

Mesure de l'exposition au BIPM
dans le domaine des rayons X de 100 à 250 kV

M. Boutillon

La Section I (Mesure des rayons X et γ , électrons) du Comité Consultatif pour les Etalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI) a fixé en 1972 [1], pour les comparaisons internationales d'étalons d'exposition, une liste de qualités de rayonnements X qui couvrent le domaine de la radiothérapie.

Le présent rapport indique les caractéristiques des rayonnements du domaine 100-250 kV réalisés au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) conformément aux recommandations de la Section I. Il décrit le dispositif expérimental utilisé pour les mesures d'exposition au BIPM et la chambre d'ionisation étalon. Il donne les valeurs des différents facteurs correctifs applicables à cet étalon en indiquant de quelle manière ils ont été déterminés.

1. Dispositif expérimental

Le tube à rayons X utilisé a une filtration inhérente équivalente à 2,3 mm d'aluminium. La tension maximale applicable est de 300 kV. La tache focale, approximativement rectangulaire, a une dimension d'environ $4 \times 5 \text{ mm}^2$. Le tube fonctionne dans des conditions de très bonne stabilité; selon le procédé décrit dans [2]. Pendant les mesures, la tension et le courant sont enregistrés et régulés. Les variations à court terme de la tension sont de l'ordre de $1 \cdot 10^{-4}$, les variations du courant de l'ordre de quelques 10^{-4} .

Le tube à rayons X est fixé sur le chariot d'un banc de tour. Il peut être placé de manière que l'axe du faisceau coïncide avec l'axe Δ_1 de l'étalon ou avec l'axe Δ_2 d'une chambre de transfert (fig. 1). Le contrôle du centrage du faisceau a été effectué au moyen de photographies de la tache focale, selon une technique décrite en [3]. Le faisceau est délimité par un diaphragme en plomb de 12 mm de diamètre, placé à 15 cm environ de la tache focale. Le faisceau ainsi délimité a un diamètre de 10,5 cm dans le plan de référence pour la mesure de l'exposition (à 120 cm de l'anticathode).

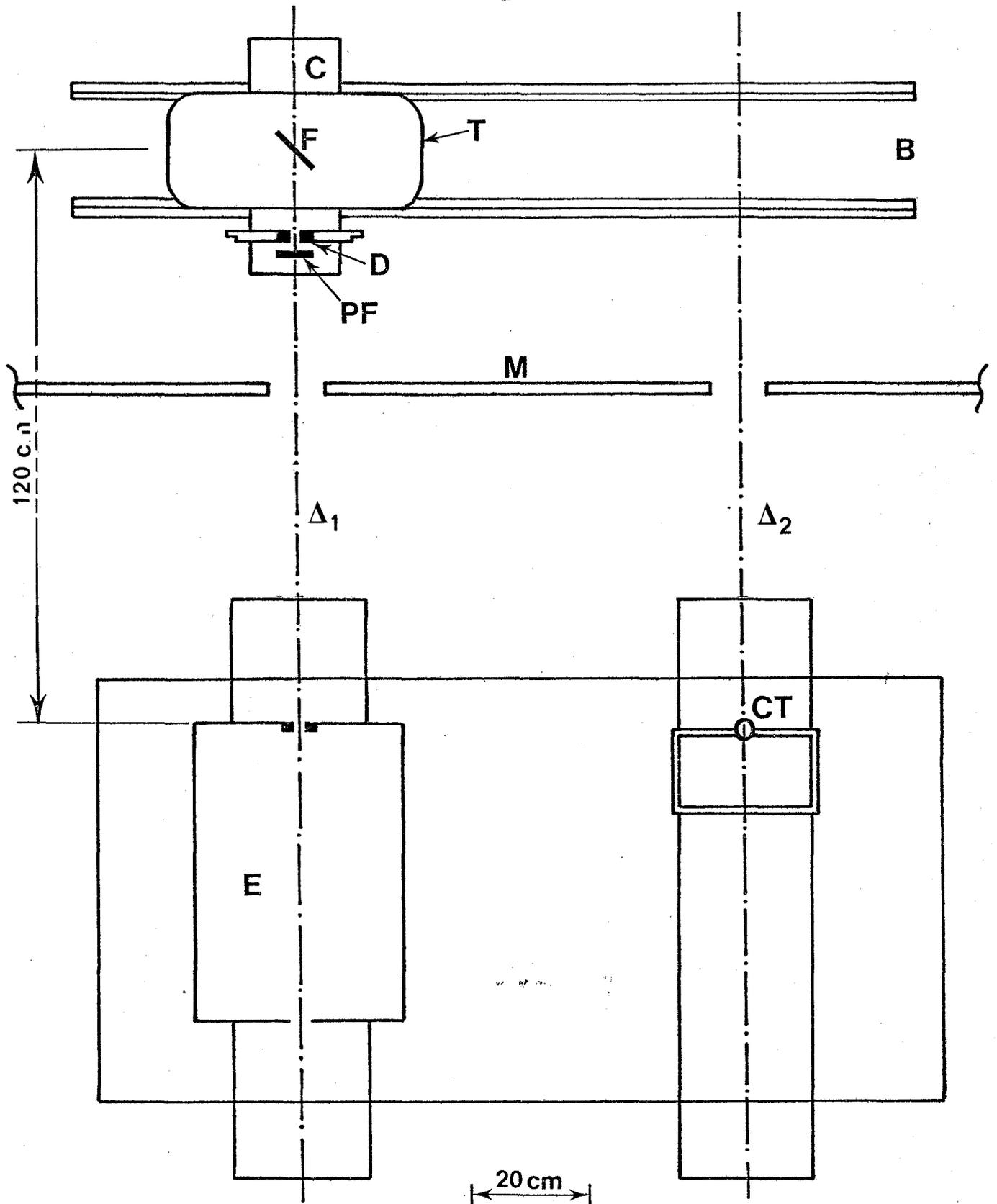


Figure 1 - Vue de dessus schématique de l'installation pour la mesure de l'exposition.
 Par déplacement, au moyen du chariot C, du tube T à rayons X le long du banc de tour B, on peut amener l'axe du faisceau en Δ_1 , axe de la chambre étalon E, ou en Δ_2 , axe de la chambre de transfert CT.
 F : foyer du tube à rayons X; D : diaphragme délimitant le faisceau;
 PF : position du filtre; M : mur de plomb pour éliminer le rayonnement parasite.

Sur l'axe Δ_1 , entre le tube à rayons X et l'étalon, on peut placer un tube contenant de l'air à pression variable (de longueur 27 cm), fermé par deux fenêtres de béryllium, atténuant peu le faisceau, d'épaisseur 0,5 mm et de 3 cm de diamètre. Ce tube est utilisé pour les mesures d'atténuation de l'air. On a expérimentalement vérifié que la présence du tube, sans ses fenêtres, ne modifie pas le courant d'ionisation mesuré avec l'étalon. La traversée du béryllium modifie très peu la qualité du rayonnement aux énergies considérées, en sorte qu'il en résulte une erreur négligeable dans la mesure du coefficient d'atténuation de l'air.

Afin de déterminer expérimentalement les filtrations nécessaires pour obtenir les qualités de rayonnement choisies par la Section I du CCEMRI, une trentaine de filtres de cuivre de grande pureté ont été réalisés et leurs épaisseurs (qui varient entre 0,02 et 4 mm) soigneusement mesurées à l'aide d'un comparateur. Ces filtres sont montés dans des bagues qui se vissent sur une pièce à l'avant du tube à rayons X, la distance entre les filtres et le diaphragme du tube étant d'environ 1 cm.

Lorsque le tube est alimenté par une tension élevée (supérieure à 100 kV), il apparaît un rayonnement diffusé parasite susceptible d'atteindre le volume de mesure de l'étalon et de perturber ainsi les mesures. Afin d'éliminer ce rayonnement, un mur de plomb de 6 mm d'épaisseur, muni d'ouvertures pour laisser passer le faisceau, a été placé entre le tube à rayons X et les chambres d'ionisation. Le tube lui-même a été entouré d'une feuille de plomb de 5 mm d'épaisseur dans sa partie centrale. Avec ces dispositifs protecteurs, la correction due au rayonnement parasite qui peut encore atteindre la chambre d'ionisation est de 0,1% à 250 kV, 0,01% à 180 kV et elle est négligeable pour des tensions inférieures.

2. Chambre d'ionisation étalon

L'étalon du BIPM (fig. 2) pour la mesure de l'exposition dans le domaine des rayons X de 100 à 250 kV est une chambre d'ionisation à plaques parallèles dont les dimensions principales sont les suivantes:

- espacement des plaques : 18 cm

dimensions de la plaque de mesure	
parallèle au faisceau	$6,000\ 4 \pm 0,000\ 5\ \text{cm}$
perpendiculaire au faisceau	20 cm

- diamètre du diaphragme $0,993\ 9\ \text{cm} \pm 0,000\ 1\ \text{cm}$

- volume de mesure $4,655\ \text{cm}^3 \pm 0,001\ \text{cm}^3$

- distance entre le plan de référence
et le centre du volume de mesure 28,15 cm .

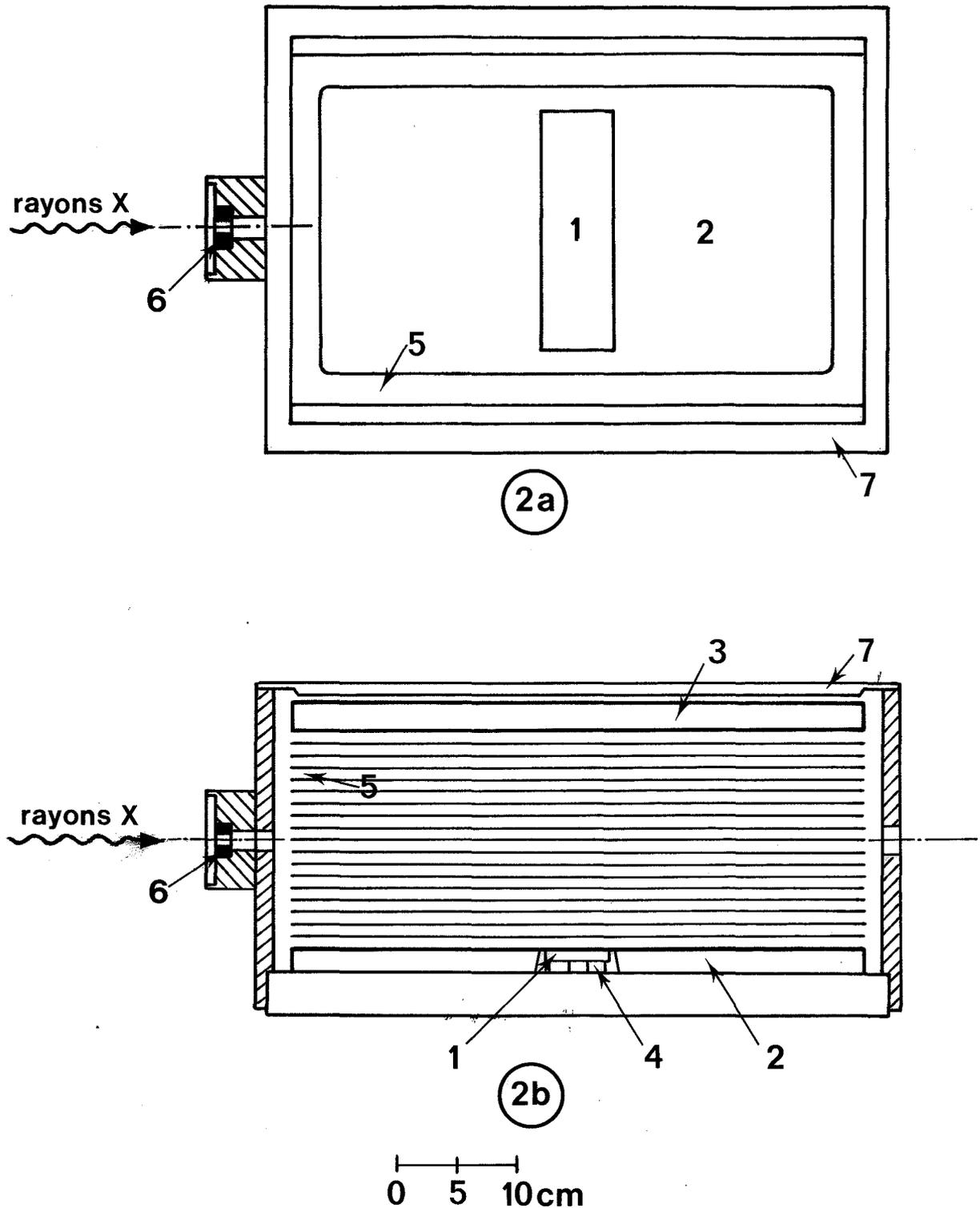


Figure 2 - Vue schématique de l'étalon du BIPM.

2a) coupe horizontale; 2b) coupe verticale;

1: plaque de mesure; 2: plaque de garde; 3: plaque

haute tension; 4: isolants en ambre supportant la plaque

de mesure; 5: système de garde; 6: diaphragme d'entrée

(alliage de tungstène); 7: enceinte extérieure reliée à la masse.

Les plaques ($51 \times 32 \text{ cm}^2$) sont horizontales. La position de la plaque supérieure, sur laquelle on applique la tension collectrice, peut être ajustée au moyen de vis réglables. Le parallélisme entre les plaques, réalisé à l'aide de cales bien calibrées, est de l'ordre de quelques centièmes de millimètre. La plaque inférieure comporte la plaque de mesure reposant sur des cales isolantes en ambre et la plaque de garde dans laquelle la plaque de mesure est insérée. Les écarts de planéité de l'ensemble des deux plaques ne dépassent pas $0,001 \text{ cm}$.

Le système de garde assurant l'uniformité du champ électrique dans la région collectrice est formé de cadres métalliques; il est fixé à la plaque haute tension. Les 17 cadres ont des dimensions extérieures de 47 et 29 cm et des dimensions intérieures de 42 et 24 cm, leur épaisseur est 1 mm, ils sont distants entre eux de 9 mm. La série des 18 résistances connectées aux cadres et constituant le diviseur de potentiel est placée à l'extérieur de la chambre d'ionisation pour éviter un échauffement gênant.

L'étalon est maintenu à une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ par un système de chauffage réglé. Les 9 résistances de chauffage, de surface rectangulaire, sont réparties sur la surface externe de la chambre. Le cycle de chauffage, dont la période est de quelques minutes, introduit dans le volume de mesure une variation de température de $0,05 \text{ K}$ crête à crête. L'évolution de la température moyenne peut atteindre environ $0,02 \text{ K}$ par heure. La température est enregistrée pendant un laps de temps suffisant, avant et après les mesures, à l'aide d'une thermistance que l'on place dans le volume de mesure.

Pour la collection des ions, un potentiel de $4\,000 \text{ V}$ est appliqué à la plaque haute tension. Le champ électrique ainsi créé (222 V cm^{-1}) est suffisant pour assurer une bonne collection des ions. Les mesures sont toujours effectuées avec les deux polarités pour éliminer l'effet de polarité. Celui-ci est d'ailleurs faible, de l'ordre de $0,01\%$.

3. Rayonnements de référence du BIPM

Les caractéristiques de ces rayonnements sont données dans le tableau 1. Les filtrations ont été ajustées pour obtenir des CDA (couches de demi-atténuation) aussi voisines que possible de celles prévues par le CCEMRI. Pour chaque rayonnement, le coefficient d'atténuation de l'air a été mesuré à l'aide du tuyau à pression variable décrit dans le paragraphe 1. Cette technique, déjà utilisée pour les rayons X de faible énergie, avait donné des résultats tout à fait concordants avec la technique plus classique qui consiste à déplacer la chambre d'ionisation alors que le diaphragme de définition reste à distance fixe de la source de rayons X [4].

Tableau I

Rayonnements de référence au BIPM

kV	100	135	180	250
mA	5	5	5	5
filtration additionnelle	1,204 mm Al	0,232 mm Cu	0,485 mm Cu	1,570 mm Cu
1 ^{ère} CDA	4,03 mm Al 0,15 mm Cu	0,49 mm Cu	0,99 mm Cu	2,50 mm Cu
2 ^è CDA	5,80 mm Al	0,77 mm Cu	1,65 mm Cu	3,40 mm Cu
μ , coefficient d'atténuation de l'air (293,15 K, 100 000 Pa)	0,035 5 m ⁻¹	0,023 5 m ⁻¹	0,019 8 m ⁻¹	0,017 2 m ⁻¹
débit d'exposition mR/s	24,5	23,9	34,5	44,6
μ A/kg	6,3	6,2	8,9	11,5

4. Mesure du débit d'exposition

Le débit d'exposition est donné par la relation

$$\dot{X} = \frac{C \Delta V / \Delta t}{\rho V} K_a K_{sc} K_e K_s K_d K_l K_p K_h, \quad (1)$$

où

$C \Delta V$ est la charge collectée pendant le temps Δt dans la masse d'air ρV ,

K_a est le facteur de correction pour l'atténuation de l'air sur la distance qui sépare le plan de référence du centre du volume de mesure,

K_{sc} le facteur de correction pour le rayonnement diffusé par l'air de la chambre,

K_e le facteur de correction pour les pertes d'électrons dans les parois de la chambre,

K_s le facteur de correction pour le manque de saturation,

K_d est le facteur de correction pour la distortion du champ électrique dont les lignes de force définissent le volume collecteur,

K_l le facteur de correction pour la transmission du rayonnement par les bords du diaphragme,

K_p le facteur de correction pour la transmission du rayonnement par les parois de l'étalon,

K_h le facteur de correction pour la présence de l'humidité dans l'air.

Le condensateur utilisé pour les mesures est un condensateur au polystyrène dont la capacité (de valeur nominale 10 000 pF) est mesurée à chaque expérience pour éliminer des fluctuations dues aux variations atmosphériques (température et humidité). Le courant d'ionisation est mesuré par la méthode de Townsend qui consiste à déterminer le temps Δt nécessaire pour accumuler une charge donnée $C \Delta V$. Le dispositif initial construit pour automatiser les mesures, et décrit dans [5], a été amélioré; en particulier, la tension à la sortie de l'électromètre est maintenant envoyée sur un amplificateur différentiel qui compare cette tension à une tension de référence et, lorsqu'il y a égalité, envoie un signal qui, après mise en forme, déclenche ou arrête le chronomètre.

Les facteurs de correction ont été déterminés pour chaque rayonnement de référence. Leurs valeurs, ainsi que leurs incertitudes, sont données dans le tableau 2.

K_a est évalué à partir des coefficients d'atténuation μ de l'air mesurés expérimentalement. Il est calculé lors de chaque expérience en tenant compte des variations de μ avec la pression et la température. L'incertitude estimée est égale à 3σ .

K_{sc} et K_e ont été déduits des valeurs expérimentales fournies par Wyckoff et Attix [6]. Les incertitudes ont été estimées d'après les valeurs de ces auteurs.

K_s a été déterminé expérimentalement. Si R est le rapport des courants d'ionisation obtenus avec des tensions appliquées à la chambre de 2 000 et 4 000 V, en portant R en fonction du courant J du tube à rayons X, on obtient une droite de la forme

$$R = 1 - a - bJ.$$

On peut alors démontrer [7] que le facteur K_s (pour une tension de 4 000 V appliquée à la chambre) peut s'exprimer sous la forme

$$K_s = 1 + a + bJ/3,$$

où le terme a correspond à la recombinaison initiale et le terme $bJ/3$ à la recombinaison en volume. Les valeurs de K_s dans le tableau 2 sont évaluées pour $J = 5$ mA. Les incertitudes estimées sont égales à 3σ .

Tableau 2

Facteurs de correction applicables à l'étalon du BIPM
pour la mesure de l'exposition

kV	100	135	180	250
CDA (mm Cu)	0,15	0,49	0,99	2,50
K_a^*	1,010 0 + 0,05%	1,006 6 + 0,05%	1,005 6 + 0,03%	1,004 8 + 0,03%
K_{sc}	0,994 8 + 0,2%	0,996 2 + 0,2%	0,996 7 + 0,2%	0,996 9 + 0,2%
K_e	1,000 + 0,1%	1,002 3 + 0,1%	1,005 2 + 0,2%	1,007 8 + 0,3%
K_s	1,000 4 + 0,03%	1,000 6 + 0,05%	1,000 5 + 0,03%	1,000 3 + 0,04%
K_d	1,000 + 0,2%	1,000 + 0,2%	1,000 + 0,2%	1,000 + 0,2%
K_l	0,999 9 < 0,01%	0,999 7 < 0,01%	0,999 7 < 0,01%	0,999 6 < 0,01%
K_p	1,000 0 < 0,01%	1,000 0 < 0,01%	0,999 9 < 0,01%	0,998 8 < 0,01%
K_h^*	0,998 0 + 0,05%	0,998 0 + 0,05%	0,998 0 + 0,05%	0,998 0 + 0,05%

* Ces corrections peuvent varier légèrement avec les conditions de mesure (pression, température, humidité). On tient compte de ces variations pour la détermination de l'exposition.

K_d est estimé égal à 1 d'après [6], avec une incertitude de 0,2%. Un contrôle effectué en mettant le blindage (qui entoure le système de garde) soit à la masse, soit à la haute tension, n'a donné aucune variation appréciable du courant d'ionisation. L'effet de distortion des lignes de force, dû à la présence du blindage, est donc négligeable.

K_l a été estimé par le calcul d'après la formule de Simons [8]. L'incertitude sur ce facteur est négligeable (< 0,01%).

K_p a été déterminé expérimentalement, en comparant les fuites électriques de l'étalon avec et sans rayonnement, le diaphragme de l'étalon étant obturé par un bouchon de plomb. L'incertitude sur ce facteur est négligeable ($< 0,01\%$).

Enfin, K_h est estimé d'après la courbe recommandée par le CCEMRI [9], qui donne la variation du courant d'ionisation en fonction de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air. On a pris comme incertitude celle qui est estimée dans le rapport [9].

L'incertitude sur le courant d'ionisation est estimée à $0,02\%$; l'incertitude sur ρ_{STP} , masse volumique de l'air dans les conditions de référence, est estimée à $0,01\%$. Enfin, les incertitudes sur la mesure de la pression et de la température sont estimées à $0,01\%$ et $0,02\%$. En combinant quadratiquement les incertitudes sur tous les facteurs entrant dans la relation (1), on obtient une incertitude systématique totale pour la mesure du débit d'exposition de $0,3\%$ à 100 et 135 kV et de $0,4\%$ à 180 et 250 kV.

L'étalon que l'on vient de décrire (étalon A) a été comparé à l'étalon d'exposition du BIPM pour les rayons X de 10 à 50 kV (étalon B). La comparaison a eu lieu pour le rayonnement de référence 100 kV. Pour ce faire, on a évalué toutes les corrections applicables à l'étalon B pour ce rayonnement, soit expérimentalement (K_s , K_p , K_a), soit par le calcul (K_l), soit d'après des études expérimentales publiées dans la littérature (K_{sc}). Le facteur K_e pour la perte des électrons dans les parois de la chambre a été déterminé d'après une étude expérimentale faite au BIPM à l'aide d'une chambre d'ionisation cylindrique à pression variable placée dans un champ magnétique à symétrie axiale [10].

La moyenne de 12 séries d'expériences a donné un écart de $0,17\%$ entre les valeurs du débit d'exposition mesuré par les deux étalons. Cet écart est tout à fait compatible avec les incertitudes estimées.

Depuis 1974, six laboratoires nationaux (NBS, OMH, PTB, NPL, NPRL et RIV) ont participé à des comparaisons internationales d'étalons d'exposition effectuées à l'aide d'instruments de transfert étalonnés successivement au laboratoire d'origine et au BIPM. L'accord général entre les étalons, environ 1% , est moins bon que dans le cas des comparaisons effectuées dans le domaine des rayons X de faible énergie, où les étalons étaient comparés directement entre eux. Mais les écarts observés ne sont pas significatifs, étant donné les incertitudes des étalons et celles des chambres de transfert dont le facteur d'étalonnage peut dépendre quelque peu des conditions expérimentales qui ne sont jamais tout à fait identiques dans les deux laboratoires.

Références

- [1] Comité Consultatif pour les Etalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI), Section I, 2^e réunion, 1972
- [2] A. Allisy, D. Carnet et M.-T. Niatel, Procès Verbaux du Comité International des Poids et Mesures (CIPM) 32, 53 (1964)
- [3] id., Procès Verbaux CIPM 31, 34 (1963)
- [4] M. Boutillon, W.H. Henry and P.J. Lamperti, Metrologia 5, 1 (1969) et Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) 2 (1968-1970)
- [5] A. Allisy et D. Carnet, Procès Verbaux CIPM 32, 54 (1964)
- [6] H.O. Wyckoff and F.H. Attix, National Bureau of Standards (US) Handbook 64 (1957)
- [7] M.-T. Niatel, Communication privée
- [8] H.A.B. Simons, Phys. in Med. Biol. 6, 561 (1962)
- [9] CCEMRI, Section I, 4^e réunion (1977)
- [10] A. Allisy et M. Boutillon, C.R. Acad. Sc. Paris 260, 6576 (1965)

(Juin 1978)
