des projets de résolution de la 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures

A Sur la révision du Système international d'unités (SI)

B Sur la définition des échelles de temps

C Sur les objectifs du BIPM

D Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2020 à 2023

E Sur les contributions arriérées des États Membres et la procédure d'exclusion

Projet de résolution A

Sur la révision du Système international d'unités (SI)

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

considérant

- qu'il est essentiel de disposer d'un Système international d'unités (SI) uniforme et accessible dans le monde entier, pour le commerce international, l'industrie de haute technologie, la santé humaine et la sécurité, la protection de l'environnement, les études sur l'évolution du climat, ainsi que la science fondamentale qui étaye tous ces domaines,
- que les unités du SI doivent être stables sur le long terme, auto-cohérentes et réalisables dans la pratique, en étant fondées sur la description théorique actuelle de la nature, au plus haut niveau,
- qu'une révision du SI visant à satisfaire ces exigences a été proposée dans la Résolution 1 adoptée à l'unanimité par la CGPM à sa 24e réunion (2011), qui expose en détail une nouvelle façon de définir le SI à partir d'un ensemble de sept constantes, choisies parmi les constantes fondamentales de la physique et d'autres constantes de la nature, à partir desquelles les définitions des sept unités de base sont déduites,
- que les conditions requises par la CGPM à sa 24e réunion (2011), confirmées à sa 25e réunion (2014), pour procéder à l'adoption d'une telle révision du SI sont désormais remplies,

décide qu'à compter du 20 mai 2019, le Système international d'unités, le SI, est le système d'unités selon lequel :

- la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$, est égale à 9 192 631 770 Hz,
- la vitesse de la lumière dans le vide, c, est égale à 299 792 458 m/s,
- la constante de Planck, h, est égale à $6{,}626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s,
- la charge élémentaire, e, est égale à $1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C,
- la constante de Boltzmann, k, est égale à $1{,}380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
- la constante d'Avogadro, N_{A}, est égale à $6{,}022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol^{-1},
- l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{cd}, est égale à 683 lm/W,

où les unités hertz, joule, coulomb, lumen et watt, qui ont respectivement pour symbole Hz, J, C, lm et W, sont reliées aux unités seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela, qui ont respectivement pour symbole s, m, kg, A, K, mol et cd, selon les relations Hz = s^{-1}, J = m^2 kg s^{-2}, C = A s, lm = cd m^2 m^{-2} = cd sr, et W = m^2 kg s^{-3}.

prend acte des conséquences de la révision du SI concernant les unités de base du SI, énoncées dans la Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 24e réunion (2011), et les confirme dans les annexes de la présente résolution, qui ont même force que la résolution elle-même,

invite le Comité international des poids et mesures (CIPM) à publier une nouvelle édition de la *Brochure sur le SI*, « Le Système international d'unités », contenant une description complète du SI révisé.

Annexe 1. Abrogation des précédentes définitions des unités de base

Il résulte de la nouvelle définition du SI décrite ci-dessus qu'à compter du 20 mai 2019 :

- la définition de la seconde en vigueur depuis 1967/68 (13e réunion de la CGPM, Résolution 1) est abrogée,
- la définition du mètre en vigueur depuis 1983 (17e réunion de la CGPM, Résolution 1) est abrogée,
- la définition du kilogramme en vigueur depuis 1889 (1ère réunion de la CGPM, 1889, 3e réunion de la CGPM, 1901), établie à partir de la masse du prototype international du kilogramme, est abrogée,
- la définition de l'ampère en vigueur depuis 1948 (9e réunion de la CGPM), établie à partir de la définition proposée par le CIPM (1946, Résolution 2), est abrogée,
- la définition du kelvin en vigueur depuis 1967/68 (13e réunion de la CGPM, Résolution 4) est abrogée,
- la définition de la mole en vigueur depuis 1971 (14e réunion de la CGPM, Résolution 3) est abrogée,
- la définition de la candela en vigueur depuis 1979 (16e réunion de la CGPM, Résolution 3) est abrogée,
- la décision d'adopter les valeurs conventionnelles de la constante de Josephson K_{J-90} et de la constante de von Klitzing R_{K-90}, prise par le CIPM (1988, Recommandations 1 et 2) à la demande de la CGPM (18e réunion de la CGPM, 1987, Résolution 6) pour l'établissement des représentations du volt et de l'ohm à l'aide des effets Josephson et Hall quantique, respectivement, est abrogée.

Annexe 2. Statut des constantes utilisées antérieurement dans les anciennes définitions

Il résulte de la nouvelle définition du SI décrite ci-dessus, et des valeurs recommandées dans l'ajustement spécial de 2017 du *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA), sur lesquelles se fondent les valeurs des constantes choisies pour définir le SI, qu'à compter du 20 mai 2019 :

- la masse du prototype international du kilogramme, $m(K)$, est égale à 1 kg avec une incertitude-type relative égale à celle de la valeur recommandée de h au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir $1{,}0 \times 10^{-8}$; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la perméabilité magnétique du vide, μ_0, est égale à $4\pi \times 10^{-7}$ H m^{-1} avec une incertitude-type relative égale à celle de la valeur recommandée de la constante de structure fine α au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir $2{,}3 \times 10^{-10}$; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la température thermodynamique du point triple de l'eau, T_{TPW}, est égale à 273,16 K avec une incertitude-type relative presque égale à celle de la valeur recommandée de k au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir $3{,}7 \times 10^{-7}$; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la masse molaire du carbone 12, $M(^{12}\mathrm{C})$, est égale à 0,012 kg mol^{-1} avec une incertitude-type relative égale à celle de la valeur recommandée de $N_{\mathrm{A}}h$ au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir $4{,}5 \times 10^{-10}$; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale.

Annexe 3. Les unités de base du SI

La nouvelle définition du SI décrite ci-dessus, fondée sur les valeurs numériques fixées des constantes choisies, permet de déduire la définition de chacune des sept unités de base du SI à l'aide d'une ou plusieurs de ces constantes, selon les cas. Les définitions qui en découlent, qui prendront effet à compter du 20 mai 2019, sont les suivantes :

- La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1}.
- Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c, égale à 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en m/s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.
- Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h, égale à $6{,}626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à kg m^2 s^{-1}, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.
- L'ampère, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e, égale à $1{,}602\,176\,634 \times 10^{-19}$ lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.

– Le kelvin, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k, égale à $1{,}380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en J K^{-1}, unité égale à kg m^2 s^{-2} K^{-1}, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h, c et $\Delta\nu_{Cs}$.

– La mole, symbole mol, est l'unité de quantité de matière du SI. Une mole contient exactement $6{,}022\,140\,76 \times 10^{23}$ entités élémentaires. Ce nombre, appelé « nombre d'Avogadro », correspond à la valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro, N_A, lorsqu'elle est exprimée en mol^{-1}.

  La quantité de matière, symbole n, d'un système est une représentation du nombre d'entités élémentaires spécifiées. Une entité élémentaire peut être un atome, une molécule, un ion, un électron, ou toute autre particule ou groupement spécifié de particules.

– La candela, symbole cd, est l'unité du SI d'intensité lumineuse dans une direction donnée. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{cd}, égale à 683 lorsqu'elle est exprimée en lm W^{-1}, unité égale à cd sr W^{-1}, ou cd sr kg^{-1} m^{-2} s^3, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h, c et $\Delta\nu_{Cs}$.

Projet de résolution B

Sur la définition des échelles de temps

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

considérant que

- la Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 14e réunion (1971) demande au CIPM de donner une définition du Temps atomique international (TAI),
- aucune définition exhaustive et autonome du TAI n'a été établie de façon officielle par le CIPM,
- le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) a proposé, dans sa Recommandation S2 (1970), une définition du TAI qui a été complétée en 1980 par une déclaration du CCDS,
- la CGPM, lors de sa 15e réunion (1975), a constaté que le Temps universel coordonné (UTC), dérivé du TAI, est à la base du temps civil et a estimé son emploi parfaitement recommandable,

reconnaissant que

- la mission du BIPM est d'assurer et de promouvoir la comparabilité mondiale des mesures, en fournissant notamment un système international d'unités cohérent,
- l'Union astronomique internationale (UAI) et l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), avec l'Association internationale de géodésie (AIG), ont pour responsabilité de définir des systèmes de référence pour les applications spatiales et terrestres,
- l'Union internationale des télécommunications – Secteur des radiocommunications (UIT-R) a pour responsabilité de coordonner la dissémination des signaux de temps et de fréquence et de formuler des recommandations pertinentes,
- le Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS), un service de l'UAI et de l'UGGI, a pour responsabilité de fournir les informations requises afin de relier les systèmes de référence terrestre et céleste, parmi lesquelles : les mesures variant dans le temps de l'angle de rotation de la Terre, UT1 - UTC ; la prédiction de faible précision d'UT1 - UTC transmise par les signaux de temps, DUT1 ; et les données permettant de décider et d'annoncer l'insertion des secondes intercalaires,

notant que

- la Résolution A4 (1991) de l'UAI définit, dans ses Recommandations I et II, le Système de référence géocentrique comme un système de coordonnées spatio-temporelles pour la Terre dans le cadre de la théorie de relativité générale, et nomme, dans sa Recommandation III, le temps-coordonnée de ce système de référence le « Temps-coordonnée géocentrique (TCG) »,

- la Résolution A4 (1991) de l'UAI définit en outre, dans sa Recommandation IV, le Temps terrestre (TT) comme un autre temps-coordonnée dans le Système de référence géocentrique, différant du TCG par une marche constante, l'unité d'échelle de TT étant choisie de sorte qu'elle s'accorde avec la seconde du SI sur le géoïde,
- la Résolution B1.9 (2000) de l'UAI redéfinit TT comme une échelle de temps qui diffère du TCG par une marche constante : $d\mathrm{TT}/d\mathrm{TCG} = 1 - L_G$, où $L_G = 6{,}969290134 \times 10^{-10}$ est une constante de définition (la valeur numérique de L_G a été choisie pour se conformer à la valeur de $W_0 = 62636856{,}0\ \mathrm{m^2s^{-2}}$ pour le potentiel de pesanteur sur le géoïde tel que recommandé par la Commission spéciale 3 de l'AIG en 1999),
- la redéfinition de TT en 2000 a introduit une ambiguïté entre TT et le TAI car le CCDS avait déclaré en 1980 que le TAI avait « comme unité d'échelle la seconde du SI telle qu'elle est réalisée sur le géoïde en rotation » alors que la définition de TT ne fait pas référence au géoïde,

déclare que

- le TAI est une échelle de temps continue produite par le BIPM à partir des meilleures réalisations de la seconde du SI et que c'est une réalisation de TT comme défini dans la Résolution B1.9 (2000) de l'UAI,
- pour la conversion du temps propre d'une horloge en TAI, le décalage relativiste de fréquence est calculé par rapport à la surface équipotentielle $W_0 = 62636856{,}0\ \mathrm{m^2s^{-2}}$ du potentiel de pesanteur de la Terre, adoptée de façon conventionnelle, en conformité avec la constante L_G définissant la marche de TT,
- tel qu'indiqué dans la Résolution A4 (1991) de l'UAI, TT - TAI est égal à 32,184 s exactement au 1er janvier 1977, 0h TAI au géocentre, pour assurer une continuité de TT avec le temps des éphémérides,
- l'UTC produit par le BIPM, fondé sur le TAI, est l'unique échelle de temps recommandée comme référence internationale et qu'il est à la base du temps civil dans la plupart des pays,
- l'UTC diffère du TAI seulement par un nombre entier de secondes, tel que publié par le BIPM,
- les utilisateurs peuvent dériver l'angle de rotation de la Terre en appliquant à l'UTC les valeurs observées ou prédites d'UT1 - UTC, telles que fournies par l'IERS,
- l'UTC fournit un moyen de mesurer les intervalles de temps et de disséminer l'étalon de fréquence pendant les intervalles qui ne comprennent pas de secondes intercalaires,
- la traçabilité à l'UTC est obtenue par l'intermédiaire des réalisations locales en temps réel maintenues par les laboratoires participant au calcul de l'UTC, dénommées « UTC(k) » où « k » identifie un laboratoire particulier,

décide que

1. le Temps atomique international (TAI) est une échelle de temps continue produite par le BIPM à partir des meilleures réalisations de la seconde du SI. Le TAI est une réalisation du Temps terrestre (TT) ayant la même marche que TT, tel que défini par l'UAI dans sa Résolution B1.9 (2000),
2. le Temps universel coordonné (UTC) est une échelle de temps produite par le BIPM ayant la même marche que le TAI mais différant du TAI par un nombre entier de secondes seulement,

et recommande

– à toutes les organisations et unions concernées de prendre en compte ces définitions et de travailler ensemble afin de parvenir à une compréhension commune des échelles de temps de référence, de leur réalisation et de leur dissémination, l'objectif étant d'examiner les limites actuelles de l'amplitude maximale d'UT1 - UTC afin de répondre aux besoins des communautés d'utilisateurs actuelles et à venir,

– à toutes les organisations et unions concernées de travailler ensemble pour améliorer davantage l'exactitude de la prédiction d'UT1 - UTC et sa méthode de dissémination afin de satisfaire les futures exigences des utilisateurs.

Projet de résolution C

Sur les objectifs du BIPM

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

considérant,

- l'utilisation mondiale du système métrique, désormais dénommé le Système international d'unités (SI),
- la Résolution 3 adoptée par la CGPM à sa 21e réunion (1999), considérant que tous les États, et pas uniquement ceux qui sont Parties à la Convention du Mètre, s'engagent dans des mesures liées au commerce qui doivent être traçables au SI,
- la Résolution 4 adoptée par la CGPM à sa 22e réunion (2003), considérant combien il est souhaitable d'augmenter le nombre des États Membres et des Associés afin d'accroître l'impact et les avantages de la participation à l'Arrangement de reconnaissance mutuelle (CIPM MRA) rédigé par le Comité international des poids et mesures (CIPM),
- la mise en œuvre des meilleures pratiques en matière de communication, de transparence et de gouvernance suite à l'adoption de la Résolution 10 par la CGPM à sa 24e réunion (2011) sur le rôle, la mission, les objectifs, la stratégie à long terme et la gouvernance du Bureau international des poids et mesures (BIPM),
- la Résolution 4 adoptée par la CGPM à sa 25e réunion (2014) sur la dotation du BIPM pour les années 2016 à 2019, qui prie instamment les États Membres, ainsi que les organisations internationales, les organismes privés et les fondations de continuer à apporter un soutien volontaire supplémentaire de toute sorte afin de soutenir des activités spécifiques liées à la mission du BIPM, en particulier celles qui faciliteront la participation aux activités du BIPM d'États dont le système métrologique est émergent,

notant

- l'importance de l'utilisation du SI pour favoriser l'innovation et répondre aux besoins industriels et sociétaux,
- le rôle que continuera à assumer le BIPM après la révision du Système international d'unités (SI),
- le succès du CIPM MRA et la mise en œuvre des recommandations établies lors de son récent examen,
- le rôle fondamental de la métrologie dans l'infrastructure internationale de la qualité et l'importance de la reconnaissance internationale des mesures pour l'évaluation de la conformité,
- l'intérêt croissant à participer aux activités du BIPM, en particulier de la part d'États dont le système métrologique est émergent,

accueille favorablement

- la stratégie et les objectifs révisés du BIPM, approuvés par le CIPM, permettant une planification au-delà du cycle de quatre ans du Programme de travail du BIPM et conduisant à une utilisation optimale des ressources, y compris des investissements dans le personnel, l'infrastructure et les équipements,
- le développement d'une vision stratégique à long terme qui, associée à un processus de planification consolidée, étaye le développement du Programme de travail du BIPM en consultation avec les États Membres,
- les efforts continus du BIPM afin qu'un plus grand nombre d'États participent à ses activités,
- la reconnaissance d'une définition commune concernant l'infrastructure de la qualité par la Banque mondiale et les dix organisations intergouvernementales et organismes internationaux formant le réseau de métrologie, d'accréditation et de normalisation pour les pays en développement (Réseau DCMAS), dont le BIPM,

confirme

que les objectifs du BIPM sont les suivants :

- représenter la communauté métrologique internationale afin d'en maximiser la reconnaissance et l'impact,
- être un centre de collaboration scientifique et technique entre les États Membres, leur permettant de développer des aptitudes pour les comparaisons internationales de mesure, sur le principe des frais partagés,
- coordonner le système mondial de mesure, en garantissant la comparabilité et la reconnaissance au niveau international des résultats de mesures,

que la mission et les objectifs du BIPM sont étayés par son travail dans les domaines suivants :

- le renforcement des capacités, avec pour objectif de parvenir à un équilibre global des aptitudes métrologiques des États Membres,
- le transfert de connaissances, qui permet de garantir que le travail du BIPM a le plus grand impact possible.

Projet de résolution D

Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2020 à 2023

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

considérant

- l'importance croissante du travail du Bureau international des poids et mesures (BIPM), dans tous les États Membres, pour le commerce international, l'innovation dans le secteur industriel, la surveillance du changement climatique, la santé humaine et la médecine, l'alimentation et la médecine légale,
- le fait que le BIPM est reconnu comme l'organisation intergouvernementale scientifique experte dans le domaine de la métrologie, ainsi que la valeur ajoutée et l'optimisation des coûts que le travail du BIPM apporte aux États Membres sur les plans technique et économique,
- la façon dont le BIPM continue d'adopter les meilleures pratiques de gestion et d'améliorer l'efficacité de son fonctionnement,
- la Résolution 7 adoptée par la CGPM à sa 16e réunion (1979), établissant le principe de détermination de la dotation de base,

notant

- la situation financière mondiale actuelle et les contraintes financières auxquelles les États Membres continuent d'être soumis,

accueille favorablement

- le soutien de toutes sortes apporté au BIPM par les laboratoires nationaux de métrologie, en particulier par voie de détachement de membres de leur personnel auprès du BIPM, ainsi que le soutien concernant le programme du BIPM de renforcement des capacités et de transfert des connaissances,

décide que

- la dotation annuelle du BIPM, telle que définie à l'article 6 (1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre, sera fixée de façon à ce qu'elle corresponde, pour les États Parties à la Convention du Mètre au moment de la 26e réunion de la CGPM, à :

12 356 526 euros en 2020

12 480 091 euros en 2021

12 606 892 euros en 2022

12 730 941 euros en 2023

encourage

- les États Membres, ainsi que les organisations internationales, les organismes privés et les fondations à continuer à apporter un soutien volontaire supplémentaire de toutes sortes afin de soutenir des activités spécifiques liées à la mission du BIPM, en particulier celles qui facilitent la participation aux activités du BIPM de pays qui ne disposent pas d'une infrastructure métrologique bien développée.

Note explicative au Projet de résolution D

Les montants de la dotation indiqués dans le présent projet de résolution correspondent à la dotation annuelle « de base » avec un ajustement de 1 % par an afin de compenser en partie l'impact à venir de l'inflation sur les dépenses de fonctionnement et de personnel. (Le taux de 1 % est inférieur chaque année aux estimations publiées par la Banque centrale européenne et le Fonds monétaire international concernant l'inflation).

La dotation de base utilisée pour ce calcul tient compte de l'augmentation du nombre d'États Membres en raison de l'accession à la Convention du Mètre des Émirats arabes unis, de la Lituanie, de la Slovénie et du Monténégro (ces trois derniers États étaient auparavant Associés à la CGPM). L'accession de ces États n'accroît pas les contributions individuelles des États Membres existants. La dotation de base est comme suit :

12 234 184 euros en 2020

12 234 184 euros en 2021

12 234 184 euros en 2022

12 234 184 euros en 2023

La dotation annuelle du BIPM est restée identique de 2016 à 2019. Au cours de cette période, des économies sont réalisées sur les dépenses de fonctionnement et de personnel afin de compenser l'inflation.

Projet de résolution E

Sur les contributions arriérées des États Membres et la procédure d'exclusion

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26e réunion,

rappelant

– l'article 6, alinéas 6 à 8 (1921), du Règlement annexé à la Convention du Mètre selon lequel :

  « *6. Si un État est demeuré trois années sans effectuer le versement de sa contribution, celle-ci est répartie entre les autres États, au prorata de leurs propres contributions. Les sommes supplémentaires, versées ainsi par les États pour parfaire le montant de la dotation du Bureau, sont considérées comme une avance faite à l'État retardataire, et leur sont remboursées si celui-ci vient à acquitter ses contributions arriérées.*

  7. Les avantages et prérogatives conférés par l'adhésion à la Convention du Mètre sont suspendus à l'égard des États déficitaires de trois années.

  8. Après trois nouvelles années, l'État déficitaire est exclu de la Convention, et le calcul des contributions est rétabli conformément aux dispositions de l'article 20 du présent Règlement. »

– la Résolution 8 adoptée par la CGPM à sa 23e réunion (2007) sur les contributions arriérées des États Membres, qui établit une procédure concernant les États qui ne respectent pas leurs obligations financières,

observant que

– les alinéas 6 et 7 de l'article 6 du Règlement annexé prévoient que, bien que les avantages et prérogatives des États débiteurs de trois années soient suspendus, les contributions de ces États demeurent dues,

– la pratique historique a toujours été d'appliquer les alinéas 6 et 7 de l'article 6 du Règlement annexé,

notant que

– la pratique historique s'est écartée des dispositions de l'alinéa 8 de l'article 6 du Règlement annexé en ne procédant pas à l'exclusion des États Membres qui avaient des contributions arriérées depuis plus de six ans et en ne rétablissant pas le calcul des contributions,

– la pratique historique a conduit à ce que certains États Membres voient leurs avantages et prérogatives suspendus pendant des périodes considérablement supérieures aux trois ans prévus dans le Règlement annexé, entraînant l'accumulation de leurs arriérés et la répartition qui s'en est suivie de leurs contributions entre les autres États Membres,

– la Résolution 8 adoptée par la CGPM à sa 23e réunion (2007) a mis en place une procédure régissant l'exclusion d'un État Membre débiteur qui requiert une décision de la CGPM : par conséquent, la période de suspension des avantages et prérogatives précédant l'exclusion dépend du calendrier des réunions de la CGPM et les États Membres débiteurs peuvent donc ne pas être traités de façon équitable,

– la Résolution 8 (2007) traite en partie des questions soulevées par la pratique historique,

considérant que

– la clarté de la procédure et le traitement équitable des États Membres sont des questions de bonne gouvernance et sont bénéfiques à toutes les parties,

– le Comité international des poids et mesures (CIPM), en tant qu'organe de surveillance permanent du BIPM, pourrait appliquer l'article 6 alinéa 8 du Règlement annexé en temps opportun,

décide que

– le CIPM appliquera l'article 6 alinéa 8 du Règlement annexé,

– le CIPM traitera des cas où la pratique historique a conduit à l'accumulation injustifiée d'arriérés,

confirme que

– le BIPM notifiera toute exclusion au Ministère français de l'Europe et des Affaires étrangères, qui informera à son tour l'État exclu ainsi que l'ensemble des États Membres,

– un État Membre exclu ne peut de nouveau accéder à la Convention du Mètre que si le reliquat de ses contributions arriérées a été acquitté,

– conformément à l'article 11 de la Convention du Mètre, cet État Membre doit acquitter une contribution d'entrée dont le montant est égal à sa première contribution annuelle.

Annexe B

Programme de travail du Bureau international des poids et mesures pour les années 2020 à 2023

RÉSUMÉ

Le présent document décrit le projet de programme de travail du Bureau international des poids et mesures (BIPM), proposé pour les années 2020 à 2023, qui tient compte des objectifs approuvés par le Comité international des poids et mesures (CIPM) tels que présentés dans le Plan stratégique du BIPM (2018).

Une première version a été publiée sur le site internet du BIPM pour commentaires en avril et mai 2018, avant d'être de nouveau examinée par le CIPM en juin 2018. La version ainsi révisée a fait l'objet d'un second cycle de consultation jusqu'en octobre 2018. Les ajustements nécessaires ont été effectués afin de s'assurer que les projets proposés étaient en ligne avec le budget demandé. Cette version « quasi-finale » sera présentée pour discussion à la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) lors de sa 26e réunion en novembre 2018.

Les activités proposées sont ambitieuses et leur réalisation dépend du travail de scientifiques invités et de spécialistes collaborant avec le personnel du BIPM. La participation accrue de scientifiques invités réduit les coûts, apporte de l'expérience lorsque nécessaire, insuffle des idées neuves et offre une plus grande souplesse en matière de personnel. À chaque tâche proposée est associée une estimation des ressources nécessaires. Ce projet de programme de travail inclut également des activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances qui, pour certaines, ne pourront être réalisées que si le BIPM trouve des partenaires financiers parmi les laboratoires nationaux de métrologie, les États Membres et les organisations régionales de métrologie, ou d'autres organismes.

Le programme comprend des projets dans quatre domaines techniques qui auront les objectifs suivants :

Métrologie en physique

– Coordonner la comparaison des réalisations primaires du kilogramme après la redéfinition de l'unité de masse et maintenir la valeur de consensus au moyen des étalons de travail et de l'ensemble d'étalons de masse de référence du BIPM.
– Disséminer l'unité de masse en établissant sa traçabilité métrologique à partir de la balance de Kibble du BIPM en se fondant sur la nouvelle définition du kilogramme.

– Organiser une nouvelle comparaison d'étalons de tension à effet Josephson en courant alternatif.
– Élaborer une nouvelle approche permettant d'établir la traçabilité des étalons de capacité électrique à partir de l'effet Hall quantique en courant alternatif.

Métrologie du temps

– Intégrer au calcul de l'UTC des données de fréquence de haute exactitude obtenues à partir d'horloges optiques afin de préparer la voie à la redéfinition de la seconde.
– Mettre en place une nouvelle méthode de comparaison de temps par fibre optique afin de valider les étalonnages de récepteurs GNSS entre laboratoires.
– Automatiser les protocoles de traitement des données afin d'optimiser le calcul mensuel de l'UTC et ouvrir la voie à une dissémination plus fréquente de l'UTC.
– Augmenter de 10 % le nombre de laboratoires participant chaque semaine à l'UTC rapide.

Métrologie de la chimie

– Coordonner la mise en œuvre de nouvelles valeurs pour les sections efficaces UV d'absorption de l'ozone par 25 laboratoires nationaux de métrologie à travers le monde qui jouent un rôle central afin d'établir la base des mesures mondiales de l'ozone troposphérique.
– Tripler le nombre de noyaux faisant l'objet d'un document de référence « Internal Standard Reference Data » afin de permettre une plus grande application des techniques de résonance magnétique nucléaire quantitative dans la caractérisation de matériaux chimiques utilisés comme étalons.
– Appliquer des méthodes de mesure absolue du dioxyde de carbone et effectuer des comparaisons des rapports isotopiques afin d'étayer les étalons des laboratoires nationaux de métrologie, de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) servant à la surveillance de l'atmosphère.
– Assurer des comparaisons pour les 20 laboratoires nationaux de métrologie les plus impliqués dans la production de calibrateurs organiques utilisés pour détecter une contamination alimentaire.

Métrologie des rayonnements ionisants

– Doubler le nombre de laboratoires nationaux de métrologie participant aux comparaisons clés et étalonnages des étalons primaires qui étayent la dosimétrie en radiothérapie pour 11 000 accélérateurs cliniques dans le monde en utilisant davantage la plateforme externe DOSEO.
– Fournir des comparaisons et étalonnages dans les faisceaux de ^{137}Cs d'une structure hors site pour la dosimétrie en radioprotection afin d'étayer la traçabilité de l'étalonnage des dosimètres utilisés dans le monde entier par 22 millions de personnes exposées à des rayonnements ionisants sur leur lieu de travail.

– Lancer le Système international de référence (SIR) de prochaine génération afin de comparer des étalons de radionucléides émetteurs de rayonnement gamma, pour des applications dans les domaines de la médecine nucléaire et de la surveillance de l'environnement. Recourir à de nouvelles technologies de mesure à faible courant qui pourraient avoir des retombées bénéfiques au sein des laboratoires nationaux de métrologie et des laboratoires désignés.
– Mettre en place de nouvelles comparaisons pour les radionucléides à longue durée de vie afin d'étayer les étalons qui sont utilisés lors du démantèlement de centrales nucléaires et qui permettent de mesurer les matières à teneur renforcée en radionucléides naturels (NORM).

Remarque :

Suite à un exercice d'estimation détaillée des coûts par projet, il a été établi que deux activités ne pourraient pas être soutenues dans le cadre du budget proposé : elles ont par conséquent été supprimées du programme de travail. Ces activités sont les suivantes : le développement d'un nouvel étalon transportable de résistance de Hall quantifiée à base de graphène (activité supprimée du projet PMD-E2 E2.1) et la mise au point d'équipements et de méthodes pour l'étalonnage des mesures optiques des rapports isotopiques du CH_4 et la coordination de la comparaison associée (activité supprimée du projet Chem-G3). Ces projets supprimés sont présentés à l'Annexe 2.

Relations internationales, coordination, communication et promotion

Le présent programme de travail décrit par ailleurs les activités en matière de relations internationales, de coordination et de communication qui permettront au BIPM d'atteindre les objectifs approuvés dans la stratégie et qui répondront ainsi de manière efficace et en temps opportun aux possibilités (et menaces) d'un environnement en constante évolution.

Parmi les activités majeures dans le domaine des relations internationales figurent le fait d'accroître les échanges avec les organismes internationaux les plus pertinents, afin de promouvoir les avantages de l'infrastructure métrologique mondiale offerts par l'intermédiaire de l'infrastructure internationale de la qualité. Les activités de collaboration du BIPM sont vastes et le BIPM se doit de rester flexible par rapport aux activités qu'il propose car les organisations avec lesquelles il collabore s'adaptent à l'évolution de leurs besoins. Toutefois, il est assuré qu'une liaison harmonieuse entre la métrologie scientifique et la métrologie légale est essentielle, tout comme la collaboration étroite permanente du BIPM avec l'OIML, car les deux organisations veillent à parler d'une seule voix au nom de la métrologie. En outre, le BIPM continuera à coopérer étroitement avec les autres partenaires de l'infrastructure de la qualité, en particulier avec l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et l'International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), en s'appuyant sur l'adoption d'une définition commune de l'infrastructure de la qualité par l'intermédiaire du réseau international INetQI.

Renforcement des capacités et transfert des connaissances (CBKT)

Au cours du programme de travail pour les années 2016 à 2019, le BIPM a lancé une série de nouvelles activités, soutenues par des partenaires financiers parmi les laboratoires nationaux de métrologie, dans le domaine du renforcement des capacités et du transfert des connaissances. Dans le présent programme de travail, certaines activités choisies, qui ont été menées de 2016 à 2019 avec le soutien de partenaires, ont été identifiées comme fondamentales pour la mission du BIPM et seront financées par la dotation du BIPM. Elles comprennent notamment des activités de renforcement des capacités lors de chaque étape essentielle de la participation au système métrologique mondial et ont pour objectif :

– de soutenir la prochaine génération de dirigeants techniques (Comités consultatifs, comités techniques et pilotage de comparaisons) afin de pouvoir partager la charge du leadership et leur permettre d'être plus efficaces,
– d'intégrer les membres du personnel de nouveaux États Membres et Associés au système métrologique mondial afin qu'ils participent efficacement à l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM (CIPM MRA),
– de fournir aux États qui pourraient devenir Membre ou Associé les informations nécessaires lorsqu'ils envisagent le fait de participer aux activités de la Convention du Mètre.

Ces activités fondamentales de renforcement des capacités et de transfert des connaissances seront organisées de façon stratégique avec les organisations régionales de métrologie puis réalisées au BIPM et, lorsque nécessaire, dans les régions. Au moins 60 membres du personnel de laboratoires nationaux et laboratoires désignés participeront à des séminaires et ateliers qui se tiendront au BIPM ; en outre, 360 membres supplémentaires de laboratoires nationaux et laboratoires désignés devraient bénéficier du programme CBKT du fait de la participation de membres du personnel du BIPM à des activités communes organisées avec les organisations régionales de métrologie.

En outre, le BIPM cherchera des partenaires financiers parmi les laboratoires nationaux de métrologie, les États Membres, d'autres organismes intéressés, ainsi que les organisations régionales de métrologie afin d'étendre les activités thématiques de renforcement des capacités (ateliers et activités de laboratoire). Sous réserve de trouver ces partenariats, les activités majeures suivantes sont planifiées :

– lancer une nouvelle activité technique de renforcement des capacités concernant l'analyse des protéines et des peptides afin de soutenir les laboratoires nationaux de métrologie qui développent une aptitude métrologique dans le domaine de la chimie clinique visant à améliorer l'exactitude des soins dispensés aux patients ;
– poursuivre les projets de renforcement des capacités intitulés « Safe food and feed » et « Metrology for clean air » et en augmenter les activités pour inclure d'autres régions du monde ;
– créer de nouvelles possibilités de renforcement des capacités au sein du laboratoire du temps du BIPM en mettant en place un « simulateur UTC » ;

– offrir des possibilités de renforcement des capacités concernant les techniques nécessaires pour comparer des étalons électriques quantiques et disséminer les étalons de masse ;
– coopérer avec les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires désignés dans les domaines de la dosimétrie des rayonnements et de la métrologie des radionucléides en organisant des projets et ateliers communs ;
– mettre en place de nouvelles activités, proposées et financées par les parties prenantes, qui font progresser le travail de la communauté plus vaste de la métrologie et qui sont en conformité avec les objectifs du BIPM.

Il est estimé que près de 40 détachements dans les laboratoires du BIPM, représentant au total près de 170 mois-personnes, seront proposés et que des ateliers organisés au BIPM sur le travail de laboratoire rassembleront une centaine de participants.

SECTION I : INTRODUCTION

Le programme de travail tient compte des objectifs approuvés par le CIPM tels que présentés dans le Plan stratégique du BIPM (2018). Voici la vision, la mission et les objectifs du BIPM.

VISION ET MISSION DU BIPM

Le BIPM est l'organisation intergouvernementale créée par la Convention du Mètre ; ses États Membres agissent en commun en ce qui concerne les sujets liés à la science des mesures et aux étalons de mesure.

La vision du BIPM est d'être universellement reconnu comme l'organisation de référence internationale concernant le système mondial de mesure.

La mission du BIPM est de travailler au niveau international avec les laboratoires nationaux de métrologie de ses États Membres, les organisations régionales de métrologie, ainsi que ses partenaires stratégiques, et de tirer parti de son statut d'organisation internationale et impartiale pour promouvoir et faire avancer la comparabilité mondiale des mesures pour :

- la découverte et l'innovation scientifique,
- la production industrielle et le commerce international,
- l'amélioration de la qualité de vie et la préservation de l'environnement.

OBJECTIFS DU BIPM

- **Représenter <u>la communauté métrologique internationale</u> afin d'en maximiser la reconnaissance et l'impact.**
  - Nous coopérons avec les organisations intergouvernementales pertinentes ainsi qu'avec d'autres organismes internationaux afin de développer les possibilités de tirer parti de la métrologie pour relever les défis mondiaux.
- **Être un <u>centre de collaboration scientifique et technique</u> entre les États Membres, leur permettant de développer des aptitudes pour les comparaisons internationales de mesure, sur le principe des frais partagés.**
  - Nous coordonnons des comparaisons internationales des étalons de mesure nationaux considérées comme de la plus haute priorité.
  - Nous établissons et maintenons des étalons de référence appropriés utilisés pour conduire, au plus haut niveau métrologique, des comparaisons clés internationales et assurons des étalonnages dans le cadre de ces comparaisons.

- **<u>Coordonner le système mondial de mesure</u>, en garantissant la comparabilité et la reconnaissance au niveau international des résultats de mesures obtenus.**
  - Nous coordonnons des activités entre les laboratoires nationaux de métrologie des États Membres et les organisations régionales de métrologie, notamment en proposant des services techniques en soutien au CIPM MRA et en fournissant l'infrastructure nécessaire au développement et à la promotion du SI.

La mission et les objectifs du BIPM sont étayés par son travail dans les domaines suivants :

- **le renforcement des capacités**, avec pour objectif de parvenir à un équilibre global des aptitudes métrologiques des États Membres ;
- **le transfert de connaissances**, qui permet de garantir que le travail du BIPM a le plus grand impact possible.

PRIORITÉS DU PROGRAMME DE TRAVAIL

L'élaboration du Plan stratégique du BIPM (2018) a défini les défis que le BIPM a dû prendre en considération lors de la préparation du présent programme de travail :

1. **Identifier les activités ayant la plus haute valeur ajoutée, requises par les États Membres :**
   - en mettant en place un processus de planification consolidée qui conjugue les points de vue des laboratoires nationaux de métrologie, du CIPM et des stratégies des Comités consultatifs,
   - en développant un programme de travail qui reconnaît la nature particulière du rôle du BIPM,
   - en reconnaissant les exigences distinctes des différents laboratoires nationaux de métrologie,
   - en décrivant les activités de façon suffisamment détaillée pour faciliter leur planification et le suivi des résultats des projets.
2. **Examiner le travail technique qui devra être effectué au BIPM dans le domaine de la métrologie en physique une fois la décision attendue de redéfinir quatre unités de base adoptée par la CGPM à sa 26e réunion (2018), en notant :**
   - que la dissémination de l'unité de masse en effectuant des étalonnages de masse continuera à être requise par les laboratoires nationaux de métrologie qui n'ont pas accès à une réalisation primaire du kilogramme,
   - qu'il est nécessaire de continuer à soutenir la dissémination des étalons de grandeurs électriques.

3. **Équilibrer les ressources affectées aux trois objectifs stratégiques (relations internationales, collaboration technique et coordination) avec les activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances, en tenant compte :**
   - du besoin d'une plus grande flexibilité dans le modèle de financement du BIPM afin de tirer parti de projets financés par des donateurs,
   - des possibilités d'externaliser l'accès à des équipements lorsque cela est réalisable et présente un avantage,
   - du besoin pour tous les départements du BIPM d'être impliqués dans les activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances.

4. **Développer un plan financier à long terme pérenne concernant le fonctionnement du BIPM afin de lui permettre de remplir sa mission jusqu'en 2025 :**
   - en fournissant des scénarios plausibles pour qu'une décision soit prise par la CGPM à sa 26e réunion (2018) afin d'éviter ou de réduire toute obligation financière supplémentaire qui nécessiterait d'être examinée lors des réunions suivantes de la CGPM,
   - en prévoyant des contrôles financiers améliorés, en bénéficiant de conseils actuariels et financiers indépendants,
   - en anticipant le besoin de recruter et de retenir du personnel et en tirant parti de l'infrastructure existante,
   - en approuvant un mécanisme de dialogue avec les États Membres concernant la soutenabilité financière à long terme du BIPM au-delà de 2025.

IMPACT DU PROGRAMME DE TRAVAIL ET AVANTAGES POUR LES ÉTATS MEMBRES

Impact du système métrologique mondial

Le système métrologique mondial est l'infrastructure technique et administrative maintenue par les laboratoires nationaux de métrologie, en collaboration avec les organisations régionales de métrologie et le BIPM, qui permet d'assurer la comparabilité des mesures dans le monde. L'existence d'un système métrologique mondial est un atout pour les États Membres car il constitue une structure acceptée au niveau international qui permet de démontrer l'équivalence des mesures effectuées par un État à celles d'un autre État. Par ailleurs, le fait de participer au système métrologique mondial permet aux laboratoires nationaux de métrologie d'analyser comparativement leurs performances et étaye les programmes nationaux concernant :

- la découverte et l'innovation scientifique,
- la production industrielle et le commerce international,
- l'amélioration de la qualité de vie et la préservation de l'environnement.

Le système métrologique mondial joue un rôle crucial de soutien dans l'infrastructure plus vaste de la qualité. Le Réseau INetQI, qui regroupe des organisations internationales (ainsi que la Banque mondiale), définit ainsi l'infrastructure de la qualité :

« The system comprising the organizations (public and private) together with the policies, relevant legal and regulatory framework, and practices needed to support and enhance the quality, safety and environmental soundness of goods, services and processes. […] The quality infrastructure is required for the effective operation of domestic markets, and its international recognition is important to enable access to foreign markets. It is a critical element in promoting and sustaining economic development, as well as environmental and social wellbeing. It relies on: metrology, standardization, accreditation, conformity assessment, and market surveillance. »[1]

Un certain nombre d'études ont été conduites par les gouvernements afin de quantifier les avantages apportés par le système métrologique mondial ; des exemples concernant plusieurs États Membres peuvent être consultés sur le site internet du BIPM.

Rôle de coordination du BIPM

L'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM (CIPM MRA), qui existe depuis 1999, est coordonné par le BIPM sous l'autorité du CIPM. Il est reconnu que le CIPM MRA a conduit à réduire les obstacles techniques au commerce et a permis aux laboratoires nationaux de métrologie du monde entier d'accroître leurs niveaux d'exigences et leurs performances. Les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie de près d'une centaine d'États et Entités économiques, ainsi que quatre organisations intergouvernementales, ont signé le CIPM MRA. Actuellement, la base de données sur les comparaisons clés (KCDB), gérée par le personnel du BIPM et en accès libre, contient plus de 1 500 comparaisons d'étalons de mesure effectuées dans le cadre du CIPM MRA et près de 25 000 données examinées par des pairs qui répertorient les aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs) des laboratoires nationaux de métrologie (et des laboratoires désignés). Cela confirme que le CIPM MRA a une visibilité croissante au sein de sa communauté d'utilisateurs de plus en plus large.

Aujourd'hui, le CIPM MRA constitue le fondement d'un système rapidement accessible de reconnaissance internationale des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires désignés. Le CIPM MRA est une ressource essentielle pour l'industrie et pour des milliers de laboratoires d'étalonnages et d'essais du monde entier. Le CIPM MRA a été adopté par l'International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) comme base officielle de la reconnaissance internationale de la traçabilité des mesures et il est référencé dans la version révisée de 2017 de la norme ISO/IEC 17025 qui est utilisée par plus de 50 000 laboratoires d'étalonnages et d'essais dans le monde.

[1] Traduction du BIPM : « Système comprenant les organisations (publiques et privées) et définissant les politiques, le cadre juridique et réglementaire pertinent et les pratiques nécessaires pour soutenir et renforcer la qualité, la sécurité et l'innocuité environnementale des biens, services et processus. […] L'infrastructure de la qualité est requise pour le fonctionnement efficace des marchés intérieurs et sa reconnaissance au niveau international est essentielle afin de permettre l'accès aux marchés étrangers. C'est un élément critique pour promouvoir et soutenir le développement économique ainsi que le bien-être environnemental et social. L'infrastructure de la qualité repose sur : la métrologie, la normalisation, l'accréditation, l'évaluation de la conformité et la surveillance du marché.

Les cas d'organismes de réglementation exigeant que la traçabilité au SI soit assurée par leur laboratoire national ont considérablement diminué ces dernières années car ces organismes sont de plus en plus nombreux à accepter le CIPM MRA comme le socle de la reconnaissance internationale des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie. Le programme de travail du BIPM pour les années 2020 à 2023 vise à soutenir le CIPM MRA à la suite de l'examen approfondi de sa mise en œuvre qui a été effectué afin d'en optimiser l'efficacité et l'efficience.

Dans le domaine des dispositifs de diagnostic *in vitro*, le travail du Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire (JCTLM), conduit par le BIPM en collaboration avec l'International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC) et l'ILAC, permet aux fabricants de démontrer qu'ils respectent les réglementations européennes en matière de traçabilité.

Le système unique des Comités consultatifs du CIPM, dont le personnel du BIPM assure la gestion, permet de rassembler les experts internationaux de nombreux laboratoires nationaux de métrologie, ainsi qu'un certain nombre d'organisations intergouvernementales et organismes internationaux. Les Comités consultatifs sont un lieu de discussion permettant de prendre des décisions sur le SI. Ils facilitent le transfert de connaissances et de technologies entre les laboratoires nationaux de métrologie et assurent la coordination des travaux de ces laboratoires, ce qui permet des économies de temps et d'argent.

Travail de laboratoire réalisé au BIPM

Le travail scientifique effectué au BIPM se concentre sur la coordination des comparaisons internationales d'étalons nationaux de mesure de la plus haute priorité et sur les travaux nécessaires à cet effet. Ainsi, le personnel du BIPM dispose des équipements spécifiques et du savoir-faire requis pour mener ces activités à frais partagés et doit, dans certains cas, établir et maintenir des étalons de référence appropriés. Les laboratoires du BIPM sont par conséquent en mesure d'offrir certains services d'étalonnage spécifiques aux États Membres.

Le tableau ci-dessous indique le nombre estimé de participations de laboratoires nationaux de métrologie et de laboratoires désignés aux comparaisons coordonnées et aux étalonnages fournis par le personnel du BIPM :

Département scientifique du BIPM	2016-2019	2020-2023
Métrologie en physique	134	137
Temps*	80	83
Chimie	176	199
Rayonnements ionisants	136	193
Total	**526**	**612**

** Pour le Département du temps, les participants sont les laboratoires qui contribuent chaque mois au calcul de l'UTC.*

Ainsi, l'ensemble des États Membres bénéficient de l'accès aux équipements, services et savoir-faire des laboratoires de métrologie du BIPM, indépendants, neutres et reconnus au niveau international.

Travail du BIPM en matière de relations internationales

Nombre d'organisations intergouvernementales et d'organismes internationaux ont besoin de mesures correctes pour accomplir leur mission. Au total, le personnel du BIPM entretient des relations institutionnelles et/ou techniques avec plus de trente organisations intergouvernementales et organismes internationaux, l'objectif étant de diffuser les meilleures pratiques métrologiques et de promouvoir les avantages de l'infrastructure métrologique mondiale. L'un des partenaires avec lequel le BIPM collabore peut être considéré comme un cas particulier : il s'agit de l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML). L'OIML est l'autre organisation intergouvernementale dans le domaine de la métrologie : elle émet des recommandations que les gouvernements adoptent dans leur législation ou réglementation afin de faciliter le commerce, d'établir une confiance mutuelle et d'harmoniser les niveaux de protection du consommateur à l'échelon mondial. Ainsi, l'OIML peut être considérée comme une organisation sœur du BIPM. La coopération entre le personnel du BIPM et le Bureau international de métrologie légale (BIML) a été de plus en plus étroite ces dernières années et cette tendance se poursuit. Les deux organisations, dont les missions sont complémentaires, présentent désormais une description intégrée de l'infrastructure mondiale de la métrologie et de ses avantages.

Ce travail de collaboration internationale a pour objectif :

- de parler d'une seule voix au nom de la métrologie, de façon cohérente et concordante, en travaillant de manière étroite avec l'OIML ;
- de promouvoir les bonnes pratiques de mesure, parmi lesquelles l'utilisation du Système international d'unités, le SI ;
- de tenir informée la communauté internationale des activités du BIPM et de diffuser de manière efficace les informations adéquates sur la métrologie dans le contexte de l'infrastructure de la qualité ;
- de défendre les intérêts de la communauté des laboratoires nationaux de métrologie afin que les membres d'autres organisations internationales puissent tirer le meilleur parti, au niveau national, des ressources métrologiques nationales disponibles pour accomplir leur mission ;
- d'échanger des connaissances au sujet de l'utilisation des étalons de mesure, de développer des techniques et méthodes de mesure, et d'approuver des stratégies afin d'atteindre des buts communs ;
- de contribuer mutuellement aux activités de renforcement des capacités en organisant des conférences ou en élaborant des outils de formation, etc.

Le travail du BIPM en matière de relations internationales est supervisé par le CIPM. Concernant les projets clés de collaboration, des orientations formelles sur les objectifs spécifiques à atteindre sont de plus en plus souvent définies dans des documents de prise de position adoptés par le CIPM.

Le BIPM travaille avec ses organismes de liaison via de nombreux forums, tels que l'arrangement quadripartite avec l'Organisation internationale de normalisation (ISO), l'International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) et l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML), ainsi qu'au sein des groupes de travail du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM). Ces organisations internationales, ainsi que le BIPM et la communauté internationale de la métrologie, œuvrent à mettre en place une infrastructure intégrée de la qualité, travail pour lequel une collaboration institutionnelle étroite est essentielle. D'autres organismes reposent, dans une plus ou moins grande mesure, sur l'infrastructure métrologique pour pouvoir effectuer leur mission avec efficacité.

Le BIPM en tant qu'organisation intergouvernementale joue ainsi un rôle stratégique lorsqu'il est question de promouvoir la comparabilité mondiale des mesures auprès d'autres organisations intergouvernementales et organismes internationaux. Le BIPM a établi une stratégie à long terme en matière de collaboration internationale qui distingue d'une part les relations institutionnelles de long terme (qui interviennent à un niveau auquel les laboratoires nationaux de métrologie n'ont pas accès individuellement), d'autre part les relations « d'ouverture » (où des spécialistes des laboratoires nationaux de métrologie pourraient être présents mais ne le sont pas, habituellement en raison d'une méconnaissance de la valeur de la traçabilité au SI). Dans le second cas, le rôle du BIPM est de fournir le savoir-faire technique nécessaire pour démontrer la fiabilité des mesures, tout en convainquant l'organisation partenaire de l'intérêt de participer à la communauté internationale de la métrologie. Lorsque cet objectif est atteint, et que la communauté des laboratoires nationaux de métrologie est suffisamment engagée, le personnel du BIPM est en mesure de réduire son implication.

BASE DE CALCUL DES COÛTS ET IMPLICATION DE PERSONNEL DÉTACHÉ

Le présent document indique pour chacun des projets proposés les ressources estimées nécessaires en termes de mois-personne (pour les membres du personnel du BIPM et les chercheurs invités), de coûts de fonctionnement et de dépenses d'investissement. Le programme inclut un certain nombre de projets dont le succès dépend de façon significative du travail de personnel en détachement. Ces projets ne seront réalisés que si ces ressources supplémentaires sont garanties.

Personnel détaché contribuant à l'exécution du programme de travail

Les ressources en personnel requises pour exécuter le programme de travail (incluant les scientifiques invités et autres spécialistes) sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Département du BIPM	**Personnel du BIPM** *(mois-personne)*		**Personnel détaché de laboratoires nationaux et désignés participant à l'exécution du programme** *(mois-personne)*
	Exécution du programme	*Gestion de département*	
Métrologie en physique	598	15	44
Temps	314	15	108
Chimie	489	15	174
Rayonnements ionisants	385	15	48
Relations internationales et communication	326	15	88
Total	**2112**	**75**	**462**

***Remarque** :*

Il est estimé que le nombre de détachés impliqués dans le programme de travail du BIPM pour les années 2020 à 2023 va plus que doubler par rapport au nombre prévu pour le programme de travail pour les années 2016 à 2019.

Les détachés bénéficiant d'activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances ne sont pas inclus dans le tableau ci-dessus.

SECTION II : PROGRAMME DE TRAVAIL DU BIPM POUR LES ANNÉES 2020 À 2023

TRAVAIL DE LABORATOIRE RÉALISÉ PAR LE BIPM

La stratégie concernant le travail de collaboration scientifique et technique mené dans les laboratoires du BIPM est la suivante :

> Être un centre de collaboration scientifique et technique entre les États Membres, leur permettant de développer des aptitudes pour les comparaisons internationales de mesure, sur le principe des frais partagés.
>
> - Nous coordonnons des comparaisons internationales des étalons de mesure nationaux considérées comme de la plus haute priorité.
> - Nous établissons et maintenons des étalons de référence appropriés utilisés pour conduire, au plus haut niveau métrologique, des comparaisons clés internationales et assurons des étalonnages dans le cadre de ces comparaisons.

Lorsqu'un projet proposé est examiné pour déterminer s'il répond à l'objectif du BIPM présenté ci-dessus et s'il est pertinent qu'il soit réalisé dans les laboratoires du BIPM, des critères sont pris en considération dans quatre domaines :

- **L'importance du mesurande/de la grandeur**
  - Le mesurande ou la grandeur qui fera l'objet de la comparaison (ou de l'équipement de référence) doit avoir un large impact dans le domaine concerné, tel qu'identifié dans la stratégie du Comité consultatif correspondant, et doit être reconnu(e) comme important(e) au niveau international.
- **L'ampleur de la participation estimée et de la future utilisation**
  - De façon générale, au moins 15 laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés participent au projet au cours de son cycle de réalisation et le projet doit présenter un intérêt sur le long terme, le projet devant être estimé nécessaire pour les dix années à venir au minimum (à compter du début du projet). Il doit être nécessaire de conserver les équipements et l'expertise développés afin de pouvoir les réutiliser dans le futur.
  - Les laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés peuvent tirer parti du projet en conduisant des comparaisons et en réalisant des étalonnages de façon efficace et en temps opportun (par exemple, en réduisant les contraintes liées à l'expédition d'instruments sensibles ou de matériaux dangereux pour des comparaisons multicentriques).

- **Le caractère unique du projet**
  - Le projet doit permettre aux laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés d'accéder à des équipements et connaissances auxquels ils n'ont pas librement accès ailleurs dans le monde.
- **La possibilité d'étendre les équipements utilisés à d'autres applications**
  - Lorsque cela est possible, le projet doit être organisé afin que des scientifiques invités venant de laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés puissent y participer et que les équipements puissent être utilisés pour des activités de renforcement des capacités.
  - Lorsque cela est possible, les avantages tirés de l'utilisation des équipements et des connaissances développées pour le projet peuvent être disséminés par le biais d'étalonnages (pour des laboratoires nationaux de métrologie et des laboratoires désignés) permettant d'assurer la traçabilité des mesures.

MÉTROLOGIE EN PHYSIQUE

Stratégie concernant la métrologie en physique

- Disposer d'une réalisation primaire du kilogramme sur le long terme.
- Coordonner des comparaisons des réalisations primaires du kilogramme maintenues dans les laboratoires nationaux de métrologie afin de soutenir la mise en pratique de la définition du kilogramme.
- Soutenir la dissémination de l'unité de masse en effectuant, à la demande des laboratoires nationaux de métrologie, des étalonnages d'étalons de masse.
- Mettre en place et conduire des comparaisons sur site à l'aide d'étalons électriques quantiques transportables.
- Soutenir la mise en pratique de la définition des unités électriques.
- Tirer parti des équipements disponibles au BIPM pour effectuer les étalonnages de grandeurs électriques de la plus haute priorité, requis par les laboratoires nationaux de métrologie.

Activités en métrologie électrique

La mission du BIPM pour faire progresser la comparabilité mondiale des mesures consiste, dans le domaine de la métrologie électrique, à garantir aux laboratoires nationaux de métrologie l'accès à des moyens permettant de comparer ou d'étalonner, au niveau d'incertitude le plus faible possible, leurs étalons primaires nationaux pour les grandeurs électriques les plus fondamentales (tension, résistance et capacité), à partir desquelles les autres grandeurs électriques peuvent être dérivées. À cette fin, le Département de la métrologie en physique maintient des équipements de référence internationaux tels que l'étalon transportable de tension à effet Josephson, l'étalon transportable de résistance de Hall quantifiée, le condensateur calculable, ainsi que les systèmes de mesure associés. Le programme de comparaisons des laboratoires d'électricité du BIPM constitue une part essentielle du programme de comparaisons du CCEM. L'importance des étalons quantiques électriques, à effet Josephson et à effet Hall quantique, devrait croître davantage dans le futur car ces étalons deviendront, après la révision du SI en 2018, des méthodes de réalisation des unités électriques. Une autre tâche importante est d'apporter un soutien continu au projet de la balance de Kibble, ainsi qu'à d'autres départements du BIPM, dans le domaine des mesures électriques.

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Étalon de tension de référence international			
1.	PMD-E1	**E1.1 : Comparaisons sur site d'étalons de tension à effet Josephson** Comparaison directe d'étalons de tension à effet Josephson en courant continu et/ou en courant alternatif à l'aide des étalons transportables du BIPM afin d'obtenir l'incertitude la plus faible possible. *Laboratoires participants : 8*	
		1) Comparaisons bilatérales sur site en courant continu dans le cadre de la comparaison clé **BIPM.EM-K10.a/b** et/ou en courant alternatif (**nouvelle comparaison**) avec une incertitude relative estimée à 1×10^{-10} (courant continu) et inférieure à quelques 10^{-6} (courant alternatif). 2) Maintenance des étalons transportables de tension à effet Josephson, également utilisés pour les comparaisons bilatérales d'étalons de tension à diodes Zener (E1.2) et les étalonnages d'étalons de tension à diodes Zener effectués pour les laboratoires nationaux de métrologie (E1.3).	a) 60 mois-pers. + 6 mois-pers. pour un scientifique invité b) 92 k€ c) 160 k€
		E1.2 : Comparaisons bilatérales de tension à l'aide d'étalons de transfert à diodes Zener Comparaisons pour les laboratoires nationaux de métrologie ne possédant pas d'étalons de tension à effet Josephson et étape préalable à une comparaison sur site d'étalons de tension à effet Josephson (E1.1). *Laboratoires participants : 4*	
		a) Comparaisons bilatérales d'étalons de tensions à diodes Zener dans le cadre de la comparaison clé **BIPM.EM-K11.a/b** avec une incertitude relative estimée à 5×10^{-8}. b) Participation aux comparaisons connexes des organisations régionales de métrologie afin de les relier à BIPM.EM-K11. c) Maintenance des étalons secondaires de tension en courant continu du BIPM (à diodes Zener), également utilisés pour l'étalonnage des étalons de tension à diodes Zener effectués pour les laboratoires nationaux de métrologie (E1.3).	a) 10 mois-pers. b) 10 k€ c) 0 k€
		E1.3 : Étalonnages d'étalons secondaires à diodes Zener Étalonnages pour les laboratoires nationaux de métrologie ne possédant pas d'étalon primaire de tension, ce qui est le cas pour la plupart des nouveaux États Membres, à l'aide de systèmes de mesure déjà en place pour les activités de comparaison. *Étalonnages destinés à : 10 laboratoires nationaux de métrologie (12 certificats)*	
		Étalonnage d'étalons secondaires à diodes Zener pour les laboratoires nationaux de métrologie ne possédant pas de réalisation primaire et pour des clients internes (Département des rayonnements ionisants et balance de Kibble).	a) 5 mois-pers. b) 10 k€ c) 0 k€
Étalon de résistance de référence international			
2.	PMD-E2	**E2.1 : Comparaisons sur site d'étalons de résistance de Hall quantifiée** Comparaison directe d'étalons de résistance de Hall quantifiée à l'aide de l'étalon transportable du BIPM avec pour objectif d'obtenir l'incertitude la plus faible possible. *Laboratoires participants : 6-8*	
		1) Comparaisons bilatérales sur site d'étalons de résistance de Hall quantifiée (y compris ceux à base de graphène) dans le cadre de la comparaison clé **BIPM.EM-K12** avec une incertitude relative estimée à 1×10^{-9}. 2) Fondement de la réalisation de l'unité de capacité, le farad. 3) Maintenance de l'étalon transportable et de la chaîne de mesure correspondante, également utilisés pour les comparaisons bilatérales de résistance à l'aide d'étalons de transfert de résistance (E2.2) et les étalonnages d'étalons secondaires effectués pour les laboratoires nationaux de métrologie (E2.3).	a) 58 mois-pers. + 12 mois-pers. pour un scientifique invité b) 71 k€ c) 40 k€

		E2.2 : Comparaisons bilatérales de résistance à l'aide d'étalons de transfert de résistance Première étape avant une comparaison sur site et comparaisons pour les laboratoires nationaux de métrologie ne possédant pas d'étalons de résistance de Hall quantifiée. *Laboratoires participants : 4-6*	
		1) Comparaisons bilatérales d'étalons de transfert de résistance dans le cadre de la comparaison clé **BIPM.EM-K13.a/b** avec une incertitude relative estimée à 5×10^{-8}. 2) Participation aux comparaisons connexes des organisations régionales de métrologie afin de les relier à BIPM.EM-K13. 3) Maintenance des étalons secondaires de résistance du BIPM et de la chaîne de mesure correspondante, également utilisés pour les étalonnages d'étalons secondaires de résistance effectués pour les laboratoires nationaux de métrologie (E2.3).	a) 13 mois-pers. b) 10 k€ c) 0 k€
		E 2.3 : Étalonnages d'étalons secondaires de résistance Étalonnages pour les laboratoires nationaux de métrologie ne possédant pas d'étalon primaire de résistance, ce qui est le cas pour la plupart des nouveaux États Membres, à l'aide de systèmes de mesure déjà en place pour les activités de comparaison. *Étalonnages destinés à : 25 laboratoires nationaux de métrologie (150 certificats)*	
		Étalonnage d'étalons secondaires de résistance pour les laboratoires nationaux de métrologie ne possédant pas de réalisation primaire et pour des clients internes (Département des masses et Département des rayonnements ionisants, balance de Kibble).	a) 20 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
Étalon de capacité de référence international			
3.	PMD-E3	**E3.1 : Comparaisons bilatérales de capacité à l'aide d'étalons de transfert de capacité** Comparaisons pour les laboratoires nationaux de métrologie souhaitant démontrer leurs aptitudes en matière d'étalonnage de capacité. *Laboratoires participants : 4-6*	
		1) Comparaisons bilatérales d'étalons de transfert de capacité dans le cadre de la comparaison clé **BIPM.EM-K14.a/b** avec une incertitude relative estimée à 5×10^{-8}. 2) Maintenance des systèmes de mesure permettant de dériver l'unité de capacité de l'effet Hall quantique et/ou du condensateur calculable, et soutien aux étalonnages d'étalons secondaires de capacité (E3.2).	a) 15 mois-pers. b) 42 k€ c) 20 k€
		E3.2 : Étalonnages d'étalons secondaires de capacité Étalonnages pour les laboratoires nationaux de métrologie ne possédant pas d'étalon primaire de capacité, ce qui est le cas pour la plupart des nouveaux États Membres. *Étalonnages destinés à : 20 laboratoires nationaux de métrologie (110 certificats)*	
		Étalonnages d'étalons secondaires de capacité pour les laboratoires ne possédant pas de réalisation primaire du farad.	a) 18 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
		E.3.3 : Effet Hall quantique en courant alternatif Développement d'une méthode primaire afin de réaliser les mesures d'impédance en courant alternatif conformément au SI révisé.	
		1) Utilisation de l'effet Hall quantique en courant alternatif pour établir un étalon primaire d'impédance opérationnel afin de réduire l'incertitude de la réalisation de l'unité de capacité électrique. 2) Comparaison directe de l'effet Hall quantique en courant alternatif et du condensateur calculable afin de vérifier la validité de l'équation établissant la constante de von Klitzing au niveau de 10^{-9}, en soutien à la mise en pratique de la définition des unités électriques.	a) 43 mois-pers. + 12 mois-pers. pour un scientifique invité b) 65 k€ c) 170 k€

Activités en métrologie des masses

Le rôle du BIPM dans le domaine des masses évoluera après la redéfinition du kilogramme qui devrait être approuvée en 2018 et mise en œuvre le 20 mai 2019. L'existence de réalisations indépendantes du kilogramme au sein de plusieurs laboratoires nationaux de métrologie, fondées sur des balances de Kibble ou sur des sphères en silicium enrichi isotopiquement, sera une situation fondamentalement inédite pour la métrologie des masses. Le BIPM aura le rôle essentiel d'assurer l'uniformité mondiale de la dissémination du kilogramme en organisant des comparaisons des réalisations primaires des laboratoires nationaux de métrologie. Pendant une période de transition, la valeur de consensus déterminée par ces comparaisons constituera le fondement de la dissémination de l'unité de masse à partir des laboratoires nationaux de métrologie et du BIPM afin d'assurer l'uniformité mondiale des mesures. Le BIPM fournira une référence stable pour ces comparaisons. Le Département de la métrologie en physique mettra en œuvre les méthodes les plus exactes et les plus efficaces pour réaliser le kilogramme, afin de parvenir à un système international robuste concernant la réalisation et la dissémination du kilogramme. Le BIPM continuera à effectuer des étalonnages de masse pour les laboratoires nationaux de métrologie qui ne disposent pas de réalisation de l'unité de masse.

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Dissémination de l'unité de masse			
4.	PMD-M1	**M1.1 : Étalonnage de prototypes nationaux et d'étalons de masse de 1 kg** *Étalonnages destinés à : 25 laboratoires nationaux de métrologie (50 certificats)*	
		1) Étalonnage de prototypes nationaux de 1 kg en platine iridié dans l'air et dans le vide. 2) Étalonnage d'étalons nationaux de masse de 1 kg en acier inoxydable, ainsi que détermination du volume et du centre de gravité, sur demande. 3) Suivi de l'évolution de la masse des étalons de travail du BIPM. 4) Étalonnage de jauges de pression : service interne nécessaire pour soutenir les étalonnages de masse au niveau d'incertitude requis et service effectué pour d'autres départements du BIPM.	a) 73 mois-pers. b) 30 k€ c) 80 k€
		M1.2 : Fabrication de prototypes de 1 kg en platine iridié *Fabrication pour : 3 laboratoires nationaux de métrologie*	
		1) Fabrication de prototypes de 1 kg en platine iridié pour les États Membres. 2) Étalonnage de prototypes de 1 kg en platine iridié et détermination de leur volume.	a) 5 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
Comparaisons des réalisations du kilogramme après la redéfinition de l'unité de masse			
5.	PMD-M2	**M2.1 : Organisation d'une comparaison clé des réalisations du kilogramme** L'objectif est de garantir l'uniformité de la réalisation et de la dissémination de l'unité de masse au plus haut niveau métrologique. *Laboratoires participants : 10*	

		1) Organisation d'une comparaison clé périodique du CCM de toutes les réalisations disponibles du kilogramme et participation à la détermination de la valeur de consensus, qui constituera au cours des premières années suivant la redéfinition du kilogramme le fondement de la dissémination de l'unité de masse pour tous les participants afin d'assurer l'uniformité mondiale des mesures de masse. 2) Comparaison clé bilatérale en continu des réalisations du kilogramme, en lien avec l'activité (1). 3) Mise à jour des valeurs de masse attribuées à l'ensemble d'étalons de masse de référence et aux étalons de travail en platine iridié, traçables à la valeur de référence de la comparaison des réalisations du kilogramme.	a) 12 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
		M2.2 : Organisation d'une comparaison des étalonnages d'étalons de masse en acier inoxydable L'objectif est de tester l'uniformité de l'unité de masse au niveau de la dissémination. *Laboratoires participants : 15*	
		1) Organisation d'une nouvelle comparaison d'étalons de masse de 1 kg en acier inoxydable. 2) Participation à des comparaisons connexes des organisations régionales de métrologie.	a) 12 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
		M2.3 : Maintenance de l'ensemble d'étalons de masse de référence L'ensemble d'étalons de masse de référence du BIPM sera utilisé pour disséminer l'unité de masse et servira à maintenir l'unité de masse entre deux comparaisons consécutives. Les masses des étalons devront être aussi stables que possible, c'est pourquoi un certain suivi sera nécessaire et les étalons devront être protégés contre l'usure.	
		1) Lien des valeurs de masse de l'ensemble d'étalons de masse de référence du BIPM avec les valeurs des réalisations du kilogramme. 2) Comparaison de masse d'étalons par rapport aux étalons de l'ensemble. 3) Modélisation des variations de masse de l'ensemble entre deux étalonnages successifs effectués à partir des expériences de réalisation du kilogramme. 4) Utilisation d'une sphère en silicium de haute qualité, préalablement caractérisée, pour la quasi-réalisation du kilogramme à partir de la caractérisation de l'état de surface (en collaboration avec un laboratoire national de métrologie), à quelques 10^{-8}.	a) 37 mois-pers. b) 80 k€ c) 45 k€
Balance de Kibble			
Développement et maintenance d'une balance de Kibble Équipement de référence international pour la mise en pratique de la nouvelle définition du kilogramme sur le long terme et à frais partagés.			
6.	PMD-M3	**M3.1 :** Incertitude cible de 2×10^{-8} (correspondant à 20 µg au niveau de 1 kg) atteinte par l'amélioration continue de l'équipement et par l'élaboration d'un bilan d'incertitude complet.	a) 59 mois-pers. + 12 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 30 k€ c) 90 k€
		M3.2 : Reconception de certains dispositifs mécaniques critiques afin de permettre un fonctionnement en semi-routine.	a) 59 mois-pers. b) 30 k€ c) 90 k€
		M3.3 : Développement de logiciels et systèmes de contrôle pour un fonctionnement dans le vide.	a) 25 mois-pers. b) 30 k€ c) 90 k€

		M3.4 : Développement d'une aptitude, en coopération avec les laboratoires nationaux de métrologie qui disposent d'un gravimètre transportable, afin de déterminer l'accélération gravitationnelle à un niveau d'incertitude de quelques 10^{-9}. Ainsi, des gravimètres absolus devront être apportés au BIPM par des experts des laboratoires nationaux de métrologie ayant participé avec succès à la comparaison ICAG la plus récente, afin d'effectuer des mesures dans le laboratoire de la balance de Kibble du BIPM.	a) 3 mois-pers. + 1 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 5 k€ c) 0 k€
		M3.5 : Participation à la comparaison en continu des réalisations du kilogramme (PMD-M2).	a) 6 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
		M3.6 : Réalisation d'une étude conceptuelle de la balance de Kibble, en tirant parti de la redéfinition du kilogramme afin de réaliser directement des masses inférieures à 1 kg, avec des incertitudes inférieures à celles actuellement obtenues.	a) 24 mois-pers. b) 0 k€ c) 30 k€

Soutien aux activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
7.	PMD-CBKT	Planification, coordination et réalisation d'activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances dans le domaine de la métrologie de l'électricité et des masses *(les estimations ont été établies à partir des projets CBKT présentés pages 44-45, ce projet devra être soutenu par des partenaires pour être réalisé*).	a) 4 pm b) 0 k€ c) 0 k€

MÉTROLOGIE DU TEMPS

Activités en métrologie du temps

La principale mission du BIPM dans le domaine du temps est de réaliser et disséminer l'échelle de temps internationale, le Temps atomique international (TAI), et le Temps universel coordonné (UTC), qui est une échelle dérivée du TAI, afin de fournir une échelle de référence qui présente un accord approximatif avec le temps dérivé de la rotation irrégulière de la Terre.

Afin de réaliser le TAI, l'UTC et une approximation rapide appelée UTCr au meilleur niveau d'exactitude et de stabilité, tout en tirant parti des horloges et des techniques de comparaison de temps développées par les laboratoires nationaux et les organisations régionales de métrologie, des améliorations sont en permanence nécessaires. Ainsi, des activités de recherche sont menées par le Département du temps, parmi lesquelles la maintenance d'un laboratoire du temps capable de fournir des récepteurs GNSS de référence permettant de mesurer les retards des récepteurs des laboratoires nationaux de métrologie.

Il n'est possible de maintenir l'échelle de temps de référence mondiale à son plus haut niveau d'exactitude et de stabilité qu'en y intégrant les progrès réalisés par les laboratoires nationaux de métrologie et en les harmonisant, ainsi qu'en faisant face aux défis scientifiques et technologiques. Au cours de la prochaine décennie, les travaux de recherche devront avoir pour objectif de contribuer au développement et à l'utilisation optimale des mesures d'étalons de fréquence optiques, ainsi qu'à leur comparaison à distance à un haut niveau d'exactitude. Cela conduira à une amélioration significative du TAI et de l'UTC, ainsi qu'à une possible redéfinition de la seconde du SI ce qui nécessitera, à son tour, une meilleure connaissance du potentiel de pesanteur de la Terre.

Par ailleurs, le Département du temps promeut l'utilisation d'une échelle de temps de référence unique par l'ensemble des pays et des fournisseurs de services GNSS, ainsi que pour différentes applications (telles que les réglementations relatives à la datation). En outre, le département évalue les besoins des nouvelles communautés d'utilisateurs en contribuant de manière proactive au programme de collaboration internationale.

Stratégie concernant la métrologie du temps

- Calculer, disséminer et améliorer l'échelle de temps de référence mondiale par l'intégration des données fournies par les horloges atomiques des laboratoires nationaux de métrologie (y compris les tests et l'intégration de nouveaux types d'étalons, ainsi que leur comparaison sur de longues distances).
- Étudier la possibilité d'améliorer d'un facteur 100 l'exactitude de la fréquence par une future redéfinition de la seconde et des échelles de temps fondées sur les horloges optiques.
- Promouvoir l'importance et les avantages pour les communautés internationales des télécommunications, de l'astronomie et des sciences de la Terre, d'utiliser :
  - l'UTC,
  - des mesures de fréquence traçables au SI, et
  - des références spatio-temporelles communes.

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Génération du TAI et de l'UTC, les références internationales stables et exactes			
1.	Time-U1	**U1.1 : Calcul de l'UTC et comparaison clé de temps et de fréquence** *Laboratoires participants : 80 (2017)*	
		Mise à disposition mensuelle des échelles de temps de référence internationales, le TAI et l'UTC, ainsi que du Temps terrestre (TT), en améliorant en permanence leur qualité métrologique. Cela est possible en calculant les différences entre UTC/UTCr et les réalisations locales en temps réel, UTC(k), des laboratoires participants. Les résultats sont publiés dans la *Circulaire T* mensuelle du BIPM, dans le bulletin hebdomadaire de l'UTCr, ainsi qu'en fournissant les données à la KCDB pour la comparaison clé CCTF-K001.UTC. La procédure de calcul de l'UTC et sa validation font partie du Système Qualité du BIPM. Le Département du temps publie également un rapport annuel qui comprend une synthèse des résultats obtenus.	a) 58,4 mois-pers. b) 5 k€ c) 8 k€
		U1.2 : Développement et optimisation du calcul de l'UTC	
		L'amélioration continue de l'UTC et des produits associés dépend du développement d'outils logiciels appropriés et de la fiabilité du matériel. Les objectifs du présent programme de travail se fondent principalement sur : – l'automatisation du système de calcul afin d'augmenter les vérifications automatiques des données d'entrée et de sortie afin d'améliorer la fiabilité des résultats ; – l'utilisation d'un ensemble sûr et redondant de serveurs fondés sur la technologie de la virtualisation ; – l'utilisation d'une structure de base de données pour les données de comparaisons de temps et les données d'étalonnages afin de fournir un accès convivial aux résultats des laboratoires participants.	a) 50 mois-pers. b) 5 k€ c) 30 k€

2.	Time-U2	**Amélioration des algorithmes servant au calcul de l'échelle de temps et au traitement des données de comparaisons de temps**	
		Les algorithmes développés, maintenus et améliorés en permanence par le Département du temps sont utilisés pour : – l'établissement des échelles de temps ; – le traitement corrigé des mesures de comparaisons de temps ; – le pilotage à l'aide des étalons de fréquence primaires et secondaires. Les objectifs sont de disposer d'un algorithme pour la détection des erreurs et des résultats aberrants, de suivre les flux de données et les comparaisons de liaisons, les liaisons redondantes, les comparaisons de temps à l'aide de systèmes GNSS multi-constellations, ainsi que de disposer d'algorithmes traitant chaque horloge à l'aide d'outils statistiques modernes et adaptés. La contribution d'un détaché serait fondamentale pour garantir que ces activités progressent comme il convient. Une forge logicielle fondée sur GIT* et gérée par le Département du temps sera utilisée dans le cadre du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons bidirectionnelles de temps et de fréquences sur satellite afin de développer un logiciel pour la technique de mesure SDR (Software Defined Receiver) en collaboration avec des laboratoires nationaux de métrologie. Cette configuration partagée sera ensuite validée par une équipe commune au BIPM et aux laboratoires nationaux puis elle pourra être téléchargée comme un service par les laboratoires nationaux de métrologie (et par d'autres laboratoires du temps participant au calcul de l'UTC). Les possibilités d'utiliser ce service pour développer et héberger des logiciels destinés à des formations et à la surveillance d'équipements seront également explorées. *GIT est un logiciel libre et à code source ouvert de gestion de versions décentralisé.	a) 62 mois-pers. + 12 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 5 k€ c) 4 k€
3.	Time-U3	**Calcul et dissémination de l'UTC rapide** *Laboratoires participants : 57 (2018), l'objectif pour 2023 est une augmentation de 10 %*	
		Afin de répondre aux exigences des laboratoires de temps des laboratoires nationaux de métrologie et des utilisateurs de l'UTC, une approximation rapide de l'UTC, appelée UTC rapide, est disponible chaque semaine à partir d'un sous-ensemble de données. L'automatisation de la procédure de calcul de l'UTCr et une détection fiable des anomalies sont ainsi encore plus importantes et ces activités seront poursuivies dans le présent programme de travail, en étudiant la possibilité d'une évaluation plus fréquente de l'échelle de temps. Afin de répondre aux attentes de nouvelles communautés d'utilisateurs, telles que les utilisateurs des systèmes GNSS de navigation et de synchronisation, le département étudiera l'impact d'une réduction des délais de publication de l'UTC et de l'UTCr.	a) 26 mois-pers. + 14 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 10 k€ c) 5 k€
Caractérisation des retards des équipements de comparaison de temps par systèmes globaux de navigation par satellite (GNSS) des laboratoires contribuant au TAI et à l'UTC			
4.	Time-D1	**D1.1 : Maintenance des récepteurs voyageurs du BIPM et procédures d'étalonnage** Le laboratoire du temps du BIPM maintient et fait fonctionner des récepteurs voyageurs, des récepteurs de référence qui ne voyagent pas, ainsi que l'horloge atomique fournissant la référence de temps locale.	
		1) Caractérisation, étude et test expérimentaux des équipements compatibles avec ceux utilisés dans les laboratoires nationaux de métrologie. 2) Étalons de référence fixes et voyageurs fiables et redondants. 3) Documents d'orientation et aide apportés aux laboratoires participants. 4) Protocoles techniques d'étalonnage. 5) Méthodes d'étalonnage visant à améliorer l'incertitude de la liaison horaire, qui reste la composante d'incertitude la plus importante d'*UTC- UTC(k).* 6) Maintien d'un laboratoire du temps effectuant des essais et étalonnages d'une liaison micro-ondes de haute exactitude.	a) 19 mois-pers. + 5 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 10 k€ c) 197 k€

		7) Fourniture d'une référence de fréquence pour les autres laboratoires du BIPM. La dissémination de ce signal de fréquence et les étalonnages internes associés font partie du Système Qualité du BIPM.	
		D1.2 Réalisation de campagnes de mesure des retards des équipements pour les laboratoires pivots (laboratoires G1)	
		Ce projet consiste à assurer les campagnes d'étalonnage des récepteurs GNSS pour les laboratoires appartenant au Groupe 1 ou pour d'autres réseaux de laboratoires. Les différentes étapes sont les suivantes : – organiser les campagnes de mesure des récepteurs GNSS (nécessitant l'envoi d'un système voyageur du BIPM sans accompagnement de membres du personnel) à la dizaine de laboratoires participants (laboratoires G1), ce nombre devant croître avec l'apparition de nouvelles organisations régionales de métrologie ; la procédure complète implique plusieurs cycles de campagnes et elle est répétée tous les deux ans ; – étalonner les réseaux de comparaison bidirectionnelle de temps et de fréquences sur satellite à l'aide de récepteurs GNSS voyageurs et en mettant en place de nouveaux équipements voyageurs afin d'atteindre la meilleure incertitude possible. – vérifier l'état des récepteurs et mesurer les retards internes avant et après une campagne de mesure ; – réaliser l'analyse des données obtenues et produire le rapport d'étalonnage.	a) 10 mois-pers. + 5 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 5 k€ c) 1 k€
		D1.3 : Coordination, avec les organisations régionales de métrologie, de campagnes d'étalonnage des récepteurs GNSS pour les laboratoires qui ne sont pas pivots (laboratoires G2) et liaison des résultats au réseau de référence du BIPM, constitué par les laboratoires G1	
		1) Mise à disposition de directives. 2) Estimation régulière des valeurs de l'incertitude de type B. 3) Validation des rapports d'étalonnage pour les laboratoires G2 et maintien de la base de données. 4) Réalisation d'étalonnages différentiels au BIPM pour les laboratoires G2 qui ne font pas partie d'une organisation régionale de métrologie.	a) 5 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
Utilisation d'étalons de fréquence optiques de très grande exactitude - Représentations secondaires de la seconde			
		O1.1 : Nouvelles techniques de comparaison de temps et de fréquence pour le calcul du TAI et de l'UTC. Possible redéfinition de la seconde du SI et de TT	
5.	Time-O1	1) Développer un algorithme opérationnel pour l'analyse et la comparaison de mesures d'étalons de fréquence optiques afin d'estimer des valeurs relatives de fréquence. 2) Étudier, développer et rendre opérationnels de nouveaux algorithmes pour le traitement de nouvelles mesures innovantes de temps et de fréquence (fibres optiques, mesures tridirectionnelles par satellite). 3) Collaborer avec les laboratoires nationaux de métrologie et le CCTF pour homogénéiser la procédure de mesure et le format des données ; traiter les données. 4) Promouvoir une connaissance plus précise du potentiel de pesanteur de la Terre nécessaire pour comparer des étalons de fréquence optiques. 5) Contribuer aux discussions sur la redéfinition de la seconde.	a) 25 mois-pers. b) 8 k€ c) 4 k€

		O1.2 : Utilisation optimale des mesures d'étalons optiques pour le calcul du TAI et de l'UTC	
		Les nouveaux étalons optiques et les nouvelles comparaisons de temps et de fréquence dans le domaine optique requièrent une mise à jour du traitement des données utilisées pour le calcul du TAI et de l'UTC afin d'optimiser l'utilisation de ces nouvelles mesures. Il est ainsi nécessaire : (a) de développer un traitement statistique correct des mesures qui pourraient présenter des particularités (temps mort, longue période de données manquantes, uniquement des comparaisons de fréquence, etc.) ; (b) d'adapter l'algorithme servant au calcul du TAI pour pouvoir intégrer de façon optimale les mesures d'étalons de fréquence optiques ; (c) d'étudier de nouvelles méthodes de comparaison d'étalons optiques et leurs contraintes techniques afin d'estimer de façon appropriée l'incertitude associée ; (d) de mettre en place des techniques et directives d'étalonnage. Il sera étudié s'il est réalisable pour le laboratoire du temps du BIPM d'être connecté au réseau de fibres optiques en cours de construction par les laboratoires nationaux de métrologie. Cela permettrait de : (a) valider les étalonnages GNSS classiques à l'aide d'une technique indépendante plus exacte, (b) être connecté à plusieurs des nouveaux étalons optiques en développement, ainsi qu'aux différentes échelles de temps UTC(k), (c) dispenser une formation sur les technologies du futur et explorer la possibilité de jouer un rôle central pour les laboratoires nationaux de métrologie concernant les comparaisons d'étalons primaires et secondaires de fréquence. Ces activités additionnelles requièrent un effort supplémentaire que le personnel du BIPM ne pourrait assumer qu'à un niveau très basique. Afin de répondre aux nouveaux défis avec les ressources adéquates et optimiser l'utilisation de données dans le calcul du TAI et de l'UTC, le soutien d'un détaché à temps plein est nécessaire, pour le traitement des données et pour l'installation de la connexion expérimentale par fibre. Si cela n'est pas possible, l'activité ne pourrait être réalisée que de façon minimale et incomplète, sans être optimisée.	a) 6 mois-pers. + 72 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 36 k€ c) 32 k€

Soutien aux activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
6.	Time-CBKT	Planification, coordination et réalisation d'activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances dans le domaine de la métrologie du temps *(les estimations ont été établies à partir des projets CBKT présentés pages 44-45, ce projet devra être soutenu par des partenaires pour être réalisé*).	a) 6 pm b) 0 k€ c) 0 k€

MÉTROLOGIE DE LA CHIMIE

Activités en métrologie de la chimie

Les activités du BIPM dans le domaine de la chimie se concentrent sur les étalons de référence pour la qualité de l'air et la surveillance de l'atmosphère, et sur les calibrateurs primaires pour des applications dans les domaines de la chimie clinique et de la médecine de laboratoire, de l'analyse des aliments, de l'analyse de l'environnement, de la médecine légale et de la pharmacie. Le BIPM coordonne les comparaisons clés et les études pilotes considérées comme prioritaires par le CCQM afin de répondre aux besoins des laboratoires nationaux de métrologie concernant :

- les gaz à effet de serre et les composés ayant un impact sur la qualité de l'air, y compris leurs rapports isotopiques, pour lesquels l'incertitude des étalons est critique, afin de pouvoir surveiller ces gaz au niveau international, sur le long terme et de façon précise (dont la comparaison clé BIPM.QM-K1 concernant l'ozone troposphérique et la comparaison clé BIPM.QM-K2 concernant le dioxyde de carbone dans l'atmosphère) ;
- l'évaluation de la pureté de calibrateurs organiques (qui fournissent la source de la chaîne de traçabilité pour les mesures de quantité de matière d'espèces organiques utilisées dans un grand nombre d'applications dans les domaines de la médecine clinique, de l'environnement, des aliments, de la médecine légale et du dopage dans le sport) et les données de référence permettant de leur assigner une valeur ; le BIPM assurera la coordination de comparaisons clés en continu du CCQM couvrant toutes les CMCs concernant des molécules organiques de petite taille, avec un modèle étendu de comparaisons pour les molécules organiques de grande taille.

Stratégie concernant la métrologie de la chimie

- Assurer et coordonner les comparaisons d'étalons de mesure nationaux pour :
  - les **gaz à effet de serre**, l'objectif étant de démontrer la cohérence des mesures aux niveaux requis afin de soutenir les priorités nationales en matière d'énergie et d'environnement ;
  - les **principaux gaz jouant un rôle sur la qualité de l'air**, l'objectif étant de démontrer la cohérence des mesures aux niveaux requis afin de soutenir les priorités nationales en matière de santé et d'environnement.
- Établir le fondement de la traçabilité métrologique des mesures d'analyse organique et biochimique en coordonnant des comparaisons de matériaux de référence primaires pour :
  - les **molécules organiques de petite taille**, l'objectif étant de démontrer la cohérence des mesures aux niveaux requis afin de soutenir les systèmes de mesure de référence dans les domaines de la médecine de laboratoire, de la sécurité alimentaire, de la médecine légale, de l'analyse environnementale et de la pharmacie ;

– les **molécules organiques de grande taille et les peptides**, l'objectif étant de démontrer la cohérence des mesures aux niveaux requis afin de soutenir les systèmes de mesure de référence dans les domaines de la médecine de laboratoire et de la santé.

– Promouvoir et développer l'utilisation d'étalons et de mesures traçables au SI (disponibles auprès des laboratoires nationaux de métrologie) par les parties prenantes intergouvernementales.

Équivalence internationale des étalons de référence pour la surveillance de la qualité de l'air et de l'atmosphère

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Comparaisons d'étalons de référence pour l'ozone troposphérique et pour la qualité de l'air			
Coordination de comparaisons afin de déterminer et d'améliorer l'équivalence des étalons de référence pour la surveillance de la qualité de l'air. *Laboratoires participants : 30*			
1.	Chem-G1	**G1.1 :** 20 comparaisons bilatérales d'étalons de référence pour l'ozone dans le cadre de la **coordination de la comparaison clé BIPM.QM-K1** (2020-2023), à l'aide de l'unique triade d'étalons du BIPM, afin d'assurer la cohérence des services d'étalonnage concernant les mesures de l'ozone troposphérique pour les réseaux locaux, nationaux et mondiaux de surveillance de la qualité de l'air. *Laboratoires participants : 20*	a) 12 mois-pers. b) 20 k€ c) 35 k€
		G1.2 : Mises à jour des systèmes électroniques des photomètres étalons de référence pour les **étalons nationaux de référence pour l'ozone**, développés et validés au BIPM en collaboration avec le NIST, afin de permettre aux laboratoires nationaux de métrologie de prolonger la durée de vie de leurs étalons de référence pour l'ozone. (Il est à noter que les coûts estimés concernent uniquement la mise à niveau et la maintenance des systèmes du BIPM. La fourniture de systèmes aux laboratoires nationaux de métrologie se fera à prix coûtant.) *Laboratoires participants : 10*	a) 12 mois-pers. b) 20 k€ c) 30 k€
		G1.3 : Coordination des comparaisons sur les gaz réactifs et les gaz pour la qualité de l'air **(comparaison d'impureté et études spectroscopiques pour les gaz NO_2, HNO_3 et HCHO**), à l'aide des équipements de référence dynamiques de pointe du BIPM, afin de permettre aux laboratoires nationaux de métrologie de démontrer l'équivalence de leurs étalons pour la surveillance de la qualité de l'air et la vérification des émissions des véhicules. *Laboratoires participants : 15 (mesures commencées lors du programme de travail pour les années 2016 à 2019)*	a) 16 mois-pers. b) 20 k€ c) 0 k€
Équipement de référence international pour la comparaison d'étalons primaires de gaz pour la pureté de l'air			
Coordination de comparaisons afin d'assurer et d'améliorer l'équivalence internationale des étalons de gaz à forçage radiatif positif. *Laboratoires participants : 47*			

2.	Chem-G2	**G2.1 :** Coordination de la comparaison clé **BIPM.QM-K2** sur le dioxyde de carbone dans l'air **(2020-2023)**, fondée sur un système manométrique unique maintenu au BIPM, qui constitue une méthode de référence indépendante lors de comparaisons à la demande d'étalons de laboratoires nationaux de métrologie préparés par gravimétrie, pour étayer les mesures du CO_2 ambiant comme des niveaux d'émission. *Laboratoires participants : 20*	a) 28 mois-pers. + 12 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 35 k€ c) 35 k€
		G2.2 : Achèvement des études de stabilité et d'homogénéité des mélanges de gaz puis coordination de la comparaison **CCQM-Pxx (2020)** sur les rapports isotopiques du dioxyde de carbone ; développement d'une méthode pour réduire les incertitudes du système de préparation par mélange dynamique et piégeage cryogénique de haute exactitude du BIPM et de l'analyseur de rapport isotopique par spectroscopie infrarouge en collaboration avec l'AEIA, afin de démontrer l'état de l'art en matière d'équivalence des étalons de rapports isotopiques du CO_2 pour étayer des mesures dans l'atmosphère visant à retracer l'origine des émissions. *Laboratoires participants : 15*	a) 20 mois-pers. + 24 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 35 k€ c) 20 k€
		G2.3 : Mise au point d'équipements et de méthodes pour assigner une valeur aux rapports isotopiques des étalons de CO_2 dans l'air et coordination de la comparaison clé **CCQM-Kxx (2023)** des rapports isotopiques du dioxyde de carbone, fondée sur les techniques de mesure optiques et de spectrométrie de masse du BIPM présentant la plus faible incertitude, afin de démontrer l'équivalence des mesures et étalons de rapports isotopiques fondés sur une échelle de référence, ainsi que le lien avec les valeurs traçables au SI. *Laboratoires participants : 12*	a) 32 mois-pers. + 36 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 65 k€ c) 385 k€
Équipement de référence international pour la comparaison d'étalons de gaz à forçage radiatif			
Coordination de comparaisons afin de déterminer et d'améliorer l'équivalence internationale des étalons de gaz à forçage radiatif positif. *Laboratoires participants : 20*			
3.	Chem-G3	**G3.1 :** Achèvement de la comparaison clé sur le protoxyde d'azote et coordination de la comparaison clé **(CCQM-K82.2023)** d'étalons de méthane dans l'air, fondée sur les équipements de comparaison d'étalons de gaz à effet de serre du BIPM présentant la plus faible incertitude, afin de démontrer l'amélioration continue dans le monde de l'exactitude des comparaisons d'étalons de gaz à forçage radiatif positif pour la surveillance de l'atmosphère. *Laboratoires participants : 20 + 16 (mesures commencées lors du programme de travail pour les années 2016 à 2019)*	a) 14 mois-pers. b) 40 k€ c) 25 k€
		G3.2 : Mise au point de méthodes permettant de réduire les incertitudes lors de comparaisons de gaz à effet de serre, fondées sur l'amélioration des équipements de séparation cryogénique pour les gaz à effet de serre et leur utilisation quantitative pour la préparation d'échantillons pour les mesures des rapports isotopiques et fractions molaires de gaz à effet de serre.	a) 20 mois-pers. + 15 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 40 k€ c) 20 k€

Équivalence internationale des calibrateurs primaires organiques pour des applications dans les domaines de la chimie clinique et de la médecine de laboratoire, de l'analyse des aliments, de l'analyse de l'environnement, de la médecine légale et de la pharmacie

Comparaisons de référence de calibrateurs primaires organiques de molécules de petite taille (matériaux purs)
Coordination de comparaisons afin d'assurer et d'améliorer l'équivalence internationale des calibrateurs organiques purs pour des applications dans les domaines de la chimie clinique et de la médecine de laboratoire, de l'analyse des aliments, de l'analyse de l'environnement, de la médecine légale et de la pharmacie. *Laboratoires participants : 50*

4.	Chem-O1	**O1.1 :** Achèvement de la comparaison clé **CCQM-K148.a (matériaux non polaires organiques, < 500 Da)** sur la pureté du bisphénol A, avec assignation de valeur par bilan massique et par résonance magnétique nucléaire quantitative au BIPM, ainsi qu'analyse d'homogénéité et de stabilité, afin de mettre en place une comparaison testant les compétences fondamentales des laboratoires nationaux de métrologie et leur permettant de démontrer pour les molécules organiques de petite taille à faible polarité leurs aptitudes et leurs progrès continus pour établir la traçabilité au SI. *Laboratoires participants : 25 (mesures commencées lors du programme de travail pour les années 2016 à 2019)*	a) 12 mois-pers. b) 63 k€ c) 33 k€
		O1.2 : Coordination de la comparaison clé **CCQM-K148.b (matériaux polaires organiques, < 500 Da)**, avec assignation de valeur par bilan massique et par résonance magnétique nucléaire quantitative au BIPM, ainsi qu'analyse d'homogénéité et de stabilité, afin de mettre en place une comparaison testant les compétences fondamentales des laboratoires nationaux de métrologie et leur permettant de démontrer pour les molécules organiques polaires de petite taille leurs aptitudes et leurs progrès continus pour établir la traçabilité au SI. *Laboratoires participants : 25*	a) 24 mois-pers. b) 63 k€ c) 15 k€
		O1.3 : Coordination de la **comparaison clé CCQM-K148.c d'analyse de pureté (500 Da à 1000 Da)** et développement de méthodes, avec assignation de valeur par bilan massique et par résonance magnétique nucléaire quantitative au BIPM, ainsi qu'analyse d'homogénéité et de stabilité, afin de mettre en place une comparaison testant les compétences fondamentales des laboratoires nationaux de métrologie et leur permettant de démontrer pour de plus grandes molécules organiques de petite taille leurs aptitudes et leurs progrès continus pour établir la traçabilité au SI, et extension des méthodes pour leur caractérisation. *Laboratoires participants : 25*	a) 24 mois-pers. b) 55 k€ c) 0 k€
Comparaisons de référence de calibrateurs primaires organiques de molécules de petite taille (solutions d'étalonnage)			
Coordination de comparaisons (matériaux de référence et méthodes) pour les calibrateurs organiques. *Laboratoires participants : 30*			
5.	Chem-O2	**O2.1 :** Coordination de la comparaison clé de solution d'étalonnage **CCQM-K78.b** (solution non polaire à plusieurs composants), fondée sur des solutions d'étalonnage du BIPM préparées par gravimétrie avec des matériaux non polaires à plusieurs composants, les fractions massiques de matériaux de référence primaires étant quantifiées à l'aide des équipements du BIPM de mesure de pureté, afin de mettre en place une comparaison testant les compétences fondamentales des laboratoires nationaux de métrologie concernant les solutions d'étalonnage de matériaux organiques non polaires. *Laboratoires participants : 25*	a) 24 mois-pers. b) 61 k€ c) 0 k€
		O2.2 : Rédaction et publication de données de référence concernant des étalons internes pour la résonance magnétique nucléaire quantitative (trois étalons internes), en utilisant l'équipement dédié du BIPM de résonance magnétique nucléaire quantitative et en collaboration avec le NMIJ, afin de publier des données de référence sur les étalons internes pour la résonance magnétique nucléaire quantitative, afin d'étendre l'utilisation de la résonance magnétique nucléaire quantitative aux mesures exactes des noyaux ^{19}F, ^{31}P et ^{13}C et d'étendre le champ d'application de la résonance magnétique nucléaire quantitative pour les mesures traçables au SI aux matériaux organiques, et afin de soutenir les services de mesure et comparaisons des laboratoires nationaux de métrologie.	a) 33 mois-pers. + 24 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 68 k€ c) 30 k€
Mise au point de méthodes de référence pour les calibrateurs primaires organiques de molécules de grande taille et leur comparaison			
Coordination de comparaisons afin d'assurer et d'améliorer l'équivalence internationale des calibrateurs primaires organiques pour des applications dans les domaines de la chimie clinique et de la médecine de laboratoire, de la médecine légale et de la pharmacie. *Laboratoires participants : 30*			

6.	Chem-O3	**O3.1 :** Mise au point et publication de méthodes pour la caractérisation de calibrateurs primaires de molécules de grande taille, à l'aide des spectromètres de masse de haute résolution du BIPM, afin d'étendre l'application des méthodes de spectrométrie de masse pour l'identification et la quantification des impuretés structurelles dans les calibrateurs de peptides qui constituent de futurs candidats pour des comparaisons qui étayeront les aptitudes de mesure des laboratoi res nationaux de métrologie.	a) 12 mois-pers. + 12 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 80 k€ c) 20 k€
		O3.2 : Achèvement de la comparaison clé **CCQM-K115.c sur la pureté de l'hexapeptide C-HbA1c** et de la comparaison clé répétée **CCQM-K115 sur la pureté de l'hexapeptide HbA0**, fondées sur une caractérisation réalisée au BIPM par bilan massique et par analyse corrigée des acides aminés par rapport aux impuretés des protéines, afin de mettre en place une comparaison des aptitudes fondamentales des laboratoires nationaux de métrologie concernant l'assignation de valeur à des matériaux de référence primaires de peptides à chaîne droite avec des poids moléculaires inférieurs à 5 kDa, et afin d'étayer les systèmes de mesure de référence pour l'hémoglobine glyquée et leur développement pour le diagnostic du diabète et le contrôle des patients. *Laboratoires participants : 15*	a) 14 mois-pers. + 9 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 80 k€ c) 15 k€
		O3.3 : Coordination de la comparaison clé CCQM-K155.d de calibrateurs primaires de peptides (5 kDa à 10 kDa) (comparaison de calibrateurs primaires organiques de molécule de grande taille), fondée sur une caractérisation réalisée au BIPM par bilan massique et par analyse des acides aminés corrigée par rapport aux impuretés des protéines, afin de mettre en place une comparaison des aptitudes fondamentales des laboratoires nationaux de métrologie concernant l'assignation de valeur à des matériaux de référence primaires de peptides avec des poids moléculaires supérieurs à 5 kDa, de réticulation et de modifications post-traductionnelles pour les laboratoires nationaux de métrologie, et afin d'étayer les systèmes de mesure de référence pour le diagnostic protéinique. *Laboratoires participants : 15*	a) 24 mois-pers. + 24 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 80 k€ c) 0 k€

Soutien aux activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
7.	Chem-CBKT	Planification, coordination et réalisation d'activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances dans le domaine de la métrologie de la chimie *(les estimations ont été établies à partir des projets CBKT présentés pages 44-45, ce projet devra être soutenu par des partenaires pour être réalisé*).	a) 90 mois-pers. + 18 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 175 k€ c) 0 k€

MÉTROLOGIE DES RAYONNEMENTS IONISANTS

Activités en métrologie des rayonnements ionisants

Dans le domaine de la métrologie des rayonnements ionisants, les éléments moteurs externes ne cessent d'évoluer et de croître. La médecine nucléaire est en pleine expansion, portée par le besoin d'un diagnostic précoce et par la demande de meilleures thérapies contre le cancer ; le marché mondial de la médecine nucléaire devrait croître de 9 milliards de dollars en 2020 à 13 milliards en 2024. Les réacteurs nucléaires de première génération sont en cours de démantèlement (166 réacteurs ont déjà été mis hors service et 183 autres devraient être démantelés dans les années 2020), ce qui conduit à une demande accrue en métrologie des radionucléides afin de garantir la sécurité de la mise au rebut des déchets. Le domaine qui est probablement le plus exigeant (en matière d'exactitude de mesure) est celui de la nouvelle science de la criminalistique nucléaire, à savoir la recherche de matériaux radioactifs dans le contexte de la sûreté nucléaire.

L'incidence croissante du cancer (l'Organisation mondiale de la santé estime que le nombre de nouveaux cancers détectés par an augmentera de 70 % au cours des 20 prochaines années) entraîne également une augmentation de l'utilisation de la radiothérapie par faisceau externe et de la curiethérapie. Le directeur général de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a déclaré qu'il manquait près de 5 000 appareils de radiothérapie dans les pays en développement. L'AIEA a également constaté que les progrès réalisés concernant la technologie de l'imagerie changent profondément la radiothérapie. On devrait également s'attendre à une expansion de la protonthérapie, dont le marché mondial atteindrait les trois milliards de dollars d'ici 2025.

Ces défis sociétaux soumettent la communauté de la métrologie des rayonnements ionisants à des demandes accrues concernant des étalons primaires de haute exactitude et leur dissémination aux hôpitaux, à l'industrie nucléaire et aux services de sécurité. Ces demandes sont internationales : des essais cliniques de nouveaux produits radiopharmaceutiques sont conduits dans plusieurs pays et l'élimination en toute sécurité des déchets radioactifs est un sujet de préoccupation mondiale (les déchets radioactifs ne connaissant pas les frontières). La nécessité de démontrer l'équivalence des étalons primaires n'a jamais été aussi cruciale et les laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés prêts à piloter des comparaisons sont confrontés à un problème unique : le poids réglementaire, logistique et pratique de l'expédition de matières dangereuses ou d'étalons primaires fragiles.

L'objectif du Département des rayonnements ionisants est de réduire la charge liée au pilotage de comparaisons, de renforcer les schémas de traçabilité établis avec succès, d'être le point de référence pour réduire le besoin de comparaisons menées à grande échelle, et de travailler en étroite coopération avec des partenaires stratégiques afin d'augmenter la portée géographique du travail accompli. L'essentiel pour ce programme de travail est donc de passer à la prochaine génération de techniques de comparaison d'étalons et de conception d'étalons primaires, en travaillant avec les parties prenantes pour optimiser l'utilisation des équipements onéreux, en adoptant de nouvelles technologies afin de pérenniser les méthodes utilisées par le département et en fournissant un service efficace aux laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés.

Stratégie concernant la métrologie des rayonnements ionisants	
– Rationaliser la mise à disposition du système international de mesure, en prenant en considération la possibilité d'utiliser des équipements externes.	Après consultation des laboratoires nationaux de métrologie, des laboratoires désignés, ainsi que de l'AIEA, développer un nouveau modèle de services de comparaison et d'étalonnage pour les grandeurs identifiées comme apportant les avantages les plus importants dans le contexte du partage des ressources. S'assurer de la conformité aux exigences réglementaires lors de l'utilisation des équipements du BIPM ou autres.
– Démontrer l'équivalence des étalons nationaux pour la dosimétrie des rayons x, des rayons gamma et des photons aux hautes énergies afin de soutenir la radiothérapie, l'imagerie médicale et la radioprotection.	Maintenir et améliorer les étalons du BIPM pour la dosimétrie des rayons x et des photons, y compris l'utilisation de l'équipement de DOSEO. Après consultation des laboratoires nationaux de métrologie et des laboratoires désignés, déve-lopper un étalon permettant d'établir la valeur de référence de la comparaison clé pour un domaine prioritaire (tel que la curiethérapie, la dosimétrie des faisceaux d'électrons, la protonthérapie).
– Démontrer l'équivalence des étalons nationaux de radioactivité afin de soutenir la médecine nucléaire, l'industrie nucléaire, la physique nucléaire, la protection de l'environnement, la radioprotection et la criminalistique nucléaire.	Maintenir et améliorer les comparateurs du BIPM pour les émetteurs de photons (SIR et instrument de transfert du SIR) et les émetteurs de rayonnement beta (ESIR). Développer la prochaine génération du SIR en utilisant de nouvelles technologies afin de réduire la nécessité d'utiliser des sources scellées comme rayonnements de référence et en réduisant la quantité de matériaux radioactifs détenus. Après consultation des laboratoires nationaux de métrologie et des laboratoires désignés, développer une méthode permettant de comparer les étalons requis pour le démantèlement nucléaire.

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Dosimétrie des rayonnements			
1.	IR-D1	**Système de référence international pour la dosimétrie des rayons x** Soutien de l'équivalence internationale des étalons nationaux pour la radiothérapie, le diagnostic par rayons x, la mammographie et la radioprotection, par la réalisation de comparaisons et d'étalonnages. *Laboratoires participants : 36*	
		D1.1 : Comparaisons bilatérales (BIPM.RI(I)-K2, -K3, -K7) dans les faisceaux de référence de haute stabilité (0,02 %) des rayons x, à l'aide d'étalons primaires de haute exactitude et de haute stabilité (0,2 % pour le kerma dans l'air). *Laboratoires participants : 16* **D1.2 :** Caractérisation et étalonnage d'étalons nationaux, sur demande. *Étalonnages destinés à : 20 laboratoires nationaux de métrologie* **D1.3 :** Assurance qualité des étalons primaires du BIPM pour la mesure du kerma dans l'air et de la dose absorbée dans l'eau, afin de confirmer leur stabilité à long terme. **D1.4 :** Assurance qualité et amélioration continue des équipements de référence du BIPM pour les faisceaux de rayons x.	a) 42 mois-pers. b) 22 k€ c) 90 k€
2.	IR-D2	**Système de référence international pour la dosimétrie des rayons gamma** Soutien de l'équivalence internationale des étalons nationaux pour la radiothérapie et la radiostérilisation, par la réalisation de comparaisons et d'étalonnages. *Laboratoires participants : 37*	
		D2.1 : Comparaisons bilatérales (BIPM.RI(I)-K1, -K4, -K5) dans le faisceau de référence de ^{60}Co du BIPM, à l'aide d'étalons primaires de haute exactitude et de haute stabilité (0,4 % pour la dose absorbée et 0,2 % pour le kerma dans l'air). *Laboratoires participants : 12* **D2.2 :** Caractérisation et étalonnage d'étalons nationaux, sur demande. *Étalonnages destinés à : 25 laboratoires nationaux de métrologie* **D2.3 :** Assurance qualité des étalons primaires du BIPM pour la mesure du kerma dans l'air et de la dose absorbée dans l'eau, afin de confirmer leur stabilité à long terme. **D2.4 :** Assurance qualité et amélioration continue des équipements de référence du BIPM pour les faisceaux de rayons gamma.	a) 45 mois-pers. b) 30 k€ c) 20 k€
3.	IR-D3	**Système de référence international pour la dosimétrie des photons aux hautes énergies** Soutien de l'équivalence internationale des étalons nationaux pour les photons aux hautes énergies afin de répondre au besoin croissant concernant l'utilisation d'accélérateurs linéaires cliniques pour la radiothérapie, par la réalisation de comparaisons et d'étalonnages. *Laboratoires participants : 26*	
		D3.1 : Comparaisons bilatérales (BIPM.RI(I)-K6) à l'aide de l'équipement du BIPM utilisé sur le site de DOSEO, avec l'étalon de dose absorbée et le système de contrôle du faisceau de haute stabilité du BIPM. *Laboratoires participants : 14* **D3.2 :** Caractérisation et étalonnage d'étalons nationaux, sur demande. *Étalonnages destinés à : 12 laboratoires nationaux de métrologie* **D3.3 :** Assurance qualité de l'étalon de dose absorbée du BIPM (calorimètre en graphite et instruments de transfert) afin de confirmer leur stabilité à long terme. **D3.4 :** Assurance qualité et amélioration continue des systèmes de mesure des faisceaux de photons aux hautes énergies utilisés par le BIPM sur le site de DOSEO.	a) 54 mois-pers. + 6 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 500 k€ c) 20 k€

4.	IR-D4	**Vers un nouvel étalon de référence pour les modalités de la radiothérapie de pointe** Préparations pour le développement d'un nouvel étalon primaire afin de répondre aux futures exigences en dosimétrie des rayonnements (telles que la dosimétrie dans les faisceaux de hadrons hors site, la calorimétrie dans les faisceaux d'électrons, la curiethérapie par rayons x).	
		D4.1 : Rapport sur une étude concernant les futures exigences en dosimétrie des rayonnements, afin d'identifier les priorités à long terme et de prendre en considération les commentaires formulés par les laboratoires nationaux de métrologie ainsi que les domaines à potentiel de croissance. **D4.2 :** Description des spécifications, conception détaillée et modélisation d'un nouvel étalon de référence pour la priorité identifiée.	a) 10 mois-pers. + 12 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 5 k€ c) 0 k€
5.	IR-D5	**Système international de référence pour la dosimétrie en radioprotection (^{137}Cs)** Soutien de l'équivalence internationale des étalons nationaux pour la dosimétrie en radioprotection dans les faisceaux de ^{137}Cs hors site, par la réalisation de comparaisons et d'étalonnages. *Laboratoires participants : 36*	
		D5.1 : Comparaisons bilatérales (BIPM.RI(I)-K5) à l'aide d'un équipement caractérisé et utilisé par le BIPM (établi dans le précédent programme de travail) et d'étalons primaires de haute exactitude et de haute stabilité (0,3 %). *Laboratoires participants : 16* **D5.2 :** Caractérisation et étalonnage d'étalons nationaux, sur demande. *Étalonnages destinés à : 20 laboratoires nationaux de métrologie* **D5.3 :** Assurance qualité et amélioration continue des étalons primaires du BIPM et des équipements associés nécessaires.	a) 12 mois-pers. b) 5 k€ c) 50 k€
Métrologie des radionucléides			
6.	IR-R1	**Système de référence international pour les radionucléides émetteurs de rayonnement gamma (SIR / SIRTI)** Mise à disposition d'un service, sur demande, pour les comparaisons bilatérales de radionucléides émetteurs de rayonnement gamma pour des applications dans les domaines de la médecine nucléaire, de l'industrie nucléaire, de la physique nucléaire, de la protection de l'environnement, de la radioprotection et de la criminalistique nucléaire. *Laboratoires participants : 33*	
		R1.1 : Comparaisons bilatérales (BIPM.RI(II)-K1) d'étalons nationaux de radionucléides émetteurs de rayonnement gamma à longue durée de vie à l'aide de chambres d'ionisation du SIR de haute précision et de haute stabilité (meilleure que 0,02 %). *Laboratoires participants : 25* **R1.2 :** Comparaisons bilatérales sur site (BIPM.RI(II)-K4) d'étalons nationaux de radionucléides émetteurs de rayonnement gamma à courte durée de vie (SIRTI - instrument de transfert du SIR) à l'aide du système de comptage par scintillation de haute précision et de haute stabilité du SIRTI (meilleure que 0,05 %). *Laboratoires participants : deux par an minimum, six radionucléides par visite de site* **R1.3 :** Soutien technique pour les comparateurs du SIR et de son instrument de transfert (contrôles qualité et amélioration continue, dont mises à jour logicielles). **R1.4 :** Assurance qualité et amélioration continue du spectromètre gamma de haute résolution permettant des vérifications d'impuretés et des applications en radioprotection. **R1.5 :** Activités permettant de s'assurer de la conformité avec les réglementations, y compris le contrôle en radioprotection, les essais de sécurité des irradiateurs (dans le cas de la dosimétrie), l'élimination des déchets radioactifs, et les exigences associées en matière de santé et de sécurité.	a) 60 mois-pers. b) 100 k€ c) 30 k€

7.	IR-R2	**Développement du Système international de référence de prochaine génération (SIR 2.0)** Installation et validation d'un nouveau SIR fondé sur des équipements de pointe afin de mesurer des courants faibles et de réduire la dépendance vis-à-vis de sources radioactives scellées, en s'appuyant sur les études effectuées lors du précédent programme de travail.	
		R2.1 : Installation d'une nouvelle chambre d'ionisation et d'un système de mesure du courant, ainsi que d'un logiciel de collecte et d'analyse de données, en utilisant une nouvelle technologie pour mesurer le courant électrique et réduire la dépendance vis-à-vis de sources radioactives scellées utilisées comme points de référence. **R2.2 :** Validation du nouveau système, notamment en déterminant la stabilité et la précision à long terme du système et en confirmant la linéarité de la réponse (courant en fonction de l'activité). **R2.3 :** Comparaisons bilatérales d'étalons nationaux de radionucléides émetteurs de rayonnement gamma (en parallèle avec des mesures du SIR dans le cadre de la comparaison clé BIPM.RI(II)-K1 afin d'établir de nouvelles valeurs de référence en termes de courant par unité d'activité).	a) 20 mois-pers. + 12 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 5 k€ c) 30 k€
8.	IR-R3	**Systèmes internationaux de comparaison des radionucléides émetteurs de rayonnement alpha et beta (ESIR)** Mise à disposition sur demande et extension d'un service pour les comparaisons bilatérales de radionucléides émetteurs de rayonnement alpha et beta pour des applications dans les domaines de la médecine nucléaire, de l'industrie nucléaire, de la physique nucléaire, de la protection de l'environnement, de la radioprotection et de la criminalistique nucléaire, à l'aide de l'ESIR établi lors du précédent programme de travail. *Laboratoires participants : 25*	
		R3.1 : Comparaisons bilatérales (BIPM.RI(II)-Kx) d'étalons nationaux de radionucléides émetteurs de rayonnement alpha et beta à longue durée de vie, à l'aide de l'ESIR établi lors du précédent programme de travail avec une reproductibilité meilleure que 0,1 %. *Laboratoires participants : 25* **R3.2 :** Soutien technique et amélioration continue pour le nouveau comparateur ESIR, notamment en développant du matériel et des logiciels supplémentaires (comme l'extension du service afin de couvrir d'autres radionucléides et l'utilisation de systèmes numériques de traitement d'impulsions).	a) 70 mois-pers. + 12 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 10 k€ c) 15 k€
9.	IR-R4	**Développement d'un système de référence pour le démantèlement nucléaire et les industries qui rejettent des effluents contenant des matières à teneur renforcée en radionucléides naturels (NORM)** Développement d'un nouveau comparateur pour les mesures d'étalons prioritaires concernant les chaînes de désintégration complexes de radionucléides naturels ou de radionucléides clés pour le démantèlement nucléaire.	
		R4.1 : Rapport sur les exigences relatives à un nouveau comparateur, en tenant compte de l'utilisation de la matrice des méthodes de mesure. **R4.2 :** Description des spécifications, conception et modélisation d'un nouveau comparateur pour la priorité identifiée. **R4.3 :** Construction et mise en œuvre du comparateur. **R4.4 :** Rapport sur les conclusions des études de validation.	a) 22 mois-pers. + 6 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 10 k€ c) 30 k€

Soutien aux activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
10.	IR-CBKT	Planification, coordination et réalisation d'activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances dans le domaine de la métrologie des rayonnements ionisants *(les estimations ont été établies à partir des projets CBKT présentés pages 44-45, ce projet devra être soutenu par des partenaires pour être réalisé*).	a) 13 pm b) 0 k€ c) 0 k€

Coûts partagés entre l'ensemble des laboratoires

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Atelier et approvisionnement en gaz			
1.	**Lab-1**	**Lab-1.1 :** Atelier : matières premières, consommables, sous-composants spéciaux et autres coûts de fonctionnement.	Coûts de fonctionnement : 180 k€
		Lab-1.2 : Approvisionnement en gaz et en cryogène pour des activités scientifiques.	Coûts de fonctionnement : 52 k€

RELATIONS INTERNATIONALES

Le travail de relations internationales a pour objectif de favoriser la coopération avec d'autres organisations intergouvernementales et de promouvoir la comparabilité mondiale des mesures. Les activités de collaboration internationale du BIPM sont vastes et concernent plus de 30 organisations internationales. Dans un monde en constante mutation, le BIPM se doit de rester flexible par rapport aux activités qu'il propose afin de pouvoir tirer parti de nouvelles opportunités car les organisations avec lesquelles il collabore s'adaptent à l'évolution de leurs besoins. C'est pourquoi le BIPM maintient et met à jour ses objectifs stratégiques concernant chacun de ses organismes de liaison. Ce travail de collaboration devrait se concentrer davantage sur la Banque mondiale, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), l'Organisation mondiale du commerce (OMC), l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI), ainsi que sur les partenaires de l'infrastructure de la qualité, et en particulier l'OIML.

Stratégie concernant le travail en matière de relations internationales

- Augmenter la participation des organisations internationales aux activités de coordination technique du BIPM, telles que les réunions des Comités consultatifs et de leurs groupes de travail, et parvenir à une plus grande reconnaissance de la valeur des mesures traçables au SI de la part de ces organisations internationales.
- Promouvoir l'importance de la comparabilité mondiale des mesures en collaboration avec des organisations internationales qui revêtent une importance stratégique pour la mission du BIPM (notamment l'OIML, l'ILAC, l'ISO et l'OMC-OTC) et travailler avec ces organisations, ainsi qu'avec d'autres, par le biais des Comités communs.
- Accroître les possibilités pour les États Membres dont le système métrologique est émergent, en encourageant les « potentiels États Membres » à passer du statut d'Associé à celui d'État Membre.

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Collaboration avec les États Membres, les Associés, le CIPM et les organisations régionales de métrologie			
1.	ILC-L1	1) Soutien apporté aux États Membres et aux Associés, au CIPM et au directeur du BIPM. 2) Promotion de la Convention du Mètre et soutien aux potentiels États Membres et Associés. 3) Soutien apporté aux organisations régionales de métrologie (AFRIMETS, APMP, COOMET, EURAMET, SIM et GULFMET) et représentation du BIPM auprès de ces organisations.	a) 36 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€

Collaboration avec des partenaires stratégiques			
2.	ILC-L2	Collaboration institutionnelle avec des organisations intergouvernementales et organismes internationaux, ainsi que des organisations faisant partie de l'infrastructure de la qualité : – OIML, ONUDI, ILAC, ISO, OCDE, OMC, Banque mondiale. – Collaboration institutionnelle avec d'autres organisations internationales selon les besoins (le BIPM collabore avec près de 30 organisations internationales).	a) 36 mois-pers. + 18 mois-pers. pour des scientifiques invités b) 0 k€ c) 0 k€
3.	PMD-L1	1) Représentation du BIPM au sein du *CODATA Task Group on Fundamental Constants* (4 réunions). 2) Représentation du BIPM au sein du Comité exécutif de la CPEM (Conference on Precision Electromagnetic Measurements) (4 réunions).	a) 3 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
4.	Time-L1	Coordination et promotion des activités du temps afin de faire progresser le développement des échelles de temps et leurs applications. 1) Dissémination du TAI, de l'UTC, de TT(BIPM). 2) Comparaisons de temps à l'aide des systèmes GNSS. 3) Coordination GNSS. 4) Définition et réalisation du temps à l'aide des systèmes GNSS. 5) Dissémination de l'UTC à l'aide des systèmes GNSS. 6) Besoins en matière de méthodes de comparaison de temps et de fréquences.	a) 14 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
5.	Time-L2	Coordination et promotion des activités du temps pour les applications scientifiques. Soutien métrologique dans le domaine du temps et des fréquences concernant : 1) les références spatio-temporelles, les Conventions de l'IERS, 2) les échelles de temps pour l'astronomie, TT(BIPM), les échelles de temps fondées sur les pulsars, 3) les applications géodésiques et géophysiques en métrologie du temps et des fréquences, c'est-à-dire les références géodésiques, le potentiel de pesanteur de la Terre.	a) 7 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
6.	Chem-L1	1) Activités de collaboration avec : IUPAC, ISO TC 212, IFCC, OMM, OMS, AMA, Codex, ISO TC 146.	a) 20 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
		2) Activités de collaboration liées à la révision de la méthode de référence des étalons mesureurs d'ozone et sa mise en œuvre au niveau mondial.	a) 6 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
7.	IR-L1	1) International Commission on Radiation Units (ICRU) (membre de la Commission principale et membre de certains comités de rédaction « Report Committees »). 2) Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) (Comité scientifique des laboratoires secondaires de dosimétrie). 3) International Committee for Radionuclide Metrology (ICRM). 4) ISO (SC 2 et réunions de groupes de travail).	a) 12 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€

Soutien aux activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
8.	ILC-CBKT	1) Réalisation d'activités thématiques CBKT soutenues par des partenaires (sujets d'intérêt choisis en commun avec la communauté des laboratoires nationaux de métrologie et des laboratoires désignés ainsi qu'avec les partenaires) et conférences : – au BIPM ; – dans le cadre de la structure des organisations régionales de métrologie (lors de formations organisées dans les régions par les organisations régionales de métrologie) en cohérence avec les détachements dans les laboratoires du BIPM de personnel venant de laboratoires nationaux de métrologie.	a) 8 pm b) 0 k€ c) 0 k€

COORDINATION

Le travail de coordination vise à coordonner le système mondial de mesure, en garantissant des résultats de mesure comparables, adaptés et reconnus au niveau international.

Stratégie concernant la coordination

- Développer un rôle pour le BIPM en tant que centre d'accès aux données et services de données détenus par la communauté internationale de la métrologie.
- Améliorer et promouvoir la reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie (CIPM MRA), en assurant la mise en œuvre de la KCDB, en soutenant le JCRB, et en accroissant les possibilités offertes par le registre international de ressources métrologiques (International Metrology Resource Registry - IMRR) hébergé par le BIPM.
- Soutenir les mesures de diagnostic *in vitro* dans le monde entier en fournissant une base de données des matériaux, méthodes et services de référence d'ordre supérieur disponibles qui peuvent être utilisés pour établir la traçabilité métrologique.
- Collaborer avec les laboratoires nationaux de métrologie des États Membres et avec les organisations régionales de métrologie.

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
CIPM MRA			
1.	ILC-C1	1) Coordination des mécanismes du CIPM MRA par l'intermédiaire du JCRB. 2) Mise à disposition de la base de données de la KCDB (ainsi que secrétariat exécutif du JCRB). 3) Conseils fournis aux signataires du CIPM MRA et exploitation des données pour les parties prenantes.	a) 52 mois-pers. + 44 mois-pers. de détachement b) 78 k€[2] c) 48 k€
JCGM			
2.	ILC-C2	Secrétariat exécutif du JCGM et rapporteur du Groupe de travail 2 du JCGM sur le VIM (JCGM : une réunion annuelle ; Groupe de travail 2 : deux réunions annuelles), soutien général au JCGM et représentation au sein du Groupe de travail 2.	a) 6 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
3.	IR-C1	Secrétariat scientifique du Groupe de travail 1 du JCGM sur le GUM et soutien concernant : 1) le rapporteur, 2) 2 réunions annuelles.	a) 5 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
JCTLM			
4.	Chem-C3	Soutien concernant : 1) le Comité exécutif et les groupes de travail du JCTLM (8 réunions), 2) la procédure de sélection et d'examen des données à intégrer à la base de données du JCTLM, 3) le maintien de la base de données du JCTLM.	a) 32 mois-pers. b) 40 k€ c) 2 k€

[2] *ILC-C1 – Coûts de fonctionnement de la KCDB comptabilisés dans « Dépenses du site » sous « Plateforme IT » dans les comptes du BIPM.*

Réunion des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie et des présidents des organisations régionales de métrologie			
5.	ILC-C3	1) Coopération avec le panel de directeurs de laboratoires nationaux de métrologie afin d'organiser une réunion annuelle au BIPM. 2) Organisation des réunions des présidents des Comités consultatifs. 3) Accès aux meilleures pratiques concernant le fonctionnement des organisations régionales de métrologie et compréhension de ces pratiques : *a) développement d'une perspective globale sur des sujets clés,* *b) soutien optimal apporté aux États dont le système métrologique est émergent,* *c) travail facilité par l'organisation, par le BIPM, des réunions annuelles des présidents des organisations régionales de métrologie.*	a) 2 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
IMRR			
6.	ILC-C4	Soutien concernant : 1) l'hébergement de la base de données du registre international de ressources métrologiques, 2) la poursuite du développement du registre, 3) l'hébergement de réunions.	a) 4 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
Soutien aux Comités consultatifs (dont la mise à disposition de leur secrétaire exécutif)			
7.	PMD-C1	Mise à disposition du secrétaire exécutif du CCEM (électricité et magnétisme) afin de soutenir : 1) 2 réunions du CCEM, 2) les réunions annuelles des groupes de travail, 3) une interaction proactive en matière de stratégie et communication, 4) la coordination des processus du CCEM, 5) la collaboration avec les comités techniques des organisations régionales de métrologie (4 réunions).	a) 14 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
8.	PMD-C2	Mise à disposition du secrétaire exécutif du CCM (masses et grandeurs apparentées) afin de soutenir : 1) 2 réunions du CCM, 2) les réunions annuelles des groupes de travail, 3) une interaction proactive en matière de stratégie et communication, 4) la coordination des processus du CCM, 5) la collaboration avec les comités techniques des organisations régionales de métrologie (4 réunions).	a) 14 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
9.	PMD-C3	Mise à disposition du secrétaire exécutif du CCU (unités) afin de soutenir : 1) 2 réunions du CCU, 2) une interaction proactive en matière de stratégie et communication, 3) la coordination des processus du CCU.	a) 6 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
10.	Time-C1	Mise à disposition du secrétaire exécutif du CCTF (temps et fréquences) afin de soutenir : 1) l'organisation des réunions du CCTF (une réunion tous les 2 ou 3 ans), 2) le secrétariat du CCTF et des groupes de travail, 3) une interaction proactive en matière de stratégie et communication, 4) la coordination des processus du CCTF, parmi lesquelles les rapports de comparaison et d'autres rapports du CIPM MRA, 5) les comparaisons clés dans les domaines du temps et des fréquences, 6) la recommandation de fréquences étalons comme représentations secondaires de la seconde.	a) 14 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€

11.	Time-C2	Mise à disposition du secrétaire exécutif du CCL (longueurs) afin de soutenir : 1) les réunions du CCL, 2) la participation aux groupes de travail, 3) une interaction proactive en matière de stratégie et communication, 4) la coordination des activités dans le domaine des longueurs entre les laboratoires nationaux de métrologie ; les comparaisons clés dans le domaine des longueurs et le soutien aux comparaisons de lasers stabilisés pilotées par des laboratoires nationaux de métrologie, 5) la recommandation de fréquences étalons pour la réalisation du mètre.	a) 6 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
12.	Time-C3	Mise à disposition du secrétaire exécutif du CCAUV (acoustique, ultrasons et vibrations) afin de soutenir : 1) les réunions bisannuelles du CCAUV et les réunions de ses 3 groupes de travail, 2) une interaction proactive en matière de stratégie et communication, 3) l'élaboration de plans stratégiques, 4) la coordination de l'examen des rapports de comparaison des Comités consultatifs et des organisations régionales de métrologie avant leur publication, 5) la collaboration avec les organisations régionales de métrologie.	a) 6 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
13.	Chem-C1	Mise à disposition du secrétaire exécutif du CCQM (quantité de matière) afin de soutenir : 1) les réunions plénières du CCQM (4 réunions) et les réunions de ses 11 groupes de travail (44 réunions), 2) une interaction proactive en matière de stratégie et communication, 3) la coordination de l'examen des rapports de comparaison des Comités consultatifs et des organisations régionales de métrologie avant leur publication, 4) le développement et l'examen de documents et directives du CCQM, 5) l'organisation et la coordination d'ateliers du CCQM.	a) 14 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
14.	Chem-C2	Mise à disposition du secrétaire exécutif du CCPR (photométrie et radiométrie) afin de soutenir : 1) deux réunions plénières du CCPR et les réunions des groupes de travail, 2) une interaction proactive en matière de stratégie et communication, 3) la coordination de l'examen des rapports de comparaison des Comités consultatifs et des organisations régionales de métrologie avant leur publication, 4) le développement et l'examen de documents et directives du CCPR.	a) 6 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
15.	IR-C2	Mise à disposition du secrétaire exécutif du CCRI (rayonnements ionisants) afin de soutenir : 1) la réunion bisannuelle du CCRI et les réunions de ses Sections I, II et III, 2) les réunions régulières de 7 groupes de travail, 3) l'élaboration de plans stratégiques, 4) la coordination de la collaboration avec les organisations régionales de métrologie.	a) 14 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
16.	IR-C3	Mise à disposition du secrétaire exécutif du CCT (thermométrie) afin de soutenir : 1) la réunion bisannuelle du CCT et les réunions de ses 12 groupes de travail, 2) une interaction proactive en matière de stratégie et communication, 3) la coordination de l'examen des rapports de comparaison des Comités consultatifs et des organisations régionales de métrologie avant leur publication, 4) la coopération avec les organisations régionales de métrologie.	a) 6 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€

RENFORCEMENT DES CAPACITÉS ET TRANSFERT DES CONNAISSANCES

Le programme du BIPM de renforcement des capacités et de transfert des connaissances (programme CBKT) a pour mission d'accroître l'efficacité au sein de la communauté internationale de la métrologie, en particulier celle des États Membres et Associés dont le système métrologique est émergent. Le programme CBKT est décrit en fonction de trois types d'activités : les activités fondamentales financées dont l'objectif est de soutenir le fonctionnement et la participation efficaces au CIPM MRA ; les ateliers/formations thématiques et détachements dans les laboratoires, soutenus par des partenaires ; et les activités de transfert des connaissances pour des scientifiques/spécialistes invités venant en détachement au BIPM afin de contribuer à l'exécution du présent programme de travail.

Stratégie concernant le renforcement des capacités et le transfert des connaissances

- Renforcer le système métrologique mondial et équilibrer la charge de travail entre les laboratoires nationaux de métrologie, et promouvoir le fonctionnement efficace du système.
- Aider les laboratoires nationaux de métrologie de pays et économies dont le système métrologique est émergent (CEEMS) à participer de façon adéquate et efficace au système métrologique mondial.
- Soutenir un programme de scientifiques invités/détachés au (et du) BIPM.

- **Activités fondamentales financées du programme CBKT**

(Ces activités ne pourront être réalisées que si la dotation du BIPM est augmentée. Si tel n'est pas le cas, le BIPM cherchera des partenaires financiers et les activités seront soutenues au mieux des possibilités.)

La gestion du programme CBKT et les activités considérées comme fondamentales pour la mise en œuvre et le fonctionnement efficaces du CIPM MRA sont intégrées dans le scénario de base concernant la dotation pour le présent programme de travail.

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Planification et coordination des activités du programme CBKT			
1.	ILC-CBKT1	1) Planification, coordination et mise en œuvre des activités fondamentales du programme CBKT soutenant le CIPM MRA et des activités thématiques soutenues par des partenaires, y compris la programmation, la conception des formations, les appels à candidature et le processus de sélection (en coopération avec les organisations régionales de métrologie pour fixer les critères de priorité concernant les candidats), l'identification des intervenants, la prise en charge des frais des participants le cas échéant, la mise à disposition de conférenciers du BIPM et l'externalisation de conférences aux organisations régionales de métrologie et laboratoires nationaux de métrologie avec toute la logistique associée.	a) 24 mois-pers b) 0 k€ c) 0 k€

		2) Développement et gestion de la structure permettant d'assurer une exécution coordonnée des activités CBKT par le BIPM et les organisations régionales de métrologie. – Collaboration avec les organisations régionales de métrologie pour assurer une exécution coordonnée du programme CBKT.	
Réalisation des activités fondamentales du programme CBKT et conférences			
2.	ILC-CBKT2	1) Réalisation des activités fondamentales du programme CBKT soutenant le CIPM MRA et conférences : – « Future leaders » (formation destinée à former les nouveaux et potentiels présidents de groupes de travail et comités techniques des organisations régionales de métrologie), – « Sound beginning » (formation destinée aux nouveaux participants au CIPM MRA), – conseils donnés aux nouveaux présidents de groupes de travail ou comités techniques d'organisations régionales de métrologie, – participation aux activités de la Convention du Mètre (y compris orientations pour les nouveaux directeurs de laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés).	a) 12 mois-pers b) 228 k€[3] c) 0 k€
3.	ILC-CBKT3	Organisation commune de l'école de métrologie de Varenne pour de jeunes scientifiques / métrologistes du monde entier, en collaboration avec la Société italienne de physique.	a) 2 mois-pers + 2 mois-pers de détachement b) 60 k€ c) 0 k€

Synthèse des activités fondamentales financées du programme CBKT

Les possibilités pour les membres du personnel de laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés de bénéficier des formations et ateliers du programme CBKT organisés au BIPM sont estimées comme suit : (ces activités du programme CBKT sont financées dans le cadre du présent programme de travail)

Activités CBKT	**Bénéficiaires** *(nombre de participants)*	
	Activités menées au BIPM	*Activités menées dans les régions dans le cadre de la structure intégrée avec les organisations régionales de métrologie/les laboratoires nationaux de métrologie*
Activités fondamentales financées du programme CBKT	60	360

• Activités du programme CBKT soutenues par des partenaires

Certaines activités du programme CBKT sur des sujets de plus grande envergure, comprenant des ateliers, séminaires et détachements dans les laboratoires, ne pourront être réalisées que si des partenariats externes sont trouvés ; ces activités permettront d'étendre la portée du programme CBKT qui est mis en œuvre avec succès depuis début 2016.

[3] *Cette activité ne pourra être réalisée que si la dotation du BIPM est augmentée, tel que requis dans la Convocation. Si tel n'est pas le cas, le BIPM cherchera des partenaires financiers et l'activité sera soutenue au mieux des possibilités.*

Les ressources nécessaires pour que le BIPM puissent entreprendre et gérer ces activités soutenues par des partenaires sont également intégrées aux coûts du programme de travail.

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Ateliers et détachements du programme CBKT concernant le travail de laboratoire du BIPM			
Ces activités sont identifiées par les parties prenantes comme faisant progresser les objectifs du BIPM et de la communauté plus vaste de la métrologie. De façon provisoire, les activités suivantes ont été considérées comme des sujets prioritaires pour le présent programme de travail : • **Metrology for Clean Air** *(détachements en laboratoire)* • **Metrology for Safe Food and Feed** *(détachements en laboratoire)* • **Metrology for Accurate Patient Care** *(détachements en laboratoire)* • **Atelier/formation sur la réalisation et la dissémination du kilogramme** • **Atelier sur l'utilisation des étalons électriques quantiques pour réaliser les unités électriques conformément au SI révisé** • **Ateliers et activités de renforcement des capacités dans le domaine de la métrologie du temps, comprenant une formation sur un « simulateur UTC »** • **Ateliers et activités de renforcement des capacités dans le domaine de la métrologie des rayonnements ionisants**			

Synthèse des activités du programme CBKT soutenues par des partenaires

Les possibilités pour les membres du personnel de laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés de bénéficier des activités du programme CBKT menées dans les laboratoires du BIPM sont estimées comme suit : (le succès de ces projets dépend des partenariats qui pourront être établis)

Département du BIPM	**Détachés bénéficiaires du programme CBKT**		
	Durée caractéristique du détachement *(mois)*	Nombre de bénéficiaires	Total *(mois-personne)*
Métrologie en physique	-	80	-
Temps	-	20	-
Chimie	5	30	150
Rayonnements ionisants	2	9	18
Total	-	**139**	**168**

Remarque :

Pour les détachements dans les laboratoires des départements de la chimie et des rayonnements ionisants, la durée typique du détachement et le nombre total de mois-personne sont indiqués dans le tableau ci-dessus, alors que pour les détachements dans les départements de la métrologie en physique et du temps, seul le nombre de bénéficiaires est indiqué.

Pour mettre à profit de façon optimale les possibilités qui se présentent et s'assurer de leur impact maximal, un certain degré de flexibilité est nécessaire en ce qui concerne les activités CBKT soutenues par des partenaires.

- **Activités de transfert des connaissances pour des scientifiques/spécialistes invités en détachement au BIPM**

Comme indiqué dans le programme de travail de laboratoire du BIPM, la réussite d'un nombre significatif de projets dépend du travail de personnel en détachement. Les scientifiques/spécialistes invités en détachement au BIPM contribuent à l'exécution des projets du programme de travail, tirent parti du travail effectué dans les laboratoires du BIPM et participent également au transfert de connaissances auprès des bénéficiaires du programme CBKT.

Le nombre total de scientifiques/spécialistes invités requis pour contribuer à l'exécution du programme de travail est estimé comme suit :

Département du BIPM	**Détachés de laboratoires nationaux de métrologie et de laboratoires désignés contribuant à l'exécution du programme** *(mois-personne)*
Métrologie en physique	44
Temps	108
Chimie	174
Rayonnements ionisants	48
Relations internationales et communication	88
Total	**462**

Remarque :

Il est estimé que le nombre de détachés impliqués dans le programme de travail du BIPM pour les années 2020 à 2023 va plus que doubler par rapport au nombre prévu pour le programme de travail pour les années 2016 à 2019.

Pour mettre à profit de façon optimale les possibilités qui se présentent et s'assurer de leur impact maximal, un certain degré de flexibilité est nécessaire en ce qui concerne les détachements de scientifiques invités.

COMMUNICATION ET PROMOTION

Stratégie concernant la communication et la promotion

- Communiquer de façon efficace (avec les États Membres, de potentiels États Membres ou d'autres parties prenantes clés) au sujet de la Convention du Mètre, du SI et de sa révision.
- Informer, par le biais de publications et réunions, la communauté scientifique, le grand public et les décideurs des questions liées à la métrologie et à ses avantages.
- Faire du site internet du BIPM le portail privilégié des parties prenantes comme source d'informations sur la métrologie mondiale.

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Production de rapports, publications et site internet du BIPM			
1.	ILC- CP1	1. Gestion du site internet du BIPM. 2. Mise à jour du site internet du BIPM, afin de l'adapter de façon efficace à l'évolution rapide des médias électroniques et garantir qu'il continue à fournir des services efficaces et donne une image exacte du BIPM.	a) 54 mois-pers. b) 212 k€[4] c) 48 k€
2.	ILC-CP2	Production des rapports du BIPM (incluant leur rédaction/tenue des procès-verbaux, édition, traduction vers le français, mise en page et impression pour les rapports du CIPM et du BIPM), ainsi que des publications et posters.	a) 52 mois-pers. b) 70 k€[5] c) 0 k€
3.	ILC-CP3	Édition et publication de *Metrologia* : 1. assurer le succès de *Metrologia*, qui constitue la publication scientifique clé dans le domaine de la métrologie de haut niveau, en augmentant son facteur d'impact, 2. augmenter de 6 à 10 le nombre de numéros annuels de *Metrologia*, 3. rendre *Metrologia* viable en tenant compte de la tendance des éditeurs de revues à publier des articles en accès libre.	a) 32 mois-pers. b) 440 k€[6] c) 0 k€
4.	ILC- CP4	Abonnements à des revues (version en ligne ou imprimée), achat d'articles scientifiques individuels et de livres pour les membres du personnel du BIPM.	a) 40 mois-pers. b) 138 k€[7] c) 14 k€

[4] *ILC-CP1 – Coûts de fonctionnement de la KCDB comptabilisés dans « Dépenses du site » sous « Plateforme IT » dans les comptes du BIPM.*

[5] *ILC-CP2 – Coûts de fonctionnement des publications comptabilisés dans « Coordination et communication » sous « Publications » dans les comptes du BIPM.*

[6] *ILC-CP3 – Coûts de fonctionnement annuels de Metrologia comptabilisés dans « Dépense du site » dans les comptes du BIPM.*

[7] *ILC-C4 – Coûts des abonnements et d'autres coûts de bibliothèque comptabilisés comme coûts de fonctionnement dans « Dépense du site » dans les comptes du BIPM.*

Journée mondiale de la métrologie			
5.	ILC- CP5	Renforcer le succès de la Journée mondiale de la métrologie, en doublant la participation d'ici 2022 à l'aide de tous les supports possibles (projet mené conjointement avec l'OIML) avec un minimum de 50 États participants. Mise à disposition des éléments suivants : 1. contenu pour le site internet dédié, 2. poster (en consultation avec les organisations régionales de métrologie et le laboratoire national de métrologie sélectionné), 3. les messages des directeurs, 4. la liste des événements organisés par l'ensemble des pays participants, 5. un communiqué de presse, 6. la participation à 4 événements nationaux minimum de pays dont le système métrologique est émergent.	a) 2 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€
Étude d'impact			
6.	ILC- CP6	Étude indépendante faisant autorité afin de mettre en évidence l'impact de la métrologie au sein de l'infrastructure de la qualité.	a) 0 mois-pers. + 12 mois-pers. de détachement b) 60 k€
Exploitation des connaissances détenues par les laboratoires nationaux de métrologie ainsi que des données de qualité de la KCDB			
7.	ILC- CP7	Plan stratégique afin d'améliorer la visibilité et la disponibilité des meilleures pratiques métrologiques, par exemple en mettant à disposition des guides des meilleures pratiques, avec au moins 3 exemples.	a) 2 mois-pers. + 12 mois-pers. de détachement b) 0 k€ c) 0 k€
Ateliers sur des sujets-clés			
8.	ILC- CP8	Identifier (en consultation avec le CIPM et les laboratoires nationaux de métrologie) les sujets d'importance pour la communauté de la métrologie (tels que les métadonnées) qui doivent faire l'objet d'un atelier du BIPM.	a) 2 mois-pers. b) 0 k€ c) 0 k€

SOUTIEN ADMINISTRATIF

Stratégie concernant le soutien administratif

- Fournir le plus haut niveau de soutien administratif et de gouvernance.
- Suivre les meilleures pratiques en matière de formation et de perfectionnement du personnel.
- Augmenter la diversité des compétences et l'expérience dont dispose le BIPM.
- Élaborer et mettre en œuvre les meilleures pratiques afin de soutenir les Comités consultatifs et les Comités communs en assurant leur secrétariat exécutif.

Directeur

Le temps de travail du directeur et celui de son assistante personnelle (2 équivalents temps plein).

Bureau du directeur : Finances, Juridique et Ressources humaines

L'équipe des finances (3 équivalents temps plein) est en charge de l'établissement du rapport annuel et des états financiers du BIPM, des plans à moyen terme et à long terme, du budget annuel, ainsi que d'activités de gestion financière permettant de répondre aux besoins de l'organisation ainsi qu'à ceux des départements scientifiques, telles que la gestion de la trésorerie, des achats et de la paye.

Le Service Juridique du BIPM (1 équivalent temps plein) assure la gestion de toutes les questions juridiques, y compris celles relatives aux Statut, Règlement et Instructions applicables aux membres du personnel (SRI) et aux Statut et Règlement de la Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM, aux accords tels que les protocoles d'accord et les contrats d'achat complexes, au droit des organisations internationales et au droit international.

Le Service des Ressources humaines (2 équivalents temps plein) exécute les tâches nécessaires pour permettre au personnel de bénéficier des avantages décrits dans les SRI. Il gère l'évaluation du personnel et assure la liaison indispensable avec les autorités françaises sur les questions d'emploi de personnel. Il apporte également son soutien au recrutement et à l'installation des membres du personnel et des détachés.

SERVICES TECHNIQUES

Stratégie concernant les services techniques

- Développer l'environnement de laboratoire adéquat pour soutenir le programme de travail.
- S'assurer que les salles de réunion du BIPM utilisées pour les Comités consultatifs et leurs groupes de travail offrent les meilleures prestations possibles.
- Développer l'infrastructure informatique du BIPM afin qu'il puisse accomplir sa mission.
- Maintenir les bâtiments historiques et le site à un niveau adéquat par rapport à la mission du BIPM.

Réunions, réception et entretien des locaux

Le Service d'organisation des réunions (2 équivalents temps plein) assiste le directeur et gère, entre autres responsabilités, la charge de travail croissante liée à la coordination administrative des Comités consultatifs : il s'agit notamment d'envoyer les invitations aux réunions organisées par le BIPM et d'en assurer l'organisation, ainsi que d'apporter de l'aide aux secrétaires exécutifs scientifiques et aux participants extérieurs venant assister aux réunions. Les activités d'entretien des locaux (3 équivalents temps plein) ont pour objectif de garantir la propreté des locaux du BIPM, d'organiser les réceptions au BIPM et de fournir toutes les prestations nécessaires aux réunions, telles que les déjeuners. Les services de réception sont sous-traités.

Qualité, Santé et Sécurité

Le Système de management de la qualité et celui de la santé et de la sécurité au travail sont gérés par un Responsable Qualité, Santé et Sécurité (1 équivalent temps plein).

Le BIPM maintient un Système de management de la qualité auto-déclaré, fondé sur la norme ISO/IEC 17025:2017 « Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais » pour ses activités d'étalonnage et de mesurage et étend les principes de cette norme à toutes les activités de comparaison effectuées dans ses laboratoires. Les parties pertinentes de la norme ISO 17034:2016 « Exigences générales pour la compétence des producteurs de matériaux de référence » sont mises en œuvre par le Département de la chimie. Des audits internes et externes du Système qualité sont réalisés de façon régulière par des experts venant des laboratoires nationaux de métrologie et le Système qualité est présenté périodiquement à un groupe d'experts qualité d'une organisation régionale de métrologie (les organisations régionales de métrologie assurant cette responsabilité à tour de rôle).

Le BIPM maintient un Système de management de la santé et de la sécurité au travail fondé sur les exigences de la norme BS OHSAS 18001:2007 « Systèmes de management de la santé et de la sécurité au travail - Exigences ». Le Système fait l'objet d'audits internes et il est soumis à divers contrôles techniques externes (conformément à la législation française) concernant des risques clés liés notamment à l'électricité, la pression, les rayonnements ionisants, la foudre ou les incendies.

Site et sécurité

Le BIPM est situé dans le domaine national de Saint-Cloud, sur un site historique concédé par le gouvernement français. Le Pavillon de Breteuil, ainsi que les six autres bâtiments construits depuis la création du BIPM et les jardins qui l'entourent, doivent donc être entretenus avec le plus grand soin. L'entretien des bâtiments qui datent aussi bien du 17e siècle (le Pavillon de Breteuil et le Petit Pavillon) que de nos jours, fait appel à un large éventail de métiers et techniques (2 équivalents temps plein). Le BIPM assure un service de gardiennage du site (1 équivalent temps plein) et fait également appel à une société extérieure.

Atelier de mécanique et entretien du site

L'atelier de mécanique (3 équivalents temps plein) est fondamental au bon fonctionnement des laboratoires scientifiques du BIPM. Non seulement l'atelier conçoit et fabrique des pièces spécifiques nécessaires aux expériences de recherche du BIPM, tellesque la balance de Kibble et le condensateur calculable, mais il fabrique également des pièces spéciales permettant d'adapter les étalons des laboratoires nationaux de métrologie aux équipements de référence du BIPM. L'atelier est par ailleurs chargé de la réparation sur site des équipements endommagés afin que les comparaisons et étalonnages puissent être réalisés sans retards importants. L'existence d'un tel atelier de mécanique est un préalable indispensable au bon fonctionnement du BIPM. L'atelier de mécanique fabrique aussi les copies en platine iridié du prototype international du kilogramme, contre remboursement des frais. C'est un service unique dont seuls les États Membres peuvent bénéficier. Par ailleurs, les membres du personnel de l'atelier contribuent aux tâches d'entretien général des bâtiments du BIPM (3 équivalents temps plein).

Services informatiques

Comme toute autre institution scientifique, le BIPM repose sur des services informatiques (2 équivalents temps plein) pleinement opérationnels. En particulier, les bases de données de la KCDB et du JCTLM doivent être accessibles en permanence à la communauté extérieure. Le calcul du Temps atomique international (TAI) et du Temps universel coordonné (UTC) dépend de la fiabilité et de la sécurité des services informatiques du BIPM. L'équipe informatique du BIPM a également pour tâche de gérer un grand parc matériel et logiciel destiné à des applications scientifiques, financières et administratives, d'assurer le bon fonctionnement d'instruments informatisés et de garantir les communications électroniques.

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME

AFRIMET	Système interafricain de métrologie
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AMA	Agence mondiale antidopage
APMP	Asia/Pacific Metrology Programme
BIML	Bureau international de métrologie légale
BIPM	Bureau international des poids et mesures
CBKT	Renforcement des capacités et transfert des connaissances
CCAUV	Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations
CCEM	Comité consultatif d'électricité et magnétisme
CCL	Comité consultatif des longueurs
CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie
CCQM	Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie
CCRI	Comité consultatif des rayonnements ionisants
CCT	Comité consultatif de thermométrie
CCTF	Comité consultatif du temps et des fréquences
CCU	Comité consultatif des unités
CEEMS	Countries and Economies with Emerging Metrology Systems - Pays et économies au système de métrologie émergent
CIPM	Comité international des poids et mesures
CIPM MRA	Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM
CGPM	Conférence générale des poids et mesures
CMC	Aptitude en matière de mesures et d'étalonnages
Codex Alimentarius	Commission du Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires
COOMET	Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions
CPEM	Conference on Precision Electromagnetic Measurements
DON	Déoxynivalenol
DOSEO	Plateforme technologique DOSEO du CEA, Saclay
EIT-90	Échelle internationale de température de 1990
ESIR	Extended SIR
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
GNSS	Global Navigation Satellite System
GULFMET	Gulf Association for Metrology
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
ICAG	International Comparison of Absolute Gravimeters
ICG	International Committee on Global Navigation Satellite Systems
ICRM	International Committee for Radionuclide Metrology
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IEC	Commission électrotechnique internationale
IERS	Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence
IFCC	Fédération internationale de chimie clinique et médecine de laboratoire
IGS	International GPS Service
ILAC	International laboratory Accreditation Cooperation
IMRR	International Metrology Resource Registry

INetQI	Réseau international pour l'infrastructure de la qualité
ISO	Organisation internationale de normalisation
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
JCGM	Comité commun pour les guides en métrologie
JCRB	Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM
JCTLM	Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire
KCDB	Base de données du BIPM sur les comparaisons clés
NIST	National Institute of Standards and Technology (États Unis d'Amérique)
NMIJ	National Metrology Institute of Japan (Japon)
NORM	Matières à teneur renforcée en radionucléides naturels
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OIML	Organisation internationale de métrologie légale
OMC	Organisation mondiale du commerce
OMM	Organisation météorologique mondiale
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONUDI	Organisation des Nations Unies pour le développement industriel
OTA	Ochratoxine A
OTC	Obstacle technique au commerce
PAT	Patuline
PICAA	Peptide Impurity Corrected Amino Acid Analysis
SI	Système international d'unités
SIM	Inter-American Metrology System
SIR	Système international de référence pour les radionucléides émetteurs de rayonnement gamma
SIRTI	Instrument de transfert du SIR
SRI	Statut, Règlement et Instructions applicables aux membres du personnel du BIPM
TAI	Temps atomique international
TT	Temps terrestre
UAI	Union astronomique internationale
UGGI	Union géodésique et géophysique internationale
UIT	Union internationale des télécommunications
URSI	Union radioscientifique internationale
UTC	Temps universel coordonné
UTCr	UTC rapide
VIM	Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie

Annexe 1

FONDEMENT DU PROGRAMME DE LABORATOIRE DU BIPM

Pourquoi le BIPM a-t-il des capacités techniques et des laboratoires dans certains domaines plutôt que d'autres ?

Au cours de l'exercice de planification stratégique qui a étayé l'élaboration du programme de travail du BIPM, il a été reconnu qu'il serait utile d'énoncer de façon plus claire les raisons pour lesquelles le BIPM maintient des capacités techniques dans certains domaines (masses, électricité, temps, rayonnements ionisants et chimie) plutôt que d'autres (acoustique, longueurs, photométrie et radiométrie, thermométrie). La mission, le rôle et les objectifs du BIPM constituent le fondement des décisions prises à ce sujet.

Acoustique, ultrasons et vibrations	**Électricité et magnétisme**	**Longueur**	**Masse et grandeurs apparentées**
Les applications métrologiques en acoustique, ultrasons et vibrations concernent de nouveaux domaines qui entrent pleinement dans le cadre des programmes de recherche des laboratoires nationaux de métrologie.	Le domaine de l'électricité et du magnétisme est un domaine fondamental de la métrologie physique moderne qui est essentiel à de nombreux autres domaines métrologiques (ainsi, tous les systèmes de mesure produisent ou utilisent des signaux électriques ; les balances de Kibble sont fondées sur des étalons électriques quantiques ; la thermométrie au niveau d'exactitude le plus élevé dépend de mesures de résistance). Les comparaisons de dispositifs quantiques nécessitent des équipements transportables spécifiques, tels que les étalons à effet Josephson et à effet Hall quantique, ainsi que des compétences spéciales. Les laboratoires nationaux de métrologie ne disposent pas d'expérience dans le domaine des mesures à l'aide d'étalons transportables. La réalisation de l'unité de capacité est difficile. Le condensateur calculable du BIPM permet de soutenir la révision du SI par la détermination expérimentale de la valeur de la constante de von Klitzing, R_K, et de renforcer par conséquent la comparaison des étalons de capacité et les étalonnages actuellement effectués.	La métrologie dimensionnelle est essentielle à de nombreux domaines et ses méthodes de mesure sont matures. Pour la plupart des applications, les incertitudes obtenues pour assurer la traçabilité à une réalisation du SI sont négligeables. La réalisation de la définition du mètre et le fait de piloter des comparaisons dans le domaine des longueurs sont des activités relativement matures, la comparabilité des mesures étant largement démontrée. Il pourrait, toutefois, être nécessaire à l'avenir de comparer des peignes de fréquence afin d'assurer la traçabilité à des mesures de longueurs d'onde absolues.	**<u>Masses</u> :** La nécessité de maintenir à long terme le prototype international du kilogramme et d'assurer la dissémination au niveau international de l'unité de masse requiert un laboratoire central et neutre afin de garantir la traçabilité des mesures de masse. *Après la redéfinition :* la traçabilité à l'unité de masse du SI sera établie à partir de diverses réalisations primaires qui nécessitent des équipements expérimentaux complexes, parmi lesquelles la balance de Kibble du BIPM, ce qui requerra d'effectuer des comparaisons afin d'assurer l'uniformité des mesures de masse à l'échelle mondiale. Par ailleurs, étant donné l'éventuel faible nombre des futures réalisations primaires, il est nécessaire que soit mis en place un programme international centralisé permettant d'assurer un accès continu aux réalisations primaires (à l'aide de l'ensemble d'étalons de masse de référence et de la balance de Kibble du BIPM). **Programme de laboratoire du BIPM** ---------- **<u>Grandeurs apparentées</u> :** Les nombreuses activités appliquées dans ce domaine sont mieux couvertes par les laboratoires nationaux de métrologie.
Pas de programme de laboratoire du BIPM	**Programme de laboratoire du BIPM**	**Pas de programme de laboratoire du BIPM**	**Pas de programme de laboratoire du BIPM**

Photométrie et radiométrie	Métrologie en chimie	Rayonnements ionisants	Thermométrie	Temps et fréquences
Le domaine de la photométrie et de la radiométrie est relativement stable et les méthodes de mesure sont, pour la plupart, matures. Les laboratoires nationaux de métrologie assurent la comparabilité fondamentale des mesures aux niveaux requis à l'aide de radiomètres cryogéniques. Pour eux, l'accent dans ce domaine est de fournir leurs incertitudes de façon pratique et rentable pour les applications. (Des difficultés sont à noter pour évaluer les nouvelles sources d'éclairage telles que l'éclairage électroluminescent.)	La métrologie en chimie est un domaine relativement récent avec une chaîne de traçabilité courte. Des mesures chimiques exactes sont en particulier fondamentales pour la qualité de la vie. Le domaine de la métrologique en chimie n'est pas encore mature et les conseils apportés aux laboratoires nationaux de métrologie sont précieux, en particulier pour les États dont les capacités métrologiques croissent rapidement. Le savoir-faire du BIPM en métrologie en chimie est essentiel pour assurer une collaboration efficace avec, en particulier, l'IFCC, l'OMM, l'OMS, le Codex Alimentarius, et d'autres organismes. Le programme du BIPM est fortement soutenu par les laboratoires nationaux de métrologie les plus importants et aussi par ceux de nombreux pays développés et en développement qui disposent déjà d'une infrastructure métrologique en physique et qui développent leur infrastructure métrologique en chimie. Les compétences spécialisées du BIPM en matière de comparaisons dans les domaines des gaz et de l'analyse de pureté ont permis de réduire les incertitudes pour ces mesures.	Dans le domaine des rayonnements ionisants, le BIPM contribue à l'équivalence bien établie et au schéma de traçabilité mondial dans un domaine ayant un impact considérable sur les soins de santé (radiothérapie, radiodiagnostic et médecine nucléaire), la protection de l'environnement (radioactivité dans la chaîne alimentaire), ainsi que l'industrie et la criminalistique nucléaires. Des instruments uniques et de haute précision, ainsi que des champs de rayonnement, sont utilisés pour les comparaisons. Le fait de se centrer sur les comparaisons et les étalonnages réduit la nécessité pour les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires désignés de gérer des réglementations astreignantes lors de l'expédition de sources radioactives ou d'instruments sensibles pour des comparaisons internationales. Le fait pour le BIPM de maintenir un programme de laboratoire dans le domaine des rayonnements ionisants lui permet d'asseoir son influence lors de ses contacts avec des parties prenantes telles que l'AIEA, l'ICRM, l'ICRP, l'ICRU, l'IRPA, l'ISO, et l'OMS.	La réalisation du kelvin et le fait de piloter des comparaisons sont des activités matures (il est à noter, toutefois, que la définition à venir du kelvin rend certaines parties de la mise en pratique moins matures). La comparabilité des mesures en thermométrie est largement démontrée. L'échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) est réalisée.	La métrologie du temps et des fréquences repose sur un système de référence unique et indépendant au niveau international. Ce domaine a un impact conséquent sur de nombreuses applications (navigation par satellite, télécommunications, gestion nationale du temps, sciences de la Terre et de l'espace, services d'horodatage). Les scientifiques expérimentés du BIPM, quand ils représentent les laboratoires nationaux de métrologie et promeuvent le SI, ont une influence significative lors de contacts avec, en particulier, l'ICG, l'IERS, l'IGS, l'UAI, l'UIGG, l'UIT et l'URSI et dans le domaine des systèmes satellitaires de navigation globaux (GNSS) civils.
Pas de programme de laboratoire du BIPM	**Programme de laboratoire du BIPM**	**Programme de laboratoire du BIPM**	**Pas de programme de laboratoire du BIPM**	**Programme de coordination du BIPM** (avec certaines activités de laboratoire)

Annexe 2

ACTIVITÉS NE POUVANT ÊTRE SOUTENUES PAR LE BUDGET PROPOSÉ

Les dépenses d'investissement des deux activités suivantes, qui avaient été intégrées aux versions précédentes du projet de programme de travail soumises aux cycles de consultation, ont été supprimées de leur projet respectif. Les coûts ainsi supprimés sont les suivants :

N	Code du projet	Services fournis et activités	Ressources en : **a)** Mois-personne **b)** Coûts de fonctionnement **c)** Dépenses d'investissement
Étalon de résistance de référence international			
1.	PMD-E2	**E2.1 : Comparaisons sur site d'étalons de résistance de Hall quantifiée** Comparaison directe d'étalons de résistance de Hall quantifiée à l'aide de l'étalon transportable du BIPM avec pour objectif d'obtenir l'incertitude la plus faible possible. *Laboratoires participants : 6-8*	
		Développement d'un nouvel étalon transportable de résistance de Hall quantifiée à base de graphène, pour un fonctionnement simplifié et une réduction des coûts.	a) 0 mois-pers. b) 0 k€ c) 175 k€
Équipement de référence international pour la comparaison d'étalons de gaz à forçage radiatif			
2.	Chem-G3	**Coordination de comparaisons afin de déterminer et d'améliorer l'équivalence internationale des étalons de gaz à forçage radiatif positif.**	
		G3.3: Mise au point d'équipements et de méthodes pour l'étalonnage des mesures optiques des rapports isotopiques du CH_4 et coordination de la comparaison **CCQM-Pxx (2023) des rapports isotopiques du CH_4**, fondée sur un analyseur optique d'isotopes dédié, afin de démontrer le niveau de comparabilité des étalons de mesure des rapports isotopiques du méthane des laboratoires nationaux de métrologie et soutenir les étalonnages des réseaux de mesure de vérification des inventaires et des sources d'émissions. *Laboratoires participants : 12*	a) 0 mois-pers. b) 0 k€ c) 90 k€

BIPM
ΜΕΤΡΩ ΧΡΩ

Bureau International des Poids et Mesures

General Conference on Weights and Measures

26th meeting (13-16 November 2018)

Note on the use of the English text

To make its work more widely accessible the International Committee for Weights and Measures publishes an English version of its reports.

Readers should note that the official record is always that of the French text. This must be used when an authoritative reference is required or when there is doubt about the interpretation of the text.

Table of contents

List of delegates and invitees 11

Proceedings, 13-16 November 2018 **309**

Agenda **310**

First session – 13 November 2018 (morning)

1. Presentation of credentials by delegates **313**
2. Opening of the meeting by the President of the *Académie des Sciences*, President of the 26th meeting of the CGPM **313**
3. Opening address by the representative of the Minister of Economy and Finance of the French Republic **313**
4. Reply by the President of the CIPM **315**
5. Address by the President of the *Académie des Sciences* **316**
6. Nomination of the Secretary of the meeting **318**
7. Establishment of the list of delegates entitled to vote **318**
8. Approval of the agenda **320**
9. Report by the President of the CIPM 'Highlights of work accomplished since the 25th meeting of the CGPM (November 2014 to November 2018)' **321**

   Member States and Associates **321**

   Actions arising from Resolutions taken at the 25th meeting of the CGPM (2014) **323**

   Present Status of the CIPM MRA and the RMOs **328**

   The CIPM and its Consultative Committees **329**

   International liaisons **331**

   Looking to the future **332**

   Conclusions **332**
10. Report by the Director of the BIPM Highlights of achievements at the BIPM **333**
11. The work of the Consultative Committees to increase the impact of the CIPM MRA **336**
12. The impact of the CIPM MRA in the Americas **339**

Second session – 13 November 2018 (afternoon)

13. The importance of measurement for international standards **342**

14. The role of quality infrastructure in economic development **343**

15. The role of accreditation in disseminating metrological traceability **344**

16. On the importance of a reference time scale for metrology **346**

17. Report by the President of the CCTF **347**

    CCTF Executive summary **347**

    Scope of the CC **348**

    Strategy **348**

    Activities and achievements since the last meeting of the CGPM **349**

    Outlook in the short and long term **351**

18. Introduction of the text and voting on Draft Resolution B **352**

19. Report by the President of the CCL **353**

    CCL Executive summary **353**

    Scope of the CC **354**

    Strategy **354**

    Activities and achievements since the last meeting of the CGPM **356**

    Outlook in the short and long term **358**

20. Nomination of members for the Working Group on the BIPM dotation **359**

Third session – 14 November 2018 (morning)

21. Metrology and QI in support of the sustainable development goals **360**

22. Building capacity in metrology: applications to food and feed **361**

23. Partnership in capacity building with the BIPM **363**

24. Supporting the development of metrology in Africa **364**

25. A long-term strategy for the BIPM **366**

26. Introduction of the text for Draft Resolution C and voting **371**

27. Work programme of the BIPM proposed for the years 2020-2023 **371**

28. Proposal for the Dotation of the BIPM for 2020-2023 (Draft Resolution D) **373**

Fourth session – 14 November 2018 (afternoon)

29. Addressing Member States in arrears **377**

30. Introduction of the text and voting on Draft Resolution E **378**

31. The Pension and Provident Fund of the BIPM **380**

Fifth session – 15 November 2018 (morning)

32. Interim report of the Working Group on the BIPM dotation **382**

33. New frontiers for metrology in biology **382**

34. Measuring isotopes accurately for a safer, healthier and sustainable world **385**

35. Traceability in laboratory medicine: a driver of accurate results for patients **387**

36. Report by the President of the CCQM **389**

    CCQM Executive summary **389**

    Scope of the CC **390**

    Strategy **390**

    Activities and achievements since the last meeting of the CGPM **392**

    Outlook in the short and long term **395**

37. Metrology to support innovation in molecular radiotherapy **396**

38. Report by the President of the CCRI **398**

    CCRI Executive summary **398**

    Scope of the CC **399**

    Strategy **399**

    Activities and achievements since the last meeting of the CGPM **400**

    Outlook in the short and long term **403**

Sixth session – 15 November 2018 (afternoon)

39. Standards and measurement science for nuclear test monitoring technologies **405**

40. Report by the President of the CCAUV **407**

    CCAUV Executive summary **407**

    Scope of the CC **407**

    Strategy **408**

    Activities and achievements since the last meeting of the CGPM **408**

    Outlook in the short and long term **410**

41. Developing a common vision for scientific and legal metrology: the OIML perspective **413**

42. Measurement challenges for efficient sustainable lighting technologies **417**

43. Report by the President of the CCPR **420**

CCPR Executive summary **420**

Scope of the CC **420**

Strategy **420**

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM **421**

Outlook in the short and long term **423**

Seventh session – 16 November 2018 (morning)

44. Opening of the session **425**

45. Progress towards a revision of the SI and report from the CCU **426**

CCU Executive summary **427**

Scope of the CCU **428**

Strategy **428**

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM **429**

Outlook in the short and long term **431**

46. Achievements in the measurement of *k* and report from the CCT **431**

CCT Executive summary **432**

Scope of the CCT **432**

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM **432**

Outlook in the short and long term **435**

47. Achievements in the quantum electrical effects and report from the CCEM **436**

CCEM Executive summary **438**

Scope of the CCEM **438**

Strategy **438**

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM **439**

Outlook in the short and long term **441**

48. Achievements in the measurement of *h* and report from the CCM **442**

CCM Executive summary **443**

Scope of the CCM **443**

Strategy **443**

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM **444**

Outlook in the short and long term **445**

Open session

49. The quantum Hall effect and the revised SI **450**

50. The role of the Planck constant in physics **453**

51. Optical atomic clocks – opening new perspectives on the quantum world **457**

52. Measuring with fundamental constants; how the revised SI will work **461**

53. Introduction to Draft Resolution A "On the revision of the International System of Units (SI)" and voting **464**

54. Voting on Draft Resolution A **465**

Eighth session – 16 November 2018 (afternoon)

55. Explanation of the ballot procedure; introduction of the "slate" for the CIPM election and appointment of scrutineers **466**

56. Agreement of final text and voting on Draft Resolution D **467**

57. Election of the CIPM and CEC **468**

58. Other business **469**

59. Closure of the meeting **469**

Resolutions adopted by the General Conference on Weights and Measures at its 26th meeting (2018) 471

On the revision of the International System of Units (SI) **472**

On the definition of time scales **475**

On the objectives of the BIPM **477**

On the dotation of the BIPM for the years 2020 to 2023 **479**

On the financial arrears of Member States and the process of exclusion **480**

Appendix A Convocation of the General Conference on Weights and Measures (26th meeting) **483**

Appendix B Near final – Work Programme of the BIPM for the years 2020-2023 **501**

List of acronyms used in the present volume 551

Proceedings of the 26th meeting

of the General Conference

on Weights and Measures

13-16 November 2018

Agenda

First session – 13 November 2018 (morning)

1. Presentation of credentials by delegates
2. Opening of the meeting by the President of the *Académie des Sciences*, President of the 26th meeting of the CGPM
3. Opening address by the representative of the Minister of Economy and Finance of the French Republic
4. Reply by the President of the CIPM
5. Address by the President of the *Académie des Sciences*
6. Nomination of the Secretary of the meeting
7. Establishment of the list of delegates entitled to vote
8. Approval of the agenda
9. Report by the President of the CIPM 'Highlights of work accomplished since the 25th meeting of the CGPM (November 2014 to November 2018)'
10. Report by the Director of the BIPM Highlights of achievements at the BIPM
11. The work of the Consultative Committees to increase the impact of the CIPM MRA
12. The impact of the CIPM MRA in the Americas

Second session – 13 November 2018 (afternoon)

13. The importance of measurement for international standards *(S. Mujica, ISO)*
14. The role of quality infrastructure in economic development *(A. Mikhnev, World Bank)*
15. The role of accreditation in disseminating metrological traceability *(M. Malmqvist Nilsson, ILAC)*
16. On the importance of a reference time scale for metrology *(N. Dimarcq, CNRS)*
17. Report by the President of the CCTF
18. Introduction of the text and voting on Draft Resolution B
19. Report by the President of the CCL
20. Nomination of members for the Working Group on the BIPM dotation

Third session – 14 November 2018 (morning)

21. Metrology and QI in support of the sustainable development goals *(B. Calzadilla Sarmiento, UNIDO)*
22. Building capacity in metrology: applications to food and feed *(X. Fang, NIM – China)*
23. Partnership in capacity building with the BIPM *(M. Cetintas, Tübitak Ume – Turkey)*
24. Supporting the development of metrology in Africa *(D. Moturi, AFRIMETS)*
25. A long-term strategy for the BIPM
26. Introduction of the text for Draft Resolution C and voting
27. Work programme of the BIPM proposed for the years 2020-2023
28. Proposal for the Dotation of the BIPM for 2020-2023 (Draft Resolution D)

Fourth session – 14 November 2018 (afternoon)

29. Addressing Member States in arrears
30. Introduction of the text and voting on Draft Resolution E
31. The Pension and Provident Fund of the BIPM

Fifth session – 15 November 2018 (morning)

32. Interim report of the Working Group on the BIPM dotation
33. New frontiers for metrology in biology *(M. Salit, NIST – USA)*
34. Measuring isotopes accurately for a safer, healthier and sustainable world *(M. Gröning, IAEA)*
35. Traceability in laboratory medicine: a driver of accurate results for patients *(G. Beastall, IFCC)*
36. Report by the President of the CCQM
37. Metrology to support innovation in molecular radiotherapy *(G. Flux, Royal Marsden Hospital and Institute of Cancer Research)*
38. Report by the President of the CCRI

Sixth session – 15 November 2018 (afternoon)

39. Standards and measurement science for nuclear test monitoring technologies *(J. Marty, CTBTO)*
40. Report by the President of the CCAUV
41. Developing a common vision for scientific and legal metrology: the OIML perspective *(R. Schwartz, CIML)*
42. Measurement challenges for efficient sustainable lighting technologies *(Y. Ohno, CIE)*
43. Report by the President of the CCPR

Seventh session – 16 November 2018 (morning)

44. Opening of the session
45. Progress towards a revision of the SI and report from the CCU
46. Achievements in the measurement of *k* and report from the CCT
47. Achievements in the quantum electrical effects and report from the CCEM
48. Achievements in the measurement of *h* and report from the CCM

Open session

49. The quantum Hall effect and the revised SI *(K. von Klitzing)*
50. The role of the Planck constant in physics *(J.-P. Uzan)*
51. Optical atomic clocks – opening new perspectives on the quantum world *(J. Ye)*
52. Measuring with fundamental constants; how the revised SI will work *(W. Phillips)*
53. Introduction to Draft Resolution A "On the revision of the International System of Units (SI)" and voting
54. Voting on Draft Resolution A

Eighth session – 16 November 2018 (afternoon)

55. Explanation of the ballot procedure; introduction of the "slate" for the CIPM election and appointment of scrutineers
56. Agreement of final text and voting on Draft Resolution D
57. Election of the CIPM and CEC
58. Other business
59. Closure of the meeting

First session – 13 November 2018

1. Presentation of credentials by delegates

As required by the Convocation to the 26th meeting (2018) of the General Conference on Weights and Measures (hereinafter CGPM or General Conference), delegates were required to present the due credentials from their Governments or authorities.

2. Opening of the meeting by the President of the *Académie des Sciences*, President of the 26th meeting of the CGPM

The first session of the 26th meeting of the CGPM on 13 November 2018 was opened by Prof. Sébastien Candel, President of the *Académie des sciences de Paris* and President of the CGPM for its 26th meeting. He underlined the significant impact that this Conference will have on the development of metrology world-wide.

The opening was followed by a declaration, given on behalf of His Excellency the Minister of Economy and Finance of the French Republic, by Mr Courbe, director general, Directorate General for Entreprise.

3. Opening address by the representative of the Minister of Economy and Finance of the French Republic

Mr Courbe, director general, Directorate General for Entreprise, delivered the following:

> "Mr President of the *Académie des Sciences*, Mr President of the International Committee for Weights and Measures, Mr Director of the International Bureau of Weights and Measures, Ladies and Gentlemen, Delegates, Ladies and Gentlemen,
>
> On behalf of Mr Bruno Lemaire, Minister of Economy and Finance, and in the name of the Government of the French Republic, I have the great honour and pleasure to welcome you to Versailles for the opening of the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) which will be marked by the historic revision of the International System of Units (SI).
>
> Indeed, this 26th meeting will give you the opportunity to vote on the adoption of a resolution to redefine four of the seven base units of the International System of Units. This revision will put an end to the use of physical references to define the system of units.
>
> France has had the privilege, since 1875, to be the depositary of the Metre Convention that was signed in Paris by seventeen States in order to establish a world authority in the field of metrology, i.e. the International Bureau of Weights and Measures, leading to the creation of the decimal metric system. This Convention, which founded one of the oldest international organizations, is today ratified by 60 Member States and 42 Associate States. This meeting today shows the vigour of this organization.

Today even more than yesterday, metrology is an unavoidable and essential factor of a dynamic and modern industrial policy. As you know, metrology fosters the production of objective comparative elements shared by all the actors of a value chain, from research and development to consumers, through to producers or evaluators.

Aware of the importance of this issue for any economic policy, and in particular for any industrial policy, the Ministry of Economy and Finance develops actions to support, nationally and internationally, the transfer of technology from fundamental metrology to industry.

Internationally, collaboration of all involved States is essential to maintain common metrological concepts of excellence and the essential role played by the International Bureau of Weights and Measures is to be recognized; the Conference, which brings us together this week will show the quality and excellence of the work carried out over the past few years in metrology.

We actively support fundamental research which is the base of this discipline and I acknowledge the work carried out at the LNE, the French National Metrology Institute, that conducts research, with the support of the Ministry, on the determination of the Boltzmann and Planck constants in order to redefine the temperature and mass units, the redefinition of units being the purpose of this Conference. We also try beyond more conventional subjects to develop fundamental research in areas where measurement science was probably not sufficiently intense, for example in areas such as the environment, biomedicine or research on artificial intelligence. We believe that metrology should resolutely explore these areas to prepare for the future.

With the disciplines I have just mentioned and with many others, we have entered an era where innovations are proceeding at a pace never met before and this is undoubtedly what distinguishes the economical time, and in particular the industrial time, in which we currently live.

Industry, research, economy and society require even more precise measurements every day in support of the innovations they expect, but also require ever larger measurement ranges and research has to develop in extreme measurement conditions (very-high temperature, cryogenics, the very small, the space field, digital technology, etc.). The most classical example, but the most explicit one, is the second which is measured today with an accuracy better than 10^{-16}; the work of laboratories on new optical clocks should allow measurements to be one hundred times more accurate (i.e. about 10^{-18}) and, for geolocation, would allow us to improve the accuracy from the metre to the centimetre. It is clear, and media have well captured it, the major impact of such a metrological development on the way to build large facilities, to improve the prediction of earth movements, particularly for earthquakes and volcanic activity, or to explore the universe. Among less widely known applications, the development of metrology in the health area will lead, thanks to more accurate blood tests, to an earlier detection of degenerative diseases, such as Alzheimer's disease, or neglected diseases, or will allow us to quickly know the consequences of exposure to endocrine disruptors.

These few examples clearly illustrate the impact of metrology in our daily life, in the life of our citizens and this impact is also obvious on our industrial competitiveness and on the safety of our society.

The system of units should be reliable, accessible and universal. For two centuries, the universality, but also the stability of the established measurement system, was essential to ensure the efficient and sustainable dissemination of measurements. In the last decades, measurements have seen some changes with the discoveries of general relativity, lasers and quantum optics that made it possible to redefine the candela in 1954, the second in 1967 and the

metre in 1983. These are the first units that were completely "dematerialized" over a few decades.

Today, the challenge and the historic milestone that this Conference is facing is to change the four units of the international system that remained unchanged: the ampere, the kelvin, the mole and the kilogram.

The mass unit is still "materialized" by the mass of the international prototype of the kilogram (IPK) made of platinum-iridium, the "grand *K*", carefully kept at the International Bureau of Weights and Measures at the Pavillon de Breteuil in Sèvres. This link to a material artefact makes comparisons difficult and creates a weakness that could affect the IPK sustainability. Intellectually and practically, it was not satisfactory to have trust in the system built on a single and non-reproducible artefact.

This is why the adoption of new definitions for these four units that were physically "materialized" and that will now be based on fundamental constants of physics or physical properties of substance will be an essential step. Therefore, "dematerialization" of all base units of the international system will ensure the long-term stability of the units, guarantee the independence of measurements from external influences and thus allow us to explore new concepts in physics and chemistry.

This historic development of the International System of Units that you are going to implement also proves the capacity of the international scientific community to permanently adapt fundamental metrological references to the needs of industry and society, taking into account the scientific and technical discoveries as much as possible and integrating new technologies such as those linked to the development of micro- and nano-electronics that are very disruptive technologies for the whole economy.

With these few words, I would like to underline the importance that the French government attaches to the Conference that opened today and to the historic milestone you are going to decide during the fruitful and intense work of this week

I thank you and wish you all an excellent 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures."

4. Reply by the President of the CIPM

Dr Inglis, President of the International Committee for Weights and Measures (hereinafter CIPM) thanked Mr Courbe for giving the presentation on behalf of the Minister and commented that it was a far-reaching presentation that highlights the importance of the work carried out in terms of metrology and, in particular, in terms of international metrology. Health sciences, the environment and emerging technologies, as well as a range of other activities, are impacted by the work carried out by the metrology community and the decisions that will be taken by the CGPM at its 26th meeting. He said that a great debt is owed to France; from the very beginning of this journey with the International System of Measurement it has been France that has been at the forefront, starting with the metric system, the Metre Convention and the depository of the metric prototypes. More than this, the home of metrology is just outside Paris and the encouragement and recognition on behalf of the Minister and French government recalls the important role France has played in this journey. He added that there is still a long way to go but the decision on the redefinition of the SI units that the CGPM is

expected to make will be historic and the metrology community will celebrate it. He thanked Mr Courbe once again for the presentation and the Minister for his wise words and said that the BIPM looks forward to taking them on board.

5. Address by the President of the *Académie des Sciences*

Prof. Sébastien Candel, President of the *Académie des sciences* de Paris and President of the CGPM for its 26th meeting gave the following speech.

> "Mr Director General, Mr President of the CIPM, Mr Director of the BIPM, Distinguished Delegates, Dear Colleagues, Ladies and Gentlemen.
>
> It is an honour to speak at this session as President of the *Académie des Sciences*. It is a privilege and also a pleasure for me to welcome you today to Versailles for this 26th General Conference on Weights and Measures, a particularly important conference in the history of metrology. I am pleased to see so many countries represented by their delegations, which I sincerely thank for their participation.
>
> This conference has been prepared with care and efficiency by the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), an intergovernmental organization created by the Metre Convention. The main mission of the BIPM is to ensure and promote comparability and global harmonization of measures, notably by providing a coherent International System of Units.
>
> Four years ago, in the introduction to the 25th General Conference, the President of the Academy of Sciences at that time, Philippe Taquet, retraced the evolution of the system of units and showed with great elegance how one had gone from an abundant collection of disparate units, which can usually be characterized as baroque, to a homogeneous and rational system. I will refrain from retracing this path - details of which can be found in the proceedings of the 25th conference.
>
> I note, however, that the evolution towards the international system originates from the reforming, universalist and unifying thrust of the French Revolution. It was then necessary to leave the clutter of the units. In its meeting of 1 August 1793, the National Assembly declares that it is satisfied with the work already done by the Academy, on the system of weights and measures; let it adopt the results to establish a system throughout the Republic to offer it to all nations. The work of the *Académie des sciences* is recognized by the Assembly and it is this work that founds the new system of units. As part of the reception of tonight at the Académie I will briefly sketch the birth of the metre using documents kept in its archives.
>
> It was the Metre Convention, eighty-two years later, in 1875, which gave birth to the International Bureau of Weights and Measures, a permanent scientific institution created by the 17 signatory nations. The corresponding decree dates from 1876.
>
> The choice of the BIPM headquarters in Paris focused on the Pavillon de Breteuil in the Parc de Saint Cloud where it is still today and which some of you have visited yesterday afternoon.
>
> The BIPM operates under the direction and supervision of the International Committee for Weights and Measures (CIPM), whose president is at my side, working under the authority of the General Conference on Weights and Measures (CGPM). This conference periodically brings together delegates from all contracting governments. The Convention stipulates in its article 4 that the presidency of the General Conference on Weights and Measures is attributed to the

current President of the Academy of Sciences and that is what justifies my intervention and honours me.

Four years ago, in the framework of the 25th general conference, Philippe Taquet, former president of the Academy, indicated that he was in no way a specialist in metrology and that the only unit for him, as a palaeontologist, expert in evolution and connoisseur of dinosaurs, was the unit of time which in his field was typically of the order of a million years (a little more than 31 teraseconds).

Not being a specialist in metrology, I followed an accelerated training programme by participating this year in meetings of the Science and Metrology Committee of the *Académie des sciences*, chaired by Christian Bordé and wish to thank him and the members of his committee for their assistance.

In this context we have implemented several actions, including a special issue of the *Comptes Rendus de l'Académie des sciences* devoted to metrology, a session on 4 December 2018 on the new International System of Units (that will be transmitted in streaming on the internet), and a science history session on the same day, in the evening, open to the general public, dealing with changes of units.

As a user of the International System in the fields of physics, aeronautical and space sciences, combustion, energy and propulsion, I appreciate the internal coherence of the International System of Units.

There is one unit that intrigues me, however, the one that bears a name surprisingly close to mine, the candela. You may have noticed this surprising resemblance. To one letter, my name would have been that of a fundamental unit! I must admit, however, that I never used the candela in my scientific work. This unit of luminous intensity, defined in Watt per steradian, is mainly useful in the field of photometry.

The International System has acquired remarkable internal coherence and brought the necessary simplification in the implementation of the great results of science and in the technical calculations of the field of engineering. And yet there was still a lot of confusion. Thus in the 1960s, shortly after the definition of the SI, the « kilogram force » had not completely disappeared from the French technical literature. It was happily replaced by the newton or rather the decanewton.

The evolution that will be achieved during this conference may be surprising. It is however a logical continuation of those successively accomplished. It is a question of reformulating the system starting from the fundamental constants of physics by replacing the last physical standard, that of the kilogram, by a definition based on Planck's constant. The ideas that lead to this change are old but it is only within the framework of this 26th meeting of the CGPM that this transition will be carried out. From this point of view, this conference will be a major event for global metrology.

In four days, on November 16, you will vote for a radical transformation of the International System that serves as the basis for science and global economic exchange. By this action you will set up a measurement system that will rely entirely on the fundamental constants of nature. The benefits of this choice can only favour new technologies.

However, a pedagogical effort will have to be made to enable everyone to fully understand this connection with and benefit from the foundations that unify the new metrology.

One of the characteristics of this conference is to bring nations together around a common scientific subject, demonstrating one more time, and this is worth underlining, that science brings people together and promotes unity. On behalf of the *Académie des sciences*, I wish you an excellent 26th General Conference, many interactions, exchanges and dialogues."

6. Nomination of the Secretary of the meeting

The President proposed Dr McLaren, Secretary of the CIPM, as Secretary of the meeting. Dr McLaren was elected with no objections.

7. Establishment of the list of delegates entitled to vote

Dr McLaren, in his capacity as Secretary of the meeting, welcomed the delegates of Member States to the 26th meeting of the CGPM. Having examined the credentials of the Delegates, Dr McLaren proceeded to establish a list of those Delegates entitled to vote on behalf of their State, asking the head of each delegation to respond indicating the presence of the delegation. The list, (in French alphabetical order), was as follows:

Member State	Head of delegation
South Africa	T. Demana
Germany	S. Schnorr
Saudi Arabia	S. Al-Kasabi
Argentina	H. Laiz
Australia	B. Warrington
Austria	G. Freistetter
Belgium	H. Pirée
Brazil	C.A. De Azevedo
Bulgaria	P. Ilchev
Canada	A. Steele
Chile	C. Ortiz
China	Y. Qin
Colombia	E.A. Cristancho Pinilla
Croatia	D. Zvizdic
Denmark	M. Kjær
Egypt	M.A.M. Amer
United Arab Emirates	A.A.Q. Al Maeeni
Spain	J.M. Bernabé

United States of America	W. Copan
Russian Federation	D.V.Golubev
Finland	M. Heinonen
France	C. Lagauterie
Hungary	Z. Nagyné Szilágyi
India	S.A.K. Srivastava
Indonesia	K. Achmad
Ireland	M. Buckley
Israel	N. Goldovsky
Italy	M. Fiorentino
Japan	T. Usuda
Kazakhstan	T. Tokanov
Kenya	H.K. Rotich
Lithuania	R. Vaitkus
Malaysia	O. Zakaria
Mexico	L.N. Lizardi Nieto
Montenegro	V. Asanovic
Norway	G. Samuelsen
New Zealand	F. Francois
Netherlands	W. de Waal
Poland	M. Dobieszewski
Portugal	I. Godinho
Republic of Korea	S.-R. Park
Islamic Republic of Iran	K. Madanipour
Czech Republic	V. Pokorny
Romania	M. Buzoianu
United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland	P.S. Hadley
Singapore	T. Liew
Slovakia	Z. Schreier
Slovenia	S. Kopac
Sweden	M. Groth
Switzerland	P. Richard
Thailand	A. Charoensook

Tunisia	L. Khedir
Turkey	N. Camuşcu
Ukraine	I. Brovchenko
Uruguay	D. Volpe

Of the 60 Member States, 55 were represented and the majority was therefore 28.

Dr McLaren welcomed the representatives of 19 of the 42 Associates of the CGPM who were (in French alphabetical order): Azerbaijan, Belarus, Bosnia and Herzegovina, Ecuador, Ethiopia, Georgia, Ghana, Hong Kong (China), Kuwait, Luxembourg, North Macedonia, Uzbekistan, Panama, Peru, Moldova, Sudan, Chinese Taipei, Tanzania and Zimbabwe.

He also welcomed representatives from the:

- International Astronomical Union (IAU)
- International Atomic Energy Agency (IAEA)
- International Commission on Illumination (CIE)
- International Electrotechnical Commission (IEC)
- International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)
- International Organization for Standardization (ISO)
- International Organization of Legal Metrology (OIML)
- International Telecommunication Union (ITU)
- International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)
- International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP)
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)
- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)

8. Approval of the agenda

The President of the meeting asked the Delegates if they had any comments on the agenda. There were no comments and the agenda was approved by a show of hands.

9. Report by the President of the CIPM 'Highlights of work accomplished since the 25th meeting of the CGPM (November 2014 to November 2018)'

Dr Inglis, President of the CIPM, presented his report.

In accordance with the Metre Convention it is my pleasure to report on the work accomplished since the 25th meeting of the CGPM held in 2014. Progress reports have been given at meetings of Government Representatives and Directors of National Metrology Institutes, which were held at the BIPM on 13 and 14 October 2015, 24 and 25 October 2016 and 18 and 19 October 2017. It is not my intention to go into detail in this report but rather to highlight the main actions and achievements. More detailed reports will be presented by the Director of the BIPM, Presidents of the Consultative Committees, and Chairs of the various CIPM Sub-Committees.

Member States and Associates

I commence by welcoming delegations from new Member States and new Associates of the CGPM. Since the 25th meeting of the CGPM, five States have acceded to the Metre Convention and six new Associates have joined. A seventh re-joined after a brief absence. There are currently 60 States Parties to the Metre Convention and 42 Associates of the CGPM.

New Member States (and date of accession):

- United Arab Emirates (27 April 2015)

Member States that acceded to the Metre Convention from Associate status:

- Lithuania (16 April 2015)
- Slovenia (23 March 2016)
- Montenegro (24 January 2018)
- Ukraine (7 August 2018)

New Associates of the CGPM (and date of association):

- Azerbaijan (1 January 2015)
- Qatar (10 March 2016)
- Sri Lanka (re-joined 17 August 2016)
- Ethiopia (1 January 2018)
- United Republic of Tanzania (1 January 2018)
- Kuwait (23 March 2018)
- Uzbekistan (13 July 2018)

Excluded Member States:

- Dominican Republic (1 January 2015)

Excluded Associates:

- Yemen (1 January 2018)

Associate States encouraged to accede to the Metre Convention

In accordance with Resolution 4 of the 24th meeting of the CGPM (2011) there are currently ten Associate States that have met the criteria and have been encouraged to accede to the Metre Convention. They are on the so-called escalator mechanism. It will be recalled that once formally encouraged to accede, Associate States that do not accede have their subscriptions increased in steps over a period of 5 years until they pay as a subscription 90 % of the amount they would pay as a Member State. Overall this approach has worked well, with a number of accessions surely attributable to this mechanism.

Associates with a UN coefficient of < 0.02 %

In implementing the practice of escalating subscriptions for Associates to encourage them to accede to the Metre Convention, the CIPM has been concerned that a number of the Associate States with the very smallest economies were likely to either withdraw or be excluded. Furthermore it was felt that the criteria for commencing the escalation could discourage States at the lower end of the UN scale who wished to participate in the future. Accordingly, in 2017, the CIPM decided (Decision CIPM/106-20) that when considering whether it is appropriate for an Associate State of the CGPM to be encouraged to accede to the Metre Convention and hence become a Member State, it will take into account whether it has:

- been an Associate State of the CGPM for at least 5 years;
- a National Metrology Institute (NMI) that has signed the CIPM MRA;
- published comparison results in the key comparison database (KCDB);
- one or more Calibration and Measurement Capability (CMC) listed in the KCDB; and
- a contribution level higher than 0.02 percent on the “Scale of assessments for the apportionment of the expenses of the United Nations”.

This decision amended the criteria previously adopted by the addition of the final bullet point, effectively exempting the smallest States from the escalator. The 0.02 percent UN point relates to those Associate States with scale weightings less than approximately one fifth of the minimum set for Associate States and one twenty-fifth of that set as a minimum for Member States.

In taking this decision the CIPM was mindful that six States with a coefficient of less than 0.02 percent were already on the escalator, with a further three about to start, with Associate States on the escalator already in arrears and with one facing exclusion at the end of 2017. The CIPM took two further decisions (CIPM/106-21 and CIPM/106-22) to address these situations:

Decision CIPM/106-21 *The CIPM decided that an Associate State of the CGPM that does not meet the criteria set in Decision CIPM/106-20 and that has already been encouraged to accede to the Metre Convention, and as a result is paying an increased subscription, shall have its subscription reduced to the minimum for an Associate State. The reduction will come into force in 2018 and will not be retroactive.*

Decision CIPM/106-22 *The CIPM asked the BIPM to work with any Associate State included in Decision CIPM/106-21 and that is in arrears in order to establish a rescheduling agreement.*

Following implementation of the CIPM Decisions the current status of Associate States encouraged to accede and paying enhanced subscriptions is as follows[1]:

Associate State	Date criteria were met	Period of increasing subscription	
		Start	90 % MS
Belarus	in 2011	2013	2017
Costa Rica	in 2011	2013	2017
Cuba	in 2011	2013	2017
Ecuador	in 2011	2013	2017
Latvia	in 2011	2013	2017
Panama	in 2011	2013	2017
Viet Nam	in 2011	2013	2017
Estonia	May 2014	2016	2020
Peru	May 2014	2016	2020
Republic of Philippines	December 2013	2016	2020

The effect on the dotation calculation and BIPM budget:

At the time the Convocation for the 26th meeting of the CGPM was published (February 2018), four new States had acceded and become Member States since the 25th meeting of the CGPM, resulting in an uplift in the 2020-2023 dotation of an additional 254 k€ per annum.

Since the publication of the Convocation there has been one additional accession of a Member State (Ukraine in August 2018), which further uplifts the dotation. However, as this increase is approximately offset by downwards adjustment of the dotation from the expected exclusion of Venezuela, it is not proposed to amend the draft Resolution D figures as a consequence of these two post-Convocation changes.

It should be noted that four of the five acceding States were previously Associate States of the CGPM, so whilst the dotation is uplifted by approximately 254 k€ per annum, in terms of the overall budget, this is offset by a reduction of approximately 187 k€ per annum from the loss of subscriptions that these four States would have paid had they remained Associate States.

If we consider the income from the new Member States and Associate States, and take account of the exclusion of Yemen as an Associate State in January 2018 and expected exclusion of Venezuela, together with the new approach for the very ‘small’ Associate States, the BIPM has seen a reduction in its overall income compared with that which was planned and presented to the 25th meeting of the CGPM in 2014.

Actions arising from Resolutions taken at the 25th meeting of the CGPM (2014)

Resolution 1 (2014): On the future revision of the International System of Units, the SI

Conditions set by the 24th meeting of the CGPM (2011) before such a revised SI could be adopted, and which were confirmed at the 25th meeting of the CGPM (2014), have now been met.

The CIPM (Decision CIPM/106-11) authorized the CIPM President to convey its support for the publication of the final numerical values for the defining constants to the Task Group for

[1] Pursuant to Resolution 4 of the 24th meeting of the CGPM the progressive and irreversible increase in the amount of annual subscription will be applicable starting on the 1 January of the second year following the CIPM decision to encourage an Associate State to become a State Party to the Metre Convention.

Fundamental Constants convened by CODATA.

A draft resolution for the 26th meeting of the CGPM on the redefinition of four of the SI base units has been submitted, proposing revisions of the SI, to be effective from 20 May 2019.

A draft 9th edition of the Brochure entitled "The International System of Units" as well as an update of the *mises en pratique* were approved by the CIPM at its 106th meeting in October 2017, reviewed at its 107th meeting in June 2018 and finally approved in October 2018. This work item will be addressed in full in the CCU President's report.

SI promotion

The CIPM (Decision CIPM/104-10) recognized the need to commence an awareness campaign and, through the CCU, established an SI Promotion Task Group under the Chairmanship of Prof. Ullrich and including public relations experts from KRISS, LNE, NIST, NMIJ, NPL and PTB. Membership of the Task Group was limited to selected NMIs and CCs but observers from ILAC, ISO, OIML, IEC and CIE were also welcomed. A further five NMIs (CENAM, INMETRO, NIM, NMISA, VNIIM) have since joined the Task Group.

Consultative Committees (Decision CIPM/105-25) prepared a joint statement for all stakeholders addressing the changes to be expected under the revised SI.

Resolution 2 (2014): On the election of the International Committee for Weights and Measures

Election of CIPM Members

In accordance with Resolution 2 of the 25th meeting of the CGPM (2014), all positions on the CIPM were declared vacant at the time of the 25th meeting of the CGPM and an election was held to fill all 18 CIPM positions. Elected Members subsequently met and elected a bureau comprising a President, Secretary and two Vice-Presidents. Since that time, there have been three resignations from the CIPM and subsequently three new members were provisionally elected in December 2016:

- Dr H. Laiz (Argentina)
- Dr M.L. Rastello (Italy)
- Dr M. Sené (United Kingdom)

The current CIPM Membership is as follows:

	Initial Election	Last Elected
President		
Dr B. Inglis (Australia)	7 August 2000	2014
Secretary		
Dr J. McLaren (Canada)	6 March 2006	2014
Vice-Presidents		
Dr W.E. May (USA)	9 June 2008	2014
Prof. J. Ullrich (Germany)	15 May 2013	2014
Other CIPM members		
Dr F. Bulygin (Russian Federation)		2014
Dr M. Buzoianu (Romania)		2014
Dr I. Castelazo (Mexico)		2014
Dr Y. Duan (P.R. China)	8 March 2010	2014
Mr L. Érard (France)	13 September 2004	2014
Dr D.-I. Kang (Republic of Korea)	12 December 2013	2014
Dr H. Laiz (Argentina)		7 December 2016
Dr T. Liew (Singapore)		2014
Dr W. Louw (South Africa)	15 May 2013	2014
Dr M.L. Rastello (Italy)		7 December 2016
Dr P. Richard (Switzerland)		2014
Dr G. Rietveld (Netherlands)		2014
Dr M. Sené (UK)		7 December 2016
Dr T. Usuda (Japan)	1 July 2012	2014

In recognition of outstanding contributions to the work of CIPM over many years, the CIPM appointed Dr R. Kaarls (Decision CIPM/104-12, March 2015) as an honorary member of the CIPM.

CIPM Sub-Committees and ad hoc Groups

In keeping with the desire of the CIPM to maximize its effectiveness and to use expertise within its membership, the CIPM (Decision CIPM/104-21) allocated responsibilities to all CIPM members to serve on CIPM Sub-Committees and *ad hoc* Working Groups. The current membership is:

CIPM Sub-Committee for Strategy
Chairperson: Dr M.J.T. Milton
Members: Dr B.D. Inglis, Dr T. Liew, Dr W.E. May, Dr J.W. McLaren, Dr M.L. Rastello, Dr G. Rietveld, Prof. J. Ullrich

CIPM Sub-Committee on Finance
Chairperson: Dr M. Sené
Members: Dr Y. Duan, Dr W. Louw, Dr J.W. McLaren, Dr M.J.T. Milton [BIPM Director], Dr P. Richard

CIPM Pension Fund Advisory Board (PFAB)
Chairperson: Mr L. Érard
Members: Dr T. Usuda [CIPM Member], Mr T. Grenon [Expert], Dr M.J.T. Milton [BIPM Director], Dr C. Michotte [Staff representative], Dr G. Petit [Staff representative], Dr S. Solve [Staff representative], Dr T. Witt [Pensioner representative] Mr F. Rojas Ceballos [BIPM staff in support], Mrs C. Fellag Ariouet [BIPM staff in support]

CIPM *ad hoc* Working Group on Conditions of Employment
Chairperson: Dr J.W. McLaren
Members: Dr M. Buzoianu, Dr I. Castelazo, Mr L. Érard, Dr M.J.T. Milton [BIPM Director], Dr R.I. Wielgosz [Staff representative], Executive Secretary: M. F. Rojas Ceballos [BIPM Legal Advisor]

CIPM *ad hoc* Working Group on the Reproducibility of Research Data and Related Topics
Chairperson: Dr T. Liew
Members: Dr F. Bulygin, Dr I. Castelazo, Dr H. Laiz, Dr M.L. Rastello, Dr M. Sené, Dr M.J.T. Milton [BIPM Director]

CIPM Sub-Committee on Awards
Chairperson: Dr F. Bulygin
Members: Dr T. Liew, Dr D.-I. Kang

CIPM Task Group for Promotion of the SI
Chairperson: Prof. J. Ullrich
Secretary: Dr E. de Mirandés (CCU Executive Secretary)
Members: BIPM, CENAM, INMETRO, KRISS, LNE, NIM, NIST, NMIJ/AIST, NMISA, NPL, PTB, VNIIM, CCEM, CCM, CCQM, CCT, CCU
Observers: ILAC, ISO, OIML, IEC, CIE
PR Expert Group: Ms F. Auty (NPL) [rapporteur], Dr V. Morazzani (LNE), Ms G. Porter (NIST), Dr J. Simon (PTB)

The CIPM appointed and reappointed the Presidents of the Consultative Committees for 4-year terms, the current appointments are as follows:

- Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration (CCAUV): Dr T. Usuda
- Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM): Dr G. Rietveld
- Consultative Committee for Length (CCL): Dr I. Castelazo
- Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM): Dr P. Richard
- Consultative Committee for Photometry and Radiometry (CCPR): Dr M.L. Rastello
- Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (CCQM): Dr W.E. May
- Consultative Committee for Ionizing Radiation (CCRI): Dr W. Louw
- Consultative Committee for Thermometry (CCT): Dr Y. Duan
- Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF): Mr L. Érard
- Consultative Committee for Units (CCU): Prof. J. Ullrich

Amendment to the CIPM Member Election Document

On the basis of the experience gained in the first CIPM Election using the new procedure, the CIPM adopted a number of minor amendments to the document "Criteria and Process for Election of CIPM Members" (September 2014) and asked Dr May as Chair of the former CIPM *ad hoc* Working Group on Membership to propose some clarification of the text in "Step 5: Seating of a newly elected CIPM". The revised document appears on the BIPM website.

Sad news

It is with great sadness that I note the passing of two of our former CIPM Presidents in 2018: Prof. Dieter Kind and Prof. Jean Kovalevsky. Both of these former colleagues provided outstanding leadership for the CIPM and BIPM and their passing is a great loss. Their many contributions to international metrology will long be remembered.

Resolution 3 (2014): On the Pension and Provident Fund of the BIPM

A CIPM Pension Fund Advisory Board (PFAB) was established on 16 October 2015 to supersede the former CIPM Sub-Committee on the BIPM Pension and Provident Fund and Health Insurance. The newly constituted PFAB includes representation from staff, representation from pensioners plus an external expert. The newly constituted Advisory Board aims to provide improved governance, transparency and effectiveness.

With advice from the PFAB and CIPM, the BIPM implemented a plan to provide sustainability for the BIPM Pension and Provident Fund. New contribution and benefit schedules came into effect on 1 January 2017.

Details of actions taken to stabilize the BIPM Pension and Provident Fund and to ensure its long-term viability will be addressed in the report to be presented by the Chair of the PFAB, Mr Érard.

Resolution 4 (2014): Dotation of the BIPM for the years 2016 to 2019

The CIPM has overseen the BIPM's budgets and financial performance with successive Audit Reports for the years 2015-2018 containing no qualifications. The BIPM has remained within budget and significant steps have been taken to address future financial challenges associated particularly with the BIPM Pension and Provident Fund. This reflects, in no small way, on the competence and hard work of the BIPM Director and his staff. Further details will be provided by the BIPM Director and Dr Sené, the Chair of the CIPM Sub-Committee on Finance.

Resolution 5 (2014): On the importance of the CIPM Mutual Recognition Arrangement

In response to the resolution a CIPM MRA Review Workshop was convened on 13–14 October 2015. Workshop attendees included NMI Directors, representatives of Member States, representatives of Regional Metrology Organizations (RMOs) and other relevant stakeholders. The Workshop identified a number of issues considered critical and appointed a Working Group on the Implementation and Operation of the CIPM MRA (finally 19 + three invitees) to be Chaired by the CIPM President. Following preliminary discussions, the Working Group met formally at the BIPM on 14–15 March 2016. A report was prepared and sent to NMI Directors for comment on 2 June 2016. The final report made 28 recommendations and sub-recommendations and was presented to and accepted by a meeting of Government Representatives and Directors in October 2016. To ensure effective action and implementation of the Recommendations the CIPM proposed the establishment of a CIPM *ad hoc* Working Group on Implementing the Recommendations from the Review of the CIPM MRA, to be chaired by the CIPM President, to oversee the implementation of the recommendations. The meeting supported the proposal.

The *ad hoc* WG identified specific actions for the BIPM, Consultative Committees, the Joint Committee of Regional Metrology Organizations and the BIPM (JCRB), Regional Metrology Organizations (RMOs) and NMIs and presented these actions at meetings of the JCRB and CC Presidents in March and June 2017 respectively. It also reported on progress to a meeting of Government Representatives and NMI Directors in October 2017. Progress on implementation of the recommendations was monitored and reported to the JCRB and a joint meeting of CC Presidents and RMOs in March and June 2018 respectively. Substantial progress on the implementation of the recommendations had been achieved to the point where, in June 2018, the CIPM took the decision to close the *ad hoc* WG on the grounds that its objectives had been achieved.

Present Status of the CIPM MRA and the RMOs

The CIPM MRA is highly valued by Member States and continues to be a major responsibility for the BIPM. Currently a total of 260 institutes participate in the CIPM MRA. These comprise 100 National Metrology Institutes, plus a further 156 Designated Institutes, from 59 Member States and 41 Associates, along with four International Organizations: European Space Agency (ESA), International Atomic Energy Agency (IAEA), Joint Research Centre (JRC) and the World Meteorological Organization (WMO).

Maintenance of the KCDB database is an ongoing workload for the BIPM with a total of 260 institutes participating in the CIPM MRA and more than 25 000 CMC entries and 1600 comparisons in the KCDB database.

Key comparison database (KCDB) 2.0

A key action on the BIPM staff following the CIPM MRA Review was to upgrade the KCDB to increase its effectiveness and the efficiency of data entry handling and transfer. This is probably the most important action to come out of the review and is not a trivial task, requiring the development of a whole new database (referred to as KCDB 2.0). Contractors have been engaged and significant progress has been made on its development. Special features of the new database include the following:

- NMI/DI draft CMCs will go directly onto the platform and communicate to the RMO TC-CHAIR for review;
- intra-RMO CMC review will be integrated into the platform;
- review process and publication database will be combined;
- improved user experience; and
- no manual transfer of data for review/publication.

The new database is expected to be completed and in full operation by late 2019.

GULFMET

The new Regional Metrology Organization (Gulf Association for Metrology - GULFMET) is making good progress following the decision at the 104th CIPM meeting (Decision CIPM/104-38) to grant it provisional recognition as an RMO within the meaning of the CIPM MRA. Its main challenge remains the limited capability in the region.

Communication between JCRB, RMOs, CCs and CIPM

One issue identified by the CIPM MRA Review was the need for improved lines of communication between the JCRB, RMOs, CCs and CIPM. To address this issue the CIPM has:

- identified a dedicated CIPM member to serve as the liaison between the JCRB and the CIPM and to attend all JCRB meetings;
- committed to maintain regular annual meetings between RMO Chairs and the CIPM bureau. The 4th RMO-bureau meeting was held at BIPM on 18 and 22 June 2018; and
- invited delegates from the RMOs to attend a meeting of CC Presidents on 19 June 2018.

Further reports on the CIPM MRA, its importance and operation will be presented by Dr Rietveld and Dr Laiz later in the agenda.

The CIPM and its Consultative Committees

CC objectives and strategies

In the course of conducting the CIPM MRA Review, the differences in operation and strategy between CCs were apparent. There are clear and valid reasons for some of the differences but for others there are benefits to be gained from greater uniformity and sharing. To assist in addressing these issues the CIPM decided to revise the text in the document CIPM-D-01 *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops* (Decision CIPM/106-16) by inclusion of the following:

In order to be informed of technical developments and evolving stakeholder needs in different areas of metrology, the CIPM has Consultative Committees with agreed scopes and the following three objectives:

- to progress the state of the art by providing a global forum for NMIs to exchange information about the state of the art and best practices;
- to define new possibilities for metrology to have impact on global measurement challenges by facilitating dialogue between the NMIs and new and established stakeholders; and
- to demonstrate and improve the global comparability of measurements. Particularly by working with the RMOs in the context of the CIPM MRA to:
    - plan, execute and monitor KCs, and to
    - support the process of CMC review.

Document CIPM-D-01 was updated accordingly and published in July 2018, and over time the CC strategies will be structured to reflect the newly stated objectives. These are already reflected in some of the presentations and posters at this conference.

Meeting of the CC Presidents

The CIPM is mindful that many challenging metrological problems these days require a multi-disciplinary solution. With this in mind and with a view to greater commonality in its strategic approach, the CIPM has initiated regular annual meetings of the CC Presidents, supported by the CC Executive Secretaries, to discuss a collegiate approach, particularly to the CIPM MRA implementation. The fourth CC Presidents' meeting was held at the BIPM on 19-20 June 2018. Furthermore, following a suggestion from the JCRB, the CIPM (Decision CIPM/106-27) invited representatives from the RMOs to attend the first day of this meeting to discuss and gain a common understanding between the CCs and the RMOs on responsibilities, technical and quality-system issues. The CIPM will monitor the effectiveness and benefits of such a meeting and may decide to make this a standing annual invitation.

Changes to the membership and observership of the Consultative Committees

Reflecting the need to remain relevant to an ever increasing and more varied set of Member States the CIPM decided (Decision CIPM/105-26) to revise the Rules for Membership of the Consultative Committees as follows: all Member States will have the right for one national laboratory charged with establishing national standards in a particular field to be an Observer at the applicable Consultative Committee and to send one person (only) to a meeting after submitting a formal request. Document CIPM-D-01 was updated accordingly.

Other attendees at CC meetings

In order to gain greater consistency between CCs and to align with international practice, the CIPM decided (Decision CIPM/105-27) that for all Consultative Committee meetings in 2017 and thereafter:

- International organizations will be referred to as "liaisons" and will not be offered membership.
- Named individuals will be "guests" or "experts" and will not be offered membership.

Recalling that decision making within CCs is by consensus, the CIPM emphasizes that this change in nomenclature is in no way intended to detract from the recognition and valuable contributions that 'liaisons', 'guests' and 'experts' make.

International liaisons

OIML

The BIPM staff are working ever more closely and effectively with the staff of the BIML, the bureau of the International Organization of Legal Metrology (*Organisation Internationale de Métrologie Légale*, OIML). The legal metrology community has provided important input to the SI revision, indeed the uncertainty that must be achieved by our scientific community in mass for the redefinition of the kilogram comes largely from their needs. BIPM staff will again form part of the drafting team for the revision of one of the principal OIML publications, OIML Document D 1 'Considerations for a Law on Metrology'. The BIPM staff and the BIML are jointly responsible for the World Metrology Day initiative promoting metrology. They work together to project a coherent view of metrology to the wider world and collaborate extensively on the identity and needs of potential new Member States and Associates, as well as on a wide range of back office topics such as the engagement of secondees, IT operation, and policy on various topics.

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM)

The CIPM maintains representation on the JCGM and the current representative (Decision CIPM/104-22) JCGM WG2 (VIM) is Dr Buzoianu.

DCMAS Network (INetQI)

BIPM staff are actively engaged in this network. The network allows exchange between ten international and intergovernmental organizations with the objective of promoting an effective metrology, accreditation and standards system in developing countries, and has made great progress in recent years. The act of agreeing a common definition for 'Quality Infrastructure' by the network (plus the World Bank) represents a significant step forward. Furthermore, the network has come to the view that good quality infrastructure is important for all States and economies, not just those in developing countries. Consequently, the network is in the process of changing its name to the '*International Network on Quality Infrastructure INetQI*' and is expected to amend its terms of reference in due course. The conference will hear more about the importance of the Quality Infrastructure from the BIPM Director and a number of our speakers.

Capacity Building and Knowledge Transfer (CBKT)

Following Resolution 4 of the 25th meeting of the CGPM and the discussions afterwards, the BIPM has launched a sponsorship-based Capacity Building and Knowledge Transfer Programme (CBKT). The aim is to increase the effectiveness with which Member States and Associates engage in the world-wide coordinated metrological system. Emphasis is placed on transferring established expertise and technologies to countries without well-developed metrology infrastructure.

The past four years have witnessed the rapid growth and the undeniable success of this initiative. Twelve projects were completed, four are ongoing and four are planned. So far, 308 participants from 83 countries covering all six RMOs have participated in various training courses, including 20 secondees who were placed at the BIPM, and 13 placements for young scientists were provided under the programme at partner NMIs. Fifty-six invited lecturers from 27 countries have shared their

experiences. Eight NMIs and five RMOs have provided voluntary sponsorship in various forms. We are really happy to see that the targets set for this programme were realized. One example, among many others, is that Azerbaijan, Namibia, Zambia and Zimbabwe have published their first ever CMCs following participation in CBKT training.

The CIPM thanks all sponsors for their generosity and commitment. For the next fiscal cycle 2020-2023, the CIPM continues to welcome Member States, as well as international organizations, private organizations and foundations to maintain the provision of additional voluntary support of all kinds to this specific BIPM mission-related programme.

Looking to the future

As the outgoing President, I take this opportunity to make a few general comments for thought and reflection:

- The BIPM is a unique organization that provides unique opportunities and benefits for Member States.
- Maintaining the BIPM on a shared basis makes for a high rate of return on investment with a relative low cost per State.
- The CIPM and BIPM staff face major challenges in the coming years to maintain the level of activity expected by the CGPM in the face of increasing salary costs and dotation levels not compensating at least for inflation – this is unsustainable in the long term. The CIPM and BIPM staff have been very active in recent years helping those States that are interested to participate either as new Member States or as Associates States to engage effectively. It will be recalled that of the last five new Member States, four were previously Associates, and that their accession brings little new money. Also, the vast majority of the potential new Associate States have very small economies, and their participation has a minimal impact on the overall BIPM income.
- In a world with changing demands in metrology there are major challenges for the BIPM in the future. The BIPM has always adapted to meet the changing needs and demands of metrology and I am sure it will again. However, it is important that Member States recognize the challenge and play an active role, consider the benefits, the returns and the necessary level of dotation for an effective BIPM.

Conclusions

The period since the 25th meeting of the CGPM has been a very busy one for the CIPM and BIPM staff with the CIPM MRA review, restructuring of the pension fund, proactive engagement with new Members, new Associates, international liaison, preparation for the proposed redefinitions, the highly successful Capacity Building and Knowledge Transfer programme, successful fulfilment of the Work Programme, and effective financial management. There have been sizable challenges along the way, but by any measure, this has been a most productive and successful four years. Much of the credit for this must go to Dr Milton, BIPM Director, for his outstanding leadership and management. I thank Martin, the management team and all the hard working BIPM staff for their untiring effort, dedication and commitment. I have never ceased to be amazed at what is achieved at the BIPM with such a relatively small, but dedicated staff.

I extend special thanks to my CIPM colleagues for their support, ongoing commitment and hard work over the past four years, and I acknowledge and thank all of the external members of our CCs, Working Groups and Sub-Committees without whom we would not be able to function.

Finally, at this CGPM meeting we anticipate witnessing a historic milestone in metrology with the redefinition of four of the SI base units in terms of fundamental constants. This is the culmination of many years of devoted scientific research in many laboratories throughout the world and the commitment of many individuals. To everyone who has contributed I thank and compliment you on a wonderful achievement!

The President of the meeting thanked Dr Inglis for his report. He handed the floor to Dr McLaren, Secretary of the meeting, for a number of announcements. Dr McLaren proposed a change to the way that the Draft Resolutions are handled during the meeting. It was proposed that voting on the Draft Resolutions will take place immediately following the discussion, with the exception of Draft Resolution D "On the dotation of the BIPM for the years 2020 to 2023". Therefore, the votes will be held on: Tuesday for Draft Resolution B; Wednesday for Draft Resolutions C and E; Friday for Draft Resolutions A (morning) and D (afternoon). The voting will be by show of hands apart from Draft Resolutions A and D, which will be one-by-one counting across each Member State.

Election of the new CIPM and the Committee for the Election of the CIPM (CEC) will take place on the afternoon of Friday 16 November. Nominations for the CEC will remain open until the close of the session on Wednesday 14 November. Nominations for the CEC should be sent to Mr Robert Gunn (UK), Chair of the CEC.

10. Report by the Director of the BIPM 'Highlights of achievements at the BIPM'

Dr Milton opened by saying that, following on from the report by the CIPM President, he would comment on the work carried out by the BIPM staff. There are currently 72 staff at the BIPM, including 25 PhDs. One of the big initiatives over the last four years has been to increase the involvement of secondees from the NMIs, with an average of 13 full-time equivalent secondees working with the BIPM staff and in the BIPM laboratories during this period. The BIPM staff support the work of the ten Consultative Committees, providing the Executive Secretaries for each. In addition, support is provided to 67 Working Groups.

The BIPM provides three databases of significance to global metrology: the BIPM key comparison database (KCDB), which contains 23 000 recognized measurement capabilities; the Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM) database, which is very important to the laboratory medicine sector; and the International Metrology Resource Registry (IMRR), a new initiative developed over the last four years with the larger NMIs, which has received support from the CIPM and will be an important new resource for the NMIs.

Over the last four years the BIPM has received an average of 2 300 participants each year at its meetings. During the same period there have been 526 NMI and DI participations in BIPM comparisons and calibrations. The importance of the Capacity Building and Knowledge Transfer (CBKT) programme to the BIPM has been growing, resulting in 16 new projects being launched in this area, all of which were sponsored by the NMIs. Twelve of the projects have been completed and four are ongoing.

The CBKT programme has been a highlight for the BIPM in the four years since 2014. The BIPM was encouraged to start work on this programme by the CGPM at its 25th meeting (2014) on the basis that it would be supported by sponsors. The BIPM is grateful that sponsors have come forward with both the resources and inspiration for the focus for capacity building projects. The sponsors have also helped to identify the user communities that would benefit.

The core capacity building activities support the efficient operation of the CIPM MRA and these activities are recognized as being important and valuable to the full range of Member States. More than 75 % of Member States and Associates have been involved in capacity building activities since 2014, amounting to 308 people from 83 countries. A total of 56 invited lecturers from 27 countries have participated and Dr Milton thanked these countries for their support in kind. Support has been provided by eight NMIs and activities have been carried out in collaboration with all six of the Regional Metrology Organizations (RMOs).

The success of the CBKT programme can be demonstrated through a number of measurable outcomes. One of the objectives of the programme was to “balance the load” among the NMIs by increasing the pool of individuals available to take leadership roles within the work of the CIPM MRA. So far, 14 new RMO Technical Committee (TC) and Working Group (WG) Chairs and 12 existing RMO TC/WG Chairs have benefited from the programme. The objective to accelerate the integration of new Associate States by achieving “right first time” publication of CMCs has been a success. Five States that became Associates of the CGPM since 2010 have published “right first time” CMCs in the KCDB, thereby minimizing delays; this is a direct result of their engagement with the CBKT programme. The target to increase the efficiency of the CIPM MRA, which resulted from the review of the MRA as well as being a goal for the capacity building activities, has been achieved. Data on the delay in reviewing CMCs shows that there has been a 10 % increase in CMC review performance since the CBKT programme was launched.

In addition to CBKT activities in support of the effective operation of the CIPM MRA, the BIPM carries out capacity building activities in its laboratories. Two significant projects have been launched in this area since 2014. The “Metrology for Safe Food and Feed” project enables NMIs to provide mycotoxin calibrant and matrix reference materials and proficiency test materials to support mycotoxin testing laboratories within their countries. The “Metrology for Clean Air” project allows NMIs to strengthen their gas standard capabilities and further develop their national metrology infrastructure in support of their air quality and emissions measurement communities. The BIPM has a specific mechanism to monitor the success of its laboratory-based capacity building activities. After taking part in these projects, participants return to their home laboratories to execute the skills and capabilities learned, and then carry out a comparison to demonstrate their new capabilities. The Director thanked the five NMIs (NIM (China), NPL (UK), PTB (Germany), TÜBİTAK UME (Turkey) and NMISA (South Africa)) that have supported the laboratory-based capacity building activities.

Dr Milton continued by reporting some highlights from the BIPM laboratory programme. These included significant progress made with the Kibble balance over the last four years. In 2018 the Kibble balance began operating reliably under vacuum, allowing measurements to start with an uncertainty target of parts in 10^7. It is expected that the uncertainty will be reduced to a level whereby the kilogram can be disseminated from the BIPM Kibble balance during the next Work Programme (2020-2023). In the chemistry laboratories the first comparisons of primary peptide reference materials have been undertaken. These contribute to the world-wide harmonization of C-peptide measurements and diabetes care. In the Ionizing Radiation Department the first comparisons of ^{11}C and ^{64}Cu isotope standards used for medical imaging have started. In addition, a new comparison service for Member States in the area of dosimetry has been established through a collaborative

agreement to use the DOSEO linear accelerator facility at Saclay, which is close to the BIPM site. The Time Department has continued to improve the stability and accuracy of Coordinated Universal Time (UTC) through the introduction of Software-Defined Radio (SDR) receivers. This work has reduced diurnal fluctuations to less than one nanosecond.

The Director said that details of the BIPM's finances and operations would be given by the Chair of the CIPM Sub-Committee on Finance, Dr Sené, later in the meeting. He gave a few highlights and details in advance of this report. The BIPM's operating expenses have been controlled carefully and are below the level of 2013. The cost of secondees has increased as a result of the strategic intent to increase participation by NMI staff in the work of the BIPM. This has resulted in part of the staff budget being used to support "non-BIPM staff". The BIPM has adapted to a reduced income following the agreed reduction in subscriptions mentioned by the President. In terms of operations, the renovation of the Observatoire building, the oldest of the BIPM's laboratories, has been completed and new facilities have been introduced to expand the BIPM's ability to support meetings.

A number of workshops have been organized at the BIPM since the 25th meeting of the CGPM (2014) as part of its knowledge transfer mandate. All workshops have been fully subscribed, making use of the BIPM's capacity to house 120 attendees. A joint "Global to urban scale carbon measurement" workshop was held with the World Meteorological Organization (WMO) on 30 June-1 July 2015 and on 28-29 September 2016 a joint "BIPM-WADA Symposium on Standards and Metrology in support of Anti-Doping Analysis" was held with the World Anti-Doping Agency (WADA). In addition the "VI International Time Scale Algorithms Symposium and Tutorials" were held on 9-11 September 2015 and a workshop on "The Quantum Revolution in Metrology" was held at the BIPM on 28-29 September 2017. As well as the onsite workshops, over 400 participants attended the "Protein and Peptide Therapeutics and Diagnostics: Research and Quality Assurance (PPTD-2016)" workshop held in Chengdu (China) from 1-3 June 2016, which was organized jointly by the NIM (China) and the BIPM.

The BIPM has developed a deepening liaison with a number of organizations in France over the last four years. As part of a joint arrangement, the *Centre international d'études pédagogiques* (CIEP), which is based in Sèvres, makes available meeting rooms and affordable accommodation for capacity building trainees. The CIEP is a French State-run institute concerned with international education. The BIPM and a range of partners around France, including the LNE and CNES, organized a competition among French-speaking schools world-wide with the theme "*Mesures et unités du monde*" in 2018 to mark the historic revision of the SI during this meeting. In addition, the BIPM worked with the LNE to provide input to the major metrology exhibition "*Sur mesure, les 7 unités du monde*" at the *Musée des arts et métiers* in Paris. The LNE is the main sponsor of this exhibition.

International liaison activities over the last four years have included a strengthening of the long-standing liaison with the International Organization of Legal Metrology (OIML). This cooperation is carried out at all levels and is aimed at coordinating the complementary missions of both organizations to represent the whole spectrum of metrology. The liaison with the OIML is increasingly at the operational level; the new BIML Director will be welcomed at the BIPM site in January 2019 when he takes up his post and further operational synergies will be identified, particularly how the mission of both organizations is developed. The BIPM works very closely with the International Organization for Standardization (ISO) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) and contributed significantly to the revision of the standard ISO/IEC 17025:2017 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories". The BIPM represented the interests of the global NMI community and the views of the CIPM in the revision of this standard. A new initiative has been launched with the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) to promote the role of measurement in

international regulation with 50 other International Organizations. In addition, the BIPM has worked with the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) to explain the role of metrology in supporting the Sustainable Development Goals as defined by the United Nations. The BIPM has also been involved in the re-branding of the former DCMAS Network as the International Network on Quality Infrastructure (INetQI).

The BIPM has developed new approaches for work programme delivery. In particular, the NMIJ (Japan), with support from a Japanese company, helped to establish a new facility to enable NMIs to enter the field of quantitative nuclear magnetic resonance (qNMR). This initiative helped progress the agreed work programme; it allows visiting scientists to take part in qNMR capacity building activities and it has been the basis of the publication of a set of new reference data for NMR, at the request of NMIs, in the development of metrology for pure organic compounds.

The new approach to delivery of the work programme has included input from secondees. Eighty-five secondees from 26 countries have been hosted at the BIPM since 2014. This equates to 13 full-time equivalents who supported the delivery of the work programme. The Director thanked the NMIs that have sent staff to the BIPM on secondment.

In summary, the Director said that since 2014 the BIPM staff have progressed with laboratory projects as committed to in the work programme. Highlights have been: the Kibble balance and new qNMR capabilities; the expanded impact of the BIPM's role in international liaison; the launch of new initiatives in capacity building and knowledge transfer; achievement of efficiency improvements and cost-savings in its operations; improvements in the efficiency of the CIPM Mutual Recognition Arrangement; and coordination of the processes that will underpin the expected redefinitions of the base units of the SI.

The President of the meeting thanked Dr Milton for his report.

11. The work of the Consultative Committees to increase the impact of the CIPM MRA

Dr Gert Rietveld, CIPM member and CCEM President, expanded on the information given by the President of the CIPM (see §9 "Resolution 5 (2014): On the importance of the CIPM Mutual Recognition Arrangement") on the work of the Consultative Committees to increase the impact of the CIPM MRA carried out over the last four years. He began by commenting on the visionary statement regarding metrology "*à tous les temps, à tous les peuples*" (for all peoples, for all time) made during the French revolution more than 200 years ago. This statement is still valid for metrology today and much progress has since been made in the field. An outcome of this progress has been the CIPM Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA), which was launched in 1999. This mutual recognition arrangement represents the current state of the art for the statement "for all peoples, for all time". A key element in this regard is that the CIPM MRA is the framework through which National Metrology Institutes demonstrate the international equivalence of their measurement standards and the calibration and measurement certificates they issue. The outcomes of the CIPM MRA are internationally-recognized (peer-reviewed and approved) Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) of the participating institutes. Approved CMCs and supporting technical data are publicly available from the CIPM MRA database (the key comparison database KCDB). The CMCs are underpinned by key comparisons that allow the comparison of capabilities to prove that these are as claimed. The CIPM MRA thus facilitates universality and acceptance of measurements world-wide.

The effectiveness of the CIPM MRA in facilitating trade and removing trade barriers is widely acknowledged. At the 25th meeting of the CGPM (2014) it was agreed that its operation required considerable effort. Following a discussion on whether it would be possible to streamline operations, Resolution 5 (2014) "On the importance of the CIPM Mutual Recognition Arrangement" was adopted. This Resolution noted the need to review the implementation and operation of the CIPM MRA and invited the Consultative Committees and the JCRB to continue their ongoing efforts to streamline operations within the existing framework. The Working Group on the Implementation and Operation of the CIPM MRA was established as a result, with the aim of achieving the same quality with less effort. This Working Group made nine recommendations in key areas, sub-divided into 28 individual actions. The BIPM KCDB represents the practical implementation of the CIPM MRA and 17 of the 28 actions were related to the KCDB, including CMC visibility in the KCDB (3), key comparison participation (3), constraining the proliferation of CMCs (5), and the CMC review process (6). The remaining eleven actions were related to CIPM Consultative Committees (CCs).

Dr Rietveld spoke about how the CCEM had contributed to the review of the CIPM MRA. One of the major concerns within the CCEM was the proliferation of CMCs and the review examined how to stop further growth. This has been achieved primarily through the implementation of detailed matrices referred to from individual lines in the KCDB, which are easier to administer. The result is that the number of CCEM CMCs in the KCDB has been reduced by 40 % from 7 100 in 2013 to 4 400 in 2018. Dr Rietveld noted that a reduction in the number of CMCs is not an aim in itself; the aim is to be more efficient and effective and to increase the impact of the CMCs.

An overview of the CMC review process was given. At present, CMCs from each RMO are collected together in an Excel file. This system works well for Technical Committees (TCs) that have few CMCs and when the technical expertise to carry out reviews is limited. For the CCEM, the review process is different: all new CMCs are initially reviewed within the RMO (intra-RMO review). When this review is complete, it is sent to the other RMOs for comment. This process has been in operation for around 15 years, but still involves repetition of work by the regions. The CCEM investigated whether the process could be optimized, with the result that the CMCs are now divided and sent to a series of regions so that there is only one review for each element of the CMCs. In 2015 the CCEM decided that some of the CMCs are relatively straightforward and the institutes that submit them are sufficiently competent to eliminate the requirement for CMC review between the regions: the intra-RMO review process has guaranteed the quality for such CMCs.

In summary, before 2011 each CCEM CMC was subject to a "400 % review", with each of the four RMOs (at that time) reviewing the entire set. Since 2011 the CCEM's CMCs have received a "100 % review", with two to four RMOs collectively reviewing the entire set. After 2015 a selective review process (<100 % review) has been carried out, based on sampling. For the latter, and following submission of a set of CMCs, the decision on the scope of the inter-RMO review is taken by the Chair of the CCEM Working Group on RMO Coordination (CCEM-WGRMO), based on a series of criteria. The final decision on the scope of review lies with the RMOs.

Dr Rietveld recalled the earlier presentation by the CIPM President, which mentioned the launch of the KCDB 2.0 in 2019: this will represent a step change in the impact of the CIPM MRA. The current process for updating the KCDB relies on manual transfer of data using Excel files, which is time-consuming and subject to errors. KCDB 2.0 is a web-based platform that eliminates the manual transfer of data and ensures correct formatting of CMCs. This will help achieve the goal of "right first time" CMCs in the KCDB, resulting in significant time savings.

The CCEM has implemented a series of steps to improve the impact and efficiency of comparisons. The basis of comparisons is to check whether the agreement claimed in the CMCs is as expected,

which is achieved by circulating artefacts. Efficiency has been improved by reducing the number of NMIs in the "loop" according to certain criteria. One of the key criteria is that any laboratory in a region that participates in the world-wide loop should be prepared to carry out a regional comparison. In addition, the CC Presidents have agreed to restrict comparisons to key quantities. A strategic plan has been developed for future comparisons and CBKT training on the operation of comparisons is considered essential to ensure that as many NMIs as possible share the responsibility.

The BIPM has a significant and ongoing role in electricity and magnetism comparisons. This will continue as the CCEM moves towards the use of quantum standards. Full implementation of quantum standards requires comparisons; the BIPM facilitates this by carrying out onsite comparisons using, for example, the BIPM travelling Josephson voltage standards (JVS) for both DC and AC and quantum Hall effect (QHE) standards. Dr Rietveld said that a BIPM onsite comparison is a valuable learning experience for all participants, including "leading" NMIs. He added that a recent innovation to improve efficiency was a BIPM-led "star approach" comparison[2] (CCEM-K4), which was finished in a record time of less than two years.

In summary, the CIPM MRA is very successful in reducing and eliminating trade barriers. A significant increase in the efficiency and impact of the CIPM MRA has been achieved by reducing the number of CMCs through the use of matrices, implementing a more efficient CMC review process, improving the strategic planning of key comparisons, and through the use of BIPM-led comparisons. The efficiency of the CIPM MRA is discussed at the yearly meeting of CC Presidents, where experiences are exchanged and the progress of all CCs on the actions to improve efficiency is tracked. Dr Rietveld finished by reiterating that the KCDB 2.0 will be a step change in efficiency when it is launched in 2019.

The President of the meeting thanked Dr Rietveld for his report and invited questions.

Ms Chambon (France) observed that the work done on the CIPM MRA review and the KCDB by the CCs and the BIPM is a big step and encouraged the other CCs to use the matrix approach as it will be a significant advance for the CC community. She thanked the global metrology community for the time spent and the workload associated with the review. Dr Rietveld replied that four years ago he had had some reservations that the CIPM MRA review committee, as requested by the CGPM, and the subsequent report would not be a real output and would not help with the review process. However, he had been very pleased with the work done, not only by the CCs, but also by the regions to take the next step forward with the review of the CIPM MRA.

Mr Érard (CIPM) asked if the optimization of the CMC review process was related to the publication of the new standard ISO/IEC 17025:2017 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", which introduced risk analysis. Dr Rietveld commented that risk is a key element of this new standard and it had been considered during optimization of the CMC review process.

Dr Inglis (CIPM President) recalled the reference made by Dr Rietveld to the travelling quantum Hall effect (QHE) standards that are used when carrying out onsite comparisons. He commented that this is not a trivial exercise and it is a tribute to the expertise in the BIPM laboratories that they have been able to develop these standards. Dr Rietveld was invited to comment on the level of expertise required to support and carry out these comparisons. Dr Rietveld replied that the knowledge of the BIPM staff is at the heart of the success of these comparisons. This knowledge contributes to the fact

[2] The "star scheme" consists of a set of parallel bilateral comparisons carried out between the participating NMIs and the BIPM. In this case, each participant provided a set of capacitance standards and the BIPM served as a common reference for the comparison. The measurands were the capacitance values at 10 pF and optionally at 100 pF. All participants carried out measurements at both values.

that whenever the BIPM carries out an onsite comparison it is a learning experience for all participants. He added that the BIPM Work Programme 2020-2023 includes an extension of the travelling QHE standards to cover AC quantities. He concluded by thanking the BIPM staff for their existing knowledge and the support they provide to the CCEM. He acknowledged the next steps the BIPM is taking to support the CCEM and electromagnetic metrology.

12. The impact of the CIPM MRA in the Americas

Dr Héctor Laiz, CIPM member and President of the Inter-American Metrology System (SIM), presented the actions taken within the SIM Regional Metrology Organization (RMO) for the implementation of both the CIPM MRA and the recommendations from the review of the CIPM MRA. He began by presenting the Vision of SIM, which is to be "*A representative, transparent, competent, and world-wide-recognized regional metrology organization"* and its Mission, which is "*To promote and support an integrated measurement infrastructure in the Americas which enables each member national measurement institute to stimulate innovation, competitiveness, trade, consumer safety and sustainable development by effectively participating in the international metrology community*." SIM has three strategic objectives:

I. Development of NMIs in the SIM Region

II. Building a Strong SIM Organization

III. Fulfil Regional Metrology Organization obligations under the CIPM MRA.

SIM includes nine Member States and eight Associates of the CGPM (including CARICOM, which represents eleven NMIs). In addition, SIM includes 17 institutes that are signatories to the CIPM MRA, including CARICOM. He said that the role of RMOs in the CIPM MRA is primarily to: review and approve the quality systems of the NMIs; to undertake intra- and inter-regional review of CMCs; and to carry out key and supplementary comparisons in support of the CMCs. As of November 2018, SIM had contributed 4 727 of the total 25 221 CMCs in the KCDB. A summary of SIM key and supplementary comparisons was presented.

Dr Laiz said that there were five outcomes from the review of the CIPM MRA of particular importance to SIM: the CIPM MRA should continue to maintain its high levels of quality and integrity so as not to undermine the effort invested over 15 years; the CIPM MRA should continue to be inclusive and be built on the appropriately demonstrated and documented assessment of capabilities between the NMIs; the total effort required to operate all aspects of the CIPM MRA should not rise above the present levels and should be reduced where possible, steps should be taken to share responsibility more widely; the KC/CMC processes should be tailored according to risk and complexity; and there is a need to upgrade the KCDB and the JCRB databases using new modern IT tools. Dr Laiz emphasized that inclusivity is particularly important to SIM to ensure that the CIPM continues to include the mechanisms to allow and foster the participation of "smaller" NMIs and to increase the number of NMIs that participate in the CIPM MRA and which submit CMCs.

SIM has encouraged WG Chairs and technicians from new NMIs within SIM, who are involved in the operation of the CIPM MRA, to attend relevant capacity building and knowledge transfer activities organized by the BIPM. The aim is to increase the efficiency of the CMC review process, to achieve "right first time" submission of CMCs and to bring about a more equitable sharing of the workload. In this respect, seven representatives from SIM attended the 2017 "Sound beginning in the CIPM MRA" initiative and a further seven attended the 2016 "Leaders of Tomorrow" initiative.

Two areas where the CIPM MRA has had a direct practical impact within SIM are in air transport and maritime transport. Prior to the establishment of the CIPM MRA, the US Federal Aviation Administration (FAA) required "traceability to NIST" for all measurements involved in the maintenance of aircraft manufactured in the USA. Following implementation of the CIPM MRA, the FAA issued a regulation that explicitly recognized the CIPM MRA as a source of acceptable traceability. This was particularly important to CIPM MRA signatories such as Argentina, which operates many aircraft maintenance companies. Before this regulation was passed, Argentinean companies had been required to send their standards to be calibrated by NIST; now they can rely on the traceability of the NMI as it has CMCs in the KCDB. A more recent example of practical impact is related to the transport of containers at sea. The International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) issued a container weight verification requirement in 2016 that established regulations for the weighing of shipping containers. This regulation was introduced to counter maritime accidents that had been caused by unbalanced loading of ships and is of particular importance to Panama due to the passage of container ships through the Panama Canal. The Panamanian NMI, CENAMEP, was recognized as a competent technical body for the implementation of this requirement based on its CMCs being included in Appendix C of the CIPM MRA. CENAMEP has been a signatory to the CIPM MRA since 2003.

Dr Laiz said that the establishment of a clear chain of traceability in quality infrastructure standards has had an impact in the Americas. The recent modification of the standard ISO/IEC 17025:2017 included an annex whereby the demonstration of metrological traceability is clearly explained for the application of the standard. From this standard, it is clear that the first source of traceability is from a NMI that has its CMCs included in the KCDB. This is important because when the impact of the CIPM MRA is being studied, it is necessary to look into the impact of the international recognition of quality infrastructure as a whole. The CIPM MRA is the basis for the recognition of all conformity and accreditation activities world-wide.

In conclusion he said that the CIPM MRA has:

- improved the quality of national standards
- improved the quality of services offered by NMIs and DIs by establishing a clear process to review quality systems
- made the measurement capabilities of NMIs and DIs visible and transparent
- made bilateral agreements unnecessary
- increased knowledge transfer and mutual trust among NMIs and DIs
- contributed to removal of technical barriers to trade (TBTs).

The review of the CIPM MRA aims to improve efficiency and maintain high quality and inclusiveness.

The President of the meeting thanked Dr Laiz and invited questions and comments.

Dr Inglis (CIPM President) said that one of the major challenges facing the CIPM MRA and the KCDB is how to deal with risk. He commented that a database is only as good as its 'weakest link' and while there is ongoing work to reduce the amount of effort required to ensure the integrity of the KCDB, it is necessary to remain mindful of the risk. There is therefore a challenge for the CCs to consider how frequently repeat comparisons are required to ensure that there is sufficient but not excessive effort. He asked Dr Laiz to comment on this and to suggest how to minimize effort whilst ensuring integrity of the KCDB. Dr Laiz replied that it is necessary to divide the analysis of risk

related to the organization of comparisons, which is different in the CCs and the RMOs. A CC has to choose key comparisons to take account of "how far the light shines" so that the core fields of metrology are covered and to ensure that the repetition rate reflects the evolution of technology in each field. The arrangement for RMOs is different; they have to consider the development of technology as well as the development of NMIs in a particular region. It is sometimes necessary to organize key comparisons or supplementary comparisons to support new capabilities for emerging NMIs in a region. He recalled the presentation by Dr Rietveld, who commented that the CCEM carries out a risk analysis to select how deeply to review the CMCs. If a CMC is new or represents a significant change in established capabilities, a more in depth review can be made. A less thorough review may be made if a CMC is state of the art or well known. Dr Brandi (Brazil) commented that when a risk analysis is carried out, an impact study is also made.

Mr Khedir (Tunisia) asked if the BIPM and the SIM strategies are complementary. Dr Laiz replied that the CBKT activities organized by the BIPM, and with the support of donor NMIs, are aligned with the strategy of SIM to achieve a more equitable spread of the workload associated with operation of the CIPM MRA. SIM takes advantage of the tools developed within the BIPM CBKT programme to improve the capabilities and efficiency of new Working Group Chairs. In addition, SIM takes advantage of the CBKT programme to train metrologists from NMIs that are in the process of submitting their first CMCs to ensure that their submissions are "right first time". Dr Milton (BIPM Director) added that the strategies are indeed complementary because the BIPM takes its "steer" and priorities for capacity building activities from the regions. Each region has a slightly different strategy, so the BIPM works with each RMO in a different way. The BIPM aims to do what is required by the regions in order to have the largest impact.

The President of the meeting closed the first session.

Second session – 13 November 2018 (afternoon)

The President of the meeting welcomed the delegates to the second session.

13. The importance of measurement for international standards

Mr Sergio Mujica, International Organization for Standardization (ISO) Secretary General, gave an invited presentation entitled "The importance of measurement for international standards". The work of ISO has two key pillars: international cooperation and consensus as a decision making mechanism. He explained how partnerships are essential to the international cooperation work of ISO, which works with more than 700 organizations. Its collaboration with the BIPM is very important and the two organizations collaborate on a number of levels. The BIPM collaborates with ISO "on the ground" through the ISO Technical Committees (ISO/REMCO and ISO/CASCO) as well as through some of the CIPM Consultative Committees. A common aim is to define similar vocabularies for their work, particularly for units. In this regard, ISO and the BIPM collaborate in the JCGM Working Group on the Expression of Uncertainty in Measurement (JCGM-WG1:GUM) and the JCGM Working Group on the International Vocabulary of Metrology (JCGM-WG2:VIM). The highest level of collaboration is via joint committees and the BIPM and ISO collaborate in the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), in which there are eight partners.

Mr Mujica said that ISO and the BIPM collaborate in the area of defining National Quality Infrastructure (NQI) and in 2017 a new definition was adopted by the former DCMAS Network. He noted that NQI is linked to competitiveness and consists of a complex quality and compliance system; a weak NQI represents a barrier to trade and public welfare. NQI relies on metrology, standardization, accreditation, conformity assessment and market surveillance. ISO has a collaborative agreement with the BIPM, OIML and ILAC through the joint declaration on metrological traceability.

One of the key messages for international standards and metrology is the mutually relevant relationship that exists between them: metrology requires standards when defining measurement units and also in guidance for measurement and processes, while standards require metrology when determining characteristics of physical objects. This relationship was demonstrated by using results from the ISO Online Browsing Platform. Out of ISO's portfolio of 22 000 international standards, 639 hits were returned for metrology, 12 976 for measurement and 20 429 for testing.

The use of metrology by ISO is expressed in a number of ways: many ISO standards require accurate measurements and these use the International System of Units (the SI); the drafting of ISO standards follows a series of directives, which mandate the Technical Committees to use SI units; the BIPM and OIML participated in ISO/CASCO for the drafting of ISO/IEC 17025:2017 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories"; and the ISO 80000 series "Quantities and units" was developed and maintained by ISO/TC 12 "Quantities and units" and provides the International System of Quantities (ISQ) in a variety of scientific fields. The SI Brochure and the ISO 80000 series were revised simultaneously with collaboration between ISO/TC 12 and both the Consultative Committee for Units (CCU) and CIPM to ensure alignment.

Mr Mujica concluded by describing the latest priorities for ISO and its contribution to the "global agenda". These are the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), the international trading system, and providing a platform for innovation.

14. The role of quality infrastructure in economic development

Mr Andrei Mikhnev, World Bank Group, began his invited presentation on "The role of quality infrastructure in economic development" by explaining how a beneficial infrastructure to assure the quality of products and services is a "critical enabler" that allows companies to access and compete in domestic and foreign markets. This can broaden their trade and investment opportunities and boost their productivity and innovation. A modern quality infrastructure serves the needs of governments, businesses and consumers. He noted that Quality Infrastructure (QI) is often misunderstood; it can erroneously be thought of as referring to the quality of infrastructure projects, such as civil engineering projects. The World Bank describes QI as an "ecosystem" of public and private institutions, together with the policies, relevant legal and regulatory frameworks, and the practices required to support and enhance the quality, safety and environmental soundness of goods, services, and processes.

The World Bank has published several analyses on different aspects of economic development. Most recently, in 2018 it published a report "*Productivity Revisited: shifting paradigms in analysis and policy*", which examined the work being undertaken by many governments around the world to improve productivity. It is important to ensure that the existing QI in a country is contributing to productivity; without QI it would be difficult to ensure competition in international markets. A second report entitled "*Trouble in the making? The future of manufacturing-led development*" concluded that rather than aiming to produce a product *per se*, attention should be focused on expanding the activities that deliver the desirable characteristics of the product and how they fulfil the needs of consumers. As more complex products and processes are developed, improvements to QI systems to certify quality standards will become increasingly important to facilitate export opportunities. However, if QI requirements are set too high, they can function as non-tariff barriers to trade and development. A third report "*The innovation paradox: developing-country capabilities and the unrealized promise of technological catch-up*" concluded that countries that are unable to innovate in their present industries are unlikely to do so in new industries. Investments in innovation in isolation do not help innovative products to succeed unless the underlining conditions for innovation exist, including quality infrastructure. The use of standards for innovation is a core element of the QI system. "Higher-quality" companies tend to have greater success in complying with more stringent international standards. These capabilities are crucial for competing in global markets in terms of quality. The impact of QI on trade and competitiveness was described.

Mr Mikhnev emphasized the three core areas where QI has an impact: to increase market access, to improve a company's productivity, and to protect the public good. Recent studies had shown that 44 % of firms had conducted significant duplication of testing procedures to meet foreign requirements after domestic requirements had already been met and 68 % of firms cited testing and certification costs as an important reason for not exporting. This highlights that a good global structure for acceptance and recognition of conformity assessment is a step towards removing such barriers to trade. A study in the UK found that the reform of standards contributed to a 13 % growth in labour productivity.

To learn from this knowledge and to help developing countries to build a modern and workable quality infrastructure, the World Bank has developed a "QI reform toolkit", which is available on the World Bank website. Mr Mikhnev concluded by saying that the World Bank is the largest development organization that provides financial and knowledge resources around the world; he outlined the QI reform support that it provides. In conclusion he reiterated that economic development depends very much on how the international quality infrastructure is working.

15. The role of accreditation in disseminating metrological traceability

Ms Merih Malmqvist Nilsson, International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) Chair, gave an invited presentation on "The role of accreditation in disseminating metrological traceability". She commented that the global quality infrastructure (QI) community needs to remain relevant to business and to keep up with technological innovation and this may require the community to reinvent itself. The QI community is however very conservative; the area where innovation is coming from is metrology. Ms Malmqvist Nilsson was of the opinion that metrology has reinvented the products and services it delivers and highlighted this innovative approach through the radical changes to metrology proposed during this 26th meeting of the CGPM. However, she cautioned that when moving from pure science to commercial products and services, the drivers may change from scientific achievements to commercial and financial achievements. This is when third-party assurance of facts or attestation of competence becomes a necessity. This is also the point where accreditation enters into the world of metrology and the dissemination of traceability of measurements. Accreditation creates the bridge between the scientific definition of units and the commercial needs of the market.

The global vision for ILAC is "Accredited once, accepted everywhere". This vision contributes to the elimination of technical barriers to trade and supports free trade. The "product" that ILAC provides to the market is its Mutual Recognition Arrangement (MRA), which covers testing, calibration and inspection. As of November 2018 the ILAC network includes 153 accreditation bodies from 126 different economies, representing 95 % of global GDP and the ILAC MRA covers 68 000 accredited laboratories and 9 500 accredited inspection bodies. In terms of dissemination of traceability, 84 ILAC MRA signatories are involved in calibration. These 84 signatories have accredited a further 11 020 calibration laboratories in accordance with ISO/IEC 17025. Ms Malmqvist Nilsson commented that the ILAC MRA builds on the peer evaluations performed by the current seven regional cooperations.

The official start of the cooperation between ILAC and the BIPM dates from the original Memorandum of Understanding (MoU), which was signed on 3 November 2001. The MoU was reaffirmed on 8 March 2016: it defines how the dissemination of units into the market and the use of traceable measurements by both industry and laboratories is guaranteed. The CIPM-ILAC Working Group meets annually at the BIPM and is responsible for the implementation and review of the BIPM-ILAC MoU. This Joint Working Group has issued various joint declarations and the joint BIPM, OIML, ILAC and ISO Declaration on Metrological Traceability (2011) will be re-signed during the 26th meeting of the CGPM. The revised declaration builds on the 2006 tripartite statement and presents the principles that should be used when demonstrating metrological traceability for international acceptance. The BIPM and ILAC have issued a number of joint statements on topics such as Accreditation of Calibration and Measurement Services of National Metrology Institutes and on Calibration and Measurement Capabilities (CMCs).

Ms Malmqvist Nilsson concluded by commenting that ILAC has been actively promoting the forthcoming revision of the SI as well as the annual World Accreditation Day (held on 9 June each year) and World Metrology Day (held on 20 May each year). She added that promoting the work of both the BIPM and OIML is essential, as their cooperation underpins the elimination of barriers to trade.

The President of the meeting thanked the speakers and invited questions and comments.

Ms Céline Kauffmann (OECD) read a testimonial on the importance on the work of the BIPM to

further emphasize the messages given in the preceding talks and to expand on their content. She said that metrology is important, not only for developing countries, but also for OECD countries and, in general, for all countries in the area of regulatory quality. Ms Kauffmann stated that she comes from the part of the OECD that works with policy makers that advise other policy makers on their regulatory agenda or good regulatory practices, as well as those people, typically centres of government, which oversee the development of draft laws and technical regulations. She commented that the focus is increasingly on how to ensure the interoperability of regulatory frameworks across borders. This is particularly important as people, products, ideas and data increasingly cross borders so it is not possible for countries to regulate in isolation. Countries need to cooperate across borders on regulatory matters and to ensure interoperability to improve effectiveness and to reduce costs for business and traders. The basis for these discussions is to agree the science behind common measurement methods in order to develop key regulations. The work of the OECD and others shows that there is some weakness in the regulatory cycle with regard to the delivery of regulations. Ms Kauffmann commented that countries can develop regulations without looking at how they should be implemented and how compliance is ensured. This is where having a common framework for measurement and understanding how the compliance with laws and regulations can be measured is very important but is often lacking. The OECD has been doing much work on regulatory quality and in the area of international regulatory cooperation, a platform has been established with 15 international organizations, including the BIPM, ISO and ILAC, that work on the quality of international norms and which also looks into measurement issues. The OECD carries out country reviews and the question of metrology has become a critical component for regulatory quality for all countries, including OECD countries. Ms Kauffmann concluded by reiterating that this was a testimony of the importance of the work of the BIPM.

Prof. Candel, President of the meeting, recalled that the presentation by Mr Mikhnev (World Bank) had included a reference to the innovation paradox and asked if this could be explained more fully. Mr Mikhnev replied that the innovation paradox highlights that while there is a lot of investment going into innovation, investment alone is no longer sufficient to succeed, particularly in developing countries. Investment *per se*, although important does not always achieve the expected result. In addition, with investment comes knowledge, but often this is not enough, and an increase in international aid and investment in innovation would be expected to stimulate further innovation, but this is not always the case. It is therefore important to consider the underlying conditions for innovation in a particular country and how its innovation system is organized, in order to determine if the “human capital” is conducive to innovation. In this respect, management capabilities are now a major factor and are considered as variables that are used to measure the success of innovation.

Ms Mikanadze (Georgia) asked what tools are available from the World Bank, international organizations and national governments to better support the application of existing innovations. Mr Mujica (ISO) replied that in terms of innovation, when talking about international standards, it refers to a set of rules to ensure that a product is fit for purpose. He commented that when talking to government representatives they often claim that international standards can be a barrier to innovation; it can be difficult to relate an existing set of rules to an innovation that is intended to do something differently. Mr Mujica cited the recent example of the launch of the “reinvented toilet”, an initiative by the Bill & Melinda Gates Foundation. When Bill Gates travelled around Africa he discovered that 4.5 billion people do not have access to basic sanitation and around 500 000 children aged under five die each year as a result. It is not possible to solve the problem using existing technology, as there would not be sufficient water. As a result, the Foundation made US$200 million available and invited the scientific community to reinvent the toilet. A number of solutions were developed, but they were too expensive. The Bill & Melinda Gates Foundation then approached the problem from a different angle and proposed that an international standard was needed to meet this

public health need. It worked with ISO's member body in the USA, the American National Standards Institute (ANSI), to develop such a standard in association with the global standardization community. The outcome was a forward-looking international standard to reflect the situation that although the technology for a viable reinvented toilet does not exist today, the end point is known. It is hoped that this forward-looking international standard will enable the existing expensive technology to be scaled-up to make it cheaper, but it will also allow it to be complemented by any new inventions. Mr Mujica concluded by saying that although international standards may not lead to all the innovations envisaged they are an important tool. Mr Mikhnev added that innovation does not simply refer to new technologies; innovation comes from all areas of society. In many countries there may not be opportunities to implement technology or access to technological innovations may not be as easy as in developed countries. Innovations may extend beyond technology and the key aspect of "human capital" is based on a concept that favours the need of consumers and which is tailored to the domestic requirements of individual countries.

16. On the importance of a reference time scale for metrology

Dr Noël Dimarcq, Senior Scientist at the CNRS (France) gave an invited presentation "On the importance of a reference time scale for metrology". He gave an overview of the need for the reference time scale, Coordinated Universal Time (UTC), and explained that end users require their clocks to be synchronized to a common reference time scale for many applications including transportation, telecommunication and energy distribution networks, global satellite positioning systems, the economy and financial sector, and scientific applications. Synchronization of clocks is required at different scales, either locally, regionally or globally. In addition clocks on the ground need to be synchronized with those on satellites for GNSS systems. Different levels of precision are also required from seconds to nanoseconds, depending on the application.

The importance to science of a reference time scale was illustrated by Dr Dimarcq who cited the 2011 faster-than-light neutrino anomaly between CERN (Geneva) and the time of arrival in Gran Sasso (Italy). The exact propagation time between the two institutes was known through the distance. The unexpected effect observed was that neutrinos arrived faster than light would have; a difference of 20 metres or 60 nanoseconds. This indicated that the velocity of neutrinos had exceeded the speed of light. This phenomenon is not possible unless there had been a deviation from Einstein's theory of special relativity. A considerable amount of work was carried out to verify the result and it was found that the anomaly was in fact due to a mistake in instrument synchronization.

A second example cited relates to the synchronization of networks, particularly Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Position and time can be determined using a GNSS receiver by measuring the time of propagation between satellites and the ground. These satellites contain synchronized clocks and a 1 nanosecond time error is equivalent to a 30 cm error in the position on the ground. Although this is not a problem for determining the exact position of a vehicle, when GNSS is used to measure movement of tectonic plates or to determine sea level for long-term monitoring, a positioning error of 1 cm or less is required. This relies on both synchronization of the clocks on the satellites and the correct estimation of the propagation time of signals from satellites to the ground. Currently a range of different GNSS systems exist, for example GPS, GALILEO and BeiDou and it is essential that the different systems are synchronized to the same reference time scale (UTC) to ensure their interoperability.

In the financial sector, particularly for global high-frequency trading, fast response trading systems

are required to minimize latency. Correct time stamps are essential to avoid mistakes or voluntary misconduct with trade orders. Examples were given to illustrate problems caused by synchronization errors and misconduct. As a result, regulatory bodies world-wide are calling for precise and traceable time tagging to UTC to avoid fictitious delays.

Dr Dimarcq described the synchronization method from the International reference time scale (UTC), which is calculated by the BIPM, through to end-user clocks via national atomic time scales and intermediate clocks. He described synchronization techniques from master clocks to slave clocks using radio broadcasts, GNSS satellites, geostationary telecommunications satellites and via optical fibres. It was stressed that it is important to have multiple techniques to check synchronization errors, which may result from either the clock or the link.

There are limitations to synchronization between master clocks and slave clocks due to signal propagation. Knowledge of the propagation time and mitigation of its fluctuations is required for accurate synchronization. The current state of the art is approximately 1 nanosecond for intercontinental synchronization. Improvements are anticipated through upgraded satellite and fibre techniques. In addition, it is necessary to account for relativistic effects. Einstein's relativistic effects, left uncorrected, can cause an error of 40 000 nanoseconds after 1 day for clocks onboard GNSS satellites, equivalent to a 12 km error in positioning.

The importance of having a time scale related to the SI definition of the time unit was emphasized. In the past, the reference time scale was calculated from the rotation of the Earth, which is irregular. Since 1967 the second has been realized using primary Cs clocks. The current ultra-stable laser-cooled Cs clocks have an accuracy of approximately 10^{-16}. The process for computing the reference atomic time scale UTC by the BIPM and the time differences between UTC(k) and UTC, which are provided monthly by the BIPM in *Circular T*, were explained.

Dr Dimarcq concluded by emphasizing that having a unique international reference time scale (linked to the SI second) for strategic applications in a wide range of fields is indispensable. He stressed the central role played by BIPM in the computation of UTC internationally and the need to ensure traceability of all national time scales to UTC. The remarkable quality of the realization of the SI second (and of UTC) can be attributed to ultra-stable atomic clocks, however the performance of optical clocks is now surpassing that of cold atom Cs fountains by two-orders of magnitude, which may lead to a possible redefinition of the SI second in the future.

17. Report by the President of the CCTF

Mr Luc Érard, President of the Consultative Committee for Time and Frequency (*Comité consultatif du temps et des fréquences*, CCTF) presented the activities of the CCTF since the 25th meeting of the CGPM (2014).

CCTF Executive summary

The CCTF actively supports research and coordination activities in the development of primary and secondary frequency standards, time and frequency comparison techniques, as well as algorithm development. Particular effort has been dedicated to the development and evaluation of secondary frequency standards, based on optical transitions. The CCTF has coordinated one key comparison, CCTF-K001.UTC, based on the realization of the international reference time scale UTC. The CCTF

has strong liaisons with scientific and industrial communities to promote the mutual benefits in the use of a unique reference time scale and accurate development of time and frequency metrology.

Scope of the CC

The CCTF is concerned with the definition and realization of the SI second; the construction of a stable and accurate reference time scale ensuring access to the SI second and realization of a time coordinate for the dating of events. The committee promotes and supports research in all related fields through nine working groups and supports global comparability and traceability to the international reference UTC (coordinated universal time), which is realized at the BIPM.

The CCTF liaises with international organizations with interests in time and frequency metrology, covering a wide range of applications such as the operation of global satellite navigation, time tagging, geodesy, astronomy and telecommunications.

Strategy

The CCTF strategy document was prepared by the CCTF Working Group on Strategic Planning (CCTF-WGSP), under the leadership of the President of the CCTF. The document is available on the BIPM website.

The CCTF strategy follows the three objectives indicated by Decision CIPM/106-16:

- to progress the state of the art by providing a global forum for NMIs to exchange information about the state of the art and best practices,
- to define new possibilities for metrology to have impact on global measurement challenges by facilitating dialogue between the NMIs and new and established stakeholders, and
- to demonstrate and improve the global comparability of measurements. Particularly by working with the RMOs in the context of the CIPM MRA to:
    - plan, execute and monitor KCs, and to
    - support the process of CMC review.

The committee has identified a variety of stakeholders including: NMIs and other institutes that realize the unit locally and maintain a time scale; international bodies representing user communities; service providers; science services; and regulators. Effective communication with the stakeholders is a key focus of the CCTF strategy, since they provide feedback to the committee and impact the work of the BIPM.

The strategy document highlights core activities in the mid and long term:

- Studies on time scales for different applications; supporting new applications for highly accurate time and, to take advantage of developments in dissemination methods, to continue to develop more rapid predictions of UTC;
- Incorporate new time transfer and time dissemination methods in terms of increased accuracy, reduced cost, easier accessibility and the ability to coexist with other users of the infrastructure;
- Very accurate primary standards will start challenging the best available time and frequency transfer techniques, it will be important to develop a range of portable and highly accurate primary standards that will confirm the performance of new, innovative long-distance clock comparison modes;
- Developing algorithms for time and frequency measurements with the consequent effort in disseminating their precise use and understanding;

- Promoting evaluations of the comparative stability, uncertainty and reproducibility of optical clocks based on the same ion and atom species, in preparation for a future redefinition of the second;
- Encouraging the BIPM to develop multi-technique time transfer and to implement rapid-UTC solutions;
- Monitoring the evolution of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and their internal system times.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Since the 25th meeting of the CGPM (2014), the CCTF has met twice, in September 2015 and June 2017. An exceptional meeting was held in 2017 after only two years with the aim of proposing a resolution to the 26th meeting of the CGPM (2018) on the definition of time scales. Despite official requests, a formal definition has never been given by the CGPM on this matter. All of the CCTF Working Groups held regular meetings during the period.

Main activities carried out cover:

- *Realization and operation of Primary and Secondary standards:*

  New Cs fountains as well as new optical frequency standards realizing secondary representations of the second have been developed by NMIs and, through the coordination of the CCTF Working Group on Primary and Secondary Frequency Standards (CCTF-WGPSFS), their results have been reported to the BIPM for the steering of International Atomic Time (TAI). In 2017 data were reported to the BIPM from six Cs fountains, two Cs beam standards continuously operating as clocks, and three secondary standards based on Rb and Sr atoms. In 2018 the measurements from one additional Cs fountain and a new secondary standard based on the Sr atom were reported.

- *Optical clocks and recommended frequencies:*

  Different optical atomic transitions are currently being studied and high-precision measurement experiments are ongoing, based on diverse atom and ion species showing the capability to reach 10^{-18} accuracy. The CCL-CCTF Frequency Standards Working Group produced an updated list of recommended frequencies in 2017 as secondary representations of the second (available on the BIPM website).

- *Development of optical fibre and other advanced links for time and frequency transfer:*

  Optical links (temporary and permanent) started operating between time laboratories to test their capabilities for very accurate frequency and time comparisons. In particular, rapid developments occurred in European laboratories with the support of EURAMET and the network of optical links is developing in different parts of the world. The BIPM is evaluating the possibility of using this technique in the computation of UTC, as well as setting up a fibre connection between the BIPM and the European network with the aim of validating GNSS calibration techniques.

  The Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer technique has been enhanced by a new development based on a Software Defined Radio receiver, which is currently under development and testing in several time laboratories. The results obtained so far in the receiving chain are encouraging and the CCTF Working Group on Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (CCTF-WGTWSTFT) has created a Task Force for further collaborative development and testing of the technique.

– *Improvement and calibration of GNSS time transfer:*

The availability of new GNSS systems, such as the European Galileo and the Chinese BeiDou, represent a possibility for multi-constellation time transfer to be used by NMIs and the BIPM for clock comparison and the computation of UTC. Tests are ongoing in different laboratories.

Many NMIs are directly collaborating with some time laboratories to support their own timing systems and the synchronization to UTC.

Cooperation between the BIPM and the RMOs was formalized to maintain the regular calibration of GNSS equipment used in UTC computation with the aim of reducing the world-wide time transfer uncertainty to below 2-3 ns. Guidelines for GNSS equipment calibration have been prepared by the BIPM Time Department and distributed to the RMOs. Calibration campaigns under this new organization are ongoing.

– *Improvement of the UTC and rapid UTC algorithms*:

Continuous improvements are evaluated and tested at the BIPM on the algorithms that treat laboratory clock data to calculate UTC and rapid UTC (UTCr). The UTCr algorithm was modified in 2017 to maintain a closer agreement with respect to UTC. Since then, the difference has remained below 2 ns. UTCr weekly solutions have been published regularly since June 2013.

A major effort has been dedicated to the evaluation of uncertainty of the differences UTC-UTC(k) taking into account correlations and biases due to the absence of calibration.

– *Promoting the use of UTC as unique reference time scale*:

The CCTF and the BIPM contributed actively to the discussion on the possible modification of the definition of UTC. The BIPM and several NMIs supported the activity of the International Telecommunication Union (ITU-R) WP 7A, including participation at the 2015 World Radiocommunication Conference, and working together for a common understanding of the benefit of a single reference time scale.

The BIPM and some time laboratories are also involved in the International GNSS Committee of the United Nations, which aims to harmonize different navigation and timing systems.

Challenges and difficulties

Having the evidence for an achievable accuracy of 10^{-18} for the next generation of frequency standards makes it urgent and critical to develop time and frequency transfer of similar performance. Optical fibres are promising but they have an intrinsic difficulty in establishing intercontinental links, and several complex and expensive processes have to be followed to obtain long-lasting contracts from optical fibre providers.

A number of new time laboratories are being set up, particularly in developing countries and economies. Their main aim is to disseminate time and frequency and to support calibration needs in these countries. There is therefore an emerging need for education and capacity building in these laboratories to assist with the development and the correct implementation of time and frequency metrology.

There is a need for time scales in many applications that are not solely for timekeeping, for example GNSS or telecommunication systems. It is difficult to limit the proliferation of new time scales which

runs the risk of causing confusion when considered with existing TAI, UTC, and UTCr, particularly when they differ from an integer number of seconds.

Outlook in the short and long term

The main areas of research over the next few years are expected to be:

- Development of optical frequency standards and their applications, including inclusion in UTC, yielding a possible redefinition of the second.
- Testing and development of new or improved time and frequency transfer techniques that are able to disseminate the quality of optical frequency standards over distances.
- Improvement of the quality and availability of the international reference UTC and its national real-time approximation realized by NMIs to support the world-wide adoption and recognition of a single reference time scale.
- Working in collaboration with other scientific and industrial communities to identify their needs concerning time and frequency measurements and being able to address the challenges with mutual benefits.

CCTF Data

CCTF set up as the CCDS in 1956, renamed CCTF in 1997

President: L. Érard — Executive secretary: P. Tavella

Membership: 25 members, five liaisons, four observers

Meetings since the 25th CGPM meeting: 17-18 September 2015, 8-9 June 2017

Nine CCTF Working Groups:
- Time Scale Algorithms (WG-ALGO)
- Coordination of the Development of Advanced Time and Frequency Transfer Techniques (WGATFT)
- GNSS Time Transfer (WGGNSS)
- CIPM MRA (WGMRA)
- Primary and Secondary Frequency Standards (PSFS)
- Strategic Planning (WGSP)
- International Atomic Time TAI (WGTAI)
- Two-way Satellite Time and Frequency Transfer (WGTWSTFT)
- CCL-CCTF Frequency Standards (WGFS)

CCTF Comparison activity	Completed	In progress	Planned
CCTF key comparisons (and supplementary comparisons)	1, monthly	Ongoing (+1)	ongoing
BIPM comparisons	0	0	0
CC pilot studies	0	0	0
CMCs	776 CMCs in 19 service categories registered in the KCDB		

The President of the meeting thanked Dr Dimarcq and Mr Érard and invited questions.

Prof. Phillips commented that general relativity affects time and this allows the measurement of gravity potential. He noted that mean sea level is changing and asked what the implications would be for the possibility that the mean sea level may change significantly at a time when frequency can be

measured with an accuracy of 10^{-18} and the general relativity effect is 10^{-16} per metre. How is the gravitational potential at mean sea level affected if sea level rises, the ice caps shrink and the compression of the land changes. Changes are expected in sea level that may be of that order over the next century. He asked what impact this would have on what constitutes a second. Mr Érard replied that a redefinition of the second is expected with an uncertainty for the frequency of 10^{-18}, which means that the gravitational effect will be very important; each time a clock is moved by one metre, there will be a noticeable effect. If the second is redefined with 10^{-18} as the standard uncertainty, one will not have a clock but an altimeter. It is important to take the relativistic effect into account with respect to sea level. Dr Dimarcq added that it will be very important to redefine the concept of the geoid. He noted that atomic clocks act as altimeters, so when it is necessary to compare remote clocks, it will not be possible to know if there is a relativistic shift or clock shift due to the intrinsic operation of the clock. It will be necessary to develop a new concept of a reference surface, whether it is the geoid or something equivalent. In the mid-term it may become important to have atomic clocks in space, where the gravitational potential can be controlled.

18. Introduction of the text and voting on Draft Resolution B

Mr Érard presented Draft Resolution B "On the definition of time scales". He said that UTC is the reference time scale for world-wide time coordination. It is the basis of legal times in different countries and is recommended as reference time in several international standards, the latest being the EU MiFID II directive (2018) for time tagging of financial transactions. UTC is calculated by the BIPM by combining data from 450 clocks in 80 national laboratories. Local real-time approximations of UTC, known as UTC(*k*), are realized and disseminated by time laboratories. UTC is based on International Atomic Time (TAI) and has been adjusted to keep pace with the rotation of the Earth since the early 1970s.

He said that despite several resolutions and recommendations, a formal definition of TAI and UTC has never been adopted by the General Conference. Resolution 1 adopted by the CGPM at its 14th meeting (1971) requested the CIPM to give a definition of TAI and to take the necessary steps, in agreement with the international organizations concerned, to ensure that available scientific competence and existing facilities are used in the best possible way to realize the International Atomic Time scale and to satisfy the requirements of users of International Atomic Time. In addition, TAI had been defined by the Consultative Committee for the Definition of the Second (CCDS - now the CCTF) in both 1970 and 1980. Recommendation S 2 (1970) by the CCDS stated that "International Atomic Time (TAI) is the time reference coordinate established by the *Bureau International de l'Heure* on the basis of the readings of atomic clocks operating in various establishment in accordance with the definition of the second." The General Conference had subsequently only taken note of this recommendation. In 1980 a declaration by the CCDS issued an improved definition: "TAI is a coordinate time scale defined in a geocentric reference frame with the SI second as realized on the rotating geoid as the scale unit." There was no subsequent resolution from the General Conference.

The CGPM at its 15th meeting (1975) noted the world-wide use of UTC and strongly endorsed its usage (Resolution 5). However, this resolution was concerned only with the use of UTC; it did not cover the definition of either UTC or TAI. Since 1975 coordinate reference systems have been clearly defined in the framework of general relativity (International Astronomical Union (IAU) 1991, 2000). Several international organizations deal with reference time scales in their different fields of

application. The International Telecommunication Union (ITU) resolved in 2015 to strengthen the cooperation between the ITU Radiocommunication Sector (ITU-R) and the BIPM to further study the various aspects of reference time scales. Mr Érard added that the mission of the BIPM is to ensure and promote the global comparability of measurements, including the provision of a coherent international system of units. Thus, a definition of TAI and UTC has been proposed:

- International Atomic Time (TAI) is a continuous time scale produced by the BIPM based on the best realizations of the SI second. TAI is a realization of Terrestrial Time (TT) with the same rate as that of TT, as defined by the IAU Resolution B1.9 (2000).
- Coordinated Universal Time (UTC) is a time scale produced by the BIPM with the same rate as TAI, but differing from TAI by an integral number of seconds.

These definitions are included in Draft Resolution B, the full text of which is available in the Convocation of the General Conference on Weights and Measures (26th meeting) (see Appendix A). Mr Érard said that Draft Resolution B includes one minor modification; the word ‘decides’ has been replaced with ‘confirms’. The proposed Draft Resolution B was agreed by the CCTF at its meeting in 2017, the CIPM at its session in June 2018 and it was also presented at the relevant ITU Working Group. As such, the resolution, with the exception of the modification of one word, has been widely accepted.

The President of the meeting thanked Mr Érard and proceeded to a vote on Draft Resolution B. He recalled that there has been general agreement on the text, with only one minor change (‘decides’ has been replaced with ‘confirms’). The President called for a show of hands in favour of adopting Draft Resolution B, which was adopted unanimously as Resolution 2 “On the definition of time scales”.

19. Report by the President of the CCL

Dr Ismael Castelazo, President of the Consultative Committee for Length (*Comité consultatif des longueurs*, CCL) presented the activities of the CCL since the 25th meeting of the CGPM (2014).

CCL Executive summary

The CCL is concerned with matters related to the definition and realization of the metre, practical length and angle measurement, and coordinate metrology. The CCL provides advice to the CIPM in the field of length metrology. In addition, the CCL is responsible for implementation of length-related aspects of the Mutual Recognition Arrangement (MRA), through which National Metrology Institutes (NMIs) recognize each other’s measurements.

The CCL maintains a portfolio of key comparisons (KCs) that have been optimized to cover the full range of possible CMCs. To achieve this scope the CCL Working Group on the CIPM MRA (CCL-WG-MRA) has worked on an extensive set of guidance documents, comparison protocols and report templates that are freely-accessible. The CCL Working Group on Dimensional Nanometrology (CCL-WG-N) has been proactive in comparisons that are intended to support this field, with several KCs having been performed and others that are ongoing.

Length has a significant impact on most human activities today; the CCL maintains a watching brief to ensure that the needs of society, research and industry are fulfilled, by forming links with relevant bodies and user communities.

The future direction for the CCL concerns new areas such as 3D dimensional nanometrology, support for industry's move to non-contact surface scanning (healthcare and energy sectors), extending 3D metrology traceability to larger ranges (aerospace, precision civil engineering), compensating for thermal and refractive index effects at different scales, and issues of traceability at the nanometre and sub-nanometre scales (advanced science). A move towards metrology embedded in the manufacturing process represents a paradigm shift away from the traditional role of the calibration laboratory. These, and other new requirements, will extend the workload of the CCL and its members over the coming years.

Scope of the CC

Present activities of the CCL concern practical length and angle measurement (from one dimension to three dimensions, from sub-nanometre to tens or hundreds of metres) and future optical frequency standards (for metre realizations).

This scope may be considered to include related issues such as nano-scale surface science, thermal properties of artefacts and instruments, refractive index compensation for optical beam propagation, laser physics, optics, instrumentation, interferometry, mechanical design, and mathematical software/data processing and advanced modelling. As such, there is some overlap between the work of the CCL and eleven of the fifteen Technical Work Areas of VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) and closer interactions with VAMAS are anticipated.

Strategy

To provide the highest level of efficiency, the CCL is supported by four Working Groups (WGs): the CCL Working Group on Strategic Planning (CCL-WG-S) oversees the revision of the CCL strategy and associated documents on a regular basis; it collects and provides information giving evidence on the continuing importance of metrology in length. The CCL-WG-N seeks to harmonize traceability routes, terminology and reference standards for users in the area of nano-science. The CCL-WG-MRA: ensures the coordination of CCL and regional metrology organization (RMO) key and supplementary comparisons; maintains links with the RMOs, seeking to ensure the involvement of member laboratories of the CCL in major comparisons in the field of length, thereby providing the means for assuring world-wide traceability and equivalence of length measurements at the highest levels of accuracy; and facilitates the inter-regional CMC review process. Through the joint CCL-CCTF Frequency Standards Working Group (WGFS), the CCL coordinates work on new realizations of the metre as optical frequency standards.

The CCL has set up a number of technical Discussion Groups, with membership beyond that of the CCL, where experts discuss new standards, recent scientific advances, and highlights of ongoing research activities within and across the regions, to maximize benefits and support cooperative research.

In 2018, the CCL reviewed its strategy to assure consideration of present and future needs in length metrology. The findings of the strategy document were summarized in two overall requirements for the future strategy:

- to anticipate future needs for instrumentation, standardization and traceability in emerging areas of science and industry, encompassing a wide variety of length scales under a range of measurement conditions; and
- to maintain maximum efficiency of the CIPM MRA processes thereby reducing costs to metrology institutes in all the regions, whilst supporting mutual recognition.

Future science objectives

Dimensional metrology, traceable to the SI metre, underpins all world-wide manufacturing, assembly and construction from nanometre scales (nano-science), through macro-scales (automotive industry, healthcare, precision engineering), to decametre (and larger) scales (aerospace industry, ship-building, surveying). Organizations that undertake significant international trade are especially sensitive to traceability, particularly when multinational sourcing of components and assemblies is prevalent. Although classical dimensional metrology is a mature and well established field, and the forthcoming SI revision has had minimal impact on the CCL. Demands from external customers as well as the Grand Challenges (for example quality of life, energy needs, health, and environment) are setting the research agenda for CCL members.

1. Continue to improve and develop access to realizations of the metre

New traceability routes to the metre will be investigated at the nanometre and sub-nanometre scales (where wavelengths of optical frequency standards are 'too large') in addition to ongoing research on realizations of the metre via updates to the list of frequencies. These will provide improved accuracy and traceability to dimensional nanometrology enabling reduced dependence on 'vertical' processes in the nano-industry.

The CCL-WG-N has explored new routes for traceability of length measurements at the nanometre and sub-nanometre scale. At the 2016 meeting of the CCL-WG-N it became clear that the lattice parameter of silicon had the potential of a new traceability route, for TEM, AFM and displacement metrology. During the 2018 meeting at the BIPM, cases for the three routes to traceability for length metrology via the silicon lattice parameter quoted in CODATA were presented. For displacement generation and measurement, x-ray interferometry can be used. A series of silicon samples comprising stacked rings of atomically flat regions separated vertically by a distance corresponding to the silicon d_{111} lattice spacing (0.314 nm) have been produced and can be used as step-height standards for AFM or optical interference microscopes. For TEM, direct counting of atoms in a silicon pillar is possible. These proposals were put forward to the CCL and will be incorporated into the revised *mise en pratique* as secondary realizations of the metre.

2. Provide CCL support for new topic areas

The CCL-WG-N has been proactive in this area with the work on the silicon lattice parameter that is essential for the semiconductor industry. Other anticipated end-user benefits include improvements to biological compatibility of nano-scale devices (medicine). A series of pilot studies have been successfully concluded and renamed as CCL supplementary comparisons. Further pilot studies are planned (semiconductor standards) as well as ongoing advice and input to ISO standardization:

- Nano 6: measurement silicon lines, completed in 2017
- Nano 1: a photomask comparison, the technical protocol is being prepared by PTB and the comparison is likely to start in 2019
- Nanoparticles comparison completed, comparison piloted by CMS/ITRI and NMIJ involving seven measurement methods on five samples (nano gold, nano silver, 3 × polystyrene latex)
- EURAMET 1239 measurement of surface roughness by AFM: delayed but about to start
- EURAMET 1242 measurement of areal roughness parameters: completed in 2018
- High precision flatness over 300 mm: currently being discussed.

Discussion Group 6 on coordinate metrology tackled the issues of CMCs based on popular flexible machines such as coordinate measuring machines (CMMs) and the preference of industry for non-contact optical-based measurement *in situ* (lack of traceability, decreased accuracy relative to contacting techniques, but faster and hence preferred by users). This topic will benefit users in energy

production (connectors used in oil and gas pipelines, gears used in wind turbines, plasma containment panels in fusion reactors) as well as health (validation of X-ray Computed Tomography, advanced prosthetics).

Long-range metrology/geodesy is an established research area in many NMIs but a relatively new topic for some. This metrology area is gaining importance (for example aerospace, geodetics and surveying, GPS location verification, civil engineering, large science projects such as the Large Hadron Collider (LHC) successor, large optical telescopes). Initial beneficiaries are companies that manufacture large products (for example aircraft, civil nuclear) where metrology-enhanced automation and *in situ* metrology will reduce both manufacturing cycle times and costs on long lead-time, expensive components.

Future CIPM MRA objectives

To minimize the cost of setting up CIPM MRA processes within the CCL and to pre-empt ongoing support issues, the majority of the CCL's work in recent years has been concerned with efficient implementation of the CIPM MRA. In particular the CCL has implemented, via the CCL-WG-MRA, several strategies to minimize the workload of CCL member laboratories associated with the CIPM MRA, whilst providing sufficient evidence to support CMCs. Since the outset, the CCL has anticipated the time and resource impact of the CIPM MRA on its members and has strived to minimize the disruption and costs of the initial implementation and ongoing support for the CIPM MRA. This ongoing work targets three issues; minimizing the workload for comparison pilots; minimizing the portfolio of key comparisons; and reducing the burden on CCL member laboratories. The CCL maximized the breadth of support for CMCs by comparison evidence by undertaking a comparison review based on a skills matrix, and giving clear guidance to accreditation bodies on the minimum necessary set of comparisons, thus reducing the number of comparisons and increasing confidence in their support for CMCs. The CCL-WG-MRA has prepared an extensive set of guidance documents, comparison protocols and report templates, which can be used by pilots of key and supplementary comparisons. These freely-accessible documents are additional to the publicly accessible copies of almost all CCL and RMO comparison protocol documents. The benefits have been to: spread the workload; reduce staff time per comparison; speed up the comparison process; and obtain clear validation of CMCs from comparison results.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Main activities

Since the previous General Conference, the CCL has met twice (on a 3-year cycle) and its working groups have each met three or four times. The Discussion Groups continue to be active and report to the CCL meetings outside of the normal meeting schedule; topics included comparison planning, recent technical advances, contributions to standards, and ideas for potential collaborative research.

In terms of the CIPM MRA, recommendations made by the CCL-WG-MRA were analysed and the following actions were made. The CCL-WG-MRA prepared an extensive set of guidance documents and reporting templates for use by future comparison pilots in order to reduce the workload and cost, thereby attracting new offers to pilot comparisons. Within EURAMET, several non-CCL members have started to use these templates and documents and at least one new key comparison pilot has come forward. The CCL-WG-MRA anticipated the recommendation of the CIPM *ad hoc* Working Group on Governance; regional Technical Committee Chairs have been *ex officio* members since the CCL-WG-MRA was formed.

The CCL WG-MRA sWG-CMC: Sub-group on CMCs and the DimVIM (sWG-CMC) has refreshed the 'DimVIM' (CMC categorization list) and taken over responsibility for its maintenance. The DimVIM is used outside the NMI community by regulators and other service portals because it provides harmonized dimensional metrology terminology in 14 languages (English, Chinese, Czech, Finnish, French, German, Greek, Italian, Japanese, Korean, Portuguese, Spanish, Thai and Turkish).

Length CMCs are currently registered in the KCDB as numerical equations, but this format is usually not used in publications or by accreditation bodies, so the CMCs are not compliant with the approach used by accreditors. The CCL proposal to move to quantity equations, which will become technically feasible in the forthcoming KCDB 2.0, was approved by the CIPM. The workload required to make the change will mainly be the responsibility of the NMIs with equation-based CMCs; these are mostly in length (~850), mass (~400) and some in chemistry.

The CCL is working on the preparation of the new *mise en pratique* document for the metre, using the standard template and the information shown on the BIPM website for the three existing methods of realizing the metre, together with two documents prepared previously within the WG-MRA. The Si lattice is included in the document as a secondary representation of the metre, as suggested by the CCL-WG-N.

Considering that NMIs are encouraged to keep the number of CMCs to the minimum necessary and to avoid duplication, a flexible CMC "Standards of 1D point-to-point dimensions" has been approved by the CCL. The basic idea is that the same equipment may be used for calibrating different standards with similar uncertainty, a typical example being a coordinate measuring machine (CMM) used to calibrate standards whose measurands lie on a single straight line. Since the CCL Length Service Classification (DimVIM) is organized by standards, and the use of the abovementioned equipment would require duplicated CMCs, guidance document CCL-GD-6 was developed to prevent confusion due to the coexistence of conventional and flexible CMCs.

Since the 25th meeting of the CGPM (2014), CCL members have been involved in two conferences: MacroScale and NanoScale. In addition, the list of optical frequency standards used for the realization of the metre and the secondary representations of the second has been updated by the WGFS and adopted by the CIPM after approval by the CCTF.

Staff from the CCL's member laboratories, along with members of CCL Working Groups, participate in national and international standardization committees. The majority of participations are via the ISO GPS (Geometrical Product Specification) matrix of standards. Key international committees with CCL representation include: ISO TC 213 (Dimensional and geometrical product specifications and verification), ISO TC 60 (Gears), ISO TC 1 (Screw threads), ISO TC 201 (SC9) (AFM probe calibration), ISO TC 202 (Microbeam analysis), ISO TC 229 (Nanotechnology), IEC TC 113 (Nanotechnology) and API SC7 (Gauging resources for gauges used in the oil and gas industries).

Challenges and difficulties

An ongoing challenge is to extend the SI to smaller scales and larger scales while continuing to support existing capabilities. The CCL has already prioritized the nano-scale regime by setting up the WG-N.

A new style of inter-RMO comparison has been developed and presented to the CIPM. It is similar to a 'virtual CCL comparison' but with a reduced planning and participation workload (especially for CCL members). The second cycle of key comparisons is now being planned as a mix of 'classical' and 'inter-RMO' styles. Linking of comparison results from one comparison to another, especially when the artefact sizes and properties are different across the comparisons, is proving difficult and it is not clear if end users of the CIPM MRA actually need this to be performed when making

judgements regarding CMCs. Some dimensional comparisons generate large sets of data and representing the results in the KCDB, especially in graphical format, is difficult. A linescale comparison (on a reduced set of measurands) generated 960 results for a single artefact. Calculation of over 921 000 pairwise degrees of equivalence is not practical or useful. Better metrics are needed to summarize large comparison datasets, to allow meaningful comparison of CMC claims and to display them in the KCDB.

Industrial use of CMMs is increasing, despite unclear traceability routes and issues regarding CMCs for these services; this topic is under active debate in the Discussion Group on coordinate metrology. CMMs are used extensively throughout industry and can measure a large selection of items, many of which are also used in key comparisons. A method to express CMCs based on the use of these machines that does not conflict with existing CMCs in the KCDB, enabling wider applicability of the CIPM MRA, has been found. There is a need for traceability in software used in dimensional metrology and some CCL members are seeking CMC categories in this field to satisfy customer requirements. However, undertaking this within the scope of the CIPM MRA is a challenge, possibly requiring inter-disciplinary discussions with other Consultative Committees.

Outlook in the short and long term

In the short term, work in the Discussion Groups will continue towards the next cycle of key comparisons. Further development of standards in nanometrology and instigation of further pilot studies, potentially in cross-discipline topics (for example nanoparticles are not simply a dimensional topic) will be on the agenda of future CCL-WG-N meetings. The start-up of activities in X-ray computed tomography (XCT) as a dimensional metrology tool at some of the CCL member laboratories is expected to trigger new studies that could lead to new CMCs and the necessary support. The CCL may have to provide coordinated assistance to NMIs to enable them to explain new SI definitions to end users. Development of services in long-range metrology will occur and the CCL and its member laboratories will need to address the needs for verification of these services. This will be a challenge to maintain momentum on the CIPM MRA as the CCL moves into the second cycle of key comparisons, whilst new techniques and research will demand reallocation of resources. Some member laboratories will face the issue of reinstating CMCs in areas where there is no longer a CCL key comparison (where a comparison topic has been abrogated).

In the longer term, it is likely that there will be a replacement of some classical services and a change of the Discussion Groups' emphasis; this will be coupled to the challenge of setting up a new range of topics for key comparisons and new rounds of CMC submission in future topics (for example XCT services). More support for *in situ* services for customers (calibrations outside laboratory environments) and the ensuing traceability issues will be required.

CCL Data

CCL set up in 1997 (CCDM from 1952-1997)

President: I. Castelazo — Executive secretary: G. Panfilo

Membership: 24 members and four observers

Meetings since the 25th CGPM meeting: 23-24 September 2015, 14-15 June 2018

Four Working Groups:
- Strategic Planning (CCL-WG-S)
- Dimensional Nanometrology (CCL-WG-N)
- CCL-CCTF Frequency Standards (WGFS)
- CIPM MRA (CCL-WG-MRA)
  - Sub-group on key comparisons (sWG-KC)
  - Sub-group on CMCs and the DimVIM (sWG-CMC)
  - Task Group on KC linking (TG-L)

Nine Discussion Groups

CCL Comparison activity	Completed	In progress	Planned [2015-2019]
CCL key comparisons (and supplementary comparisons)	7 key 4 supplementary	2 key	5
BIPM comparisons	2	0	0
CC pilot studies	0	0	1 [2017]
CMCs	1 071 CMCs in 51 service categories registered in the KCDB		

20. Nomination of members for the Working Group on the BIPM dotation

The President of the meeting introduced this agenda item and handed the floor to Dr McLaren, Secretary of the meeting. Dr McLaren recalled that during a meeting of the CGPM, a Working Group on the BIPM dotation is assembled and meets in advance of the vote on the Draft Resolution. The Working Group will meet at 15:35 on Wednesday 14 November. The President and Secretary of the CIPM had compiled a tentative list of 20 Member States, representing large, medium and small contributors to the dotation to participate in the Working Group. Any other Member State that wishes to participate in the Working Group can do so, with the proviso that there can be no more than two participants from each Member State. He read the proposed list of participants: Argentina, Australia, Brazil, Canada, China, France, Germany, Italy, Japan, Kazakhstan, Republic of Korea, Mexico, the Netherlands, Russian Federation, Saudi Arabia, Spain, Sweden, Switzerland, the UK and the USA. He reiterated that other Member States were welcome to join the Working Group and consequently New Zealand was added.

The President of the meeting closed the Second Session.

Third session – 14 November 2018 (morning)

The President of the meeting welcomed the delegates to the third session.

21. Metrology and QI in support of the sustainable development goals

Dr Bernardo Calzadilla Sarmiento, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), gave an invited presentation on "Metrology in support of the sustainable development goals". His presentation covered metrology for sustainable development, the UNIDO approach to QI development, collaboration with the BIPM and OIML, and UNIDO's work in metrology.

UNIDO considers quality infrastructure as an "enabler" for sustainable development. In 2018, UNIDO cooperated with the former DCMAS Network to develop a definition of Quality Infrastructure (QI) within the framework of the Sustainable Development Goals (SDGs). He noted that metrology is one of the cornerstones of this definition, which includes the sentence "*It is a critical element in promoting and sustaining economic development, as well as environmental and social wellbeing. It relies on metrology, standardization, accreditation, conformity assessment, and market surveillance*." UNIDO regards metrology as being fundamental to QI systems and essential for most SDGs. This recognition was reinforced in 2017, when UNIDO, the BIPM and OIML collaborated on the development of a brochure to highlight the importance of metrology in achieving the SDGs "*The role of Metrology in the context of the 2030 Sustainable Development Goals*". He gave details of metrology and the SDGs in the context of meeting the needs of people, protecting the planet and building prosperity.

Dr Calzadilla Sarmiento explained UNIDO's partnerships describing how the former DCMAS Network has been expanded and renamed the International Network on Quality Infrastructure (INetQI). Both UNIDO and the BIPM are among the ten partners in this network, which is at the core of a "QI family".

UNIDO takes a systemic approach to development of quality infrastructure that looks beyond QI functions to provide a solid foundation for market regulation and consumer protection. Its approach begins with governance (providing a regulatory framework and quality policy) and filters down through QI institutions (metrology, standardization and accreditation), QI services, enterprises, and finally consumers. UNIDO's approach is to "build a bridge" between QI and enterprises and end users to guarantee a solid and sustainable QI; in many cases, QI is supply-driven without the critical mass of demand. The ten partners in INetQI have developed a series of "Quality Policy Guiding Principles" documents to achieve a more coherent approach to the QI system, define what is voluntary and what is regulatory, and ensure optimization of processes and sustainability.

Dr Calzadilla Sarmiento said that UNIDO is very satisfied with its collaboration with the BIPM and OIML. The work of this strategic partnership is guided by the MoU signed in 2008. The MoU is intended to enhance the impact of industrial development on economic growth, to minimize technical barriers to trade, and to assist in the beneficial integration of developing countries and transition economies into the global economy.

UNIDO has been working with the Intra-African Metrology System (AFRIMETS) to organize "metrology schools". In 2011, 76 metrologists from 31 African countries were trained to provide

measurement traceability to their regional and local economies. In 2014, 87 participants from 37 African countries and Haiti were trained in aspects of legal metrology; 17 experts gave presentations during the sessions. A joint project between UNIDO and the Norwegian Agency for Development Cooperation (NORAD) has helped AFRIMETS to develop a strategic roadmap and sustainability plan. UNIDO has undertaken training in other regions, including QI training for Gulf countries in Bahrain on 5-7 December 2016 and for Caribbean countries in Kingston (Jamaica), on 13-17 March 2017. Furthermore, UNIDO has established a Trade Investment Innovation (TII) knowledge hub and an E-Learning resource for QI and trade, which builds on previous UNIDO training experiences.

Dr Calzadilla Sarmiento described UNIDO's work in metrology. UNIDO has more than 40 years' experience in increasing competitiveness through quality and standards compliance. It is consistently chosen as the main UN agency to implement quality infrastructure development. UNIDO is considered a centre of excellence when it comes to trade capacity building and has assisted in the setting up of numerous NMIs world-wide. UNIDO often works towards the establishment of basic metrological systems in countries and he gave examples of its work in Sri Lanka, Mozambique, Nigeria and Iraq.

In conclusion, Dr Calzadilla Sarmiento said that the revised SI will be fundamental to the achievement of the Sustainable Development Goals. Furthermore, the revised SI, metrology and QI will contribute to innovation, which is at the core of the "fourth industrial revolution".

22. Building capacity in metrology: applications to food and feed

Dr Fang Xiang, Director General, National Institute of Metrology (China) gave an invited presentation on "Building capacity in metrology: applications to food and feed", which began with an overview of the importance of food to Chinese culture and how food safety has an impact on everyone's health and wellbeing.

He presented a World Health Organization (WHO) model of GDP and quality of life, which showed that the level of food safety in a country is correlated to its stage of economic and social development. As per capita GDP increases, concerns shift from grain security through to food safety and finally nutrition and health. China's per capita GDP has risen from US$156 in 1978 (when grain security was a primary concern) to more than US$8 000 in 2017, making it a middle-income country. China's regional development is uneven, with per capita GDP varying from region to region. As a result, the food risk situation in China is possibly more complex than in any other country. Dr Fang commented that this complicated situation required a systematic and comprehensive overhaul of the food and feed supervision system in China and the implementation of robust measurement capabilities for food safety issues. Following decades of work, a national measurement standard system for food safety has now been established in China.

Successful supervision and application of a national standard system for food safety requires an effective analytical measurement system. Certified Reference Materials (CRMs) and reference value assignment play a key role and, through the use of CRMs, measurement traceability to the SI is achieved.

Two examples were given to demonstrate that NIM has contributed directly to capacity building and knowledge transfer initiatives to improve national testing capabilities, as well as providing qualified technologies to ensure food safety. In 2008, NIM had a key role following a scandal whereby certain

Chinese brands of infant formula milk were found to contain melamine. The NIM responded by developing analytical methods and CRMs as well as conducting assessments. Subsequently, NIM participated in the setting up of national standards and took part in international comparisons of melamine (CCQM-K103, melamine in milk powder) and proficiency testing campaigns. In 2009, the Asia Pacific Metrology Programme (APMP) recognized NIM's role in responding to the scandal as an example of metrology being used to support a national economy.

In 2015, when China hosted the 15th International Association of Athletics Federations (IAAF) World Championships, the maximum limit for clenbuterol in porcine meat, according to the national standard, was 0.76 μg/kg. At that time, there were nine domestic accredited laboratories that could carry out the testing and eight of these were able to achieve acceptable results. When the maximum limit for clenbuterol was decreased by 20 times to 0.036 μg/kg, only two laboratories were able to achieve acceptable results, and when it was further decreased 100 times to 0.0071 μg/kg, none of the accredited domestic laboratories achieved acceptable results. The 100 times decrease was required by the IAAF. Following the decrease in the maximum limit, NIM provided training to allow the accredited laboratories to improve their measurement technologies and it organized proficiency testing. Seven of the nine domestic accredited laboratories were able to achieve acceptable results for testing clenbuterol after receiving training from NIM.

Dr Fang said that food safety is one of the priorities for national development. However, developing countries face significant challenges when tackling and determining accurately the presence of toxic substances in grain products, particularly mycotoxins. There are more than 400 types of mycotoxin, which are highly toxic secondary metabolites produced by fungi. Of these 400 types, eleven are found regularly in food and feed. The WHO estimates that over 25 % of grain and feed is contaminated by mycotoxins and the Food and Agriculture Organisation (FAO) estimates that 8 % to 18 % of cereals in Asia and Africa are lost during post-harvest handling and storage as a result of fungal growth and contamination with mycotoxins.

The challenges faced in the accurate measurement of mycotoxins in food were highlighted and Dr Fang stressed that inaccurate measurements can put lives at risk. More than 100 countries have implemented regulatory limits for mycotoxins in food and feed in order to protect public health. In this context, AFRIMETS has identified an urgent regional need for CRMs to support the accurate measurement of mycotoxins in food; APMP and SIM have strongly supported this suggestion. The BIPM responded to this call from developing countries to build capacity in mycotoxin measurements by launching the "Metrology for Safe Food and Feed in Developing Economies" project in 2016. Within the framework of this project, the BIPM, NIM, NMISA (South Africa) and other NMIs collaborated to conduct research on methods, reference solutions and matrix CRMs. The project has been very successful, with 15 NMIs and three organizations participating to develop measurement standards and capabilities for mycotoxin analysis. In addition, 16 visiting scientists have undertaken knowledge transfer placements at the BIPM related to the production and characterization of mycotoxin calibrants. The NIM has actively participated in this project by providing secondees to the BIPM; organizing workshops in Asia, Africa and South America; developing key CRMs; and participating in the first inter-laboratory comparison of mycotoxins (CCQM-K154a).

Dr Fang said that NIM has obtained support from the Ministry of Science and Technology (MOST, China) and the State Administration for Market Regulation (SAMR) for the "Research and Application of Measurement Standard and Technical System in Agro-product Safety (2017-2020) project. This project will focus on standard measurement techniques and traceability systems for mycotoxins in grain and will involve collaboration between NIM, BIPM, NMISA and other NMIs. He added that NIM has led the APMP Food Safety Focus Group (FSFG), which has identified priorities regarding mycotoxin measurement for grain safety.

Dr Fang concluded by saying that these represent comprehensive collaborations in capacity building and knowledge transfer. In terms of food safety measurements, the BIPM acts as an effective international coordinator to help developing economies introduce more advanced measurement technologies, which in turn promote more balanced development of measurement capacity between different regions and countries. The NIM keeps improving its own measurement capabilities, and at the same time, helps many other developing countries with capacity building. He added that food safety metrology faces the following challenges:

- How to get more resources, including human resources, funding and technology to support activities among global stakeholders?
- How to promote communication and collaboration with relevant international organizations, such as the WHO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and others?
- How to better apply the results of the CBKT projects to the development of relevant national standards, constructing the whole measurement system and helping governments to formulate laws and regulations?

23. Partnership in capacity building with the BIPM

Dr Mustafa Cetintas, Director, TÜBİTAK UME (Turkey), gave an invited presentation entitled "Partnership in capacity building with the BIPM". He said that TÜBİTAK UME has made significant progress over a relatively a short period of time. He gave an overview of its development from establishment in 1986 as the National Physics and Technical Measurement Standards Center to the present day.

TÜBİTAK UME has a commitment to capacity building and it has been a beneficiary of open knowledge sharing and capacity building activities from other NMIs. Its commitment to capacity building is motivated by a desire to "give back to the metrology community", especially to developing NMIs. TÜBİTAK UME has been involved in EURAMET's capacity building activities since 2007 and has supported the development of the new RMO GULFMET since 2012. To underline its commitment, TÜBİTAK UME was an early contributor to the BIPM CBKT programme, sending a secondee to support the "Metrology for Safe Food and Feed in Developing Economies" project.

In November 2016 TÜBİTAK UME suggested the provision of a long-term training programme for researchers from developing NMIs, at no cost, and as a CBKT activity, to be undertaken in full cooperation with the BIPM. In July 2017 a cooperation agreement was signed between the BIPM and TÜBİTAK UME for a two-year programme. The "BIPM – TÜBİTAK UME Project Placements" include an opportunity to spend one to three months in the TÜBİTAK UME laboratories working on a research activity of the trainee's own choosing. The placements were aimed at young NMI researchers from countries that have recently signed the CIPM MRA or will do so in the near future and feature a two-day workshop on the CIPM MRA and global quality infrastructure with instructors from the BIPM. Fifty three applications were received from 23 countries for the first cycle of project placements in 2018. Ten applicants were selected: one from EURAMET, two from COOMET, two from GULFMET, four from AFRIMETS and one from APMP. Feedback given by four of the participants was presented.

Dr Cetintas said that participants benefit from the opportunity to study a subject of interest while

receiving guidance from experienced laboratory staff in well-equipped laboratories. They also have the opportunity to network and develop lasting professional relationships with metrologists from other NMIs. The knowledge and skills gained during each placement can be transferred to their home laboratory. TÜBİTAK UME benefits from the opportunity to contribute to the development of world metrology and cooperation between NMIs, as well as being able to showcase its technical capabilities and infrastructure. Furthermore, it gains from laying the foundation for greater cooperation with NMIs and it improves the teaching and mentoring skills of its staff. The BIPM gains from support for its CBKT programme and improved cooperation with emerging NMIs, which are drawn into further engagement with the world-wide metrology system.

Dr Cetintas said that applications for the BIPM – TÜBİTAK UME Project Placements: Second Cycle 2019 were open and that the programme will start on 1 March 2019. He encouraged the BIPM to continue with the CBKT programme and finished his presentation with a quotation "Information and knowledge increases when it is shared".

The President of the meeting thanked the previous three speakers and invited questions and comments.

Prof. Phillips referred to the presentation by Dr Fang on food safety and particularly grain security. One of the slides indicated that as well as mycotoxin contamination of grain there was additional contamination by heavy metals. He asked how heavy metals enter stored grain. Dr Fang replied that it is from the air and soil. Mr Date (Ghana) added that grain can become contaminated with heavy metals by improper post-harvest handling. In Ghana, grain is dried by spreading it on floors and if it is not properly handled heavy metal contamination can occur.

Dr Inglis acknowledged the contributions from NIM (China) and TÜBİTAK UME (Turkey) towards the CBKT programme. He said that the CBKT programme has been dependent on contributions from NMIs and that NIST (USA) had "kick-started" the programme by making a very significant contribution. Dr Inglis recalled the presentations made by Dr Fang and Dr Cetintas that included examples of the enormous contribution and the potential benefits that can come from the CBKT programme.

The Indian delegation commented that international food standards are made by both ISO and Codex Alimentarius. The delegate asked what types of standards are produced by ISO and what are produced by Codex; is there an overlap or do they deal with separate domains? Dr Wielgosz (BIPM) replied that the BIPM has a liaison with the Codex Alimentarius Commission, particularly with the Committee on methods of analysis and sampling. The role of this committee is to decide which methods are used by Codex and the international community; ISO acts as a "method developer" in this committee. Codex is the body that decides which methods are used internationally for food safety. Metrology is also involved in the measurement standards that are used in some of these methods. ISO is only one of a number of "method developers" that can be used as a basis for standards in food analysis.

24. Supporting the development of metrology in Africa

Mr Dennis Moturi, Chairman of AFRIMETS, provided an overview of metrology in Africa and a history of AFRIMETS, which began with an inaugural workshop at Midrand (South Africa) in March 2006. AFRIMETS has a mandate to promote the development of scientific, industrial and legal metrology issues across Africa and to operate a fully-fledged Regional Metrology Organization

(RMO). For practical reasons, AFRIMETS is divided into sub-regional organizations that align with existing regional economic communities (RECs).

Mr Moturi introduced the African Continental Free Trade Area (AfCFTA), which is a new initiative of the African Union (AU) and explained how it fits in with AFRIMETS. The AfCFTA is a free-trade agreement initially signed by 44 of the 55 AU Member States in Kigali (Rwanda) on 21 March 2018; by July 2018 another five countries had signed. The agreement creates the largest free-trade area, in terms of participating countries, since the formation of the World Trade Organization (WTO). The AfCFTA will bring together 55 countries with a combined population of more than one billion people and a combined GDP of more than US$3.4 trillion.

The goal of the AfCFTA is to create a single continental market for goods and services, eventually leading to a customs union, and to resolve the challenges of multiple and overlapping REC memberships. Kenya for example, is a member of the East African Community (EAC), Common Market for Eastern and Southern Africa (COMESA) and the Intergovernmental Authority on Development (IGAD). The AfCFTA agreement aims to establish a customs union (90 % of tariff lines to have zero duty within 5 years), a common market, monetary union and ultimately a single currency for Africa.

Mr Moturi described how the creation of the AfCFTA fits with metrology. The AU requires a functional quality infrastructure (QI) to deliver the AfCFTA successfully; the Pan-African Quality Infrastructure (PAQI) forum addresses this need. The PAQI consists of four “pillar” organizations: African Organisation for Standardisation (ARSO); African Electrotechnical Standardization Commission (AFSEC); African Accreditation Cooperation (AFRAC); and AFRIMETS. He highlighted that measurements underpin the activities of a sound QI, and that one of the impacts of a QI for Africa, in terms of the AfCFTA, is increased trade opportunities.

The growth of BIPM membership in Africa from 2007 to 2018 and growth in the categorization of scientific metrology over the same period were presented.

Mr Moturi said that the number of CMCs published in the KCDB by AFRIMETS members increased from 535 in 2017 to 634 in 2018. However, it is more significant to note that in 2018 three African nations published CMCs for the first time: Namibia, Zambia and Zimbabwe. These nations are Associates of the CGPM and add to the four other African nations that have published CMCs and which are Member States: Egypt, Kenya, South Africa and Tunisia. The focus areas for metrology in Africa are the African food and feed reference materials programme; metrology capacity building for safe food and feed in developing economies in partnership with the BIPM CBKT programme; and shortening the traceability chain within Africa. Accredited testing facilities receive support in terms of calibration solutions and through the introduction of proficiency testing (PT) schemes. AFRIMETS is assisting countries to improve their testing facilities in support of the AfCFTA and it will set up a services database for metrology institutes (peer reviewed acceptance of capabilities for trade).

Mr Moturi summarized his presentation by saying that metrology in Africa is now integrated into the international metrology system and that AFRIMETS has contributed greatly to this. AFRIMETS, along with the other QI organizations, is playing a key role in the realization of the African Continental Free Trade Area (AfCFTA). He concluded by thanking all of the partners that have assisted AFRIMETS over the years.

25. A long-term strategy for the BIPM

Dr Takashi Usuda, CIPM member, gave a presentation entitled "A long-term strategy for the BIPM" as a background to the proposed Draft Resolution C "On the objectives of the BIPM". He gave an overview of the past, present and future functions performed by the BIPM since the signing of the Metre Convention in 1875.

He recalled Resolution 10 of the 24th meeting of the CGPM (2011) "On the role, mission, objectives, long-term strategy and governance of the BIPM", which invited the CIPM *"to establish an ad hoc Working Group under the Chairmanship of the President of the CIPM, with representation from the CIPM, States Parties to the Metre Convention (with maximum, intermediary and minimum contributions) and NMIs, properly balanced to represent all regions, and the Director of the BIPM, charged with conducting a Review of the role, mission, objectives, long-term financial stability, strategic direction and governance of the BIPM*." As a result, an *ad hoc* Working Group on the Role, Mission, Objectives, Long-Term Financial Stability, Strategic Direction and Governance of the BIPM was set up and met in March 2012. It presented its findings to the CIPM, States Parties to the Metre Convention and NMI Directors in October 2012. A summary of the key findings and recommendations of the meeting of the *Ad hoc* Working Group can be found in Appendix 2 of the Proceedings of the 101st meeting of the CIPM (2012). Recommendation 1 of the *Ad hoc* Working Group was to *Develop a compact and clear statement on the role, mission and objectives based on the original objectives set by the Metre Convention, but reinterpreted for the 21st Century*. Following this recommendation, the CIPM approved a vision and mission statement for the BIPM in 2016, which stated that:

> *The BIPM is an intergovernmental organization established by the Metre Convention, through which Member States act together on matters related to measurement science and measurement standards.*
>
> *Its vision is to be universally recognized as the world focus for the international system of measurement.*
>
> *Its mission is to work with the NMIs of its Member States, the RMOs and strategic partners world-wide and to use its international and impartial status to promote and advance the global comparability of measurements for:*
>
> – *Scientific discovery and innovation,*
> – *Industrial manufacturing and international trade,*
> – *Improving the quality of life and sustaining the global environment*.

At the same meeting, the CIPM approved the following objectives for the BIPM:

> *To represent the world-wide measurement community - aiming to maximize its impact.*
>
> – *liaison with relevant organizations and bodies in order to develop opportunities for the application of metrology to global challenges.*
>
> *To be a centre for scientific and technical collaboration between Member States providing capabilities for international measurement comparisons on a shared-cost basis.*
>
> – *coordination of international comparisons*
> – *provision of appropriate reference standards for key international comparisons.*
>
> *To be the coordinator of the world-wide measurement system ensuring it gives comparable, fit-*

for-purpose and internationally-accepted measurement results.

- *coordination between Member States and RMOs*
- *provision of technical services to support technical infrastructure.*

Dr Usuda explained the priorities agreed by the CIPM for the planning of the BIPM Work Programme 2020-2023. These were:

1. To identify the highest-value activities required by the Member States
2. To review the technical work needed at the BIPM in physical metrology following the expected decision to redefine the base units of the SI
3. To balance the resources committed to the three strategic objectives (liaison, technical collaboration and coordination)
4. To develop a sustainable long-term financial plan for the operation of the BIPM enabling it to fulfil its mission to 2025.

He described the process used to develop the long-term strategy for the BIPM, which culminated in CIPM approval in October 2017. The process had been carried out in a transparent way, with the draft strategy having been discussed at the meeting of NMI Directors and Member State representatives in 2015, 2016 and 2017. It was also discussed at: the annual meeting of RMO Chairs; through the CIPM representation at JCRB meetings; and at the annual meetings of the CIPM bureau with the OIML and ILAC.

The BIPM Strategic Plan (2018-2019) and its aspirations for the long term (to 2025) include detailed strategic plans that address seven areas of activity for the BIPM Work Programme (four scientific areas: physical metrology, time metrology, chemical metrology, ionizing radiation metrology, as well as knowledge transfer, liaison, and coordination), together with two underpinning areas (communication and promotion, human resources and infrastructure).

Dr Usuda presented highlights of activities at the BIPM from 2014 to 2018, which included: the launch of new initiatives in capacity building and knowledge transfer; improving the efficiency of the CIPM's mutual recognition arrangement; and engaging more effectively with Member States and Associates with "emerging metrology systems" ("micro-CEEMS"). He introduced some of the external trends and drivers that will influence the BIPM's priorities in the future:

- The demand for quantified and equivalent metrology globally will continue in areas such as trade, environment, health, safety and SDGs.
- The demand for a development of Quality Infrastructure will increase to underpin industry.
- The capabilities of the RMOs will continue to broaden due to their size, background and resources (CIPM MRA, scientific programme, capacity building, open forum).
- The membership of the organization will increase and the demands of NMIs will broaden.
- A high priority should be for metrology to address the uptake of disruptive technologies, for example carbon measurement, biology, the Internet of Things (IoT), dynamic measurement, uncertainty.

He listed some strategic changes expected in the work of the BIPM beyond 2024:

International

- to work more closely with the OIML and other international organizations.
- to support capacity-building activities in each of the regions and in their language of choice.

Governance and the CIPM

- to enhance support for the work of the CCs (and the CC Presidents).

– to provide greater support for specific initiatives defined by the CIPM.

Technical and scientific work

– to reduce the number of comparisons carried out, focusing only on those at the highest level and with the largest participation, or where there is some special reason for coordination by the BIPM laboratories.
– to contribute to the dialogue and associated shifts in the revision of the SI.
– to participate in multilateral programmes with Member State NMIs.

Support work

– to meet the increasing demand for meetings to be hosted at the BIPM and to support visitors and secondees.
– to provide more rapid information dissemination via the internet.

Dr Usuda summarized his presentation by observing that:

– The activities of the BIPM have changed dynamically from its beginning to the present day.
– The objectives and priorities of the BIPM are clearly described under the governance of the CIPM.
– The strategy was established transparently through dialogue with NMI directors and State representatives.
– Laboratory work at the BIPM is scrutinized by the CIPM to maximize its impact.
– Under the 2016-2019 programme, some new activities including the CBKT programme were started;
– To respond effectively to future trends some additional resources will be needed.

He said that the BIPM has changed, and should continue to change, according to the demands of the global NMI community while keeping in mind the visionary statement that metrology should be "*à tous les temps, à tous les peuples*" (for all peoples, for all time).

The President of the meeting thanked Dr Usuda and invited questions and comments.

Ms Lagauterie (France) stated: I would like to thank you, Mr Usuda, for the quality of your presentation. I also thank all the staff, the director and the CIPM for the quality of the exchanges we had for many years and for all information conveyed on the BIPM website or through communications. Significant progress has been made since the first CGPM meeting I attended in 2011 and this should be recognized. We carefully reviewed all the documents sent during the last few years, months, etc., and this is all along the right lines. This is why, without any restriction, the French government will support Draft Resolution C on the development of the BIPM objectives.

Dr Golubev (Russian Federation) said: Thank you very much Mr President. First of all, I want to thank you very much Dr Usuda and all the CIPM for the strategy. I want to say that we are supporting it. Then I want to say that Russian Federation made the proposal X or F to the conference. There were a lot of discussions in the Monday informal meeting, yesterday and today. We welcome them and I hope they were very useful. According to these previous discussions, it was discussed to modify the Resolution C, to establish a working group to investigate the problem of the governance in the BIPM and connected problems. Now, I can say we are ready to decide to withdraw our Resolution X. Not to change the current Resolution C. If the CIPM will organize their working group from the Member States, from the signatory States, that is what we want. An advantage is the result of this working group should be presented at the next, the 27th conference, of investigating the problem of the governance of the BIPM and connected problems. In this case, we are ready to support this Resolution C.

Prof. Candel (President of the meeting) replied: We noticed that you were proposing something, but this is withdrawn. What you propose is to have a working group that will be organized by the CIPM. This working group will propose something for the 27th conference.

Dr Golubev (Russian Federation) clarified: This working group should consist of the signatory States persons, this is an idea.

Dr Inglis (CIPM President) said: I would just like to go back to the comments from our delegate from the Russian Federation. I thank him and the Russian Federation for taking their proposed Resolution X off the table. I think the minutes should record very carefully what is being requested. I think just leaving this issue until the next CGPM (2022) might be a little bit too long. I personally would rather see an expectation that the CIPM will address this and come back to the next meeting of the Member States and the NMI directors.

Dr Milton (BIPM Director) said: Can I just clarify Mr CIPM President, the next meeting you refer to would be in October 2019? The CIPM only meets once between now and October, so that is a tall order.

Dr Inglis (CIPM President) replied: I think just to leave it hanging and say, “We will report back at the next general conference,” may be too long. Too long for action, we’re necessarily going to get a decision or a finalization. I think we need to address the issue.

Dr Golubev (Russian Federation) said: I want to clarify my suggestion. First of all, I said I want this working group to report to the next CGPM. I think that these matters are under the authority of the CGPM. Then, the report may be not a decision or something like that. This is a report, this is what I want to see in the minutes, if it is okay and appropriate.

Dr Inglis (CIPM President) replied: I guess my concern is the formulation or the organization of the working group. We’re just leaving that. You say you would like a working group, but I think you have to charge the CIPM with bringing this working group together and establishing the process.

Dr Richard (Switzerland) observed: Firstly, I appreciate a lot the work of the BIPM and thank you for the draft proposal of Resolution C, which we will approve with great pleasure. I would like to clarify the role of the proposed working group. For me, the terms of reference are absolutely not clear. Will the working group report on the content of the Resolution X, which will be withdrawn, or will this working group report on something else?

Dr Steele (Canada) said: Firstly, I would like to thank Takashi Usuda for an excellent presentation. I think you captured quite a lot of the progress that’s been made in the last decade or so since a couple of CGPMs ago. I welcome in particular the transparency, the openness and the participative approach that we’ve taken collectively involving, not just the CIPM, but engaging at the NMI directors meeting and engaging with the State representatives to move these larger picture changing context issues into the open forum. I encourage that kind of behaviour and some of the discussions that come from the Russians. Withdrawing their resolution to set a specific comment on governance, titles and naming aside, I welcome that very much and I thank them for their gesture. It is my expectation that the road you have established by engaging nations both through their national laboratories and their State representatives in these questions with the general conference with the oversight of the CIPM is intended to continue. I think everyone welcomes this very much. From a laboratory perspective, I would like to share as the manager of another rather small national metrology institute and in a greatly changing context, the difficulties associated with taking deep expertise from one or two areas. Looking forward to places where you can bring your skills quickly into application on new problems, while getting ready to train the next generation of metrologists in those new areas. I sympathize with the challenge that Martin Milton has taken on and I support it

whole-heartedly. It is in that strategic context that I am very pleased to welcome the strategy you have presented. I anticipate the same for the work programme ahead. I think we will have no problem welcoming and entirely supporting the Resolution C that we will be coming up with in this new context of open discussion and governance moving forward.

Dr Copan (USA) said: I want to just add my comments and support for the spirit behind Resolution C. I believe that great progress has been made. We have seen that so eloquently presented this morning by Dr Usuda, thank you so much for that presentation of the strategy and the progress. I would like to say it is an important time for us to look at the modernization of the CGPM, the BIPM, the CIPM and all the inter-relationships between the organizations. I also fully support the notion of having a working group under the CIPM that reviews the key processes, the decision points, the relationships amongst the parties and in particular the involvement of the Member States as well as the NMIs that represent this great body. I believe we have a tremendous opportunity to look at even greater clarity, transparency, as well as the sharing of strengths amongst the NMI community in an increasingly complex world. I look forward to that expanded collaborative spirit that we are looking forward to as so clearly outlined in the strategic documents this morning.

Mr Janssen (Germany) declared: First of all, thank you very much for the presentation Dr Usuda, I think it was really clear. You made the point what the BIPM strategy is about. We also support the proposal to establish a working group that makes recommendations for the next general conference on appropriate governance and practices available within the Metre Convention. The recommendation of the governance should be oriented to the principles of clarity, transparency and sustainability. We also ask kindly the CIPM to support and organize this process and the Member States.

Ms Lagauterie (France) said: Like Switzerland, I would like to ask for more elements about the working group. In any case, for France, we are particularly concerned. The working group should not be linked to Draft Resolution X as Draft Resolution X proposed to change the name of the organization and the BIPM structures. After confirmation of the French Ministry for Europe and Foreign Affairs, as depository of the Metre Convention, such changes cannot result from CGPM decisions and would need to amend the Convention and to hold new negotiations of the treaty. It should therefore be clear that the issue of the name of the organization or the major structures of the organizations, as set in the Metre Convention, should not be part of the terms of reference of this group.

Mr Ortiz (Chile) said: Since it is the first time I take the floor, I would like to thank you for the convening of this meeting today. Regarding the process of voting this resolution, I would seek from you, Mr President, further clarification on the terms of reference alluded to by several delegations. Particularly regarding the status of these terms of reference regarding the resolution we are following to vote. I would seek this clarification.

Dr Thompson (UK) observed: Thank you to the CIPM and to Takashi [Usuda] for that very clear presentation. We support the resolution. We look forward to a working group such as that. The terms of reference are absolutely critical and that's the first task. I would suggest that the first time that CIPM meets it would be considering draft terms of reference that all Member States would be able to comment on and that would be the way forward.

Dr Buckley (Ireland) said: First, I would like to thank the speaker for the wonderful presentation on Resolution C and I have to say we fully support the BIPM going forward. I am slightly confused about the introduction of what appears to be a new resolution for which we have not had any opportunity to look at in detail before coming to the meeting. I would use the phrase, '*it has taken us on the hop*.' I think we need to tread carefully going forward with the working group because we

need to understand clearly what are the terms of reference? What is it expected to deliver? I heard phrases like governance of the organization. I have to say, I am concerned to hear these kinds of terms. I do understand it is, at times, necessary for an organization to look to itself. I would have no problem with looking closely at the terms of reference, but I am concerned it has just appeared on the floor at this stage.

Mr Bernabé (Spain) stated: I am really concerned about this working group. I share the concern made clear by France and fully support the statement made by her representative.

Prof. Candel (President of the meeting) concluded by saying: I think we can move on Resolution C. We are going to look at that resolution and we will then vote on that resolution.

26. Introduction of the text for Draft Resolution C and voting

Dr Usuda said that the text of Draft Resolution C "On the objectives of the BIPM" had been available since early 2018 (see Appendix A). The President called for a show of hands in favour of adopting Draft Resolution C, which was adopted unanimously as Resolution 3 "On the objectives of the BIPM". There were no abstentions.

27. Work programme of the BIPM proposed for the years 2020-2023

Dr Milton presented proposals for the Work Programme of the BIPM for the years 2020-2023. He thanked the CIPM for their positive and constructive work with the BIPM over the last four years on developing the strategy. This strategy formed the basis for developing the proposed Work Programme for 2020-2023, as the BIPM has been mandated to do by the CIPM. He recalled that Dr Usuda had already spoken at length on the process that had been followed to develop the BIPM objectives (see §25). A financial plan has been developed in parallel to the Work Programme. He said that Dr Sené, the Chair of the CIPM Sub-Committee on Finance would talk about the financial plan in the next presentation (see §28).

The Director said that the foundation of BIPM's activities will continue to be the work of staff in all parts of its organization that carry out liaison, coordination and technical collaboration activities. The BIPM's technical activities, as reviewed with the CIPM, are limited to those where the BIPM has a distinctive role and which provide direct support to many or all Member States. The Draft Work Programme includes estimates of the staff, resources and expenditure needed for 66 different tasks. The BIPM plans to be able to deliver all of these tasks, except for two longer-term investments that were in the initial consultation, but which were removed during the detailed costing phase. He selected two tasks from each of the four scientific areas as examples of the tasks in the Draft Work Programme 2020-2023.

In physical metrology, the BIPM will work towards disseminating the kilogram from the BIPM Kibble balance. The BIPM will coordinate the comparison of primary realizations of the kilogram, which is a vital part of the new system for the standard of mass. Furthermore, it will organize a new comparison of AC voltage standards based on the Josephson effect.

In time metrology the BIPM will introduce high-accuracy frequency data from optical clocks into the calculation of UTC. This represents an important step on the roadmap towards a second based on

optical clocks. In addition, the BIPM will automate data handling for UTC in order to optimize the calculation and increase the number of laboratories participating in rapid UTC; a 10 % increase has been targeted.

In chemical metrology, the BIPM will coordinate the implementation of new values for the ultraviolet absorption cross-sections for ozone among the 25 NMIs around the world that are centrally involved in providing traceability for world surface ozone measurements. The BIPM will work with these NMIs to implement the results of measurements of the ozone cross-section that were carried out by the BIPM in the previous period. The number of nuclei that are covered by the BIPM's quantitative NMR (qNMR) internal standard reference data scheme will be tripled. The resulting documents are published after review by a specialized group of NMIs within the CCQM and will allow wider application of the qNMR technique among NMIs working on chemical standards.

In ionizing radiation metrology, the BIPM plans to double the number of NMIs that take part in key comparisons and calibrations of the primary standards that underpin radiotherapy dosimetry for the 11 000 clinical accelerators world-wide. This work will take place under the arrangement that the BIPM has established with the DOSEO facility, close to the BIPM site, which gives it access to the latest technology. In addition, the BIPM will launch the next generation of the international reference standard (SIR), for comparing standards of gamma emitting radionuclides. These are used for applications in nuclear medicine and environmental monitoring. In order to do so, the BIPM will exploit developments with low-current measurement technologies that have come out of the quantum electrical standards and the high-precision, low-current measurement capabilities in the NMIs.

In the liaison area, the BIPM will continue to present a coherent and cohesive single voice for metrology by working closely with the OIML. In addition, the BIPM will continue to advocate on behalf of the NMI community, such that the members of other international organizations can gain the optimum benefit at the national level from the available national metrology resources for their missions. Technical liaisons with international organizations take place through the Consultative Committees. For example the IAEA participates in the CCQM and CCRI; the ITU is involved in the CCTF; and the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) is involved with the CCRI.

In the coordination area, the BIPM's work is built around the implementation of three important global databases. The BIPM key comparison database (KCDB) promotes the mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by NMIs. The Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM) database supports *in vitro* diagnostic measurements world-wide and recently there has been a new initiative to promote the benefits of this work and to start a knowledge transfer activity. The International Metrology Resource Registry (IMRR) database, which is the gateway to data and data-related services held by the international metrology community, will be expanded. This resource registry for metrology in NMIs is an exciting opportunity based on a platform developed by NIST. Many NMIs have indicated that they want to get involved in this initiative and regard it as an opportunity to expand the resource, based on the investment that has already been made.

The Director said that the BIPM proposes to continue with its core capacity building programme in order to increase the pool of NMIs that are able to contribute to and to take leadership positions in the CIPM MRA. In addition, it will provide training so that when Associates participate in the CIPM MRA for the first time, they can come into the system without being delayed by a lack of information, knowledge or training about how the CIPM MRA works. It is proposed that at least 420 NMI and DI staff will attend core CBKT courses and workshops during 2020-2023.

The BIPM's proposed technical capacity building programme consists entirely of sponsor-funded

projects. Technical capacity building activities are developed with sponsors, RMOs and groups of NMIs that can work with the BIPM to implement the projects. A new technical capacity building project is proposed in the chemistry area to support NMIs that are developing capability to provide metrology for "accurate patient care". The BIPM intends to expand the technical capacity building model, so that it is used more widely in the other laboratory departments. For example, it will provide capacity-building opportunities to improve the quality of data submitted to UTC; to support new NMIs coordinating comparisons of electrical quantum standards and the dissemination of mass standards; and to engage with NMIs and DIs working in radiation dosimetry and radionuclide metrology through joint projects and workshops. The target is for 40 laboratory placements at the BIPM during 2020-2023 totalling around 170-person months. In addition, the BIPM is planning for 100 participations in laboratory-based workshops.

The Director concluded by saying that the proposed activities are ambitious and that they depend on the work of visiting scientists. He said that Dr Sené would elaborate on how visiting scientists are now an important part of the BIPM's capabilities. Visiting scientists and specialists will work alongside BIPM staff towards the delivery of this work programme. This growing participation of visiting scientists not only increases the capacity and the capability of the organization, it also reduces costs. The proposals include capacity building and knowledge transfer activities, some of which depend on the BIPM securing sponsorship. They will all involve collaboration with the regions. Finally, the BIPM will continue to enable scientific and technical collaboration between Member States, providing the capabilities in its laboratories for international measurement comparisons on a shared cost basis.

The President of the meeting thanked the BIPM Director and invited questions and comments.

Prof. Phillips recalled that the integration of optical frequency standards had been mentioned. He said that as was widely agreed, there should be a redefinition of the second because laboratories are essentially using a *de facto* definition of the second based on higher-quality optical standards. He added that he was confused about the existence of a roadmap for the eventual redefinition of the second. He had heard dates that range from 2025 to sometime after 2030. He asked if there is there an official position. The Director replied that there is an official position within the CCTF and they have a roadmap. The CCTF roadmap focuses on four or five criteria that have to be met for the performance of optical clocks and the inter-comparison of clocks. It will also be necessary to consider the capability to get optical clock data into the timescale system and that is what the BIPM is concerned with. The Director added that the global optical clock community will have to decide when they are going to be able to meet the criteria the CCTF have put forward.

28. Proposal for the Dotation of the BIPM for 2020-2023 (Draft Resolution D)

Dr Martyn Sené, CIPM member and Chair of the CIPM Sub-Committee on Finance, said that his presentation would cover the financial management and financial performance of the BIPM in the dotation period 2016 to 2019 and the composition of the budget proposed for the BIPM dotation for the next period, covering the four years 2020 to 2023. More detail on both of these had been provided to Member States in advance of the conference in the document "*Highlights of progress made since the 25th meeting of the CGPM (2014) and notes supporting the proposed dotation 2020-2023*". There had also been some preliminary discussions at the informal meeting on Monday 12 November. Further discussions will take place at the meeting of the Working Group on the BIPM dotation later

on Wednesday 14 November.

He said that the CIPM Sub-Committee on Finance and the CIPM have commended the BIPM Director and his team on their good and prudent financial management in each year of the dotation period (2016-2019). Dr Sené noted that the accounts for the first two complete financial years of the current period had been submitted and audited on schedule and the auditors had given them a “clean bill of health” with no “qualifications”. The auditors did however note the long-term pension fund liability. This is something that the CIPM and the BIPM Director, supported by the Pension Fund Advisory Board (PFAB), have sought to address. Mr Érard, who chairs the PFAB, would report on this in §30.

Dr Sené presented the financial figures, showing the revenue and the expenditure for the present dotation period (2016-2019). The figures consisted of the audited results for 2016 and 2017, the forecast outturn for 2018 and the budget reviewed by the CIPM Sub-Committee on Finance and agreed by the CIPM for 2019. Performance to date and the forecast to the end of the period are better than the agreed budget presented at the 25th meeting of the CGPM (2014), as a result of good cost management. Dr Sené noted that there had been many conversations about the impressive achievements of the BIPM work programme and its impact. Taking a financial perspective, it is worth noting that the BIPM has delivered this programme with the “flat cash” dotation agreed at the 25th meeting of the CGPM. In fact, revenue for 2019 will be less than that projected at the last CGPM. This is because the work to attract new Member States and Associates is more than cancelled out by the decision to take some Associate States with emerging metrology systems “micro-CEEMS” off the “escalator mechanism”, as highlighted by the CIPM President (see §8.1).

Dr Sené spoke about the increased participation of secondees in the work of the BIPM, which is a cost-effective way to deliver the BIPM work programme, as well as increasing the participation of and supporting Member States. He added that a strategic and planned approach to budget and capital expenditure has been adopted. The BIPM, in consultation with the CIPM, developed a long-term strategy and plan for these expenditures. The aim is to sustain the laboratories, smooth the costs across years and reduce the risk of unexpected expenditure.

The final point for the 2016-2019 dotation period is that overall operating expenses have been well controlled. Operating expenses represent the ongoing running costs of the BIPM (total spend minus investments). From 2013 to 2016, operating expenses showed a steady decline as the BIPM Director and his team made a number of savings and efficiency improvements. In 2017, operating expenses increased, but they were still below the 2013 figure and are expected to remain stable for the remainder of the current period. However, with limited opportunities for further savings and inflation predicted to increase in Europe, the cost of maintaining a sustainable laboratory that is fit to deliver its role can be expected to rise.

Dr Sené presented the proposed budget for 2020-2023. He highlighted a few points, and said that fuller details had been circulated in the notes prior to the conference. The proposed budget for 2020-2023 is driven by the strategy that was presented in §24 and a detailed costing of the work programme that the BIPM Director outlined in §25. The budget has been developed from a detailed costing of the work programme.

Dr Sené reaffirmed that the CIPM will continue to challenge the BIPM to find further efficiency savings. The BIPM will continue to plan carefully for buildings expenditure and capital expenditure in the long term. Where practical, it will seek to use off-site facilities. The BIPM Director had highlighted the example of the use of the DOSEO facility at Saclay (see §25), which has enabled maintenance of an important BIPM capability and improved services to Member States in the critical area of radiotherapy, whilst saving, from a financial point view, the multi-million euro capital cost of an accelerator facility.

There will need to be continued contributions to the pension fund. As Mr Érard will discuss in §31, the CIPM and BIPM will seek to prudently balance the present cost against the long-term liability of the Member States.

The BIPM Work Programme for 2020-2023 assumes the continued use of fixed-term appointments and growth in secondments to the BIPM. The basis for the staff costs over the 2020-2023 dotation period, with the number of person months deployed in each of the BIPM departments, was presented. More details are available in the *Work Programme of the BIPM for the four years 2020-2023*, which includes a breakdown of staff effort and costs down to the level of each individual activity and "deliverable". The secondees in the next dotation period are projected to contribute to 20 % of the BIPM's programme delivery, representing a major and a cost-effective contribution. There is however a limit to secondee engagement determined by two factors. The first is the need to balance the benefits of engagement and development and the new ideas that come from secondees against the requirement to maintain an enduring capability at the BIPM. Secondly, there is a maximum number of staff who can physically be accommodated in the BIPM buildings.

Dr Sené said that against this background of efficient use of funds, the proposal in Draft Resolution D is for a modest compound increase in the dotation. He continued by describing the additional value that will come from this "below inflation" increase that will enable the BIPM to evolve and which is aimed at the long term. He said that it is driven by the strategy to respond to longer-term trends in Member State priorities, to respond to developments in metrology and to respond to the long-term financial position of the BIPM.

Driven by strategy and reflecting the priorities of Member States, the 1 % (compound) increase will enable support for the "core" CBKT programme. Dr Sené recalled the discussions on the enormous value that the CBKT programme provides, both for emerging States, but also in reducing the load and hence the cost of participation in the CIPM MRA of other Member States: this represents a clear return on investment for all Member States. He added that the CBKT will be put on a firm footing by removing dependence on sponsorship for the "core" activities.

The proposed 1 % (compound) increase in the dotation will enable the recruitment of three staff. Over the period of the next dotation (2020-2023) the BIPM expects five vacancies to arise from retirements and expiry of fixed-term contracts, reducing the number of staff from 72 to 67. The proposal is for three of these vacancies to be filled.

The proposed increase will allow the BIPM to prepare for the period beyond 2024. This recognizes that the needs and the priorities of Member States are changing, reflecting the challenges and changes in the outside world. There will be additional staff retirements and there are pressures on the BIPM finances, which it is prudent to consider and address in a measured way. The 2016-2019 dotation period has a flat-cash settlement, which has been mitigated by efficiency savings in operating costs. Whilst the CIPM will continue to seek savings, there is limited opportunity to beat inflation.

Dr Sené said that the underlying year-on-year operation of the BIPM is likely to move into deficit by the end of the next dotation period (2020-2023). The size of the reserves mean this is not a cause for concern, but it would be prudent for the CIPM and the BIPM Director to consider options, including joint appointments, the balance between permanent and fixed-term appointments, contracting tasks externally and re-prioritization of existing posts. He commented that it would be good for the BIPM to have at its disposal a modest budget to start a limited reorganization to ensure a secure future. Dr Sené noted that he has experience of making changes in a number of organizations, in both the public and the private sector. Making changes to an organization does incur costs, but in his experience, delaying change usually costs more.

Dr Sené completed his presentation by commending Draft Resolution D to the Member States. He added that in the notes supporting the present dotation, there are other scenarios with reduced or no increases in the dotation. Whilst they would enable the “core” work programme to continue, they will not provide the modest increase to enable the BIPM to evolve to meet the future needs of Member States. Draft Resolution D will support a programme that will enable the BIPM to deliver best value to the Member States and to evolve to meet their changing needs in a sustainable way.

The President of the meeting thanked Dr Sené and said that there would be an opportunity to discuss matters relating to the dotation during the meeting of the Working Group on the BIPM dotation later on Wednesday 14 November. He closed the Third Session.

Fourth session – 14 November 2018 (afternoon)

The President of the meeting welcomed the delegates to the Fourth Session.

29. Addressing Member States in arrears

Dr James McLaren, CIPM Secretary and Secretary of the meeting began by giving an overview of the position regarding arrears in general and noted that the situation with respect to arrears is currently very good when compared to past performance thanks to the work of many BIPM staff. There are two Member States, namely Pakistan and Tunisia with one year of arrears for 2017, which amounted to about 1 % of the 2017 dotation.

There are no outstanding contributions for years prior to that, other than the case of the Bolivarian Republic of Venezuela, which has arrears for 2013-2018. In 2012 a small amount, € 1 848, or about 3 % of the expected contribution, was received. Therefore, there are almost seven years of arrears for Venezuela, which amount to € 558 000. Many attempts have been made by the BIPM staff to resolve this situation, including numerous attemps to communicate, but all efforts have been unfruitful.

All procedural and diplomatic aspects specified in Resolution 8 "On financial arrears of Member States" of the 23rd meeting of the CGPM (2007) have been observed with respect to Venezuela. As a result, the CIPM, at its meeting in June 2018 decided (Decision CIPM/107-05) to recommend to the CGPM at its 26th meeting to take a decision with regard to the exclusion of the Bolivarian Republic of Venezuela, in accordance with Article 6 of the Regulations annexed to the Metre Convention and in full compliance with the requirements specified in Resolution 8 of the 23rd meeting of the CGPM.

The text of Decision CIPM/107-05 (June 2018) was as follows: "*The CIPM noted that the Bolivarian Republic of Venezuela has not paid its contributions for six years. Pursuant to Resolution 8 adopted by the CGPM at its 23rd meeting (2007) it has been sent a formal notification inviting it to fulfil its financial obligations and reminding it of the procedure governing the recovery of arrears and exclusion. The CIPM decided to recommend to the CGPM at its 26th meeting to take a decision with regard to the exclusion of the Bolivarian Republic of Venezuela in accordance with Article 6 of the Regulations annexed to the Metre Convention*."

Dr McLaren said that the proposal to exclude the Bolivarian Republic of Venezuela was open for discussion. He proposed that the report of the meeting would note the recommendation of the CIPM under decision CIPM/107-05 of June 2018, and that the CGPM endorses this recommendation.

The President of the meeting asked if there were any comments or questions. There were no comments and the following decision "*the CGPM notes the recommendation of the CIPM under decision CIPM107-05 of June 2018, that the CGPM endorses this recommendation and decides that the Bolivarian Republic of Venezuela, which has persisted in its failure to fulfil its financial obligations, shall be excluded as state party to the Metre Convention with immediate effect*." was approved by a show of hands, with five abstentions. The Member States that abstained were: Argentina, Brazil, Croatia, Italy and Sweden.

30. Introduction of the text and voting on Draft Resolution E

Dr Barry Inglis, CIPM President, introduced Draft Resolution E "On the financial arrears of Member States and the process of exclusion". He commented that the CGPM had just been through a voting process in accordance with the requirements under Resolution 8 (2007) with regard to Venezuela (see §29). However, Resolution 8 (2007) fails to clearly address the situation of Member States in financial arrears and this is why it needs to be complemented by Draft Resolution E; the rationale behind the new resolution was explained.

Dr Inglis referred to an excerpt of Article 6 (1921) of the Regulations annexed to the Metre Convention which reads as follows:

6. *If a State remains three years without paying its contribution, the said contribution is distributed among the other States pro-rata to their own contributions. The supplementary sums thus paid by these States to make up the dotation of the Bureau are considered as advances made to the State in arrears, and are reimbursed to them in the event that it repays its arrears of contributions.*
7. *The advantages and prerogatives conferred by accession to the Metre Convention are suspended for those States in arrears by three years.*
8. *After three more years, the State in arrears is excluded from the Convention and the calculation of contributions is re-established in accordance with the provisions of Article 20 of the present Regulations.*

A literal interpretation of Article 6 implies that there should not be any need for a decision by the General Conference every time a situation arises regarding the exclusion of a Member State in arrears. Dr Inglis further explained the exclusion process envisaged pursuant to Article 6 paragraphs 6 to 8 (1921) of the annexed Regulations: In summary, the advantages and prerogatives are suspended after three years of default; exclusion after six years of default; and no decision at the General Conference is required. In other words, during the first three years after the default begins, there are no contributions paid to the BIPM from the defaulting State. For the second three year period, the contributions are distributed between the Member States. If there is no exclusion after six years the situation can continue for longer periods. Resolution 8 (2007) was adopted in an attempt to follow such a procedure. However, it has been noticed that its wording introduced an additional step in the exclusion procedure that was not intended, whereby a recommendation is made to the next General Conference, which then approves the exclusion. This step was the one carried out for the exclusion of the Bolivarian Republic of Venezuela.

Dr Inglis commented that although Resolution 8 (2007) was intended to address certain issues, it also introduced a number of difficulties. Indeed, its wording leads to confusion and uncertainty about when the exclusion of a State will actually take place because the date of a General Conference may not necessarily coincide with the end of the six-year exclusion period. In addition, Resolution 8 (2007) states that the formal notification inviting a defaulting Member State to fulfil its financial obligations is only initiated after six years in default, even though article 6 paragraph 8 of the annexed Regulations clearly stipulates that "the State in arrears is excluded from the Convention" after six years. Therefore, this provision in Resolution 8 (2007) opens a further period of negotiation allowing exclusion that can drift beyond six years. A further clause in Resolution 8 (2007) allows the CIPM to enter into a rescheduling agreement with a defaulting State. In doing so, the time it takes to conclude a rescheduling agreement can extend the period in default to beyond six years. Dr Inglis added that Resolution 8 makes reference to the General Conference. It says, "*The exclusion shall be notified by the CGPM to the Member States through the French Ministry of Foreign Affairs*." He remarked that the CGPM does not undertake administrative tasks; this is the responsibility of the CIPM.

Dr Inglis said that the intention of Draft Resolution E "On the financial arrears of Member States and the process of exclusion" is to clarify the situation and to fully implement Article 6 of the annexed Regulations, so that after six years of arrears the exclusion should be automatic. He recalled that following the informal discussions on Monday 12 November, two comments regarding editorial changes have been implemented and he invited the delegates to raise any other issues before the vote takes place on Draft Resolution E. The full text of Draft Resolution E is available in the Convocation of the General Conference on Weights and Measures (26th meeting) (see Appendix A).

The President of the meeting thanked Dr McLaren and Dr Inglis and said that there was time for a short discussion.

Dr Rietveld (CIPM) clarified that there had been a discussion in the CIPM about whose responsibility it actually is to exclude defaulting States and some CIPM members had abstained or voted against the proposal. He commented that personally, as a CIPM member, he did not want to exclude States, which is a very sensitive issue. He added that the essence of the first bullet point in "Decides" of Draft Resolution E is simply to implement what is already in the Metre Convention. The bullet point reads "*the CIPM shall implement Article 6 paragraph 8 of the Annexed Regulations*". His interpretation of the proposed first bullet point is that the CIPM implements what the governments have already decided among themselves. Therefore, wherever the CIPM is mentioned in Draft Resolution E, in the "decides" and in the amended first bullet point of "confirms" is that, in his understanding, the CIPM simply implements what has already been decided and has been agreed upon by the Member States. Dr Rietveld said that he would like to make this perfectly clear: excluding a Member State is not a decision of the CIPM, or its individual members. Dr Inglis thanked Dr Rietveld for the clarification.

Dr Steele (Canada) supported Dr Rietveld's view. He said that during the informal meeting on Monday 12 November, one of the topics that had been discussed from a procedural perspective was the uncertain period that occurs while waiting for the next CGPM to obtain the necessary approval for exclusion. Dr Steele asked whether the CGPM could be alerted early about States that are in default and have a *de facto* "anticipatory approval" in place concerning exclusion. Dr Steele agreed that the uncertain period that can continue for a long time creates confusion. He also agreed with Dr Rietveld that the CIPM should simply be implementing a decision of the General Conference.

Dr Milton (BIPM Director) replied that the exclusion process results in the information being sent to all Member States by the French Ministry for Europe and Foreign Affairs. He asked the BIPM Legal Advisor to confirm that the CGPM exists only when it is convoked and therefore it is not possible for the CGPM to issue a notification every time as required by Resolution 8 (2007). Mr Rojas Ceballos (BIPM Legal Adviser) confirmed that the CGPM is the plenary policy making organ of the BIPM consisting of delegates of all Member States. In principle, the CGPM only exercises its mandate pursuant to Article 3 of the Metre Convention when convoked (i.e. at least once every six years). Delegates attending the CGPM represent the positions of their respective governments when voting on the Resolutions in accordance with the Metre Convention and its annexed regulations. As has been pointed out, the CIPM's task would be to implement the will of the States that signed, and acceded to, the Metre Convention so as to apply its provisions, including article 6 paragraph 8 of its Annexed Regulations. The CIPM meets more frequently than the plenary organ, the CGPM. It is therefore not surprising that the organ that exerts the exclusive direction and supervision of the BIPM implements the Resolutions adopted by the CGPM, including those related to financial arrears of Member States such as Draft Resolution E.

Prof. Zvizdic (Croatia) said that he fully understands the intention that is proposed in Draft Resolution E because there will only be two steps before exclusion, rather than the current situation of three steps plus several additional years where no decision is taken. He recalled his comments at

the 24th meeting of the CGPM (2011), when four countries were put up for exclusion. His suggestion was accepted and some of these countries remained as Member States. He added that if a State does not pay its contribution then all Member States have to share the cost. Prof. Zvizdic reminded delegates that if a Member State is excluded, this cost also has to be shared. He concluded by saying that everything possible should be done to keep Member States within the Metre Convention.

Dr Inglis said that everything possible is done to retain Member States and clarified that a defaulting Member State receives communications when it reaches three-years in arrears. He stressed that the situation of Member States in arrears is closely followed-up by the BIPM and intense negotiations are constantly carried out for them to remain party to the Metre Convention. He reiterated that these actions should take place well before a defaulting Member State reaches six-years in arrears. Following this, and after six years, exclusion should be automatic.

Prof. Zvizdic (Croatia) added that there should be provision for countries that are unable to pay their contributions due to exceptional circumstances such as during time of conflict. Dr Inglis replied that there is no reason why the General Conference could not reconsider individual cases under exceptional circumstances such as these. However, he emphasized that Member States should be aware of the rules and should adhere to them.

The President of the meeting proceeded to a vote on Draft Resolution E by show of hands. It was adopted unanimously as Resolution 5 “On the financial arrears of Member States and the process of exclusion”.

Dr Steele (Canada) raised a point of order and said that he was not sure of the rules regarding the adoption of Resolution 5 (2018). Would it have the effect of abrogating the previous resolution, which is only mentioned in “recalling” as *Resolution 8 adopted by the CGPM at its 23rd meeting* and, if so, what has to be done to observe that or does it simply modify the procedure. Dr Inglis replied that his understanding is that Resolution 8 (2007) should not be abrogated because some parts of it need to be retained. The legal advice is that there is no need to abrogate Resolution 8 (2007) in its entirety. It includes indeed some key elements that need to be preserved, such as those related to settling of arrears before re-joining the organization and those related to the payment of the entry fee. Resolution 5 (2018) therefore completes, and has to be read in conjunction with, Resolution 8 (2007). In the event of any conflict or inconsistency, the provisions of Resolution 5 (2018) should prevail.

31. The Pension and Provident Fund of the BIPM

Mr Érard, Chair of the Pension Fund Advisory Board (PFAB), said that his presentation would report on actions following Resolution 3 (2014) “On the Pension and Provident Fund of the BIPM”, including the implementation of the different proposals made towards ensuring the long-term financial stability of the BIPM Pension Fund and the way forward.

Mr Érard recalled that, in Resolution 3 (2014), the CGPM invited the CIPM to:

- *implement its plans to provide sustainability for the BIPM Pension and Provident Fund whilst continuing to examine the longer term liability issue,*
- *inform Member States about the outcome of actuarial studies on the assets and liabilities of the BIPM Pension and Provident Fund in its regular financial publications and at the next meeting of the General Conference.*

Since the adoption of this resolution, several meetings were held in 2015 leading to the establishment of the Pension Fund Advisory Board (PFAB) (decision CIPM/104-33). The creation of this advisory board, exclusively dedicated to address pension related issues, was in line with the practice observed

in other international organizations. The PFAB, which is a Sub-Committee of the CIPM, has met six times since its establishment. Its members include three staff representatives, one pensioner representative, three CIPM members, the BIPM Director, and, when necessary, an external expert appointed by the CIPM. Mr Érard further commented that, as Chair of the PFAB, he had reported to the CIPM bureau on the ongoing work of the Board and that the PFAB has duly submitted its recommendations to the CIPM, when required.

Mr Érard presented a graph showing the projected Pension Fund assets from 2016 to 2056, which had been developed by the actuarial expert. He recalled that the actuarial study carried out by Mercer recommended that in order to retain the defined pension benefits, the contribution rate of staff members should be gradually increased up to 19.8 % or 18.8 % of the gross salary depending on whether they were recruited before or after the 1 January 2010 (pre-2010 section and post-2010 section). He further recalled that the actuarial study also recommended that staff recruited after 1 January 2017 (post-2017 section) will have to pay a fixed contribution of 15 % of the gross salary with certain reductions in the pension benefits compared with the other two sections.

Mr Érard indicated that all the proposals put forward by Mercer were discussed with the BIPM staff and management, and assessed within the PFAB. After thorough consultation, the CIPM approved the recommended measures in October 2016 (Decision CIPM/105-5 and CIPM/105-6). It should be noted that these measures were accompanied by a BIPM contribution to the Pension Fund of 46 % of salaries plus an additional BIPM contribution to the Pension Fund of 400 000 € in 2017 and of 150 000 euros per year for the following years, from the reserves, in order to guarantee the rights of the BIPM staff members (and former members) in the long term.

Mr Érard also recalled that the actuarial recommendations suggested the introduction of a “pension point” and of a five-year pension freeze. Subsequently, in October 2017, the CIPM decided unanimously to introduce a “pension point” that would not be adjusted for the period 2018-2019 (Decision CIPM/106-07). This two-year pension freeze was introduced instead of the five years proposed by Mercer. In this respect, Mr Érard informed the CGPM delegates that two pensioners have brought appeals against this decision before the ILO Administrative Tribunal (ILOAT).

Mr Érard finally recalled that one point discussed at the 25th meeting of the CGPM (2014) was that the Pension Fund assets should remain undiminished over a 30-year timescale. He commented that a prudent investment policy is being followed and that Mercer had been commissioned to carry out a study of the investment strategy in 2017.

Mr Érard concluded by presenting the next steps for the BIPM Pension Fund. An actuarial review will be carried out in 2019. It will be the basis for considering: the effectiveness of options for addressing the long-term stability of the Pension Fund; whether the “pension freeze” is still required; whether any other measures need to be taken and the possible impact of the strategy of preferring fixed-term appointments. Finally, the PFAB will undertake a continuous review of financial performance of the Pension Fund assets.

The President of the CGPM thanked Mr Érard for his clear presentation and opened the floor for comments.

Dr Inglis (CIPM President) indicated that the review of the Pension Fund has been challenging for all involved. Nevertheless, the outcome of the constructive consultations held with staff and with all its representative bodies made it possible to make progress. Dr Inglis commented that staff are entitled to express concern about the reduction of certain pension benefits, but in the long term, it is in their best interests that the BIPM adopts the measures recommended by the actuarial expert to ensure the stability of the Pension Fund.

The President of the meeting closed the fourth session.

Fifth session – 15 November 2018 (morning)

The President of the meeting welcomed the delegates to the Fifth Session.

32. Interim report of the Working Group on the BIPM dotation

Dr Inglis, Chair of the Working Group on the BIPM dotation, gave a short report of the discussions held on Wednesday 14 November. He said that 26 Member States had been represented at the meeting and, following a discussion, had indicated their intention in terms of voting on Draft Resolution D "On the dotation of the BIPM for the years 2020 to 2023". Twenty one of the 26 Member States represented at the meeting of the Working Group had indicated that they were intending to vote in favour and five indicated they would abstain. No Member States had indicated that they would vote against the resolution.

Dr Inglis asked delegates to reflect on this outcome before voting on Draft Resolution D takes place on Friday 16 November. He reminded them that if any Member State would vote negative on the resolution there would be serious implications because the dotation would not remain as it is and it would be necessary to convene a meeting of the General Conference again in 2019.

33. New frontiers for metrology in biology

Dr Marc Salit, NIST, gave an invited presentation on "New frontiers for metrology in biology". He began by giving background to the formation of the Joint Initiative for Metrology in Biology (JIMB) partnership, in which NIST and Stanford University are the founding partners. The JIMB was established to bring together academia, government and industry to define a new type of partnership to support 21st century life sciences and biotechnology. It aims to provide a collaborative home for measurement science and standards for "omics" and synthetic biology. The JIMB will focus on "operational mastery of living matter at the cellular level" through the organizing principle of "Measure, Model, Make"; through genomics and synthetic biology; and by measuring everything inside the cell. He stressed that it will not focus on metrology of biomaterial's properties, medical diagnostics, biotherapeutics, regenerative medicine, and diagnostic imaging.

He showed a simplified schematic of how a cell works. Firstly there is a genome, which is composed of DNA. Then there is the transcriptome, which is how the cell creates activity. Finally, there is the proteome, which is the material that the cell and everything around it is made of. He commented that these three biomolecular "cohorts" are the information carrying and activity determinant molecules in biology and they characterize living matter. A systematic approach is being taken to measure these extremely multiplexed measurands of heterogeneous systems with complex dynamics and interactions. Dr Salit said that a living cell is a "dance" of these interactions and it is governed by biophysics.

Biological measurement underwent a revolution in 2006 following the publication of the paper "Accurate multiplex polony sequencing of an evolved bacterial genome".[3] Following this publication, the Church Lab at Harvard Medical School decided to use charge-coupled device (CCD) cameras to image, in parallel, biochemical reactions on a planar substrate using a microscope. The

[3] Shendure, J. et al, (2005). Accurate multiplex polony sequencing of an evolved bacterial genome. *Science*, **309**(5741), 1728-1732.

result was the development of significantly improved DNA sequencers and a rapid drop in the cost of DNA sequencing; a human genome can now be sequenced for less than US$1 000. He noted that the scope for research opportunities in the biosciences is very large, with much competition. The latest budget for the National Institutes of Health in the USA is ~US$39 billion per year, which is significantly larger than the budget for any other science agency.

Dr Salit presented a roadmap of the current state of measurement capabilities in terms of the genome, transcriptome, proteome and metabolome and noted that there is more work to be done, particularly in terms of stakeholder outreach. The metrology in biology community is collaborating with other communities to develop standards for protocols in areas such as data representation, data exchange, requirements and specifications, calibration materials, and validation and benchmark materials and data. The metrology in biology community has found it most effective to work in partnership with researchers who have similar concerns about comparability, compatibility, validity, veracity of their work, and bringing the tools of chemical metrology to the genomic biology area.

So far the strategy has been effective, but only by working in partnership with stakeholders. Dr Salit noted that the metrology in biology community has made good progress at the genome level and outlined plans for further development. There are regulatory assays that can determine what elements from the genome get incorporated into the transcriptome and what elements of DNA end up in RNA. The next stage is to determine how the RNA ends up in protein and how that protein acts to give rise to metabolism and biological activity. There has been significant investment in building assays and measurement science, as well as tool development, throughout this phase. He said that he hoped there would be a global coordination effort at JIMB to include metrology into this endeavour from the start.

He mentioned the ENCODE project, which is an encyclopaedia of DNA elements that brings together a global consortium of researchers to develop methods to understand the functional meaning of the DNA genome. The consortium has developed requirements and specifications to describe what an assay is “doing” and they are interested in calibration materials. At the moment, ENCODE has many shared references but not calibration; the consortium is determining how to take the shared references and use them to build validation materials and validation strategies.

Dr Salit commented that by taking a cue from chemical metrology, it is possible to develop reference materials that work in biology. He cited the examples of External RNA Control Consortium (ERCC) Controls (quantitative transcriptome spike-ins) and Genome in a Bottle (GIAB) Genomes (qualitative human genomes): both these reference materials were created in consortium partnerships, have been widely adopted, and address specific needs in genome-scale measurement.

He gave technical details of the ERCC Controls and commented that the effective application of the system was facilitated by the use of an analytical software tool, the “erccdashboard”. This allows technology-independent ratio performance measures that show differences in performance across experiments, laboratories and measurement processes. The software tool allows quantitative, “analytical chemistry-type” measurements or analyses and the determination of “good” laboratory performance compared to “bad” performance.

The Genome in a Bottle (GIAB) consortium produces and disseminates human genome reference materials. It creates shared reference samples and validation materials to evaluate, demonstrate, refine and optimize technologies. In addition, it has developed a benchmarking dashboard with its stakeholders at the Global Alliance for Genomics and Health (GA4GH), and is meeting the needs of technology developers, regulators and clinical research teams.

Dr Salit gave an overview of the future direction of genomic technologies by giving the example of the single-molecule nanopore sequencer. This technology uses protein nanopores to sequence DNA.

Long strands of DNA are unwound by an enzyme and threaded through a protein pore, which generates an electrical signal that is proportional to the DNA nucleotide; this gives a readout of the underlying sequence. He added that the technology is currently not as accurate as short-read sequencers, which give data on a few hundred nucleotides, neverthless spectacular results are being achieved.

He said that single cells can be thought of as the "atoms of biology". The current situation with single-cell genomics is that researchers are starting to carry out single-cell measurements. Instead of measuring heterogeneous collections of millions of cells at a time, which is most of what genomics has been doing since its outset; it is now possible to look at populations of cells, one at a time. He cited the example of building a human cell atlas using a single-cell RNA-Seq. Initially, a graph of tissues and their gene expression profiles, from bulk measurements and two tissues (frontal cortex and hippocampus) was developed. Using single-cell data, and comparing how different individuals from a group of 22 cadavers overlapped, it was possible to demonstrate that particular cells have particular signatures, individual to individual.

Dr Salit concluded his presentation by proposing that NMIs, when establishing biometrology programmes should not simply focus on immediate needs, but should question what needs to be known in order to create a robust biology technology that satisfies the requirements of society and economies around the globe. He added that there is some "real" metrology to be carried out around the areas of metrics and comparability from data analysis.

The President of the meeting thanked Dr Salit and invited questions.

Prof. Phillips said that he was intrigued by the statistical analysis that made it possible to look at the difference between a "good laboratory" and a "bad laboratory" in terms of the false positives and true positives. He asked Dr Salit if he knew what it is that the good lab and the bad lab are doing differently and can these tools be used to help the "bad" labs to come up to the standards of the "good" labs. Dr Salit replied that it is possible to use these tools for that purpose. It is a complex process to go from the biological sample to the gene expression count and these tools allow researchers to analyse the sources of variability and assess the relative magnitudes.

Prof. Ullrich (CIPM) recalled that the 2014 Nobel Prize in Physiology or Medicine had been in the area of structural biology. He commented that traceability is a useful concept but is rarely used as a basis for quality infrastructure and regulations world-wide. He suggested that the needs of the biology community therefore need to be discussed.

Prof. Candel (President of the meeting) asked what was meant by the "metrology of completeness of databases" in Dr Salit's presentation. Dr Salit replied that much of the interpretation of genomic data comes from comparison to a database or a knowledge base and at the moment there are significant gaps. Most of the population of genomes that had been observed and archived into the databases are from people of European origin. He added that the genetic basis of disease is not solely a Eurocentric matter and the databases have not yet been completed for diversity. There are other questions of rare diseases that are under-represented in the databases. It is therefore difficult to estimate how confident a result is when comparing it against the database. Another set of activities involves looking at clinical genome sequencing as a whole. When a genome is obtained from a clinical sample, the question is how it should be analysed and how should it be functionally annotated and used in the databases. Throughout these activities it should be possible to understand the confidence, provenance and reliability of those data so that they can be compared in the future when this particular genomic variant reappears in a different person.

34. Measuring isotopes accurately for a safer, healthier and sustainable world

Dr Manfred Gröning, from the International Atomic Energy Agency (IAEA) Environment Laboratories, started by recalling the IAEA motto 'atoms for peace and development'. He commented that his presentation will focus on recent developments and will include a few examples of its work in assisting its Member States in the peaceful use of nuclear techniques and in addressing particular complex problems.

He presented a history of the IAEA network of Secondary Standard Dosimetry Laboratories (SSDLs), which was established in 1976 in association with the World Health Organization (WHO). The SSDLs provide calibration services for radiation dosimetry equipment and it is important that their measurement results are traceable to the SI. The BIPM has been instrumental in assuring the quality of the service the IAEA provides to its Member States since 1987. Furthermore, the BIPM participates in the SSDL Scientific Committee, which addresses issues in this network. The IAEA signed the CIPM MRA in 1999 and currently has 26 CMCs in this area.

The programme of IAEA/WHO dose audits for SSDLs was described. For the audit, a passive dosimeter is sent to the SSDL to be irradiated under reference conditions until a specified dose is reached. The irradiated dosimeter is returned to the IAEA Dosimetry Laboratory for evaluation, and the dose received by the dosimeter is compared to the specified dose; this enables the accuracy of calibrations performed by the SSDL to be verified. The traceability of measurements carried out at the IAEA Dosimetry laboratory itself is assessed and ensured by comparison with primary dosimetry laboratories, for example at the BIPM. The BIPM has provided reference irradiations for the IAEA/WHO dose audits for more than 20 years. The performance quality is within 1 % so it is fit for purpose.

Dr Gröning recalled that in 2012 the IAEA and BIPM signed a Memorandum of Understanding to define their main areas of cooperation. He highlighted the collaboration in the area of measurement standards and reference materials as being a relatively new area where the two organizations have strong links. He mentioned the topic of trace element analysis and nuclear data, noting that cooperation is ongoing in trace element analysis within the CCQM (toxic elements or toxic metals in algae) and nuclear data evaluation within the CCRI (decay data evaluations and enlarged standard cross sections); both are areas that could be expanded in the future.

He then moved on to the main topic of his presentation, which was cooperation in the measurement of stable isotope ratios and radionuclides. The IAEA has been active in this area for more than 50 years, providing reference materials for several different disciplines and scientific fields globally. There are more than 100 such materials available from the IAEA covering the fields of stable isotope analysis, environmental radioactivity, measurements in the field, trace element analysis and the determination of organic contaminants. These reference materials range from water samples to standards of brown rice, and they are instrumental in the measurement of low-level radioactivity in food products and in the environment. Examples include tuna fish and sea sediment.

Dr Gröning gave an explanation of what constitutes a stable isotope and how it is possible to measure the ratio of a stable isotope to different nuclides in any natural material by mass spectrometry. He gave the example of oxygen in water: the stable isotope is ^{16}O but a minor isotope, ^{18}O, is also found in natural ocean water samples in a ratio of 1 to 500. The total variation in natural systems for the ^{18}O to ^{16}O isotope ratio is only about 10 % world-wide. Therefore high-precision measurements are needed to take advantage of these slight isotopic differences. Accurate measurements of the oxygen isotopic composition of precipitation world-wide can provide a wealth of information on the origin, age and vulnerability to contamination of groundwater. The reference material used is Vienna

Standard Mean Ocean Water 2 (VSMOW2), which was prepared from natural samples and which has a total uncertainty of the isotopic composition for oxygen in the range of 0 ± 0.02 ‰. He added that its isotopic composition is used for the standard cells of triple point of water which is the basis of the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90).

He moved on to the subject of atmospheric carbon dioxide monitoring and said that Carrara marble IAEA-603 is the standard for carbon isotope ratio measurements world-wide, and its value is determined with extremely low uncertainty. This standard is used to measure any material that contains carbon by using mass spectrometry. Around 10 years ago, new technology emerged for measuring CO_2 that used the absorption of infrared laser light by CO_2, to determine the isotopic composition. However, this requires a new standardization approach, using gases instead of powdered carbonates. In addition, there are large differences in the isotopic composition of gaseous CO_2 depending on the source of the gas, so precise determination of the isotopic composition is needed.

The BIPM has provided and published calibration strategies for optical instrument isotope ratio measurements[4] to overcome this problem, including the characteristics of standards that are required for this purpose. In order to assess the comparability of CO_2 isotopic standards, a CO_2 isotope ratio comparison (CCQM-P204) will be carried out, and coordinated by the BIPM and IAEA in 2020. The comparison samples are being prepared by the BIPM using a high-precision gas blending facility (the BIPM Stable Isotope Reference Mixture Generator Facility), with measurements relative to IAEA-603 performed by the IAEA. Dr Gröning continued by explaining how accurate carbon isotope ratio measurements in atmospheric CO_2 can be used to monitor changes in CO_2 levels, global circulation and oceanic/biospheric uptake of CO_2 and to determine if rising levels of CO_2 are from natural or man-made sources. He said that the newly created CCQM Working Group on Isotope Ratios (CCQM-IRWG) will ensure the continued cooperation between the IAEA and the BIPM for the benefit of environmental monitoring world-wide.

He noted that stable isotopic signatures are useful in other environmental problem areas such as protecting endangered habitats and species. It is possible to validate the origin of timber from concessions versus illegal sources and to check the origin of ivory within the framework of the Convention on International Trade in Endangered Species (CITES): there are now five laboratories that can differentiate between two test samples of ivory using stable isotope signatures.

Dr Gröning concluded by mentioning the Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity (ALMERA) network. The IAEA coordinates this network of 177 laboratories designated by Governments of 89 of its Member States on emergency preparedness. These laboratories are able to provide assistance in case of any environmental emergency involving radionuclides. The IAEA provides support to 400 laboratories by carrying out annual independent proficiency tests of their performance in environmental radionuclide analysis. It also provides sample sets for environmental radionuclides covering water, organics and soils. He summarized by saying that the cooperation between the IAEA and BIPM can be very helpful. There are many aspects where an organization cannot operate alone, but together it is possible to give meaning to science for the benefit of Member States.

[4] Flores E., Viallon J., Moussay P., Griffith D.W.T., Wielgosz R.I., Calibration strategies for FT-IR and other isotope ratio infrared spectrometer instruments for accurate $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ measurements of CO_2 in air, *Anal. Chem.*, 2017, **89**(6), 3648-3655.

35. Traceability in laboratory medicine: a driver of accurate results for patients

Dr Graham Beastall, from the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC) and the Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM), gave an introduction to laboratory medicine in healthcare. The global cost of healthcare has been estimated at around US$8.2 trillion; about 2.5 % of that, or US$200 billion, is the cost of laboratory medicine. This amount can be further broken down so that the actual cost of reagents and equipment constitutes one third of this amount; the remainder is for staff and overheads. It is estimated that 35 billion *in vitro* diagnostic tests are performed annually and there are as many as 4 000 different *in vitro* diagnostic tests performed. In addition, all these figures are growing by 5 % annually.

Dr Beastall said that a high percentage of all clinical decisions are informed by data from pathology and laboratory medicine, so there is a central role for these disciplines. Up to 70 % of all clinical decisions can be informed by laboratory medicine data in some cases, and in some clinical settings. This is achieved for a cost of less than 3 % of the total healthcare budget. The central role means that laboratory medicine is involved in identifying risk factors and symptoms, diagnosing disease, determining appropriate treatment, and evaluating the response to treatment. Laboratory medicine is part of the multidisciplinary team at the centre of healthcare and with this influence comes a responsibility to deliver a high-quality service.

In terms of laboratory medicine methods, some measurands are structurally simple and available in pure form, for example glucose. Most measurands are complex and are often heterogeneous, for example viruses; method calibration therefore is a challenge. There are also more than a hundred diagnostics companies world-wide that produce *in vitro* diagnostic reagents and each uses its own calibrators. The result is that there is often variability between methods for the same measurand; the same patient specimen can give different results using different methods. This variability between methods can result in incorrect patient results, misdiagnosis, poor clinical outcomes and can impact patient safety. He cited the example of measurement of haemoglobin A2 (HBA_2), which is an important biomarker in establishing carrier status for Beta thalassemia; determining accurately whether or not a patient is a carrier for Beta thalassemia can depend on the specific method used.

Dr Beastall stated that traceability in laboratory medicine can be used to address this situation and he explained the metrological traceability chain. Metrological traceability is the property of a measurement result, which can be related to a reference through a documented unbroken chain of calibrations, each contributing to the measurement uncertainty. Therefore, traceability depends on both certified reference materials and the reference measurement procedures or methods in which they were used. For structurally simple measurands (analytes) it is possible to obtain pure substance primary reference materials; for more complex measurands pure substances may not be available. Primary reference measurement procedures are based on physical methods, for example isotope dilution mass spectrometry (ID-MS). The result is that for both reference materials or calibrators and for reference measurement procedures or methods, there is a hierarchy from product calibrator through to primary reference material or pure substance.

This hierarchy can be assembled into a metrological traceability chain. Starting at the bottom of the chain is a routine laboratory medicine service where a patient result is obtained using a routine laboratory method. That routine laboratory method will have been provided by an *in vitro* diagnostic kit manufacturer that will have had a product calibrator, a master calibrator and different measuring measurement procedures to establish the value of the calibrators. Depending on the measurand, it will be possible to go higher up the traceability chain to a NMI or a reference laboratory where there may be a secondary calibrator, a primary calibrator and primary reference materials and primary and

secondary reference measurement procedures. In cases where pure materials, primary reference materials or secondary reference materials are not available it may be necessary to use conventional calibrators, ideally international conventional calibrators, which may not be SI traceable, or international conventional reference measurement procedures.

Dr Beastall said that the importance of traceability in laboratory medicine was recognized in the 1998 European Union In-Vitro Diagnostic Directive (IVDD): 98/79/EC, which stated that "*The traceability of values assigned to calibrators and/or control materials must be assured through available reference measurement procedures and/or available reference materials of a higher order*." This was superseded in 2017 by EU In-Vitro Diagnostic Device Regulation (IVDR): EU/2017/746, which said "*9.3. Where the performance of devices depends on the use of calibrators and/or control materials, the metrological traceability of values assigned to calibrators and/or control materials shall be assured through suitable reference measurement procedures and/or suitable reference materials of a higher metrological order*".

The original directive challenged IVD method manufacturers to embrace metrological traceability in the IVD methods that they are producing for laboratory medicine. In response, the global laboratory medicine community came together to form the Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM) in 2002. The three founding members were the BIPM, the IFCC and ILAC. The JCTLM currently has 49 members from 14 countries. Its membership includes NMIs, external quality assessment providers, professional bodies and IVD manufacturers. The BIPM provides the lead on metrology and the secretariat.

Dr Beastall gave an overview of the work of the JCTLM: it maintains a global database of reference materials, reference methods and reference services; it coordinates the nomination and review process for database entries; contributes to ISO Working Groups on reference systems, which are responsible for global standards; provides news and freely available resources on traceability in laboratory medicine; and hosts a biennial scientific meeting. He added that the JCTLM database contains 289 certified reference materials, 194 reference measurement procedures and 176 reference measurement services across a wide range of different analytical systems.

He mentioned that NMIs provide higher order reference materials (both pure and matrix materials) to support the IVD industry and that currently 95 % of certified reference materials in the JCTLM database are supplied by NMIs. In addition, the BIPM functions as an external quality assessment provider for the NMIs by coordinating key comparisons; sending out samples of pure materials for NMIs to value assign and compare; and using its own laboratories to independently value-assign materials. He cited CCQM-K115: C-peptide purity, as part of the Peptide Primary Reference Material Comparison Series as an example of pure peptide comparisons coordinated by the BIPM for the NMIs.

Dr Beastall concluded by saying that the global population of 7.7 billion people is entitled to believe that all methods will give the same result on their specimen and that stakeholder coordination is required to address this challenge. He added that coordination on a global basis for 4 000 different measurands is quite a challenge, so the JCTLM has a significant future ahead of it.

The President of the meeting thanked the speakers and invited questions.

Prof. Phillips said that he had a particular interest in traceability in laboratory medicine because he is married to a retired medical technologist whose career spanned the era from when tests were done by bench methods by highly trained professionals to tests done by machine. Through that entire time, she would have advised that one should never make a medical decision based on a single laboratory result. He asked if the situation is different today. Dr Beastall replied by using cholesterol as an

example; there has been a cholesterol standardization programme in place for around 30 years. It does not matter which method is used anywhere around the world, it provides an answer that is consistent within about 2 % to 3 %. There is now recognition that standardizing cholesterol measurement world-wide has been a major contributor to the reduction in cardiovascular disease. As a result, for many of the entries in the JCTLM database, it is possible to say that the methods are acceptable and one measurement is enough, however for others, a medical decision should not be based on a single laboratory result.

Prof. Candel (President of the meeting) referred to a slide in the presentation by Dr Gröning, which showed a graph where atmospheric CO_2 levels were increasing at the same time as $\delta^{13}C$ was decreasing. He asked what can be learned from this data and what does it say with respect to CO_2. Dr Gröning replied that the CO_2 produced by the burning of fossil fuels is depleted in ^{13}C, when compared to atmospheric CO_2. The result is that if more of this CO_2 from the burning of fossil fuels enters the system over time, the atmospheric reservoir of CO_2 becomes progressively diluted in ^{13}C. The change is in the order of 1 ppm over 40 years: the reservoir associated with plants and oceans is vast when compared to the input of CO_2 from the burning of fossil fuels, which is comparatively small. However, it has a major impact because this input cannot be balanced out; only half of the CO_2 input can be absorbed by the biosphere or oceans and the situation in the future is unknown. The position could be better understood if there were more CO_2 monitoring stations to allow better determination of where emissions were coming from on a regional basis.

Prof. Phillips commented that the improvements in dosimetry of low-level radiation are impressive. He added that there has been ongoing controversy about whether there is any threshold for the ill effects of radiation. He asked Dr Gröning if the improvements that have been made in the accuracy and reliability of, especially low-level dosimetry, have been able to do anything to resolve some of these long-standing controversies. Dr Gröning replied that the question is so complex that there is no single answer. So far, the statistical evidence about the effects of low-level radiation is insignificant.

36. Report by the President of the CCQM

Dr Willie May, President of the Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (*Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie*, CCQM), presented his report on the activities of the CCQM since the 25th meeting of the CGPM (2014).

CCQM Executive summary

The CCQM is responsible for metrology in chemistry and biology, and its activities between 2015 and 2018 are reported here. The Committee updated and published its strategy document in 2018, addressing the key challenges it faces in the broad and complex field in which it operates. With a portfolio of over 170 key comparisons and over 130 pilot studies to date, it manages these by operating through eleven Standing Working Groups and additional *ad hoc* groups being convened as needed. During this period, the Bioanalysis Working Group was subdivided into three working groups, focused on protein, nucleic acid and cellular analysis, all of which have now implemented active comparison programmes. A working group on isotope ratios has been established in response to stakeholder needs, as a well as a task group on method defined measurands, which has been asked to develop criteria for assessing which of the growing number of method defined measurands should be covered within the scope of activities of the CCQM.

During this reporting period, 48 CCQM key comparisons were started as well as eleven stand-alone pilot studies, of which nine key comparisons and one pilot study were being coordinated by the BIPM. These numbers compare well with the predicted 16 new comparisons which the CCQM foresees that it will start each year, and a reduction from the number predicted in its previous strategy document, attesting to the improvements in effectiveness from the adoption of a "core key comparison" model within the CCQM which focuses more on interrogation of the skills and competencies maintained by NMIs/DIs to deliver services to their customers.

The CCQM has been active in consulting the global chemical community regarding the redefinition of the mole, and has worked with the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) to develop wording on the new definition that is acceptable to both the metrology and practitioner communities.

The CCQM continues to provide a forum for exchange of information on technical activities. In the last five year period the CCQM WGs have organized sixteen workshops with the goal of exchanging information on research and development activities in chemical and biological measurement science. The CCQM 2017-2026 strategy document references twenty five publications in peer-reviewed journals that were stimulated or resulted from CCQM comparisons.

The broad range of activities covered by the CCQM is exemplified by the eleven impact case studies provided in its Strategy Document. The studies describe the benefits and impact of internationally equivalent and traceable measurements in the healthcare, environmental monitoring, food safety, energy, and advanced manufacturing sectors.

Scope of the CC

The CCQM is responsible for developing, improving and documenting the equivalence of national standards (certified reference materials and reference methods) for chemical and biological measurements. It strives to progress the state of the art of chemical and biological measurement science and to work with global stakeholders to promote and increase the impact of metrology in chemistry and biology. It advises the CIPM on matters related to chemical and biological measurements including advice on the BIPM scientific programme activities.

The objectives of the CCQM are:

- to progress the state of the art of chemical and biological measurement science (including contributing to the establishment of a globally recognized system of national measurement standards, methods and facilities for chemical and biological measurements; and acting as a forum for the exchange of information about the research and measurement service delivery programmes and other technical activities of the CC members and observers, thereby creating new opportunities for collaboration).
- to reach out to new and established stakeholders (facilitating dialogue between the NMIs and global stakeholders in order to define new possibilities for metrology in chemistry and biology to deliver impact).
- to demonstrate the global comparability of chemical and biological measurements (through promoting traceability to the SI, and where traceability to the SI is not yet feasible, to other internationally agreed references; contributing to the implementation and maintenance of the CIPM MRA with respect to chemical and biological measurements).

Strategy

The CCQM strategy document covering the period 2017 to 2026 was published on 17 January 2018. This follows on from a complete review and revision of the previous document covering the

2013-2023 period, the last version of which was published in July 2014. The detailed list of comparisons planned for the 2017 to 2026 period continues to be updated on a six month basis by the CCQM.

A major change to the document has been a restructuring to reflect the generic objectives for all Consultative Committees, notably: to progress the state of the art of measurement science; to reach out to new and established stakeholders; and to demonstrate the global comparability of measurement standards.

The CCQM has continued to respond to the three key challenges identified in the first strategy document, and thereby has achieved the following:

- in response to the requirement to maintain an efficient, effective and manageable programme of comparisons, it has continued to develop and implement the core capability approach to key comparisons, which has allowed the foreseen number of comparisons required annually to underpin NMI capabilities to be reduced to 16 from the 19 foreseen previously.
- in response to the requirement to deal with new, emerging and evolving fields, it has established active working groups with well-defined activities and comparisons for protein analysis, nucleic acid analysis and cellular analysis as well as establishing a new working group on isotope ratio measurements.
- in response to the requirement to improve the efficiency of the CMC generation and review process, it has implemented the recommendations for the CIPM MRA review, including starting the implementation of broad-claim CMCs, and has seen the growth rate in the total number of CMCs related to chemical/biological measurements reduce.

The CCQM will continue to provide a forum for information exchange on leading edge measurement research activities. Mechanisms for achieving this include:

- Technical presentations as part of the CCQM WG activities
- Focused workshops on cutting edge measurement science research within the CCQM WGs
- Sector specific workshops organized by the CCQM
- Support of workshops with RMOs, NMIs and Stakeholders (for example Protein and Peptide Therapeutics and Diagnostics PPTD-2018, organized with the BIPM, NIM and JCTLM).

The CCQM has a long history in the organization of workshops with stakeholder and sectoral groups in order to understand their requirement for accurate and traceable measurement results and guide the work of the CCQM working groups (including the fostering of new working groups as appropriate). In addition, several BIPM organized workshops have provided further contact with stakeholders important to the CCQM, notably:

- BIPM Workshop on Global to Urban Scale Carbon Measurements, 30 June-1 July 2015;
- BIPM-NIM workshop on Protein and Peptide Therapeutics and Diagnostics, 1-3 June 2016 and 10-12 October 2018;
- BIPM-WADA Symposium on Standards and Metrology in support of Anti-Doping, 28-29 September 2016.

The CCQM will continue to work with international stakeholders with specialist workshops and when further collaboration is required, as well as invitations to participate in meetings of the CCQM WGs (for example IAEA, WMO, WHO/NIBSC, national and regional Pharmacopoeias, such as USP and EDQM) or the CCQM (e.g., IUPAC, WMO, WADA, Codex Alimentarius, WHO, IFCC, ENFSI, ISO/REMCO, ILAC, VAMAS).

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Comparisons and CMCs

The total number of NMIs/DIs providing chemical and biological CMCs is 61 (50 in 2012) from 48 different countries (39 in 2012). The total number of chemical biological CMCs in the BIPM KCDB is 6412 (October 2018) from 5718 in 2014. In the period 2015-2018, 48 CCQM key comparisons were started as well as eleven stand-alone pilot studies, of which nine key comparisons and one stand-alone pilot study are coordinated by the BIPM, to underpin these capabilities.

Impact Studies and Stakeholder Engagement

Eleven case studies have been reported in the CCQM 2017-2026 strategy document to highlight the impact of CCQM activities and their links to stakeholders. The benefits and impact of internationally equivalent measurement are described for example in:

- Healthcare
- Environmental Monitoring
- Food Safety
- Energy
- Advanced Manufacturing
- Redefinition of the SI units

The comparisons led by the CCQM WGs have contributed to the following examples of achievements:

- *Improved accuracy and quality assurance for Vitamin D measurements world-wide*. In CCQM-K132 metrology institutes demonstrated their capabilities for the measurement of vitamin D metabolites in two different serum pools. All participants demonstrated the capability of determining the main metabolite, 25(OH)D3, at levels ~25 ng/g with a coefficient of variance (CV) of 3 %. This comparison underpins critical programmes covering the production of certified reference materials and the complementary provision of reference values for External Quality Assurance Schemes, for Vitamin D that has been described as the “Vitamin of the decade” with a growing list of adverse health outcomes linked to its deficiency. Vitamin D is being studied for its possible connections to conditions such as diabetes, hypertension, autoimmune diseases, bone disorders and some types of cancer. High levels of Vitamin D can be toxic and lead to a range of symptoms with excess vitamin D reported to lead to damage to the kidneys. As a result, over the last decade there has been a world-wide increase in the level of vitamin D testing.

- *Support for standardization of diabetes diagnostics*. The CCQM-K115 key comparison allowed nine NMIs to compare their capabilities for value assigning C-peptide primary reference materials, a biomarker for natural insulin production. This has supported the development of a reference measurement system for C-peptide measurements, which will allow standardization of IVD measurements globally, and thereby providing improvements in diabetes diagnostics and management, a condition currently affecting over 450 million adults world-wide.

- *Supporting regulations for improvements in water quality*. Chemical pollution from pharmaceutical residues in water supplies poses a threat to the aquatic environment and human health, and this phenomenon has become one of the major emerging environmental

issues in recent decades. CCQM-K126 addressed reference methods for the measurements of pharmaceuticals in surface water, focusing on carbamazepine, at levels relevant to regulatory limits. This provides accurate assessment methods for measuring hazardous substances in surface waters which have been highlighted as indispensable tools to safeguard the environment and public health. With increasing water reuse and recycling the assessment of levels of compounds like pharmaceuticals in water will continue to be a high priority. Institutes that successfully demonstrated their capabilities in this comparison will have an international benchmark to underpin services they are able to offer across the broader classes of similar types of contaminants in water supplies.

– *Providing new standards to monitor greenhouse gas emissions and their sources*. The equivalence of the next generation of CO_2 in air standards was addressed in the CCQM-K120.a and b comparisons, during which 46 standards were compared. The comparison supports the development of the next generation of greenhouse gas standards, which will be valued assigned for CO_2 mole fraction and isotope ratio and matrix matched to atmospheric compositions, providing instrument manufacturers and atmospheric scientists with the standards required to monitor CO_2 mole fractions and isotope ratios accurately in real time. The activities have improved the state of the art in measurement science, benchmarked comparability and supported NMIs in working towards addressing the needs of stakeholders, which will permit the identification of sources and sinks of carbon at local, regional, and global scale, and contribute to the understanding of their relative impacts on atmospheric concentrations.

– *Food safety*. CCQM coordinated a specific key comparison CCQM-K103 “Melamine in Milk Powder” to demonstrate the capability of NMIs/DIs to provide accurate measurements for traces of melamine in milk and milk powder. Melamine (1,3,5-triazine-2,4,6-triamine), with its high nitrogen content, has been unethically added to food products in order to increase their apparent protein content. The melamine incidents that occurred as a result of tainted pet food in the United States in 2007 and tainted milk powder in China in 2008 caused significant impact. After these crises, the determination of melamine in food has become one of the important routine measurements for food testing laboratories. The key comparison assisted in ensuring the comparability of reference measurement procedures being used internationally to produce certified reference materials for food laboratories. In addition, several NMIs/DIs have been coordinating proficiency testing (PT) schemes for melamine in milk products and assigning reference values to the samples to provide participants with an independent benchmark to assess their accuracy. Melamine can be a challenging chemical to detect and quantify and tools such as matrix reference materials and PT schemes are essential in ensuring the quality of these measurements. Melamine continues to be a contaminant that is monitored in an ongoing way by the food industry and the CCQM’s activities have helped ensure there is an effective internationally recognized metrology infrastructure to support this.

– *Supporting use of alternatives to natural gas*. As world-wide natural gas resources are declining, there is a growing interest in exploiting alternatives to the use of conventional natural gas. Examples include biogas, biomethane and liquefied biogas (LBG). These gases need to be accurately analysed for their content, in order for them to be injected into the national gas grid, both to calculate energetic value and avoid impurities that would affect appliances. CCQM-K112 addressed biogas, a natural gas substitute. Biogas is very rich in carbon dioxide and nitrogen, and usually contains 0.3 % to 0.6 % oxygen and approximately 1 % hydrogen. The results of the key comparison underlined the challenges with measuring

the amount-of-substance fraction oxygen in energy gases, and will lead to better methods and standards for their characterization.

– *Supporting the development of next-generation solar cells*. In CCQM-K129, NMIs demonstrated the accuracy of surface analysis methods based on "total number counting methodology" to accurately characterise new generation multi-element alloy films. The film studied, $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS), is a promising material for next-generation solar cells. Recently, a power conversion efficiency of 22.6 % was achieved using CIGS based solar cells. The market size of thin-film solar cells is anticipated to reach US$30 billion by 2024. However, the analysis of CIGS film is very difficult because it is a multi-element alloy film with non-uniform in-depth distribution of the constituents. The calibration and measurement capabilities developed at NMIs and proven by the key comparison can now be implemented for thin film analysis of a variety of multi-element alloy films used in various advanced industries.

– *Supporting the SI unit redefinitions and accurate measurements of the Avogadro constant*. The Avogadro constant N_A was determined from measurements of the mass, volume, crystal lattice parameter and molar mass of a silicon sphere. A key requirement for the molar mass determination is measuring the absolute isotopic composition of the silicon. The molar mass is calculated by multiplying the amount-of-substance fractions by the relative atomic masses of the three naturally occurring silicon isotopes (^{28}Si, ^{29}Si, ^{30}Si). The Si isotopic measurements have presented a demanding experimental challenge. CCQM-P160 has facilitated a collaborative investigation of the silicon isotope ratio measurements, including: selection of an optimum solvent for dissolution of the silicon and for the ICP-MS measurements; the enormous disparity in amount between ^{28}Si and the other two isotopes; overcoming instrumental interferences when determining the very low levels of ^{29}Si and ^{30}Si; correcting for instrumental mass bias (K-factor calibration) between the three isotopes; methodology for processing the ICP-MS data to achieve a relative uncertainty of the molar mass of the silicon crystal of less than 1×10^{-8}. The outcomes of this work have been incorporated into the most recent measurements of the Avogadro constant.

Improving the state of the art of measurement science

The CCQM continues to provide a forum for exchange of information on technical activities. In the last five year period the CCQM WGs have organized sixteen workshops with the goal of exchanging information on research and development activities in chemical and biological measurement science and standards being undertaken by NMIs across a range of sectors. In addition, research and development activities have been stimulated by comparisons either in the preparation phase, frequently by the coordinating laboratory in developing and characterizing appropriate samples to demonstrate the compatibility of measurement capabilities or subsequent to comparisons where methods and capabilities have been developed to reduce measurement uncertainties. The CCQM 2017-2026 strategy document lists twenty five publications in peer-reviewed journals that were stimulated or resulted from twenty one CCQM comparisons.

Redefinition of the SI units

The CCQM activities related to the revision of the SI units have been led by the CCQM *ad hoc* WG on the mole, which has drafted a *mise en pratique* for the mole. Engagement and consultation with the chemical community has continued. A symposium on the mole was held as part of the ACS meeting in Boston in August 2015, in order to further publicise the changes being proposed. Strong

liaison with IUPAC has continued throughout the period. The IUPAC Technical Report "A critical review of the proposed definitions of fundamental chemical quantities and their impact on chemical communities" (IUPAC Technical Report)[5] was published in 2017. The Technical Report presents an overall positive appreciation of the redefinition of the mole, based on a specified number of entities (typically atoms or molecules) that will not depend on the unit of mass, the kilogram. Proposals on the exact wording of the redefinition have been submitted by IUPAC to the CCQM, which has incorporated these in its recommendation to the CCU, and are summarized in the publication "Definition of the mole" (IUPAC Recommendation 2017)[6]. The activities of CCQM, including the extended consultation with the international chemical community, are expected to lead to a definition of the mole, and by consequence the quantity of amount of substance, that will be better understood by the scientific community at large, whilst ensuring that the accuracy of chemical measurements are maintained and a no step function change in measurement will occur as a result of redefinition.

Outlook in the short and long term

The recently updated CCQM strategy document provides a comprehensive plan of activities for the CCQM in the near and longer term. The recommendations of the CIPM MRA review have been addressed in the strategy document, and the concept of broad claim CMCs is being implemented. The evolution of the total number of CMCs will need continued surveillance, with stabilization expected if the percentage coverage of NMI services covered by CMCs becomes the key performance indicator.

CCQM Data

CCQM set up in 1993	
President: W.E. May	Executive Secretary: R.I. Wielgosz
Membership:	24 members, six liaisons and eleven observers
Meetings since the 25th CGPM meeting:	20-21 April 2015, 21-22 April 2016, 27-28 April 2017, 19 20 April 2018
Eleven Working Groups:	– Cell Analysis (CCQM-CAWG) – Electrochemical and Classical Methods Analysis (CCQM-EAWG) – Gas Analysis (CCQM-GAWG) – Inorganic Analysis (CCQM-IAWG) – Isotope Ratios (CCQM-IRWG) – Key Comparisons and CMC Quality (CCQM-KCWG) – Nucleic Acid Analysis (CCQM-NAWG) – Organic Analysis (CCQM-OAWG) – Protein Analysis (CCQM-PAWG) – Surface Analysis (CCQM-SAWG) – Strategic Planning Working Group (CCQM-SPWG)
One *ad hoc* Working Group:	– Working group on the mole

[5] Marquardt R., Meija J., Mester Z., Towns M., Weir R., Davis R., Stohner J., A critical review of the proposed definitions of fundamental chemical quantities and their impact on chemical communities (IUPAC Technical Report), 2017, *Pure Appl. Chem.* **89**(7), 951-981.

[6] Marquardt R., Meija J., Mester Z., Towns M., Weir R., Davis R., Stohner J., Definition of the mole (IUPAC Recommendation 2017), 2018, *Pure Appl. Chem.*, **90**(1), 175-180.

CCQM Comparison activity	Completed/ In progress	Planned
CCQM key comparisons	172	12 per year
BIPM ongoing comparisons	1	1
CC pilot studies (stand-alone)	134	4 to 5 per year
CMCs	6 412 CMCs in 67 service categories registered in the KCDB	

The President of the meeting thanked Dr May and said there was time for one or two questions.

Prof. Phillips asked Dr May for clarification as to why the American Chemical Society had not initially supported the proposed change to the definition of the mole. Dr May replied that some of the objections had come from the academic community due to concerns about how they would be able to teach students the new definition. This was resolved through discussion and interventions by the metrology community.

37. Metrology to support innovation in molecular radiotherapy

Dr Glenn Flux, Royal Marsden Hospital and Institute of Cancer Research, opened his presentation with the key messages that the discipline of nuclear medicine enables the function of organs to be imaged and it is used for the diagnosis of malignancies. Molecular radiotherapy (MRT) is a cancer management field that treats cancers systemically with ionizing radiation. The international standardization of measurements of activity is critical to ensure safe and effective procedures and is used as a basis for clinical trials. He added that molecular radiotherapy is currently undergoing a revolution, with a rapid increase in availability of radioactive drugs, treatments and methods of administration. This promises significant benefits in healthcare. There are ongoing developments in standards for new radiotherapeutics and research into measurements of *in vivo* activity to calculate radiation doses delivered to tumours and organs in individual patients.

Nuclear medicine uses injected radionuclides that localize in selected tissues and give information about the function of those tissues. Whereas conventional x-ray and computed tomography techniques are used to give details of the anatomy of an organ, nuclear medicine gives information on how that organ is functioning, for example renal imaging with ^{99m}Tc and diagnosing tumours with fluorodesoxyglucose. The rationale behind molecular radiotherapy is that if a small quantity of a tracer's activity can inform how an organ is working by selectively localizing there, is it possible to give a larger quantity of a high-energy therapeutic agent to eradicate that tissue. MRT is therefore the treatment of cancer or, in some cases, benign disease, using therapeutic radiopharmaceuticals. The technique is used routinely to treat of benign thyroid disease and thyroid cancer. In addition MRT is used to treat bone metastases from prostate cancer, neuroendocrine tumours, liver tumours and neuroblastoma in children. New treatments are also emerging for breast cancer and lung tumours. MRT is the only medical treatment that allows *in vivo* imaging of the drug in real time.

Dr Flux commented that there is vast potential for MRT; a market analysis by MEDraysintell in 2015 predicted that the radiopharmaceutical market will grow by 26 % per year between 2014 and 2020. In addition there have been a number of recent high-value acquisitions of radiopharmaceutical companies.

There is currently a paradigm shift in treatments from the existing practice of treating according to the level of activity administered to treatment according to radiation dose. This addresses the problem

of widely varying biokinetics from one patient to another, for example if two patients are each given 7 400 megabecquerels of a radionuclide, although both patients receive the same activity the radionuclide will be distributed differently in the body and will deliver a very different pattern of radiation dose to the patient. In general, the radiation doses to normal organs vary by an order of magnitude and the radiation doses to tumours vary by two orders of magnitude. In terms of internal dosimetry there is ongoing development to standardize the radiation doses delivered to patients. The aim is to treat patients in a personalized manner according to the radiation doses delivered, which is common practice in external beam radiotherapy.

Dr Flux acknowledged the role played by the CIPM MRA in ensuring the international standardization of activity measurements. The CIPM MRA ensures that primary standards of activity are equivalent in different countries and that patients are administered the same activity. He added that a new system of uncertainty analysis in metrology of dosimetry for molecular radiotherapy has recently been devised and published.[7] He also mentioned the issue of ensuring that medical images in nuclear medicine are quantitative so that the distribution of the radionuclide in the body can be determined from the image. One difficulty is that nuclear medicine gamma cameras are designed to image small quantities of low energy gamma emitters for “qualitative” diagnosis. Therapy imaging requires “quantitative” imaging of high-energy, high-activity radionuclides. These cameras must therefore be calibrated to convert the counts acquired into absolute measurements of activity and to make corrections for “dead-time” if there is a higher count rate than then the system can handle. This is a complex task that requires standardization for multicentre trials. There are ongoing initiatives to standardize cameras across European centres, including MRTDosimetry (metrology for clinical implementation of dosimetry in molecular radiotherapy) and MEDIRAD (implications of medical low dose radiation exposure). The MRTDosimetry consortium, led by the NPL (UK), has compared ^{90}Y and ^{177}Lu measurement capabilities between different centres and has an ongoing multicentre ^{131}I dosimetry trial known as SELIMETRY. The latter is examining a drug called Selumetinib which is used to express the sodium iodide transporter in patients that are no longer iodine avid. MEDIRAD is a European Horizon 2020 project investigating the effects of low-dose radiation.

Dr Flux concluded by presenting a case study on the treatment of a 22-year old patient with neuroblastoma, which is a cancer of the neuroendocrine system found in children and young adults. Before receiving the new treatment, the patient had been through every form of chemotherapy, surgery and radiotherapy. A new protocol was developed, that will now proceed to European clinical trials. The protocol treats according to the radiation dose delivered to the bone marrow, which is the dose limiting organ. The patient was treated with ^{131}I meta-iodobenzylguanidine (mIBG). A total of 58 GBq of activity was administered, which is approximately eight times more activity administered than in the absence of dosimetry. The patient tolerated the treatment very well and the end result was that seven months later there had been a complete response, which is something that had never been seen before.

The President of the meeting thanked Dr Flux and invited questions.

Prof. Phillips asked if it is possible to relate the variability among patients to the genotype or if there is something else that might be identified before a therapy. Dr Flux replied that there is a lot of work being carried out to identify and characterize genotypes and into the personalization of drugs, but it has not made its way into this area yet; that will be the next step. The first step is to know what the radiation doses are and to achieve standardization.

---

[7] Gear J.I. et al, EANM practical guidance on uncertainty analysis for molecular radiotherapy absorbed dose calculations, *Eur. J. Nucl.Med. Mo.l Imaging*, 2018.

38. Report by the President of the CCRI

Dr Wynand Louw, President of the Consultative Committee for Ionizing Radiation (*Comité consultatif des rayonnements ionisants*, CCRI) presented his report on the activities of the CCRI since the 25th meeting of the CGPM (2014).

CCRI Executive summary

The CCRI is responsible for coordinating and supporting metrology for all applications of ionizing radiation. The work of the CCRI helps ensure that ionizing radiation can be used safely and effectively in healthcare, environmental health and safety, the nuclear industry and the defence sectors. Every year, ionizing radiation metrology affects 4 million cancer patients, 4 billion patients undergoing diagnostic x-rays and nuclear medicine scans and 11 million radiation workers. Accurate metrology is also essential for effective sterilization of medical devices (40 % of single-use medical devices are sterilized by ionizing radiation) and assuring the quality of radiation-processed materials. The work of the CCRI underpins all of these applications, by enabling the accurate measurement of radiation dose and activity.

The cornerstone of the CCRI's work is organizing comparisons to demonstrate the equivalence of national measurement standards, so that Member States can calibrate radiation detection instrumentation accurately for checking the radiation doses and activity to which patients, the workforce and the public are exposed. The CCRI works closely with the Ionizing Radiation Department at the BIPM, which provides the scientific facilities for more than 60 % of the comparisons in ionizing radiation metrology.

The CCRI strategy for 2013 to 2023 covers the development of standards for new applications, improvements in the efficiency of the international measurement system for radionuclide metrology and reducing costs for all stakeholders by joint utilization of facilities. The main achievements during the last 4 years include:

- A new standard for absorbed-dose-to-water in medium energy x-rays has been developed for comparisons with national laboratories that hold standards for radiotherapy using this energy range.
- The established pattern of comparisons has continued, including 37 comparisons for radiation dosimetry and 21 for long-lived radionuclides at the BIPM. Comparisons have been completed for the first time for some short-lived radionuclides used in medical imaging (^{11}C and ^{64}Cu).
- The challenge of establishing international traceability for high-energy photon dosimetry (with linear accelerators) has been addressed. The BIPM has arranged access to an accelerator at a new local research facility (DOSEO); a comparison service has been established and measurements have been completed for comparisons with two NMIs.
- The organization of the CCRI has been streamlined and the membership rules were aligned with the other CCs. All NMIs with major ionizing radiation metrology facilities are now included in the CCRI and the biennial meeting schedule has been reduced from 20 working days in 2014 to 10 in 2016. A further reduction is planned for 2019.
- A special issue of *Metrologia* on *Uncertainties in Radionuclide Metrology* has been published. In addition, Volume 8 of the *Monographie BIPM-5, Table of Radionuclides*, has been published. The CCRI played a key role in ensuring the adoption of new data for radiation dosimetry published in *ICRU Report 90*. A review article to assist NMIs in adopting these new data was published in *Metrologia*.

- There has been an increased focus on knowledge transfer and capacity building activities, with a programme of secondments and visits to the BIPM, participation in conferences and workshops such as those organized by the IAEA, and the organization of new workshops.

The number of ionizing radiation CMCs remains stable at around 4 000, but this large number of CMCs can result in a significant workload for the NMI staff responsible for periodic reviews. The CCRI is continuing to seek approaches to address this workload, whilst adhering to the principles of the CIPM MRA. Any changes need to be made without reducing the quality of the CMCs and balancing the needs of both large and small NMIs. A concept of "representative" CMCs is being considered that increases the number of services that can be covered by a single CMC.

A new strategy for the CCRI has been developed, to take into account the future requirements driven by developments in technology such as new radiotherapy methods and new drugs for radioimmunotherapy, and concerns of the potential risk to the environment from the large quantities of radioactive waste that will be generated from the decommissioning of legacy nuclear sites.

Scope of the CC

The CCRI's vision is a world in which ionizing radiation can be used for the benefit of humankind, confident that the associated risks are constrained by accurate, scientifically-rigorous measurement. Its mission is to discuss, foster, enable and coordinate the development, comparison and promulgation of national measurement standards for ionizing radiation. The CCRI aims to enable all users of ionizing radiation to make measurements at an accuracy that is fit-for-purpose, working with its stakeholders to be 'the voice of the customer'.

The scope of the work encompasses metrology for all applications of ionizing radiation, including dosimetry for radioprotection, radiotherapy and medical device sterilization, and radionuclide metrology for nuclear medicine and environmental protection. All ionizing radiation is included in the scope: alpha and beta particles, gamma- and x-rays, electrons, protons and heavier ions, and neutrons.

The CCRI's main tasks and deliverables are to:

- Plan and run comparisons, published in the Technical Supplement of *Metrologia*, including approving Key Comparison Reference Values (KCRVs)
- Produce guidance for NMIs, DIs and RMOs on CMCs and comparisons
- Oversee the international reference systems for radionuclide metrology
- Oversee the international measurement standards for radiation dosimetry
- Publish monographs on nuclear decay data and special issues of *Metrologia*
- Contribute to conferences and meetings
- Contribute to knowledge transfer, for example, by facilitating secondments and visits to the BIPM and through organizing workshops.

Strategy

The CCRI's long-term strategy was discussed at a Strategy Workshop held on 21 June 2017, which led to the formation of the CCRI *ad hoc* Working Group on Strategy (CCRI-SWG). This Working Group held its first meeting on 16 March 2018.

In line with the CCRI's vision, the new 2018-2028 strategy is aiming for an inclusive international measurement system for ionizing radiation. The main aims of the CCRI strategy are:

– To improve global comparability of measurements by: making comparison exercises more accessible and more efficient; increasing the scope to cover emerging requirements;

reducing the need for long-term, large-scale exercises; and optimizing the use of resources at NMIs/DIs and the BIPM.

- To build capability in smaller NMIs, by organizing knowledge transfer workshops and increasing secondments and visits to the BIPM working in partnership with NMIs/DIs and liaison organizations such as the IAEA.
- To advance the state of the art for priority issues of benefit to NMIs, through supporting the organization of targeted joint research projects.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

The CCRI has held two meetings since the 25th meeting of the CGPM: 17 May 2015 and 29-30 June 2017. Both meetings were presided over by Dr Wynand Louw.

The CCRI was streamlined in 2016/2017. The three Sections, which cover radiation dosimetry, radionuclide metrology and neutron metrology, now function under the auspices of the CCRI committee as Working Groups. The technical working groups (such as the Key Comparison Working Groups) continue to report to the relevant Sections, with the over-arching CCRI *ad hoc* Working Group on Strategy (CCRI-SWG) and CCRI RMO Working Group on IR CMCs (CCRI-RMOWG) reporting to the CCRI. The first meeting in the new format was held in 2017 where the duration of the meetings was reduced to 10 working days (compared to 20 in 2014). It is planned to further consolidate the meetings in 2019 to fit within one week.

The CCRI works closely with staff at the BIPM to deliver comparison exercises and to help steer development projects; this partnership reduces the burden on NMIs / DIs to organize comparison exercises and facilitates knowledge transfer activities.

Main activities

As reported to the 25th meeting of the CGPM, the number of ionizing radiation CMCs remains relatively stable at around 4 000. Although there are relatively few new CMCs submitted every year, the large number of CMCs means that the requirement for periodic reviews can be burdensome on some NMI staff, depending on details of the review processes within the RMO. There have therefore been extensive discussions concerning the implementation of the findings from the review of the CIPM MRA. Efforts to simplify the interpretation of CMCs are continuing by trying to balance the interests of larger NMIs, which need to reduce the complexity of reviewing CMCs, with the needs of smaller NMIs where direct links to services can be established easily under the current definition. Guidance has been discussed at the CCRI but there is further work to be done on this topic.

There has been progress in implementing a clear strategy for comparisons. A cycle of comparisons has been agreed, with procedures in place to ensure that one comparison exercise can be used to underpin several CMCs (the Measurement Methods Matrix used in radioactivity being one example). The regular cycle of comparisons for radiation dosimetry has continued, with 37 comparisons being carried out during the period, enabling NMIs to demonstrate the continued accuracy of their primary standards.

One major issue of concern to the CCRI in recent years has been establishing a firm basis for traceability for dosimetry for accelerator-based radiotherapy. Accelerators are rapidly replacing high-activity sealed sources for radiotherapy; there are already 12 000 accelerators in use compared to 2 000 sealed sources, and there is growing demand for comparisons and calibrations. An arrangement has been reached between the BIPM and a research facility (DOSEO) for access to a linear accelerator: the BIPM primary standard has been used to calibrate the beams available on the facility, and a comparison service was launched in 2017. The proximity of this French facility to the BIPM has enabled BIPM staff to set up the comparison service with no loss in accuracy and

efficiency. Two NMIs, KRISS (Republic of Korea) and the METAS (Switzerland) have already participated.

A number of NMIs have developed primary standards for absorbed dose-to-water in medium-energy x-ray beams. To comply with the needs of the NMIs to compare and validate their standards, a new service, based on the existing free-air primary standard, has been established at the BIPM. A new key comparison was approved by the CCRI(I) and registered in the KCDB as BIPM.RI(I)-K9. The first comparison was completed in 2017 with the PTB (Germany) and the second with the LNE-LNHB (France) is in progress.

Comparisons of standards of gamma-ray emitting radionuclides have continued using the *Système International de Référence* (SIR) and an equivalent transportable instrument (SIRTI). Both instruments are established and convenient approaches to demonstrate equivalence, reducing the need for large-scale comparison exercises; the CCRI approved updates of the KCRVs for 16 radionuclides, including, for the first time, results from the ^{99m}Tc and ^{18}F SIRTI comparisons.

The SIR played an important role in demonstrating the equivalence of primary standards of ^{223}Ra (a new therapeutic agent); this radionuclide is particularly difficult to standardize and the comparison enabled NMIs to confirm their standards, supporting the roll-out of the new drug world-wide.

The SIR is not suitable for use with short-lived radionuclides as they decay during transit to the BIPM. However, diagnostic imaging in nuclear medicine uses radiopharmaceuticals based on such short-lived isotopes. The CCRI therefore supported the development of a travelling instrument (SIRTI) that can be taken to NMIs for comparison exercises; the instrument has been used at ANSTO (Australia), NRC (Canada), NIST (USA), POLATOM (Poland) and NMISA (South Africa), and has been used to compare standards of ^{11}C and ^{64}Cu for the first time. A strategic approach to using the SIRTI has been agreed by the CCRI-Section II: Key Comparisons Working Group (CCRI-KCWG(II)), priority radionuclides have been identified and new measurement campaigns will be launched in the 2020-2023 work programme.

The CCRI co-ordinated the publication of a *Metrologia* Special Issue on *Uncertainties in Radionuclide Metrology* (Volume 52, Number 3). This publication covers the estimation of uncertainties across the field, including articles that are of use in nuclear medicine clinics (ionization chambers) and environmental monitoring laboratories (gamma-ray spectrometry). The latter article has been referred to in a draft ISO standard on gamma-ray spectrometry, and will consequently be used in testing laboratories world-wide.

The period also saw the publication of new recommended values for basic quantities related to the interaction of radiation with matter for radiation dosimetry (ICRU Report 90, *Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications*). Research work carried out at the BIPM made an important contribution to these new recommendations. The CCRI has been instrumental in disseminating the use of these new data to the metrology and user communities, particularly through the publication by the BIPM of a review article in *Metrologia*, 2018, **55**(4)[8] ensuring that estimates of patient dose continue to be based on the best available scientific data.

A further volume of nuclear decay data has been published as a *BIPM Monographie* (BIPM-5, Volume 8, 2016) covering recommended decay data for 32 radionuclides. The decay data are evaluated by the Decay Data Evaluation Project, led by LNE-LNHB (France) with the participation of institutes world-wide; publication as a BIPM monograph ensures that national measurement institutes (and hence most measurement laboratories) adopt the data. This work has helped to

[8] Burns D., Kessler C., Re-evaluation of the BIPM international dosimetry standards on adoption of the recommendations of ICRU Report 90, *Metrologia*, 2018, **55**(4), R21-R26.

harmonize measurements of radionuclides: prior to publication as a *BIPM Monographie*, laboratories used different values drawn from a wide range of publications and databases.

There is a long-standing knowledge transfer scheme in place: participants in dosimetry comparison and calibration exercises often work alongside BIPM staff to carry out the measurements, including staff from ENEA-INMRI (Italy), ININ (Mexico), SCK•CEN/LNK (Belgium), SMU (Slovakia), KRISS (Republic of Korea), METAS (Switzerland) and NRC (Canada). This has been supplemented by secondees working at the BIPM on longer-term projects.

A joint workshop with representatives from the CCEM was held at NIST in September 2018, to discuss opportunities to use new low electrical current measurement technologies for instruments used in radionuclide metrology. Twenty delegates attended from the radionuclide metrology and electrical metrology communities, and the conclusion was that two approaches showed promise. The workshop will be published as *NIST Conference Proceedings*, and a study of one of the techniques will start at the BIPM in 2019. If successful, the new technology could enable NMIs to replace obsolete electronics and reduce the dependence on sealed radioactive sources for ionization chambers.

Challenges and difficulties

There are two external regulatory challenges to maintaining the international measurement system in its present form. First, shipping radioactive sources for comparisons can be very complex and time consuming due to “multiple layers of regulations, lack of harmonization and over-regulation in transport authorities”. This applies in particular to comparisons of neutron source emission, but shipments of radioactive sources are also impacted. Work is under way to address this issue where possible, for example, by setting up an on-demand comparison service for beta-emitting radionuclides similar to the SIR. This project is not without its own technical challenges; the trial exercises in 2014 and 2017 gave inconsistent results. The project restarted at the BIPM in September 2018, with support from a dedicated team of experts from the LNE-LNHB, POLATOM, PTB and NPL, the end-goal of simplifying comparisons of important radionuclides with applications in nuclear medicine is making the effort worthwhile.

The second challenge comes from the increasingly stringent regulations on the use of high-activity sealed sources. Such sources are used in dosimetry (to produce reliable photon beams for comparison exercises) and in radioactivity (to check the reproducibility of measurements in ionization chambers). The approach being taken is to share resources where feasible: the ^{137}Cs irradiator had to be closed at the BIPM to comply with these regulations, and work is starting for the transfer of the BIPM standard to the IAEA. The ^{137}Cs beam provides an essential comparison point for radiation protection standards: the service will continue to be run by BIPM staff using the BIPM primary standard and any increase in uncertainties due to the transfer are expected to be negligible for radiation protection dosimetry. The search is on to find replacements for legacy sealed sources used in radionuclide metrology - an IRA/NPL/LNE-LNHB joint project has been launched to construct ^{166m}Ho sources to replace ^{226}Ra for the SIR and similar instruments at NMIs.

Outlook in the short and long term

In the short term, the focus of the CCRI will be on addressing the key issues impacting the field (ensuring there are efficient and effective processes for reviewing CMCs, reducing the number of large-scale comparison exercises and reducing dependence on sealed sources).

For the longer term, the drivers for ionizing radiation metrology remain strong and will bring the need for new comparisons and new science:

- Expansion in the use of new radiotherapy techniques (including proton therapy), leading to the need for new primary dosimetry standards and associated comparisons,
- Continued expansion in the use of diagnostic medical examinations,
- Concerns over radioprotection issues for workers, patients and the general public,
- Miniaturization of electronic devices making them more susceptible to the effects of radiation damage,
- New industrial applications of high-dose irradiations,
- Development of new therapeutic radiopharmaceuticals (radioimmunotherapy), requiring primary standards and techniques for comparing standards of the radionuclides,
- Growth in the work for clearing legacy nuclear sites, testing land quality and tighter regulations for naturally-occurring radionuclides, resulting in an increase in the need for comparisons of very long-lived radionuclides,
- Metrology for the next generation of nuclear power stations, including fusion reactors,
- Demands for high accuracy measurements for characterizing samples of illicit radioactive materials (nuclear forensics).

Finally, the CCRI expects closer links to develop with the IAEA, as the major international organization working in the field.

CCRI Data

CCRI set up in 1958 (From 1958 to 1999 the committee was under the name CCEMRI.)

President: W. Louw	Executive secretary: S. Judge		
Membership:	Eight members, three liaison organizations and 14 observers		
Meetings since the 25th CGPM meeting:	17 May 2015, 29-30 June 2017		
Three Sections:	–	CCRI Section I	X- and gamma rays, charged particles
	–	CCRI Section II	Measurement of radionuclides
	–	CCRI Section III	Neutron Measurements
Seven Working Groups:	–	CCRI *ad hoc* Working Group on Strategy CCRI-SWG	
	–	Working Group on IR CMCs CCRI-RMOWG	
	–	Brachytherapy Standards Working Group CCRI(I)-BSWG(I)	
	–	Key Comparisons Working Group (Section I) CCRI(I)-KCWG(I)	
	–	Key Comparisons Working Group (Section II)CCRI(II)-KCWG(II)	
	–	Key Comparisons Working Group (Section III)CCRI(III)-KCWG(III)	
	–	Extension of the SIR to beta emitters Working Group CCRI(II)-ESWG(II)	

CCRI Comparison activity	Completed	In progress	Planned [2019-2023]
CCRI key comparisons (and supplementary comparisons)	8+(0)	4+(6)	1 per year (Section II)
BIPM comparisons	51	14 (dosimetry) 26 (radioactivity)[9]	20 per year
CC pilot studies	0	4	1 (pilot study for ESIR)
CMCs	3 985 CMCs registered in the KCDB		

The President thanked Dr Louw and opened the floor for a discussion.

Prof. Phillips asked Dr Louw about neutron radiation, which is becoming more and more prevalent and the associated metrology, which is becoming more important. He recalled that neutron detectors use ^{3}He and, since it is becoming increasingly difficult to find ^{3}He for research purposes, how will this shortage affect neutron detectors. Dr Louw referred the question to Dr Judge, who commented that he was aware of the shortage and that there are ongoing efforts to replace ^{3}He detectors with alternative techniques.

Dr Milton (BIPM Director) recalled the presentation given by Dr Gröning about the requirement for standardization of environmental radioactivity measurements. He asked what steps are required to initiate CCRI activity in that field and to trigger appropriate activity in the NMIs. Dr Judge replied that there is a meeting of the Key Comparison Working Group in this particular field in the near future. One of the issues is the global acceptability of reference materials, particularly for nuclear decommissioning because many of the nuclear power sites world-wide are reaching the end of their useful life. There is a wider variety of radionuclides that will have to be measured in a wider variety of different matrices. The issue of how the CCRI and the BIPM can contribute to giving the public and users more confidence in the reference materials is something that the BIPM will be exploring, with the aim of starting up a new comparison service in the next programme. Dr Gröning added that this is related to the IAEA ALMERA network, which was set up in response to interest from its members in the creation of reference materials for contaminated waste from nuclear plants. The IAEA is exploring the possibility of creating such reference materials and this could provide a link for future cooperation.

Prof. Candel (President of the meeting) asked if there is any relevant research in the area of aircrew exposure to radiation in high-altitude flights. Dr Louw replied that there is currently a focus on dose measurements for this type of exposure. Work is under way at iThemba (South Africa) to establish a reference beam for 200 MeV. He added that 60 MeV to 200 MeV beams are used to assist with the calibration of dose meters that are used for this type of monitoring and it is important that systems are in place to monitor the dose accurately.

The President of the meeting closed the fifth session.

[9] ‘In progress’ means that the measurements have been carried out and the report is in progress.

Sixth session – 15 November 2018 (afternoon)

The President of the meeting welcomed the delegates to the Sixth Session.

39. Standards and measurement science for nuclear test monitoring technologies

Dr Julien Marty, from the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), began by thanking Dr Milton for the invitation to give this presentation and Dr Usuda for his continuing support to the activities of the CTBTO. He quoted Article 1 of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) which states that "*Each State Party undertakes not to carry out any nuclear weapon test explosion or any other nuclear explosion, and to prohibit and prevent any such nuclear explosion at any place under its jurisdiction or control*." The treaty was opened for signature on 24 September 1996 in the UN. It is almost universal, with 184 States having signed. However, the treaty has not yet entered into force because to do so requires ratification by the 44 nuclear technology holder States listed in annex two of the treaty; eight of these States have not yet ratified it. As a result, the full name of the organization is currently the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, although it is simply referred to as the CTBTO.

The role of the CTBTO is to build up a verification regime and promotion of the treaty's universality. The organization is based in Vienna and the commission is composed of two main bodies: a plenary body composed of all States Signatories (PrepCom) and the Provisional Technical Secretariat (PTS). The PTS includes more than 260 staff from more than 70 countries.

Dr Marty explained the verification regime, which is made up of four components. The first is the International Monitoring System (IMS), which is a global network of 337 monitoring facilities that send data in near real-time to the International Data Centre in Vienna. The second is consultation and clarification. If a potential non-conformity is observed by the IMS, the Member States will consult between themselves and can request clarification from a Member State. The third component is on-site inspection, which can be used to clarify any potential non-conformity. The final component is confidence-building measures, which are used to prevent the misinterpretation of data and support the calibration of monitoring tools.

Dr Marty said that his presentation would focus on the IMS. This system consists of 337 facilities and relies on four technologies: seismic (170 facilities for listening underground); hydroacoustic (eleven facilities for listening under water); infrasound (60 facilities for listening above ground); and radionuclide (80 facilities to detect potential radioactive emissions). A total of 88 % of the IMS facilities have been certified and send data to the International Data Centre. He gave an overview of how the monitoring network and the four different technologies work.

The main objective of the CTBTO is to detect nuclear tests. Dr Marty used the example of a nuclear test on 3 September 2017. The test was detected by 134 stations in the CTBTO International Monitoring System, including seismic, hydroacoustic and infrasound facilities. As the number of stations in the IMS increases, so the location accuracy improves and for the 2017 test, the location accuracy was ±6.7 km.

The CTBTO is able to detect other "non-nuclear" events and because it operates a very strict requirement for data availability and data equality, it provides a valuable set of geophysical data that can be used in civil applications; the International Data Centre located 556 337 seismo-acoustic events between February 2000 and November 2017. The most well-known civil application is the

provision of tsunami warnings. The CTBTO has an agreement with 14 tsunami warning centres to share this data in real time and a specific process has been put in place that can read an alert 10 minutes after real-time detection of an earthquake that could potentially generate a tsunami. Civil applications for infrasound technology include the detection of volcanic eruptions, which is important for the aviation industry to prevent ash plumes from causing damage to aircraft. Infrasound technology has the advantage over satellite technology in the detection of ash plumes in that it can operate even when there is dense cloud cover. The CTBTO has an agreement with the International Civil Aviation Organization (ICAO) and the Volcanic Ash Advisory Centers (VAACs) as part of the EU-funded Atmospheric Dynamics Research InfraStructure in Europe (ARISE) project to share ash plume alerts based on data from the infrasound network. The ARISE project also uses data from the CTBTO to better explain the dynamics of the middle atmosphere to improve weather forecasting and to refine current atmospheric models. Additionally, the infrasound network is used to monitor airburst bolides, giving improved statistics on near-earth objects impacting the atmosphere.

Dr Marty highlighted the importance of the radionuclide monitoring network by citing its use following the Fukushima accident on 11 March 2011. The first traces of radionuclides from the site were detected by the IMS radionuclide network and information was shared with States Signatories on 13 March 2011. Presentations were made to States Signatories on 15 March 2011 and on 17 March 2011 radionuclide observations were shared.

The main topic for the CTBTO remains the detection of nuclear tests. To do so requires a measurement system that measures ground motion or pressure fluctuation as accurately as possible. It is vital for the credibility of the organization that its data are trustworthy. He detailed the standards that exist for the different technologies and highlighted the need for validated CMCs across the IMS infrasound, seismic and hydroacoustic monitoring ranges. To achieve that objective, the support of the global metrology community will be required. For the radionuclide monitoring technology, CMCs are already available. Thirteen out of the 16 IMS Radionuclide Laboratories are already certified, including four with noble gas capability. Standards are used for proficiency testing of IMS radionuclide laboratories, and for the station calibration.

The President thanked Dr Marty and asked if microphones for hydroacoustic monitoring are placed in the Sound Fixing and Ranging (SOFAR) channel. If this is the case, does this mean that they are at 900 metres below sea level? Dr Marty replied that the SOFAR channel is a horizontal layer of water in the ocean at which depth the speed of sound is at its minimum and its depth will depend on the latitude and therefore the station location. He confirmed that it will indeed be located hundreds of metres below the ocean surface.

Prof. Candel asked a second question relating to how the position of an explosion is determined from the data received from the devices and what is the uncertainty on the location. Dr Marty said that when data are received they are first checked for quality and are authenticated. The data from each station are then processed and categorized to filter explosive events from other sources of data. The final stage is to use these data to build an event.

Dr Louw (CIPM) asked if the measuring instruments at various sites are calibrated within the country they are sited in, if the capability to do so exists there. Dr Marty commented that a different mechanism is used depending on the technology. In the case of seismic or the infrasound technology the CTBTO uses a reference laboratory, for example infrasound technology is calibrated by Sandia National Laboratories (USA) or the *Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives* (CEA, France). These laboratories have the highest level of standards at present and the CTBTO sensors are sent to them for calibration on a regular basis; this results in what are referred to as "golden sensors". These golden sensors are then used to calibrate other sensors that will travel back

and forth between the CTBTO and the stations. There is a requirement to calibrate all of the CTBTO's measurement systems at least once a year at all of its stations.

Mr Henson (BIPM) referred to the radionuclide facilities and asked if it is useful to monitor more than one radionuclide, as the temporal and spatial variation will depend on the properties of the radionuclide. Dr Marty replied that the IMS monitors many different isotopes, especially for the noble gases, with xenon being the main one.

Dr Sung (Republic of Korea) asked what happens to signatories to the CTBTO if they fail to comply with its rules and secondly, how the work of the CTBTO is funded as the IMS appears to be an expensive network. Dr Marty commented that the CTBTO provides information to its Member States following any suspicious event. It is then up to the Member States at the UN to take decisions based on that purely technical information as to whether or not they impose sanctions; this is not the role of the CTBTO. He said that funding comes from contributions from the CTBTO's 184 Member States, which is linked to the UN scale of assessment. The IMS is considered to be a cost-effective way to monitor nuclear testing compared to other technologies, such as satellite-based systems.

A member of the Tunisian delegation asked for clarification regarding two issues. The first was about the fact that for hydroacoustic technologies, the CTBTO has primary standards but no CMCs. The second relates to the impact of the revision of the SI on results because high-accuracy measurements are needed. Dr Marty answered that, for hydroacoustic technologies, the issue of primary standards is linked to the frequency range. The CTBTO has primary standards for some frequency bands but not all of them. The band of interest for the CTBTO is not completely covered by CMCs. Regarding the impact of the revision of the SI, it will have consequences at the very highest level but a limited impact on measurements, as the way measurements are carried out will not change.

40. Report by the President of the CCAUV

Dr Takashi Usuda, President of the Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration (*Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations*, CCAUV) presented his report on the activities of the CCAUV since the 25th meeting of the CGPM (2014).

CCAUV Executive summary

The CCAUV covers quantities in the field of acoustics, ultrasound and vibration, all of which concern mechanical waves in various media (air, water and solids) and in structures (machine components, vehicles, buildings, and even human tissues and bodies). Although the measurement units that the CCAUV supports are not fundamental units of the International System of Units (SI), they have a direct relationship with public safety, health, and security as these phenomena are experienced in everyday life. Clear routes for future planning of the activities of the CCAUV have been identified through the strategic planning process, which revealed the importance and priority of acoustics, ultrasound and vibration (AUV) to its stakeholders.

Scope of the CC

The remit of the CCAUV is to advise the CIPM on all scientific matters and issues that influence metrology in the fields of mechanical waves: acoustics (A), ultrasound and underwater acoustics (U) and vibration (V). It identifies and organizes key comparisons (KCs) in these four fields to establish global comparability of measurements and traceability to the SI. The CCAUV also acts as the focus

and network for this diverse community, to discuss the results of latest research to support emerging areas, and to develop common aims and collaboration between NMIs and DIs in Member States or with other relevant bodies.

Strategy

In 2017, the CCAUV reviewed its strategy to illustrate the present and future metrological needs for applications in AUV. The BIPM does not carry out any activities in these fields; as a result the planning uniquely covers NMIs, DIs and their stakeholders. The published CCAUV Strategic Planning document gives a detailed analysis of each separate discipline.

The CCAUV has now reached the stage where repeat KCs are being carried out in addition to considering new ones. The comparison phase within all four fields has matured and is dominated by repeats. Additionally, these repeat KCs are characterized by broadened scope, spanning increased frequency ranges, which reflect the changing demands of users.

To achieve the highest efficiency and quality, the CCAUV is supported by its three Working Groups (WGs): the Working Group on Strategic Planning (CCAUV-SPWG) oversees revision of the CCAUV strategy and associated documents on a regular basis, it maintains a watching brief on developments and evolution in relevant scientific fields. The Working Group for RMO Coordination (CCAUV-RMOWG), among other things, works to resolve any obstacles to the review of inter-RMO calibration and measurement capabilities (CMC) and to harmonize intra-RMO CMC review processes. The Working Group for Key Comparisons (CCAUV-KCWG) reviews protocols, reports of international key comparisons and coordinates with the RMO KCs in order to assure the quality of published data.

The CCAUV follows developments in adjacent fields and applications, such as the work on the new definition of the kelvin and materials metrology in terms of acoustic wave propagation. It maintains close interaction with the Technical Committees of the International Electrotechnical Commission (IEC) and the International Organization for Standardization (ISO), both of which have a liaison status within the Committee. The CCAUV has started dialogue with the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO) concerning infrasound and low-frequency vibration traceability for its International Monitoring System (IMS).

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

The CCAUV has met twice since the 25th meeting of the CGPM (2014). As recommended by the CIPM *ad hoc* Working Group on Governance in 2012, the RMO TC-AUV chairs were invited to the CCAUV meetings, as well as to participate in the Key Comparison and Strategic Planning WG meetings.

The CCAUV has taken part in the revision of the CIPM MRA. The application of the recommendations made by the CIPM *ad hoc* Working Group on Implementing the Recommendations from the Review of the CIPM MRA has been one of the main activities of the CCAUV and its WGs.

Guidance documents are provided by the KCWG for carrying out KCs within the framework of the CCAUV.

The List of Service Categories has been updated in agreement with the CCM, introducing force measuring chain and force transducer for mechanical impedance and mobility measurements or modal testing.

Main activities

The CCAUV meets every two years. The group of metrologists within these areas represent a sparse and geographically-dispersed community. Therefore, in addition to covering cooperation via comparisons, CCAUV meetings also provide a global forum to describe the latest research and demonstrate progress in the relevant fields; they allow the creation and maintenance of contacts with other specialists; and they facilitate discussions on current issues. The meetings provide an opportunity for scientific exchange and thematic presentations on current leading-edge AUV metrology topics.

There is no significant workload for the CCAUV with regard to reviewing CMCs so far but it plans to pursue a risk-based assessment approach towards reviewing them in the future. The planning process for KCs involves careful deliberation to optimize the resource requirements needed to respond to the needs of its stakeholders.

Some mature KCs have reached the stage where repeats of CC KCs, normally conducted on a 10-year cycle, are being carried out to assess them as well as to extend their calibration range. Long-term timetables and repetition periods were defined in the updated strategy document. The CCAUV has implemented the approach of limiting participation in CC KCs that use sequentially travelling standards. Typically, ten to fifteen (two to three per RMO) participating laboratories take part in CC KCs for a period of 1 year.

An *ad hoc* WG reviewed the expression of CMCs (for example units, uncertainty ranges) to achieve better consistency and reported its findings to the KCDB manager.

The CCAUV decided that comparison pilots should include paragraphs in the KC documents to act as proposals for KCWG approval and to give a general indication on “how far the light shines”. This will allow KCs and SCs to be interpreted as widely as is reasonably applicable to indicate coverage of CMCs.

CMS/ITRI (Chinese Taipei) became an Observer and METAS (Switzerland) became a Member of the CCAUV in 2016.

Challenges and difficulties

Contrary to many other Consultative Committees, the CCAUV does not maintain a base unit; the units that it uses are either derived (composed of several different base units), or represented by the dimensionless unit “decibel”. For this reason, there is a need in the AUV areas to provide traceable measurements in a wide range of units.

Although the planned redefinition of four SI base units does not have an immediate impact on AUV metrology, it will ensure that future requirements for increases in accuracy have been addressed. A coherent metric system among the mechanical and electro-magnetic quantities is indispensable for improving inertial sensors that are based on Microelectromechanical System (MEMS) calibrations.

Comparisons that are designed to accomplish traceability are carried out by circulating travelling standards, such as microphones, hydrophones or accelerometers, between participants. This unavoidable method of working in the AUV field is often time consuming, whereby the next participant must wait for the previous, and where the conservation of artefact quality can critically affect the outcome of a global comparison. Unfortunately, transport problems are regularly encountered and are often exacerbated by national customs procedures. This can be particularly problematic for the sensitive and fragile instruments involved.

Outlook in the short and long term

Environmental Monitoring

Future developments in the area of metrology for airborne sound (sound in air) can be grouped under four main headings within emerging technologies: (a) metrology infrastructure, sensors and instrumentation; (b) hearing assessment and conservation; (c) product and machinery noise; (d) environmental noise assessment. In all of these areas, the common denominator is the goal to better understand and mitigate the impact of noise on humans, and their environment.

Each line of development has a significant impact on the human population, industrial activities, industrial design, urban planning, health, safety, security, and environmental protection. There are several cases where the positive applications of sound and strategies for the mitigation of noise are intertwined. The benefits of environmental monitoring extend across all areas of society, from urban to rural populations.

A further aspect to be considered is the monitoring of highly dynamic events such as seismic activity and controlled explosions such as mining and demolition of man-made structures. Such events have an impact on the environment, and in some cases these sound sources may be of vital importance to global security. In this context, a subset of the environmental monitoring activities, which have applications to support the monitoring of the international treaties for banning nuclear testing, will require the establishment of acoustic traceability at very low frequencies.

Underwater acoustic techniques are chosen for most marine applications that require remote imaging, communication or mapping in sea water. Techniques based on electromagnetic waves are not suitable for such applications because they suffer from a limited range due to high levels of absorption.

Another key driver for environmental monitoring is the concern over exposure of marine life to noise pollution. The impact of acoustic noise emanating from human activities poses unprecedented risks for the sustainability of key marine species, biodiversity, ecosystems and the overall health of the oceans. This increasing concern has led to the introduction of regulations.

Oceanic studies related to climate change use acoustics as a tool to probe the oceans, for example to monitor changes in acidification, detection of methane seepage, or to detect CO_2 leakage from sub-seabed Carbon Capture and Storage (CCS) sites.

Medical and diagnostics

Medical and diagnostic applications span all stages of life, from birth (in the form of neonatal screening) into old age (hearing conservation).

Hearing impairment can lead to severe degradation of quality of life. Hearing loss can lead to social isolation, family tensions and employment challenges for adults. In children, it can affect communication ability, literacy, educational achievement, as well as social and psychological development. Consequently, national healthcare programmes invest heavily in both hearing diagnostics (through screening programmes) and rehabilitation (hearing aids).

The metrological underpinning of ‘objective audiology’ is a vital prerequisite for the extended use of this technology, which has the potential to become the standard diagnostic technology for audiology in the future. Improved methods for the determination of reference values of the ear with regard to hearing thresholds requires new calibration methods that are traceable to national standards and the investigation of the relationship to behavioural hearing thresholds, which have to be determined for the new earphones.

Therapy and Diagnostics: After x-rays, ultrasound is the second most commonly used imaging technique in medicine. There are 250 000 diagnostic ultrasound instruments world-wide and 250 million examinations are performed each year. In the developed world, most foetuses will be the subject of at least two obstetric examinations during normal pregnancy. Safety-sensitive diagnostic applications will drive the continued development of improved metrological tools and prediction models. A number of these applications involve generating higher acoustic output.

Novel therapeutic applications of ultrasound will continue to emerge, supporting drug delivery concepts based on high-power ultrasound or cavitation and more extensive use of High Intensity Focused Ultrasound (HIFU) or High Intensity Therapeutic Ultrasound (HITU). Exploitation of the clinical potential of these methods requires the development of metrology for both existing and emerging dosimetric quantities. To unlock the potential of therapeutic ultrasound and to better assess safety in diagnostic applications, metrology is essential for the development and validation of methods to determine ultrasound dose.

Key factors in assessing the safety of medical ultrasound applications lie in methods of estimating *in vivo* ultrasound levels, and its implications in terms of bio-effects. The ability to make such measurements is likely to find increasing application, for example in the evaluation of protein solutions, or assessment of nanoparticles.

Engineering and production

Sensors, and the instrumentation used to produce meaningful outputs from them, underpin all acoustic measurements, starting with the realization and dissemination of the primary standard and finishing with hearing assessment, noise measurement or a description of sound quality. In many cases, the drivers for developments in acoustic instrumentation can be addressed through innovation in sensors and instrumentation. In this respect there is great potential to exploit synergies with the consumer product sector, where the demand for microphones now exceeds 2 billion units each year. With the proliferation of low-cost sensors, there is now scope for active management of the acoustic performance of sophisticated items and wireless, autonomous and intelligent operation. For example condition monitoring of machinery, vehicles, rail infrastructure and even domestic appliances could be implemented to maintain the acoustic performance designed into products, optimizing operating efficiency or simply monitoring the level of noise produced. These applications demand new metrological techniques, such as remote self-calibration of sensors and sensor networks, acoustic signature recognition and decision making based on multiple parameters.

Industrial applications of ultrasound are extensive, where it is commonly applied as a means of bringing about macroscopic changes in materials, either within the bulk or at surfaces. Ultrasonic cleaning is the most widespread application of industrial ultrasound and such technology is used for the cleaning of surgical and dental instruments. There is a need for broadband measurement methods capable of spatially resolving non-uniformities in acoustic field distributions, and to underpin improved understanding of influencing factors. This will enable high-power ultrasound to be further applied in an economically viable way in a wide range of technical fields in industries such as food (crystallization control, pasteurization), pharmaceuticals (particle size control) and biofuel production.

The emerging metrological activity in the field of dynamic measurement of mechanical quantities, like force and torque, has revealed a whole new area where linear and angular acceleration become base quantities for traceability of the derived quantities. One well known area is automotive crash testing for which dynamic measurements are essential. Although widely-accepted international standards exist, the results are in many cases not strictly comparable due to the lack of appropriate calibrations and an in-depth understanding of the dynamic metrology. The metrology infrastructure

currently in place for dynamic mechanical quantities, namely vibration and shock, lags a long way behind that established for acceleration measurements.

Emerging applications in MEMS sensors

Requirements for traceability in shock acceleration measurements are generated in research, industry, medicine and the military. The challenge is to cover the wide range of applications with a small number of efficient methods and calibration techniques. MEMS accelerometers made their debut in the automotive applications of crash sensing and airbag control. Here, the accelerometer continuously measures acceleration of the car. The acceleration curve is integrated to determine if a large change in velocity has occurred and, if it exceeds a predetermined threshold, the airbag is fired. The decision to fire the airbags must be made in the order of milliseconds, yet the operation must be extremely reliable since errors can result in loss of life and limb. Automotive applications for accelerometers also include vehicle dynamic control, rollover detection, antitheft systems, electronic parking brake systems, and vehicle navigation systems. Since human life is at stake if these systems malfunction, these accelerometers are all tested and calibrated, as well as undergoing extensive reliability testing.

The development of autonomous vehicles is advancing rapidly. As of 2018 no fully autonomous cars have been permitted on public roads. Accelerometer specifications for inertial guidance of an autonomous vehicle will be much stricter than those for other applications discussed above, since in the event that a GPS signal is lost the position of the vehicle must be determined by the inertial guidance system over a period of time that might span tens of minutes. The current designs for capacitive MEMS-based accelerometers and gyroscopes may never fully meet requirements for autonomous driving, and may have to move towards optical-based systems instead of capacitive-based systems.

Society and Occupational Safety

Noise produced by a variety of sources such as transportation (road, rail, air), industrial plant and wind farms, neighbourhood noise, sports and entertainment venues, is detrimental to the environment and quality of life.

Requirements for traceability and mutual recognition of measurement results are needed for workers' safety. The human response to mechanical vibration, where a dose concept is applied, represents one issue, and hearing is commonly put at risk from excessive exposure to man-made noise. Measures to reduce these hazards impose huge expenses annually. The widespread screening of the workforce or personal noise dose-monitoring will demand new approaches and innovative instrumentation.

Low-frequency vibration transducers are widely used for monitoring earthquakes. The demand for earthquake monitoring systems has increased following a number of major seismic incidents. Special sensors provide traceability to thousands of seismometers and hundreds of observation stations in the Global Seismographic Network, which provide an immediate alert to the population, demanding calibrations at ultra-low frequencies.

CCAUV Data

CCAUV set up in 1998	
President: T. Usuda	Executive secretary: G. Panfilo
Membership:	18 members, two liaison and 12 observers
Meetings since the 25th CGPM meeting:	25-27 November 2015, 20-22 September 2017
Three Working Groups:	– Key Comparisons (CCAUV-KCWG) – RMO Coordination (CCAUV-RMOWG) – Strategic Planning (CCAUV-SPWG)

CCAUV Comparison activity	Completed	In progress	Planned
CCAUV key comparisons (and supplementary comparisons)	15	3	13
RMO key comparisons (and supplementary comparisons)	26	2	-
BIPM comparisons	0	0	0
CC pilot studies	4	0	5
CMCs	1 174 CMCs in 51 service categories registered in the KCDB		

The President of the meeting thanked Dr Usuda and asked if there were any comments.

Dr Flux (UK) asked if there is more information, not just on noise volume, but also on the frequency of noise because the amount of noise is increasing along with levels of stress in humans. It is often questioned as to whether there is a connection. He asked if the CCAUV deals with the effect of the levels of noise and of the frequencies involved. Dr Usuda replied that sound perception is a physiological quantity. Humans sense sound through the air, but the ear is not a linear sensor. The characteristic is not linear, so it depends on the circumstances. Metrologists have to investigate the linearity of the sensor itself and the next step is to investigate perception: how the sound is recognized by the human body.

41. Developing a common vision for scientific and legal metrology: the OIML perspective

Prof. Roman Schwartz, President of the International Committee of Legal Metrology (CIML) congratulated the BIPM and the CIPM on their achievements over recent years, especially on the successful preparations for the historic step that will be taken on 16 November 2018 to make the successful SI even better and future-proof. He commented that the International Organization of Legal Metrology (OIML) appreciates this step, and noted that it has been involved in the process from the beginning as a stakeholder, representing practical and legal metrology.

Prof. Schwartz presented the history of the OIML and a summary of its work. The OIML is an intergovernmental organization established in 1955 with 23 members. Under the terms of the WTO/TBT agreement, the OIML is an “international standards-setting organization”; this requires OIML publications to be applied, when appropriate, by all signatories to the TBT agreement when developing technical regulations. The OIML currently has 62 Member States and 65 Corresponding Member Countries/Organizations. He summarized the structure of the OIML and noted that the current Director of the BIML, Mr Stephen Patoray, will retire on 1 January 2019 and will be succeeded by Mr Anthony Donnellan. The mission of the OIML is to enable economies to put in place effective legal metrology infrastructures that are mutually compatible and internationally recognized for all areas for which governments take responsibility, such as those that facilitate trade, establish mutual confidence and harmonize the level of consumer protection world-wide.

The relevance of the OIML to regulatory bodies lies in its development and provision of model regulations, technical standards and relevant International Documents for use by legal metrology authorities and manufacturers in support of the WTO/TBT Agreement. For example Document D 1:2012 Considerations for a Law on Metrology; Document D 2:2007 Legal Units of Measurement; and Document D 9:2004 Principles of metrological supervision. Document D 2:2007 will change following the decisions on the revision of the SI that will be taken later in the 26th meeting of the CGPM. The OIML has set up a joint committee, which includes the BIPM, to oversee the changes.

Prof. Schwartz highlighted the OIML's current priorities, which include its ongoing technical activities and a desire to increase the speed and efficiency of its technical work. The OIML plans to raise awareness of its new Certification System (OIML-CS) among its stakeholders and to address the needs of Countries and Economies with Emerging Metrology Systems (CEEMS). A major priority is to foster closer cooperation with other international organizations, notably the BIPM, to promote metrology as an important part of a sound quality infrastructure (QI) for a modern economy. He said that the OIML faces challenges posed by the digitization of economy and society in a globalized world and what this means for legal metrology, and metrology in general, in order to remain relevant in the future. The technical activities of the OIML and its relevance for manufacturers were presented. The OIML develops and provides international recommendations and documents that harmonize metrological and technical requirements for measuring instruments world-wide. It encourages innovation and supports local trade in measuring instruments, harmonizes test procedures and facilitates harmonized testing and certification. In addition, the OIML enables mutual recognition of test data, which then forms the basis for certification systems.

The new OIML Certification System (OIML-CS) has been developed to support global trade in measuring instruments and its vision is "tested once, accepted everywhere". The OIML-CS was launched on 1 January 2018 and is a single certification system based on ISO/IEC 17025, ISO/IEC 17065 and OIML Recommendations. It replaces the basic and Mutual Acceptance Arrangement (MAA) systems and currently covers 19 categories of measuring instrument; an additional 18 categories will be added during 2019 to 2020.

Prof. Schwartz then focused on the development of a common vision for scientific and legal metrology. He said that the BIPM and OIML are two different metrology organizations with complementary missions, increasing collaboration and which together represent the whole spectrum of scientific, industrial and legal metrology. He quoted from the Draft BIPM Work Programme 2020-2023, which states "*...The BIPM staff and the BIML (the bureau of the OIML) have worked increasingly closely in recent years. This trend continues. Whilst the missions of the two organizations are complementary, both now present an integrated description of the world-wide metrology infrastructure, and its benefits*." He added that a key message for the collaboration is that "together we are strong".

The global quality infrastructure (QI) and the role of the BIPM and OIML were described. The message conveyed was that the organizations in charge of metrology, standardization and accreditation can be considered as the foundations of a national QI for the entire economy of a country. These functions are often "below the surface" and, as such, are invisible; the role of "awareness raising", especially for metrology, is therefore vital. These functions include those furnished by the BIPM which provides traceability to the SI and mutual recognition of calibration certificates; the OIML, which provides harmonized standards, legal regulations and mutual recognition in the field of type testing and certification; the IEC and ISO, which provide harmonized standards in all relevant fields; and the ILAC and IAF, which provide harmonized procedures with regard to the competence of testing laboratories and certification bodies.

Prof. Schwartz highlighted a series of common denominators between the work of the BIPM and the OIML:

- trust in measurement results
- traceability of measurements
- promoting free trade - eliminating technical barriers to trade (WTO/TBT)
- minimizing costs and work load for stakeholders in the market
- promoting "awareness raising" with regard to the importance of metrology and providing

information for decision makers
- engagement with the global QI capacity building community.

He said that in view of these common denominators, it is not surprising that there is a well-established collaboration between the BIPM and the OIML. There is a good bilateral relationship, which is carried out without a bilateral MoU. A trilateral MoU exists between the BIPM/OIML/UNIDO, which was signed in 2008. Annual bilateral and multipartite meetings are held at a senior level and in 2018 the revision of the '*Joint BIPM, OIML, ILAC and ISO Declaration on Metrological Traceability*' was discussed. In addition, periodic meetings between the directors of the BIML and BIPM and the senior staff are held to address both technical matters and organizational matters of common interest. The BIPM and OIML also collaborate on the World Metrology Day joint initiative, the website for which is hosted by the OIML.

Furthermore, the BIPM and OIML collaborate in the DCMAS Network, which is being renamed INetQI. The BIPM participates in the OIML CEEMS Advisory Group and is contributing to the revision of OIML Document D1 "*Considerations for a Law on Metrology*". The OIML participates in JCGM WG1 (GUM), JCGM WG2 (VIM) and the CCU. Furthermore, BIML members have lectured at BIPM CBKT courses.

From an OIML perspective there are a number of ways the two organizations can work towards even closer cooperation and a common vision. The BIPM and OIML should focus on their common denominators and "strong points". He said that there is still room for improvement and that the two organizations can investigate joint technical work where there are common interests. There are opportunities to explore a "holistic approach" to jointly and coherently promote metrology (scientific, industrial and legal) as a key element of the sound quality infrastructure needed for a modern economy. The BIPM and OIML could develop joint CEEMS and CBKT activities; this could involve use of the new "QI reform toolkit" published by the World Bank. (see §14). Finally, there is the possibility of jointly developing an e-learning platform and further developing the joint BIPM/OIML web portal.

Prof. Schwartz concluded by suggesting that a joint task group could be set up to explore opportunities for even closer cooperation. He said that the many common points, common denominators and future challenges for both organizations suggest that closer ties between scientific and legal metrology are possible.

The President of the meeting thanked Prof. Schwartz and opened the floor for questions and comments.

Dr Inglis (CIPM President) thanked Prof. Schwartz and said that, speaking on behalf of the CIPM, they would like to participate in a common task group, with an emphasis on metrology. Dr Milton (BIPM Director) recalled the comment by Prof. Schwartz that "together we are strong" and the section of his presentation summarizing the joint activities that already exist between the BIPM and OIML, which highlight the existing breadth of joint activity. Dr Milton took the opportunity to thank Mr Patoray for their strong and positive work over the last six years, noting that many of the joint activities described in the presentation either started or grew rapidly during this six-year period. He offered his best wishes to Mr Patoray on his retirement and said that he and his colleagues at the BIPM look forward to working with Mr Donnellan, the incoming BIML Director.

Dr Milton further recalled that Prof. Schwartz had emphasized the focus on common denominators and strong points. He said that it is deeply encouraging that the strong points of the two organizations are different and that this can be a basis for further synergy: the OIML does things well that the BIPM does not address in its mandate and the BIPM does things well that the OIML does not address

in its mandate. This gives reassurance that there is potential for further collaboration, and that there is an opportunity for the two organizations to become even stronger together.

Dr Laiz (Argentina) suggested that a strong point for collaboration in the future should be related to digitization of metrology, which is a common field that affects both scientific and legal metrology. Prof. Schwartz agreed, commenting that the consequences of a digital transformation need to be considered, and specifically what they mean for scientific and legal metrology. This may include how to include electronic, intrinsic calibration and testing capabilities into a measuring instrument from the beginning.

Dr Copan (USA) thanked Prof. Schwartz for his presentation and said that one of the areas emphasized in the presentation was the importance of raising the profile of metrology in general to ensure that there is understanding and support in conversations with the Member States. It is clear that in many areas, metrology is essentially taken for granted. Dr Copan asked Prof. Schwartz if he had some recommendations for this combined group towards raising the profile of metrology. Prof. Schwartz replied that this will largely depend on the individual country. The community will have to find ways to raise the profile of metrology by being creative and taking opportunities offered through workshops or talks and by asking to be invited to meetings. Metrologists will have to learn to go beyond the laboratory and to promote measurement science.

Mr Patoray (BIML Director) commented that when reference is made to legal metrology or scientific metrology, ultimately both are metrology. To expand on this, the metrology community is part of the bigger picture of quality infrastructure. It is not possible simply to combine metrology; it is necessary to combine those other aspects and think about the global quality infrastructure as a whole.

Mr Henson (BIPM) responded to the comments by Dr Copan. He agreed that some of the work of the metrology community is not entirely visible and gave two examples. Both the OIML and the BIPM have observer status in the WTO TBT committee, giving them an opportunity to address an audience that is not a conventional audience for metrology, but which is nevertheless very influential. If only one organization were represented on the committee it would have to represent the other. Now that both the BIPM and OIML are represented, the system works well. Another example, as mentioned in the OECD statement (see comments after §15), is the international regulatory collaboration platform, which consists of a group of more than 50 international regulatory bodies. This initiative allows the BIPM and OIML to give both technical input and to raise the visibility of the NMI community and the infrastructure that exists within it. He added that the BIPM's role is largely to advocate for the use of the SI and for the infrastructure of the NMIs and the RMOs around the world. A lot of work is undertaken in this area and it is not always as visible as it should be. Mr Henson concluded by saying that he is confident that more opportunities will be found to increase visibility in a more strategic way in the future.

Dr Warrington (Australia) commented that there is more that institutes that have benefited from the collaboration can learn from the international framework and the partnership between scientific and legal metrology. Prof. Schwartz replied that in terms of international cooperation there are ongoing discussions in Europe between the European Association of National Metrology Institutes (EURAMET) and the European Cooperation in Legal Metrology (WELMEC) to find more synergy. He added that although the OIML and BIPM are distinct and complementary organizations it is always helpful to have a better understanding of each others work and to continue working closely together, as well as with the international community. He encouraged greater understanding of the other side of metrology (scientific or legal). This will benefit the entire metrology community and will support the bringing together of the two fields of scientific and legal metrology. He emphasized that both fields are complementary, but in reality there is one metrology community and each field

has to understand the other. The better this is achieved, the better metrology can be promoted as part of the quality infrastructure, especially in the age of digitization. Prof. Schwartz said that is important that the digital transformation of metrology, both calibration and testing, is handled in a complementary and consistent manner. A concept needs to be developed by both the BIPM and OIML as well as at the regional level. He commented that in order to remain relevant, the metrology community needs to develop this understanding and cooperation.

Dr Dudle (Switzerland) commented that he is the Chairman of WELMEC and added that in Europe EURAMET is responsible for technical metrology and WELMEC is the body responsible for legal metrology. About 18 months ago, the two bodies decided to establish a joint working group, similar to that proposed by the OIML and BIPM, to explore fields for greater collaboration. The aim for WELMEC and EURAMET is to increase the visibility of their work. He commented that there is one metrology community with a duty to stakeholders to increase its visibility and to sharpen its profile. Dr Dudle welcomed the initiative presented by the OIML and BIPM.

Mrs Lagauterie (France) thanked Prof. Schwartz for his presentation. She pointed out that she is the CIML member for France and that she agreed with the comments of the President of WELMEC, adding that she is also the WELMEC member for France. While the OIML presentation underlined the common denominators, such as work on traceability, Mrs Lagauterie wished to comment on the specifics of legal metrology. She mentioned the stakeholders for legal metrology, which can be common to both organizations, such as producers that are the customers of the national laboratories and certification laboratories. Legal metrology has to provide a guarantee to protect consumers and various stakeholders that have an interest in measurements carried out for legal purposes using certain types of instrument. Unlike scientific and industrial metrology, where it is in the interest of the operators to use secure and reliable instruments, legal metrology has to face issues regarding fraud, conditions of use, misuse, etc.; therefore, legal metrology underpins necessary legal outcomes, for example the imposition of fines and the abolition of authorizations.

42. Measurement challenges for efficient sustainable lighting technologies

Dr Yoshihiro Ohno, President of the International Commission on Illumination (CIE), began by giving an overview of the CIE, commenting that it is an international scientific and standards body that operates in the area of light and lighting that was established in 1913. It is recognized by ISO, the International Electrotechnical Commission (IEC) and the CIPM and has 37 National Committees and three associate National Committees that cover all continents. In addition, the CIE operates 120 technical committees. A MoU between the CIE and CIPM was signed on 2 April 2007, which clarified that the CIPM is responsible for units and the CIE is responsible for defining action spectra. Joint consultation is carried out on issues relating to quantities and units and metrology for optical radiation. In addition, the CIE is an observer in the CCU.

Dr Ohno moved on to the topic of solid-state lighting (SSL) and the associated measurement challenges. He recalled the history of light-emitting diodes (LEDs). Red and yellow LEDs were invented in the 1960s, but it was the invention of the blue LED by Prof. Nakamura, Prof. Amano and Prof. Akasaki in Japan in 1994, for which they won the Nobel Prize for Physics in 2014, that allowed the production of white LEDs for lighting. He commented that the efficiency of LEDs will further improve and is expected to reach 300 lumens per watt, three times higher than fluorescent lamps, the most efficient light sources at the moment. He added that LEDs have other advantages over traditional light sources, such as long life, instant starting and ease of control.

It is expected that many existing light sources will be replaced by LEDs and this move towards energy-efficient, solid-state lighting is being referred to as the third revolution in lighting. This trend will have a significant beneficial impact on global energy consumption and greenhouse gas emissions; statistics from the USA indicate that lighting currently accounts for around 20 % of electricity consumption and approximately 8 % of total energy consumption. Developments in white LEDs are still under way and products with an efficiency of 200 lumens per watt are now available. Improvements in efficiency are expected to continue to improve, along with the associated energy savings.

The expected impact on energy savings is prompting governments around the world to adopt programmes and regulations to promote energy-efficient lighting and high-quality LED lighting. Dr Ohno presented the different regulations for energy efficient lighting that exist in China, Europe, Japan and the USA. Each region specifies its own requirements for minimum lumens per watt performance along with other requirements such as lifetime or colour quality. He noted that there is a need for international harmonization of test methods and accreditation; although there is significant international trade in energy-efficient lighting products, the regions use different test methods and test reports are not compatible and are not accepted across regions. The ideal solution would be one international test method for solid-state lighting that is used in all regions and countries. Accreditation could then be mutually recognized and proficiency testing shared. This would result in a major reduction in the costs associated with international trade and commerce for the solid-state lighting industry.

The CIE published the international standard CIE S 025:2015 “Test method for LED lamps, LED luminaires and LED modules” in 2015 as a step towards achieving this goal. The standard was developed over four years and is intended for use in SSL regulations and for testing laboratory accreditation. The development work was carried out jointly with the European Committee for Standardisation (CEN) TC-169 WG7, which produced the harmonized European standard EN 13032-4 Lighting Applications - Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires - Part 4: LED lamps, modules and luminaires. The CIE has followed up and promoted the standard through capacity building for industry and by providing tutorials and practical workshops for testing LED products to CIE S 025:2015. He commented that there is a need for further education, particularly for industry, in the area of measurement uncertainties. Other recent publications include CIE 226:2017 Optical Measurement of High-Power LEDs and CIE 227:2017 High Speed Testing Methods for LEDs.

Dr Ohno said that there are many measurement challenges for LEDs, LED lamps and LED luminaires. LED products have very different characteristics from traditional lighting sources and require specific test methods and guidance for measurements as well as the uncertainty variation. A world-wide Interlaboratory Comparison of Measurements of LED lamps, involving 110 laboratories, was carried out by the International Energy Agency, (IEA 4E SSL Annex IC 2013). This study was undertaken to determine the level of agreement or variation of the measurements of solid-state lighting products. In the cases of luminous flux and chromaticity there were large variations with significant outliers and variation in uncertainties, indicating that a problem exists.

One of the challenges facing solid-state lighting is the issue of colour quality. The existing standard “CIE Color Rendering Index” did not meet the needs of solid-state lighting, so a new metric, CIE 2017 Colour Fidelity Index (CIE 224:2017), was published in 2017. The non-visual effects of light are also under investigation. Vision can be divided into visual effects, such as image recognition and colour and non-visual effects such as sleep-wake (circadian) regulation, alertness and comfort, and eye fatigue. The human eye has five photo receptors, including the intrinsically-photosensitive retinal ganglion cells (ipRGC) that were the most recently discovered and do not directly contribute to

vision; these photoreceptors can lead to a reduction of melatonin when they are excited by light in the blue region of the spectrum. As a result of growing awareness of the non-visual effects of light, research is being conducted into “healthful lighting” including the best light to aid quality of sleep, optimum lighting for offices to aid productivity, and the amount of light needed for a healthy life. Furthermore, the CIE has been working on the Draft International Standard DIS 026: 2018 “CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light”. This standard defines action spectra for ipRGC and the four other photoreceptors (L, M and S-cones and Rod) and defines quantities measured with these action spectra using SI units.

Dr Ohno commented that the CIE’s future work in photometry includes the development of the “CIE standard illuminant for LEDs”. Photometric instruments are currently calibrated using the CIE Illuminant A, which is calibrated against an incandescent standard lamp. When used to measure LED products, spectral mismatch errors occur. The proposal is to develop a “CIE Illuminant L”, using a LED standard source (Source L), against which photometric instruments can be calibrated for measuring LED products. This is expected to reduce uncertainties by a factor of four to five.

He said that the 1983 BIPM monograph “Principles governing photometry” is being revised and the document “Basis of Physical Photometry” (CIE 18.2-1983), which was developed by the CIE-CCPR Joint TC (JTC-2) is at the approval stage. The BIPM document makes a link between the SI definition of the candela and the $V(\lambda)$ function. As the SI definition does not refer to the action spectra and spectral luminous efficiency functions, this is a fundamental document for photometry. However, there is $V(\lambda)$ for photopic (bright) conditions and also $V'(\lambda)$, for scotopic (dark adaptive) conditions. The response of the human eye changes gradually between these conditions, but there was nothing defined. This has prompted the CIE and CCPR to revise the “Principles governing photometry” document so that it covers mesopic “twilight” conditions, which is of vital importance for street lighting. LED-based street lighting will have a much higher efficacy using the mesopic function when compared to other types of street lighting such as high-pressure sodium lamps.

Dr Ohno concluded by saying that the revolution in lighting is ongoing and will lead to huge energy savings globally. The CIE supports metrology and the scientific aspects of solid-state lighting. There is much research and standardization being carried out and further standards are needed for the evolving field of solid-state lighting. He emphasized that the CIE’s cooperation with other organizations is very important and encouraged further countries and organizations to participate in its work.

The President of the meeting thanked Dr Ohno and said there was time for one question.

Prof. Phillips recalled that it is possible to buy LEDs that claim to have different colour temperatures and which do indeed look warmer or colder. He asked how the luminous efficiency of LEDs changes with colour temperature and if there is a simple relationship. Dr Ohno replied that the higher colour temperature LEDs are more efficient than those with a warmer colour temperature because the use of red phosphorous in the latter reduces their efficiency. He added that this may change in the future with the emergence of new technologies.

43. Report by the President of the CCPR

Dr Maria Luisa Rastello, President of the Consultative Committee for Photometry and Radiometry (*Comité consultatif de photométrie et radiométrie*, CCPR) presented her report on the activities of the CCPR since the 25th meeting of the CGPM (2014).

CCPR Executive summary

Established as the Consultative Committee for Photometry in 1933, and further extended to include Radiometry in 1971, the CCPR now covers metrological aspects of light, which range from well-known measurements to very advanced research fields. The activities of its 23 members reflect this duality. One working group is devoted to monitoring the efficient running of the ten key comparisons identified almost twenty years ago, but a number of Discussion Forums allow surveillance of challenges and needs in all sectors that benefit from advanced knowledge of light, such as quantum cryptography for security applications or accurate radiometers on-board satellites for Earth observation systems.

Since the 25th meeting of the CGPM (2014), CCPR members have contributed to the revision of the SI, to be proposed to the 26th meeting of the CGPM (2018). In addition to the rewording of the definition of the candela they took part in the general efforts by the metrology community to improve the processes developed to demonstrate global comparability of measurements (CIPM MRA review); they finalized guidance documents on conducting international comparisons and shared views on statistical treatments and software to improve the calculation of degrees of equivalence; and they started comparisons in challenging domains, such as standards at the single-photon level.

Scope of the CC

The responsibilities of the CCPR are:

- To provide advice to CIPM on all matters concerned with photometry and radiometry;
- To establish global comparability of related photometric and radiometric measurements through the promotion of traceability to the SI photometric unit, the candela, and associated derived units for photometric and radiometric quantities;
- To contribute to the establishment of a globally recognized system of national measurement standards for photometry and radiometry and development of absolute radiometry methods and facilities;
- To contribute to the implementation and maintenance of the CIPM MRA in the field of photometry and radiometry;
- To review and advise the CIPM on the uncertainties of the photometry and radiometry calibration and measurement capabilities as published on the BIPM website;
- To act as a forum for the exchange of information about the photometry and radiometry activities of the CCPR members and observers;
- To create opportunities for collaboration in the field of photometry and radiometry

In order to carry out its responsibilities, the CCPR has three Working Groups (WGs): one to discuss its strategy, including matters related to quantities and units (CCPR-WG-SP); one to monitor how key comparisons are conducted (CCPR-WG-KC); and one to coordinate the submission and review of Calibration and Measurement Capabilities (CCPR-WG-CMC).

Strategy

The strategy developed by CCPR members to cover the responsibilities listed above is detailed in the

Strategy document, which was recently updated to cover the period 2017 to 2027. A summary is provided below.

Establishment of global comparability

The CCPR defined its strategy to develop and maintain the CIPM MRA soon after its implementation. In particular, the CCPR coordinates international key comparisons performed to benchmark claimed competencies of the NMIs and DIs for standards that are needed to underpin photometry, optical properties of detectors and sources, optical properties of materials and fibre optics. Six key measurands have been identified (spectral irradiance, spectral responsivity, luminous intensity, luminous flux, spectral regular transmittance and spectral diffuse reflectance), leading to ten key comparisons to cover different spectral ranges. A first cycle of comparisons was completed in 2014, and cycle 2 started to repeat each comparison with an average period of 10 years.

Key comparisons organized by the CCPR are limited to about 12 member institutes. The CCPR allows RMOs to coordinate subsequent key comparisons for NMIs or DIs in their regions to demonstrate comparability with a greater number of laboratories.

RMOs are also invited to coordinate regional comparisons of measurement standards for additional quantities related to photometry and radiometry. These have included absolute radiometers, spectral radiance, spectral radiant flux, colorimetric quantities and optical fibre quantities such as attenuation or power meters.

Exchange of information and outreach

Member institutes are regularly invited to present their most advanced developments, to identify needs in new areas and perform pilot comparisons when required. At each CCPR meeting, they provide written reports on their activities in photometry and radiometry, which were made publicly available in 2016 (CCPR 2016 documents). Since 2016, meetings of the CCPR have been reorganized to include three discussions on challenges that build on the presentations given by selected delegates. In 2016 this included Few Photon Metrology, LED sources, and Earth Observation and Climate.

Discussion Forums are also created when a new topic is raised. They typically include CCPR members but can be extended to individuals from universities or companies if required. The aim is to identify challenges, needs for cooperation and eventually, new comparisons. Presently, there are four Discussion Forums on: Fibre Optics, Few Photon Metrology, THz Metrology and Use of White LED Sources for Photometry. They work electronically or organize satellite meetings in parallel with relevant conferences.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Advising the CIPM and promoting traceability to the candela

During the last four years, CCPR members have participated in the consultation process carried out by the Consultative Committee for Units on the new SI brochure. They implemented the decisions already taken before 2014 regarding the rewording of the definition of the candela for the 26th meeting of the CGPM (2018) and developed the new *mise en pratique* published in *Metrologia* in 2015.

Meanwhile, the CCPR worked with International Commission on Illumination (CIE) representatives to update the *Principles Governing Photometry*, which includes information on all photometric quantities and units, as well as the CIE standard spectral luminous efficiency functions for photopic

and scotopic vision (daylight and dark night conditions). Since the first version of this document in 1983, studies undertaken by CIE members have resulted in functions being defined for mesopic vision (twilight), and the wish to include them. The new version was made consistent with the new SI brochure, and it was agreed to publish it as a *Metrologia* guide in May 2019, together with the SI Brochure.

Ensuring global comparability of measurements

In accordance with its policy, international comparisons on key quantities currently undertaken at the CCPR level are repeats of the set of ten "cycle 1" comparisons. One was completed and published in 2017, and three are in progress. Meanwhile, RMOs performed five comparisons to demonstrate the comparability of more laboratories around the world. A good example is the comparison CCPR-K4, which was completed with 17 participants at the CC level in 2000 and was followed by regional comparisons in recent years to allow 19 more participants. The second cycle of this comparison is in progress at the CCPR level.

In addition, supplementary comparisons were carried out within the RMOs to underpin measurements related to the use of optical fibres, such as fibre optic power responsivity, which was compared in the APMP comparison APMP.PR-S2.

Finally, following discussions that started before 2014 in a dedicated CCPR Task Group, the first key comparison undertaken in the far-infrared spectral region was carried out between three NMIs and was published in a peer-reviewed journal (IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 6(5), 2016). It represents a milestone which will greatly benefit commercial development of instrumentation and sensors for remote sensing, THz imaging, high-speed telecommunications, and time-domain spectroscopy.

Improvements in the CIPM MRA

Following Resolution 5 of the 25th meeting of the CGPM (2014), a review of the CIPM MRA was undertaken by the CIPM *ad hoc* Working Group on the implementation and operation of the CIPM MRA with the involvement of all Consultative Committees. CCPR members took part in this process, with a number of discussions during their usual meetings as well as in devoted workshops. They shared their best practices with other CCs and improved their own processes for conducting international comparisons, claiming measurement capabilities and reviewing those claims.

International comparisons

Between 2009 and 2014, CCPR members developed a number of guidance documents to harmonize how comparisons are carried out, both at the CC level and within RMOs. A document to cover supplementary comparisons in RMOs has been under development since 2014 and will be published. In parallel, there has been a focus on software and statistical tools to help implement the principles developed in the guidelines.

Calibration and Measurement Capabilities (CMCs)

It was decided during the 23rd CCPR meeting (2016) to extend the chairmanship of the working group devoted to CMCs from 2 to 4 years in order to leave more time for the chair to monitor and complete the tasks undertaken by this group. As a consequence, two important guidance documents for CMC review were updated in 2017 and 2018 and have been made publicly available (Services in PR and Supporting evidences for CMCs in PR). Rules were clarified, and the CMC review process should be more efficient in the future.

Workshops

Since the 25th meeting of the CGPM (2014), two workshops have been organized to discuss the best mathematical treatment of comparison results (in 2015 and 2017). They resulted in the decision to write another guidance document, and the appropriate software to perform the required calculation was selected and shared among CCPR participants as a tool for laboratories in charge of coordinating comparisons. The aim is to harmonize the treatment of comparisons but also to reduce the workload of pilot laboratories.

In addition, a workshop on Metrology Needs in Fibre Optics took place in conjunction with the 23rd CCPR meeting (2016). During this workshop, it was decided to carry out a Pilot Comparison on optical fibre power responsivity using a fibre-coupled cryogenic radiometer, in order to respond to the needs of communication via fibres.

A number of members of the CCPR were very active during the session on single-photon measurements and radiometry with entangled sources at the Quantum Revolution in Metrology workshop organized at the BIPM in September 2017. This reflects the significant interest in better standards at the single-photon level, with promising applications in quantum cryptography and photo-bio-photonics.

Challenges and difficulties

The few-photon community is starting to become significant. As the properties of light in this extreme range are completely different from classical properties, SI-traceable measurement at the few-photon level requires further research and development.

In terms of units and definitions, there remains an ongoing discussion within the CCPR as to the choice of base unit, with suggestions that the lumen may be a better choice than the candela. While it would have little impact on the nature and type of comparisons performed to support the CIPM MRA, the CCPR community would be impacted by the change in definitions and relationships of the traceability chain.

Outlook in the short and long term

In the short term, the existing portfolio of key comparisons is considered to be adequate to underpin the needs of the CCPR community, but within the next two decades, extensions into different spectral regions will become necessary. For example, semiconductor industries require SI-traceable measurement of extreme UV radiation. The field of high-energy radiation requires radiometric standards down to the X-ray range. Mid- and far-infrared radiometry has become more important in order to increase the accuracy of Earth and climate observations. THz-radiation has found commercial applications in remote sensing. To allow the extension of the measurand range, various activities to validate the methods and the equivalence of each laboratory should follow.

Many of the fields considered in the strategy document are highly multidisciplinary and there is recognition that photometry and radiometry specialists must work in close collaboration with experts from other technical domains who are closer to those applications. Demand for cooperation with other international organizations will increase in the near future. This will include the need to work closely with the Earth observation community through links with space agencies and their international organizations such as the Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) and the Group on Earth Observations (GEO). In the display and lighting industries, improved reliability of science and technology related to human vision and cognition are needed to support better product design and process control. For example, the newest displays for virtual reality will require metrology

beyond the current measurement standards of photometry. In the medical/health sector, the development of quantitative diagnostic and therapeutic biophotonics instrumentation requires metrology experts in optical radiation measurements to collaborate in multidisciplinary work with experts in biotechnology, health and life sciences. The CCPR needs to link scientific experts with industrial experts through joint activities with the relevant global organizations such as the International Commission on Illumination (CIE) and the Society for Information Display (SID) to promote the development of measurement standards that will meet urgent practical demands.

CCPR Data

CCPR set up in 1933

President: M.L. Rastello — Executive secretary: J. Viallon

Membership: 23 members, two liaison and three observers

Meetings since the 25th CGPM meeting: 22−23 September 2016

Three Working Groups:
- Key Comparisons (CCPR−WG−KC)
- CMC (CCCPR−WG−CMC)
- Strategic Planning (CCPR−WG−SP)

CCPR Comparison activity	Completed	In progress	Planned [period]
CCPR key comparisons (and supplementary comparisons)	10 KC, plus 3 SC, 3 before MRA, 1 repeat, 4 bilateral	1 KC	5 KC (all repeats), 1 bilateral [until 2022]
BIPM comparisons	3	0	0
CC pilot studies	3	2	3
CMCs	1 345 CMCs in 85 service categories registered in the KCDB		

The President of the meeting thanked Dr Rastello and closed the sixth session.

Seventh session – 16 November 2018 (morning)

The President of the meeting welcomed the delegates to the Seventh Session, which was held as an open session.

44. Opening of the session

Prof. Candel, President of the meeting, opened the session with the following speech.

> "Distinguished Presidents, Directors, Delegates, Colleagues, Dear High School Students, Ladies and Gentlemen,
>
> It is with great pleasure that I open this public meeting of this fourth day of the twenty-sixth General Conference of Weights and Measures. I do it on behalf of the *Académie des Sciences*. Indeed, it is a tradition that the CGPM is chaired by the current President of the Academy of Sciences and I am honoured. This tradition is linked to the birth of the metre, a little more than two hundred years ago, in 1799. Indeed, it is the initiative taken by the academicians Jean-Charles Borda, Marie Jean Condorcet, Joseph-Louis Lagrange, Pierre-Simon Laplace and Gaspard Monge that is at the origin of the definition of the metre from the measurement of a quarter of terrestrial meridian and it is the measurements of distance by triangulation, realized by Jean-Baptiste Delambre and Pierre François Méchain which resulted in the value of the metre. It is therefore an immense privilege to speak in this context and I am well aware of the honour that is awarded to me.
>
> You know that this 26th Conference will mark a real turning point in the definition of the units of the International System. The evolution initiated during this conference may be surprising. Nevertheless, it is a logical continuation of the evolutions that have been carried out successively. The system of units is reformulated starting from the fundamental constants of physics and replacing the last material standard, that of the kilogram, with a definition based on the Planck constant. The concepts that underlie this change are old and yet it is only now that this transition will be executed.
>
> This conference will appear in history as a major event for global metrology. The new definitions of the units of the International System will be adopted in this context.
>
> This transition will be deeper than any that have taken place since the creation of the system by the French Revolution. The International System will be more coherent and more in harmony with quantum and relativistic physics, as with the most recent techniques in interferometry of matter waves. It will also move closer to Planck's natural unit system while using the most advanced quantum metrology technologies.
>
> Today's vote will bring about a radical transformation of the International System that serves as the basis for science and global economic exchange. Through this action, CGPM delegates will set up a measurement system that will rely entirely on the fundamental constants of nature. This choice will favour new technologies. However, it will be necessary to develop a considerable pedagogical effort to allow everyone to understand this rapprochement with the foundations that unify metrology, and to benefit from it.
>
> It is this objective that is pursued today with the opening of this session to the public and its transmission in the form of a Webcast.

I wish you an exciting morning and I give the floor to Joachim Ullrich, Vice-President of the CIPM.

Thank you."

45. Progress towards a revision of the SI and report from the CCU

Prof. Joachim Ullrich, President of the Consultative Committee for Units (*Comité consultatif des unités*, CCU) gave an overview of progress towards the revision of the SI and presented his report on the activities of the CCU since the 25th meeting of the CGPM (2014).

He gave an overview of the changes proposed in the revision of the SI. In the revised SI, the numerical values of defining constants have been fixed to redefine the units. Equations of physics and defining constants are then used to realize the units in general and the base units in particular. This is based on the present understanding of nature and is valid for all times and civilizations throughout the universe. In 1900, when Max Planck formulated Planck's law, postulating the existence of the Planck constant to explain the observed spectrum of black body radiation, he wrote that with the help of fundamental constants there exists the possibility of establishing units of length, time, mass and temperature, which necessarily retain their validity for all times and civilizations, even extra-terrestrial and non-human, and this is what is proposed in the revision of the SI. Planck's vision was a theoretical vision, which is now being brought to reality. Two seminal papers published in 2005[10] and 2006[11], set the scene for the redefinitions and after 13 years, numerous CIPM recommendations and CGPM resolutions and seven CCU meetings, the metrology community has arrived at Draft Resolution A "On the revision of the International System of Units (SI)". The Member States and Associates cover 98 % of the world's GDP, so the vote on the revised SI will truly be a defining moment for the global measurement community and which is a cornerstone of the international quality infrastructure.

Prof. Ullrich gave a series of examples to illustrate how the equations of physics and combinations of defining constants are used to realize the units in general and the base units in particular. It is important to note that whenever a better experiment or better technology is developed, it will be possible to achieve a better realization without changing the definition; there is no longer a limit imposed by the definition. The ultimate precision achievable for counting the numbers of atoms in a silicon sphere would be at the level of one atom. That is equivalent to a relative uncertainty in the order of 10^{-26} and if it were possible to count individual electrons for the ampere, this would give a relative uncertainty of 10^{-19}. The new definitions are only limited by the quantization of nature.

The revised SI represents a significant change, but there will not be any change in everyday life. Much effort has gone into ensuring that there will be continuity, harmonization and stability with the new system. In order to do so, it was necessary to make sure that the value of the defining constants, was measured with great accuracy in the old system. This way it is possible to ensure that they can serve as the basis of the new definitions while guaranteeing the continuity between the two systems.

Prof. Ullrich said that the historic revision of the SI represents a millennium-long effort by mankind to establish units of measurement that will come to an end today. It started with artefacts several

[10] Mills I.M., Mohr P.J., Quinn T.J., Taylor B.N., Williams E.R., Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come, *Metrologia*, 2005, **42**(2), 71-80.

[11] Mills I.M., Mohr P.J., Quinn T.J., Taylor B.N., Williams E.R., Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005), *Metrologia*, 2006, **41**(1), 227-246.

thousand years ago, for volume, length or for mass, and has reached its culmination with the most abstract concept which can be thought of to define units, which are sometimes referred to as the quantum SI. This will be valid for all times and civilisations. It will be valid throughout the universe, as envisioned by Max Planck and brought to fruition by many ingenious researchers. This will underpin what is sometimes called the second quantum revolution as well as innovation in science and industry for the benefit of mankind.

CCU Executive summary

The CCU, created in 1964, provides advice to the International Committee for Weights and Measures (CIPM) in all matters concerning the central goal and most important task of the Metre Convention, namely to establish, maintain and disseminate a state-of-the-art International System of Units, the SI, to Member States and Associate States and Economies of the General Conference on Weights and Measures (CGPM). As of now this is a total of about 100 countries representing more than 97 % of the world's economic power.

To fulfil its task, the CCU seeks advice from and liaises with its members and stakeholders, international associations, commissions and committees as well as intergovernmental organizations and international bodies, and stays in close collaboration with all related Consultative Committees (CCs) and the National Metrology Institutes (NMIs).

The most recent challenge of the CCU has been to guide, coordinate and scientifically underpin the envisaged fundamental change of the SI towards the "Revised SI". Rather than still partly relying on artefacts, material properties or idealized definitions to define the units, the revised system is expected to be based on fixing the numerical values of a coherent set of "Defining Constants" and establishing procedures that realize the units, the *mises en pratique* (MeP).

Since the adoption by the 24th meeting of the CGPM (2011) of Resolution 1 "On the possible future revision of the International System of Units, the SI", the CCU has focused its activities on the preparation for the redefinition, especially by providing a draft of the 9th Edition of the SI Brochure, the most widely used publication of the BIPM. The final draft is now completed and publicly available. Moreover, an infographic for the "Revised SI" has been designed by the CCU and a logo by a CIPM Task group, headed by the CCU President, and measures for informing the wider public about the redefinition have been taken.

A "Strategy document for the CCU for the period 2013 to 2023" was prepared in February 2014, and was reviewed and improved in the CCU meeting in June 2016. The CCU strategy will be fully revised after the adoption of the revision on the SI, in the CCU meeting that will take place in October 2019.

Responding to a request for guidance, the CCU Working Group on "Angles and Dimensionless Quantities" was created in June 2014 and met for the first time in February 2015. The discussions focused on the pertinence of adding the radian as a new base unit of the SI and on the treatment of so-called "dimensionless" quantities in the draft of the 9th edition of the SI Brochure. After many discussions, the group could not come to a consensus on any of these issues and therefore it was decided that in the 9th edition of the SI Brochure the treatment of the radian and of dimensionless quantities should be kept the same as in the 8th edition, in compliance with CGPM resolutions in force.

Scope of the CCU

The work of the CCU is concerned with matters related to:

- the development and improvement of the International System of Units (SI),
- providing advice to the CIPM about units of measurement in general,
- providing information and advice on units and their use beyond the CIPM to a wide range of international bodies, associations, commissions and committees as well as individuals who approach the BIPM seeking such information.

To fulfil its task, the CCU seeks advice from and liaises with its members and stakeholders, international associations, commissions and committees as well as intergovernmental organizations and international bodies, and stays in close collaboration with all related Consultative Committees (CCs) and National Metrology Institutes (NMIs).

The CCU is responsible for the preparation of successive editions of the SI Brochure, including the "Concise Summary of the SI" and any other summaries relevant to metrology institutes, industry, universities and school teachers as well as to the general public. The SI Brochure, now in its 8th Edition (dated 2006), is the most important and widely used publication of the BIPM. It is the result of work by many people, both inside and outside the BIPM, and its production requires a high level of scientific knowledge and experience. Every care is taken with preparing the text, not only in the accuracy of the meaning but also because it is translated into many other languages as well as being used by people whose mother tongue is neither French nor English. During the past years, the CCU has been preparing the 9th Edition of the SI Brochure, which incorporates the revised definitions of the SI. If, as expected, the new definitions are approved by the 26th meeting of the CGPM in November 2018, this Brochure will be published on 20 May 2019, the day of the official implementation of the revised SI.

Strategy

According to the scope of the CCU to provide advice to the CIPM in all matters concerning measurement units in general and the SI in particular, it has in recent years developed a strategy for redefining the base units to cope with the advancing needs of industry, society and science.

This resulted in the development of the "Revised SI" that is now based on two key elements, namely:

(i) fixing the numerical values of a consistent and coherent set of "Defining Constants" and
(ii) establishing procedures to realize the units: the *mises en pratique*.

The revision, based on Resolution 1 of the 24th CGPM (2011) and expected to be approved in November 2018 by the 26th meeting of the CGPM, includes new definitions of the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole. The main challenge faced by the CCU over the past few years has been to guide, coordinate and scientifically underpin the fundamental change of the SI to the "Revised SI".

Strategic guiding principles of this effort have been:

I. Ensuring continuity and practicability.
II. Ensuring coherence, stability and a sound scientific foundation.
For example, the uncertainty limits of the Kibble balances and the silicon sphere experiments and their consistency as formulated by the Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) have been key requirements for the decision to redefine the SI. Both experiments have been used to determine Planck's constant h, or equivalently, establish the relation between the kilogram and the defining constant h. At the same time

their consistency along with results of experiments on the so-called ‘quantum metrological triangle’ guarantee the consistency of realizations of the ampere, and thus, of the electrical units, based on utilizing the von Klitzing and the Josephson constants.

III. Enabling the realization of the units so that the advancing needs of industry, society and science are always satisfied at the highest technological level.

Here, the new approach offers the following advantages:

- All SI units can be realized directly from an appropriate combination of the defining constants, currently with no difference between units called base units or derived units, although the concept of base units will be kept for historical and practical reasons.
- A unit may be realized via fundamentally different experiments (for example on a macroscopic level the kilogram can be realized by a Kibble balance and silicon spheres, and on a microscopic level by photon recoil or De-Broglie wavelength measurements), which enables key comparisons with no or little correlation.
- The units are defined and may be realized on the entire scale and not only, such as for the present kelvin, at just two fixed points, requiring interpolations and extrapolations.
- Any unit can be realized, in principle, with ever-increasing accuracy in the future as science and technology evolves, since the definitions do not limit *mises en pratique*.

In the future, new suggestions for realizations of units in terms of the Defining Constants will emerge along with further proposals for the *mises en pratique*. The CCU will monitor these developments, take care of the consistency of the overall system and provide scientific advice to the CIPM in close coordination with the involved CCs.

A detailed roadmap for redefining the kilogram by 2018 was worked out by the CCM together with the CCU, and was approved by the CIPM at its 103rd meeting in March 2014. It included distinct requirements on the quality of the experimental data requested for fixing the numerical value of the Planck constant. Similar requirements have been stated by the other CCs involved. Over recent years, significant progress has been achieved and this has allowed the required criteria to be met such that a proposal for adopting the new definitions has been submitted to the 26th meeting of the CGPM and is expected to be approved in November 2018.

In the years directly after the redefinition, much public attention might still be expected and the CCU along with its President will further work towards providing explanations and increasing general acceptance.

The strategy of the CCU will be revised in the next CCU meeting, in October 2019, once the revision of the SI has taken place and been fully implemented. A new CCU Strategy Working Group has been established for this purpose. Among the new tasks that the CCU is expected to embrace, there is the possible future redefinition of the second whose development will be monitored in close collaboration with the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF).

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Main activities

The most important activity of the CCU in recent years has been the preparation of the “Revised SI”. This is the subject of Draft Resolution A of the 26th meeting of the CGPM (2018).

The CCU has accomplished the following:

- The draft of the 9th SI Brochure describing the “Revised SI” has been finalized and has been made available on the BIPM website. During the past years, the draft Brochure has been available for comment both from CCU members, from NMIs and from to the widest

possible audience, which has made it possible to follow the developments of the draft Brochure via the BIPM webpages. All comments to the consecutive versions were collected and taken into account for the final version.

- In January 2014, the President of the CCU re-established the "Drafting Team for the 9th SI Brochure", which had been set up at the 21st meeting of the CCU in June 2013. The new "Drafting Team" met in June 2015 in order to review the comments received on the draft first three chapters of the 9th SI Brochure. The subsequent version of the Brochure was drafted by the Editing Team and was opened to comments. The draft Brochure reached its final stage in November 2018. The translation into French is being completed.
- A CCU Working Group was created with the task of reviewing the "Angles and dimensionless quantities in the SI", for which some guidance on the use of units and in expressing values of quantities was requested. The terms of reference, membership and chairmanship of this body were approved by the CCU. The first meeting of the Working Group was held at the BIPM in February 2015 with the aim of developing advice for the presentation of units for so-called "dimensionless" quantities, including counting quantities and to discuss the pertinence of including the radian as a SI base unit. The group had intense discussions on all these topics but it was not possible to reach consensus on any of the issues addressed. As a consequence, in the subsequent CCU meeting, it was decided not to make any modifications in the 9th edition of the SI Brochure to the subjects related to angles and dimensionless quantities. The text of the new Brochure is therefore fully compliant with all past CGPM resolutions that addressed the issue of the radian and dimensionless quantities.
- The President, who chairs the CIPM Task Group on the Promotion of the SI, has led the work of the Task group on the production of a logo for the "Revised SI". This SI logo has been now officially approved and is publicly downloadable from the BIPM open webpages.
- The CCU strategy document, which has been in force since February 2014, is being revised by the newly established CCU Strategy Working group to clarify the mission of the CCU once the revision of the SI is approved and implemented. The new strategy document will be approved by the CCU in October 2019. One of the main tasks the CCU is expected to take in is the monitoring of the advances towards a future redefinition of the second. This work will be led by the CCTF and the stages of the process have been defined in a CCTF roadmap, which foresees at present a possible adoption of the redefinition of the second by the CGPM in 2030.

Challenges and difficulties

One of the challenges the CCU has had to face is linked to the implementation of the "Revised SI". Convincing the communities of the need to depart from artefacts and prototypes has been a demanding task. In this respect, the CCU will continue to provide advice to ensure a smooth transition from the present to the "Revised SI".

Following a decision of the CIPM, the CCU and other CCs have revised their membership and relationship with organizations in *liaison* in 2018. The CCU will work closely with all its members and liaisons, involving them and their stakeholders in the discussions to attain consensus and general support.

Outlook in the short and long term

In the short term, the 9th edition of the SI Brochure and the Concise Summary will be published, both in English and French, and officially adopted on 20 May 2019, the day of the implementation of the revised SI.

The CCU will closely follow the transition to the revised SI to ensure a smooth passage.

In the long term, efforts will be focused on monitoring the developments towards the future expected redefinition of the second. Moreover, scientific advances that might have an effect on the realization of the SI units will be monitored and emphasis will be given to core definitions in the VIM, directly relating to the revised SI, like definitions of the terms “unit”, “measurement”, “traceability” and others.

CCU Data

CCU set up in 1964	
President: J. Ullrich	Executive secretary: E. de Mirandés
Membership (since 2018):	11 members, 10 international organizations in liaison, no observers, two personal members, one honorary member
Meetings since the 25th CGPM meeting:	15-16 June 2016, 5-6 September 2017
Two Working Groups:	– CCU Working Group on Angles and Dimensionless Quantities in the SI (CCU-WGADQ) – CCU Working Group on Strategy (CCU-WG-S)

46. Achievements in the measurement of *k* and report from the CCT

Dr Yuning Duan, President of the Consultative Committee for Thermometry (*Comité consultatif de thermométrie*, CCT) reported on achievements in the measurement of *k* and presented his report on the activities of the CCT since the 25th meeting of the CGPM (2014).

Thermometry measurements play a vital role in a sustainable society, such as monitoring global warming, energy saving, manufacturing and fair trade, as well as health and safety and research. Many techniques and control processes rely on reliable temperature and humidity measurements. The unit of temperature, kelvin, is currently defined as 1 part in 273.16 of the thermodynamic temperature of the triple point of water. This definition relies on how the specific material, water, and the isotopic components of water impact the thermodynamic temperature of the triple point of water. Furthermore, the isotopic components of water vary with location.

In recent years, scientists have made great efforts towards the redefinition of kelvin and the CCT has played a unique and important role in coordinating this work. The redefined kelvin will be based on a fixed value of the Boltzmann constant *k*, instead of the temperature of the triple point of water. The proposed redefinition of the kelvin will lay the foundation for future improvements. A definition that is independent of material and technological constraints enables future developments of new and more precise temperature measurement technologies to be exploited, especially at extremes of temperature.

A great deal of scientific research has been conducted towards the redefinition of the kelvin and determining the value of *k* using four primary methods: acoustic gas thermometry; Johnson noise

thermometry; dielectric constant gas thermometry; and Doppler broadening thermometry. In 2017, CODATA accepted the measurement results of three methods: acoustic gas thermometry, dielectric constant thermometry and the Johnson noise thermometry and issued the new value of *k*.

Following the ground-breaking work by the entire thermometry community, the criteria and conditions for the redefinition of the kelvin have been fulfilled and the time is right for its redefinition. With the support of the new *mise en pratique* for the kelvin, following the redefinition, there will be little or no immediate impact on temperature measurement practice and the traceability of temperature measurement.

CCT Executive summary

The CCT covers metrology linked to temperature, humidity and thermophysical quantities[12]. The CCT strategy was updated in 2017 and its recent activity has been focused on the redefinition of the kelvin. New key comparisons are not expected in the near future, only repeats.

A precise and accurate knowledge of temperature is important in science, technology and industry where precision and expanded limits are targeted. Temperature and humidity metrology play important roles in climate studies, whereas thermophysical quantities represent essential information to balance costs linked to energy consumption. Although thermometry is regarded by some as a mature science, it faces new challenges.

Scope of the CCT

The CCT gives advice to the CIPM on all scientific matters and issues that influence metrology in the fields of temperature, humidity and thermophysical quantities. It acts as the focus and network for this diverse community, to develop common aims and collaboration among NMIs and DIs in Member States or with other relevant bodies. The CCT assures continuity and reliable precision of a common international temperature scale and promotes best practice. It also identifies and organizes key comparisons in its fields to establish global comparability of measurements and traceability to the SI, and assures the quality of reported data.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

The CCT and the redefinition of the kelvin

The kelvin is currently defined by the temperature of the triple point of water; the temperature where ice, water and water vapour coexist. This temperature is realized using a glass or quartz cell containing water. Improvement of the associated uncertainty has been achieved by a better understanding of the influence from the isotopic composition of the water, an outcome of the international key comparison CCT-K7. Nevertheless, the definition is still linked to a device that limits precision and realization of extreme low or high temperatures.

The redefinition of the kelvin by the Boltzmann constant was the focus of the CCT meeting in June 2017; the CCT played an important role in coordinating this achievement. This new definition is based on an invariant constant and is not only universally accessible but will allow improved precision in the future as well as providing a stable reference for future generations. Substantial progress has been achieved by a large number of NMIs. The different techniques and realizations applied to determine the Boltzmann constant *k*, a constant that links temperature to energy with high precision, are the basis of obtaining a robust value. A range of very different approaches has successfully been exploited to contribute to this common goal: precise determination of the speed of

[12] Thermophysical quantities describe thermal behaviour in matter, such as thermal conduction or thermal insulation.

sound; techniques taking advantage of the thermal properties of the dielectric constant; measuring temperature related electric noise or determining the Doppler broadening of optical frequencies.

International collaboration between the institutes involved was indispensable to get a clear picture of the results. The two conditions for the redefinition of kelvin proposed by the CCT were:

- a relative standard uncertainty of the adjusted value of k less than 1×10^{-6}, and
- a determination of k based on at least two fundamentally different methods, of which at least one result for each has a relative standard uncertainty less than 3×10^{-6}

These conditions were fulfilled. Furthermore, for the first time, the uncertainty of the Boltzmann constant is smaller than the uncertainty of the applied temperature scale, an additional indication that the time is appropriate for a redefinition. The CODATA special adjustment in 2017 provided the exact value:

$$k = 1.380\ 649\ 10^{-23}\ \text{J/K}.$$

The preparation for the new definition of the kelvin has been accomplished by establishing a new *mise en pratique* (available on the BIPM website) on how the new definition may be realized. It contains a main document completed with a number of appendices with detailed technical information on the primary standards and guidance on how to realize the kelvin via the Boltzmann constant and evaluate the associated uncertainty. This document is not only a guide but represents the current uppermost level of thermometry as well as decades of experience. It represents an excellent outcome by the CCT.

The temperature scale ITS-90 is presently not affected by the redefinition. An electronic *Guide to the realization of the ITS-90* (available on the BIPM website) was completed in 2017. It is available on the BIPM website and is a unique manual for thermometrists and has been realized within the auspices of the CCT.

A *Metrologia* focus issue on the Boltzmann constant was published in 2015.

The different primary instruments developed for the determination of the Boltzmann constant are now used to measure thermodynamic temperature over a wide range of temperatures to determine the difference to the present temperature scale ITS-90. This phase is expected to last until the mid-2020s and will stimulate the need for a new temperature scale.

Strategy

In 2012, the CCT carried out a significant analysis of its accomplishments since the introduction of the CIPM MRA and a forecast of its impact. This analysis was updated and published on the BIPM website in 2017. The CCT strategic plan provides a global picture of the present and future needs in thermal metrology. No thermometry activities are carried out at the BIPM; the strategic plan is of relevance to the NMIs, DIs and their stakeholders.

Dominant areas for stakeholders' needs are within the energy sector, climate and global warming, high-value manufacturing, health and safety, electronics and materials industry, science and research.

No increase in the number of key comparisons is presently expected. The comparison phase within thermometry is mature and is dominated by repeats of key comparisons.

There are seven Working Groups within the CCT today. In addition, the CCT is supported by a number of Task Groups, which have a limited duration depending on achievement of the objective and/or time.

Comparisons and working groups

Several comparisons within the CCT have been completed since the 25th meeting of the CGPM (2014). Notably, the first key comparison in humidity was completed and the results were published in 2015. The first supplementary comparison within the CCT on the cross-disciplinary field of thermophysical quantities was also concluded and the final report was published in 2016. Repeat comparisons are in progress, notably on the realization of ITS-90 using Standard Platinum Resistance Thermometers. A repeat of the realization of the triple point of water is planned to start in 2019. The CCT has identified seven key comparisons, listed in the table below.

The CCT is assisted by working groups that deal with matters on key comparisons, calibration and measurement capabilities (CMCs) and strategy. These working groups are supported by the working groups for contact and non-contact thermometry, humidity and environment. Recent outcomes of the working groups are summarized in the *CCT Strategy document (2017)*[5]. Task Groups that had accomplished their objectives for the *mise en pratique* and the redefinition of the kelvin were closed in 2017. A new task group was created on emerging technologies (CCT-TG-CTh-ET). It will explore new possibilities for self-calibrating and small size devices. These devices have been made possible by exploring quantum physics, which is likely to modify the "landscape" of thermometry. The group is tasked with making a survey of this field and will report to the CCT at its next meeting, which is expected to be held in 2020.

Set of CCT key comparisons		Repeats	
CCT-K1	Realization of the ITS-90 from 0.65 K to 24.6 K		
CCT-K2	Realization of the ITS-90 from 13.8 K to 273.16 K		
CCT-K3	Realization of the ITS-90 from 83.8 K to 933.4 K	**CCT-K9**	Realization of the ITS-90 from 83.8 K to 692.7 K
CCT-K4	Comparison of local realizations of AL and Ag freezing-point temperature		
CCT-K5	Realization of the ITS-90 from 961 °C to 1 700 °C	**CCT-K10**	Realization of the ITS-90 from 961 °C to 3 000 °C
CCT-K6	Humidity: Dew and frost point temperatures (−50 °C to 20 °C)	**CCT-K8**	Humidity: dew point temperatures (30 °C to 95 °C)
CCT-K7	Water triple point cells	**CCT-K11**	Repeat foreseen in 2019

Interaction with international bodies

Since 2015, the CCT, via the Working Group for Environment (CCT-WG-Env), has been represented on the Commission for Instruments and Methods of Observation (CIMO) Expert Teams of the World Meteorology Organization (WMO). There has been reciprocal input in the CCT working group.

Active exchanges are made with the International Association on Properties of Water and Steam (IAPWS) on issues related to humidity.

In addition, there are opportunities for international communication at the TEMPMEKO conference, the most recent of which was held in Zakopane (Poland) in 2016.

Meeting of the CCT in 2017

The CCT met on 1 and 2 June 2017 at the BIPM, preceded by Working Group and Task Group meetings. A number of NMIs that were neither members or official observers of the CCT, but which

were from Member States of the BIPM attended as observers: INM (Colombia), INTiBS (Poland), NIS (Egypt) and SASO-NMCC (Saudi Arabia). The chairperson from each technical committee for thermometry within the RMOs was invited to attend. The CMI (Czech Republic) presented their request to become member of the CCT, which was approved by the CIPM in 2017.

A list of actions and decisions is available on the BIPM website and the proceedings of the meeting have been published.

Outlook in the short and long term

Precise and accurate knowledge of temperature is important in all scientific fields where precision and expanded limits are targeted. The redefinition of the kelvin will notably stimulate the establishment of a new temperature scale; a particularly important task for the CCT.

Credible thermal design for production control in the metallurgical and ceramic industries relies on thermophysical quantity data related to transfer and storage of heat (thermal conductivity, heat capacity and thermal diffusivity). Improvements in thermal insulation represent huge cost reductions world-wide and a reduction of global energy consumption.

Reaching an SI-based definition of relative humidity represents a big challenge where a significant user community is involved. Furthermore, developments in the humidity field are required to support industrial measurements in diverse gases such as carbon dioxide, hydrogen and fuel gas mixtures.

In the longer term, increasing computer power through quantum computing is a potential growth industry requiring accurate temperature measurement at very-low temperatures.

Climate and meteorology are priority areas. Temperature and humidity are fundamental quantities involved in a wide range of climate change investigations. Comparability for meteorological observations and traceability to international measurement standards must be improved.

New technology allows the production of small-sized thermometry devices, opening the door to new applications. The CCT anticipates this progress.

The CCT is facing several challenges. For the scientific community, the future redefinition of the kelvin is clear and consistent but appears abstract to most of the user community; there is a challenge in how to make this concept more accessible, for example to schoolchildren and students.

Comparisons to accomplish traceability are made by circulating sensitive devices or reference materials. This process is unavoidably time consuming and transport problems are regularly encountered. Other problems are linked to customs procedures or regulatory and safety issues.

Finally, thermometry is regarded by many people as an “old” science and fewer students are attracted to this academic field. There is real concern over how to maintain existing know-how in this particular discipline, not only in the metrology sector but also in the manufacturing sector, as this is fundamental to high-precision science and technology. The onus is on the thermometry community to communicate more clearly the importance of the discipline.

CCT Data

CCT was set up in 1937	
President: Dr Yuning Duan	Executive Secretary: Dr Susanne Picard
Membership	24 members and one observer
Meetings since the 25th CGPM meeting:	1–2 June 2017
Seven Working Groups:	– Key Comparisons (WG-KC) – CMC Coordination (WG-CMC) – Strategic Planning (WG-SP) – Contact Thermometry (WG-CTh) – Non-Contact Thermometry (WG-NCTh) – Humidity (WG-Hu) – Environment (WG-Env)
Five Task Groups:	– Emerging Technologies (TG-CTh-ET) – Guide to Thermometry (TG-GoTh) – Themophysical Quantities (TG-ThQ) – Non-Contact Thermometry CMCs (TG-NCTh-CMC) – Non-Contact Thermometry HTFP Uncertainties (TG-NCTh-HTFPU)

CCT Comparison activity	Completed	In progress	Planned [2019-2022]
CCT key comparisons (and supplementary comparisons)	14 + (1)	9 + (2)	1
BIPM comparisons[13]	0	0	0
CCT pilot studies	3	0	3
CMCs	2 688 thermometry CMCs registered in the KCDB (1 September 2018)		

47. Achievements in the quantum electrical effects and report from the CCEM

Dr Gert Rietveld, President of the Consultative Committee for Electricity and Magnetism (*Comité consultatif d'électricité et magnétisme*, CCEM) reported on achievements in the quantum electrical effects and presented his report on the activities of the CCEM since the 25th meeting of the CGPM (2014).

Following an introduction on the importance of electrical measurements in daily life he presented the present definition of the ampere, which is "*The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 metre apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to* 2×10^{-7} *newton per metre of length.*" He stressed that this definition does not mention the electron. The realization of this definition can never be better than the realization of the kilogram from the International Prototype and this is a challenge that the CCEM has been working on to improve for many years.

Dr Rietveld noted that there are existing quantum standards for voltage (Josephson effect) and

[13] One of the completed CCT comparisons was piloted by the BIPM.

resistance (quantum Hall effect). They can only be linked to the SI with accuracy at the 10^{-7} level, whereas the agreement between quantum standards for voltage and resistance is better than the 10^{-10} and 10^{-9} level respectively; this was a driver for change. Recent developments in quantum standards, for example, for AC JVS and the quantum Hall effect in graphene are expected to enlarge the range of applications.

Some of the member institutes of the CCEM are working on developing a quantum current standard based on manipulating single electrons. The rationale is that if it is possible to manipulate a single electron it will provide a much better basis for defining the ampere. A single-electron transport standard would allow the application of a certain frequency that would cause electrons to move through the device, one-by-one. Recent progress with single-electron transport has achieved an accuracy of $\sim 2 \times 10^{-7}$.

Dr Rietveld presented the Kibble balance and explained its role in paving the way towards the revised SI. The Kibble balance allows the force exerted by gravity on a mass to be compensated by an electrical force. The Kibble equation compares the mechanical watt and the electrical watt (the product of voltage and current) and a link is established between the macroscopic mass m and the Planck constant h by measuring the electrical quantities with quantum standards.

By fixing the values of the Planck constant h and the elementary charge e, the electrical units will be "back in the SI"; however the values of h and e do not align perfectly with the 1990 values and the CCEM will be the only CC that has to manage the consequences of a step change of units following the revision of the SI. There will be a change of 1 part in 10 million in voltage and a smaller step of 2 parts in 100 million in resistance. The new definition of the ampere is as follows: "the ampere, symbol A, is the unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge e to be $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{Cs}$". Dr Rietveld said that the CCEM has published papers and has undertaken outreach activities to educate its stakeholder community on how to deal with the step change. The change will not really be detectable for industrial users, although NMIs or industries that exploit quantum standards will have to refer to the CCEM Guidelines for Implementation of the Revised SI for guidance.

Dr Rietveld commented that the advancement of measurement science is all about people. The metrology community relies on the discoveries of Brian Josephson and Klaus von Klitzing, the Josephson effect and the quantum Hall effect, which are the basis of all the CCEM's electrical measurements. He also mentioned the late Bryan Kibble, who was crucial in inventing the moving-coil watt balance, now called the Kibble balance, which allowed the link between electrical and mechanical standards to be made. He thanked all the scientists in the electricity and magnetism community that continue to build on their legacy and their inventions, leading to further advances and increasing accuracy and applicability. He commented that he was proud to be President of this vibrant community of outstanding researchers.

Dr Rietveld concluded by thanking the governments that have provided the financial and moral support to advance the quantum standards and to facilitate work on the Kibble balance. In particular he thanked all the governments that have invested in the development of Kibble balances and continued to invest in them. He said that the electricity and magnetism community went quantum thirty years ago and it was the best thing that it could have done, however, a problem remains. The electricity and magnetism community is not exactly in the middle of the SI; it is 1 part in 10 million apart. This problem cannot be solved in isolation. He commented that the Member States have been provided with all the measures to remedy the situation, so apart from moral and financial support, a vote in favour of the revised SI is required.

CCEM Executive summary

The Consultative Committee for Electricity and Magnetism covers a very broad field of metrology which is based on a large number of measurement standards, realizing many derived units and ratios over a wide frequency range. Since the 25th meeting of the CGPM, significant steps have been taken to increase the impact and the efficiency of the CIPM MRA in the EM area, most notably via more strategic planning of comparisons, full implementation of matrices in the presentation of CMCs, and the introduction of a more efficient CMC review process. The BIPM has provided continued support to the worldwide comparability of EM measurements amongst others via its ongoing key comparison programme.

Based on the outcomes of the 2017 CCEM workshop on "Future Challenges in Electrical Metrology", a first discussion was held on revision of the existing CCEM strategy, setting new priorities for the future. At the next CCEM meeting in March 2019 a new CCEM strategy, based on the workshop outcomes, will be discussed.

Major scientific efforts over the past four years have been devoted to progressing electrical methods to realize the kilogram, in preparation of the proposed revision of the SI. A draft *mise en pratique* has been developed for the base SI electrical unit, the ampere, and for derived electrical units in the revised SI. Since the introduction of the revised SI will introduce a small step change in voltage and resistance measurements and related derived quantities, CCEM Guidelines for Implementation of the 'Revised SI' have been prepared to support the electrical stakeholder community in handling this step change.

Scope of the CCEM

The CCEM is responsible for advising the International Committee for Weights and Measures (CIPM) on all matters related to measurement standards for electricity and magnetism, including the EM work programme activities of the BIPM Physical Metrology Department.

The application of electricity is ubiquitous in daily life and electrical metrology covers a broad field involving many quantities and requiring many derived standards. Typical examples are voltage, current, resistance, capacitance, inductance, power, transformer ratio, ac-dc transfer, electrical field strength, magnetic field strength, antenna factors and radiofrequency scattering parameters. In many cases, the quantities span both a very wide range of values (for example nanovolts to megavolts) and frequencies (ranging from dc far into the radiofrequency range), with different techniques required for different ranges.

Due to the vastly different technologies required in the low frequency and the radiofrequency ranges, the detailed technical work of the CCEM is undertaken by two CCEM Working Groups: the CCEM Working Group on Low-Frequency Quantities (CCEM-WGLF) and the CCEM Working Group on Radiofrequency Quantities (CCEM-GT-RF).

Strategy

The present CCEM strategy document was developed in 2013 and focuses on two main components: future technical challenges in electromagnetism and the need for future key comparisons. At the start of the CCEM strategy review, a workshop was held on 23 March 2017 on "Future Challenges in Electrical Metrology". The workshop covered the following major themes and challenges (presentations are available on the CCEM web pages):

- Quantum technology;
- NMI on a chip;
- Nanomagnetism and spintronics;
- Electrical measurements for micro / nanoelectronic devices;

- High-frequency electromagnetic metrology (RF to terahertz);
- Electrical power and smart grids.

Following the workshop, the CCEM strategy summary has been updated to reflect the workshop outcomes. An important part of the CCEM strategy is to further improve the efficiency and effectiveness of the CIPM MRA via strategic planning of KCs, by optimizing CMC reviews, and implementing further recommendations of the CIPM MRA review work group. The full CC strategy is presently under review and will be discussed during the next CCEM meeting on 28-29 March 2019.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Main activities

Two CCEM meetings were held during the period 2015-2018, one on 12-13 March 2015 and one on 22-24 March 2017. The meeting reports and the majority of the presentations/working documents are publicly available on the CCEM webpages.

At the 2015 and 2017 CCEM meetings, major attention was paid to matters related to fundamental constants and the revision of the SI. The CCEM Working Group on Electrical Methods to Monitor the Stability of the Kilogram (CCEM-WGKG) presented the world-wide state-of-the-art in watt balances and their measurement results for the Planck constant *h*. This WG furthermore organized regular meetings of scientists working on watt balance experiments, to which representatives of the Avogadro community were invited, for in-depth discussions of technical matters between the scientists working on these experiments. The CCEM strongly supported the proposed renaming of ‘watt balances’ to ‘Kibble balances’, in honour of the late Dr Bryan Kibble for his invention of this crucial instrument towards a revision of the SI.

The CCEM Working Group on Proposed Modification to the SI (CCEM-WGSI) drafted two important documents. First of all, a draft *mise en pratique* was developed for the base SI electrical unit, the ampere, and for derived electrical units in the revised SI. Secondly, since the introduction of the revised SI will introduce a small step change in voltage and resistance measurements and related derived quantities, “CCEM Guidelines for Implementation of the Revised SI” have been prepared to support the electrical stakeholder community in handling this step change. The documents were discussed at the CCEM meetings, and their final versions were approved by the CCEM members for publication on the BIPM website.

Other CCEM meeting discussions on the revised SI concerned updates from the CCU work towards the revision of the SI, most notably updates of the 9th edition of the “SI brochure” (including the new definition of the ampere), and reports from the CODATA Task Group on Fundamental Constants.

Further important discussions at the CCEM meetings concerned progress updates by three other CCEM working groups, reports of the work programme of the BIPM electricity laboratories, review of the CCEM strategy, and improvement of the efficiency of the CIPM MRA.

In 2013, the CCEM had the largest number of CMC entries (about 7 100) in the BIPM key comparison database (KCDB), reflecting the broad field covered by electromagnetic metrology. However, stimulated by the CCEM Working Group on RMO Coordination (CCEM-WGRMO), in the subsequent five years NMIs have consistently introduced matrices in the presentation of their CMCs, reducing the number of CMC entries in the EM area by almost 40 % to less than 4 400 in November 2018. This has resulted in a significant decrease in the maintenance efforts for the CCEM CMCs, at the same time providing better CMC overviews to the users of the KCDB containing these CMCs.

In the same period, the CCEM-WGRMO has optimized the CMC review process. All EM CMCs continue to be reviewed within the RMO (the intra-RMO review). The inter-RMO review, however, is significantly optimized: instead of having *all* other RMOs review the *complete* CMCs of a certain RMO, the review of these CMCs is now divided among the RMOs. Some relatively straightforward CMCs may even not be selected by the WGRMO chair for inter-RMO review. The rigidness of the inter-RMO review process is still guaranteed, as any RMO is free to review any CMC not assigned to it by the WGRMO chair for review.

Since the 25th meeting of the CGPM, the CCEM has approved three CCEM key comparisons and ten RMO key comparisons. It has reviewed 15 RMO supplementary comparisons. The BIPM Electricity laboratories have carried out 26 bilateral comparisons during this time.

The first round of key comparisons in electricity and magnetism is complete and a comparison plan for a second round has been carefully set up. In the field of low frequency measurements, the existing list of key comparisons is considered to be appropriate (with some minor modification of parameters) and it was decided that the comparisons should be repeated during the next ten years. In the field of radiofrequency measurements it is not generally possible to repeat all comparisons, since the resources are limited and the number of quantities is very large. A higher priority has been assigned to comparisons in frequency bands that have not yet been covered. For both fields, lists of future comparisons have been established, ranging until 2022. The first new comparisons have started.

One of these comparisons is CCEM-K4 on capacitance. Here, a new comparison scheme has been trialled, where all participating NMIs have sent their travelling standards to the BIPM for measurement. This so called “star scheme” has resulted in a very effective performance of the comparison: the total time from comparison start to the final agreed comparison report is less than two years; a record in the EM area. This result would not have been possible without the commitment made by the BIPM to carry out all the measurements as well as to coordinate the logistics.

The existing CCEM policy to maintain a strong science focus in its meetings has been reinforced: speakers were invited to make presentations on new developments in electrical metrology. Dr F. Schopfer (LNE) presented ‘Advances in user-friendly quantum Hall resistance standards based on graphene’, Dr P. Hale (NIST) gave a presentation on ‘Waveform characterization’, and Dr W. Poirier gave insight in the LNE work on ‘Practical quantum realization of the ampere’. Furthermore a scientific workshop on “Future challenges in Electrical Metrology” with six invited speakers was held on 23 March 2017. It was decided to hold a similar scientific workshop at the next CCEM meeting in 2019.

SCL (Hong Kong) and NIS (Egypt) became a CCEM Observer in 2015 and 2017 respectively, and CENAM (Mexico) became a CCEM Member in 2015.

Challenges and difficulties

The CCEM needs to respond adequately to new metrology challenges in the EM area. To this end, the CCEM strategy will be revised and updated to identify these challenges. Furthermore, scientific workshops will be held to provide better insight in these challenges and to reach an effective joint approach to meet them.

The efficient performance of key comparisons remains a challenge to the EM community. Following the success of the CCEM-K4 comparison, it will be examined whether a similar ‘star scheme’ can be used for other comparisons. This will very much depend on the availability of suitable travelling standards, as well as a coordinator that is willing to be the central laboratory in the star scheme, and which will perform the vast majority of the measurements.

The effective implementation of the CIPM MRA will continue to require attention in the coming

years. Presently, a review of the CMC categories in the high-voltage area is under way to match these more closely with the state of the art in the field and present industrial practice. The CMC review process has been significantly improved but may require further fine tuning. The implementation of the KCDB2.0 in the year following the 26th meeting of the CGPM will be a major step forward for the CCEM, but will require significant attention to ensure a smooth transition from the 'old' to the 'new' KCDB.

Outlook in the short and long term

The planned adoption of the revised SI by the 26th meeting of the CGPM is expected to stimulate the development of quantum standards as they will become the direct realizations of the SI units. The trend in these developments is for simple, table-top systems that are easy to use, also by industrial stakeholders. Additionally, the potential development of a true quantum current standard opens up exciting new possibilities for realization of the SI; the progress in this area has already been significant during the past four years. The proliferation of quantum standards will further increase the relevance of the BIPM bilateral on-site comparisons of DC and AC Josephson voltage standards and quantum Hall resistance standards.

The revised SI will lead to a need for the development of "routine operation" watt balances, requiring the development of more economical and reliable electrical standards with the lowest possible uncertainties. The need for precision electromagnetic measurements to realize mass, not only at the kilogram level but also for smaller masses, will necessarily demand a continuing role for the CCEM.

Two rapidly evolving areas within EM measurement challenges that had been mentioned previously in the CCEM report to the 25th meeting of the CGPM were (smart) electricity grids and the radiofrequency and microwave area. Both will require attention to assure an adequate response from the CCEM community. A scientific workshop in parallel with the 31st CCEM meeting (2019) will be devoted to the latter, with industry and GT-RF experts providing an overview of the most recent developments in the field.

CCEM Data

CCEM set up in 1927 (as the CCE)

President: G. Rietveld	Executive Secretary: M. Stock
Membership:	25 members and three observers
Meetings since the 25th CGPM meeting:	12-13 March 2015, 22-24 March 2017
Five Working Groups:	– RMO Coordination (WGRMO) – Low-Frequency Quantities (WGLF) – Radiofrequency Quantities (GT-RF) – Proposed Modification to the SI (WGSI) – Electrical Methods to Monitor the Stability of the Kilogram (WGKG)

CCEM Comparison	Completed	In progress	Planned
CCEM key comparisons (and supplementary comparisons)	48[14]	6	20
BIPM comparisons	1	9 (ongoing)	9 (ongoing)
CCEM pilot studies	0	1	2
CMCs	4 374 CMCs in 194 service categories registered in the KCDB		

48. Achievements in the measurement of *h* and report from the CCM

Dr Philippe Richard, President of the Consultative Committee for Mass and Related Quantities (*Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées*, CCM) reported on achievements in the measurement of *h* and presented his report on the activities of the CCM since the 25th meeting of the CGPM (2014).

Following an introduction of the importance of the kilogram and its derived units in everyday life, Dr Richard recalled that the international prototype of the kilogram (IPK) has been carefully preserved at the BIPM for nearly 130 years. However, it is known that the IPK has its limitations: it allows the realization of the kilogram at the nominal value of only 1 kilogram; it is not possible to control its intrinsic stability; it can be damaged during use; and it can suffer surface contamination. As a result, the need to find a better solution to define the kilogram has increased over time.

Mr A. Danjon, the CIPM President at the time of the 11th meeting of the CGPM (1960), referring to the IPK said that, "…*it must be admitted that its invariability is something of a miracle. In practice, it is only used rarely for fear of altering it. This is a weakness of the Metric System to which metrologists must sooner or later provide a remedy*." The miracle mentioned by the CIPM President in 1960 has thus lasted more than 130 years.

The CCM has been following the redefinition process and the progress made in the various laboratories towards redefining the kilogram for decades. In order to manage this change, the CCM set out a series of conditions to be met and recommendations to be followed before proceeding with the redefinition. The CCM had developed a roadmap to support the stakeholders on the path to the redefinition. Dr Richard recalled that he had already presented an earlier version of this roadmap at the 25th meeting of the CGPM (2014).

Dr Richard gave an overview of the determination of the Planck constant *h*. The 25th meeting of the CGPM (2011) retained *h* as a fundamental constant to be used in the future redefinition of the kilogram. A number of improvements have been made since then. In particular, there are two types of experiments that have met the challenge of being the most accurate determination of this constant. The first is the Kibble balance, also known as the watt balance. According to the journal *Nature*[15], the Kibble balance is one of the five hardest physics experiments in the world. For example, it can be compared to a level of difficulty comparable to that of identifying the Higgs boson. Three different Kibble balances in different countries have directly contributed to setting the final value of *h*, which is achieved by comparing electrical power and mechanical power in a complex mechanical system.

[14] Including 18 approved for provisional equivalence before 1999.

[15] Jones N., Frontier experiments: Tough science, five experiments as hard as finding the Higgs, 2012, *Nature*, **481**(7379), 14-17.

Several additional experiments are now almost complete; they will be ready to contribute to the realization of the kilogram in 2019. The second type of experiment consists of counting atoms in a sphere of silicon and, in particular, determining the density of a silicon crystal using x-ray crystal density (XRCD). This is known as the Avogadro experiment. The result is that two fundamentally different types of experiment, the Kibble balance and the Avogadro experiment, have together contributed to fixing the final value of *h* that will define the kilogram following the redefinition.

It is important to recall the conditions that were set by the CCM and the recommendations that had to be followed before proceeding with the redefinition of the kilogram. These were: to ensure the consistency of the results of the various experiments; to guarantee the lowest level of uncertainty possible for determining *h*; to ensure the shortest possible traceability path between the IPK and *h*; and the procedures for the realization of the kilogram had to be clearly defined in the implementation and had to be compatible with the principles of the CIPM MRA. In conclusion, the CCM, CCU, CCEM and the CIPM found that all the conditions laid down by each committee had been generally met, thus opening the door for the redefinition of the kilogram to proceed.

Dr Richard said that thanks to excellent planning and intense efforts, the CCM and the entire metrology community have achieved their objective of linking the kilogram to *h*. He described the main advantages of the revised kilogram. Most importantly, the long-term stability of the kilogram will be guaranteed. The new definition also allows for future improvements in the realization of the kilogram, based on *h*, as instruments continue to improve and new experiments are developed. Furthermore, the new definition allows the realization of units in all places and at different nominal values. It will also allow electrical units to reintegrate into the SI (see §47).

CCM Executive summary

The CCM has active working groups that span the following diverse areas of metrology: realization of the unit of mass, dissemination of the unit of mass, density and viscosity, force and torque, pressure and vacuum, fluid flow, hardness and gravitational acceleration. The CCM Working Group on Strategy and MRA coordination (CCM-WGS) seeks to provide guidance on coordinating and harmonizing these activities.

Much of the present activity of the CCM is focused on preparing the transition to a new definition of the kilogram by following a roadmap developed to organize this work. However, not all the working groups are affected by this change but instead are concerned with the improvement of existing technical capabilities or the development of new capabilities.

Scope of the CCM

Present activities concern matters related to the comparisons of mass standards with the international prototype of the kilogram (IPK), considerations affecting the definition and realization of the unit of mass, establishment of international equivalence between national laboratories for mass and a number of related quantities (density, pressure, force, fluid flow, viscosity, hardness, gravitational acceleration) and advice to the CIPM on these matters.

Strategy

A major revision of the CCM Strategy was made by the Working Group on Strategy and MRA coordination in 2017. The CCM strategic plan for 2017-2027, as well as the Executive Summary, are available on the CCM website.

The major themes, challenges and actions in the strategy document are to:

- Coordinate the transition to the new definition of the kilogram;
- Ensure consistent dissemination of the mass unit after the redefinition;
- Stay current with technical developments in CCM technical areas not directly affected by redefinition of the kilogram;
- Improve the operating efficiency of the CCM by defining clear action plans and structured reporting;
- Further improve the efficiency and effectiveness of the KC and CMC reviews by addressing the key recommendation of the CIPM MRA review;
- Encourage common views across the CCs and aim at an improved coordination of work across the CCs.

Many of these themes are reflected in the following sections.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Main activities

Two CCM meetings were held during the period 2015-2018, one on 26-27 February 2015 and one on 18-19 May 2017. The meeting reports and the majority of the presentations/working documents are publicly available on the CCM webpages. The progress of the tasks according to a joint CCM and CCU roadmap, based on the CCM roadmap established in 2013, was reviewed during these meetings. The meetings also saw progress within the CCM on the final drafting of the *mise en pratique* as well as the formulation of two CCM recommendations, in particular CCM Recommendation G1 (2017) for a new definition of the kilogram in 2018. The latter recommendation was formally submitted and approved by the CIPM.

A calibration campaign with respect to the IPK, in anticipation of the redefinition of the kilogram, was performed at the BIPM. A pilot study of 1 kg mass standards, calibrated with relation to future primary realization experiments for the mass unit was completed successfully. The results of both the calibration campaign and the pilot study were published in *Metrologia* and made publicly available on the CCM webpages. The first key comparison of realizations of the redefined kilogram is being organized.

A *Metrologia* Focus Issue on Realization, Maintenance and Dissemination of the kilogram was coordinated by the CCM Working Group on the Realization of the kilogram (CCM-WGR-kg). The first contributions were published online in 2016. The issue contains technical papers in support of the *mise en pratique* of the new definition of the kilogram. A short note on the dissemination process after the proposed redefinition of the kilogram has been written. A more detailed guidance document is being developed for the CCM members and the NMIs. A joint CC statement on the proposed revision of the SI is now available as well as a CCM statement about the redefinition of the kilogram. A new tab giving links to the future redefinition of the kilogram was created on the CCM webpage. Therefore, all key documents mentioned above, as well as others related to this important change, are easily accessible.

In 2015 and 2016 the CCM President held various seminars and made oral presentations to raise global awareness of the redefinition of the kilogram in Germany, China and Japan as well as at the 2015 NCSL International Workshop and Symposium in the USA and at the XXI IMEKO World Congress in the Czech Republic.

A Task Group on the Phases for the Dissemination of the kilogram following redefinition (CCM-TGPfD-kg) was created by the CCM President in early 2018. The Task Group held its first

meeting in July during the 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. The Terms of Reference (ToRs) and membership of the CCM Working Groups (WGs) have been revised. The WGs now include common ToRs covering KCs and CMCs and, as *ex officio* members, the chairs of Regional Committees or their representatives. In addition, two WGs have changed their names to better reflect the activities undertaken and the issues addressed within the WGs.

NIS (Egypt) became a CCM Observer in 2015 and DFM (Denmark) became a CCM Member in 2017. An important activity of the CCM since the 25th meeting of the CGPM (2014) has been to provide advice during a full review of the CIPM MRA. Additionally, the CCM has identified the needs for additional guidelines and templates to improve the efficiency of the KCs and the CMC review within the CCM. The *CCM Guidelines for approval and publication of the final reports of key and supplementary comparisons* was revised. The revisions mainly clarify the reporting of comparisons and their impact on CMC claims. A template for key comparisons reports containing detailed explanations and examples was produced. The *CCM Guidelines for Submission and Review of CMCs* was completed. The document outlines the general principles for an "efficient and effective" approach to CMC review within the CCM. Specific guidance documents, which apply to the measurands, are being developed in the CCM WGs. All these guidance documents are publicly available on the CCM webpages. In addition, a review of all CCM comparisons has been conducted; 33 CCM KCs were surveyed. Guidance is needed on: appropriate methods to calculate Key Comparison Reference Values (KCRVs), useful flow charts or software templates for KCRV calculations, and treating the consequences of unstable transfer standards. The NIST consensus builder is at present being tested in WGs for the KCRV calculation.

Challenges and difficulties

The mass community faces major challenges in implementing the redefinition of the kilogram after its adoption in November 2018. The various communities with legitimate concerns that must be addressed are: NMIs that have developed a suitable realization of the new definition; NMIs that are working on such a realization; all other NMIs; the legal metrology community; balance and weight manufacturers; the regulatory community; science educators; and the interested public.

The most crucial issue is to manage the different phases for the dissemination of the redefined kilogram in particular the dissemination phase from the consensus value as requested by CCM Recommendation G1 (2017) and its transition to the dissemination from individual realizations. There are a number of technical issues that must be addressed such as the computation of the consensus value and reducing the dispersion in realization experiments.

Within the CCM, there is a wide community of interest as reflected by the diversity of its technical working groups. Only a fraction of these groups are deeply concerned with the redefinition of the kilogram, and it is important to pay close attention to other important concerns such as the metrology of dynamic measurements in force and pressure metrology or new instrumentation in other technical fields.

Other more routine difficulties must also be addressed continually. These include minimizing the delays in carrying out key comparisons and reporting their results.

Outlook in the short and long term

By the end of 2019 the CCM will have held its 17th meeting (16-27 May 2019), preceded by meetings earlier that week of most of its Working Groups, including the Working Group on Strategy and MRA coordination. The major goals of the CCM meeting are:

– Approval of the detailed guidance document on the dissemination process after the proposed redefinition of the kilogram;

- Approval of the protocol for the first key comparison on primary realizations of the new definition of the kilogram;
- Appointment/re-appointment of all WG chairs.

As for the 15th and 16th meetings, each CCM member will be asked to prepare a short written report of relevant scientific activities, to be received by the Executive Secretary prior to the meeting. In a change to previous practice, a half-day meeting will be dedicated to new activities and developments in the areas of metrology that are of interest to the CCM.

By the end of 2020 the CCM expects to complete the first key comparison of primary realizations of the mass unit, the kilogram, and to compute the first consensus value for the dissemination of the mass unit.

In the long term, from 2022 and beyond, the CCM expects to have a strengthened infrastructure that will support the new definition of the kilogram by facilitating the achievement of the following goals:

- Managing the dissemination phase from the consensus value and the transition to the dissemination from individual realizations of the mass unit;
- Reducing the dispersions in realizations of the mass unit;
- Ensuring that a sufficient number of primary realizations of the unit of mass are always available;
- Ensuring that an ensemble of artefact mass standards is maintained at the BIPM to aid in the dissemination of the unit of mass;
- Development of less expensive and more easily operated apparatus (also those based on new ideas, alternative to Kibble balance and XRCD routes) to realize the kilogram in terms of the Planck constant for use by the NMIs;
- Development of commercial instruments for the realization of the kilogram and its submultiples for use at NMIs in the short term, and by a widening range of end users in the longer term;
- Continuing the development of technical and scientific activities in the CCM Working Groups according to the CCM Strategy and the Working Group action plans.

CCM Data

CCM set up in 1980	
President: P. Richard	Executive Secretary: H. Fang
Membership:	23 members and six observers
Meetings since the 25th CGPM meeting:	26-27 February 2015, 18-19 May 2017
Nine Working Groups:	– Strategy and MRA coordination (WGS) – Realization of the kilogram (WGR-kg) – Dissemination of the kilogram (WGD-kg) – Density and Viscosity (WGDV) – Force and Torque (WGFT) – Pressure and Vacuum (WGPV) – Fluid Flow (WGFF) – Hardness (WGH) – Gravimetry (WGG)

CCM Comparison activity	Completed	In progress	Planned
CCM key comparisons (and supplementary comparisons)	91	8	4
BIPM comparisons	0	0	0
CC pilot studies	2	4	1
CMCs	2 802 CMCs in 36 service categories registered in the KCDB		

The President of the meeting thanked the speakers and opened the floor for comments and questions.

Prof. Phillips commented that a redefinition of the second will be needed and it is clear that it is possible to make measurements of time and frequency far better than the current definition of the SI allows. This has been seen during the history of the SI; changes in technology have made it possible to measure things better than the definitions allow. These proposed new definitions will change this situation; the definitions should be good forever and improvements in technology will make their realizations much better. He was of the opinion that this is not the case with time at the moment and it may not be the case with the second, even with the proposed redefinition. Prof. Ullrich replied that the metrology community is looking forward to redefining the second. At present, the frequency used in the definition of the second is the one that can be most accurately realized. The mass of the electron could have been used to define time, but this is currently not good enough. The SI is a practical system and the second is the only part that can be further improved.

Mrs Lagauterie (France) thanked the speakers for their presentation and added some information. She underlined the efforts made regarding the Kibble balance by the NMIs of three Member States: the NIST (USA), the NRC (Canada) and the LNE (France).

An unidentified delegate thanked the speakers for their presentations. He mentioned Gödel's incompleteness theorem, which is a fundamental aspect of mathematical logic. The theorem states that nothing can be universal and true at the same time, which means this system, even now, cannot be true and universal. He commented that discussions with Dr Quinn and Prof. Ullrich had concluded that the revised SI will not last forever, but it will do so for a long time and is much better than the current SI, as has been thoroughly demonstrated by the speakers. Prof. Ullrich replied that although this is basically correct, the definitions of the kilogram, the ampere and electrical units are now based on the quantum nature of the environment. He added that no matter what theories are developed in the future, it will not be possible to measure a macroscopic mass to a level of better than one atom. It might be possible to measure smaller masses, for example the electron mass, and the same may be possible for current. The capacity to use improved realizations has been implemented in the definitions.

Dr Louw (CCRI President and CIPM Member) said that none of the units used by the ionizing radiation community are being redefined *per se* at this General Conference. The ionizing radiation sector measures the rate of decay in becquerels, which is "per second", but the sector does use the kilogram. He recalled the discussions on reference materials for environmental monitoring (see §39) and commented that to determine and monitor radioactivity from soil and water requires preparation methods that are based on mass. The redefinition of the kilogram therefore has important repercussions for nuclear medicine and environmental monitoring. He asked the CCM President to give a practical example of how the redefined kilogram will affect all those types of mass measurements, considering that after the redefinition, the current IPK will take on an uncertainty of about 10 µg. How will that, in practice, influence the determination of mass? Dr Richard replied that this is a complex question that requires an understanding of the future dissemination of the kilogram. There will not be any noticeable difference in the practical use of the kilogram and many of the NMIs already have measuring capabilities with the required accuracy or greater. For the applications specified it will become possible to have absolute stability of the kilogram over longer periods, which is an advantage. There will also be the possibility of achieving direct realization using specific instruments. For example, for very small masses, it will be possible, in principle, to put the value of *h*

into an instrument and obtain a practical realization, which is also an advantage for other communities. Frank Härtig (PTB) added that one of the challenges of the new definition is to determine very small masses. The limit of current measuring instruments is in the range of several micrograms. If an improved instrument is developed which allows the weighing of smaller masses, the possibility now exists with the proposed new definition. Prof. Ullrich said the new definition of the kilogram enables the measurement of atomic masses to a high level of accuracy, for example by recoil experiments. The difficulty is with masses that are somewhere in between this level and the kilogram. He added that this is a technical challenge and was optimistic that new devices will be developed to remedy this situation. He recalled that Kibble balances are designed to be able to also deal with smaller masses and commented that there will likely be further innovations in the future. Dr Richard said that it is currently possible to realize the kilogram at the level of 1 kg, starting from the IPK, which is in Sèvres. It is challenging to go down in the submultiples 500 g, 200 g, 100 g and so on, down to 1 mg. In some laboratories it is possible to measure down to 0.1 mg. However, at each step there is some loss of accuracy and it is not possible to go lower than 0.1 mg at the moment.

Dr Usuda (Japan, CCAUV President and CIPM Member) recalled comments made during the presentations that the achievements towards the revision of the SI would not have been possible without the support of the government of each Member State. He added that the revision of the SI is not a final goal; it is a starting point for further work and he expressed the hope that there will be ongoing support from governments. Mr Henson (BIPM) echoed this comment and thanked the governments for their investment and reiterated the call for their continued support. He stressed that an investment in the BIPM is one of the best investments a government will ever make. History has shown that improvements in the International System of Units have led to massive steps forward in technologies such as the development of GPS navigation, the internet and modern banking systems. Each time a better measurement capability is developed, it furthers technological innovation.

Dr Himbert (France) emphasized that the challenge of teaching the changes to the SI to students at all levels remains. Significant efforts have already been made to promote the reasons for the change and the nature of the change and it is important to address the teaching challenge. This challenge has two aspects. The first is to promote the SI for everybody, everywhere, even if, as has been mentioned, the redefinitions represent a significant change which will have no change in practice. In addition, publicity around the redefinitions represents a tremendous opportunity to make a lot of people aware of the concept of the “quantum world”. Prof. Ullrich agreed with this sentiment and said that the CIPM has set up the CIPM Task Group for Promotion of the SI towards achieving this goal. He thanked the NMIs and everyone who has contributed to this effort and commented that information about the promotional activities can be found on the BIPM website. He agreed that transmitting the message about the quantum nature of the world is worthwhile. Mr Mukhufhi (South Africa) said that an initiative is under way in South Africa to engage with universities, where a curriculum is being developed that covers teaching, not only to university students, but also for high school students and even younger students.

Mr Frøystein (Norway), speaking in his capacity as the Chair of EURAMET, backed up the earlier comments by Mrs Lagauterie, Dr Usuda and the CCEM President by thanking NMIs and governments around the world. In particular, and as the Chair of EURAMET, he thanked the European Union and the Member States of the European Metrology Research Programme (EMRP), which has been running since 2007. The EMRP is an ongoing joint effort that is putting considerable resources into metrology research, not only for the fundamental SI development, but also for industrial innovation and metrology related to solving some of the grand challenges, in health, the environment and energy. Furthermore, collaboration in these projects extends to partners from other parts of the world.

Open session

The President of the meeting opened the open session of the meeting that was simultaneously transmitted as a webcast. He introduced a short video entitled "Scientists to vote on Metric Makeover", which was shown to the delegates. He then gave the following speech:

> "It's with great pleasure I open this public session that will be transmitted as a webcast and will be available to the world. It's a pleasure to mention we have in this auditorium the distinguished delegates of some 60 States, a number of presidents, directors, scientists of prestigious institutions, the press and master's level and high school students.
>
> I am Sébastien Candel of the *Académie des Sciences*. Traditionally, the General Conference on Weights and Measures, this conference, is chaired by the president in exercise and I am greatly honoured to be in this position. This tradition was adopted because the *Académie des Sciences* played a major role in the definition of the metre and in what was to become the metric system. This is linked to the names of de Condorcet, de Borda, Lagrange, Laplace, Monge and to those of Delambre and Méchain. These last two scientists actually measured a quarter of the terrestrial meridian. This was then used to define the metre, which was provided to the *Assemblée Nationale* in 1799 in the form of a platinum standard dedicated 'to all people and to all times'.
>
> About 75 years later, in 1875, the *Convention du Mètre* established the BIPM, *Bureau International des Poids et Mesures*. The Director of the BIPM is on my side on the right. The main mission of the BIPM is to ensure and promote comparability and global harmonization of measures, notably by providing a coherent International System of Units. The President of the CIPM is on my left. The BIPM, represented here by the Director and the delegates to this conference are engaged in a historic change of the International System of Units.
>
> We are now in the final day of the 26th General Conference on Weights and Measures. Today will mark a turning point in the definition of the units of the international system. This move may be surprising but is a logical continuation of those made before. The International System of Units, SI, is reformulating starting from the fundamental constants of physics. It will gain in coherence and harmony with quantum and relativistic physics, as well as with the most advanced quantum metrology technologies.
>
> This webcast comprises four keynote lectures that will be given by Klaus von Klitzing, Nobel Prize winner in physics 1985. He is with the Max Planck Institute, Stuttgart, Germany. Jean-Philippe Uzan from the Institut d'Astrophysique de Paris, he is a research director with CNRS. Jun Ye from JILA in Boulder, Colorado, USA. William Phillips, Nobel Prize winner in physics 1997, from the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA.
>
> Before I give the podium to Klaus von Klitzing, I would like to tell you that after the lectures the Director of the BIPM, Martin Milton, will introduce the resolution on the revision of the international system of units and this will be followed by the vote. Let me first ask Klaus von Klitzing to come to the podium.
>
> Klaus von Klitzing is a German physicist, internationally known for his discovery of the integer quantum Hall effect for which he was awarded the Nobel Prize in Physics in 1985.
>
> He published his first paper on semi-conductors in 1971. He worked on and researched the effects of strong magnetic fields on semi-conductors at the University of Wurzburg where he earned his PhD in 1972 on Galvanomagnetic Properties of Tellurium in Strong Magnetic Fields under the chair of Gottfried Landwehr. He carried out some research work at the Clarendon Laboratory at Oxford University from 1975 to 1976, which was able to provide the required facilities. For this reason, he also went to the High Magnetic Field Laboratory at the Institute

Max von Laue-Paul Langevin in Grenoble, France, from 1979 to 1980. While there he discovered the quantum values in the Hall effect, and found the von Klitzing constant,

$$R_K = h / e^2 = 25\,812.807\,449(86)\Omega$$

In 1980, he joined the University of Munich where he worked until December 1984. In 1985, he became the director of the Max Planck Institute for Solid State Research in Stuttgart.

The significance of von Klitzing's discovery, made in 1980, was immediately recognized by the scientific community. His experiments enabled other scientists to study the conducting properties of electronic components with extraordinary precision. His work also contributed to the determination of the precise value of the fine-structure constant and relevant standards for the measurement of electrical resistance. Klaus von Klitzing, thank you."

49. The quantum Hall effect and the revised SI

Prof. Klaus von Klitzing began by saying that he had given many plenary talks in his life, but this was a highlight of his scientific career, adding that 16 November 2018 is a historic day for metrology. The metrology community has an opportunity to make the vision of Max Planck, which was elucidated in his ideas on quantum physics published in 1900, come true. This work included a chapter on fundamental constants that contained the sentence '*It offers the possibility of establishing units for length, mass, time and temperature which are independent of specific bodies or materials and which necessarily maintain their meaning for all time and for all civilizations, even those which are extra-terrestrial and nonhuman, constants which therefore can be called fundamental physical units of measurement.*' Prof. von Klitzing commented that Max Planck will be a focus of his presentation and noted that 2018 was the centenary of his being awarded the Nobel Prize in Physics. There is a close connection between Nobel Prize winners and metrology; the nature of making high-precision measurements can result in new discoveries.

He continued by saying that the revision of the International System of Units is sometimes referred to as the biggest revolution in metrology since the French Revolution, when the metric system was introduced, most famously, the metre and the kilogram. It is well known that the SI has seven base units (the second, metre, kilogram, kelvin, ampere, candela and mole), but for non-scientists it is not always clear that everything in chemistry, high-energy physics and biology can be traced back to these seven base units. A good foundation is therefore required for these base units. Until today, the kilogram has been based on a prototype, the kelvin is related to the triple point of water, and the ampere is based on the force between current-carrying wires. Today, 16 November 2018, will see a big change in these units.

Prof. von Klitzing recalled two of the milestones towards the revision of the SI, including the publication of a paper in 2005 entitled "Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come" and a meeting at the Royal Society in London on 24 and 25 January 2011 entitled 'The new SI: units of measurement based on fundamental constants', where there had been a discussion on formulating and redefining the kilogram by fixing the numerical value of the Planck constant, and the ampere, kelvin and mole, by fixed numerical values of the elementary charge, the Boltzmann constant and the Avogadro constant respectively. He added that the metrology community has devoted considerable time and effort over the last decade or more to finding new methods to relate the experiments and the units of the experiments to fundamental constants. The discovery of the laser allowed high-precision measurements of the velocity of light and since 1983 the value for the

velocity of light has been fixed, providing a starting point for the revision of the SI.

He returned to Max Planck and his original idea of natural units, the "Planck units" (Planck length, mass, time and temperature) and his use of the Boltzmann constant to explain black body radiation. Despite values that were not useful for practical applications, for example 10^{32} kelvins or 10^{-33} centimetres, the Planck units had practical applications and provided a practical relation between fundamental constants and units. Now the metrology community is ready to introduce a new measurement system based on constants of nature and these constants will play a very important role.

Prof. von Klitzing came to the main point of his presentation on the quantum Hall effect and the revised SI, focusing on the electrical units. The quantum Hall effect and the Josephson effect together constitute a driving force towards a revised SI based on constants of nature. He commented that the pioneering work of Brian Josephson is fundamental when considering the electrical quantum units. At the age of 23, Brian Josephson made a very important theoretical discovery and his work, '*Possible new effects in superconductive tunnelling*'[16] was published in 1962. This provided a new realization of an accurate voltage. He received the 1973 Nobel Prize in Physics "*for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects.*"

Josephson's discovery led to a new way to produce accurate voltages and was the first quantum phenomenon in electricity which could be used for metrology. It was a fundamental discovery and experiments were carried out to determine its universality. By using different materials it was found that voltages can be reproduced at a level of 10^{-16}. Before the discovery of the Josephson effect the electrical voltage used in metrology was produced using a standard electrochemical cell. Due to the Josephson effect, it was possible to improve these measurements by several orders of magnitude. However, four different representations of the volt existed in France, the USA, the USSR and the rest of the world as each had fixed a different value of the Josephson constant $K_J = 2e/h$ (where e is the elementary charge and h is the Planck constant) by comparison against their electrochemical cell. The *Comité consultatif d'électricité* (CCE – now the CCEM) recommended that all countries should use the same value and a new "conventional" value ($K_{J\text{-}90}$) was adopted at the 18th meeting of the CGPM (1990). Today, the metrology community will go one step further and integrate the values of the e and h into the SI, which will have fixed values.

Prof. von Klitzing described his discovery of the quantum Hall effect while working in Grenoble (France) in 1980. This discovery led to a new type of electrical resistance with a fixed value of the von Klitzing constant $R_K = h/e^2 \approx 25812\ \Omega$ and he received the 1985 Nobel Prize in Physics for his work. He commented that all quantum Hall resistances, using different materials such as silicon, GaAs or graphene show the same value with at least ten digits when comparing different devices. However, only eight digits can be measured within the present SI. The requirements to observe the quantum Hall effect are a two-dimensional electron system and strong magnetic fields. Before the discovery of the effect, the standard electrical resistance in most NMIs was maintained using wire resistors; the different wire resistors had to be transported to the BIPM for occasional comparisons. The use of quantum Hall resistors in the NMIs eliminated the need to travel to the BIPM to calibrate these wire resistors. The quantum Hall effect also allowed the absolute drift of wire resistors to be measured against a stable quantum standard for the first time.

The CGPM at its 18th meeting (1987)[17] considered that many national laboratories were using the Josephson effect and the quantum Hall effect to maintain the representations of the volt and of the ohm as this offers of the best guarantee of long-term stability. Furthermore, it considered that because of the

[16] Josephson B.D., "Possible new effects in superconductive tunnelling", *Phys. Lett*., (1962), 1(7), 251-253.
[17] Resolution 6 of the 18th CGPM (1987)

importance of coherence among the units of measurements of the various physical quantities the values adopted for these representations must be as closely as possible in agreement with the SI. Finally, the CIPM recommended in 1988 that 25 812.807 Ω exactly be adopted as a conventional value, denoted by $R_{K\text{-}90}$, for the von Klitzing constant, R_K, that this value be used from 1 January 1990, and not before, by all laboratories which base their measurements of resistance on the quantum Hall effect, and that from this same date all other laboratories adjust the value of their laboratory reference standards to agree with $R_{K\text{-}90}$. At the same time, the CIPM was of the opinion that no change in this recommended value of the von Klitzing constant would be necessary in the foreseeable future. Prof. von Klitzing added that the foreseeable future ends today, 16 November 2018, and he hoped that the vote on Draft Resolution A will be positive. The revised SI will result in a relative shift in the value of R_K of 17×10^{-9}; this will only be seen by NMIs. He said that following the revision of the SI it will be possible to improve the quality of volt meters and ohm meters and therefore he was in favour of making this adjustment now, so that any future jump in the units is avoided.

Prof. von Klitzing noted that following the revision of the SI, the quantum units for the ohm and volt will be unified with the SI units, which will include the fixed values of e and h. The value of $R_K = h/e^2$ will become fixed as well as compatible with the revised SI. The decision to adopt the conventional values of the Josephson constant $K_{J\text{–}90}$ and of the von Klitzing constant $R_{K\text{–}90}$ taken by the CIPM (1988, Recommendations 1 and 2) at the request of the CGPM (18th meeting of the CGPM, 1987 Resolution 6) for the establishment of representations of the volt and the ohm using the Josephson and quantum Hall effects, respectively, will be abrogated.

An unexpected application of the electrical quantum units was their contribution to the realization of an electronic kilogram based on a fixed value of the Planck constant. When using a Kibble balance the mechanical force of the kilogram is compensated by the electromagnetic force. The electrical force is measured with the quantum Hall effect and the Josephson effect: there is a direct relationship between the Planck constant and the mass. The quantum Hall effect is therefore not only important for electrical standards, but also for at least one method to realize the kilogram according to its new definition. In conclusion Prof. von Klitzing said that he was looking forward to the vote on Draft Resolution A and noted that constants of nature are the most stable basis for a universal system of units “for all time, for all people.”

The President of the meeting thanked Prof. von Klitzing for his lecture. He introduced the second keynote lecture, which was on the subject of “The role of the Planck constant in physics.” It was presented by Jean-Phillipe Uzan, a French Researcher in theoretical physics, Director of research at the Institut d’Astrophysique de Paris and at the French National Center for Scientific Research (CNRS). He graduated from the École des Mines of Paris and received his PhD at Orsay University. His research in fundamental physics and cosmology focuses on theories of gravity, construction of cosmological models and a description of the primordial universe. Jean-Philippe Uzan has published more than 120 articles in peer-reviewed journals and has given many lectures internationally. In addition he has written two monographs and is the author of many books. He has received several awards including the Prix Paul Langevin by the French Society of Physics and the Prix Georges Lemaître.

In addition to his research, he is widely known for explanations of science to the general public and in particular to children. His children’s books have been translated into Chinese, Italian, Korean and Spanish. He is co-founder of a science festival for children and is involved in numerous school projects. He is also interested in science and art; contributing to the creation of a play directed by Étienne Pommeret. He has also developed thoughts around music and cosmology and created Vostok, a musical installation in collaboration with Eddie Ladoire and Joep van Lieshout.

50. The role of the Planck constant in physics

Dr Jean-Philippe Uzan stated that he is a theoretician and that he will use the language of theoretical physics to explain the fundamental constants, why they are so important and to understand their role in physics. He recalled that Prof. von Klitzing had introduced the Planck constant and its connection to the kilogram in the previous lecture. The proposed revised International System of Units derives the base units from the numerical values of a set of fundamental constants so that in the end they all relate to a clock. This is not a new idea since this was already the way chosen to define the metre from the second by fixing the numerical value of the speed of light in 1983. In practice this is a major shift in which "concrete" artefacts or physical systems are abandoned and replaced by fundamental constants, which are a more abstract concept, in particular for the general public.

He said that his lecture would give some insight on the nature of these constants and explain why some have been chosen as a reference. It will focus on the Planck constant to illustrate how the status of a constant is actually related to an understanding of physics.

The general trend to define units has been to relate them to objects that are considered to be the most fundamental known. This was highlighted in 1870 by James Clerk Maxwell using the example of the metre. Maxwell argued that the properties of the Earth are not stable enough to define the metre and he proposed the use of the properties of what he thought were the most fundamental objects of nature at the time: atoms, which he referred to as "molecules". Indeed, and as Maxwell explained, if a structure is truly fundamental, it cannot change in time. It is imperishable and unalterable.

However, the more that is learned about nature, the more it becomes apparent that what was thought to be fundamental at one time is actually not. Atoms themselves are not fundamental objects; they are made of protons and neutrons, and these particles are even made of quarks. Only the future will tell if those structures are fundamental or not. Science only provides temporal descriptions that are always evolving. It will never be possible to prove that researchers have discovered the most fundamental theory. Fortunately, in practice this is not a problem so long as it is possible to understand clearly the domain of validity of the theories that are being used, which is when they give a good and accurate description of nature. Are the constants the most fundamental objects known today and if yes why? To answer this question, it is necessary to define a constant.

The dictionary definition (***Constant*** *: PHYS., Numerical value of* ***some*** *quantity that allows to characterize a body. Quantity whose value is fixed (****e.g.*** *mass and charge of the electron, speed of light) and that plays a* ***central*** *role in physical theories.*) acknowledges the central role of constants in the laws of nature. It gives no explanation of their nature and their main characteristic, which is to possess a fixed value. This is actually why they are called "constant". For a physicist, this definition raises questions: how many constants exist? Are they all of the same nature or are some constants more important or fundamental than others? What are their roles in the laws of nature? Can they vary? According to the dictionary the answer is "no" by definition.

Dr Uzan said that the only way to know the nature of the constants is through experimentation and it should not be dictated by a definition. Physicists have tested whether these constants are unchanging in the laboratory and in the universe, at least up to the accuracy of their experiments. Definitions should always follow the properties of nature and not the reverse. Defining concepts is an unavoidable task of theoretical physics, without which theories are not built on solid foundations.

Constants depend on a theoretical framework and without a clear definition, it is necessary to look in places where constants are found, for example in science text books. When looking at physics textbooks from different epochs it becomes apparent that: constants appear (for example the Planck

constant in 1900); can be explained in terms of other constants (for example proton mass); can disappear (for example the Joule constant - proportionality heat/work - due to the understanding that heat and work are just two forms of energy, which are both measured in joules); may become a unit (for example the speed of light since 1983). This highlights a core feature: the fundamental constants are intimately related to the theories of physics. It is not possible to mention fundamental constants without talking about the theories of physics.

He suggested that because the scientific community is defining the set of theories with which it is working, a good definition of a fundamental constant will be "any parameter which is not determined by this set of theories", because in these theories there is no way to predict their values and they have to be measured. The hypothesis that they are constant is backed up by the reproductibility of the experiments that confirm these theories. If they were observed to vary, then one would need to consider an extension of the theoretical framework in which these parameters are dynamical, probably at the expense of the introduction of new constants.

Dr Uzan mentioned that there are two different kinds of constants: those without dimensions and constants with units. Dimensionless constants, for example the proton to electron mass ratio are pure numbers that appear in the laws of nature. These are crucial (unexplained) numbers and changing their values changes the physical phenomena. Concerning the constants with units, their numerical values are completely contingent. As expressed by Max Planck in 1900, the constants with units can be used to define a system of units. For instance, to define the metre, kilogram, second and kelvin, four fundamental constants are required. Planck suggested that it was necessary to assume the value of four constants: the speed of light; gravitational constant; Planck constant; and Boltzmann constant, to unity, then it defines a set of fundamental units. Dr Uzan mentioned the limitations to using Planck's ideas today. This is also what is achieved by the revised SI, with two slight differences: first one cannot use the Newton constant (too badly measured) and one cannot set the value of the chosen constants to 1 since one needs to ensure continuity with the previous definitions of the units.

To define the metre, kilogram, kelvin and ampere four constants are required. Dr Uzan said that specific criteria should be used to select constants that are required to define units. The constants should be universal, so that they are not restricted to a single phenomenon. They should be fundamental in the sense that there is nothing more fundamental in terms of which they can be computed. In addition, there should be some experimental pragmatism; it should be possible to measure the constants in the laboratory using dedicated techniques.

Dr Uzan illustrated the development of constants with reference to the development of the Planck constant, which was first proposed in 1900. To understand its development requires an understanding of black body radiation; a radiation at equilibrium in an oven at a given temperature. There was much debate at the time concerning the shape of the energy spectrum of this radiation as a function of the wavelength and the temperature of the oven. At the turn of the 20th century Max Planck proposed a formula for the spectrum as a function of the wavelength λ of the radiation. It involves two parameters C and C' that can be determined from experiments; however, Planck needed to justify the shape of the spectrum. He gave a talk at the German Physical Society on 14 December 1900 and published a paper[18] with the intention of reproducing the formula he found for the spectrum using two main assumptions. First, he used the definition of the entropy proposed by Boltzmann in 1877 to relate the macroscopic thermodynamic quantity, entropy, to the microscopic nature of radiation. Planck introduced a constant k, known today as the Boltzmann constant. This was the first time this constant appears in the literature. The second assumption concerned the energy exchange between matter and radiation. He assumed that it just happens in discrete "pieces of energy", what will be

[18] Planck, M. (1901). "Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum". *Annalen der Physik*. **309**(3): 553–563.

referred to later as “quanta”. He used a relation of proportionality between these energy elements *epsilon* ε and frequency *nu* ν. It requires a constant *h* since energy is in joules and frequency is in hertz. A constant with a dimension is required and this is the Planck constant. This equation $\varepsilon = h\,\nu$ has no number and is justified only by the fact that it allows Planck to recover his previous black-body spectrum. There is no theoretical motivation for it. Then Planck states that *h* and *k* are two universal constants and, at the end of his article, he derives their numerical values.

At this time Planck’s concept was controversial. Some considered it to be an effective way to describe the interaction between matter and radiation and that it could be derived from a better understanding of this phenomenon. Others thought that it had a deep meaning and revealed a new property of nature. The increase in the universality of the Planck constant, *h*, received support in 1905 when Einstein argued that light (that is radiation) should be described as a fluid of energy elements governed by the Planck relation. Not only are the energy exchanges quantized, but also the energy packets that constitute light. It was revolutionary idea at a time when the description of light as an electromagnetic wave by Maxwell’s theory was a success, theoretically and experimentally. Max Planck had considered that quanta were just for the energy exchange between matter and radiation. A consequence of Einstein’s hypothesis on the nature of light was an understanding of the photoelectric effect. This was tested experimentally by Robert Milikan in 1914, confirming the prediction of Einstein and giving a new measurement of the Planck constant. The word photon was coined in 1926. Arthur Compton demonstrated in 1923 that X-ray photons scatter by electrons as particles. He attributed a momentum to them, thus demonstrating the particulate nature of electromagnetic radiation: light was made of some kind of particles. This represented a big shift, moving from how matter and radiation interact to an understanding that radiation and light have a double nature.

The universality of *h* gained further support beyond electromagnetism and light when in 1924 Louis de Broglie proposed that any particle shall be associated to a wave. The properties of the particle (energy and momentum, E and p) and those of the wave (frequency and wavelength, ν and λ) are related by the Planck constant. This was the beginning of a new concept, the concept of wave function, which is at the heart of quantum mechanics. The Planck constant made it possible to relate physical quantities that previously had no commonality: energies are measured in joule and frequencies in hertz and they cannot be reconciled without a conversion factor.

In parallel it was understood that *h* had applications in quantum mechanics. Planck suggested, during the Solvay Conference in Brussels (Belgium) in 1911 that *h* is the quantum of action, that is the elementary unit in phase space. This was an abstract concept that provided a connection between the quantum and classical worlds and paved the way for a new formulation of quantum mechanics that was developed by Richard Feynman in the 1940s and 1950s. In 1927, Werner Heisenberg questioned the validity of the usual classical concepts (such as the one of trajectory) and demonstrated that there is an intrinsic uncertainty in any measurement that arises from the quantum nature of the world. The typical magnitude of this quantum uncertainty is set by $h/(2\pi)$. Quantum theory is what is referred to as a “frame theory” in the sense that every theory of physics has to be quantum. As such it makes *h* a truly universal constant because it will appear in the quantum description of any physical phenomena.

Dr Uzan commented that the evolution of the Planck constant is related to the evolution of the understanding of physics; a similar story can be told for any constant. The speed of light has the same kind of history. It was shown that it was not infinite by Ole Rømer, an astronomer at the Observatoire de Paris. Then it was understood by Maxwell that this was also the speed of propagation of any electromagnetic wave in a vacuum. In 1905 Einstein developed the central concept of special relativity, synthesizing the notions of space and time to led to the new concept of space-time. Special relativity is another frame theory, so that the speed of light can be considered as one of the most fundamental constants alongside the Planck constant. The charge of the electron is also the unit

charge and it characterizes the strength of the electromagnetic interaction. The Boltzmann constant is related to the concepts of entropy and temperature, which emerge for systems having a large number of particles.

Dr Uzan stated that a constant cannot be thought of outside of a theoretical framework. It is always necessary to state the theories of physics that are assumed to describe nature today. They can only be measured, they allow the forging of new concepts; and they are dynamic in the way physics is considered. He recalled that he had distinguished two types of constants: those with dimension and those which are dimensionless. The first can be used to define units; this is what has been done with the speed of light, the Planck and Boltzmann constants and electric charge. The numerical values of dimensionless fundamental constants are very important because they are pure numbers and the value of these pure numbers is important for an understanding of the magnitude of many physical phenomena.

He posed the question as to whether the fundamental constants, these numbers without dimension, retain the same value in the whole history of the universe. In addition, can it be guaranteed that the fine structure constant, the ratio between mass of the electron and mass of the proton, keeps the same value throughout the age of the universe? The conclusion is that they do not change by more than a fraction of a percent over the age of the universe and by no more than 10^{-16} per year today. This is very important since it improves the confidence in the theories of physics and it provides a test of the equivalence principle at the heart of Einstein's theory of gravitation: general relativity.

In conclusion, Dr Uzan emphasized that the revision of the SI is a human enterprise: the most fundamental theory of nature will never be reached, but at every step in their understanding of nature scientists must find a representation of the world based on the most fundamental theories and concepts. Only theory, experiment and the use of careful, precise language will allow the achievement of this goal and emphasize the importance of the value of science for society and rational thinking to guide scientists and metrologists in their decisions. He cited Antoine de Lavoisier in his *Traité Élémentaire de Chimie* written in 1789, who wrote "*…, as ideas are preserved and communicated by means of words, it necessarily follows that we cannot improve the language of any science without at the same time improving the science itself; neither can we, on the other hand, improve a science, without improving the language or nomenclature which belongs to it. However certain the facts of any science may be, and, however just the ideas we may have formed of these facts, we can only communicate false impressions to others, while we want words by which these may be properly expressed.*"

The President of the meeting thanked Dr Uzan. He introduced the third keynote speaker, Dr Jun Ye who spoke about "Optical atomic clocks - opening new perspectives on the quantum world." Dr Ye is a fellow of the National Institute of Standards and Technology, NIST and a fellow of JILA, which is jointly operated by NIST and the University of Colorado, Boulder. In his 20-year career at NIST and JILA he has become a widely acknowledged world leader in pioneering laser science and technology, next generation experimental atomic clocks and ultra-cold quantum gases. His work highlights the increasingly important connections between precision, measurement and quantum-state control, from which many future quantum technologies will grow. Dr Ye has invented world-leading experimental atomic clocks that operate at optical frequencies and which have found a variety of applications.

51. Optical atomic clocks – opening new perspectives on the quantum world

Dr Jun Ye said that it was a great honour to be invited to speak on this historic day. He commented that the development of optical atomic clock opens many possibilities in the understanding of future technologies such as controlling super-long coherence time for electromagnetic fields, building the next generation of quantum sensors or being able to carry out physics on a "table top". He noted that although the redefinition of the second was not being discussed at the 26th meeting of the CGPM, it was certainly being considered for the future. Furthermore, almost all units, whether they are base or derived, can be traced back to time.

He commented that redefining the units based on fundamental laws of nature is opening up opportunities for new discoveries. The units are based on the so-called "standard model", which explains most of the things that can be seen and understood in the universe, however, it is incomplete. He gave the examples of dark energy, which is known to exist, but its composition is unknown, and that matter and anti-matter are asymmetrical in the universe. These things cannot be explained by the standard model. The SI units are now connected to one of the most precise, well-tested models known, even if that model is incomplete. Furthermore, the scientific community now has an understanding of previously unknown phenomena such as gravitational waves. It is possible to exploit this discovery as a measurement device and to use gravitational waves as a "telescope" to study the universe. Dr Ye said that what he is advocating is that if the metrological community continues to advance, and if it becomes possible to build a network of atomic clocks at the level of 10^{-21} or 10^{-22} relative uncertainty, these will become a tool that will allow the scientific community to study the unknowns, such as the search for dark energy.

He gave a brief survey of timescales, starting with the "quantum pendulum", which is the term given to the time it takes for an electron to orbit around a nucleus: a period of about 10^{-15} seconds or one femtosecond. At the other end of the scale is the age of the universe, which is about 15 billion years or 10^{18} seconds. The timescale from microscopic quantum physics to the macroscopic timescale of the universe spans 33 decades from 10^{-15} to 10^{18} and the geometric mean is 30 seconds. Taking the example of strontium atoms, the coherence time for the quantum pendulum can be as long as three minutes, similar to the timescale of the geometric mean between the age of the universe and a single swing of its quantum pendulum period. This means that when the quantum pendulum has been started it has a quality factor of 10^{17} and the period is extremely fast; it oscillates once every 10^{-15} seconds. It is possible to keep track of that period for 160 seconds. That gives rise to the possibility of counting the period to a quality factor of 10^{17}. For a usual pendulum, one that swings once per second, it would swing over the entire age of the universe. That is the basis for this device used to build a clock.

Dr Ye introduced the quantum certainty principle and the quantum uncertainty principle. He said that metrology is making significant advances, because to a large degree, the interplay between these certainties and uncertainties comes from quantum mechanical principles. Using the example of electron orbits around the nucleus, it is known with certainty that those orbits are quantized and there is a discrete energy scale separating different electron orbits. The energy scale is extremely well-described; it is set by nature. If it is assumed that fundamental constants do not change throughout the universe, the frequency of these orbits can be considered to be a constant. Providing physical measurements are made accurately, everybody should derive the same frequency. If a population is placed in the ground state or the excited state it is possible to make very accurate measurements of a single photon, single electron, or single atom.

What is uncertain, and which sets the measurement uncertainty, is when a population is in coherent

superposition between the ground state and excited state because it is no longer in a stationary quantum mechanical state. There is a dynamic phase, which will evolve between the ground state and the excited state. When a measurement is made and the coherent superposition collapses into a particular measurement state, and when an attempt is being made to determine whether the atom is in the excited state or the ground state, this is when uncertainty is introduced. This is the Heisenberg uncertainty principle, which can be used to describe the wave function collapse or the permeation relationship of angular momentum. The end result is that this phase can be used as a clock time. As the phase evolves around the equatorial plane as the atom is put into coherent superpositions, there will be a little "fuzziness" consisting of a measurement uncertainty that is dictated by the quantum mechanical uncertainty principle.

Dr Ye noted that the internal states that are exploited are very certain because of the certain energy level structures. However, there are external degrees of freedom such as quantum phase noise. Lasers are normally used to measure how fast the electrons are moving around the nucleus: the "quantum pendulum". A difficulty arises from the fact that atoms are moving around and they have a Doppler effect. When the laser takes a measurement of the atoms, it can introduce a photo-momentum into the atom. Uncertainties will be introduced depending on how the quantum pendulum is measured.

A revolution is currently under way to introduce quantum certainty into the measurement system, to include all degrees of freedom, including the motional degrees of freedom. It includes how the atoms are moving around in space and how they interact with each other. It is necessary to ensure that all of these degrees of freedom are quantized, so that measurements will no longer be limited by analogue techniques, such as Doppler shifts or frequency shifts due, for example, to the interactions of atoms. If this is achieved, it should be possible to develop thousands or many hundreds of thousands of quantum pendulums, all of which will swing in synchronization. Measurement will be improved by one over the square root of how many quantum pendulums it is possible to measure at the same time. Dr Ye commented that this is the main point of his talk; being able to measure both internal degrees of freedom and controlling the external degrees of freedom, all within the realm of quantum mechanical certainty. These factors can be combined to allow the so-called "standard quantum limit" to be reached when atoms are used to build atomic clocks. Measuring the "ticks" of these quantum pendulums requires sensitive lasers that have a coherence time of a scale of 160 seconds, as mentioned earlier. Development of these lasers took many years of effort by pioneers such as John Hall and Theodore Hänsch, and the work of improving the stability of lasers is ongoing.

There are currently two lasers at the PTB and two at JILA, which use silicon crystal structures to support two mirrors that provide the most stable lasers possible. Using a common photodetector, a beat note of 8 millihertz was measured between the PTB and JILA lasers. The frequency is of the order of 10^{15} hertz, giving a stability for the laser of 4×10^{-17}. If this is translated into "coherence time", it is equivalent to an optical wave that could be coherent for nearly one minute, or on a length scale, this would be a coherence length 1/10 of the distance between the earth and the sun. This technology, along with the invention of frequency combs by Theodore Hänsch and John Hall, has facilitated a coherent digitization of the entire electromagnetic spectrum, from the visible to the microwave range. This technology will allow measurement of the quantum pendulum swings of the atom and the transfer of this information into the microwave range, which can then be used as the basis for a clock.

Dr Ye moved from lasers to atoms. Pioneering work in the 1980s and 1990s has led to the development of laser cooling, which allowed atoms to be cooled from room temperature to one billionth of room temperature in a few hundred milliseconds. Once these atoms are cold, they can be captured using "optical tweezer" technology pioneered by Arthur Ashkin and colleagues in the 1970s. It is possible to use the laser field, polarize atoms and then capture atoms within the focus of the laser beam. The underlying principle is that spatially independent inhomogeneous energy shifts

are created in the original atomic structure.

It was necessary to modify this technology to use two quantum states in order to build an atomic clock. An optical trap was designed, such that when the atoms have been trapped in “light bowls”, the frequency shift of the ground state and excited state have been engineered to have exactly the same shape and form. Even though the atoms have been trapped within this light-inhomogeneous structure, the frequency difference between the two energy states is kept constant. Being able to hold onto these atoms to benefit from the long coherence time is an important concept. The simplest form of trapping is to use the laser beam in one dimension and reflecting it using a mirror to form a standing wave. The antinodes are where the atoms can be trapped. This resembles a “stack of pancakes” where each antinode can have a dozen atoms trapped and these atoms can be used as the atomic clock atoms.

Dr Ye described the principle of quantizing the Doppler effect; emphasizing the earlier point that everything should be quantum in nature. The atoms are cooled to 1 µK and it is necessary to measure the spectral width. At that temperature there is a spectral width of about 40 kHz. That represents the Doppler width of the 1 µK atom being probed by light. If the atoms are placed into the quantized well, the atom can still move around. If the well is fairly shallow, it can still exhibit tunnelling. When looking at the atomic spectrum, it already shows some effect due to the fact that the atoms start to be localized by the individual wells. If the wells are made deeper the central carrier transition no longer contains any motional effect. The Doppler effect is still present, but is completely absorbed into the sidebands. The sidebands come from the fact that the motional states of atoms are now fully quantized. When the atoms are cooled to very-low motional states, they can absorb photons to go along the direction where the motional states are neither increasing nor decreasing, such that it is the carrier transition; this is free of any motional effects.

When the motional degrees of freedom are quantized the Doppler effects are removed. This is “quantum state control” and is the basis of the new generation of optical atomic clock where the internal degrees of freedom and external degrees of freedom are fully separated. It is possible to carry out measurements such that when it is feasible to control a single quantum state with accuracy, it becomes possible to use multiple atoms. The likelihood of building many hundreds of thousands of quantum pendulums would allow an improvement in the measurement precision of time by the square root of the number of particles used. It could become practical to build clocks with an uncertainty at the 2×10^{-18} level.

Dr Ye commented that in the optical domain, the strontium and ytterbium clocks operated by JILA and NIST in Boulder, Colorado, have been compared down to 3 parts in 10^{18}. He added that it is feasible that a further improvement to the 10^{-20} level can be achieved with further quantization. Motional degrees of freedom have been quantized along the Z direction, as explained earlier. Additional quantization in both the X and Y directions would quantize the way that atoms interact with each other. In cases where a dozen atoms in a particular “pancake” site interact, they can cause each other to experience frequency shifts. If these atoms can be quantized, quantum certainty can be introduced into the problem to solve the systematic issues.

He described the latest work using three-dimensional optical lattices; the 3D Fermi gas clock. This technique uses quantum degenerate gas fermions loaded into optical lattices to fully quantize all degrees of freedom. The idea follows the Pauli exclusion principle: if the atoms have been cooled to sufficiently low temperatures, it should be possible to produce atoms that occupy one per site. Therefore, the X, Y and Z degrees of freedom, as well as how atoms interact with each other, will be fully quantized. The device would use one million atoms in 100 cells × 100 cells × 100 cells in height with a coherence time of 160 seconds. This would realize a clock with a precision of 3 parts in 10^{20} at one second. When averaged over 100 seconds, this will be in the realms of sensitivity where it is

possible to “hear” gravitational waves from the atomic clock.

Dr Ye summarized recent progress on the three-dimensional optical lattice clock. Atoms are loaded into a three-dimensional optical lattice and when motional sideband spectroscopy is carried out, it is possible to see that the three motional degrees of freedom are all quantized. Three sidebands are observed that drive the transition from the quantum mechanical ground state to quantum mechanical excited state. All are quantized in terms of electronic degrees of freedom and motional degrees of freedom. ^{87}Sr has 10 different spin states and in cases such as this it is not possible to have just one atom per site, because atoms with different nuclear spin states are distinguishable particles. Therefore, they do not have to obey the Pauli exclusion principle. It is feasible to have multiple atoms occupying the same lattice site with different nuclear spins.

When the energy spectrum of such a clock transition is observed, it is found that there is a carrier transition, which is free of motional effects. When these atoms interact, they cause a very large frequency shift. Two different configurations are possible, EG+ and EG−. This is similar to when two hydrogen atoms come together; they can form as “bound” and “antibound”, depending on how the nuclear spins are configured. So-called entangled states can be created between the two atoms by “driving”. For example, EG+ means that the two nuclear spins are anti-symmetrized and the two electronic spins are symmetrized and vice-versa. The interaction itself is fully quantized. The interaction is no longer due to perturbations around the carrier and the interaction is well separated from the carrier. The carrier transition is free from Doppler effects and any atomic interactions. However, this is not strictly the case here, because at the 10^{-20} level, other atomic interactions become apparent and this offers opportunities for new discoveries. With these systems a coherence time of six seconds has been achieved and the quality factor is 8×10^{15}. A coherence time of 160 seconds has not yet been reached due to photon scattering caused by the light that confines the atoms in the trap, which limits the coherence time. The solution is to build a shallower lattice. Dr Ye recalled that this is a three-dimensional optical lattice and he illustrated the solution using two wells. With two atoms confined in two wells, if the wells are made shallower, these atoms can still be trapped for up to 100 seconds. When lasers are used to excite the transitions, the fact that there is space between the lattice and the wavelength of the clock laser, which is not commensurate, makes it possible to detect a phase shift between the left well and the right well. The two atoms thus become distinguishable.

The latest technologies allow the lattice to be configured so that the two lattice sites move apart so that they can be exactly matched with the integer multiples of the wavelength of the clock laser. In such cases, when the transitions are initiated, the atoms, regardless of where they are, always “swing” in synchronization. This allows maintenance of the indistinguishability between these atoms and tunnelling will be facilitated. The light scattering effect, which causes the finite lifetime, will be eliminated.

Dr Ye concluded by commenting that in a 3D lattice the layers of atoms are only 10 microns apart. For 10 microns the red shift is 10^{-21}. If the 10^{-21} level is achieved, when atoms are placed in coherent superposition between the top layer and the bottom layer, de Broglie waves will extend over the entire optical 3D lattice. He commented that in these cases time is not very well-defined because this “proper time” is in fact different in the lattice. It is very different from a magnetic field gradient in the sense that a magnetic field gradient only acts on the spin. The gravitational effect is universal; it acts on both the spin degrees of freedom as well as the motional degrees of freedom. He suggested that the science community needs to consider how quantum coherence will survive in situations like this. He finished his presentation by suggesting that advances in atomic clocks will open up new areas of research.

The President of the meeting thanked Dr Ye. The final keynote lecture was given by Prof. William Phillips, "Measuring with fundamental constants; how the revised SI will work." Prof. Phillips is a fellow of NIST and shared the Nobel Prize in physics in 1997 for the development of methods to cool and trap atoms with laser light. He leads the Laser Cooling and Trapping Group in the Quantum Measurement Division of the NIST Physical Measurement Laboratory and is a Distinguished Professor at the University of Maryland. He is a fellow of the Joint Quantum Institute and is Co-Director of a National Science Foundation (NSF) funded physics frontier centre focusing on quantum phenomena that spans different sub-fields of physics. Prof. Phillips and colleagues demonstrated the first atomic fountain clock as proposed by Jerrold R. Zacharias. Such clocks, as realized in other laboratories, have become the primary time standards for world timekeeping. He handed the floor to Prof. Phillips.

52. Measuring with fundamental constants; how the revised SI will work

Prof. William Phillips thanked the President and said that it was a real pleasure and an honour to be speaking on this historic occasion. He commented that an alternative title for his lecture would be "how can we define a system of units by defining the values of some of the fundamental constants of nature?"

He noted that the metrology community is on the verge of a revolution; on the 20 May 2019, World Metrology Day, the world will experience the greatest revolution in measurement since the French Revolution. The nature of this revolution will be a change to the International System of Units such that all the base units of the International System of Units will be defined by fixing the values of fundamental constants of nature. In order to understand how this is possible Prof. Phillips gave a short history of length. Length is already defined by defining a constant of nature. The early approaches to length used the human body as a standard, for example the fathom, yard and cubit. This was convenient but not consistent. One solution to this problem was to use a particular body, the body of the king or the pharaoh as the standard. In ancient Egypt this worked very well and in a surprisingly modern way. The length of the pharaoh's forearm was enshrined as the royal cubit in a standard made out of granite. The people building the pyramids were required to calibrate their wooden standards against this granite standard once a month. The pyramids were built with high precision; the base lines were consistent to 0.025 % and they were square to the 12 arc seconds. This was an amazing feat of metrology. Similar kinds of artefacts to this Egyptian artefact were used throughout Europe during the Middle Ages and even later as ways of providing standards for a particular town. However, the standards would vary from town to town.

This was a common problem, and one that the metrologists of the French Revolution wanted to address. During the French Revolution the idea came into being of a metre; something that would be the measure of all things, that in the spirit of equality and fraternity of the French Revolution, would be available to everyone (*À tous les temps, à tous les peoples*). The metre was defined as being one ten-millionth of the distance from the pole to the equator along a meridian that ran through Paris. However, it took seven years for Delambre and Méchain to complete this measurement and the length was enshrined in the length of the "metre of the Archives", which was in the spirit of the Egyptian cubit whereby the definition of length was a primary-standard artefact, against which secondary, working standards were calibrated.

This idea continued after the signing of the *Convention du Mètre* in 1875, when a new metre artefact was produced. This artefact was of a different design, where the distance between two scratches on a platinum iridium rod was considered to be one metre. It became apparent that this standard was inadequate because it was difficult to determine what constituted the middle of a scratch. Furthermore, it was realized that use of the artefact of the metre to define length was not as accurate as measuring length based on the wavelength of light. This accuracy was facilitated by using an interferometer, a device that allows measurements to a fraction of a millionth of a metre. The wavelength of light became a *de facto* standard that was used around the world as a definition of length, although it was not the SI definition of length. In 1960, the same year as the invention of the laser, the metre was re-defined as a certain number of wavelengths of light from a krypton lamp. However, the purity of the light from krypton was found to be insufficient for the accuracy of measurements that metrologists were making with laser light.

Lasers such as the helium neon laser, a red laser stabilized to a particular transition in molecular iodine became the *de facto* albeit unofficial standard of length, even though the SI definition was based on krypton. Once again, the situation arose whereby it was clear that the SI definition of the metre needed to change. The obvious choice would have been to select the wavelength of the iodine stabilized helium neon laser to define the metre. Instead, the metrology community made a radical and future-proof choice: to define the speed of light. Resolution 1 of the 17th meeting of the CGPM (1983) defined the metre as the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of 1/299 792 458 second. This effectively fixes the speed of light. The speed of light c is equal to the wavelength of light λ, times the frequency f by the relationship:

$$c = \lambda f$$

This means that for any light, if its frequency is determined, its wavelength will be known. This definition incorporates improvements in lasers and frequency measurements, such as those by Jan Hall and Theodore Hänsch, which led to their 2005 Nobel Prize in Physics for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique.

Prof. Phillips opined that the definition of the metre is both brilliant and beautiful and that today, the CGPM is about to bring this same beauty to the kilogram. He gave a brief history of mass. In ancient times, mass was defined by artefacts or manufactured standards. Clearly, the difficulty of having such standards is they are not universal; copies are required. In the same revolutionary spirit that devised new definition of the metre, based on the idea the metre is the measure of all things, a cubic decimetre, what is referred to as a litre of water, was defined to be one kilogram around 1793. This was a good concept, except for the fact that the density of water changes with the temperature and it is not easy to measure exactly one litre of water. As a result of the difficulty in using the water definition of the kilogram, a platinum artefact became the kilogram of the Archives, representing a return to the ancient practice of using artefacts. Following the signing of the 1875 *Convention du Mètre*, a new artefact kilogram, the International Prototype of the Kilogram (IPK), was made of Pt-Ir. This is the last artefact. The current definition is: the kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram. Today, in the 21st century, the unit of mass is an artefact, a piece of metal made in the 19th century, which was based on an object made in the 18th century. This artefact-based definition is flawed because the definition of the unit of mass is that it is the mass of an object. The mass of this object could change, but by law it cannot change. If the mass of the IPK were to change, everything else in the universe changes its mass.

He commented that the mass of the IPK has indeed changed. A comparison of the IPK against several other prototypes that were made in exactly the same way found that over a period of years, it has

changed by many micrograms. Of course, the mass of the IPK should not change because legally it is the definition of the kilogram and it is this situation that must be fixed. The same approach to solving this conundrum should be used to that used for the defining metre: to define the metre the speed of light is fixed. For the redefinition of the kilogram, the Planck constant has been selected. Prof. Philipps explained why using one of the most famous equations in history, $E = mc^2$. E is the energy of an object at rest, m is its rest mass and c is the speed of light. In a second equation $E = hf$, E is the energy of a photon (a particle of light), which is equal to Planck's constant h, times the frequency of that light f. By combining the two equations it is possible to define mass.

$$E = mc^2 = hf = E$$

$$m = hf/c^2$$

m would be the change in the mass of a particle when it emits a photon of a frequency f, which can be measured. Fixing the Planck constant h allows mass to be defined.

It is not possible to weigh photons accurately enough; instead, one of the approaches is to use a Kibble (watt) balance, an electromechanical device invented by Bryan Kibble. In an ordinary mass balance, mass is measured by equating the gravitational force on one side of the balance to the gravitational force of an unknown mass on the other side of the balance. A similar method can be used to measure the force created by a current carrying wire in a magnetic field. The gravitational force on this mass can be equated to the electromagnetic force that is created by a coil of wire. This is how the ampere is defined, in terms of a force that a current carrying wire experiences when it is in a magnetic field.

There is a problem with this definition of the ampere. It is impractical. It is very difficult to determine with accuracy this magnetic field. Kibble overcame this problem by suggesting that the voltage induced on the coil should be measured as it moves in the field of the magnet. Measuring the voltage gives enough information about the magnetic field to define current. If metrologists had another way of defining current, for example using quantum electrical constants, the definition can be turned around to make it a definition of force and therefore a definition of mass. That is the idea behind the Kibble balance approach for creating a new definition of the kilogram.

The Kibble balance operates using two modes. The velocity mode is where the coil is moved in the field of the magnet to produce a voltage. Then current is passed through the coil in the weighing mode and the force is measured. With this operation the following expression is created:

$$mgv = IV$$

where mg is the force from weighing mode, v is the velocity from velocity mode, I is the current from weighing mode and V is the voltage from velocity mode. Each side of the expression is an expression of power; mechanical power of force times the velocity on the left and electrical power of current times the voltage on the right. If those two kinds of power are the same, as they must be, this equation can be solved to deduce the mass which is equal to the electrical power, divided by the acceleration of gravity, times the velocity.

$$m = IV/gv$$

Prof. Phillips explained how this is related to the Planck constant. It is because of the quantum methods of measuring current and voltage using the quantum Hall effect and the Josephson effect. This gives rise to a voltage that is proportional to $h/2e$ because of the Josephson effect and a current that is proportional to e because of both the quantum Hall effect and the Josephson effect, which are used to establish the current. The mass is proportional to the Planck constant but not to the elementary charge e which cancel out.

Prof. Phillips mentioned that the NIST Kibble balance is capable of realizing the kilogram to 10^{-8},

which is better to changes in the IPK due to surface contamination. He added that the advantage of redefining the kilogram using the Planck constant is that it does not limit metrologists to one method of realizing the kilogram. Another method used is the silicon sphere. Measuring the lattice constant and all the other parameters of the silicon sphere provides another way of determining the value of the Planck constant. The consistency between these different methods of realizing the kilogram allows metrologists to have confidence in the revision of the SI. The work to realize the kilogram using Kibble balances and silicon spheres is a global effort.

Following the vote on Draft Resolution A the definition of the ampere will change. Instead of being based on forces between current carrying wires, the ampere will be defined using the elementary charge e, which can be realized by counting a certain number of electrons per second, but not yet well enough to compete with using the quantum Hall effect and the Josephson effect as a way of realizing the new ampere. With both the numerical value of e and h fixed, $2e/h$ and h/e^2 are exact, allowing the Josephson and quantum Hall effects to be used to measure all electrical quantities. As mentioned previously, one of the advantages of this is that a unified set of electrical units is now available within the SI.

Prof. Phillips concluded by mentioning two more units: the mole and the kelvin. The mole was formerly the amount of substance with the number of entities equal to the number of ^{12}C atoms in 12 g of ^{12}C. Following the revision it will become a number based on the fixed value of the Avogadro constant N_A. The kelvin, formerly 1/273.16 of the triple point of water will be defined using the fixed value of the Boltzmann constant k.

Prof. Phillips commented that the French Revolution introduced the metric system, with metres being the measure of length and the kilogram as the measure of mass. The *Convention du Mètre* brought an international agreement with regard to these units. On 20 May 2019, the anniversary of the signing of the 1875 *Convention du Mètre*, and based on a decision of the 26th meeting of the CGPM, the world will witness the biggest revolution in measurement units since the French Revolution. The world will finally be free of artefact standards of measurements. All of the base units of the International System of Units will be defined by fixing the values of fundamental constants of nature.

The President of the meeting thanked Prof. Phillips. He asked Dr Milton (BIPM Director) to introduce Draft Resolution A "On the revision of the International System of Units (SI)".

53. Introduction to Draft Resolution A "On the revision of the International System of Units (SI)" and voting

The BIPM Director said the following:

"Mr President of the CGPM, Mr President of the CIPM, representatives of our 60 Member States, representatives from our 42 Associate States and Economies, ladies and gentlemen. You have met here in Versailles at the 26th General Conference on Weights and Measures and have heard about the work of the national metrology institutes around the world to bring us to the position where it is possible to propose to revise the base units of the International System of Units, the SI.

The International Committee for Weights and Measures, the CIPM, has drafted the text of a resolution for the Member States that will bring the new definitions into force. It was published nine months ago. The full text is on the BIPM website and has been available for consideration by all. It is three pages long, so I am not going to read all of it.

It starts, 'The General Conference on Weights and Measures (CGPM) at its 26th meeting,

considering

- the essential requirement for an International System of Units, SI, that is uniform and accessible world-wide for international trade, for high-technology manufacturing, for human health and safety, protection of the environment, global climate studies and the basic science that underpins all these,
- that the SI units must be stable in the long term, internally self-consistent and practically realizable being based on the present theoretical description of nature at the highest level,
- that conditions set by this conference at its 24th meeting, (2011), and confirmed at its 25th meeting (2014), before such a revised SI could be adopted have now been met.'

You have heard the proposal for the revision of the SI is that it should be based on fundamental constants. We are going to ask the Member States here to agree to use these constants and from these we will have a new and stable system of units. It has been agreed that this change will become effective from next year from World Metrology Day, 20 May 2019. I will read the numbers, the fixed values that will be voted upon to be agreed to be used to implement the international system.

'[The CGPM] **decides** that effective from 20 May 2019 the International System of Units, the SI, is the system of units in which:

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu_{Cs}$ is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum c is 299 792 458 m/s,
- the Planck constant h is $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- the elementary charge e is $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- the Boltzmann constant k is $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- the Avogadro constant N_A is $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mole^{-1},
- the luminous efficacy of monochromatic radiation frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd} is 683 lm/W.'

Mr President, I think we are ready to propose the vote."

54. Voting on Draft Resolution A

The President of the meeting thanked Dr Milton and said that the voting on Draft Resolution A "On the revision of the International System of Units (SI)" would be carried out by a roll-call of the Member States by Dr McLaren, Secretary of the Meeting, each of which will be asked to vote either yes or no. Dr McLaren added that each of the 54 Member States that were present will be called on to vote in order. The head of each delegation has been given a country card and the name of each Member State will be announced, first in French and then in English. After which the head of the delegation should raise the country card, and vote by saying either, "Yes," or "Oui." Any Member State that wishes to vote no or abstain should simply remain silent.

Following the vote, Draft Resolution A, was adopted unanimously as Resolution 1 "On the revision of the International System of Units (SI)".

The President of the meeting thanked the delegates and closed the seventh session.

Eighth session – 16 November 2018 (afternoon)

The President of the meeting welcomed the delegates to the Eighth Session.

55. Explanation of the ballot procedure; introduction of the "slate" for the CIPM election and appointment of scrutineers

Dr McLaren, in his role as Secretary of the meeting, reminded delegates that two elections would be held; one for a new CIPM and one for the Committee for the Election of the CIPM (CEC). He asked Mr Gunn (UK), the CEC Chairperson, to introduce the process. Mr Gunn explained that the election of the CIPM is a vital process to ensure that the "right" CIPM is in place to take metrology forward for the next four years. He recalled that the CEC was created at the 25th meeting of the CGPM (2014) to oversee the election process, which had been agreed at the same meeting. The 26th meeting of the CGPM marked the first time that the CEC had been involved in the process for electing all 18 members of the CIPM. He explained the CIPM election process, saying that nominations were sought from Member States and those nominations were assessed by the CIPM against a set of general considerations for membership, as well as necessary personal attributes and qualifications in order to provide a list of qualified candidates. The CIPM produced a recommended slate of candidates that they considered could most effectively and efficiently carry out its duties over the next four years. The slate of candidates was sent to the CEC, which was assessed, along with other supporting information. He added that the CEC had received a list of very good candidates and that all of those on the ballot paper were suitably qualified and experienced to perform the role.

Mr Gunn said that the CEC was grateful for the work done by the CIPM and agreed that they had supplied a list that would provide an effective and efficient CIPM, however the CEC wanted to consider a particular issue, which was to look at the regional balance within the CIPM. As a result, as well as having all the necessary skills and experience, the CEC looked at the geographical distribution of Member States, the diversity of size of Member States, and the financial contributions. The CEC considered that there are many ways that these factors can be taken into account. However, there is still some work for the newly elected CEC, when it is formed, to do in conjunction with the CIPM, to agree proper criteria to address the regional balance before the next election at the 27th meeting of the CGPM.

Mr Gunn recalled, in the interests of transparency, that there had been much discussion within the CEC regarding eligibility. At the time when the nominations for the candidacy closed, some of the administrative arrangements for the accession of Ukraine were not fully complete. However, Ukraine became a Member State on 7 August 2018, which was prior to the completion of the CEC's deliberations and well before this election date, and, as part of the balancing of regional representation, the CEC included the Ukrainian candidate. He added that it is important to be transparent about that point, because there are some interpretations that if the accession was not complete by the time of nomination, the delegates at the CGPM could question the eligibility. The CEC did not, but that is something which the CGPM is open to consider.

As a result of the CEC's deliberations, it recommended the election of 18 candidates indicated on the ballot paper with an asterisk. These 18 candidates are recommended as a slate of candidates that would provide an effective, efficient, and representative CIPM.

Mr Gunn recalled that at the 24th meeting of the CGPM (2011), he had spoken about the need to ensure that a genuine election is held. Therefore, he clarified that, while the CEC recommends this slate of eligible candidates, delegates are free to vote for any of the candidates on the ballot paper. The delegates were given a ballot paper containing 22 names and they were asked to mark up to 18 names on the ballot paper that they would like to elect. Any ballot paper with more than 18 votes would be considered void.

He concluded by commenting that four scrutineers had volunteered to oversee both elections: Dr Buzoianu (Romania), Dr Francois (New Zealand), Ms Gao (China) and Ms Guliyeva (BIPM). The scrutineers will count the votes, disqualify any that do not adhere to the rules, and provide a list of the elected candidates.

Dr McLaren spoke about the election of the CEC. He commented that he would be overseeing the election of the CEC as Mr Gunn had indicated his intention to stand for re-election. Delegates were asked to vote for no more than seven candidates for the CEC on the ballot paper. He added that two ballot papers would be distributed, one for the CIPM election and one for the CEC election. Each Member State will be invited to deposit their completed ballot papers in the appropriate ballot box by roll-call.

56. Agreement of final text and voting on Draft Resolution D

The text of each draft resolution is given in the *Convocation of the General Conference on Weights and Measures (26th meeting)* Appendix A.

The text of Draft Resolution D was displayed. Dr McLaren asked if any Member State intended to vote against the resolution before proceeding to voting by roll-call of the Member States entitled to vote. He said that feedback from the 26 Member States that had participated in the Working Group on the BIPM dotation had indicated that they would each either vote positive or abstain. He recalled that a single negative vote would defeat the resolution and an extraordinary meeting of the CGPM would have to be convened in 2019 to establish the budget. There were no indications from delegations that there would be any negative votes.

During the voting, it was noted by the delegation from Turkey that the figure for the dotation in 2022 was too high by € 2 000. Following a discussion it was agreed that the figure for the dotation in 2022 would be € 12 606 892. It was clarified that the dotation being voted for represented a 1 % annual compound increase in the dotation for 2020 to 2023.

Draft Resolution D was adopted as Resolution 4 “On the dotation of the BIPM for the years 2020 to 2023”. There were five abstentions: Argentina, Austria, Czech Republic, Spain and the USA. The figure for the dotation in 2022 would be corrected to € 12 606 892.

Dr Steele (Canada) raised a procedural question, related to the last vote. He commented that the delegates had voted on the resolution, as was normally the case, but in the text there were some explanatory notes explaining where the baseline number comes from, and it mentions the list of countries acceding. Then, in the more recent explanatory note, it points to the fact that there was one additional country that had acceded before the vote, and there was likely to be one exclusion. If the minutes and the resolution include those explanatory notes, he asked if the explanatory note could be updated to include the most recent information, not simply the information that was available at the

time the convocation was circulated. If the notes are not to be part of the formal record, he said that he would withdraw the request. His preference would be that it shows the current status on the day of the vote. Mr Henson (BIPM) agreed and said that the notes would have to be removed or updated so that they reflect the position at the time of the vote. His suggestion was to remove the explanatory notes.

57. Election of the CIPM and CEC

The CIPM and CEC elections were carried out according to the procedure outlined in §55. The results were as follows:

Election of the CIPM

Mr Gunn announced the results of the election of the CIPM.

Candidate	Nationality	Votes
Bulygin, F.	Russian	44
del Campo Maldonado, D.	Spanish	45
Castelazo, I.	Mexican	45
Dimarcq, N.	French	48
Duan, Y.	Chinese	48
Laiz, H.	Argentinean	46
Liew, T.	Singaporean	47
Louw, W.	South African	51
Neyezhmakov, P.	Ukrainian	33
Olthoff, J.	American	49
Park, S.-R.	South Korean	49
Rastello, M.L.	Italian	53
Richard, P.	Swiss	46
Rietveld, G.	Dutch	46
Sené, M.	British	47
Steele, A.	Canadian	48
Ullrich, J.	German	52
Usuda, T.	Japanese	52

Mr Gunn declared the 18 candidates, as proposed by the CEC, as duly elected to serve on the CIPM.

Election of the Committee for CIPM Election (CEC)

Dr McLaren announced the results of the election of the CEC. The candidates elected to serve on the CEC were:

Candidate	Affiliation
Gunn, R.	NPL (UK)
Hoell, A.	Ministry of Economy (Germany)
Jun, X .	State Administration for Market Regulation (China)
Lagauterie, C.	Ministry of Economy (France)
Miki, Y.	NMIJ/AIST (Japan)
Mukhufi, N.	NMISA (South Africa)
Saundry, C.	NIST (USA)

58. Other business

Dr Chambon (France) thanked the five outgoing members of the CIPM: Dr Buzoianu, Mr Érard, Dr McLaren, Dr May and Dr Inglis, all of whom have done an excellent job.

The President of the meeting thanked the BIPM staff and all those involved in the organization of the meeting for their contributions. The BIPM Director singled out Mrs Fellag Ariouet for special thanks for leading the team that was responsible for coordinating and delivering the 26th meeting of the CGPM. Mrs Fellag Ariouet was also part of the team that was responsible for the major metrology exhibition "*Sur mesure, les 7 unités du monde*" at the *Musée des arts et métiers* in Paris. The President of the meeting thanked the speakers. He commented that it was really a delight as an external person who was not from the metrology community. He had enjoyed it very much and learnt a lot. The President of the meeting thanked the interpreters, who had worked very hard, all of the delegations and everybody who had participated in this General Conference and made it a success. He added that it has been very successful on all counts. Finally, he thanked the President of the CIPM, Dr Barry Inglis, the Director of the BIPM, Dr Martin Milton, and the Secretary, Dr James McLaren.

Dr May thanked Prof. Candel on behalf of all delegates for acting as the President of the meeting. Dr Inglis seconded this comment and said that Prof. Candel had done an outstanding job.

59. Closure of the meeting

The President of the meeting closed the 26th meeting of the CGPM.

Resolutions adopted by the
General Conference on Weights and Measures
at its 26th meeting (2018)

Resolution 1

On the revision of the International System of Units (SI)

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

considering

- the essential requirement for an International System of Units (SI) that is uniform and accessible world-wide for international trade, high-technology manufacturing, human health and safety, protection of the environment, global climate studies and the basic science that underpins all these,
- that the SI units must be stable in the long term, internally self-consistent and practically realizable being based on the present theoretical description of nature at the highest level,
- that a revision of the SI to meet these requirements was proposed in Resolution 1 adopted unanimously by the CGPM at its 24th meeting (2011) that laid out in detail a new way of defining the SI based on a set of seven defining constants, drawn from the fundamental constants of physics and other constants of nature, from which the definitions of the seven base units are deduced,
- that the conditions set by the CGPM at its 24th meeting (2011), confirmed at its 25th meeting (2014), before such a revised SI could be adopted have now been met,

decides that, effective from 20 May 2019, the International System of Units, the SI, is the system of units in which:

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$ is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum c is 299 792 458 m/s,
- the Planck constant h is $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- the elementary charge e is $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- the Boltzmann constant k is $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- the Avogadro constant N_{A} is $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol^{-1},
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd}, is 683 lm/W,

where the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to Hz = s^{-1}, J = kg m^2 s^{-2}, C = A s, lm = cd m^2 m^{-2} = cd sr, and W = kg m^2 s^{-3}.

notes the consequences as set out in Resolution 1 adopted by the CGPM at its 24th meeting (2011) in respect of the base units of the SI and confirms these in the following Appendices to this Resolution, which have the same force as the Resolution itself,

invites the International Committee for Weights and Measures (CIPM) to produce a new edition of its Brochure entitled "*The International System of Units*" in which a full description of the revised SI will be given.

Appendix 1. Abrogation of former definitions of the base units

It follows from the new definition of the SI described above that, effective from 20 May 2019:

- the definition of the second in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 1) is abrogated,
- the definition of the metre in force since 1983 (17th meeting of the CGPM, Resolution 1) is abrogated,
- the definition of the kilogram in force since 1889 (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901) based upon the mass of the international prototype of the kilogram is abrogated,
- the definition of the ampere in force since 1948 (9th meeting of the CGPM) based upon the definition proposed by the CIPM (1946, Resolution 2) is abrogated,
- the definition of the kelvin in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 4) is abrogated,
- the definition of the mole in force since 1971 (14th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the definition of the candela in force since 1979 (16th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the decision to adopt the conventional values of the Josephson constant K_{J-90} and of the von Klitzing constant R_{K-90} taken by the CIPM (1988, Recommendations 1 and 2) at the request of the CGPM (18th meeting of the CGPM, 1987, Resolution 6) for the establishment of representations of the volt and the ohm using the Josephson and quantum Hall effects, respectively, is abrogated.

Appendix 2. Status of constants previously used in the former definitions

It follows from the new definition of the SI described above, and from the recommended values of the 2017 special adjustment of the Committee on Data for Science and Technology (CODATA) on which the values of the defining constants are based, that effective from 20 May 2019:

- the mass of the international prototype of the kilogram $m(K)$ is equal to 1 kg within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of h at the time this Resolution was adopted, namely 1.0×10^{-8} and that in the future its value will be determined experimentally,
- the vacuum magnetic permeability μ_0 is equal to $4\pi \times 10^{-7}$ H m^{-1} within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of the fine-structure constant α at the time this Resolution was adopted, namely 2.3×10^{-10} and that in the future its value will be determined experimentally,
- the thermodynamic temperature of the triple point of water T_{TPW} is equal to 273.16 K within a relative standard uncertainty closely equal to that of the recommended value of k at the time this Resolution was adopted, namely 3.7×10^{-7}, and that in the future its value will be determined experimentally,
- the molar mass of carbon 12, $M(^{12}C)$, is equal to 0.012 kg mol^{-1} within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of $N_A h$ at the time this Resolution was adopted, namely 4.5×10^{-10}, and that in the future its value will be determined experimentally.

Appendix 3. The base units of the SI

Starting from the new definition of the SI described above in terms of fixed numerical values of the defining constants, definitions of each of the seven base units are deduced by taking, as appropriate, one or more of these defining constants to give the following set of definitions, effective from 20 May 2019:

- The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1}.
- The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum c to be 299 792 458 when expressed in the unit m/s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{Cs}$.
- The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant h to be $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ when expressed in the unit J s, which is equal to kg m^2 s^{-1}, where the metre and the second are defined in terms of c and $\Delta\nu_{Cs}$.
- The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge e to be $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{Cs}$.
- The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant k to be $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ when expressed in the unit J K^{-1}, which is equal to kg m^2 s^{-2} K^{-1}, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h, c and $\Delta\nu_{Cs}$.
- The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant, N_A, when expressed in the unit mol^{-1} and is called the Avogadro number. The amount of substance, symbol n, of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.
- The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd}, to be 683 when expressed in the unit lm W^{-1}, which is equal to cd sr W^{-1}, or cd sr kg^{-1} m^{-2} s^3, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h, c and $\Delta\nu_{Cs}$.

Resolution 2

On the definition of time scales

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

considering that

- Resolution 1 adopted by the CGPM at its 14th meeting (1971) requested the CIPM to define International Atomic Time (TAI),
- no complete self-contained definition of TAI has been provided officially by the CIPM,
- the Consultative Committee for the Definition of the Second (CCDS) proposed in its Recommendation S2 (1970) a definition which was extended by a Declaration of the CCDS in 1980,
- the CGPM at its 15th meeting (1975) noted that Coordinated Universal Time (UTC), derived from TAI, provides the basis of civil time, and strongly endorsed this usage,

recognizing that

- the mission of the BIPM is to ensure and promote the global comparability of measurements, including the provision of a coherent international system of units,
- the International Astronomical Union (IAU) and the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) with the International Association of Geodesy (IAG) are responsible for defining reference systems for Earth and space applications,
- the International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R) is responsible for coordinating the dissemination of time and frequency signals and making relevant recommendations,
- the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), a service of the IAU and IUGG, is responsible for providing information required to relate terrestrial and celestial reference systems, including time-varying measurements of the Earth's rotation angle, UT1 - UTC, the low-precision prediction of UT1 - UTC for time signal broadcasts, DUT1, and for deciding and announcing leap second insertions,

noting that

- Resolution A4 (1991) of the IAU defined, in Recommendations I and II, the Geocentric Reference System as a system of space-time coordinates for the Earth within the framework of general relativity, and, in Recommendation III, named the time coordinate of that reference system "Geocentric Coordinate Time" (TCG),
- Resolution A4 (1991) of the IAU further defined, in Recommendation IV, Terrestrial Time (TT) as another time coordinate in the Geocentric Reference System, differing from TCG by a constant rate; the unit of measurement of TT being chosen to agree with the SI second on the geoid,
- Resolution B1.9 (2000) of the IAU redefined TT to be a time scale differing from TCG by a constant rate: $d\mathrm{TT}/d\mathrm{TCG} = 1 - L_G$, where $L_G = 6.969290134 \times 10^{-10}$ is a defining constant (the numerical value of L_G was chosen to conform to the value $W_0 = 62636856.0\ \mathrm{m^2s^{-2}}$ for the gravity potential on the geoid as recommended by Special Commission 3 of the IAG in 1999),
- the redefinition of TT in 2000 introduced an ambiguity between TT and TAI as the CCDS had stated in 1980 that TAI was to have "*the SI second as realized on the rotating geoid as the scale unit*" while the definition of TT does not refer to the geoid,

states that

- TAI is a continuous time scale produced by the BIPM based on the best realizations of the SI second, and is a realization of TT as defined by IAU Resolution B1.9 (2000),
- in the transformation from the proper time of a clock to TAI, the relativistic rate shift is computed with respect to the conventionally adopted equipotential W_0 = 62636856.0 m^2s^{-2} of the Earth's gravity potential, which conforms to the constant L_G defining the rate of TT,
- as stated in the IAU Resolution A4 (1991), TT - TAI = 32.184 s exactly at 1 January 1977, 0h TAI at the geocentre, in order to ensure continuity of TT with Ephemeris Time,
- UTC produced by the BIPM, based on TAI, is the only recommended time scale for international reference and the basis of civil time in most countries,
- UTC differs from TAI only by an integral number of seconds as published by the BIPM,
- users can derive the rotation angle of the Earth by applying to UTC the observed or predicted values of UT1 - UTC, as provided by the IERS,
- UTC provides a means to measure time intervals and to disseminate the standard of frequency during intervals in which leap seconds do not occur,
- traceability to UTC is obtained through local real-time realizations "UTC(*k*)" maintained by laboratories contributing data to the calculation of UTC, identified by "*k*",

confirms that

1. International Atomic Time (TAI) is a continuous time scale produced by the BIPM based on the best realizations of the SI second. TAI is a realization of Terrestrial Time (TT) with the same rate as that of TT, as defined by the IAU Resolution B1.9 (2000),
2. Coordinated Universal Time (UTC) is a time scale produced by the BIPM with the same rate as TAI, but differing from TAI only by an integral number of seconds,

and **recommends** that

- all relevant unions and organizations consider these definitions and work together to develop a common understanding on reference time scales, their realization and dissemination with a view to consider the present limitation on the maximum magnitude of UT1 - UTC so as to meet the needs of the current and future user communities,
- all relevant unions and organizations work together to improve further the accuracy of the prediction of UT1 - UTC and the method for its dissemination to satisfy the future requirements of users.

Resolution 3

On the objectives of the BIPM

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

considering,

- the world-wide use of the metric system – now the International System of Units (SI),
- Resolution 3 adopted by the CGPM at its 21st meeting (1999), which considers that all States, not only those that are Parties to the Metre Convention, engage in measurements which are related to trade and need to be traceable to the SI,
- Resolution 4 adopted by the CGPM at its 22nd meeting (2003), which considers the desirability of extending the number of Member States or Associates so as to increase the impact and benefit of participation in the Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM),
- that best practice in communication, transparency and governance has been implemented following adoption of Resolution 10 by the CGPM at its 24th meeting (2011), on the role, mission, objectives, long-term strategy and governance of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM),
- Resolution 4 adopted by the CGPM at its 25th meeting (2014) on the Dotation of the BIPM for the years 2016 – 2019, which urges Member States, as well as international organizations, private organizations and foundations to maintain the provision of additional voluntary support of all kinds to support specific BIPM mission-related activities, particularly those that facilitate participation in the activities of the BIPM by those States with emerging metrology systems,

noting

- the importance of the use of the SI for innovation, industrial and societal needs,
- the continuing role of the BIPM following the revision of the International System of Units (SI),
- the success of the CIPM MRA and the implementation of the recommendations following its recent review,
- the core role of metrology within the international Quality Infrastructure and the importance of international recognition of measurements for conformity assessment,
- the growing interest in participation in the activities of the BIPM, particularly from States with emerging metrology systems,

welcomes

- the revised strategy and objectives for the BIPM, agreed by the CIPM, allowing planning beyond the four-year cycle of the BIPM Work Programme and leading to best use of resources, including investment in people, infrastructure and equipment,
- the development of a long-term strategic view which, together with a consolidated planning process, underpins the development of the BIPM Work Programme in consultation with Member States,
- the continuous efforts of the BIPM to engage more States in its activities,

- the recognition of a common definition for the Quality Infrastructure by the World Bank and the ten international and intergovernmental organizations that form the network on metrology, accreditation, standardization and conformity assessment for developing countries (DCMAS Network), including the BIPM,

confirms

that the objectives of the BIPM are to:

- represent the world-wide measurement community, aiming to maximize its uptake and impact,
- be a centre for scientific and technical collaboration between Member States, providing capabilities for international measurement comparisons on a shared-cost basis,
- be the coordinator of the world-wide measurement system, ensuring it gives comparable and internationally accepted measurement results,

that fulfilling the BIPM mission and objectives is complemented by its work in:

- capacity building, which aims to achieve a global balance between the metrology capabilities in Member States,
- knowledge transfer, which ensures that the work of the BIPM has the greatest impact.

Resolution 4

On the dotation of the BIPM for the years 2020 to 2023

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

considering

- the increased importance of the work of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) to international trade, to industrial innovation, to monitor the global environment, to human health and medicine, to food and forensic science in all Member States,
- the recognition of the BIPM as the scientifically expert intergovernmental organization in metrology and the added value and cost efficiency it provides to all Member States in technical and economic terms,
- the manner in which the BIPM continues to adopt best management practice and to improve the efficiency of its operation,
- Resolution 7 adopted by the CGPM at its 16th meeting (1979) establishing a principle for the determination of the base dotation,

noting

- the current world financial situation and the financial constraints that Member States continue to experience,

welcomes

- the support of all kinds provided to the BIPM by National Metrology Institutes, in particular by way of secondment of staff to the BIPM, and support for the BIPM Capacity Building and Knowledge Transfer programme,

decides that

- the annual dotation of the BIPM, as defined in Article 6 (1921) of the Regulations annexed to the Metre Convention, will be set in such a way that, for those States that are Parties to the Metre Convention at the time of the 26th meeting of the CGPM, it shall be:

12 356 526 euros in 2020

12 480 091 euros in 2021

12 604 892 euros in 2022

12 730 941 euros in 2023

encourages

- Member States, as well as international organizations, private organizations and foundations to maintain the provision of additional voluntary support of all kinds to support specific BIPM mission-related activities, particularly those that facilitate participation in the activities of the BIPM by those countries without well-developed metrology infrastructure.

Resolution 5

On the financial arrears of Member States and the process of exclusion

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

recalling that

– Article 6 paragraphs 6 to 8 (1921) of the Regulations annexed to the Metre Convention reads as follows:

« 6. Si un État est demeuré trois années sans effectuer le versement de sa contribution, celle-ci est répartie entre les autres États, au prorata de leurs propres contributions. Les sommes supplémentaires, versées ainsi par les États pour parfaire le montant de la dotation du Bureau, sont considérées comme une avance faite à l'État retardataire, et leur sont remboursées si celui-ci vient à acquitter ses contributions arriérées.

7. Les avantages et prérogatives conférés par l'adhésion à la Convention du Mètre sont suspendus à l'égard des États déficitaires de trois années.

8. Après trois nouvelles années, l'État déficitaire est exclu de la Convention, et le calcul des contributions est rétabli conformément aux dispositions de l'article 20 du présent Règlement. »[1]

– Resolution 8 adopted by the CGPM at its 23rd meeting (2007) on financial arrears of Member States sets a procedure concerning States who fail to fulfil their financial obligations,

observing that

– paragraphs 6 and 7 of Article 6 of the Annexed Regulations foresee that whilst the advantages and prerogatives of Member States are suspended for those States in arrears by three years, their contributions remain due,
– historical practice has always been to apply paragraphs 6 and 7 of Article 6 of the Annexed Regulations,

---

[1] English translation for easy reference of the authoritative French version:

6. If a State remains three years without paying its contribution, the said contribution is distributed among the other States pro-rata to their own contributions. The supplementary sums thus paid by these States to make up the dotation of the Bureau are considered as advances made to the State in arrears, and are reimbursed to them in the event that it repays its arrears of contributions.

7. The advantages and prerogatives conferred by accession to the Metre Convention are suspended for those States in arrears by three years.

8. After three more years, the State in arrears is excluded from the Convention and the calculation of contributions is re-established in accordance with the provisions of Article 20 of the present Regulations.

noting that

- historical practice has been at variance with the provisions of paragraph 8 of Article 6 of the Annexed Regulations by not excluding Member States when they have defaulted on their contributions for more than six years and by not re-establishing the calculation of contributions,
- historical practice has resulted in certain Member States remaining in a state of suspension for periods considerably exceeding the three-year period envisaged in the Annexed Regulations, leading to the accumulation of their arrears and the consequent distribution of their contributions among all other Member States,
- Resolution 8 adopted by the CGPM at its 23rd meeting (2007) introduced a procedure for the exclusion of a defaulting Member State that requires a decision of the CGPM, and consequently, the period of suspension prior to exclusion depends on the scheduling of CGPM meetings and thus defaulting Member States may not be treated equally,
- Resolution 8 (2007) partly addressed the issues raised by historical practice,

further recalling that

- procedural clarity and fair treatment of Member States are matters of good governance and are beneficial to all parties,
- the International Committee for Weights and Measures (CIPM), as the permanent supervisory organ of the BIPM, could apply Article 6 paragraph 8 of the Annexed Regulations in a timely manner,

decides that

- the CIPM shall implement Article 6 paragraph 8 of the Annexed Regulations,
- the CIPM shall address the situation where historical practice has resulted in the accumulation of arrears,

confirms that

- the CIPM shall notify the French Ministry for Europe and Foreign Affairs of any exclusion, which shall accordingly inform the excluded State and all other Member States,
- an excluded Member State may only again accede to the Metre Convention if its remaining arrears have been paid,
- pursuant to Article 11 of the Metre Convention, that such a Member State shall pay an entrance contribution equal to its first annual contribution.

Appendix A

Convocation of the General Conference on Weights and Measures (26th meeting)

This Convocation is the official invitation to Governments of States Parties to the Metre Convention to send a delegation to the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) that will take place

From Tuesday 13 to Friday 16 November 2018

at the **Palais des Congrès de Versailles**,

10 rue de la Chancellerie,

78000 Versailles, Yvelines, France.

This document includes a draft agenda and draft resolutions proposed to the CGPM by the International Committee for Weights and Measures (CIPM).

Governments of the Member States are asked to inform the Director of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) of the composition of their delegations not later than two weeks before the opening of the meeting, i.e. not later than 30 October 2018.

Member States are requested to let the CIPM know as soon as possible, and preferably before 1 October 2018, of any proposals they would like to submit to the General Conference, so that they may be distributed to all Member States.

The full programme and other relevant documentation will be made available on the BIPM website, which will be updated with the latest information during the preparation of the meeting: www.bipm.org/en/cgpm-2018/.

Constitution of the General Conference on Weights and Measures

"The International Bureau* shall operate under the exclusive direction and supervision of an *International Committee for Weights and Measures***, itself placed under the authority of a *General Conference on Weights and Measures**** consisting of the delegates of all the contracting Governments."

Excerpt from the Metre Convention (1875): Article 3****

"The General Conference, mentioned in Article 3 of the Convention, shall meet in Paris, on the convocation of the International Committee at least once every six years.

Its mission is to discuss and instigate measures necessary for the propagation and improvement of the metric system as well as to approve new fundamental metrological determinations that might have been made in the interval between its meetings. It receives the Report of the International Committee on work accomplished […].

Votes at a General Conference are made by States, each State has the right to one vote.

Members of the International Committee have a seat as of right at meetings of the Conference; they may, at the same time, be delegates of their Governments."

Excerpt from the Regulations annexed to the Metre Convention (1875): Article 7****

* Often referred to in this document as BIPM or International Bureau of Weights and Measures.

** Often referred to in this document as CIPM or International Committee.

*** Often referred to in this document as CGPM or General Conference.

**** BIPM translation.

Place and dates of sessions of the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures

All the sessions of the CGPM will take place at the

Palais des Congrès de Versailles

10 rue de la Chancellerie, 78000 Versailles, France

with simultaneous interpretation in French and English.

First session,	Tuesday 13 November 2018	from 09:00 to 12:30
Second session,	Tuesday 13 November 2018	from 14:00 to 17:30
Third session,	Wednesday 14 November 2018	from 09:00 to 12:00
Fourth session,	Wednesday 14 November 2018	from 13:00 to 14:30
Fifth session,	Thursday 15 November 2018	from 09:00 to 12:00
Sixth session,	Thursday 15 November 2018	from 13:30 to 17:30
Seventh session,	Friday 16 November 2018	from 09:00 to 13:00
Eighth session,	Friday 16 November 2018	from 14:10 to 16:00

Working Group on the Dotation of the BIPM

The General Conference will establish a Working Group on the Dotation of the BIPM, which will meet at the Palais des Congrès de Versailles on Wednesday 14 November 2018 from 15:00 to 17:00.

An informal meeting on the BIPM Work Programme and corresponding Dotation, chaired by the CIPM President, will be held at the BIPM on Monday 12 November 2018 at 9:30. The CIPM President will define a list of Member States that will be invited to send representatives to this informal meeting. These States will be chosen to include maximum, intermediary and minimum contribution payers, properly balanced to represent all regions.

After the list of Member States that have been invited and have confirmed their participation at the informal meeting has been published on the BIPM website, there may be provision for a limited number of additional participants. Representatives of Member States who are not initially invited but who may wish to attend the informal meeting should contact the CIPM Secretary, Dr James W. McLaren (e-mail: mclarenjw@sympatico.ca).

For further information on the informal meeting, Member States are kindly invited to contact the CIPM Secretary, Dr James W. McLaren, and to consult the relevant BIPM webpage.

Please note that in order to accommodate the meeting and to ensure effective discussion, participation from any one Member State should be limited to a maximum of two people.

The BIPM laboratories will be open to Delegates to the General Conference on Monday 12 November 2018 starting at 14:00.

1 February 2018

For the International Committee for Weights and Measures
Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex

The Secretary,
J. W. McLaren

The President,
B. D. Inglis

Provisional agenda of the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures

1 Presentation of credentials by Delegates

2 Opening of the meeting

3 Address by His Excellency the *Ministre de l'Europe et des Affaires Etrangères de la République Française*

4 Reply by the President of the CIPM

5 Address by the President of the *Académie des sciences de Paris*, President of the General Conference

6 Nomination of the Secretary of the General Conference

7 Establishment of the list of Delegates entitled to vote

8 Approval of the agenda

9 Report of the President of the CIPM on the work accomplished since the 25th meeting of the CGPM

10 Presentations by representatives of intergovernmental organizations and international bodies

11 Report on relations with intergovernmental organizations and international bodies

12 Nomination of members of the Working Group on the Dotation of the BIPM

13 The revision of the International System of Units (See Draft resolution A)

14 On the definition of time scales (See Draft resolution B)

15 The objectives of the BIPM (See Draft resolution C)

16 Proposed Work Programme of the BIPM and corresponding dotation

16.1 Proposed Work Programme for the years 2020 to 2023

16.2 Proposed annual dotation (See Draft resolution D)

17 Financial arrears of Member States and the process of exclusion (See Draft resolution E)

18 Reports of Presidents of Consultative Committees

19 Proposals by Delegates

20 Open session

21 Votes on all Resolutions

22 Election of the CIPM

23 Other business

24 Closure of the meeting

List of Draft Resolutions for the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures

A On the revision of the International System of Units (SI)

B On the definition of time scales

C On the objectives of the BIPM

D On the dotation of the BIPM for the years 2020 to 2023

E On financial arrears of Member States and the process of exclusion

Draft Resolution A

On the revision of the International System of Units (SI)

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

considering

- the essential requirement for an International System of Units (SI) that is uniform and accessible world-wide for international trade, high-technology manufacturing, human health and safety, protection of the environment, global climate studies and the basic science that underpins all these,
- that the SI units must be stable in the long term, internally self-consistent and practically realizable being based on the present theoretical description of nature at the highest level,
- that a revision of the SI to meet these requirements was proposed in Resolution 1 adopted unanimously by the CGPM at its 24th meeting (2011) that laid out in detail a new way of defining the SI based on a set of seven defining constants, drawn from the fundamental constants of physics and other constants of nature, from which the definitions of the seven base units are deduced,
- that the conditions set by the CGPM at its 24th meeting (2011), confirmed at its 25th meeting (2014), before such a revised SI could be adopted have now been met,

decides that, effective from 20 May 2019, the International System of Units, the SI, is the system of units in which:

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$ is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum c is 299 792 458 m/s,
- the Planck constant h is $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- the elementary charge e is $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- the Boltzmann constant k is $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- the Avogadro constant N_{A} is $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol^{-1},
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd}, is 683 lm/W,

where the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to Hz = s^{-1}, J = m^2 kg s^{-2}, C = A s, lm = cd m^2 m^{-2} = cd sr, and W = m^2 kg s^{-3}.

notes the consequences as set out in Resolution 1 adopted by the CGPM at its 24th meeting (2011) in respect of the base units of the SI and confirms these in the following Appendices to this Resolution, which have the same force as the Resolution itself,

invites the International Committee for Weights and Measures (CIPM) to produce a new edition of its Brochure entitled "*The International System of Units*" in which a full description of the revised SI will be given.

Appendix 1. Abrogation of former definitions of the base units

It follows from the new definition of the SI described above that, effective from 20 May 2019:

- the definition of the second in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 1) is abrogated,
- the definition of the metre in force since 1983 (17th meeting of the CGPM, Resolution 1) is abrogated,
- the definition of the kilogram in force since 1889 (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901) based upon the mass of the international prototype of the kilogram is abrogated,
- the definition of the ampere in force since 1948 (9th meeting of the CGPM) based upon the definition proposed by the CIPM (1946, Resolution 2) is abrogated,
- the definition of the kelvin in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 4) is abrogated,
- the definition of the mole in force since 1971 (14th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the definition of the candela in force since 1979 (16th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the decision to adopt the conventional values of the Josephson constant K_{J-90} and of the von Klitzing constant R_{K-90} taken by the CIPM (1988, Recommendations 1 and 2) at the request of the CGPM (18th meeting of the CGPM, 1987, Resolution 6) for the establishment of representations of the volt and the ohm using the Josephson and quantum Hall effects, respectively, is abrogated.

Appendix 2. Status of constants previously used in the former definitions

It follows from the new definition of the SI described above, and from the recommended values of the 2017 special adjustment of the Committee on Data for Science and Technology (CODATA) on which the values of the defining constants are based, that effective from 20 May 2019:

- the mass of the international prototype of the kilogram $m(K)$ is equal to 1 kg within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of h at the time this Resolution was adopted, namely 1.0×10^{-8} and that in the future its value will be determined experimentally,
- the vacuum magnetic permeability μ_0 is equal to $4\pi \times 10^{-7}$ H m^{-1} within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of the fine-structure constant α at the time this Resolution was adopted, namely 2.3×10^{-10} and that in the future its value will be determined experimentally,
- the thermodynamic temperature of the triple point of water T_{TPW} is equal to 273.16 K within a relative standard uncertainty closely equal to that of the recommended value of

k at the time this Resolution was adopted, namely 3.7×10^{-7}, and that in the future its value will be determined experimentally,

– the molar mass of carbon 12, $M(^{12}\mathrm{C})$, is equal to 0.012 kg mol^{-1} within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of $N_A h$ at the time this Resolution was adopted, namely 4.5×10^{-10}, and that in the future its value will be determined experimentally.

Appendix 3. The base units of the SI

Starting from the new definition of the SI described above in terms of fixed numerical values of the defining constants, definitions of each of the seven base units are deduced by taking, as appropriate, one or more of these defining constants to give the following set of definitions, effective from 20 May 2019:

– The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1}.

– The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum c to be 299 792 458 when expressed in the unit m/s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.

– The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant h to be $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ when expressed in the unit J s, which is equal to kg $\mathrm{m}^2\ \mathrm{s}^{-1}$, where the metre and the second are defined in terms of c and $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.

– The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge e to be $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.

– The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant k to be $1.380\,649 \times 10^{-23}$ when expressed in the unit J K^{-1}, which is equal to kg $\mathrm{m}^2\ \mathrm{s}^{-2}\ \mathrm{K}^{-1}$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h, c and $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.

– The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant, N_A, when expressed in the unit mol^{-1} and is called the Avogadro number.

  The amount of substance, symbol n, of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.

– The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd}, to be 683 when expressed in the unit lm W^{-1}, which is equal to cd sr W^{-1}, or cd sr $\mathrm{kg}^{-1}\ \mathrm{m}^{-2}\ \mathrm{s}^3$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h, c and $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$.

Draft Resolution B

On the definition of time scales

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

considering that

- Resolution 1 adopted by the CGPM at its 14th meeting (1971) requested the CIPM to define International Atomic Time (TAI),
- no complete self-contained definition of TAI has been provided officially by the CIPM,
- the Consultative Committee for the Definition of the Second (CCDS) proposed in its Recommendation S2 (1970) a definition which was extended by a Declaration of the CCDS in 1980,
- the CGPM at its 15th meeting (1975) noted that Coordinated Universal Time (UTC), derived from TAI, provides the basis of civil time, and strongly endorsed this usage,

recognizing that

- the mission of the BIPM is to ensure and promote the global comparability of measurements, including the provision of a coherent international system of units,
- the International Astronomical Union (IAU) and the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) with the International Association of Geodesy (IAG) are responsible for defining reference systems for Earth and space applications,
- the International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R) is responsible for coordinating the dissemination of time and frequency signals and making relevant recommendations,
- the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), a service of the IAU and IUGG, is responsible for providing information required to relate terrestrial and celestial reference systems, including time-varying measurements of the Earth's rotation angle, UT1 - UTC, the low-precision prediction of UT1 - UTC for time signal broadcasts, DUT1, and for deciding and announcing leap second insertions,

noting that

- Resolution A4 (1991) of the IAU defined, in Recommendations I and II, the Geocentric Reference System as a system of space-time coordinates for the Earth within the framework of general relativity, and, in Recommendation III, named the time coordinate of that reference system "Geocentric Coordinate Time" (TCG),
- Resolution A4 (1991) of the IAU further defined, in Recommendation IV, Terrestrial Time (TT) as another time coordinate in the Geocentric Reference System, differing from TCG by a constant rate; the unit of measurement of TT being chosen to agree with the SI second on the geoid,

- Resolution B1.9 (2000) of the IAU redefined TT to be a time scale differing from TCG by a constant rate: $d\mathrm{TT}/d\mathrm{TCG} = 1 - L_G$, where $L_G = 6.969290134 \times 10^{-10}$ is a defining constant (the numerical value of L_G was chosen to conform to the value $W_0 = 62636856.0\ \mathrm{m^2s^{-2}}$ for the gravity potential on the geoid as recommended by Special Commission 3 of the IAG in 1999),
- the redefinition of TT in 2000 introduced an ambiguity between TT and TAI as the CCDS had stated in 1980 that TAI was to have "*the SI second as realized on the rotating geoid as the scale unit*" while the definition of TT does not refer to the geoid,

states that

- TAI is a continuous time scale produced by the BIPM based on the best realizations of the SI second, and is a realization of TT as defined by IAU Resolution B1.9 (2000),
- in the transformation from the proper time of a clock to TAI, the relativistic rate shift is computed with respect to the conventionally adopted equipotential $W_0 = 62636856.0\ \mathrm{m^2s^{-2}}$ of the Earth's gravity potential, which conforms to the constant L_G defining the rate of TT,
- as stated in the IAU Resolution A4 (1991), TT - TAI = 32.184 s exactly at 1 January 1977, 0h TAI at the geocentre, in order to ensure continuity of TT with Ephemeris Time,
- UTC produced by the BIPM, based on TAI, is the only recommended time scale for international reference and the basis of civil time in most countries,
- UTC differs from TAI only by an integral number of seconds as published by the BIPM,
- users can derive the rotation angle of the Earth by applying to UTC the observed or predicted values of UT1 - UTC, as provided by the IERS,
- UTC provides a means to measure time intervals and to disseminate the standard of frequency during intervals in which leap seconds do not occur,
- traceability to UTC is obtained through local real-time realizations "UTC(*k*)" maintained by laboratories contributing data to the calculation of UTC, identified by "*k*",

decides that

1. International Atomic Time (TAI) is a continuous time scale produced by the BIPM based on the best realizations of the SI second. TAI is a realization of Terrestrial Time (TT) with the same rate as that of TT, as defined by the IAU Resolution B1.9 (2000),
2. Coordinated Universal Time (UTC) is a time scale produced by the BIPM with the same rate as TAI, but differing from TAI only by an integral number of seconds,

and **recommends** that

- all relevant unions and organizations consider these definitions and work together to develop a common understanding on reference time scales, their realization and dissemination with a view to consider the present limitation on the maximum magnitude of UT1 - UTC so as to meet the needs of the current and future user communities,
- all relevant unions and organizations work together to improve further the accuracy of the prediction of UT1 - UTC and the method for its dissemination to satisfy the future requirements of users.

Draft Resolution C

On the objectives of the BIPM

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

considering,

- the world-wide use of the metric system – now the International System of Units (SI),
- Resolution 3 adopted by the CGPM at its 21st meeting (1999), which considers that all States, not only those that are Parties to the Metre Convention, engage in measurements which are related to trade and need to be traceable to the SI,
- Resolution 4 adopted by the CGPM at its 22nd meeting (2003), which considers the desirability of extending the number of Member States or Associates so as to increase the impact and benefit of participation in the Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM),
- that best practice in communication, transparency and governance has been implemented following adoption of Resolution 10 by the CGPM at its 24th meeting (2011), on the role, mission, objectives, long-term strategy and governance of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM),
- Resolution 4 adopted by the CGPM at its 25th meeting (2014) on the Dotation of the BIPM for the years 2016 – 2019, which urges Member States, as well as international organizations, private organizations and foundations to maintain the provision of additional voluntary support of all kinds to support specific BIPM mission-related activities, particularly those that facilitate participation in the activities of the BIPM by those States with emerging metrology systems,

noting

- the importance of the use of the SI for innovation, industrial and societal needs,
- the continuing role of the BIPM following the revision of the International System of Units (SI),
- the success of the CIPM MRA and the implementation of the recommendations following its recent review,
- the core role of metrology within the international Quality Infrastructure and the importance of international recognition of measurements for conformity assessment,
- the growing interest in participation in the activities of the BIPM, particularly from States with emerging metrology systems,

welcomes

- the revised strategy and objectives for the BIPM, agreed by the CIPM, allowing planning beyond the four-year cycle of the BIPM Work Programme and leading to best use of resources, including investment in people, infrastructure and equipment,
- the development of a long-term strategic view which, together with a consolidated planning process, underpins the development of the BIPM Work Programme in consultation with Member States,
- the continuous efforts of the BIPM to engage more States in its activities,
- the recognition of a common definition for the Quality Infrastructure by the World Bank and the ten international and intergovernmental organizations that form the network on metrology, accreditation, standardization and conformity assessment for developing countries (DCMAS Network), including the BIPM,

confirms

that the objectives of the BIPM are to:

- represent the world-wide measurement community, aiming to maximize its uptake and impact,
- be a centre for scientific and technical collaboration between Member States, providing capabilities for international measurement comparisons on a shared-cost basis,
- be the coordinator of the world-wide measurement system, ensuring it gives comparable and internationally accepted measurement results,

that fulfilling the BIPM mission and objectives is complemented by its work in:

- capacity building, which aims to achieve a global balance between the metrology capabilities in Member States,
- knowledge transfer, which ensures that the work of the BIPM has the greatest impact.

Draft Resolution D

On the dotation of the BIPM for the years 2020 to 2023

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

considering

- the increased importance of the work of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) to international trade, to industrial innovation, to monitor the global environment, to human health and medicine, to food and forensic science in all Member States,
- the recognition of the BIPM as the scientifically expert intergovernmental organization in metrology and the added value and cost efficiency it provides to all Member States in technical and economic terms,
- the manner in which the BIPM continues to adopt best management practice and to improve the efficiency of its operation,
- Resolution 7 adopted by the CGPM at its 16th meeting (1979) establishing a principle for the determination of the base dotation,

noting

- the current world financial situation and the financial constraints that Member States continue to experience,

welcomes

- the support of all kinds provided to the BIPM by National Metrology Institutes, in particular by way of secondment of staff to the BIPM, and support for the BIPM Capacity Building and Knowledge Transfer programme,

decides that

- the annual dotation of the BIPM, as defined in Article 6 (1921) of the Regulations annexed to the Metre Convention, will be set in such a way that, for those States that are Parties to the Metre Convention at the time of the 26th meeting of the CGPM, it shall be:

12 356 526 euros in 2020

12 480 091 euros in 2021

12 606 892 euros in 2022

12 730 941 euros in 2023

encourages

- Member States, as well as international organizations, private organizations and foundations to maintain the provision of additional voluntary support of all kinds to support specific BIPM mission-related activities, particularly those that facilitate participation in the activities of the BIPM by those countries without well-developed metrology infrastructure.

Explanatory note to Draft Resolution D

The figures for the dotation given in this draft are the "baseline" numbers adjusted by 1 % each year to correct, in part, for the future impact of inflation on running and staff costs. (The figure of 1 % is lower in each year than the estimates for inflation published by the European Central Bank and the International Monetary Fund).

The "baseline" numbers used for this calculation take into account the increase in the number of Member States due to the accession of the United Arab Emirates, Lithuania, Slovenia and Montenegro. (The latter three were previously Associates of the CGPM). The accession of these States does not increase the individual contributions from all existing Member States. The base line numbers are:

12 234 184 euros in 2020

12 234 184 euros in 2021

12 234 184 euros in 2022

12 234 184 euros in 2023

The BIPM dotation remained constant for the years 2016 to 2019. Cost savings are being made to compensate for inflation in running and staff costs during this period.

Draft Resolution E

On the financial arrears of Member States and the process of exclusion

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

recalling that

- Article 6 paragraphs 6 to 8 (1921) of the Regulations annexed to the Metre Convention reads as follows:

  « 6. Si un État est demeuré trois années sans effectuer le versement de sa contribution, celle-ci est répartie entre les autres États, au prorata de leurs propres contributions. Les sommes supplémentaires, versées ainsi par les États pour parfaire le montant de la dotation du Bureau, sont considérées comme une avance faite à l'État retardataire, et leur sont remboursées si celui-ci vient à acquitter ses contributions arriérées.

  7. Les avantages et prérogatives conférés par l'adhésion à la Convention du Mètre sont suspendus à l'égard des États déficitaires de trois années.

  8. Après trois nouvelles années, l'État déficitaire est exclu de la Convention, et le calcul des contributions est rétabli conformément aux dispositions de l'article 20 du présent Règlement. »[1]

- Resolution 8 adopted by the CGPM at its 23rd meeting (2007) on financial arrears of Member States sets a procedure concerning States who fail to fulfil their financial obligations,

observing that

- paragraphs 6 and 7 of Article 6 of the Annexed Regulations foresee that whilst the advantages and prerogatives of Member States are suspended for those States in arrears by three years, their contributions remain due,
- historical practice has always been to apply paragraphs 6 and 7 of Article 6 of the Annexed Regulations,

---

[1] English translation for easy reference of the authoritative French version:

6. If a State remains three years without paying its contribution, the said contribution is distributed among the other States pro-rata to their own contributions. The supplementary sums thus paid by these States to make up the dotation of the Bureau are considered as advances made to the State in arrears, and are reimbursed to them in the event that it repays its arrears of contributions.

7. The advantages and prerogatives conferred by accession to the Metre Convention are suspended for those States in arrears by three years.

8. After three more years, the State in arrears is excluded from the Convention and the calculation of contributions is re-established in accordance with the provisions of Article 20 of the present Regulations.

noting that

- historical practice has been at variance with the provisions of paragraph 8 of Article 6 of the Annexed Regulations by not excluding Member States when they have defaulted on their contributions for more than six years and by not re-establishing the calculation of contributions,
- historical practice has resulted in certain Member States remaining in a state of suspension for periods considerably exceeding the three-year period envisaged in the Annexed Regulations, leading to the accumulation of their arrears and the consequent distribution of their contributions among all other Member States,
- Resolution 8 adopted by the CGPM at its 23rd meeting (2007) introduced a procedure for the exclusion of a defaulting Member State that requires a decision of the CGPM, and consequently, the period of suspension prior to exclusion depends on the scheduling of CGPM meetings and thus defaulting Member States may not be treated equally,
- Resolution 8 (2007) partly addressed the issues raised by historical practice,

further recalling that

- procedural clarity and fair treatment of Member States are matters of good governance and are beneficial to all parties,
- the International Committee for Weights and Measures (CIPM), as the permanent supervisory organ of the BIPM, could apply Article 6 paragraph 8 of the Annexed Regulations in a timely manner,

decides that

- the CIPM shall implement Article 6 paragraph 8 of the Annexed Regulations,
- the CIPM shall address the situation where the historical practice has resulted in unjustified accumulation of arrears,

confirms that

- the BIPM shall notify the French Ministry for Europe and Foreign Affairs of any exclusion, which shall accordingly inform the excluded State and all other Member States,
- an excluded Member State may only again accede to the Metre Convention if its remaining arrears have been paid,
- pursuant to Article 11 of the Metre Convention, that such a Member State shall pay an entrance contribution equal to its first annual contribution.

Appendix B

Work Programme of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2020-2023

EXECUTIVE SUMMARY

This document provides the proposed BIPM work programme for the years 2020 to 2023 that addresses the objectives agreed by the CIPM in the BIPM Strategic Plan (2018).

A first draft was opened for comment through the BIPM website for April and May 2018, prior to being reviewed by the CIPM in June 2018, with the refined version available for a second round of consultation until October 2018. Fine tuning to ensure the proposed projects matched the requested budget has been undertaken. This 'near final' version is made available for presentation/discussion at the 26th meeting of the CGPM in November 2018.

The proposed activities are ambitious and depend on the work of visiting scientists and specialists working alongside BIPM staff for their delivery. The increasing participation of visiting scientists reduces cost, brings in specific expertise when it is needed, injects new ideas, and provides greater flexibility in staffing. Estimates of the resources needed for each task are given. The proposals also include capacity building and knowledge transfer activities, some of which depend on the BIPM securing sponsorship from NMIs, Member States and RMOs, or other bodies.

The programme includes projects in four technical areas that will:

Physical Metrology

- Coordinate the comparison of primary realizations of the kilogram according to the new definition and maintain the consensus value on the BIPM working standards and the BIPM ensemble of mass standards.
- Disseminate the unit of mass by establishing metrological traceability from the BIPM Kibble balance based on the new definition of the kilogram.
- Organize a new comparison of AC voltage standards based on the Josephson effect.
- Develop a new approach to providing traceability for capacitance standards based on the AC quantum Hall effect.

Time Metrology

- Introduce high-accuracy frequency data from optical clocks into the UTC calculation to prepare the way for the re-definition of the second.

- Implement a new optical fibre-based method for time transfer to validate inter-laboratory GNSS receiver calibration.
- Automate data handling protocols in order to optimise the monthly calculation of UTC and to pave the way towards more frequent dissemination of UTC.
- Increase the number of laboratories participating each week in Rapid-UTC by 10 %.

Chemical Metrology

- Coordinate the implementation of new values for ultra-violet absorption cross-sections for ozone amongst 25 NMIs world-wide that are centrally involved in providing the basis for world surface ozone measurements.
- Triple the number of nuclei covered by the BIPM's qNMR Internal Standard Reference Data, allowing wider application of qNMR techniques at NMIs for chemical standard characterization.
- Apply unique absolute carbon dioxide measurement methods and isotope ratio comparisons to underpin NMI, WMO and IAEA standards for atmospheric monitoring.
- Provide comparisons for the 20 NMIs world-wide most involved in delivering organic calibrants for the detection of food contamination.

Ionizing Radiation Metrology

- Double the number of NMIs taking part in key comparisons and calibrations of the primary standards that underpin radiotherapy dosimetry for 11 000 clinical accelerators world-wide by making greater use of the off-site DOSEO facility.
- Provide comparisons and calibrations using an off-site ^{137}Cs facility for radiation protection dosimetry, to support traceability of the calibration of dosimeters used by the 22 million people world-wide exposed to ionizing radiation in the workplace.
- Launch the next-generation International Reference System (SIR) for comparing standards of gamma-emitting radionuclides, for applications in nuclear medicine and environmental monitoring. Exploit new low current measurement technologies that may have spin-off advantages for their use at NMIs and DIs.
- Introduce new comparisons for long-lived radionuclides, to underpin standards used when decommissioning nuclear plants and for the measurement of naturally-occurring radioactive materials (NORM).

Note:

Following a detailed project costing exercise it was established that two activities could not be supported with the proposed budget and they have been removed from the work programme. These are: the development of a new transportable QHR standard based on graphene (activity removed from project PMD-E2 E2.1) and the development of facilities and methods for calibration of CH4 optical isotope ratio measurements, and associated comparison (activity removed from project Chem-G3). These cut projects are shown in Appendix 2.

Liaison, Coordination, Communication and Promotion

This work programme also describes liaison, coordination and communication activities that will address objectives agreed in the strategy and will thereby respond effectively and in a timely way to opportunities (and threats) arising from the evolving environment.

Highlights amongst the liaison activities will include increased interactions with the most relevant international bodies, in order to promote the benefits of the world-wide metrology infrastructure delivered through the international quality infrastructure. The liaison activities are broad, and the BIPM must remain agile in terms of its activities as liaison partners respond to their changing needs. However, what can be assured is the importance of seamlessly linking scientific and legal metrology, and thus the continued close collaboration with the OIML as both organizations strive to present 'one voice' for metrology to the outside world. Additionally, the BIPM will continue to work closely with the other 'Quality Infrastructure' partners, most notably ISO and ILAC, aided by the agreement through the INetQI – International Network of a common definition for Quality Infrastructure.

Capacity Building and Knowledge Transfer (CBKT)

During the 2016-2019 work programme, the BIPM launched a series of new activities supported by sponsorship from NMIs in the areas of capacity building and knowledge transfer. In the programme presented here, selected activities carried out during 2016-2019 on a sponsorship basis have been identified as being core to the BIPM's mission and will be supported by the BIPM's dotation. These include capacity building at each of the key stages of involvement in the international metrology system that will:

- Support the next generation of technical leaders (in Consultative Committees, Technical Committees and comparison piloting) to facilitate sharing the leadership burden and enable them to be more effective.
- Integrate staff from new Member States and Associates into the international metrology system and enable them to engage effectively in the CIPM MRA.
- Provide candidate Member States and Associates with the information and understanding needed when considering participation in the activities of the Metre Convention.

These core CBKT activities will be strategically planned with the RMOs and performed at the BIPM, and where appropriate, in the regions. At least 60 NMI/DI staff are expected to attend courses and workshops held at the BIPM, with a further 360 NMI/DI staff expected to benefit through the participation of BIPM staff in joint activities organized with the RMOs.

Additionally, sponsorship will be sought from NMIs, Member States, other interested bodies and RMOs to expand the topic based capacity-building activities (workshop and laboratory). Subject to achieving such sponsorship, the following highlights are planned:

- Launch a new technical capacity-building activity on protein and peptide analysis to support NMIs developing capability in "Metrology for accurate patient care".

- Continue the “Safe food and feed” and “Metrology for clean air” capacity building projects, expanding the activities to include additional regions of the world.
- Develop new capacity-building opportunities in the BIPM Time laboratory by the establishment of a “UTC simulator”.
- Provide capacity building opportunities related to techniques necessary for the comparison of electrical quantum standards and for the dissemination of mass standards.
- Engage with NMIs and DIs working in radiation dosimetry and radionuclide metrology, through joint projects and workshops.
- Implement new activities proposed and funded by stakeholders advancing the work of the wider metrology community and being consistent with the objectives of the BIPM.

It is estimated that around 40 laboratory placements totalling around 170 person months will be offered, with a further 100 participations in laboratory-based workshops organized at the BIPM.

SECTION I: INTRODUCTION

The Work Programme addresses the objectives agreed by the CIPM in the BIPM Strategic Plan (2018). We repeat here the Vision, Mission and Objectives:

THE VISION AND MISSION OF THE BIPM

The BIPM is an intergovernmental organization established by the Metre Convention, through which Member States act together on matters related to measurement science and measurement standards.

Its vision is to be universally recognized as the world focus for the international system of measurement.

Its mission is to work with the NMIs of its Member States, the RMOs and strategic partners world-wide and to use its international and impartial status to promote and advance the global comparability of measurements for:

- Scientific discovery and innovation,
- Industrial manufacturing and international trade,
- Improving the quality of life and sustaining the global environment.

THE OBJECTIVES OF THE BIPM

- **To represent <u>the world-wide measurement community</u> - aiming to maximize its impact.**
  - We liaise with relevant intergovernmental organizations and other international bodies in order to develop opportunities for the application of metrology to global challenges.
- **To be a <u>centre for scientific and technical collaboration</u> between Member States providing capabilities for international measurement comparisons on a shared-cost basis.**
  - We coordinate international comparisons of national measurement standards agreed to be of the highest priority.
  - We establish and maintain appropriate reference standards for use as the basis of key international comparisons at the highest level and provide selected calibrations from them.
- **To be the <u>coordinator of the world-wide measurement system</u> ensuring it gives comparable, fit-for-purpose and internationally accepted measurement results.**
  - We coordinate activities between the NMIs of Member States and the RMOs, including the provision of technical services to support the CIPM MRA and the infrastructure for the development and promotion of the SI.

Fulfilling our mission and objectives is underpinned by our work in:

- **capacity building**, which aims to achieve a global balance between the metrology capabilities in Member States.
- **knowledge transfer**, which ensures that our work has the greatest impact.

PRIORITIES IDENTIFIED FOR THE WORK PROGRAMME

The development of the BIPM Strategic Plan (2018) established the challenges facing the BIPM in preparing this Work Programme:

1. **To identify the highest-value activities required by the Member States by**
   - operating a Consolidated Planning Process that assembles views from the NMIs, the CIPM and the CC strategies.
   - developing a work programme that recognizes the distinctive nature of the BIPM's role.
   - recognizing the differing requirements of different NMIs.
   - describing activities in sufficient detail to facilitate planning and monitoring of the outcomes of projects.
2. **To review the technical work needed at the BIPM in physical metrology following the expected decision to redefine the base units of the SI at the 26th CGPM (2018), noting**
   - that the dissemination of mass calibrations will continue to be required by NMIs that will not have access to a primary realization.
   - the continuing need to support the dissemination of standards for electrical quantities.
3. **To balance the resources committed to the three strategic objectives (liaison, technical collaboration and coordination) with the capacity building and knowledge transfer activities, whilst taking account of**
   - the need for greater flexibility in the BIPM funding model in order to take advantage of donor-funded projects.
   - opportunities to outsource access to facilities where feasible and beneficial.
   - the need for all departments at the BIPM to be involved in knowledge transfer and capacity-building activities.
4. **To develop a sustainable long-term financial plan for the operation of the BIPM enabling it to fulfil its mission to 2025 by**
   - providing plausible scenarios for decision at the 26th CGPM (2018) that avoid or minimize additional financial obligations that would need to be considered at subsequent meetings of the CGPM.
   - planning for improved financial controls, using independent expert actuarial and financial advice.
   - anticipating the need to recruit and retain staff and exploit existing infrastructure.
   - agreeing a mechanism for dialogue with Member States regarding the long-term financial sustainability of the BIPM beyond 2025.

IMPACT OF THE WORK PROGRAMME AND THE BENEFITS FOR MEMBER STATES

Impact of the global metrology system

The global metrology system is the technical and administrative infrastructure maintained by the National Metrology Institutes (NMIs) in collaboration through the Regional Metrology Organizations (RMOs) and the BIPM that enables a comparable basis for measurements around the world. It benefits Member States because it creates an internationally agreed framework within which the equivalence of measurements made in different states can be demonstrated. Additionally, involvement in the system provides a benchmark for the performance of NMIs and supports national agendas in:

- Scientific discovery and innovation,
- Industrial manufacturing and international trade,
- Improving the quality of life and sustaining the global environment.

The global metrology system plays a crucial and underpinning role in the wider quality Infrastructure. The INetQI Network of international organisations (plus the World Bank) defines the QI as:

"The system comprising the organizations (public and private) together with the policies, relevant legal and regulatory framework, and practices needed to support and enhance the quality, safety and environmental soundness of goods, services and processes." And go on to state: "The quality infrastructure is required for the effective operation of domestic markets, and its international recognition is important to enable access to foreign markets. It is a critical element in promoting and sustaining economic development, as well as environmental and social wellbeing. It relies on: metrology, standardization, accreditation, conformity assessment, and market surveillance."

A number of studies have been carried out by Governments to quantify these benefits and examples from Member States are accessible through the BIPM website.

Coordination role of the BIPM

The CIPM Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA) has been in operation since 1999 and is coordinated by the BIPM under the authority of the CIPM. It has a recognised role in reducing technical barriers to trade as well as driving up standards and performance in NMIs world-wide. NMI Directors from around one hundred states and economies have signed the CIPM MRA, as have four international organizations. There are now more than 1 500 comparisons of measurement standards underpinning the CIPM MRA and some 25 000 peer-reviewed entries listing the capabilities of the NMIs (and Designated Institutes - DIs) in the publicly available database operated by the BIPM. This confirms that the CIPM MRA has growing visibility among its wider community of users.

Today, the CIPM MRA forms the foundation of rapidly accessible international recognition of the national measurement standards and of the calibration and measurement certificates issued by NMIs and other DIs. It is an important resource for industry and thousands of calibration and testing laboratories world-wide. The CIPM MRA has been adopted as the formal basis for international recognition of measurement traceability by the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), and is referenced in the 2017 revision of ISO/IEC 17025, the standard used by more than 50 000 calibration and testing laboratories world-wide. The instances of regulators demanding traceability to the SI through their national laboratory have reduced significantly in recent years as they increasingly accept the CIPM MRA as the basis for international recognition of calibration and measurement certificates issued by NMIs. The BIPM Work Programme for 2020 to 2023 will support the implementation of the CIPM MRA following its current in-depth review, which is optimizing the efficiency and effectiveness with which it is implemented.

In the field of *in vitro* devices (IVD) the work of the Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM), operated by the BIPM in conjunction with the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC) and ILAC, enables manufacturers to demonstrate compliance with the EU regulations for traceability.

The unique system of Consultative Committees managed by the BIPM brings together the world's experts from many NMIs and a number of intergovernmental organizations. It provides the forum in which decisions about the SI are made. It facilitates knowledge and technology transfer between the NMIs as well as enabling the coordination of the work of the NMIs, thereby facilitating cost and time saving.

Laboratory work carried out at the BIPM

The scientific work carried out at the BIPM focuses on the coordination of international comparisons of national measurement standards of the highest priority and undertaking the scientific work necessary to enable this to be done. In this way, BIPM staff maintain the specialized equipment and expertise needed to do this on a cost-shared basis. In some cases, this requires them to establish, maintain and develop appropriate reference standards. As a result of this work, the BIPM laboratories have the capability to provide selected calibrations for Member States.

The projected numbers of NMI and DI participations in comparisons coordinated by BIPM staff and calibrations delivered by BIPM staff:

BIPM Scientific Department	**2016-2019**	**2020-2023**
Physical Metrology	134	137
Time*	80	83
Chemistry	176	199
Ionizing Radiation	136	193
Total	**526**	**612**

**the participations indicated for the Time Department correspond to the monthly determination of UTC.*

In summary, all Member States have access to the facilities, services and the know-how of internationally recognized, fully neutral and independent metrology laboratories at the BIPM.

BIPM liaison work

Many intergovernmental bodies and international organizations depend on sound measurements to execute their mission. In total BIPM staff interact at an institutional or technical level (or both) with some 30 international or intergovernmental bodies, spreading measurement best practice and promoting the use and benefits of the world-wide metrology infrastructure. One liaison partner can be considered as a special case. The International Organization of Legal Metrology (OIML), the other intergovernmental body in the field of metrology, offers recommendations for governments to adopt in their legislative and regulatory framework to facilitate trade, establish mutual confidence and harmonize the level of consumer protection worldwide. As such the OIML can be considered as a sister organization to the BIPM. The BIPM staff and the BIML (the bureau of the OIML) have worked increasingly closely in recent years. This trend continues. Whilst the missions of the two organizations are complementary, both now present an integrated description of the worldwide metrology infrastructure, and its benefits.

The interaction with liaisons aims:

- to present of coherent and cohesive single voice for metrology by working closely with OIML.
- to promote good measurement practice including use of the International System of Units, the SI.
- to update the international community about BIPM activities and effectively disseminate information about metrology in the quality infrastructure context.
- to advocate on behalf of the NMI community such that the members of other International Organizations can gain the best benefit at national level from the available national metrology resource for their missions.
- to exchange knowledge in the use of measurement standards, development measurement techniques and methods, and agree on strategies for achieving common goals.
- to mutually contribute to capacity building activities through lecturing or developing training material, etc.

The BIPM's liaison work is overseen by the CIPM. Increasingly for key liaison initiatives formal guidance on the specific objectives is defined in position papers adopted by the CIPM.

The BIPM works with its liaisons through a wide range of forums, including the quadripartite arrangement with the International Organization for Standardization (ISO), International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) and the OIML and, in the working groups (WGs) of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). These international organizations along with the BIPM and the wider international metrology community, form part of the integrated quality infrastructure community and close institutional cooperation is clearly essential. Other bodies rely to a greater or lesser extent on the metrology infrastructure to execute their missions effectively.

The BIPM is an intergovernmental body and it has a strategic role in advocating the global comparability of measurements among international organizations. A long-term strategy has been established for liaison work in which liaisons are classified into long-term institutional liaisons (typically at a level where individual NMIs do not have access) and 'door opening' liaisons (where NMI experts could be present, but are not, usually because of a lack of awareness of the value of SI traceability). In this second case the role of the BIPM is one of providing specific technical expertise to demonstrate credibility, whilst convincing the liaison organization of the value of engagement with the international metrology community. When this has been achieved, and the NMI community and infrastructure is appropriately engaged, BIPM staff are able to reduce their involvement.

BASIS FOR COSTINGS AND THE INVOLVEMENT OF SECONDED STAFF

Each project is presented here together with the estimated resources necessary to deliver it expressed in terms of person months (of BIPM staff and visiting staff), the operating costs and the estimated investment costs. The programme includes a number of projects that are significantly dependent on seconded staff for their success. These will only be completed if these additional resources can be secured.

Seconded staff contributing to delivery of the Work Programme

The total staff resources required for programme delivery (including visiting scientists and other specialists) are:

BIPM Department	**BIPM staff** *(person months)*		**Staff seconded from NMIs/DIs for programme delivery** *(person months)*
	Programme delivery	*Dep. management*	
Physical Metrology	598	15	44
Time	314	15	108
Chemistry	489	15	174
Ionizing Radiation	385	15	48
International Liaison and Communication	326	15	88
Total	**2112**	**75**	**462**

Notes:

The estimated involvement of seconded staff is more than twice that projected for the 2016-2019 BIPM Work Programme.

Seconded staff benefitting from the CBKT activities are not included above.

SECTION II: BIPM WORK PROGRAMME FOR 2020-2023

LABORATORY WORK CARRIED OUT BY THE BIPM

The strategy for scientific and technical collaboration work to be carried out in the BIPM laboratories is:

> To be a centre for scientific and technical collaboration between Member States providing capabilities for international measurement comparisons on a shared-cost basis.
>
> - We coordinate international comparisons of national measurement standards agreed to be of the highest priority.
> - We establish and maintain appropriate reference standards for use as the basis of key international comparisons at the highest level and provide selected calibrations from them.

In considering whether a proposed project meets objective of the BIPM as listed above and its suitability to be carried out in the BIPM laboratories, criteria are considered in four areas:

- **The importance of the measurand/quantity**
  - The measurand/quantity that will be addressed by the comparison (or reference facility) must have a wide impact in its field as identified in the Consultative Committee strategy and be recognised to be of importance globally.
- **The extent of planned participation and future use**
  - Participation over the project cycle should generally be at least at the level of 15 NMIs/DIs and the project should be of enduring value as evidenced by a projected future requirement for at least the next 10 years (from the start of the project). It should be necessary to retain the facilities and expertise developed for repeated future use.
  - The NMIs and DIs can benefit by conducting comparisons and calibrations in an efficient and timely manner (for example, through reducing the burden of shipping sensitive instruments or hazardous materials for multi-centre comparisons).
- **Uniqueness**
  - Projects should provide access for NMIs/DIs to facilities and expertise that are not available openly to them elsewhere in the world.

- **Wider applications of the facilities used**
  - When applicable, the project should be organized to involve participation of scientists visiting from NMIs/DIs and the facilities may be of use for capacity building activities.
  - When applicable, the benefit of facilities and expertise developed for the project may be disseminated by providing traceability through calibrations (to NMIs/DIs)

PHYSICAL METROLOGY

Strategy for physical metrology

- To provide a long-term primary realization of the kilogram.
- To coordinate comparisons of primary realizations held by NMIs to support the *mise en pratique* for the kilogram.
- To support the dissemination of the unit of mass by providing calibrations of mass standards on request to NMIs.
- To develop and provide on-site comparisons using travelling quantum electrical standards.
- To support the *mise en pratique* of the electrical units.
- To exploit facilities at the BIPM by providing the highest-priority calibrations for electrical quantities requested by NMIs.

Activities in the field of electrical metrology

The mission of the BIPM to advance the global comparability of measurements takes in the field of electrical metrology in the form of ensuring that NMIs have continued access to means of comparing or calibrating their national primary standards, with the lowest possible uncertainty, for the most fundamental electrical quantities – voltage, resistance and capacitance. From these quantities most other electrical quantities can be derived. For these purposes the Physical Metrology Department maintains and develops international reference facilities: transportable Josephson voltage standard, transportable quantum Hall resistance standard, calculable capacitor, and the associated measurement systems. The comparison programme of the BIPM electricity laboratories is an integral part of the CCEM comparison programme. The importance of the quantum electrical standards, based on the Josephson and quantum Hall effect, is expected to increase even more in the future as they will become realization methods for electrical units as a consequence of the revision of the SI in 2018. A second important task is the continued support of the Kibble balance and other BIPM departments in the field of electrical measurements.

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
International reference standard for voltage			
1.	PMD-E1	**E1.1: On-site comparisons of Josephson voltage standards (JVSs)** Direct comparison of JVSs at dc and/or ac using the BIPM transportable JVSs to obtain lowest possible uncertainty *NMI Participations: 8*	
		1) Bilateral on-site comparisons at dc as part of **BIPM.EM-K10.a/b** and/or ac (**new comparison**) with relative uncertainty of 1×10^{-10} (dc) and below 10^{-6} (ac) 2) Maintenance of the transportable Josephson voltage standards, supporting also bilateral comparisons of Zener voltage standards (E1.2) and calibrations of Zener voltage standards for NMIs (E1.3)	a) 60 pm + 6 pm for visiting scientist b) 92 k€ c) 160 k€

		E1.2: Bilateral voltage comparisons using Zener diode transfer standards For NMIs not possessing JVSs, and as a first step before an on-site comparison of JVSs (E1.1) *NMI Participations: 4*	
		a) Bilateral comparisons of Zener voltage standards as part of **BIPM.EM-K11.a/b** with relative uncertainty of 5×10^{-8} b) Participation in related RMO comparisons to link them to BIPM.EM-K11 c) Maintenance of the BIPM secondary dc voltage standards (Zeners), also supporting the calibration of Zener voltage standards for NMIs (E1.3)	a) 10 pm b) 10 k€ c) 0 k€
		E1.3: Calibrations of Zener diode secondary standards For NMIs not possessing a primary voltage standard, as most of the new Member States, using measurement systems already in place for comparison activities. *Calibration for: 10 NMIs (12 Certificates)*	
		Calibration of Zener diode secondary standards for NMIs without primary realization and for internal customers (Ionizing Radiation and Kibble balance)	a) 5 pm b) 10 k€ c) 0 k€
International reference standard for resistance			
2.	PMD-E2	**E2.1: On-site comparisons of quantum Hall resistance (QHR) standards** Direct comparison of QHR standards using the BIPM transportable standard, to obtain lowest possible uncertainty *NMI Participations: 6-8*	
		1) Bilateral on-site comparisons of quantum Hall standards (including new graphene samples) as part of **BIPM.EM-K12** with relative uncertainty 1×10^{-9} 2) Providing the basis for the realization of the capacitance unit farad 3) Maintenance of the transportable standard and related measurement chain, also supporting bilateral resistance comparisons using resistance transfer standards (E2.2) and calibrations of secondary standards for NMIs (E2.3)	a) 58 pm + 12 pm for visiting scientist b) 71 k€ c) 40 k€
		E2.2: Bilateral resistance comparisons using resistance transfer standards As a first step before an on-site comparison and for NMIs not possessing a QHR standard *NMI Participations: 4-6*	
		1) Bilateral comparisons of resistance transfer standards as part of **BIPM.EM-K13.a/b** with relative uncertainty of 5×10^{-8} 2) Participation in related RMO comparisons to link them to BIPM.EM-K13 3) Maintenance of BIPM secondary resistance standards and related measurement chain, also for the calibration of resistance secondary standards for NMIs (E2.3)	a) 13 pm b) 10 k€ c) 0 k€
		E 2.3: Calibrations of resistance secondary standards For NMIs not possessing a primary resistance standard, as most of the new Member States, using measurement systems already in place for comparisons *Calibration for: 25 NMIs (150 Certificates)*	
		Calibration of resistance secondary standards for NMIs without primary realizations and for internal customers (Mass, Ionizing Radiation, Kibble balance)	a) 20 pm b) 0 k€ c) 0 k€

International reference standard for capacitance			
3.	PMD-E3	**E3.1: Bilateral capacitance comparisons using capacitance transfer standards** For NMIs wishing to demonstrate their capabilities in capacitance calibrations *NMI Participations: 4-6*	
		1) Bilateral comparisons of capacitance transfer standards as part of **BIPM.EM-K14.a/b** with relative uncertainty of 5×10^{-8} 2) Maintenance of the measurement systems to derive the capacitance unit from the quantum Hall effect and/or the calculable capacitor, also supporting the calibrations of capacitance secondary standards (E3.2)	a) 15 pm b) 42 k€ c) 20 k€
		E3.2: Calibrations of capacitance secondary standards For NMIs not possessing a primary capacitance standard, as most of the new Member States. *Calibration for: 20 NMIs (110 Certificates)*	
		Calibrations of capacitance secondary standards for NMIs without primary realizations	a) 18 pm b) 0 k€ c) 0 k€
		E3.3: ac quantum Hall effect To develop a primary method to realize ac impedances according to the revised SI	
		1) Development of the ac quantum Hall effect into an operational primary standard of impedance, to reduce the uncertainty of the realization of the capacitance unit 2) Direct comparison of the ac quantum Hall effect and the calculable capacitor, for verification of the validity of the equation for the von Klitzing constant at the 10^{-9} level, supporting the *mise en pratique* for the electrical units	a) 43 pm + 12 pm for visiting scientist b) 65 k€ c) 170 k€

Activities in the field of mass metrology

The role of the BIPM in the field of mass metrology will evolve after the redefinition of the kilogram, which is expected to be approved in 2018 and implemented on 20 May 2019. The existence of independent realizations of the kilogram at several NMIs using Kibble balances or isotopically enriched ^{28}Si spheres will be a fundamentally new situation for mass metrology. The BIPM will play an important role in ensuring the world-wide uniformity of dissemination of the kilogram by organizing comparisons of the NMIs' kilogram realizations. During a transition period the consensus value determined by these comparisons will serve as the basis for dissemination from the participating NMIs and the BIPM to ensure world-wide uniformity. The BIPM will provide a stable mass reference for these comparisons. The Department will implement the most accurate and efficient means of realizing the kilogram, to support a robust international system for the realization and dissemination of the kilogram. The BIPM will continue to provide mass calibrations for NMIs which do not realize the mass unit.

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
Mass dissemination			
4.	PMD-M1	**M1.1: Calibration of 1 kg national prototypes and mass standards** *Calibration for: 25 NMIs (50 Certificates)*	
		1) Calibration of existing 1 kg national Pt-Ir prototypes in air or under vacuum. 2) Calibration of 1 kg stainless steel national mass standards, including volume and centre-of-gravity determination, if requested. 3) Monitoring of the mass evolution of the BIPM working standards. 4) Calibration of pressure gauges, as an internal service necessary to support mass calibrations at the required uncertainty, and for other BIPM departments.	a) 73 pm b) 30 k€ c) 80 k€
		M1.2: Provision of 1 kg Pt-Ir prototypes *Fabrication for: 3 NMIs*	
		1) Fabrication of 1 kg Pt-Ir prototypes for Member States. 2) Calibration of new 1 kg Pt-Ir prototypes including volume determination.	a) 5 pm b) 0 k€ c) 0 k€
Comparisons of realizations of the new kilogram definition			
5.	PMD-M2	**M2.1: Organization of a key comparison of kilogram realizations** To guarantee uniform mass realization and dissemination at the highest level *NMI Participations: 10*	
		1) Organization of a periodic CCM key comparison of all available kilogram realizations and participation in the determination of the consensus value, which during the first years after the redefinition will serve as the basis for dissemination for all participants to ensure world-wide uniformity of mass measurements. 2) Ongoing bilateral key comparison of kilogram realizations, linked to (1) 3) Update of the mass values attributed to the ensemble of reference mass standards (ERMS) and the Pt-Ir working standards, traceable to the reference value of the comparison of kilogram realizations.	a) 12 pm b) 0 k€ c) 0 k€
		M2.2: Organization of a comparison of calibrations of stainless steel mass standards To test the uniformity of the mass unit at the level of dissemination *NMI Participations: 15*	
		1) Organization of a new comparison of stainless steel 1 kg mass standards 2) Participation in related RMO comparisons.	a) 12 pm b) 0 k€ c) 0 k€
		M2.3: Maintaining the ERMS (ensemble of reference mass standards) The ERMS will be used for mass dissemination and as a flywheel for comparisons. The masses of the standards need to be as stable as possible; therefore some monitoring is necessary, while protecting the standards against wear.	
		1) Link of the ERMS masses with values from realization experiments. 2) Mass comparison of standards within the ERMS. 3) Modeling of mass changes in-between calibrations against realization experiments. 4) Using a previously-characterized high-quality Si sphere for quasi-realization of the kg, based on surface characterization (in collaboration with an NMI), at the parts in 10^8 level.	a) 37 pm b) 80 k€ c) 45 k€

Kibble Balance			
Developing and maintaining the Kibble balance International reference facility for realization of the new definition of the kilogram on a long-term cost-shared basis			
6.	PMD-M3	**M3.1:** Achieving a target uncertainty of 2 parts in 10^8 (corresponding to 20 µg at 1 kg) by further improvements of the apparatus and the development of a detailed uncertainty budget.	a) 59 pm + 12 pm for visiting scientists b) 30 k€ c) 90 k€
		M3.2: Reengineering of critical mechanical subsystems to enable semi-routine operation.	a) 59 pm b) 30 k€ c) 90 k€
		M3.3: Developing software and control system for full operation in vacuum.	a) 25 pm b) 30 k€ c) 90 k€
		M3.4: Develop a capability, in conjunction with NMIs that have a transportable gravimeter, for the determination of gravitational acceleration at the uncertainty level of a few parts in 10^9. This will require absolute gravimeter(s) to be brought to the BIPM from NMIs that have successfully participated in the most recent ICAG, accompanied by the NMI experts, for measurements in the BIPM Kibble balance laboratory.	a) 3 pm + 1 pm for visiting scientists b) 5 k€ c) 0 k€
		M3.5: Participate in the ongoing comparison of realizations of the kilogram (PMD-M2).	a) 6 pm b) 0 k€ c) 0 k€
		M3.6: Carry out a design study for a Kibble balance, taking advantage of the re-definition of the kilogram to realize directly masses below 1 kg, with smaller uncertainties than at present.	a) 24 pm b) 0 k€ c) 30 k€

Laboratory support for capacity building and knowledge transfer activities

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
7.	PMD-CBKT	Planning, coordination and delivery of the capacity building and knowledge transfer activities in the field of electricity and mass metrology *(estimates are based on delivery of the CBKT topics presented on page 38, sponsorship will be required for delivery)*	a) 4 pm b) 0 k€ c) 0 k€

TIME METROLOGY

Activities in the field of time metrology

The main mission of the BIPM in the field of time is the realization and dissemination of the international time scale, International Atomic Time (TAI), and of the Coordinated Universal Time (UTC), derived from TAI, to provide a reference scale which ensures approximate agreement with the time derived from the irregular rotation of the earth.

To realise TAI, UTC, and a rapid approximation called UTCr at the best level of accuracy and stability, whilst taking advantage of the clocks and time transfer techniques developed by NMIs and RMOs, continuous improvements are necessary. Therefore, research activities are carried out in the Time Department, including the maintenance of a time laboratory which is able to provide reference GNSS receivers for the measurement of the NMI receiver delays.

The ultimate world reference time scale can maintain its highest level of accuracy and stability only if it is ready to incorporate and harmonise the developments achieved by NMIs and if it is capable of facing scientific and technological challenges. In the next decade, research shall focus on support towards the development and optimal use of the optical frequency standard measures and their high accuracy comparison at distance. This will lead to a significant improvement in TAI and UTC as well as to a possible redefinition of the SI second which, in turn, will require an improved knowledge of the Earth gravitational potential.

Moreover, the Time Department promotes the use of a unique time scale reference by all countries, all GNSS providers, and in different applications (for example time stamping regulations). In addition, it evaluates the needs of the emerging user communities through a proactive contribution to the Liaison programme.

Strategy for time metrology

- To calculate, disseminate and improve the world reference time scale through the integration of data from atomic clocks at the NMIs (including tests and inclusion of new type of standards and their comparison at long distance).
- To investigate the scope for a 100-fold improvement in frequency accuracy through a future redefinition of the second and of time-keeping based on optical clocks.
- To promote the importance and benefits to the international telecommunications, astronomy and earth science communities of:
  - UTC,
  - frequency measurements traceable to the SI and
  - common space-time references.

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
Generation of TAI/UTC, stable and accurate international reference			
1.	Time-U1	**U1.1: Computation of UTC and KC for Time and Frequency transfer** *Participating laboratories: 80 (2017)*	
		Monthly provision of the international reference time scales TAI, UTC, and the terrestrial Time (TT), continuously improving their metrological quality. This is obtained by computing the differences between UTC/UTCr and the local real time realizations UTC(k) of the contributing laboratories. Results are published in the monthly BIPM *Circular T*, the weekly bulletin of the UTCr, and providing data to the KCDB for the key comparison CCTF-K001.UTC. The process to obtain UTC and its validation is part of the BIPM Quality System. The Department also issues an annual report with a summary of the results.	a) 58.4 pm b) 5 k€ c) 8 k€
		U1.2: Development and optimization of the UTC computation	
		The continuous improvement of UTC and related products is based on the development of appropriate SW tools and HW reliability. The goals of this WP are mostly based on: – Automatization of the computation system augmenting the automatic checks on input and output data to improve the reliability of the results. – Use of a redundant and secure ensemble of servers based on virtualization technology. – Use of data base structure for the time transfer and calibration data to provide user-friendly access to the results to the contributing NMIs.	a) 50 pm b) 5 k€ c) 30 k€
2.	Time-U2	**Improved algorithms for time scale and time transfer data processing**	
		The algorithms developed, maintained, and continuously improved by the Time Department are devoted to: – the ensemble time scale formation, – the corrected processing of the time transfer measures, – the steering by the use of primary and secondary frequency standards. The goals are an algorithm for outlier and faults detection, monitoring of the data flow and link comparison, redundant links, multi-constellation GNSS time transfer, as well as algorithms treating each clock with adapted and modern statistical tools. The contribution of a secondee would be fundamental to ensure the necessary progress of these activities. The use of a GIT* laboratory capability within the frame of the TWSTFT WG so that software for software defined receiver (SDR) measurement technique can be developed through a collaborative effort with leading NMIs. This shared configuration will then be validated by a joint BIPM/NMI team and be made available for download as a service to NMIs (and other UTC time laboratories). Opportunities to use the capability for training and equipment monitoring will also be explored. *GIT is a free and open source distributed version control system	a) 62 pm + 12 pm for visiting scientists b) 5 k€ c) 4 k€

3.	Time-U3	**Calculation and dissemination of Rapid UTC** *Participating laboratories: 57 (2018), 2023 target is to grow by 10 %*	
		To meet the requirements of the NMI time labs and of other UTC users, a rapid approximation of UTC, called rapid UTC, is available weekly based on a subset of data. The automatization of the process and a reliable anomaly detection are in this case still more important and will be pursued in this WP, evaluating the possibility for a more frequent evaluation of the time scale. To be in pace with emerging user communities, as for example the GNSS navigation and timing systems, the Time Department will investigate the impact of reducing the delay in the publication of UTC and UTCr.	a) 26 pm + 14 pm for visiting scientists b) 10 k€ c) 5 k€
Characterization of delays in time transfer equipment operated in TAI/UTC contributing laboratories			
4.	Time-D1	**D1.1: Maintenance of BIPM GNSS travelling receivers and procedures for calibration** The BIPM Time laboratory maintains and operates the travelling standard receivers, the reference ones not travelling, and the atomic clock providing the local time reference	
		1) Characterization, study, and experimental tests of equipment compatible with those operated in NMIs. 2) Reliable/redundant travelling and fixed-reference standards. 3) Guidance documents and support for contributing NMIs. 4) Technical protocols for calibration. 5) Methods of calibration aimed at improving the time link uncertainty, which remains the largest component of the uncertainty of *UTC- UTC(k).* 6) Maintaining a time lab supporting test and calibration of high accuracy microwave link. 7) Provision of a frequency reference to the other BIPM labs. The dissemination of this frequency signal and the related internal calibrations are part of the BIPM Quality System.	a) 19 pm + 5 pm for visiting scientists b) 10 k€ c) 197 k€
		D1.2: Realization of delay measurement campaigns for pivot laboratories (G1 labs)	
		This project ensures the calibration trips by GNSS receiver to the labs belonging to GNSS Group 1 or to other networks of labs. The different steps are: – To organize the GNSS measurement campaigns (requiring the shipping of the BIPM travelling system without staff) to each of approximately ten contributing laboratories (G1 labs), a number that should expand with new RMOs. The whole process involves several circulating trips and is repeated every other year. – to calibrate the TWSTFT networks by travelling GNSS receivers and by setting up additional dedicated travelling equipment with the aim to reach the best possible achievable uncertainty. – to check the receiver conditions and measure internal delays before and after the circulation. – to carry out the data analysis and issue the calibration report.	a) 10 pm + 5 pm for visiting scientists b) 5 k€ c) 1 k€
		D1.3: Coordinating with the RMOs for GNSS campaigns of G2 laboratories (labs which are not pivot labs) and linking results to the BIPM G1 reference	
		1) Provision of Guidelines. 2) Regular assessment of the values of the Type B uncertainty. 3) Validation of the G2 calibration reports and maintenance of the database. 4) Realization of differential calibration at the BIPM for G2 labs outside RMOs.	a) 5 pm b) 0 k€ c) 0 k€

Use of very accurate optical frequency standards - Secondary representations of the second			
		O1.1: New time and frequency transfer techniques in TAI/UTC. Possible redefinition of the SI second and TT	
		1) Develop an operational algorithm for the analysis and comparison of optical frequency standard measures to estimate the relative frequency values. 2) Study, develop, and make operational new algorithms for the processing of new and innovative time and frequency measures (optical fibres, 3-way by satellite). 3) Collaborate with NMIs and the CCTF for standardization of measurement process, data format; data treatment. 4) Promote the refinement of the Earth gravity potential as necessary for the comparison of optical frequency standards. 5) Contribute to the discussion on the redefinition of the second.	a) 25 pm b) 8 k€ c) 4 k€
		O1.2: Optimal use of optical standard measurements in TAI/UTC	
5.	Time-O1	New optical standards as well as new time and frequency comparison in the optical domain call for an update of the TAI/UTC data processing to optimize the contribution of these new measures. To this aim, the Time Department need: (a) to develop the correct statistical treatment of measures that may have peculiarities (dead time, long period of missing data, only frequency comparison…); (b) to adapt the TAI algorithm for the optimal introduction of the optical frequency standard measurements; (c) to study new optical transfer techniques and their technical constraints with the aim to appropriately estimate the uncertainty; (d) to set up calibration techniques and guidelines. The feasibility for the BIPM time lab to be connected to the network of optical fibres under construction by the NMIs will be explored. This would provide the possibility to: (a) validate the usual GNSS calibrations by independent and more accurate technique, (b) be connected to several of the new optical standards under development and to different UTC(k) time scales (c) provide training on the technologies of the future and explore the possibility for providing a hub for international PSFS comparison for NMIs. These additional activities require additional effort that the BIPM staff could ensure only at a very basic level. To face the new challenges with appropriate resources and optimizing the use in TAI/UTC, the support of a full time secondee is necessary both in the data treatment, and in the set-up of the experimental fibre connection. In case this should not be available, only a minimal, un-optimized, and incomplete activity can be ensured.	a) 6 pm+ 72 pm for visiting scientists b) 36 k€ c) 32 k€

Laboratory support for capacity building and knowledge transfer activities

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
6.	Time-CBKT	Planning, coordination and delivery of the capacity building and knowledge transfer activities in the field of time metrology *(estimates are based on delivery of the CBKT topics presented on page 38, sponsorship will be required for delivery)*	a) 6 pm b) 0 k€ c) 0 k€

CHEMICAL METROLOGY

Activities in the field of Chemistry

The BIPM chemistry laboratory activity focuses on gas standards for air quality and global atmospheric monitoring, and primary calibrators for clinical chemistry and laboratory medicine, food analysis, environmental analysis, forensics and pharma. The BIPM coordinates key comparisons and pilot studies prioritized by the CCQM, in response to NMI needs, for:

- greenhouse and air quality gases including their isotope ratios, for which the uncertainty of standards is critical, to ensure the accurate long-term, global monitoring of these species, including the BIPM key comparison BIPM.QM-K1 for surface ozone and BIPM.QM-K2 for atmospheric carbon dioxide;
- the purity assessment of organic calibrators (source of traceability for measurements of the amount of organic species in a wide range of clinical, environmental, food, forensic and drugs in sport applications) and reference data for their value assignment. Coordination of an on-going series of CCQM key comparisons covering all small-organic-molecule-based CMCs, with an extended model of comparisons for large organic molecules.

Strategy for chemical metrology

- To provide and coordinate comparisons of national measurement standards for:
  - **greenhouse gases**, demonstrating consistency at levels required to support national energy and environmental priorities;
  - **major air quality gases**, demonstrating consistency at levels required to support national health and environmental priorities.
- To provide the basis for metrological traceability for organic and biochemical measurements by coordinating comparisons of primary reference materials for:
  - **small organic molecules**, demonstrating consistency at levels required to support reference measurement systems for laboratory medicine, food safety, forensics, environmental analysis and pharma.
  - **peptides and large organic molecules**, demonstrating consistency at levels required to support reference measurement systems for laboratory medicine and health care sectors.
- To promote and develop the use of SI traceable standards and measurements (available from the NMIs) with intergovernmental stakeholders.

International equivalence of gas standards for air quality and global atmospheric monitoring

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
Surface ozone and air quality gas standard comparisons			
Coordination of comparisons to determine and improve the international equivalence of gas standards for air quality monitoring *NMI Participations: 30*			
1.	Chem-G1	**G1.1:** 20 ozone standards bilateral comparisons as part of **BIPM.QM-K1 coordination** (2020-2023), based on the unique triad of standards at the BIPM, which will maintain consistency of calibration services for surface ozone measurements for local, regional, national and global air quality monitoring networks. *NMI participations: 20*	a) 12 pm b) 20 k€ c) 35 k€
		G1.2: Updates of SRP electronics systems for **National Ozone Standards**, developed and validated at the BIPM, in collaboration with the NIST, enabling NMIs to extend the lifetime of their ozone standards (Note, costs included relate to upgrade and maintenance of the BIPM systems only, any provision of systems to NMIs is at cost) *NMI participations: 10*	a) 12 pm b) 20 k€ c) 30 k€
		G1.3: Coordination of reactive gas/air quality comparisons **(NO_2, HNO_3 and HCHO impurity comparison and spectroscopy studies**), based on state of the art dynamic standard reference facilities at the BIPM, enabling NMIs to demonstrate equivalence of their standards for air quality and vehicle emission verification measurements. *NMI participations: 15 (Measurements started in 2016-2019 BIPM Work Programme)*	a) 16 pm b) 20 k€ c) 0 k€
International reference facility for comparison of standards and scales for clean air			
Coordination of comparisons to determine and improve the international equivalence of radiative forcing gases *NMI Participations: 47*			
2.	Chem-G2	**G2.1:** Coordination of **BIPM.QM-K2** on Carbon dioxide in air **(2020-2023),** based on a unique manometric reference comparison facility maintained at the BIPM, providing an independent absolute analytical reference method for on-demand comparisons of gravimetrically prepared NMI standards for greenhouse gas and emissions measurement calibrations. *NMI participations: 20*	a) 28 pm + 12 pm for visiting scientists b) 35 k€ c) 35 k€
		G2.2: Completed homogeneity and stability studies on blended mixtures and coordination of **CCQM-Pxx (2020)** on isotope ratios in carbon dioxide, and method development for reduced uncertainties, based on BIPM's high accuracy flow and cryogenic trapping system and optically based IRIS facility in collaboration with IAEA, demonstrating the state of the art in equivalence of CO_2 isotope ratio standards for atmospheric and point of origin measurement applications. *NMI participations: 15*	a) 20 pm +24 pm for visiting scientists b) 35 k€ c) 20 k€
		G2.3: Developed facility and methods for isotope ratio value assignment of CO_2 in air standards and coordination of **CCQM-Kxx (2023)** on isotope ratios in carbon dioxide, based on lowest uncertainty mass spectrometric and optically based measurements techniques at the BIPM, demonstrating equivalence of scale based isotope ratio measurements and standards and relationship to SI traceable values. *NMI participations: 12*	a) 32 pm + 36 pm for visiting scientists b) 65 k€ c) 385 k€

International reference facility for comparison of standards and scales for radiative forcing gases			
Coordination of comparisons to determine and improve the international equivalence of gas standards for radiative forcing gases. *NMI Participations: 20*			
3.	Chem-G3	**G3.1:** Completion of key comparison on nitrous oxide and coordination of methane in air standards comparison **(CCQM-K82.2023**), based on dedicated greenhouse gas standard comparison facilities at the BIPM with minimized analytical uncertainty to provide demonstration of continued improvement in the accuracy of radiative forcing gas standards world-wide for atmospheric monitoring. *NMI participations: 20 + 16 (Measurements started in 2016-2019 BIPM Work Programme)*	a) 14 pm b) 40 k€ c) 25 k€
		G3.2: Developed methods with reduced uncertainties for Greenhouse Gas comparisons, based on the improvement of cryogenic separation facilities for greenhouse gases and their quantitative operation in sample preparation for greenhouse gas mole fraction and isotope ratio measurements.	a) 20 pm +15 pm for visiting scientists b) 40 k€ c) 20 k€

International equivalence of organic primary calibrators for Clinical Chemistry and Laboratory Medicine, Food Analysis, Environmental analysis, Forensics and Pharma

Small Molecule Organic Primary Reference Comparisons (Pure Materials)			
Coordination of comparisons to determine and improve the international equivalence of organic primary calibrators for clinical chemistry and laboratory medicine, food analysis, environmental analysis, forensics and pharma. *NMI Participations: 50*			
4.	Chem-O1	**O1.1:** Completion of bisphenol A purity comparison **CCQM-K148.a (non-polar organic (< 500 Da)**, with mass-balance and qNMR value assignment at the BIPM, and homogeneity and stability analysis, providing a core comparison enabling NMIs to demonstrate capabilities and continued improvement in providing SI traceability for small molecule low polarity organic analytes. *NMI participations: 25(Measurements started in 2016-2019 BIPM Work Programme)*	a) 12 pm b) 63 k€ c) 33 k€
		O1.2: Coordination of **CCQM-K148.b (polar organic (< 500 Da)** with mass-balance and qNMR value assignment at the BIPM, and homogeneity and stability analysis providing a core comparison enabling NMIs to demonstrate capabilities and continued improvement in providing SI traceability for polar small molecule organic analytes. *NMI participations: 25*	a) 24 pm b) 63 k€ c) 15 k€
		O1.3: Coordination of CCQM-K148.c organic purity (500 Da to 1000 Da) and method development, with mass-balance and qNMR value assignment at the BIPM, and homogeneity and stability analysis, providing a core comparison enabling NMIs to demonstrate capabilities and continued improvement in providing SI traceability for larger small molecule analytes, together with the extension in methods for their characterization. *NMI participations: 25*	a) 24 pm b) 55 k€ c) 0 k€
Small Molecule Organic Primary Reference Comparisons (Calibration Solutions)			
Coordination of comparisons standards and methods for organic calibrants. *NMI Participations: 30*			
5.	Chem-O2	**O2.1:** Coordination of the calibration of solution comparison **CCQM-K78.b** (Multi-component non-polar), based on BIPM gravimetrically prepared calibration solutions with multi component non-polar analytes, with the mass fractions of primary reference materials quantified within the BIPM purity measurement facilities, providing a core comparison for non-polar organic calibration solutions for NMIs. *NMI participations: 25*	a) 24 pm b) 61 k€ c) 0 k€

		O2.2: Developed and published reference data for qNMR internal standards (three internal standards), based on BIPM's dedicated qNMR facility and in collaboration with NMIJ providing published reference data on qNMR internal standards, enabling the extension of the use of qNMR to accurate measurements with ^{19}F, ^{31}P and ^{13}C nuclei, and extending the scope of applicability of qNMR for SI traceable measurements on organic analytes, and support for NMI measurement services and their comparisons.	a) 33 pm +24 pm for visiting scientists b) 68 k€ c) 30 k€
Large Molecule Organic Primary Reference Method Development and Comparisons			
Coordination of comparisons to determine and improve the international equivalence of organic primary calibrators for Clinical Chemistry and Laboratory Medicine, Forensics and Pharma *NMI Participations: 30*			
6.	Chem-O3	**O3.1:** Developed and published methods for the characterization of large molecule primary calibrators, based on high resolution mass spectrometry facilities at the BIPM, extending the application of mass spectrometric methods for the identification and quantification of structurally related impurities in peptide calibrators that are future candidates for comparisons to underpin NMI measurement capabilities.	a) 12 pm + 12 pm for visiting scientists b) 80 k€ c) 20 k€
		O3.2: Completion of purity key comparison **CCQM-K115.c C-HbA1c hexapeptide purity and CCQM-K115 repeat on HbA0 hexapeptide purity**, based on mass-balance and protein impurity corrected amino acid analysis characterization performed at the BIPM, providing a core comparison of capabilities for value assignment of primary reference material straight chain peptides with molecular weights smaller than 5 kDa at NMIs, and underpinning reference measurements systems for glycated hemoglobin and their development for diabetes diagnosis and patient monitoring. *NMI participations: 15*	a) 14 pm +9 pm for visiting scientists b) 80 k€ c) 15 k€
		O3.3: Coordination of CCQM-K155.d Primary peptide calibrator (5 kDa to 10 kDa) large organic molecule primary calibrator comparison**,** based on mass-balance and protein impurity corrected amino acid analysis characterization performed at the BIPM, providing a core comparison of capabilities for value assignment of primary reference material peptides with molecular weights greater than 5 kDa, cross-links and post-translational modifications for NMIs, and underpinning reference measurements systems for protein diagnostics. *NMI participations: 15*	a) 24 pm + 24 pm for visiting scientists b) 80 k€ c) 0 k€

Laboratory support for capacity building and knowledge transfer activities

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
7.	Chem-CBKT	Planning, coordination and delivery of the capacity building and knowledge transfer activities in the field of chemical metrology *(estimates are based on delivery of the CBKT topics presented on page 38, sponsorship will be required for delivery).*	a) 90 pm + 18 pm for visiting scientists b) 175 k€ c) 0 k€

IONIZING RADIATION METROLOGY

Activities in the field of ionizing radiation metrology

The external drivers for ionizing radiation metrology continue to evolve and expand. Nuclear medicine is expanding rapidly, driven by the need for early diagnosis and the demand for better cancer therapies; the world-wide market for nuclear medicine is predicted to grow from 9 billion USD in 2020 to 13 billion USD in 2024. The first-generation nuclear power reactors are being decommissioned (166 power reactors have already shut down and a further 183 reactors are scheduled for decommissioning in the 2020s), leading to increased demand for radionuclide metrology to ensure the safe disposal of the wastes arising. Perhaps the most demanding field (in terms of measurement accuracy) is the new science of nuclear forensics - the examination of radioactive material in the context of nuclear security.

The rising incidence of cancer (the World Health Organization estimates that the number of new cases of cancer per year will increase by 70 % over the next 20 years) is also driving expansion in the use of external beam radiotherapy and brachytherapy. The Director General of the IAEA has stated that there is a shortfall of 5000 radiotherapy machines in the developing world. The IAEA also has noted that developments in imaging technology are fundamentally changing radiation therapy. Proton therapy is also predicted to expand, with the global market reaching 3 billion USD by 2025.

These societal challenges are placing increasing demands on the ionizing radiation metrology community for accurate primary standards and for their dissemination to hospitals, the nuclear industry and security services. The demands are international, with clinical trials of new radiopharmaceuticals being carried out in several countries, and the safe disposal of radioactive waste being of global concern (radioactive waste knows no borders). The need to demonstrate equivalence of primary standards has never been more pressing but NMIs/DIs that volunteer to pilot comparison exercises face a unique problem: the regulatory, logistical and practical burden of shipping hazardous materials or delicate primary standards instruments.

The vision of the Ionizing Radiation Department is to reduce the burden of piloting comparisons, to build on the successful and established traceability schemes, to be the focal point to reduce the need for large scale comparison exercises and to work closely with strategic partners to increase the geographical reach of the work. The focus for this work programme is therefore moving to the next generation of techniques for comparing standards and realizing primary standards, working with stakeholders to optimize use of expensive facilities, adopting new technology to future-proof the methods used by the department and providing an efficient service for NMIs and DIs.

Strategy for ionizing radiation metrology	
– To rationalize the provision of the international measurement system, taking into account options to use external facilities.	Following consultation with the NMIs, DIs and the IAEA, develop a new model for the provision of comparison and calibration services for the quantities identified as bringing the most significant benefits from sharing resources. Ensure regulatory compliance when using BIPM or other facilities.
– To demonstrate the equivalence of national standards for radiation dosimetry of x-rays, gamma-rays and high-energy photons in support of radiotherapy, medical imaging and radioprotection.	Maintain and improve the BIPM standards for x-ray and photon dosimetry, including use of the DOSEO facility. Following consultation with the NMIs and DIs, develop a standard to establish the KCRV for a priority field (for example, brachytherapy, electron beam dosimetry, proton therapy).
– To demonstrate the equivalence of national standards of radioactivity, in support of nuclear medicine, the nuclear industry, nuclear physics, environmental protection, radioprotection and nuclear forensics.	Maintain and improve the BIPM comparators for photon emitters (SIR and SIRTI) and beta-emitters (ESIR). Develop the next generation SIR, using new technologies to reduce the need for sealed sources as reference radiations and minimizing quantities of radioactivity held. Following consultation with the NMIs and DIs, develop a method to enable comparisons of standards needed for nuclear decommissioning.

N	**Project Code**	**Deliverables and Activities**	**Resources in:** **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
Radiation Dosimetry			
1.	IR-D1	**International reference system for x-ray dosimetry** Underpinning the international equivalence of national standards for radiotherapy, diagnostic x-rays, mammography and radiation protection, through the provision of comparisons and calibrations. *NMI Participations: 36*	
		D1.1: Bilateral comparisons (BIPM.RI(I)-K2, -K3, -K7) using high-stability (0.02 %) reference x-ray beams and high accuracy and stability primary standards (0.2 % for air kerma). *NMI participation: 16* **D1.2:** Characterization and calibration of national standards, on request. *Calibration for: 20 NMIs*	a) 42 pm b) 22 k€ c) 90 k€

		D1.3: Quality assurance of the BIPM primary standards for air kerma and absorbed dose to water, to confirm the long-term stability. **D1.4:** Quality assurance and continual improvement of the BIPM international reference x-ray beam facilities.	
2.	IR-D2	**International reference system for gamma-ray dosimetry** Underpinning the international equivalence of national standards for radiotherapy and radio-sterilization, through the provision of comparisons and calibrations. *NMI Participations: 37*	
		D2.1: Bilateral comparisons (BIPM.RI(I)-K1, -K4, -K5) using the BIPM ^{60}Co reference beam facility and high accuracy and stability primary standards (0.4 % for absorbed dose and 0.2 % for air kerma). *NMI participation: 12* **D2.2:** Calibration and characterization of national standards, on request. *Calibration for: 25 NMIs* **D2.3:** Quality assurance of the BIPM primary standards for air kerma and absorbed dose to water, to confirm the long-term stability. **D2.4:** Quality assurance and continual improvement of the BIPM international reference gamma-ray beam facility.	a) 45 pm b) 30 k€ c) 20 k€
3.	IR-D3	**International reference system for high energy photons** Underpinning the international equivalence of national standards for high energy photons to meet the expanding need from the use of clinical linear accelerators for radiotherapy, through the provision of comparisons and calibrations. *NMI Participations: 26*	
		D3.1: Bilateral comparisons (BIPM.RI(I)-K6) using the BIPM off-site facility at DOSEO, with the BIPM absorbed dose standard and high-stability beam monitoring system. *NMI participation: 14* **D3.2:** Characterization and calibration of national standards, on request. *Calibration for: 12 NMIs* **D3.3:** Quality assurance of the BIPM absorbed dose standard (graphite calorimeter and transfer instruments) to confirm their long-term stability. **D3.4:** Quality assurance and continual improvement of the measurement systems used at the DOSEO/BIPM high-energy photon beam facility.	a) 54 pm +6 pm for visiting scientists b) 500 k€ c) 20 k€
4.	IR-D4	**Towards a new reference standard for state-of-the-art radiotherapy modalities** Preparations for the development of a new primary standard to meet future requirements for radiation dosimetry (for example, hadron beam dosimetry at an out-sourced facility, electron calorimetry, x-ray brachytherapy).	
		D4.1: Report on an investigation into future requirements for radiation dosimetry, identifying the priorities for the long term, taking into account feedback from NMIs and potential growth areas. **D4.2:** Specification, detailed design and modelling of a new reference standard for the priority identified.	a) 10 pm +12 pm for visiting scientists b) 5 k€ c) 0 k€
5.	IR-D5	**International reference system for radiation protection dosimetry (^{137}Cs)** Underpinning the international equivalence of national standards for radiation protection dosimetry using an off-site ^{137}Cs facility, through the provision of comparisons and calibrations. *NMI Participations: 36*	

		D5.1: Bilateral comparisons (BIPM.RI(I)-K5) using a BIPM-characterized and operated facility (established in the previous programme) and high accuracy and stability primary standards (0.3 %). *NMI participation: 16* **D5.2:** Characterization and calibration of national standards, on request. *Calibration for: 20 NMIs* **D5.3:** Quality assurance and continual improvement of the BIPM primary standards, and the associated ancillary equipment.	a) 12 pm b) 5 k€ c) 50 k€
Radionuclide Metrology			
6.	IR-R1	**International reference system for gamma-emitting radionuclides (SIR / SIRTI)** Provision of on-demand capability for bilateral comparisons of gamma-emitting radionuclides for applications in nuclear medicine, the nuclear industry, nuclear physics, environmental protection, radiation protection and nuclear forensics. *NMI Participations: 33*	
		R1.1: Bilateral comparisons (BIPM.RI(II)-K1) of national standards of long lived gamma emitting radionuclides using the high precision, high stability, SIR ionization chambers (reproducibility better than 0.02 %). *Participating NMIs: 25* **R1.2:** On-site bilateral comparisons (BIPM.RI(II)-K4) of national standards of short lived gamma emitting radionuclides (SIRTI), using the high precision, high stability SIRTI scintillation counter (reproducibility better than 0.05 %). *Participating NMIs: minimum of two per year, six radionuclides per site visit* **R1.3:** Technical support for the SIR and SIRTI comparators (quality control checks and continual improvement including software updates). **R1.4:** Quality assurance and continual improvement of the high resolution gamma spectrometer for impurity checks and applications in health physics. **R1.5:** Tasks to ensure compliance with regulations, including radiation protection monitoring, safety testing of irradiators (for Dosimetry), arranging disposal of radioactive waste, and associated health and safety requirements.	a) 60 pm b) 100 k€ c) 30 k€
7.	IR-R2	**Development of the next generation international reference system (SIR 2.0)** The installation and validation of a new SIR based on state-of-the-art instrumentation for measuring low currents and reducing the dependence on sealed radioactive sources, drawing on the studies completed in the previous programme.	
		R2.1: Installation of a new ionization chamber and current measurement system, data collection and analysis software, using new technology for electrical current measurement and reducing the dependence on sealed radioactive sources as reference points. **R2.2:** Validation of the new system including determining the long term stability and precision of the system and confirmation of the linearity of the response (current versus activity). **R2.3:** Bilateral comparisons of national standards of gamma-emitting radionuclides (in parallel with measurements on the SIR under BIPM.RI(II)-K1, to establish new key comparison reference values in terms of current versus activity).	a) 20 pm +12 pm for visiting scientists b) 5 k€ c) 30 k€

8.	IR-R3	**International comparison systems for alpha- and beta-emitting radionuclides (ESIR)** Provision and extension of the on-demand capability for bilateral comparisons of alpha- and beta-emitting radionuclides for applications in nuclear medicine, environmental protection, radiation protection and nuclear forensics, based on the ESIR established in the previous programme. *NMI Participations: 25*	
		R3.1: Bilateral comparisons (BIPM.RI(II)-Kx) of national standards of long lived pure alpha- and beta-emitting radionuclides, using the new ESIR comparator established in the previous programme with a reproducibility of better than 0.1%. *Participating NMIs: 25* **R3.2:** Technical support and continual improvement of the new ESIR comparator including the development of additional software and hardware (such as extending the capability to cover additional radionuclides and the use of digital pulse processing systems).	a) 70 pm +12 pm for visiting scientists b) 10 k€ c) 15 k€
9.	IR-R4	**Development of a reference system for the nuclear decommissioning and NORM industries** Development of a new comparator for priority measurements of standards for the complex decay chains of naturally-occurring radionuclides or key radionuclides for nuclear decommissioning	
		R4.1: Report on requirements for a new comparator, taking into account use of the MMM. **R4.2:** Specification, design and modelling of new comparator for the priority identified. **R4.3:** Construction and implementation of comparator. **R4.4:** Report on outcomes from validation studies.	a) 22 pm +6 pm for visiting scientists b) 10 k€ c) 30 k€

Laboratory support for capacity building and knowledge transfer activities

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
10.	IR-CBKT	Planning, coordination and delivery of the capacity building and knowledge transfer activities in ionizing radiation *(estimates are based on delivery of the CBKT topics presented on page 38, sponsorship will be required for delivery).*	a) 13 pm b) 0 k€ c) 0 k€

Costs shared across all laboratories

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
Workshop and Scientific gas supplies			
1.	**Lab-1**	**Lab-1.1:** Workshop: raw materials, consumables, special subcomponents and other operating costs	Operating costs: 180 k€
		Lab-1.2: Scientific gas and cryogen supplies	Operating costs: 52 k€

INTERNATIONAL LIAISON

Liaison work - to foster cooperation with international organizations and to promote the world-wide comparability of measurement. The BIPM liaison activities are broad, encompassing more than 30 international organizations. In a fast changing world, the BIPM must remain agile in terms of its activities to be able to take advantage of new opportunities as liaison partners respond to their changing needs. Consequently, the BIPM maintains and updates individual strategic aims for its interactions with liaison organisations. Greater focus is expected to be given to OECD, WTO, World Bank, UNIDO as well as the Quality Infrastructure partners, and very specifically, the OIML.

Strategy for international liaison work

- To increase participation by International Organizations (IOs) in technical coordination activities at the BIPM, including CCs and their working groups, and to achieve greater recognition by IOs of the value of SI traceable measurements.
- To promote the importance of the global comparability of measurements with international organizations of strategic importance to the BIPM mission (including the OIML, ILAC, ISO, WTO-TBT) and to work with them and others through Joint Committees.
- To increase opportunities for Member States with emerging measurement systems, encouraging "prospective Member States" to make the transition from Associate to Member State.

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
Liaison with Member States, Associates, the CIPM and RMOs			
1.	ILC-L1	1) Support to Member States and Associates, CIPM and the BIPM Director; 2) Promotion of the Metre Convention and support to potential Member States and Associates; 3) Support for and representation to RMOs (AFRIMETS, APMP, COOMET, EURAMET, SIM and GULFMET).	a) 36 pm b) 0 k€ c) 0 k€
Liaison with strategic partners			
2.	ILC-L2	Institutional liaison with International/intergovernmental/Quality Infrastructure: – OIML, UNIDO, ILAC, ISO, OECD, WTO, World Bank; – Institutional liaison with other international organizations as required (BIPM liaises with around 30 international organizations).	a) 36 pm + 18 pm for visiting scientists b) 0 k€ c) 0 k€
3.	PMD-L1	1) Representation of the BIPM in the CODATA Task Group on Fundamental Constants (4 meetings); 2) Representation of the BIPM in the Executive Committee of the CPEM (Conference on Precision Electromagnetic Measurements) (4 meetings).	a) 3 pm b) 0 k€ c) 0 k€

4.	Time-L1	Coordination and promotion of time activities for the advancement in the development of time scales and their applications. 1) Dissemination of TAI/UTC/TT(BIPM) 2) GNSS time transfer 3) GNSS coordination 4) GNSS system time definition and realization 5) GNSS dissemination of UTC 6) Need in Time and frequency transfer methods.	a) 14 pm b) 0 k€ c) 0 k€
5.	Time-L2	Coordination and promotion of time activities for scientific applications. TF metrological support to: 1) Space-time references, IERS Conventions 2) Timescales for astronomy/TT(BIPM)/Pulsar timescales 3) Geodetic and geophysical applications of TF metrology e.g. geodetic references, Earth gravity potential.	a) 7 pm b) 0 k€ c) 0 k€
6.	Chem-L1	1) Liaison activities with: IUPAC; ISO TC 212, IFCC, WMO, WHO, WADA, Codex, ISO TC 146.	a) 20 pm b) 0 k€ c) 0 k€
		2) Liaisons activities related to revision of Ozone standard reference method and global implementation.	a) 6 pm b) 0 k€ c) 0 k€
7.	IR-L1	1) International Commission on Radiation Units (ICRU) (Commissioner and sponsor of Report Committees) 2) International Atomic Energy Agency (IAEA) (SSDL Scientific Committee) 3) International Committee for Radionuclide Metrology (ICRM) 4) ISO (SC2 and working group meetings)	a) 12 pm b) 0 k€ c) 0 k€

Department support for capacity building and knowledge transfer activities

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
8.	ILC-CBKT	1) Delivery of, and lecturing on, sponsor supported topic based CBKT activities on courses (topics of interest chosen with the NMI/DI community and sponsors): – at the BIPM and – within the RMO Framework (i.e. at courses arranged in the regions by the RMOs), and aligned with NMI laboratory placements	a) 8 pm b) 0 k€ c) 0 k€

COORDINATION

Coordination - to be the coordinator of the world-wide measurement system ensuring it gives comparable, fit-for-purpose and internationally-accepted measurement results.

Strategy for coordination

- To develop a role for the BIPM as the gateway to data and data-related services held by the international metrology community.
- To improve and promote the mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by NMIs (the CIPM MRA), particularly by operation of the KCDB and supporting the JCRB and expanding the opportunities presented by the International Metrology Resource Registry (IMRR), which is hosted by the BIPM.
- To support *in vitro* diagnostic measurements world-wide by providing a database of available higher-order reference materials, methods and services that can be used to establish metrological traceability.
- To liaise with the NMIs of Member States and the Regional Metrology Organizations (RMOs).

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
CIPM MRA			
1.	ILC-C1	1) Coordination of the CIPM MRA mechanisms through the JCRB 2) Provision of the KCDB database (Including Exec Sec of the JCRB). 3) Advising the CIPM MRA participants and mining the data for stakeholders	a) 52 pm + 44 pm secondment b) 78 k€ [1] c) 48 k€
JCGM			
2.	ILC-C2	Provision of JCGM Executive Secretary and rapporteur for WG2 (JCGM-one annual meeting, JCGM WG2 - two annual meetings), general support to JCGM, representation in JCGM WG2.	a) 6 pm b) 0 k€ c) 0 k€
3.	IR-C1	Provision of the Scientific Secretary for JCGM WG1 and support including: *1) Rapporteur* 2) Two annual meetings.	a) 5 pm b) 0 k€ c) 0 k€
JCTLM			
4.	Chem-C3	Support for: 1) JCTLM Executive and WGs (eight meetings) 2) JCTLM Database entry/nomination review process 3) Maintenance of: JCTLM Database	a) 32 pm b) 40 k€ c) 2 k€

[1] *ILC-C1 - the KCDB operating costs accounted for in the 'Site Expenses' under 'IT platform' in the BIPM accounts.*

NMI Directors and RMO Chairs meeting			
5.	ILC-C3	1) To work with the panel of NMI Directors to organize an annual meeting at the BIPM 2) Organization of the CC Presidents meetings 3) Access to and understanding of best practice in the operation of RMOs *a) Development of a global perspective on key issues;* *b) Optimal support for states with emerging metrology systems* *c) Facilitated by the BIPM convening annual meetings of the RMO Chairs*	a) 2 pm b) 0 k€ c) 0 k€
IMRR			
6.	ILC-C4	Support for: 1) Hosting of the database 2) Further development 3) Hosting meetings	a) 4 pm b) 0 k€ c) 0 k€
Support of CCs (including provision of Executive Secretaries)			
7.	PMD-C1	Provision of CCEM (Electricity and Magnetism) Executive Secretary in order to support: 1) Two CCEM meetings 2) Annual working group meetings 3) Pro-active interaction on strategy and communication 4) Coordination of CCEM processes 5) Related liaison with RMO technical committees (4 meetings)	a) 14 pm b) 0 k€ c) 0 k€
8.	PMD-C2	Provision of CCM (Mass and Related Quantities) Executive Secretary in order to support: 1) Two CCM meetings 2) Annual working group meetings 3) Pro-active interaction on strategy and communication 4) Coordination of CCM processes 5) Related liaison with RMO technical committees (4 meetings)	a) 14 pm b) 0 k€ c) 0 k€
9.	PMD-C3	Provision of CCU (Units) Executive Secretary in order to support: 1) Two CCU meetings 2) Pro-active interaction on strategy and communication 3) Coordination of CCU processes	a) 6 pm b) 0 k€ c) 0 k€
10.	Time-C1	Provision of CCTF (Time and Frequency) Executive Secretary in order to support: 1) Organizing the CCTF bi/triennial meetings 2) Providing secretariat of CCTF and WGs 3) Pro-active interaction on strategy and communication 4) Coordinate CC processes including comparison and other MRA reports. 5) Key comparisons in time and frequency 6) Recommendation of standard frequencies as secondary representations of the second	a) 14 pm b) 0 k€ c) 0 k€
11.	Time-C2	Provision of CCL (Length) Executive Secretary in order to support: 1) CCL meetings 2) Participation in WGs 3) Pro-active interaction on strategy and communication 4) Coordination between NMIs for length related activities. Key comparisons in length, support to comparisons of stabilized lasers piloted by NMIs	a) 6 pm b) 0 k€ c) 0 k€

		5) Recommendation of standard frequencies for the practical realization of the metre	
12.	Time-C3	Provision of CCAUV (Acoustics, ultrasound and vibration) Executive Secretary in order to support: 1) Biennial CCAUV meetings and three WG meetings 2) Pro-active interaction on strategy and communication 3) Development of strategic plans 4) Coordinate review of CC and RMO comparison reports before publication 5) Related liaisons with RMOs.	a) 6 pm b) 0 k€ c) 0 k€
13.	Chem-C1	Provision of CCQM (Amount of Substance) Executive Secretary in order to support: 1) CCQM meetings (four plenary meetings) and eleven WG meetings (44 meetings in total) 2) Pro-active interaction on strategy and communication 3) Coordination of review of CC and RMO comparison reports before publication 4) Development and review of CCQM documents and guidelines 5) Organization and coordination of CCQM workshops	a) 14 pm b) 0 k€ c) 0 k€
14.	Chem-C2	Provision of CCPR (Photometry and Radiometry) Executive Secretary in order to support: 1) Two CCPR plenary meetings and associated WG meetings 2) Pro-active interaction on strategy and communication 3) Coordination of review of CC and RMO comparison reports before publication 4) Development and review of CCPR documents and guidelines	a) 6 pm b) 0 k€ c) 0 k€
15.	IR-C2	Provision of CCRI (Ionizing Radiation) Executive Secretary in order to support: 1) Biennial CCRI and sections I, II and III meetings 2) Regular meetings of seven working groups 3) Development of strategic plans 4) Co-ordination engagement with RMOs	a) 14 pm b) 0 k€ c) 0 k€
16.	IR-C3	Provision of CCT (Thermometry) Executive Secretary in order to support: 1) Biennial CCT meetings and twelve WG meetings 2) Pro-active interaction on strategy and communication 3) Coordinate review of CC and RMO comparison reports before publication 4) Related liaisons with RMOs	a) 6 pm b) 0 k€ c) 0 k€

CAPACITY BUILDING AND KNOWLEDGE TRANSFER

The BIPM Capacity Building and Knowledge Transfer Programme (CBKT) aims to increase the effectiveness within the world-wide metrology community and particularly of those Member State and Associates with emerging metrology systems. The CBKT Programme is described in three activities: core funded CBKT is to support effective operation and participation in the CIPM MRA; sponsor supported topic based workshops/courses and laboratory placements; and the knowledge transfer activities from visiting scientists/specialists seconded to the BIPM who contribute to delivery of this work programme.

Strategy for capacity building and knowledge transfer

- To reinforce the international metrology system and to "balance the load" amongst the NMIs and promote efficient operation of the system.
- To aid NMIs from Countries and Economies with Emerging Metrology Systems (CEEMS) to engage appropriately and effectively with the international measurement system.
- To sustain a programme for visiting/seconded scientists to (and from) the BIPM.

- **Core funded CBKT Programme activities**

(These activities are dependent on increase of the BIPM dotation. If this increase is not forthcoming sponsorship will be sought and the activities will be supported on a best effort basis)

The management of the CBKT Programme and those activities that are considered core to the effective implementation and operation of the CIPM MRA are included in the base case funding envelope of this work programme.

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
Planning and coordination of BIPM CBKT Programme activities			
1.	ILC-CBKT1	1) Planning, coordination and operation of core CBKT activities supporting the CIPM MRA and sponsor supported topic based CBKT activities, including scheduling, course design, call and selection processes (liaising with RMOs on prioritization of candidates), identification of speakers, funding of participants' costs where appropriate, provision of BIPM lecturers and sourcing of external RMO/NMI lectures together with all associated logistics. 2) Developing and managing of the BIPM RMO framework ensuring coordinated delivery of CBKT activities by BIPM and the RMOs – Liaison with RMOs to ensure coordinated CBKT delivery	a) 24 pm b) 0 k€ c) 0 k€
Delivery of, and lecturing on core BIPM CBKT activities			
2.	ILC-CBKT2	1) Delivery of, and lecturing on, core CBKT activities supporting the CIPM MRA: – Future leaders (aimed at new and potential RMO TC/WG Chairs) – Sound beginning (aimed at new participants in the CIPM MRA) – Orientation for new RMO TC/WG Chairs – Participation in the activities of the Metre Convention (including orientation for new NMI/DI Directors)	a) 12 pm b) 228 k€* c) 0 k€
3.	ILC-CBKT3	Delivery of joint Varenna metrology school for world class young scientists/metrologists - with the Italian Physical Society.	a) 2 pm + 2 pm secondment b) 60 k€ c) 0 k€
***Note*:** **This activity is dependent on increase of the BIPM dotation, as requested in the Convocation. If this increase is not forthcoming sponsorship will be sought and the activity will be supported on a best effort basis.*			

Summary of the core funded CBKT Programme activities

We estimate that the opportunities for NMI/DI staff to benefit from CBKT workshops and courses delivered at the BIPM: (These CBKT activities are funded through this Work Programme)

CBKT activities	**CBKT beneficiaries** *(Number of recipients)*	
	Delivered at the BIPM	*Delivered in the regions as part of the integrated framework with RMOs/NMIs*
Core funded CBKT activities	60	360

• Sponsor supported CBKT Programme activities

Wider topic-based BIPM CBKT activities, including workshops, courses and laboratory placements will depend on securing external sponsorship, expanding the practice that has been successfully implemented since early 2016. The resources necessary for the BIPM to engage with and manage sponsor-supported CBKT opportunities are also included in the work programme costings.

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
CBKT BIPM Laboratory based placements and workshops			
Activities are identified by stakeholders advancing the objectives of the BIPM and wider metrology community. Provisionally the following activates are identified as the priority topics to be addressed during the programme period: • **Metrology for Clean Air** *(laboratory placements)* • **Metrology for Safe Food and Feed** *(laboratory placements)* • **Metrology for Accurate Patient Care** *(laboratory placements)* • **Workshop/training on Realization and dissemination of the kilogram** • **Workshop on 'Use of quantum electrical standards to realize the electrical units in the revised SI'** • **Workshops and capacity building activities in Time Metrology, including training on UTC simulator** • **Workshops and capacity building activities in Ionizing Radiation**			

Summary of projected sponsor supported CBKT Programme activities

We estimate that the opportunities for NMI/DI staff to benefit from CBKT activities in the BIPM laboratories are as follows: (The success of these projects depends on securing sponsorship)

BIPM Department	Seconded staff – CBKT beneficiaries		
	Typical length of placement *(months)*	Number of recipients	Total *(person months)*
Physical Metrology	-	80	-
Time	-	20	-
Chemistry	5	30	150
Ionizing Radiation	2	9	18
Total	-	**139**	**168**

Notes:

For laboratory placements in the Chemistry and Ionization Radiation Departments the typical length of placements and total person months are shown in the table above, whilst for laboratory workshops in the Physical Metrology and Time Departments only the numbers of recipients are shown.

To ensure best use of opportunities arising and optimal impact, a degree of flexibility is necessary for sponsor based CBKT activities.

- **Knowledge transfer activities from visiting scientists/specialists seconded to the BIPM**

As indicated in the laboratory work programme of the BIPM, a significant number of projects depend on seconded staff for their success. Visiting scientists/specialists seconded to the BIPM contribute to the delivery of the programme projects; benefit from the work at the BIPM laboratories and also help to knowledge transfer to the CBKT beneficiaries.

The total visiting scientists/specialists required to contribute to delivery of the Work Programme is:

BIPM Department	Staff seconded from NMIs/DIs for programme delivery *(person months)*
Physical Metrology	44
Time	108
Chemistry	174
Ionizing Radiation	48
International Liaison and Communication	88
Total	**462**

Notes:

The estimated involvement of seconded staff is more than twice that projected for the 2016-2019 BIPM Work Programme.

To ensure best use of opportunities arising and optimal impact a degree of flexibility is necessary for visiting scientist placements.

COMMUNICATION AND PROMOTION

Strategy for communication and promotion

- To communicate effectively (with Member States, potential new Member States and other key stakeholders) about the Metre Convention, the SI and its revision.
- To inform the science community, the wider scientific public and decision makers on matters related to metrology and its benefits through publications and meetings.
- To aim for the BIPM website to be the portal of choice for all stakeholders seeking information on world-wide metrology.

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
Reporting, Publications and the BIPM website			
1.	ILC- CP1	1. Provision of BIPM internet. 2. Website update - to adapt effectively to the rapidly changing world of electronic media to ensure that the website continues to deliver services effectively and portrays an up-to-date image of the BIPM.	a) 54 pm b) 212 k€[2] c) 48 k€
2.	ILC-CP2	Generating BIPM reports including drafting/minuting, editing, translation into French, typesetting and publication of CIPM and BIPM reports, publications and posters.	a) 52 pm b) 70 k€[3] c) 0 k€
3.	ILC-CP3	Editing and publication of *Metrologia* 1. To ensure the success of *Metrologia* as the key scientific publication for high level metrology with an increase in impact factor. 2. To increase the number of annual issues of *Metrologia* from 6 to 10 3. Maintain a viable journal taking account of the trend towards "open access" for journals.	a) 32 pm b) 40 k€[4] c) 0 k€
4.	ILC- CP4	Journal subscriptions (on-line or hard copy) buy-per-view scientific articles and books for BIPM staff)	a) 0 pm b) 138 k€[5] c) 14 k€

[2] *ILC-CP1 - Website operating costs accounted for in 'Site Expenses' under 'IT platform' in the BIPM accounts.*
[3] *ILC-CP2 - Publications operating costs accounted for in 'Coordination and Communication' under 'Publications' in the BIPM accounts.*
[4] *ILC-CP3 - Metrologia annual operating costs accounted for in 'Site Expenses' in the BIPM accounts.*
[5] *ILC-CP4 - Journal subscriptions and other library costs accounted for as operating costs under Site expenses in the BIPM accounts.*

World Metrology Day			
5.	ILC- CP5	To build on the success of World Metrology Day, doubling participation through all media by 2022 (Project run jointly with OIML) with participation by at least 50 states. Provision of: 1. Website content, 2. Poster (in consultation RMOs and with selected NMI), 3. Directors messages, 4. Events listings for all participating countries 5. Press release 6. Participation in at least 4 national events in countries with emerging metrology systems	a) 2 pm b) 0 k€ c) 0 k€
Impact study			
6.	ILC- CP6	Authoritative independent study highlighting the impact arising from metrology in the Quality Infrastructure	a) 0 pm + 12 pm secondment b) 60 k€
Mining the captured NMI knowledge and the quality assured KCDB data			
7.	ILC- CP7	A strategically plan to enhance the visibility and availability of metrological best practice, for example through the availability of Best Practice Guides, with at least 3 examples.	a) 2 pm + 12 pm secondment b) 0 k€ c) 0 k€
Workshops on key topics			
8.	ILC- CP8	To identify (with the CIPM and NMIs) topics of importance to the metrology community (such as 'big data') to be addressed at BIPM Workshops.	a) 2 pm b) 0 k€ c) 0 k€

CORPORATE SUPPORT

Strategy for corporate support services

- To provide a highest level of corporate support and governance.
- To follow "best practice" in staff training and development.
- To increase the skill mix and experience available at the BIPM.
- To develop and implement best practice in the support of the Consultative Committees and Joint Committees through the provision of Executive Secretaries.

Director

The BIPM Director's time together with Director's PA (2 full time equivalent).

Directors Office: Financial, Legal and HR

The Finance team (3 full time equivalent) addresses the BIPM's annual accounts and financial statements, medium- and long-term plans, annual budget and a range of financial management functions to meet corporate needs as well as those of the scientific departments and includes cash management, purchasing and pay role.

The BIPM Legal Office (1 full time equivalent) addresses all legal issues including those related to the Regulations, Rules and Instructions applicable to staff members and the Regulations and Rules of the BIPM Pension and Provident Fund, agreements such as Memoranda of Understanding and complex purchase contracts and agreements, international institutional law and international law.

The Human Resources Office (2 full time equivalent) carries out all of the processes needed to provide the staff benefits specified in the BIPM Regulations, Rules and Instructions. They manage the staff reporting processes, and provide all the liaison necessary with National French authorities relating to staff employment. They also support the recruitment and installation of all staff and secondees.

TECHNICAL SERVICES

Strategy for technical services

- To develop the laboratory environment to sustain the BIPM Work Programme.
- To ensure that the BIPM meeting facilities which support the CCs and WGs continue to be "best in class".
- To develop the BIPM IT infrastructure to support its mission.
- To maintain the heritage buildings and estate at a level consistent with the mission of the BIPM.

Meetings, Reception and Housekeeping

The Meetings Office (2 full time equivalent) supports the Director and, among other responsibilities, the growing workload related to the administrative coordination of the Consultative Committees. This includes issuing invitations and support related to meetings organized by the BIPM, supporting the scientific Executive Secretaries as well as visiting delegates. Housekeeping services (3 full time equivalent) ensure the BIPM is cleaned, reception manned, and meeting services, including meals, provided. Reception services are contracted.

Quality, Health and Safety

The quality and occupational health and safety system is administrated by a Quality, Health and Safety Manager (1 full time equivalent).

The BIPM maintains a self-declared quality system based on ISO/IEC 17025:2017 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories" for its calibrations and measurements, and extends the principles of the standard to all laboratory comparison activities. The relevant parts of ISO 17034:2016 "General requirements for the competence of reference materials producers" are implemented within the Chemistry Department. The quality system is routinely audited both internally and also externally by experts from leading NMIs and the system is periodically presented to a group of regional quality experts from the Regional Metrology Organization (on a rotating basis).

The BIPM maintains an Occupational Health and Safety management system that is consistent with BS OHSAS 18001:2007 – "Occupational health and safety management systems – Requirements". Occupational health and safety is audited internally and subject to a variety of external technical controls (following French law) related to key risk aspects such as electrical, pressure, ionizing radiation, lightning protection and fire hazards.

Grounds and Security

The BIPM is located in the *Domaine national de Saint-Cloud*, a historic site granted by the French Government. The Pavillon de Breteuil and the six other buildings erected since the creation of the BIPM and the grounds must be maintained to a high standard. The maintenance of buildings, ranging in date from the seventeenth century (the Pavillon de Breteuil and the Petit Pavillon) to the present day, requires a wide range of skills and techniques (2 full time equivalent). The BIPM operates a "site guardian" service (1 full time equivalent) supplemented by external contractors.

Workshop and Site Maintenance

A mechanical workshop (3 full time equivalent) is essential for the efficient operation of a scientific laboratory such as the BIPM. The workshop not only designs and manufactures specific components for research instrumentation at the BIPM, such as the Kibble balance and the calculable capacitor, but also provides the special parts needed to adapt NMI standards to the BIPM reference facilities. It also repairs damaged equipment on the spot allowing comparisons and calibrations to run without major delays. The operation of such a mechanical workshop is an indispensable prerequisite for the efficient running of the BIPM. The mechanical workshop also produces platinum/iridium copies of the kilogram prototype against reimbursement of cost. This is a unique service that is only available to Member States. In addition workshop staff assist with general building maintenance tasks (3 full time equivalent).

IT Services

Like any other scientific institution, the BIPM relies heavily on a fully operational IT support service (2 full time equivalent). In particular the KCDB and JCTLM databases need to be accessible to the outside world on a permanent basis. The need to establish International Atomic Time (TAI) and Coordinated Universal Time (UTC) is dependent on the reliability and security of the BIPM's IT services. In addition to these tasks the typical spectrum of hardware and software for scientific, financial and administrative computing, and computerized instrument operation as well as electronic communication needs to be covered by the IT services.

ACRONYMS USED IN THE PRESENT VOLUME

AA	Amino acid
AC	Alternating current
AFRIMETS	Inter-Africa Metrology System
APMP	Asia/Pacific Metrology Programme
BIML	International Bureau of Legal Metrology
BIPM	International Bureau of Weights and Measures
CBKT	Capacity Building and Knowledge Transfer
CC	Consultative Committee of the CIPM
CCAUV	Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration
CCEM	Consultative Committee for Electricity and Magnetism
CCL	Consultative Committee for Length
CCM	Consultative Committee for Mass and Related Quantities
CCPR	Consultative Committee for Photometry and Radiometry
CCQM	Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology
CCRI	Consultative Committee for Ionizing Radiation
CCT	Consultative Committee for Thermometry
CCTF	Consultative Committee for Time and Frequency
CCU	Consultative Committee for Units
CEEMS	Countries and Economies with Emerging Metrology Systems
CGPM	General Conference on Weights and Measures
CIPM	International Committee for Weights and Measures
CIPM MRA	CIPM Mutual Recognition Arrangement
CMC	Calibration and Measurement Capability
Codex Alimentarius	Commission under the Joint FAO/WHO Food Standards Programme
COOMET	Euro-Asian Cooperation of National Metrology Institutions
DI	Designated Institute
DOSEO	DOSEO technology platform CEA SACLAY
DON	Deoxynivalenol
ERMS	BIPM Ensemble of Reference Mass Standards
ESIR	Extended SIR
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
FTIR	Fourier-transform infrared
GNSS	Global Navigation Satellite System
GULFMET	Gulf Association for Metrology
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IAEA	International Atomic Energy Agency
IAU	International Astronomical Union
ICAG	International Comparison of Absolute Gravimeters
ICG	International Committee on Global Navigation Satellite Systems
ICRM	International Committee for Radionuclide Metrology
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IDMS	Isotope dilution mass spectrometry
IEC	International Electrotechnical Commission

IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IFCC	International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine
IGS	International GPS Service
ILAC	International laboratory Accreditation Cooperation
IMRR	International Metrology Resource Registry
INetQI	International Network for Quality Infrastructure
IPK	International Prototype of the Kilogram
ISO	International Organization for Standardization
ITS-90	International Temperature Scale of 1990
ITU	International Telecommunication Union
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IVD	*in vitro* diagnostics
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
JCRB	Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM
JCTLM	Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine
JVS	Josephson voltage standards
KCDB	BIPM key comparison database
KCRV	Key comparison reference value
LSC	Liquid scintillation counting
MMM	Measurements Method Matrix
NIST	National Institute of Standards and Technology (United States of America)
NMI	National Metrology Institute
NMIJ	National Metrology Institute of Japan (Japan)
NORM	Naturally Occurring Radioactive Materials
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OIML	International Organization for Legal Metrology
OTA	Ochratoxin A
PAT	Patulin
PICAA	Peptide Impurity Corrected Amino Acid Analysis
QHR	quantum Hall resistance
qNMR	quantitative Nuclear Magnetic Resonance
RMO	Regional Metrology Organization
SI	International System of Units
SIM	Inter-American Metrology System
SIR	International Reference System for gamma-ray emitting radionuclides
SIRTI	Transfer Instrument of the SIR
TAI	International Atomic Time
TT	Terrestrial Time
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization
URSI	International Union of Radio Science
UTC	Coordinated Universal Time
UTCr	rapid UTC
VIM	International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology

WADA	World Anti-Doping Agency
WHO	World Health Organization
WMO	World Meteorological Organization
WTO	World Trade Organization

Appendix 1

RATIONALE FOR THE BIPM LABORATORY PROGRAMME

Why does the BIPM have technical capability/laboratories in one area and not another?

During the strategic planning exercise that underpinned development of the BIPM work programme it was recognized that it would be useful to better articulate the rationale for the BIPM to maintain laboratory capabilities in certain areas (Mass, Electricity, Time, Ionizing Radiation and Chemistry) but not others (Acoustics, Length, Photometry and Radiometry, Thermometry). The Vision, Role and Objectives of the BIPM provide the underpinning decision basis.

Acoustics, Ultrasound and Vibration	Electricity and Magnetism	Length	Mass and related quantities
Application of metrology - in new areas well suited to being addressed in the research programmes of the NMIs.	Fundamental area of modern physical metrology, core to many other fields of metrology (e.g. all other measuring systems produce/use electrical signals, Kibble balances are based on electrical quantum standards, highest accuracy thermometry depends on resistance measurements). Comparisons of quantum devices require specialized and dedicated travelling equipment e.g. travelling Josephson and quantum Hall standards; comparing quantum standards requires special expertise. Experience with transportable standards does not exist at the NMIs. Realization of capacitance is difficult. Calculable capacitor supports new SI though R_K determination subsequently strengthens on-going comparison and calibrations for capacitance.	Whilst dimensional metrology is core to many fields, the measurement methods are mature. Traceability to SI realization generates negligible uncertainties in most applications. Realizing the metre and piloting comparisons in the field of dimensional metrology are activities that are relatively mature, comparability largely demonstrated Comparison of frequency combs may, however, be needed in the future to ensure traceability to absolute wavelength measurements.	**Mass:** Providing traceability to the international prototype of the kilogram (IPK) requires a central and neutral laboratory for long-term maintenance and global dissemination. *After redefinition:* traceability to the SI unit of mass will be based on multiple primary realizations obtained with complex experimental facilities including the BIPM Kibble balance, which will require comparisons to maintain world-wide mass uniformity. In addition their potential small number requires an international and central programme to guarantee continuous access to primary realizations (via BIPM ensemble of reference mass standards and Kibble balance). **BIPM laboratory programme** ---------- **Related quantities:** Largely applied activities more suited to NMIs.
No BIPM laboratory programme	**BIPM laboratory programme**	**No BIPM laboratory programme**	**No BIPM laboratory programme**

Photometry and Radiometry	Metrology in Chemistry	Ionizing Radiation	Thermometry	Time and Frequency
The field is relatively stable, and the methods mostly mature. Fundamental comparability is achieved at the required levels by NMIs using their cryogenic radiometers. Focus in the field is to make their uncertainty available in a convenient and cost effective way for applications. (Noting recent new lighting sources such as solid state lighting face difficulties in their evaluation).	Relatively new area with a short traceability chain. Accurate chemical measurements critically important particularly for Quality of Life, metrology not mature yet and guidance to NMIs invaluable, especially for countries where capabilities are expanding rapidly. Expertise in chemical measurement is essential for effective collaboration with particularly IFCC, WMO, WHO, Codex Alimentarius, etc. The programme has the strong support of all the major NMIs and many developed and developing countries that already have adequate physical metrology infrastructure are expanding their chemical metrology infrastructure. Specialized expertise in gas and organic purity comparison has driven down uncertainties.	Supports a mature and well-established equivalence and global traceability scheme in a field with high impact on healthcare (radiotherapy, radiodiagnostics and nuclear medicine), environmental protection (radioactivity in the foodchain) the nuclear industry and nuclear forensics. Unique, very high precision, instruments and radiation fields for use in comparisons. A single focus for comparisons and calibrations reduces the need for NMIs / DIs to deal with burdensome regulations when shipping radioactive sources or sensitive instruments for large-scale comparisons. Maintaining a laboratory programme ensures leverage when engaging with stakeholders, particularly IAEA, WHO, ISO, ICRU, ICRM, ICRP and IRPA.	Realizing the kelvin and piloting comparisons are mature (noting however that the forthcoming definition of the kelvin makes part of the realization of the unit less mature). Comparability is largely demonstrated. ITS 90 realized comprehensively	Single, unique and independent reference system world-wide. Wide impact (Satellite navigation, telecoms, national timekeeping, earth and space science, time stamping services). Experienced scientists have substantial leverage when representing the NMIs and supporting the SI when engaging with particularly ITU, IAU, IUGG, ICG, IGS, IERS, GNSS (GPS Civil) and URSI.
No BIPM laboratory programme	**BIPM laboratory programme**	**BIPM laboratory programme**	**No BIPM laboratory programme**	**BIPM coordination programme** (with some laboratory work)

Appendix 2

ACTIVITIES THAT COULD NOT BE SUPPORTED BY THE REQUESTED BUDGET

As a result, capital expenditure for the following two activities that had been included in the earlier consultation versions of the work programme has been cut from their respective projects, the amounts cut are shown below.

N	Project Code	Deliverables and Activities	Resources in: **a)** Person months **b)** Operating costs **c)** Capital investment
International reference standard for resistance			
1.	PMD-E2	**E2.1: On-site comparisons of quantum Hall resistance (QHR) standards** Direct comparison of QHR standards using the BIPM transportable standard, to obtain lowest possible uncertainty *NMI Participations: 6-8*	
		Development of a new transportable QHR standard based on graphene, for simplified operation and cost reduction	a) 0 pm b) 0 k€ c) 175 k€
International reference facility for comparison of standards and scales for radiative forcing gases			
2.	Chem-G3	**Coordination of comparisons to determine and improve the international equivalence of gas standards for radiative forcing gases.**	
		G3.3: Developed facilities and methods for calibration of CH_4 optical isotope ratio measurements and coordination of **CCQM-Pxx (2023) CH_4 isotope ratios**, based on a dedicated optical isotope analyser, to demonstrate the level of comparability of methane isotope ratio standards from NMIs, supporting calibrations for emission source and inventory verification measurement networks. *NMI participations: 12*	a) 0 pm b) 0 k€ c) 90 k€

Liste des sigles utilisés dans le présent volume
List of acronyms used in the present volume

AC	Alternating current
AfCFTA	African Continental Free Trade Area
AFM	Atomic force microscopy
AFRAC	African Accreditation Cooperation/Coopération d'accréditation africaine
AFRIMETS	Système intra-africain de métrologie/Intra-African Metrology System
AFSEC	African Electrotechnical Standardization Commission/Commission électrotechnique africaine de normalisation
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Japon/Japan)
ALMERA	Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity
AMA	Agence mondiale antidopage
ANSI	American National Standards Institute
ANSTO	Australian Nuclear Science and Technology Organisation (Australie/Australia)
APMP	Asia Pacific Metrology Programme
ARISE	Atmospheric Dynamics Research InfraStructure in Europe
ARSO	African Organisation for Standardisation
AU	African Union
AUV	Acoustics, Ultrasound and Vibration
BIML	Bureau international de métrologie légale/International Bureau of Legal Metrology
BIPM	Bureau international des poids et mesures/International Bureau of Weights and Measures
CARICOM	Caribbean Community/Communauté des Caraïbes
CAE	Communauté d'Afrique de l'Est
CBKT	Capacity Building and Knowledge Transfer/Renforcement des capacités et transfert des connaissances
CC	Consultative Committee of the CIPM
CCAUV	Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations/Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration
CCAUV-KCWG	CCAUV Working Group for Key Comparisons

CCAUV-RMOWG	CCAUV Working Group for RMO Coordination
CCAUV-SPWG	CCAUV Working Group on Strategic Planning
CCCR	Commission consultative sur la Caisse de retraite
CCD	Charge-coupled device
CCDM	Comité consultatif pour la définition du mètre/Consultative Committee for the Definition of the Metre
CCDS	Comité consultatif pour la définition de la seconde/Consultative Committee for the Definition of the Second
CCE	Commission des conditions d'emploi
CCEM	Comité consultatif d'électricité et magnétisme/Consultative Committee for Electricity and Magnetism
CCEM-GT-RF	CCEM Working Group on Radiofrequency Quantities
CCEMRI	Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants
CCEM-WGKG	CCEM Working Group on Electrical Methods to Monitor the Stability of the Kilogram
CCEM-WGLF	CCEM Working Group on Low-Frequency Quantities
CCEM-WGRMO	CCEM Working Group on RMO Coordination
CCEM-WGSI	CCEM Working Group on Proposed Modifications to the SI
CCL	Comité consultatif des longueurs/Consultative Committee for Length
CCL WG-MRA	CCL Working Group on the CIPM MRA
CCL-WG-N	CCL Working Group on Dimensional Nanometrology
CCL-WG-S	CCL Working Group on Strategic Planning
CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées/Consultative Committee for Mass and Related Quantities
CCM-TGPfD-kg	CCM Task Group on the Phases for the Dissemination of the kilogram following redefinition
CCM-WGR-kg	CCM Working Group on the Realization of the kilogram
CCM-WGS	CCM Working Group on Strategy and MRA coordination
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie/Consultative Committee for Photometry and Radiometry
CCPR-WG-CMC	CCPR Working Group on CMCs
CCPR-WG-KC	CCPR Working Group on Key Comparisons
CCPR-WG-SP	CCPR Working Group on Strategic Planning
CCQM	Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie/Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology

CCQM-IRWG	CCQM Working Group on Isotope Ratios
CCRI	Comité consultatif des rayonnements ionisants/Consultative Committee for Ionizing Radiation
CCRI KCWG(II)	CCRI-Section II: Key Comparisons Working Group
CCRI-RMOWG	CCRI RMO Working Group on IR CMCs
CCRI-SWG	CCRI ad hoc Working Group on Strategy
CCS	Carbon Capture and Storage
CCT	Comité consultatif de thermométrie/Consultative Committee for Thermometry
CCTF	Comité consultatif du temps et des fréquences/Consultative Committee for Time and Frequency
CCTF WGPSFS	CCTF Working Group on Primary and Secondary Frequency Standards
CCTF-WGSP	CCTF Working Group on Strategic Planning
CCTF-WGTWSTFT	CCTF Working Group on Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer
CCT-TG-CTh-ET	CCT Task Group for Emerging Technologies
CCT-WG-Env	CCT Working Group for Environment
CCU	Comité consultatif des unités/Consultative Committee for Units
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (France)
CEC	Committee for the Election of the CIPM
CEEMS	Countries and Economies with Emerging Metrology Systems/Pays et économies dotés de systèmes de métrologie émergents
CEN	Comité européen de normalisation/European Committee for Standardisation
CENAM	Centro Nacional de Metrología (Mexique/Mexico)
CENAMEP	Centro Nacional de Metrología de Panamá (Panama)
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites/Comité sur les satellites d'observation de la Terre
CERN	European Organization for Nuclear Research/Organisation européenne pour la recherche nucléaire
CGPM	Conférence générale des poids et mesures/General Conference on Weights and Measures
CIE	Commission internationale de l'éclairage/International Commission on Illumination (CIE)
CIEP	Centre international d'études pédagogiques
CIML	Comité international de métrologie légale/International Committee of Legal Metrology
CIMO	WMO Commission for Instruments and Methods of Observation/Commission des instruments et des méthodes d'observation de l'OMM

CIPM	Comité international des poids et mesures/International Committee for Weights and Measures
CIPM MRA	Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM/CIPM Mutual Recognition Arrangement
CITES	Convention on International Trade in Endangered Species/Convention sur le commerce international des espèces en danger
CMC	Calibration and Measurement Capability/Aptitude en matière de mesure et d'étalonnage
CMI	Český metrologický institut (Tchéquie/Czechia)
CMM	Coordinate measuring machine
CMR	Conférence mondiale des radiocommunications
CMS/ITRI	Center for Measurement Standards/Industrial Technology Research Institute (Taipei chinois/Chinese Taipei)
CNES	Centre national d'études spatiales (France)
CNRC	Conseil national de recherches Canada (Canada)
CNRS	Centre national de la recherche scientifique (France)
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
COMESA	Common Market for Eastern and Southern Africa/Marché commun de l'Afrique orientale et australe
COOMET	Coopération métrologique entre les États d'Europe centrale/Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions
CRM	Certified reference material
CTBT	Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty
CTBTO	Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization
DC	Direct current
DCMAS Network	Network on Metrology, Accreditation and Standardization for Developing Countries/Réseau de métrologie, d'accréditation et de normalisation pour les pays en développement
DFM	Danish Fundamental Metrology (Danemark/Denmark)
DI	Designated Institute
EAC	East African Community
EDQM	European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare
EIT-90	Échelle internationale de température de 1990
EM	Electricity and Magnetism
EMRP	European Metrology Research Programme
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (Italie/Italy)

ENFSI	European Network of Forensic Science Institutes
ERCC	External RNA Control Consortium
ESA	European Space Agency/Agence spatiale européenne
ESIR	Extended SIR
EU MiFID II	Markets in Financial Instruments (EU directive)
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
FAA	Federal Aviation Administration
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations/Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FSFG	Food Safety Focus Group (APMP)
GA4GH	Global Alliance for Genomics and Health
GDP	Gross domestic product
GEO	Group on Earth Observations/Groupe sur l'observation de la Terre
GIAB	Genome in a Bottle
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GULFMET	Gulf Association for Metrology
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement/Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
HBA_2	Haemoglobin A2
HIFU	High Intensity Focused Ultrasound
HITU	High Intensity Therapeutic Ultrasound
IAF	International Accreditation Forum
IAAF	International Association of Athletics Federations/Association internationale des fédérations d'athlétisme
IAEA	International Atomic Energy Agency
IAPWS	International Association on Properties of Water and Steam
IAU	International Astronomical Union
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICP-MS	Inductively coupled plasma mass spectrometry
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IDC	International Data Centre/Centre international de données
ID-MS	Isotope dilution mass spectrometry
IEA	International Energy Agency/Agence internationale de l'énergie
IEC	International Electrotechnical Commission

IFCC	International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine
IGAD	Intergovernmental Authority on Development/Autorité intergouvernementale pour le développement
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation
ILOAT	Administrative Tribunal of the International Labour Organization
IMEKO	International Measurement Confederation
IMRR	International Metrology Resource Registry
IMS	International Monitoring System/Système de surveillance international
INetQI	International Network on Quality Infrastructure
ININ	Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (Mexique/Mexico)
INM	Instituto Nacional de Metrología de Colombia (Colombie/Colombia)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Brésil/Brazil)
INTiBS	Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych (Pologne/Poland)
IoT	Internet of Things
IPK	International Prototype of the Kilogram
ipRGC	Intrinsically-photosensitive retinal ganglion cells
IRA	Institut universitaire de radiophysique appliquée (Suisse/Switzerland)
ISO	International Organization for Standardization/Organisation internationale de normalisation
ISO/CASCO	ISO Committee on Conformity Assessment/Comité de l'ISO pour l'évaluation de la conformité
ISO/REMCO	ISO Committee on Reference Materials/Comité de l'ISO pour les matériaux de référence
ISQ	International System of Quantities/Système international de grandeurs
ITS-90	International Temperature Scale of 1990
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics
IVDD	In-Vitro Diagnostic Directive
IVDR	In-Vitro Diagnostic Device Regulation
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology/Comité commun pour les guides en métrologie
JCGM WG1	JCGM Working Group on the Expression of Uncertainty in Measurement
JCGM WG2	JCGM Working Group on the International Vocabulary of Metrology

JCRB	Joint Committee of Regional Metrology Organizations and the BIPM/Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM
JCTLM	Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine/Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire
JIMB	Joint Initiative for Metrology in Biology (États-Unis d'Amérique/US)
JRC	European Commission Research Centre /Centre commun de recherche de la Commission européenne
JVS	Josephson voltage standards
KC	Key comparison
KCDB	BIPM Key comparison database/Base de données du BIPM sur les comparaisons clés
KCRV	Key Comparison Reference Value
KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science (République de Corée/Republic of Korea)
LBG	Liquefied biogas
LED	Light-emitting diode
LHC	Large Hadron Collider/Grand collisionneur de hadrons
LNE	Laboratoire national de métrologie et d'essais (France)
LNHB	Laboratoire national Henri Becquerel (France)
MAA	Mutual Acceptance Arrangement
MEMS	Microelectromechanical System
MeP	mise en pratique
METAS	Institut fédéral de métrologie/Federal Institute of Metrology (Suisse/Switzerland)
MOST	Ministry of Science and Technology (Chine/China)
MoU	Memorandum of Understanding
MRT	Molecular radiotherapy
NCSLI	NCSL (National Conference of Standards Laboratories) International
NIBSC	National Institute for Biological Standards and Control (Royaume-Uni/UK)
NIM	National Institute of Metrology (Chine/China)
NIS	National Institute of Standards (Égypte/Egypt)
NIST	National Institute of Standards and Technology (États-Unis d'Amérique/USA)
NMI	National Metrology Institute
NMIJ	National Metrology Institute of Japan (Japon/Japan)
NMISA	National Metrology Institute of South Africa (Afrique du Sud/South Africa)
NORAD	Norwegian Agency for Development Cooperation (Norvège/Norway)

NPL	National Physical Laboratory (Royaume-Uni/UK)
NQI	National Quality Infrastructure
NRC	National Research Council Canada (Canada)
NSF	National Science Foundation
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OIML	Organisation internationale de métrologie légale/International Organization of Legal Metrology
OIML-CS	OIML Certification System
OMC	Organisation mondiale du commerce
OMM	Organisation météorologique mondiale
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONU	Organisation des Nations Unies
ONUDI	Organisation des Nations Unies pour le développement industriel
ORAN	Organisation africaine de normalisation
OTC	Obstacles techniques au commerce
OTICE	Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires
PAQI	Pan-African Quality Infrastructure/Infrastructure panafricaine de la qualité
PFAB	Pension Fund Advisory Board
PIB	Produit intérieur brut
POLATOM	National Centre for Nuclear Research, Radioisotope Centre (Pologne/Poland)
PPTD	Protein and Peptide Therapeutics and Diagnostics
PT	Proficiency testing
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne/Germany)
PTS	Provisional Technical Secretariat
QHE	quantum Hall effect
QI	Quality Infrastructure
qNMR	quantitative nuclear magnetic resonance
RECs	Regional economic communities
RMO	Regional Metrology Organization
SAMR	State Administration for Market Regulation (Chine/China)
SASO-NMCC	Saudi Standards, Metrology and Quality Organization/National Measurement and Calibration Center (Arabie saoudite/Saudi Arabia)

SCK•CEN	Studiecentrum voor Kernenergie – Centre d'étude de l'énergie nucléaire (Belgique/Belgium)
SCL	Standards and Calibration Laboratory (Hong Kong (Chine/China))
SDGs	United Nations Sustainable Development Goals
SDR	Software-Defined Radio
SI	Système international d'unités/International System of Units
SID	Society for Information Display
SIM	Sistema Interamericano de Metrología/Inter-American Metrology System
SIR	Système international de référence / International Reference System
SIRTI	SIR transportable instrument/instrument de transfert du SIR
SMU	Slovenský Metrologický Ústav (Slovaquie/Slovakia)
SOFAR	Sound Fixing and Ranging
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea/Convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer
SSDL	Secondary Standard Dosimetry Laboratory
SSL	Solid-state lighting
TAI	Temps atomique international/International Atomic Time
TAOIT	Tribunal administratif de l'Organisation internationale du travail
TBTs	Technical barriers to trade
TC	Technical Committee
TEM	Transmission electron microscopy
TICE	Traité d'interdiction complète des essais nucléaires
ToR	Terms of Reference
TT	Temps terrestre/Terrestrial Time
TÜBİTAK UME	TÜBITAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (Turquie/Turkey)
UAI	Union astronomique internationale
UIT	Union internationale des télécommunications
UIT-R	Union internationale des télécommunications, secteur Radiocommunications
UN	United Nation
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization
USP	United States Pharmacopeia
UTC	Coordinated Universal Time/Temps universel coordonné
UTCr	UTC rapide/Rapid UTC
VAACs	Volcanic Ash Advisory Centers
VAMAS	Versailles Project on Advanced Materials and Standards

VIM	Vocabulaire international de métrologie/International Vocabulary of Metrology
VNIIM	D.I. Mendeleyev Institute for Metrology (Fédération de Russie/Russian Federation)
VSMOW2	Vienna Standard Mean Ocean Water 2
WADA	World Anti-Doping Agency
WELMEC	European Cooperation in Legal Metrology/Coopération européenne en métrologie légale
WG	Working Group
WGFS	CCL CCTF Frequency Standards Working Group
WHO	World Health Organization
WMO	World Meteorological Organization
WRC	World Radiocommunication Conference
WTO	World Trade Organization
XCT	X-ray computed tomography
XRCD	X-ray crystal density/Méthode de mesures de masse volumique de cristaux par rayons x
ZLECAf	Zone de libre-échange continentale africaine

Imprimerie Agate
10, rue Claude Dalsème
92190 Meudon
ISBN 978-92-822-2276-8
ISSN 1016-5893
Achevé d’imprimer : décembre 2019
Imprimé en France