

## **VERIFICATION DE L'ETALONNAGE D'INSTRUMENTS DE MESURE DE RAYONNEMENTS IONISANTS AU MOYEN D'UN CHAMP D'IRRADIATION REALISTE, SANS SOURCES RADIOACTIVES**

**Gabriel DUPONT [1], Arnaud CHAPON [2], Jean-Marc BORDY [3]**

[1] ATRON Metrology / LPC Caen (CNRS/IN2P3)  
6 Boulevard du Maréchal Juin, 14050 Caen cedex, France  
[gdupont@cerap.fr](mailto:gdupont@cerap.fr)

[2] ATRON Metrology  
Rue des Vindits, 50100 Cherbourg-en-Cotentin, France

[3] CEA, LIST, LNE LNHB  
F-91191 Gif-Sur-Yvette, France

Les instruments de mesure de rayonnements ionisants utilisés dans l'industrie nucléaire sont conçus pour pouvoir être soumis à des débits d'équivalent de dose avec une dynamique importante, allant de quelques  $\mu\text{Sv/h}$  à quelques  $\text{Sv/h}$  en fonctionnement normal, voire quelques centaines de  $\text{Sv/h}$  en situation accidentelle [1].

L'arrêté du 21 mai 2010 [2] précise que le contrôle périodique de l'étalonnage des instruments de mesure de rayonnements ionisants sans moyen de contrôle permanent de bon fonctionnement doit être effectué tous les trois ans.

Or la vérification de l'étalonnage est le plus souvent réalisée au moyen de sources radioactives, telles que le  $^{137}\text{Cs}$  ou le  $^{60}\text{Co}$ . Afin de sonder la grande dynamique en débits d'équivalent de dose, les instruments de mesure de rayonnements ionisants sont placés à différentes distances de la source. La loi d'atténuation géométrique en inverse carré de la distance permet ainsi de vérifier leur bon fonctionnement sur toute la gamme de réponse.

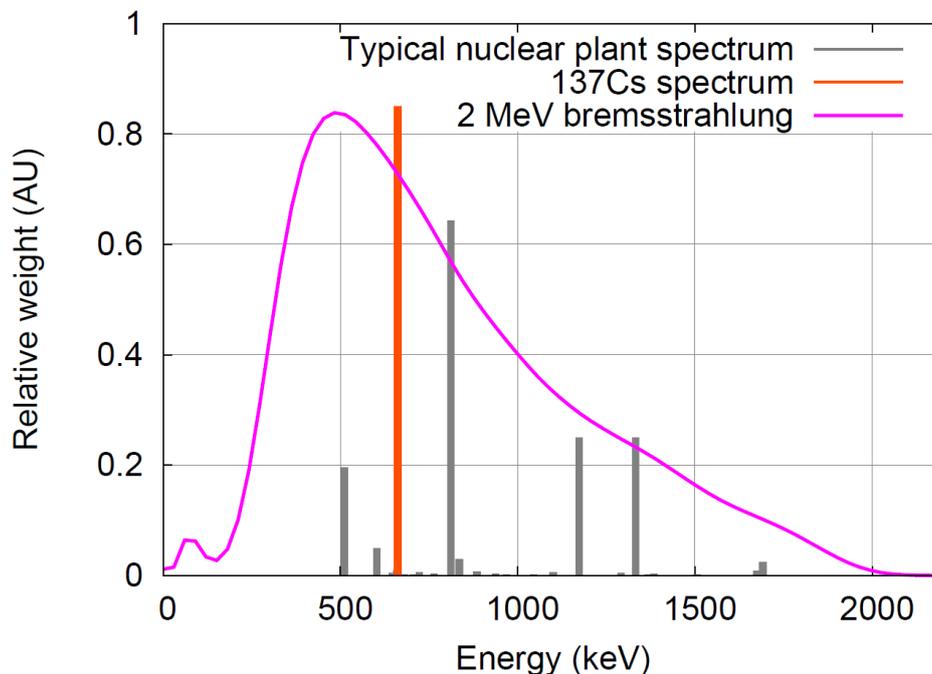
Cette méthode éprouvée, qui fait référence dans les normes ISO [3], présente cependant plusieurs inconvénients. D'une part, l'utilisation de sources radioactives en tant que telle présente un impact environnemental. D'autre part, malgré les précautions prises en termes de radioprotection, le risque d'une exposition accidentelle d'un opérateur ne peut être exclu. De plus, le spectre énergétique de ces sources est discret donc non représentatif des spectres en énergie rencontrés dans l'industrie nucléaire. Enfin, compte tenu des nombreuses manutentions à réaliser, le temps de traitement peut limiter le nombre d'appareils de mesure vérifiés, ce qui conduit à un faible rendement.

ATRON propose une méthode de vérification de l'étalonnage d'instruments de mesure de rayonnements ionisants innovante [4], en mettant en œuvre un champ d'irradiation réaliste. Ce champ d'irradiation possède un spectre énergétique continu, obtenu à partir du rayonnement de freinage (ou « Bremsstrahlung ») d'électrons préalablement accélérés.

Le principe du rayonnement de freinage s'appuie sur les équations de Maxwell de l'électromagnétisme. Lorsqu'une particule chargée traverse un champ électromagnétique, elle est déviée. C'est notamment le cas d'un faisceau d'électrons qui bombarde une cible solide : les interactions que ces électrons subissent à l'échelle atomique causent une diminution de leur vitesse. Cette variation de vitesse induit l'émission d'un rayonnement de freinage correspondant à la perte d'énergie des électrons. Plus la cible bombardée possède un numéro atomique et une densité élevés, plus la section efficace de production de rayonnement de freinage est importante.

Cette méthode innovante nécessite donc l'utilisation d'un accélérateur d'électrons. ATRON a choisi de s'équiper d'un accélérateur électrostatique simple étage « Singletron » conçu par High Voltage Engineering Europa (HVEE). Celui-ci produit un faisceau d'électrons mono-énergétiques, dont l'énergie peut être réglée de 200 keV à 3,5 MeV, et l'intensité de quelques pA à 1 mA jusqu'à une tension accélératrice de 2 MV et 600  $\mu$ A au-delà.

Le faisceau d'électrons est guidé jusqu'à une cible de conversion, constituée d'une plaque de tantale qui est caractérisée par un numéro atomique et une densité élevés, favorisant ainsi la conversion des électrons en photons. La cible est par ailleurs pourvue d'un dispositif de refroidissement et d'un système de centrage du faisceau d'électrons garantissant la stabilité et la reproductibilité du champ d'irradiation X. Le spectre en énergie des photons obtenu est continu, d'énergie maximale égale à celle du faisceau incident d'électrons et d'énergie moyenne voisine du tiers de cette énergie maximale. Nous pouvons par exemple obtenir une énergie moyenne de 662 keV correspondant à la désintégration du  $^{137}\text{Cs}$  en utilisant une énergie faisceau de 2 MeV.



Spectres simulés de la désintégration du césium 137, du bremsstrahlung à 2 MeV et spectre typique estimé d'une centrale nucléaire

Le spectre de rayonnement utilisé est donc plus représentatif des conditions de mesure que rencontrent les exploitants nucléaires in-situ et permet ainsi de réaliser une vérification de l'étalonnage plus proche des conditions réelles que lors de l'utilisation de sources radioactives.

Le débit d'équivalent de dose est quant à lui proportionnel au courant délivré par la source d'électrons pour une énergie donnée. Ainsi, il suffit d'ajuster l'intensité du faisceau pour vérifier les différents débits d'équivalent de dose de la gamme de réponse des instruments. Les conditions d'irradiation sont donc totalement paramétrables.

Il est notamment possible d'arrêter la source, de façon manuelle ou automatisée, conduisant par conséquent à un débit de dose nul, ce qui réduit les risques sanitaires, notamment l'exposition accidentelle d'un travailleur. Cette méthode s'inscrit donc dans une dynamique de réduction des risques radiologiques.

Enfin, un dispositif magnétique permettant de balayer le faisceau incident d'électrons horizontalement et verticalement sur la cible de conversion est mis en place afin d'obtenir un champ d'irradiation présentant une uniformité de  $\pm 1 \%$  sur une surface d'environ  $1000 \text{ cm}^2$  à 3 m de la cible. Cette uniformité autorise le placement de plusieurs appareils de mesure simultanément dans le champ d'irradiation afin d'accroître la productivité du procédé de vérification de l'étalonnage. ATRON a pour cela conçu en collaboration avec le Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen, un passeur d'échantillons sur lequel les instruments de mesure sont positionnés avec une tolérance de 1 mm.

Les principaux obstacles liés à la mise en œuvre de cette méthode relèvent de la maîtrise de la source de rayonnements ionisants, dont la justesse et la précision de la mesure du courant et de la tension sont nécessaires à garantir la stabilité et la reproductibilité d'une séquence d'irradiation.

Pour répondre à ces difficultés, nous avons imaginé une chaîne de mesure et d'asservissement de l'accélérateur d'électrons et de sa source.

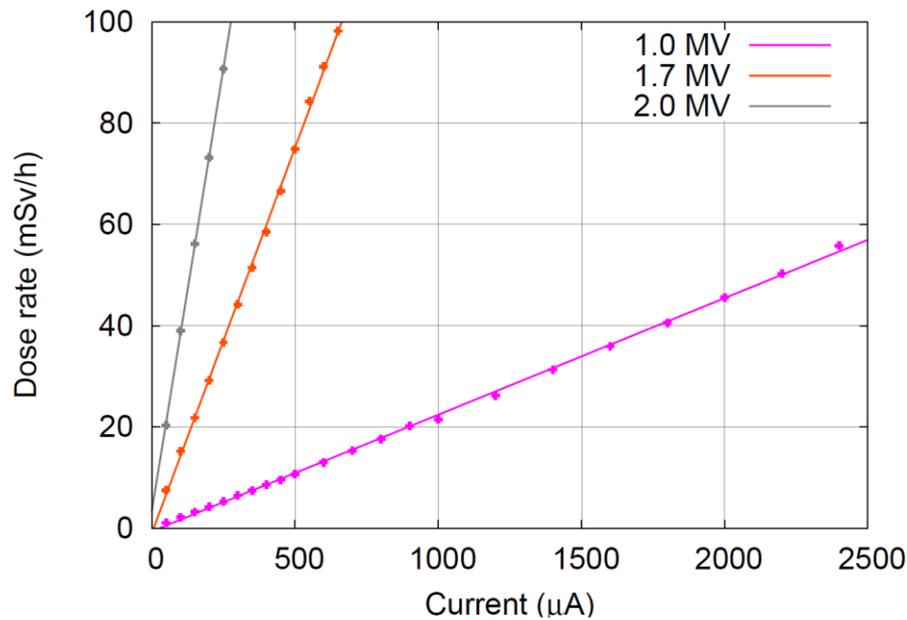
Une chambre d'ionisation fonctionnant en transmission, développée en collaboration avec le Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen, est placée au contact de la cible de conversion pour assurer le contrôle du faisceau à faible courant avec une précision plus importante que le système proposé par le constructeur dans le but d'atteindre des courants très faibles. Cette mesure agit sur la source d'électrons primaires grâce à une boucle de rétroaction pour la réguler avec une précision meilleure que 2 %.

Deux chambres d'ionisation sphériques d'un litre, associées à deux électromètres de référence, sont aussi positionnées en permanence au niveau du passeur d'échantillons, à proximité des instruments de mesure de rayonnements ionisants en cours de vérification. Elles sont placées de façon symétrique pour vérifier l'uniformisation du champ d'irradiation et permettent de quantifier le débit de dose lors d'une séquence d'irradiation. Elles ont été sélectionnées de telle sorte à obtenir une efficacité de détection importante sur toute la gamme en courant et en énergie du faisceau produit par l'accélérateur pour réduire les erreurs de mesure.

Enfin, une chambre d'ionisation, dite de transfert, spécifiquement développée par le CEA LNE LNHB pour ATRON, permet le raccordement à l'étalon national par la mesure du kerma dans l'air. Elle est positionnée dans la salle d'irradiation pour réaliser le contrôle périodique de la source. Elle permet la mesure de la fluence et le calcul des équivalents de dose via les coefficients de conversion monocinétiques fournis par l'ICRU d'une part et le spectre énergétique de la source, déterminé au préalable, d'autre part.

Toutes les données collectées lors d'une séquence d'irradiation sont stockées et conservées et assurent une traçabilité métrologique de chaque instrument de mesure dont la vérification de l'étalonnage a été réalisée par ATRON. Les méthodes et les matériels mis en œuvre, ainsi que la diminution significative des manutentions tendent à améliorer la maîtrise métrologique du procédé.

ATRON a donc l'ambition de mettre à disposition des industriels et des organismes de recherche une nouvelle source de rayonnements ionisants plus réaliste pour la vérification de l'étalonnage des instruments de mesure des rayonnements ionisants. La faisabilité de cette méthode a déjà été validée au CEA LIST LNHB sur un accélérateur linéaire médical [5].



Débits d'équivalent de dose en fonction du courant du faisceau d'électrons  
(Données expérimentales obtenues sur un accélérateur IBA pour trois tensions accélératrices différentes)

De plus, afin de garantir la qualité métrologique des mesures délivrées, ATRON s'inscrit dans une démarche d'accréditation selon le référentiel ISO 17 025 [6].

#### Références :

[1] N. VALENDRU, M. HEBERT

Guide d'application du Référentiel Radioprotection

- thème Métrologie, Mesure de l'exposition externe, février 2014

[2] Arrêté du 21 mai 2010 portant homologation de la décision n°2010-DC-0175 de l'Autorité de Sûreté Nucléaire du 4 février 2010 précisant les modalités techniques et les périodicités des contrôles prévus aux articles R. 4452-12 et R. 4452-13 du code du travail ainsi qu'aux articles R. 1333-7 et R. 1333-95 du code de la santé publique

[3] International Standard ISO 4037-1:1996, ISO 4037-2:1997, ISO 4037-3:1999 : X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy

[4] A. CHAPON, J.-M. BORDY

Vérification de l'étalonnage de radiamètres au moyen d'un accélérateur d'électrons. Congrès nationale de radioprotection SFRP 2015, Reims, juin 2015

[5] D. DUSIAC, M. BOUDIBA, J.-M. BORDY, J. DAURES

Etude pour l'établissement d'une référence de faisceaux photoniques de haute énergie pour la radioprotection. Congrès nationale de radioprotection SFRP 2013, Bordeaux-Lac, juin 2013

[6] ISO / IEC 17 025 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais