

Comparaison des étalons de kerma dans l'air du BNM-LCIE et du BIPM dans le domaine des rayons x d'énergie moyenne

M. Boutillon*, C. Etard ** et G. Pautonnier**

* Bureau international des poids et mesures-92312 Sèvres Cedex

** Bureau national de métrologie, BP 8, 92266, Fontenay-aux-Roses cedex

Résumé

Une comparaison directe entre les étalons de kerma dans l'air du Bureau national de métrologie, France, et du BIPM a été effectuée dans le domaine des rayons x d'énergie moyenne. L'accord entre les étalons est excellent pour des tensions du tube radiogène supérieures à 100 kV, compte tenu des incertitudes. A 100 kV cependant un écart significatif de 1 % a été observé qui reste inexplicé et demande vérification.

1. Introduction

Une comparaison entre les étalons de kerma dans l'air du Bureau national de métrologie - Laboratoire central des industries électriques (BNM-LCIE) et du Bureau international des poids et mesure (BIPM) a été effectuée dans le domaine des rayons x d'énergie moyenne (100 kV-250 kV). Cette comparaison a été faite dans les conditions de référence recommandées par la Section I du Comité consultatif pour les rayonnements ionisants (CCRI (1)) [1], en utilisant la chambre de transfert PTW M23331 n° 785 du BNM-LCIE. Les étalons sont des chambres à plaques parallèles de dimensions très voisines. L'étalon du BIPM a été décrit dans [2] et aucun détail n'est donné ci-dessous. Les caractéristiques de l'étalon du BNM-LCIE et celles de la chambre de transfert utilisée pour la comparaison sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1. Principales dimensions de l'étalon du BNM-LCIE (100 kV – 250 kV) et de la chambre de transfert utilisée pour la comparaison

étalon	espacement de plaques	18 cm
	longueur plaque de mesure	environ 10 cm
	largeur plaque de mesure	6.000 cm
	diamètre du diaphragme	1.000 cm
	longueur d'air	27 cm
	volume de mesure	4.712 cm^3 ($s = 0.2 \%$)
	tension appliquée (polarité positive)	4500 V
chambre de transfert	type	PTW M23331
	forme	cylindrique
	volume	$\cong 1 \text{ cm}^3$
	matériau	équivalent tissu ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$)

Une première vérification de l'étalon du BNM-LCIE avait été faite en 1986 par l'intermédiaire du BNM-LPRI, les résultats indiquant alors un accord meilleur que 1 % entre les étalons. Vu le temps

écoulé et les incertitudes dues à un double transfert, il devenait nécessaire de renouveler l'opération, et ce de manière plus directe.

2. Qualités de rayonnements

Quatre qualités de rayonnement ont été choisies par la Section I du CCRI pour ce type de comparaison [3]. On donne dans le tableau 2 des informations sur les conditions géométriques et sur les qualités de rayonnements utilisés dans les deux laboratoires. Celles-ci étant très voisines, la réponse de la chambre de transfert ne sera pas modifiée de façon appréciable d'un faisceau à l'autre.

Tableau 2. Conditions de mesure

		BIPM		BNM-LCIE				
distance de référence		120 cm		120 cm				
diamètre du faisceau dans le plan de référence		10.5 cm		10.5 cm				
filtration inhérente		≅ 2.3 mm Al		0.7 cm Be				
Qualités des rayonnements de référence								
kV	100		135		180		250	
laboratoire	BIPM	BNM-LCIE	BIPM	BNM-LCIE	BIPM	BNM-LCIE	BIPM	BNM-LCIE
filtration/mm Al	1.294	3.00	-	-	-	2.20	-	-
filtration/mm Cu	-	-	0.232	0.20	0.484	0.50	1.570	1.60
CDA*/mm Al	4.027	-	-	-	-	-	-	-
CDA*/mm Cu	0.148	0.21	0.494	0.46	0.990	1.08	2.500	2.47
μ/ρ **/ cm ² g ⁻¹	0.300	0.230	0.198	0.191	0.167	0.166	0.145	0.145
débit de kerma /mGy s ⁻¹	0.214	0.211	0.210	0.323	0.300	0.360	0.390	1.08

* couche de demi atténuation

** coefficient d'atténuation de l'air

3. Détermination du débit de kerma dans l'air

Le débit de kerma dans l'air est déterminé par la relation

$$\dot{K} = (I / \rho V) W/e (1 - g)^{-1} \prod k_i, \quad (1)$$

où I est le courant mesuré par l'étalon et normalisé aux conditions de référence (101 325 Pa et 273.15 K),

ρ est la masse volumique de l'air et V le volume de mesure ; ρ est égal à 1.2930 kg/m³ dans les conditions de référence,

W/e est l'énergie fournie par un électron pour créer dans l'air sec une paire d'ions, W/e est égal à 33.97 J/C [4],

g est la fraction de l'énergie des électrons dissipée en rayonnement de freinage [5] et $\prod k_i$ est le produit des facteurs de correction.

Les facteurs de correction applicables à l'étalon du BIPM sont donnés en [6], et ceux du BNM-LCIE dans la table 3. Leurs incertitudes y sont également consignées sous forme d'écart-type. Les

deux étalons ayant sensiblement les mêmes dimensions et un diaphragme semblable, leurs facteurs k_{sc} , k_e et k_i sont corrélés. Chaque incertitude est la somme quadratique d'une incertitude de type A (obtenue par des moyens statistiques) et d'une incertitude de type B (obtenue par d'autres moyens). L'incertitude totale sur le terme $\prod k_i$ est de 0.14 % pour l'étalon du BIPM et de 0.20 % pour l'étalon de BNM-LCIE.

Tableau 3. Facteurs de correction de l'étalon du BNM-LCIE et incertitudes sur \bar{K}

kV		100	135	180	250	$s / \%^{(1)}$
k_{sc}	rayonnement diffusé	0.9948	0.9962	0.9967	0.9969	0.07
k_e	perte d'électron	1.000	1.0023	1.0052	1.0078	0.1
k_s	manque de saturation	1.0005	1.0005	1.0005	1.0005	0.03
$k_a^{(2)}$	atténuation de l'air	1.0081	1.0067	1.0058	1.0051	0.1
k_d	champ électrique	1.000	1.000	1.000	1.000	0.1
k_1	transmission par les bords du diaphragme	0.9999	0.9997	0.9997	0.9996	< 0.01
k_p	transmission par les murs	1.000	1.000	1.000	1.000	< 0.01
k_h	humidité [7]	0.998	0.998	0.998	0.998	0.03
k_{pol}	polarité	0.9995	0.9995	0.9995	0.9995	0.05
l-g	bremsstrahlung	0.9999	0.9999	0.9998	0.9997	< 0.01
incertitude relative sur						
le courant I				0.1 %		
la température T				0.05 %		
la pression P				0.05 %		
le volume V				0.2 %		
la densité de l'air ρ				0.01 %		
l'énergie moyenne W/e				0.15 %		
facteurs de correction $\prod k_i$				0.20 %		
incertitude combinée sur \bar{K}				0.35 %		

(1) l'incertitude est donnée sous forme d'écart-type

(2) obtenu par calcul à partir de l'énergie moyenne du faisceau (pondérée sur la fluence énergétique)

4. Etalonnage de la chambre de transfert PTW

Le facteur d'étalonnage N_K de la chambre de transfert PTW, en termes de kerma dans l'air, est donné par la relation

$$N_K = K / I_{PTW} , \quad (2)$$

où K est le débit de kerma dans l'air mesuré avec l'étalon du laboratoire concerné et I_{PTW} est le courant de la chambre de transfert corrigé des fuites de courant, et normalisé aux conditions habituelles choisies par le BNM-LCIE ($P = 101\,325$ Pa, $T = 20$ °C, $H = 0$ % en humidité relative). L'effet de la non-uniformité latérale du faisceau sur la section de la chambre PTW est négligeable et n'a pas été pris en compte. D'autre part, le manque de saturation de cette chambre n'a pas été tenu en compte car le débit de kerma dans l'air est sensiblement le même dans les deux laboratoires.

La chambre de transfert est positionnée sur l'axe du faisceau du BIPM, son centre étant dans le plan de référence. Pour l'étalonnage, le tube est déplacé latéralement et l'axe du faisceau coïncide avec l'axe de l'une ou l'autre des chambres. La température de la chambre PTW est mesurée avec un thermomètre placé dans son voisinage et en dehors du faisceau. La tension appliquée à la chambre PTW est de 300 V (polarité positive). Les mesures avec l'étalon du BIPM sont faites immédiatement avant et après les mesure avec la chambre PTW, pour corriger des dérives éventuelles du faisceau. La chambre a été étalonnée aux qualités de rayonnement de référence, indiquées dans le Tableau 2. Le courant de cette chambre est mesuré avec la chaîne de mesure du BNM-LCIE. L'écart-type d'une série de mesures est de l'ordre de 0.02 %, pour l'étalon du BIPM et pour la chambre PTW.

Pour l'étalonnage au BNM-LCIE, les mesures avec la chambre de transfert sont faites immédiatement après les mesures avec l'étalon de ce laboratoire. La chambre PTW a été étalonnée au BNM-LCIE avant et après son étalonnage au BIPM. Les écarts obtenus sur les facteurs d'étalonnage mesurés sont de l'ordre de -0.6% , de 135 kV à 250 kV et sont largement supérieurs à l'incertitude estimée sur ces écarts. L'écart étant toujours dans le même sens, quelque soit la qualité du rayonnement, on peut penser que la chambre de transfert a subi une évolution. Ce fait diminue la précision du résultat de comparaison des deux étalons.

5. Résultats de la comparaison

5.1 Comparaison des systèmes de mesure

La grandeur \bar{K} a été mesurée par chaque laboratoire avec son système de mesure propre. Par contre, le courant I_{PTW} a été mesuré dans les deux laboratoires avec le système de mesure du BNM-LCIE. La comparaison ne concerne donc pas seulement les étalons seuls mais aussi les systèmes de mesure. Bien que le résultat global puisse être intéressant en lui-même, pour les applications par exemple, il convient de séparer étalons et systèmes de mesure pour vérifier la qualité de chacun d'entre eux.

Les deux systèmes de mesure ont d'abord été comparés par des mesures faites à 50 kV, avec une autre chambre du BNM-LCIE. Deux séries de 10 mesures, faites chacune avec le système de mesure d'un des laboratoires ont donné les résultats consignés dans le Tableau 4. L'écart sur le courant d'ionisation est de 0.31 %. Une partie de cet écart est expliqué par une mesure de pression inadéquate du système du BNM-LCIE. Le reste, 0,11 %, est dû aux incertitudes sur la mesure du courant lui-même et sur la température. Cette valeur est compatible avec les incertitudes (0.03 % et 0.1 % des systèmes de mesure respectifs du BIPM et du BNM-LCIE).

Tableau 4. Comparaison des systèmes de mesure

système de mesure	BIPM	BNM-LCIE	rapport
mesure de la pression	102 800 Pa	102 600 Pa	1.0020
courant d'ionisation	31.595 pA	31.495 pA	1.0031

5.2 Comparaison des étalons

Le résultat global de la comparaison (de l'ensemble étalons + systèmes de mesure) est exprimé sous la forme du rapport R défini par

$$R = (\dot{K} / I_{PTW})_{\text{BNM-LCIE}} / [(\dot{K} / I_{PTW})_{\text{BIPM}} k_{\text{ref}}] \quad (3)$$

où k_{ref} tient compte du fait que les valeurs de K et de I_{PTW} au BIPM ne sont pas mesurées exactement dans les mêmes conditions : on normalise la valeur de K à celle qui serait obtenue pour une épaisseur d'air fixe (en g/cm^2) entre le tube à rayons x et le plan de référence. La mesure de I_{PTW} , faite avec le système de mesure du BNM-LCIE, ne tient pas compte de cette normalisation. Les valeurs de R et k_{ref} sont données dans le Tableau 5.

Le résultat R_K de la comparaison entre les étalons seuls est déduit de la relation

$$R_K = [(N_K)_{\text{BNM-LCIE}} / (N_K)_{\text{BIPM}}] k_{\text{ref}} k_{\text{syst}} \quad (4)$$

où k_{syst} est le rapport des courants d'ionisation mesurés avec les systèmes de mesure du BIPM et du BNM-LCIE (section 5.1).

Les valeurs des résultats sont données dans la Tableau 5 et l'analyse de leurs incertitudes est présentée dans le Tableau 6. Les valeurs des grandeurs physiques ρ et W/e utilisées par les deux étalons sont identiques et les facteurs de correction k_{sc} et k_e sont fortement corrélés du fait que les étalons sont de même dimension. Les incertitudes de ces paramètres n'entrent donc pas dans l'incertitude de R_K .

Tableau 5. Résultats des comparaisons

		kV	100	135	180	250
BNM-LCIE	avant BIPM	\dot{K} (mGy/s)	-	0.3250	0.3624	1.0898
		I_{PTW} (pA)	-	12.31	13.56	40.40
		N_K (Gy/ μ C)	-	26.401	26.73	26.98
	après BIPM	\dot{K} (mGy/s)	0.2111	0.3804	0.3603	0.5326
		I_{PTW} (pA)	8.140	12.21	13.57	19.82
		N_K (Gy/ μ C)	25.93	26.24	26.55	26.87
		$\Delta N_K / N_K$	-	- 0.61 %	- 0.68 %	-0.41 %
BIPM	\dot{K} (mGy/s)	0.21131	0.20579	0.29616	0.38320	
	I_{PTW} (pA)	8.0389	7.7752	11.076	14.157	
	N_K (Gy/ μ C)	26.285	26.467	26.739	27.068	
corrections		k_{ref}	1.0006	1.0004	1.0002	1.0002
		k_{syst}	1.0031	1.0031	1.0031	1.0031
comparaison (étalons + systèmes mesure)		R	0.9871 $s = 0.54 \%$	0.9949 $s = 0.54 \%$	0.9965 $s = 0.54 \%$	0.9949 $s = 0.54 \%$
comparaison étalons seuls		R_K	0.9901 $s = 0.54 \%$	0.9979 $s = 0.54 \%$	0.9996 $s = 0.54 \%$	0.9980 $s = 0.54 \%$

Table 6. Incertitudes sur les résultats de la comparaison

incertitude sur la mesure de	BIPM	BNM-LCIE
\bar{K}	0.22 %	0.35 %
I_{PTW}	0.03 %	0.05 %
distance	0.04 %	0.08 %
fluctuation du tube à rayons x.	0.1 %	0.10 %
k_{ref}	-	-
k_{syst}	-	0.05 %
somme quadratique	0.25 %	0.38 %
évolution de la chambre PTW	-	0.3 %
incertitude sur R_K	0.54 %	

6. Discussion et conclusion

L'accord entre les étalons du BNM-LCIE et du BIPM est bon à 135 kV, 180 kV et 250 kV, compte tenu de l'incertitude assez importante sur la valeur de R_K . Il est regrettable qu'une part non négligeable de cette incertitude soit due à une variation significative du facteur d'étalonnage de la chambre PTW, mesuré au BNM-LCIE avant et après son étalonnage au BIPM. Les mesures faites à 100 kV indiquent un écart significatif de 1 % entre les deux étalons. Cet écart ne peut s'expliquer que très partiellement par la différence de spectres entre les deux faisceaux et demande des vérifications expérimentales ultérieures. D'autre part le système de mesure du BNM-LCIE présente un écart non négligeable (0.31 %) avec celui du BIPM. Pour toutes ces raisons, le BIPM et le BNM-LCIE estiment sage de recommencer la présente comparaison d'ici trois ans, lorsque le BNM-LCIE aura terminé les vérifications expérimentales nécessaires et étudié soigneusement la stabilité des chambres utilisées comme instruments de transfert lors de comparaisons.

On donne dans le Tableau 7, à titre d'information, les résultats de toutes les comparaisons effectuées au BIPM avec les laboratoires nationaux. Les résultats de la présente comparaison sont compatibles avec l'ensemble des comparaisons effectuées avec les laboratoires nationaux dans le même domaine d'énergie, excepté peut-être à 100 kV.

7. References

- [1] BIPM, Qualités de rayonnements, in *Com. Cóns. Etalons Mes. Ray. Ionisants* (Section I), 1972, 2, R15 (BIPM, F-923 12 SŠvres CEDEX)
- [2] BOUTILLON M., Mesure de l'exposition au BIPM dans le domaine des rayons x de 100 - 250 kV, *Rapport BIPM-78/3*.
- [3] BIPM, Qualités de rayonnement, in *Com. Cons. Etalons Mes. Ray. Ionisants* (Section I), 1975, 3, R(I)6
- [4] BOUTILLON M. and PERROCHE-ROUX A.-M., Re-evaluation of the W value for electrons in dry air, *Phys. Med. Biol.* 1987, 32, 213.
- [5] BIPM, Constantes physiques pour les étalons de mesure de rayonnement, in *Com. Cons. Etalons Mes. Ray. Ionisants* (Section I), 1985, 11, R45
- [6] BOUTILLON M., Measuring conditions used for the calibration of ionization chambers at the BIPM, 1996, *Rapport BIPM-96/1*.
- [7] BIPM, Correction d'humidité, in *Com. Cons. Etalons Mes. Ray. Ionisants* (Section I), 1977, 4, R(I)6.

Summary of the results R_K of the international comparisons of air kerma standards

radiation quality	kV	10	30	50	50	50	kV	100	135	180	250	^{60}Co			^{137}Cs	
												$H^{\text{VL}}(\text{Al})$ /mm	R_K	R_K	R_K	date
Laboratory	date						date	R_K	R_K	R_K	R_K	date	R_K	date	R_K	
ARL	-	0.036	0.18	1.00	2.26	1988	1.0037	1.0045	1.0029	1.0044	1997	1.0020	-	-	-	
BARC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1975	1.0025	-	-	
BEV	-	-	-	-	-	1982	0.9988	0.9980	0.9979	0.9960	1995	1.0029	1995	0.9945	-	
CIEMAT	1979	1.0021	1.0011	1.0018	1.0025	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CSIR	-	-	-	-	-	1976	0.9969	1.0042	1.0008	1.0049	-	-	-	-	-	
ENEA	1985	0.9986	0.9975	0.9989	0.9989	1976	1.0027	0.9986	0.9988	-	-	1985	0.9994	-	-	
ETL	1972	0.9958	0.9960	1.0031	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
GUM	1994	0.9963	0.9973	0.9968	0.9977	1994	0.9985	0.9968	0.9959	0.9944	1996	0.9987	-	-	-	
LNMRI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1986	1.0004	1995	1.0000	
LPRI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1993	1.0025	-	-	
NIST	1966	0.9992	0.9998	0.9948	0.9966	1991	0.9978	0.9941	0.9935	0.9935	1996	0.9982	1994	1.0017	-	
NMi	1996	0.9986	0.9998	1.0028	1.0009	1991	1.0018	0.9975	0.9950	0.9937	1996	1.0031	-	-	-	
NPL	1997	0.9983	0.9980	0.9977	0.9989	1982	0.9978	0.9941	0.9935	0.9935	1982	0.9982	-	-	-	
NRC	1966	1.0007	1.0003	0.9997	-	-	-	-	-	-	-	1989	1.0021	-	-	
OMH	1988	0.9973	-	1.0020	1.0010	1975	1.0040	1.0013	0.9993	0.9961	1994	1.0025	1994	0.9954	-	
PTB	-	-	-	-	-	1975	1.0016	1.0003	1.0002	1.0016	1989	1.0031	*	-	-	
SZMDM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1991	0.9982	-	-	
UDZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1992	0.9992	-	-	
VNIIM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1997	0.9961	1997	1.0020	
BNM-LCIE	-	-	-	-	-	1998	0.9901	0.9979	0.9996	0.9980	-	-	-	-	-	