

MODELISATIONS DE LA REPONSE SOUS RAYONNEMENTS DE DOSIMETRES ELECTRONIQUES

S. Ménard

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

BP 17 92262 Fontenay-aux-Roses cedex

Les rayonnements neutroniques et photoniques étant indirectement ionisants, l'instrumentation de radioprotection utilisée pour la dosimétrie d'ambiance ou individuelle des travailleurs exposés consiste à détecter les particules chargées secondaires. Leurs natures et leurs distributions spectrales dépendent de l'énergie, de l'angle et du type de rayonnement incident. Simuler, à l'aide de codes Monte Carlo, les interactions et le transport des rayonnements primaires et secondaires dans les détecteurs permet de réduire le nombre de prototypes développés et d'expériences de caractérisations sous rayonnement. De plus, la simulation rend possible la détermination de la réponse de l'instrument pour des configurations d'exposition plus étendues que celles des rayonnements de référence produits en laboratoire.

Le code MCNPX [1] permet de transporter, en plus des photons, électrons et neutrons, les particules chargées plus lourdes que les électrons et de simuler les interactions rayonnement-matière pour un certain nombre de particules (photons, neutrons, protons). Le présent papier se propose de présenter l'intérêt de l'utilisation du code MCNPX dans les phases d'études, de recherches et d'évaluation de l'instrumentation nécessaire à la surveillance dosimétrique. Pour ce faire, la présentation s'appuie sur les résultats de modélisation d'un prototype de compteur proportionnel équivalent tissu (CPET) et du CRAMAL.

I) Présentation des dosimètres

CRAMAL

Le CRAMAL¹ permet de mesurer l'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ et le débit d'équivalent de dose pour les neutrons dans des champs mixtes neutrons/photons. Le CRAMAL, comme la majorité des radiamètres, est une sphère de polyéthylène de 20 cm de diamètre à l'intérieur de laquelle est situé un compteur cylindrique de diamètre 2,5 cm et de longueur 2,5 cm, rempli d'un mélange gazeux d'hélium et de krypton. Une enveloppe de cadmium entoure ce compteur fonctionnant en régime proportionnel et permet de réduire l'influence des neutrons thermiques. Trois types de particules chargées déposent toute ou partie de leur énergie dans le compteur d'hélium. Ce sont les électrons, protons et tritons. Les noyaux de recul mis en mouvement dans le gaz par les diffusions élastiques contribuent également aux

¹ Appareil de radioprotection commercialisé par la société Eurisys Mesures,

dépôts d'énergie dans le gaz. Les contributions des neutrons et des photons primaires et secondaires se superposent. Dissocier ces différentes contributions permet de s'assurer du bon comportement gazeux du compteur (régime proportionnel ou non), et en particulier que le seuil bas en énergie de coupure sur les photons est suffisant. Cette type d'étude présente un grand intérêt dans la mise au point également de l'algorithme de calcul de l'équivalent de dose.

CPET

Un compteur proportionnel équivalent tissu (ET) est constitué d'un détecteur gazeux rempli de gaz ET à basse pression dont les parois sont en plastique ET. Un matériau ET est un mélange principalement d'atomes d'hydrogène, de carbone, d'azote et d'oxygène. Leur utilisation et l'application du principe microdosimétrique permettent de simuler à partir d'une cavité macroscopique remplie d'un gaz à basse pression un site microscopique de tissu humain. La dose absorbée et l'évaluation des équivalents de dose se déduisent des spectres de dépôts d'énergie mesurés. Ce type de détecteur peut être utilisé pour tout type de rayonnement (neutron, photon, proton, beta ...). Les paramètres du détecteur tels que sa géométrie, la pression et composition du gaz conditionnent la réponse sous rayonnements de ce type de compteur. Deux prototypes de CPET sont actuellement étudiés au sein du service de dosimétrie de l'IRSN [2,3]. Le premier possède une géométrie multi-éléments de type nid d'abeilles et simule ainsi 60 sites microscopiques. Le second a une géométrie cylindrique et simule un seul site de 1 μ m. Des études sont actuellement menées pour optimiser les paramètres gazeux et géométriques. Les objectifs sont respectivement pour le CPET multi-éléments l'amélioration de la réponse en terme de dose absorbée [4] et pour le CPET cylindrique l'amélioration de sa réponse en équivalent de dose ambiant.

II) Intérêt du code MCNPX 2.4

CRAMAL

L'étude des différentes contributions de particules chargées au signal du CRAMAL est possible aussi bien expérimentalement que numériquement. Le signal dû aux photons peut être modélisé avec MCNP ou MCNPX. Cette information permet de fixer la coupure en énergie sur les spectres afin de rejeter la majorité des photons issus soit des interactions des neutrons soit des rayonnements primaires. La base de données de sections efficaces évaluées pour l'hélium actuellement disponible est incomplète puisque les distributions de probabilités d'émission des protons et des tritons produits par la capture des neutrons n'y sont pas évalués. De ce fait, une seule simulation MCNPX ne permet pas de déterminer le spectre de dépôts d'énergie dus aux protons et aux tritons. Par contre, une simulation MCNPX avec pour sources des sources isotopes de protons et tritons distribuées uniformément dans le volume d'hélium permet de simuler ces dépôts. Le nombre de particules tirées est déterminé par le nombre de captures calculé dans la première simulation.

Cette information couplée à la simulation de la distribution spectrale due aux photons et aux diffusions élastiques permet ainsi de déterminer le spectre de dépôt d'énergie dans le compteur rempli d'hélium.

CPET

Les bases de données de sections efficaces évaluées pour les matériaux de ce type de détecteur actuellement disponibles permettent de simuler les spectres de dépôts d'énergie dus aux électrons et aux protons produits lors des diffusions élastiques. Toutefois, la modélisation de la contribution due aux particules alpha suppose, comme dans le cas du CRAMAL, de réaliser des simulations en deux temps et d'émettre des hypothèses sur leur caractéristiques d'émission lors des interactions des neutrons avec les noyaux de carbone, oxygène et azote.

Le code MCNPX 2.4 permet de déterminer le paramètre majeur servant à l'application du principe microdosimétrique ; c'est-à-dire le parcours moyen des particules chargées dans le gaz appelé la 'corde moyenne'.

III) Résultats des simulations

CPET

Le spectre de dépôt d'énergie d'une simulation avec une source de neutrons d'énergie 565 keV est comparé sur la figure 1 au spectre expérimental obtenu sur la ligne de faisceau IRSN de l'accélérateur 4MV du CEA de Bruyères-le-Châtel. L'écart observé entre les deux spectres pour des dépôts d'énergie inférieurs à 10 keV est important. Compte-tenu de l'énergie de ces dépôts, une explication possible est qu'ils sont dus à des photons. Les photons produits lors des interactions des neutrons ainsi que les électrons ont été transportés dans les simulations MCNPX 2.4 réalisées. La contribution de ces photons secondaires n'explique pas l'écart. Les photons produisant ces dépôts sont donc des photons incidents. Cela est démontré par les simulations avec le code MCNPX des interactions du faisceau de protons avec la cible de lithium et le support de la cible. Des photons d'énergie 478 keV sont en effet produits et contribuent pour 1/3 en fluence dans la zone d'étalonnage de l'appareil [5]. Lorsque ces photons sont inclus dans le rayonnement incident de la simulation, on obtient le spectre numérique de la figure 2. La différence observée pour les dépôts inférieurs à 10 keV est réduite. Au-dessus de 10 keV, les dépôts sont essentiellement dus aux protons produits dans les diffusions élastiques des neutrons avec les matériaux du détecteur.

Les différences entre les résultats numériques et expérimentaux peuvent s'expliquer par différents facteurs :

- la source neutrons simulée émet perpendiculairement au détecteur et ne tient pas compte de la distribution en énergie et en angle des neutrons dans la zone d'étalonnage,

- les effets de parois, de collection de charges et de résolution en énergie.

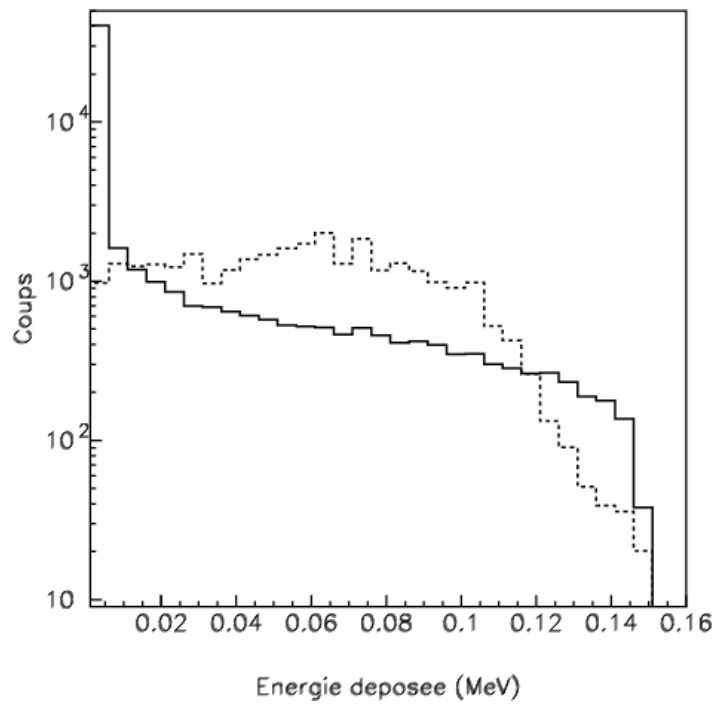


Figure 1 : Spectres de dépôts d'énergie du CPET cylindrique à 565 keV (expérimentaux en continu, numériques en pointillé)

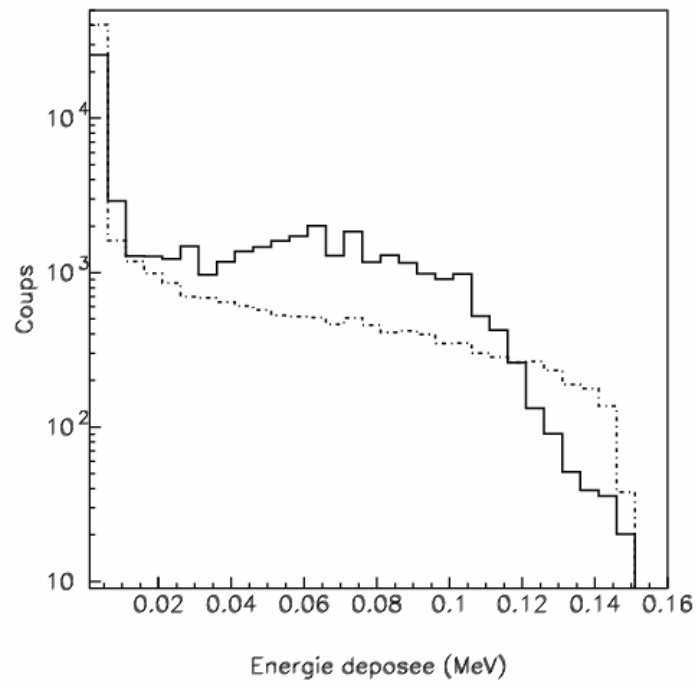


Figure 2 : Spectres de dépôts du CPET pour des neutrons de 565 keV et des photons de 478 keV (expérimental en pointillé, numérique en continu).

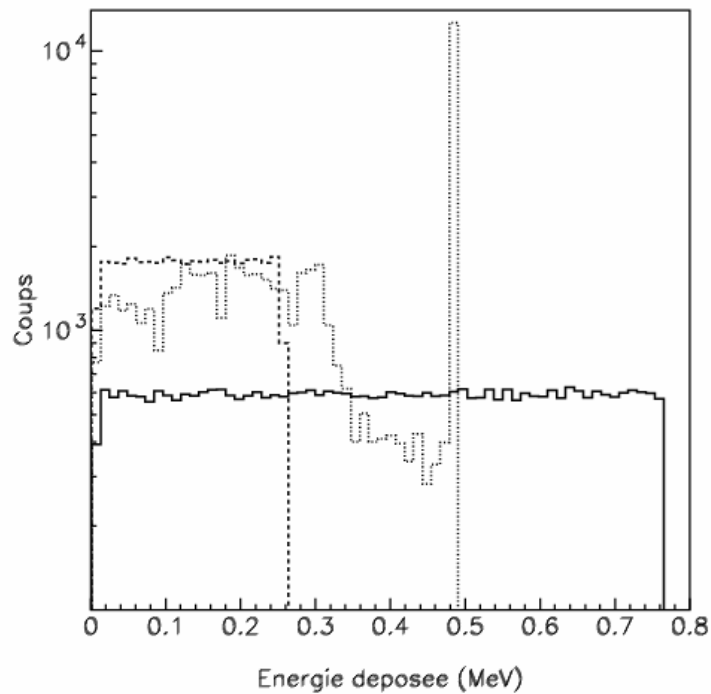


Figure 3 : Spectres de dépôts d'énergie du CRAMAL pour des neutrons de 565 keV (protons en continu, tritons en tiret) et des photons de 478 keV (en pointillé).

CRAMAL

Deux types de résultats ont été exploités. Les premiers concernent le nombre de réactions de capture de neutrons dans le compteur d'hélium. Les seconds sont les spectres de dépôts d'énergie dans le compteur. Les résultats obtenus en fonction de l'énergie des neutrons sont conformes aux résultats parus dans la littérature pour des instruments de radioprotection de même type[6]. Ces résultats peuvent être simulés aussi bien avec le code MCNPX que le code MCNP[7].

Connaissant le nombre de réactions de capture et l'énergie des neutrons capturés, il est possible de simuler le dépôt d'énergie des protons et des tritons dans le gaz avec le code MCNPX. Les aspects de straggling en énergie et en angle sont inclus dans la physique de ce code. Les simulations avec des protons et des tritons donnent pour une énergie de neutrons incidents de 565 keV les résultats présentés dans la figure 3. Comme le champ de rayonnement de la zone d'étalonnage des appareils de l'installation de Bruyères-le-Châtel a une composante photonique importante en fluence, une simulation avec des photons a été également effectuée afin d'estimer l'impact de ces derniers sur la réponse du détecteur. Le résultat obtenu (spectre en pointillés cf figure 3) est différent de celui du CPET dans le sens où ces photons peuvent déposer toute leur énergie dans le compteur.

Toutefois dans ce type de radiamètre, un seuil en énergie déposée est appliqué pour s'affranchir le plus possible de la composante photon. Ce seuil n'étant connu que de l'industriel, il n'est pas possible de conclure à partir des simulations et de ce spectre en particulier l'impact des photons sur la réponse du CRAMAL. De plus, les pics observés pour des photons incidents peuvent faire l'objet d'un traitement spécifique dans l'algorithme.

IV) Conclusion

Le code MCNPX est un outil puissant pour la mise au point de prototypes de détecteurs et pour leur caractérisation sous rayonnements ainsi que la compréhension des réponses obtenues. En effet, le dimensionnement d'écrans de pondération, de la géométrie du détecteur, la possibilité de simuler les spectres attendus permettent de développer dosimètres à partir de multi-détecteurs tels que le Saphydose-n [8] et de comprendre leurs réponses dans diverses configurations de champs de rayonnement. Toutefois, les bases de données de sections efficaces de neutrons ont des limites et de ce fait, il n'est pas possible de simuler le transport de tous les types de rayonnements secondaires de particules chargées dus aux interactions des neutrons.

Le développement de détecteurs pour la dosimétrie des neutrons s'appuie sur des phases de caractérisation des prototypes dans des champs neutroniques de référence. La sensibilité intrinsèque des appareils aux photons est à prendre également en compte lors de la mise au point des dosimètres et radiamètres. Dans certaines situations, il peut par ailleurs être intéressant de disposer d'appareils de

mesures pour des champs mixtes neutrons/photons. Par conséquent, l'incidence de la composante photonique des champs de rayonnements neutroniques de référence (sources, accélérateurs) sur la mesure des neutrons est à estimer.

Les facteurs possibles des différences observées sur les spectres du CPET nécessiteront d'être étudiés avec attention, spécialement les effets des parois et la collection de charges électriques.

Références

[1] MCNPX Users's Manual Version 2.4.0, September 2002 LA-CP-02-408

[2] S. Ménard, Q. Chau, T. Lahaye « Active personal neutron dosimeters based on microdosimetric principles : research studies », Radiat. Prot. Dosim. 99 (1-4) pp375-376 (2002)

[3] S. Ménard, D. Cutarella, T. Lahaye, T. Bolognese-Milsztajn. « Active personal neutron dosimeter based on microdosimetric principles : CIME », Radiat. Prot. Dosim., vol 96 (1-3) pp 265-268 (2001)

[4] C. Louis, S. Ménard « Simulations d'un CPET multi-éléments réalisées avec le code MCNPX », rapport SDOS-2003 à paraître

[5] Base de données pour les protons pour le lithium communiquée par Laurie Waters de l'équipe de développement du code MCNPX de Los Alamos National Laboratory

[6] D.T. Bartlett, R.J Tanner, H. Tagziria and D.J. Thomas, “ Response Characteristics of Neutron Survey Instruments, NRPB-R333, 2001

[7] MCNP Version 4C LA-13709-M

[8] Communication de T. Lahaye sur l' « Intérêt de la dosimétrie numérique en radioprotection : moyen de substitution ou de consolidation des mesures ? »