

Rayonnements ionisants

Ionising radiation

1. Introduction

Les activités de maintien et de développement des références dans ce domaine sont confiées à deux laboratoires : le laboratoire national de métrologie LNE-LNHB (Laboratoire national Henry Becquerel) au CEA/Saclay et le laboratoire associé LMDN (Laboratoire de Métrologie et de Dosimétrie des Neutrons) à l'IRSN/Cadarache. Elles couvrent la métrologie de l'activité et celle de la dose, pour tous les rayonnements ionisants (photons, neutrons, électrons).

2. LNE-LNHB

En 2007, on notera le renforcement de l'engagement du LNE-LNHB dans les programmes européens. En particulier, le laboratoire a décroché dans le cadre de l'EMRP d'Euramet une participation à deux des projets financés : le premier en curiethérapie s'intitule « *Increasing cancer treatment efficacy using 3D brachytherapy* » et le second en radiothérapie, « *External beam cancer therapy* ».

2.1. Comparaisons et actions internationales

Le LNE-LNHB a organisé conjointement avec le BIPM le premier *Workshop* « *Absorbed dose and air kerma primary standard* », qui s'est déroulé du 9 au 11 mai 2007, à Paris. Il a réuni cinquante experts, issus d'une quinzaine de pays différents.

Les références de kerma dans l'air pour les rayons X de moyenne énergie ont été comparées à celles du BIPM en juin 2007 : ceci fera l'objet d'une publication dans le courant du prochain exercice. A l'issue de ces résultats très satisfaisants, le laboratoire a ajouté une ligne supplémentaire à ces étalonnages, dans la portée détaillée du Cofrac.

On notera également la participation du laboratoire à la comparaison organisée par l'AIEA dans le domaine des mesures pour l'environnement et relative à la détermination de plusieurs radionucléides présents dans les chaînes naturelles des ^{235}U et ^{238}U . Les résultats ont été transmis et la synthèse est prévue pour l'année 2008.

Enfin, on soulignera les quatre participations du laboratoire, dans le cadre du SIR, portant sur les radionucléides suivants : ^{124}Sb , $^{99}\text{Tc}^m$, ^{57}Co et ^{75}Se .

2.2. Métrologie de l'activité

2.2.1. *Étalonnage par traceur Compton (ETC), une nouvelle méthode de mesure primaire d'activité en scintillation liquide*

Le laboratoire a développé une nouvelle façon d'appliquer le modèle à paramètre libre en scintillation liquide à l'aide d'une source de traceur virtuelle créée *in situ* dans le scintillateur mesuré.

La source radioactive est préparée selon la procédure habituelle en scintillation liquide. Cette solution scintillante est exposée à une source gamma mono-énergétique, qui crée temporairement des électrons par effet Compton. Ce sont ces électrons, considérés comme une source virtuelle, qui sont détectés et dont la mesure permet de déduire le rendement lumineux intrinsèque du scintillateur dans ces conditions spécifiques de mesure. La source virtuelle est ensuite supprimée en arrêtant l'exposition aux rayonnements γ externes, et le rendement lumineux intrinsèque précédemment déterminé est employé pour calculer l'efficacité de détection du radionucléide. Cette nouvelle méthode a été nommée « *Étalonnage par traceur Compton* » (ETC) et le système expérimental implémenté est décrit dans la figure 1.

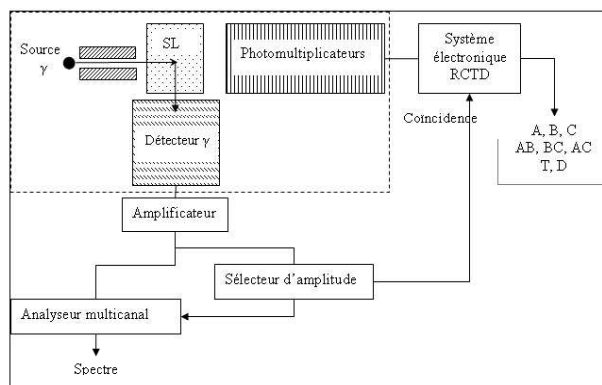


Fig. 1. – Principe d'un compteur à scintillation liquide utilisant un spectromètre Compton.

Cette méthode a été validée par la mesure d'une solution scintillante étalon de tritium. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés à ceux donnés par la technique de mesure traditionnelle RCTD (rapport des coïncidences triples à doubles). Les résultats donnés par les deux méthodes sont identiques pour une valeur du paramètre de non-linéarité du scintillateur. Cependant, la

méthode ETC est, toutes choses égales par ailleurs, moins sensible à ce paramètre que la méthode RCTD classique, donc plus robuste pour une utilisation en système de comparaison.

La méthode ETC présente les principaux avantages suivants :

- le traceur est mesuré exactement dans les mêmes conditions que la source à mesurer ;
- l'efficacité de détection ne dépend pas du taux de comptage de ce traceur, mais seulement de l'analyse de son spectre, qui est accessible expérimentalement avec une résolution qui ne dépend que de celle du détecteur gamma du spectromètre Compton utilisé. De plus, comme la méthode ne dépend pas de l'activité d'un traceur, il n'y a pas de facteur d'incertitude lié à l'activité d'un étalon à prendre en compte.

Dans cette méthode, le rendement de détection peut également être calculé en employant la méthode RCTD classique à partir du même jeu de données expérimentales. Cela donne une possibilité de contrôle des résultats.

2.2.2. Mesure d'activité massique d'une solution de ^{55}Fe avec un bolomètre magnétique

En 2007, le LNE-LNHB a effectué une première mesure d'activité avec un bolomètre magnétique. C'est la première mesure d'une source enfermée dans l'absorbeur d'un bolomètre magnétique avec traçabilité de la masse de la source.

Une telle conception permet de mesurer une source radioactive avec un angle solide de détection de 4π sr ; tout en absorbant la quasi-totalité (plus de 99 %) des rayonnements ionisants issus de la source. La figure 2 compare la fraction des rayonnements issus d'une source de ^{55}Fe détectée par le bolomètre magnétique avec celle détectée pour un détecteur X à semi-conducteur et pour la scintillation liquide. Le LNE-LNHB a démontré que la technologie des bolomètres magnétiques permettait d'atteindre les performances requises pour avoir accès à des informations sur les schémas de désintégration jusque là inaccessibles avec les détecteurs conventionnels.

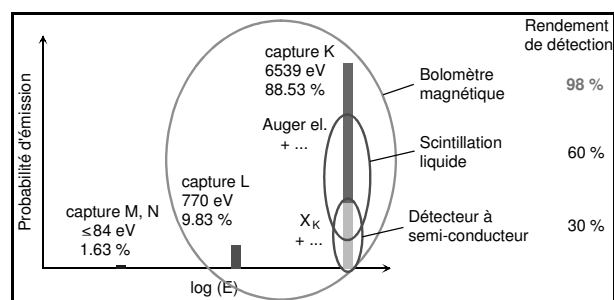


Fig. 2. – Spectre en énergie d'émission du ^{55}Fe avec indication de la fraction des rayonnements détectés avec différentes méthodes de mesure d'activité.

Ce bolomètre magnétique conçu et réalisé par le laboratoire (fig. 3) spécifiquement pour cette mesure est constitué d'un absorbeur en or en contact thermique avec

un senseur paramagnétique en or-erbium. Le détecteur fonctionne à très basse température, entre 10 mK et 50 mK, et en présence d'un faible champ magnétique (quelques milliteslas). L'élévation de la température du détecteur suite à l'absorption d'une particule dans l'absorbeur est traduite en une variation du moment magnétique du senseur. Cette variation est mesurée à l'aide d'un SQUID, un magnétomètre très sensible.

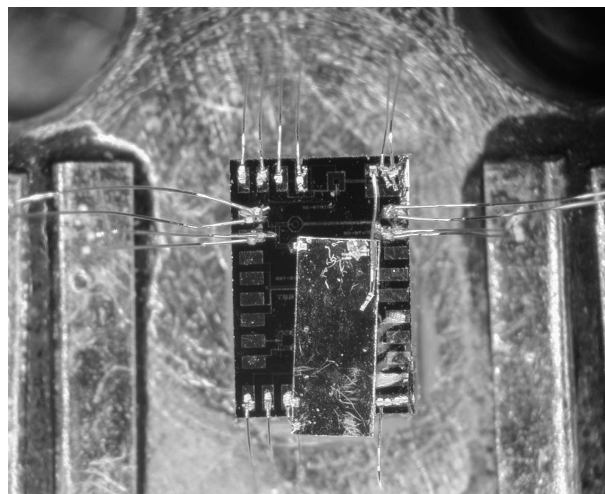


Fig. 3. – Bolomètre contenant une source de ^{55}Fe .

La solution radioactive choisie pour cette mesure est du ^{55}Fe dont l'activité massique a été préalablement déterminée par scintillation liquide. Ce radionucléide émet des photons et des électrons d'énergies comprises entre quelques électronvolts et 6,5 keV. L'épaisseur d'or nécessaire pour arrêter au moins 99,9 % des électrons et photons de 6,5 keV, calculée par des simulations Monte Carlo utilisant le code Penelope, est de 12 μm . Dans la pratique, une feuille d'or d'une épaisseur de 14 μm a été utilisée. Le dimensionnement de cette feuille a par ailleurs été déterminé, en calculant d'une part les capacités thermiques de l'absorbeur et du senseur du bolomètre, d'autre part en estimant le bruit de la chaîne de mesure (du détecteur à la chaîne d'acquisition). La valeur limite supérieure de cette surface est de 1,5 mm \times 1,5 mm ; elle devrait permettre de détecter les événements au delà de 500 eV, ce qui, dans le cas présent, correspond à environ 98 % des désintégrations.

Le résultat de la première mesure d'activité massique avec l'un de ces détecteurs est compatible avec la mesure en scintillation liquide. L'incertitude sur cette première mesure est relativement importante par rapport aux méthodes de mesure d'activité conventionnelles. Elle a été évaluée à 3 %, avec comme facteur prédominant l'incertitude sur la faible masse de solution radioactive déposée sur la feuille de l'absorbeur. Pour espérer gagner sur le niveau des incertitudes, il faut maintenant étudier les possibilités d'augmentation de la quantité de dépôt, et donc de la surface disponible pour celui-ci. Cet aspect est à ce jour encore limité par la conception du dispositif.

2.2.3. Réalisation de nouvelles chambres d'ionisation primaires

Les chambres d'ionisation associées aux faisceaux de ^{60}Co et de ^{137}Cs disponibles au laboratoire constituent les chaînes d'instrumentation primaires pour la détermination des références de kerma dans l'air dans ces différents faisceaux.

Les caractéristiques des matériaux utilisés pour leur réalisation (dimension, forme, pureté) conditionnent le niveau d'incertitude du volume de collection des charges, et donc celui de la mesure elle-même. En effet, toutes les charges créées dans le volume doivent être collectées. Pour cela, la forme du volume doit être extrêmement régulière et lignes de champ électrique (qui délimitent le volume de collection) doivent être les plus parallèles possibles au point de jonction entre la partie sphérique et l'embout.

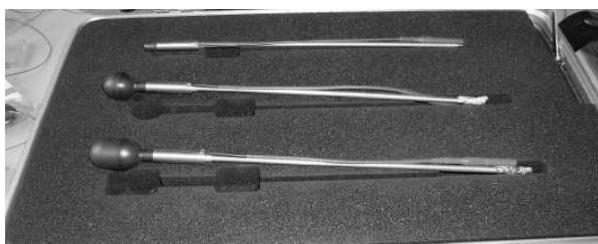


Fig. 4. – Trois chambres d'ionisations cylindro-sphérique (CIRF-CS-001), sphérique (CIRF-SP-001) et manche factice associé.

Le développement de six nouvelles chambres d'ionisation a été engagé en 2006. Trois couples de deux chambres sphériques et cylindro-sphériques (pour chacun desquels la dimension sphérique est identique) ont été fabriqués par une société spécialisée dans l'usinage du graphite (fig. 4).

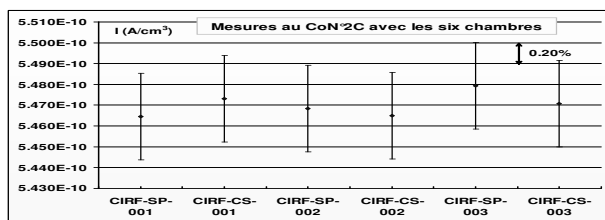


Fig. 5. – Résultats des mesures primaires réalisées dans le faisceau de photons du cobalt 2C avec les différentes chambres d'ionisation.

Ces chambres, une fois assemblées, ont été radiographiées afin de qualifier leur montage. Leurs volumes respectifs ont également été mesurés par l'équipe « longueur » du LNE. Les niveaux de courant de fuite ont été évalués ; la tenue électrique des isolants vérifiée et la tension de polarisation optimale des chambres déterminée. Enfin, les facteurs de correction appliqués à la mesure de kerma dans l'air ont été identifiés et calculés : la figure 5 présente la bonne compatibilité des résultats des mesures primaires réalisées dans le faisceau de photons du cobalt 2C avec les différentes chambres d'ionisation.

2.2.4. Calorimétrie eau

La calorimétrie eau est développée au LNE-LNHB depuis 2003, en complément de la calorimétrie graphite. Cette instrumentation présente l'intérêt d'accéder directement à la mesure de la dose absorbée dans l'eau (milieu de référence en radiothérapie). Elle nécessite un développement spécifique aux contraintes physiques qui lui sont propres : maîtrise des mouvements de convection, pureté de l'eau, mesure de faibles élévations de température...

Une enceinte calorimétrique compacte a été précédemment conçue (fig. 6). Elle est constituée d'une cuve en PMMA à double paroi dans laquelle circule un fluide régulé à 0,01 °C près, par un thermocryostat. L'ensemble est isolé thermiquement par une paroi en polystyrène. Les sondes de température sont constituées de thermistances, insérées dans des capillaires qui sont eux-mêmes positionnés dans des ampoules en quartz, devant le faisceau d'irradiation. La mesure de température est déduite de la mesure de leur résistance par un pont de Wheatstone de précision (l'électronique utilisée est celle développée pour la calorimétrie graphite).

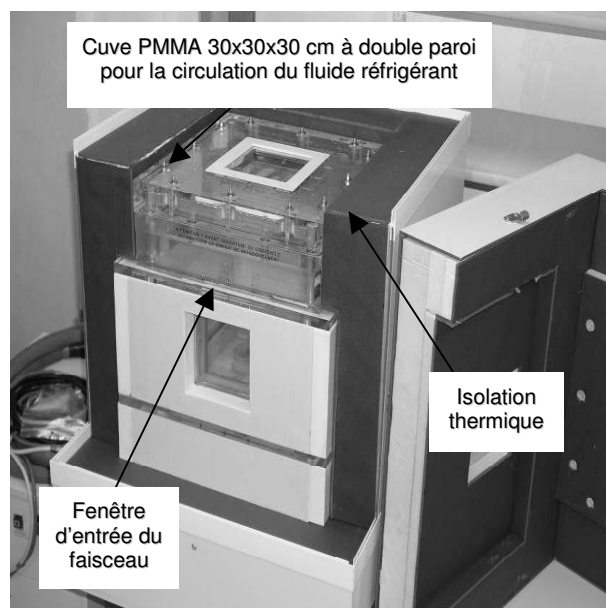


Fig. 6. – Enceinte calorimétrique.

Les sondes de température utilisant ces capillaires en quartz ont été assemblées au début de l'année 2007. L'enceinte du calorimètre eau a ensuite été testée à 4 °C et les cartographies thermiques de l'intérieur de l'enceinte et de la cuve ont été réalisées. Ceci a permis d'identifier les deux principaux points chauds, qui se situent au niveau des fenêtres d'entrée. L'isolation de la fenêtre supérieure a été améliorée en insérant un rideau d'air froid (à 4 °C) devant la fenêtre ; ceci réduira donc les phénomènes de convection dans la cuve du calorimètre. D'autres mouvements de convection, très lents, existent également dans l'ampoule de quartz, mais sont négligeables sur la durée d'une mesure.

Il s'avère, par contre, nécessaire de corriger les effets de la conduction thermique. Ce point a été simulé à l'aide du logiciel de calcul Comsol.

Une première série de mesures sur la ligne Co n° 2C du laboratoire a été réalisée en fin d'année. La dispersion des résultats sur la mesure de la dose absorbée dans l'eau se situe actuellement entre 1 % et 2 %. L'étude, qui se poursuivra sur les deux années à venir, portera en priorité sur la réduction du bruit des sondes de température et la maîtrise des mouvements de convection dans la cuve. L'objectif fixé étant de mettre en œuvre des améliorations conduisant à une incertitude sur la mesure de dose comprise entre 0,3 % et 0,7 %.

3. LNE-IRSN

Le laboratoire de Métrologie et de Dosimétrie des Neutrons (IRSN/DRPH/SDE/LMDN) de l'IRSN est un laboratoire associé au LNE pour les activités en dosimétrie des neutrons. Il est en charge des références neutroniques, ainsi que de leur transfert aux utilisateurs.

3.1. Actions internationales

Après avoir étudié durant l'exercice précédent le remplacement des sources $^{241}\text{Am-Be}$ de l'installation Sigma, le laboratoire prépare maintenant la comparaison

internationale du CCRI sur les champs neutroniques à composante thermique sur cette même installation.

Une autre comparaison avec le NPL et le PTB est également en cours de préparation. Son objectif est de valider le système étalon pour les mesures de fluence qu'est le long compteur.

3.2. Développement des références

Une nouvelle référence en énergie et fluence, *via* le développement d'un télescope à protons de recul a démarré fin 2006, dans le cadre d'un travail de thèse. L'exercice 2007 a été particulièrement concluant sur ce sujet, puisque deux prototypes sont actuellement en cours de réalisation. Le premier, à base de cellules C-MOS, est réalisé en collaboration avec le LPSC de Strasbourg. Le second, est un détecteur multicanal constitué de modules avec chambres d'ionisation, conçu en collaboration avec l'IN2P3 de Grenoble. Ces deux instruments étant opérationnels dans deux gammes d'énergie distinctes, ils sont complémentaires et associés à l'accélérateur Amande, assureront la référence sur l'ensemble de la gamme en énergie allant de quelques méga-électronvolts à 20 MeV. Ces deux prototypes seront testés en 2008.