

## RÉSUMÉ de la présentation orale Étalonnage de dosimètres opérationnels sans source radioactive

Gabriel DUPONT, Arnaud CHAPON

ATRON METROLOGY

[gdupont@atron.fr](mailto:gdupont@atron.fr)

ATRON Metrology a défini au sein de son organisation un Laboratoire de Métrologie pour la RadioProtection (LMRP), qui réalise l'étalonnage et la vérification de l'étalonnage d'instruments de mesure des rayonnements ionisants en termes de kerma dans l'air ( $K_{air}$ ), d'équivalent de dose ambiant ( $H^*(10)$ ) ou de leurs débits.

La source d'étalonnage utilisée par le LMRP repose sur le rayonnement de freinage d'électrons préalablement accélérés à quelques MeV, contribuant à réduire l'utilisation de sources radioactives. Le LMRP est accrédité par le COFRAC pour ces activités [1] suivant les exigences applicables [2, 3].

Cette communication vise à démontrer la faisabilité d'étendre les capacités du LMRP à l'étalonnage et à la vérification de l'étalonnage de dosimètres opérationnels, dont la grandeur de référence est l'équivalent de dose individuel.

### 1. De la grandeur physique à la grandeur opérationnelle

La dosimétrie externe des rayonnements ionisants s'appuie sur un système de grandeurs dosimétriques liant les grandeurs physiques aux grandeurs opérationnelles et de protection.

#### 1.1 Le kerma dans l'air

Les grandeurs physiques qui nous concernent plus particulièrement sont, :

- La fluence, qui traduit le nombre de particules pénétrant dans l'aire apparente d'un volume ;
- Le kerma (*Kinetic Energy Release in MAterial*) dans l'air, qui désigne l'énergie cinétique délivrée par unité de masse.

La fluence s'exprime en  $m^{-2}$  ; et le kerma dans l'air, en grays.

Les grandeurs physiques sont utilisées pour établir les références nationales. C'est la comparaison de ces dernières entre laboratoires nationaux de métrologie qui assure la cohérence et la pérennité du système international d'unités [4]. S'agissant des photons, les dosimètres absolus sont des chambres d'ionisation, permettant d'atteindre le kerma dans l'air au moyen de l'expression :

$$K_{air} = \frac{Q}{\rho_{air} \times V} \times \frac{W_{air}}{e} \times \frac{1}{1-g} \prod_i k_i$$

Avec :

- $Q$  : charge collectée aux bornes des électrodes (en C)
- $V$  : volume de collection efficace de la chambre d'ionisation (en  $cm^3$ )
- $g$  : fraction de l'énergie, transmise aux particules chargées, convertie en rayonnement de freinage
- $\rho_{air}$  : masse volumique de l'air sec à 20 °C et 101,325 kPa (= 1.20479  $g.cm^{-3}$ )
- $W_{air}/e$  : énergie moyenne de création d'une paire électron/ion dans l'air sec rapportée à la charge de l'électron (= 33.97  $J.C^{-1}$ )

- $k_i$  : produit des facteurs de correction liés à la variation de la masse volumique de l'air en fonction des conditions climatiques au moment des mesures et aux imperfections et perturbations de la chambre d'ionisation, notamment.

Les grandeurs opérationnelles sont traçables aux grandeurs physiques. Elles sont mesurées au moyen de dosimètres préalablement étalonnés et servent d'estimateurs aux grandeurs de protection.

## 1.2 L'équivalent de dose ambiant

L'équivalent de dose ambiant  $H^*(d)$  correspond à l'équivalent de dose  $H$  qui serait produit par un champ de rayonnements unidirectionnel et expansé dans une sphère ICRU [5] (fig. 1), à une profondeur  $d$  de la surface exposée de la sphère. Pour les rayonnements fortement pénétrants, la profondeur  $d = 10$  mm est choisie de sorte à être un estimateur de la dose efficace  $E$  ; ainsi  $H^*(10)$  est la grandeur opérationnelle utilisée pour étalonner les radiamètres. Du fait de sa définition au sein de la sphère ICRU cette grandeur est isotrope.

## 1.3 L'équivalent de dose individuel

L'équivalent de dose individuel  $H_p(d,\alpha)$  correspond à l'équivalent de dose  $H$  qui serait produit par un champ de rayonnements unidirectionnel et expansé ayant une incidence  $\alpha$  avec la normale à la surface d'un fantôme parallélépipédique (fig. 1), à une profondeur  $d$  de sa surface d'incidence.  $H_p(10)$  est, pour les rayonnements fortement pénétrants, un estimateur de la dose efficace  $E$  [6]. Du fait de la forme parallélépipédique du fantôme de définition cette grandeur est iso-directionnelle. C'est dans cette grandeur opérationnelle que le LMRP envisage une extension de la traçabilité de ses champs de référence, pour l'étalonnage de dosimètres opérationnels.

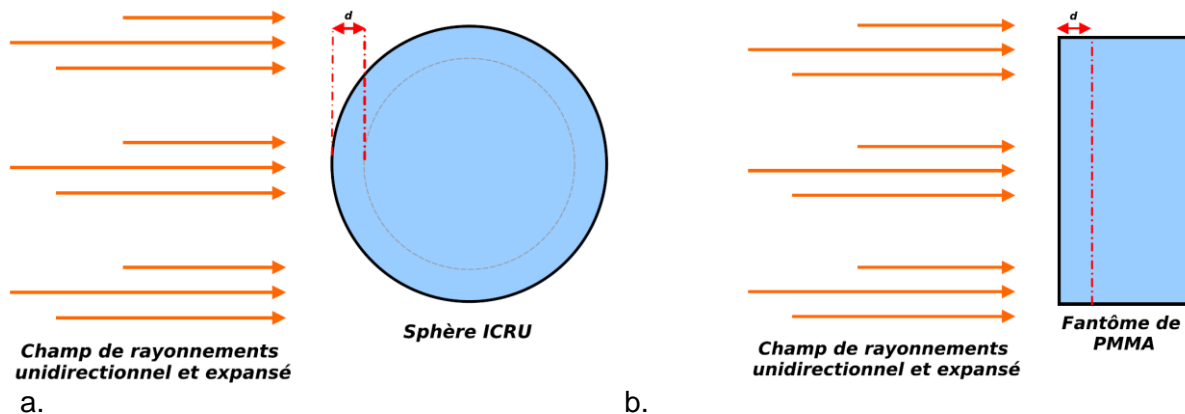


Figure 1 : a. Conditions d'irradiation de la sphère ICRU pour la détermination de l'équivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  ; b. Conditions d'irradiation du parallélépipède en matériau ICRU 4 éléments pour la détermination de l'équivalent de dose personnel  $H_p(10,0^\circ)$ .

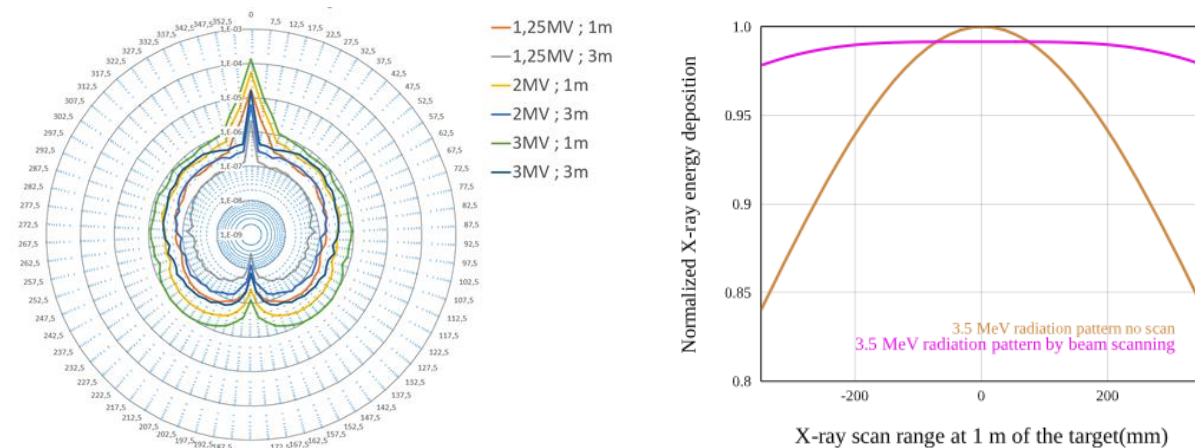
## 2. Champ de rayonnement et étalonnage

### 2.1 Champ de rayonnement unidirectionnel et expansé

Concernant les conditions d'étalonnage idéales des deux grandeurs opérationnelles citées ci-avant, en photons, elles partagent les mêmes conditions d'irradiation, à savoir un champ de rayonnement parallèle.

La répartition angulaire et l'homogénéité du champ de rayonnements X d'ATRON METROLOGY ont déjà fait l'objet d'une optimisation et de mesures par le LMRP. Elles sont

représentées par la figure 2 pour des champs X générés par un faisceau mono-énergétique d'électrons de 1,25 MeV, 2,0 MeV et 3,0 MeV respectivement, à 1 m et 3 m, auxquelles la traçabilité en  $H^*(10)$  est déjà démontrée par le LMRP. Ces calculs ont montré que le champ de rayonnements délivré par l'installation de ATRON METROLOGY est très largement monodirectionnel.



a.

b.

Figure 2 : a. Répartition angulaire des fluences de photons dans chacune des configurations : le champ de rayonnements incident y est supérieur de l'ordre de deux décades aux contributions de rayonnements diffusés ; b. Homogénéité du champ d'irradiation dans les conditions les plus défavorables, 3.5 MeV à 1 m de la cible : le champ de rayonnement y est homogène sur un angle d'ouverture de  $\pm 15^\circ$ .

## 2.2 Etalonnage

Les grandeurs opérationnelles sont calculées à partir des grandeurs primaires par application de coefficients de transfert tabulés en fonction de l'énergie des rayonnements dans le rapport ICRU 57 [7]. La grandeur dosimétrique primaire à partir de laquelle est assurée la traçabilité,  $K_{air}$ , est mesurée à l'aide d'un instrument-étalon ne nécessitant pas d'étalonnage. L'incertitude de mesure associée a été évaluée à 4,2 % avec un facteur d'élargissement pris à  $k = 2$  pour les qualités de faisceau retenues par le LMRP.

Il s'ensuit que l'équivalent de dose ambiant et l'équivalent de dose individuel s'expriment à partir de  $K_{air}$  et des coefficients de transfert fournis par l'ICRU :

$$H_{ref}^*(10) = \sum h_{H^*(10)/K} \times K_{air}$$

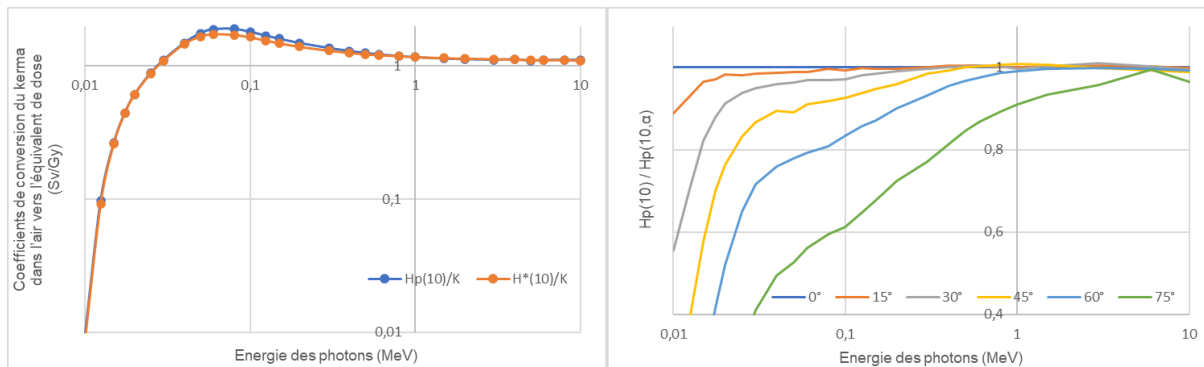
$$H_{p\ ref}^*(10) = \sum_{\alpha} \sum_{E} h_{H_p(10,\alpha)/K} \times K_{air}$$

Avec :

- $H_{ref}^*(10)$  et  $H_{p\ ref}^*(10)$  : équivalent de dose ambiant ou équivalent de dose individuel de référence au point de mesure
- $\alpha$  et  $E$  : angle d'incidence et énergie du champ de rayonnement au point de mesure
- $h_{H^*(10)/K}$  et  $h_{H_p(10,\alpha)/K}$  : coefficients de conversion du kerma dans l'air vers l'équivalent de dose ambiant ou l'équivalent de dose individuel

Les valeurs de référence peuvent ainsi être utilisées pour l'étalonnage ou la vérification de l'étalonnage d'instruments de mesure de rayonnements ionisants dans les grandeurs opérationnelles cibles ou leurs débits.

Si les conditions de mesures varient en fonction des grandeurs opérationnelles considérées,  $H^*(10)$  et  $H_p(10)$  n'en demeurent pas moins des estimateurs d'une même grandeur de protection, la dose efficace corps entier  $E$ . Les coefficients de conversion du kerma dans l'air vers ces grandeurs sont par conséquent attendus assez proches l'un de l'autre en fonction de l'énergie des photons incident. C'est ce qu'illustre la figure 3.



a. *Figure 3 : a. Tracé des coefficients  $h_{H^*(10)/K}$  et  $h_{H_p(10)/K}$  en fonction de l'énergie des photons au point de mesure ; b. Tracé des rapports  $H_p(10,0^\circ) / H_p(10,\alpha)$  en fonction de l'énergie des photons au point de mesure pour différents angles d'incidence  $\alpha$  du champ de rayonnements ; données issues de [7].*

### 3. Perspectives

La méthodologie de traçabilité des grandeurs opérationnelles « équivalent de dose ambiant »,  $H^*(10)$ , et « équivalent de dose individuel »,  $H_p(10)$  appliquée aux qualités de faisceau du Laboratoire de Métrologie pour la RadioProtection d'ATRON METROLOGY La faible contribution latérale du champ de rayonnement à l'équivalent de dose individuel n'augmente pas significativement le bilan d'incertitude pour les étalonnages aux qualités de faisceau déjà utilisées, ouvrant la voie à l'étalonnage de dosimètres individuels opérationnels par le LMRP, sans utiliser de source radioactive.

### 4. Références

- [1] Accréditation n°2-6778, portée disponible sur [www.cofrac.fr](http://www.cofrac.fr)
- [2] Norme NF ISO 4037 « Radioprotection — Rayonnements X et gamma de référence pour l'étalonnage des dosimètres et des débitmètres, et pour la détermination de leur réponse en fonction de l'énergie des photons », 2019
- [3] Norme NF EN ISO/CEI 17025 « Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais », 2017
- [4] « La dosimétrie externe des rayonnements ionisants : de la référence nationale aux utilisateurs en radiothérapie et en radioprotection », Rapport CEA-R-6214, J.-M. BORDY, 2009
- [5] « Radiation Quantities and Units », ICRU report 33, 1980
- [6] « Dosimétrie pour la radioprotection dans des champs de rayonnements X jusqu'à des énergies de 3 MeV », Thèse de doctorat, G. DUPONT, 2019
- [7] « Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation », ICRU report 57, 1998