

# Etudes du dépôt d'énergie dans le noyau d'un calorimètre dédié à la mesure de l'échauffement nucléaire.

H. AMHARRAK<sup>1\*</sup>, C. REYNARD-CARETTE<sup>1</sup>, A. LYOUSSI<sup>2</sup>, M. CARETTE<sup>1</sup>, D. FOURMENTEL<sup>2</sup>, J. BRUN<sup>1</sup>, C. DE VITA<sup>1</sup>, J-F. VILLARD<sup>2</sup>, P. GUIMBAL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Aix Marseille Université, CNRS, Université de Toulon, IM2NP UMR 7334, 13397, Marseille, France

<sup>2</sup>CEA, DEN, DER, Laboratoire de dosimétrie, capteurs et instrumentation, Cadarache, F-13108 Saint Paul lez Durance, France

<sup>3</sup>CEA, DEN, DER, SRJH, Cadarache, F-13108 Saint Paul lez Durance, France

\*Auteur correspondant : [hicham.amharrak@univ-amu.fr](mailto:hicham.amharrak@univ-amu.fr)

**Résumé** - L'échauffement nucléaire (exprimé généralement en W/g) constitue un paramètre clé pour le dimensionnement thermique des expériences, sur les matériaux et les combustibles, réalisées dans les canaux expérimentaux des réacteurs d'irradiation tels que le réacteur OSIRIS du CEA-Saclay ou le futur Réacteur Jules Horowitz (RJH) sur Cadarache. Les mesures en pile de référence de cet échauffement nucléaire se font notamment à l'aide de calorimètres radiométriques différentiels non adiabatiques intégrant un noyau sensible en graphite. Ces mesures sont alors exploitées et transposées à d'autres matériaux, d'autres géométries, ou d'autres conditions expérimentales afin de prédire l'échauffement nucléaire et les conditions thermiques induites dans les dispositifs d'irradiation. Ce papier focalise sur l'influence de l'épaisseur et de la nature des matériaux environnant, de la nature du noyau, de la forme de la source sur le dépôt d'énergie dans le noyau sensible d'un calorimètre.

## Nomenclature

$E_\gamma$	Energie des photons, MeV	$\mu_r/\rho$	Coefficient de transfert massique, $\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$
K	KERMA, $\text{MeV}.\text{g}^{-1}$	$\phi$	Fluence des photons, $\gamma.\text{cm}^{-2}$
D	Energie massique déposée, $\text{MeV}.\text{g}^{-1}$		

## 1. Contexte et objectifs

L'échauffement nucléaire (en W/g) représente l'énergie calorifique dégagée dans un matériau soumis à un flux de rayonnement, correspondant à une augmentation du niveau d'équilibre de l'agitation thermique des électrons constituant ce matériau. Lors d'une fission nucléaire, une partie de l'énergie produite est absorbée localement par les particules chargées, tandis qu'une autre partie de l'énergie est transportée hors du site de la réaction par les photons, les neutrons et les particules  $\beta^-$  émises. Les photons et les neutrons émis interagissent alors avec la matière et produisent un flux de particules chargées, qui se ralentit dans la matière progressivement jusqu'à l'équilibre thermique en déposant de l'énergie.

La quantité d'énergie dissipée dans le cœur d'un réacteur est très variable. Elle dépend notamment de l'endroit de l'interaction, du type de rayonnement incident, du type d'interaction et de la nature du matériau cible [1]. En dehors des éléments combustibles, ceux sont les rayonnements qui sortent du combustible, notamment les photons ( $\gamma$  ou X), les neutrons et les particules chargées légères (électrons, beta), qui déposent leurs énergies dans la matière. Les échauffements nucléaires sont parmi ceux qui suscitent actuellement énormément d'intérêt, leurs mesures étant d'importance dans les réacteurs de recherche d'irradiation MTR « *Material Testing Reactors* ». Ce besoin est généré en particulier par le futur réacteur d'irradiation Jules Horowitz

(RJH), dont la construction est actuellement en cours sur le site du CEA<sup>1</sup>-Cadarache, pour lequel la connaissance des échauffements nucléaires est nécessaire pour dimensionner le plus finement thermiquement et mécaniquement les dispositifs d'irradiation accueillants les échantillons à étudier sous rayonnement. En effet, il est attendu des niveaux d'échauffement atteignant 20 W/g pour une puissance nominale de 100 MWth, ce qui va bien au-delà des niveaux d'échauffements maximum de 13 W/g atteints actuellement dans le réacteur OSIRIS du CEA-Saclay [2].

Afin d'améliorer in fine la qualification de schémas de calcul de l'échauffement nucléaire au sein des canaux expérimentaux du réacteur RJH, dès son démarrage, un programme de recherche commun entre le CEA et l'Université d'Aix-Marseille, dénommé IN-CORE « *Instrumentation for Nuclear radiation and Calorimetry On line in REactor* » [3], est mené depuis fin 2009. Ce programme a un double objectif. Le premier objectif est de développer un nouveau dispositif CARMEN (*Calorimétrie en Réacteur et Mesures des Emissions Nucléaires*). Ce dispositif permettra de mesurer en ligne simultanément l'échauffement nucléaire, les flux neutroniques et les flux photoniques dans les emplacements expérimentaux des canaux du réacteur RJH au moyen de différents détecteurs [4]. Le second objectif porte sur l'optimisation de la méthode de mesure qui permet de quantifier directement l'échauffement nucléaire : la calorimétrie radiométrique (du capteur à la méthode d'étalonnage) [4]. Une première étape du programme IN-CORE s'est concrétisée par la réalisation d'une première version du dispositif dit CARMEN-1 adaptée à la cartographie des conditions d'irradiation du réacteur OSIRIS contenant en particulier un calorimètre dont la sensibilité a été augmentée pour des expériences en périphérie [4-7]. L'échauffement nucléaire est souvent estimé par la grandeur KERMA (*Kinetic Energy Released per unit Mass*) : l'énergie transmise par unité de masse sous forme d'énergie cinétique aux particules chargées, qui nécessite un calcul Monte Carlo en mode neutron (échauffement neutronique) ou en mode neutron-photon (échauffement photonique) [8-9]. Cependant cette estimation n'est représentative de l'échauffement que lorsque l'équilibre des particules chargées est atteint et dans le cas d'un système constitué d'un seul matériau. Par conséquent, une nouvelle approche de cette estimation est considérée dans cette étude en calculant également une autre grandeur toujours représentative de l'échauffement : l'énergie massique déposée par les particules chargées générées. La détermination de cette grandeur nécessite alors un calcul plus complet en mode neutron-photon-électron.

Ce papier focalise donc sur l'estimation, de l'échauffement dû aux gammas prompts, par ces deux grandeurs (KERMA et énergie massique déposée). Ces grandeurs sont calculées par des simulations Monte Carlo au moyen du code de transport MCNP « *Monte Carlo N-Particle* » [10]. Elles sont déterminées dans le cas du calorimètre différentiel intégré dans le dispositif de mesure CARMEN-1, qui a été irradié en périphérie du réacteur OSIRIS en 2012. Ainsi, après avoir détaillé la modélisation de la géométrie complète du capteur, l'impact de l'épaisseur et du type de matériaux entourant le noyau du calorimètre sera déterminé sur ces grandeurs. Ensuite, l'influence de la nature du noyau sur celles-ci sera étudiée pour différentes formes de source. Les résultats de ces deux grandeurs seront comparés aux résultats obtenus pour un noyau de référence en graphite. Enfin, ces résultats seront discutés et des pistes d'optimisations seront données.

## **2. Modélisation de l'échauffement nucléaire dans les réacteurs MTR**

Ce paragraphe est consacré à la modélisation de l'échauffement photonique dans le calorimètre différentiel du dispositif CARMEN-1. Cette modélisation a été réalisée à l'aide du code de transport MCNP.

### **2.1. Origine de l'échauffement nucléaire**

Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire génère un très grand nombre de particules : neutrons, photons ( $\gamma$ , X, freinage), particules chargées légères (électron et positon), particules chargées lourdes (fragments de fissions, proton, alpha,...). Après leur émission, toutes ces particules se transportent et déposent une partie de leur énergie par des interactions successives

---

<sup>1</sup> Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives

avec les noyaux et les atomes constituant les matériaux du réacteur. Ces dépôts d'énergie successifs créent ainsi des échauffements locaux qui se traduiront par une élévation de la température des matériaux.

Lors de la réaction de fission, une partie de l'énergie produite est absorbée localement par les fragments de fission, tandis qu'une autre partie est transportée hors du site de la réaction par les photons, les neutrons et les particules  $\beta^-$ . Les photons et les neutrons émis interagissent avec la matière et produisent un flux de particules chargées qui déposent localement leur énergie.

Les échauffements des matériaux autres que le combustible ont trois composantes :

- ✓ Les photons prompts (de fission, capture et diffusion), constituent la composante prépondérante [9]. Le dépôt d'énergie est alors issu des interactions photon-matière par effets photoélectrique, Compton et création de paires ;
- ✓ Les photons retardés, par désintégration radioactive des produits de fission ;
- ✓ Les neutrons sont souvent minoritaires; ils proviennent des réactions suivantes : diffusions élastiques et inélastiques des neutrons; désintégrations  $\beta^-$  suites aux captures radiatives; réactions (neutron, gamma) ou (neutron, proton).

Donc, une partie de l'énergie transportée par les photons est transférée aux électrons via des interactions. L'énergie transmise par unité de masse sous forme d'énergie cinétique aux électrons correspond à la grandeur KERMA. Par ailleurs les électrons générés déposent leur énergie dans le milieu : cette énergie massique déposée correspond à la dose absorbée. A l'équilibre électronique le KERMA et la dose absorbée sont égaux.

Ce papier focalise sur l'étude du dépôt d'énergie dû uniquement aux photons prompts.

Le KERMA photon, exprimé en MeV/g, est donné par la relation :

$$K = \int_{E_\gamma} \phi(E_\gamma) \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \cdot E_\gamma \cdot dE_\gamma \quad (1)$$

Avec :  $\phi$  est la fluence des photons (en  $\text{cm}^{-2}$ ),  $E_\gamma$  est l'énergie des photons (MeV), et  $\left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)$  est le coefficient de transfert d'énergie massique des photons ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ).

Lorsque l'équilibre des électrons secondaires mis en mouvement est réalisé, une relation s'établit entre le KERMA et l'énergie massique déposée :

$$D = K \cdot (1 - g) \quad (2)$$

Ou  $g$  représente la fraction d'énergie emportée par rayonnement de freinage.

## 2.2. Description du calorimètre différentiel intégré dans le dispositif CARMEN-1

Le calorimètre différentiel est constitué de deux éprouvettes de même géométrie; une éprouvette de référence « vide » (sans noyau) et une éprouvette « pleine » contenant l'échantillon de graphite dans lequel on veut mesurer l'échauffement nucléaire. La différence d'échauffements des deux éprouvettes, voyant les mêmes flux photonique et neutronique, renseigne alors sur l'échauffement nucléaire dans l'échantillon de graphite.

Le calorimètre du dispositif de mesure CARMEN-1 se compose d'un lot de deux éprouvettes superposées enfermées dans une enveloppe en acier inox de 0,7 mm d'épaisseur totale remplie d'azote (enveloppe de 0,5 mm d'épaisseur + entretoise de 0,2 mm d'épaisseur). Ces deux éprouvettes sont de géométrie et de taille identiques, elles ont chacune une longueur de 79 mm, leur structure est en aluminium. Chacune d'elles est constituée de trois parties du haut vers le bas (cf. figure 1) et contient deux thermocouples de type K :

- ✓ La tête cylindrique comporte plusieurs éléments assemblés de manière concentrique.
- ✓ Le piédestal qui correspond à un barreau cylindrique d'aluminium de 1 mm de rayon et de 40 mm de longueur.
- ✓ La base également en aluminium et de forme cylindrique de 8,5 mm de rayon et de 15 mm de longueur.

La tête de chaque éprouvette est constituée :

- ✓ D'une résistance chauffante (au centre), utilisée pour étalonner le capteur. Cette résistance est réalisée à partir d'une perle d'alumine de 20 mm de hauteur et d'un diamètre de 2,8 mm; percée de 8 trous équidistants, et bobinée avec du fil de constantan.
- ✓ D'une pièce au design particulier réalisée en aluminium afin de favoriser les transferts thermiques, en périphérie externe de la résistance.
- ✓ D'un cylindre creux de 19,8 mm de hauteur, de 3,5 mm de diamètre interne et de 8 mm de diamètre externe contenant ou non le noyau de graphite, en périphérie externe de cette pièce.
- ✓ D'une partie annulaire cylindrique prolongée par un cône raccordé au piédestal.

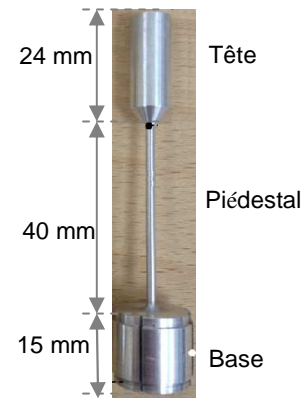


Figure 1 : Eprouvette du calorimètre du dispositif CARMEN-1

### 2.3. Modélisation du calorimètre différentiel sous le code de transport MCNP

Afin de modéliser le calorimètre du dispositif CARMEN-1, le code de transport MCNP a été utilisé. Ce paragraphe présente la modélisation géométrique de l'éprouvette considérée (éprouvette pleine) et de la modélisation physique associée.

#### 2.3.1. Modélisation géométrique du calorimètre

La géométrie du modèle est décrite dans le fichier d'entrée du code, suivant deux phases successives. Dans un premier temps, il s'agit de déterminer toutes les surfaces et leurs axes associés. Dans un second temps, on construit la géométrie zone par zone, à partir d'unions, d'intersections ou d'exclusions de ces surfaces. Le modèle du calorimètre différentiel tient compte de la géométrie complète de l'éprouvette avec l'échantillon de graphite mais également des matériaux qui entourent l'éprouvette.

Les coupes axiale et radiale du modèle pris en compte dans cette étude sont illustrées dans les figures 2 et 3.

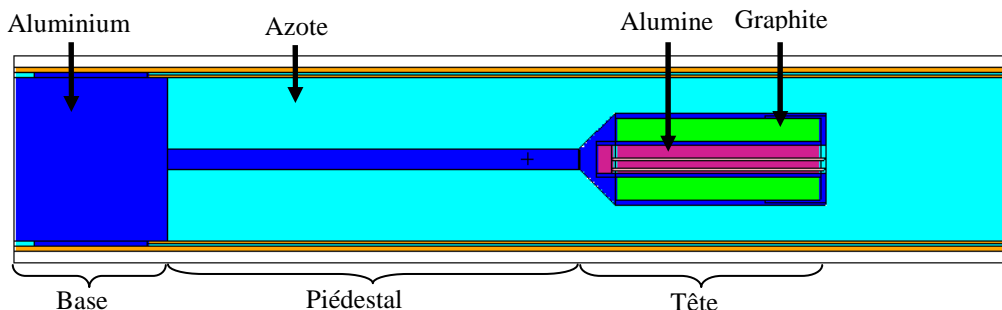


Figure 2 : Coupe axiale de l'éprouvette pleine du dispositif CARMEN-1

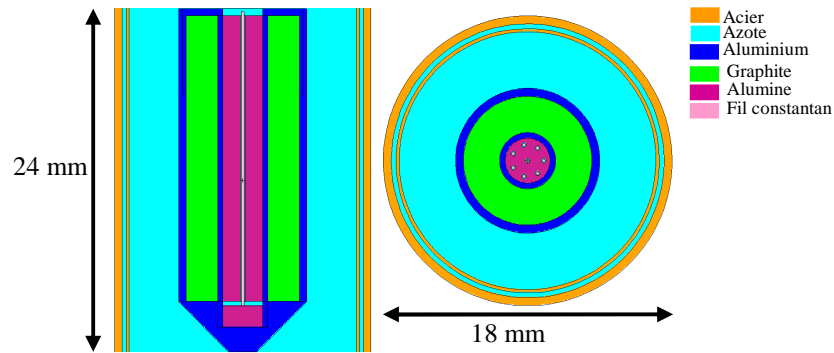


Figure 3 : Coupes axiale (à gauche) et radiale (à droite) au niveau de la tête de l'éprouvette pleine

### 2.3.2. Modélisation physique du calorimètre

La modélisation physique comprend la définition des matériaux de chaque cellule et les bibliothèques de données nucléaires associées (sections efficaces d'interaction rayonnement-matière). Les caractéristiques de la source de particules sont ensuite décrites en fonction de sa nature, sa position, son intensité, sa répartition énergétique, et sa direction d'émission. Uniquement les photons prompts sont pris en compte dans cette étude. Enfin, il est nécessaire de définir le type de résultat souhaité ou « Tally » à calculer par le code. En effet, le code permet d'évaluer des grandeurs telles que des flux, des dépôts d'énergie en différents points, surfaces ou volumes. Les résultats de sortie du code sont systématiquement normalisés par particules sources (/p-src). Afin d'évaluer le dépôt d'énergie et le KERMA à partir d'un spectre photonique comme donnée d'entrée, le calcul MCNP en mode photon-électron est nécessaire. Les calculs effectués font l'objet d'un certain nombre d'hypothèses et de limitations. En effet, le code ne poursuit le transport des particules qu'au delà d'un certain seuil énergétique, et nous faisons l'hypothèse que seule la zone d'intérêt modélisée contribue au dépôt d'énergie dans le noyau. La figure 4 représente les spectres des photons prompts (de fission, capture et diffusion) obtenus dans les 4 emplacements en périphérie du réacteur OSIRIS. Ces spectres ont été utilisés comme source d'entrée dans le modèle.

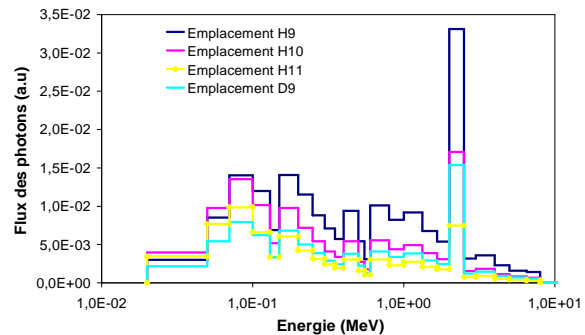


Figure 4 : Spectres des photons  $\gamma$  prompts à différents emplacements en périphérie d'OSIRIS

## 3. Etudes paramétriques sur l'énergie déposée dans le calorimètre

Les résultats de simulation présentés dans ce paragraphe concernent les études paramétriques du dépôt d'énergie intégré dans le noyau en fonction de l'épaisseur et de la nature de l'enveloppe, de la nature du noyau et des matériaux de structure, et de l'énergie et du type de la source photonique. L'échauffement photonique dans le noyau a été estimé à la fois par la grandeur KERMA et l'énergie massique déposée. Le spectre des photons prompts en périphérie d'OSIRIS « emplacement H9 », a été distribué sur une surface cylindrique.

### 3.1. Influence de l'épaisseur de l'enveloppe en acier

Le KERMA dépend du flux des photons à l'emplacement du calcul, de l'énergie des photons, et du coefficient de transfert massique ( $\mu_{tr}/\rho$ ). Par contre, l'énergie massique déposée dépend du pouvoir d'arrêt massique ( $S/\rho$ ) des électrons générés dans les matériaux environnants. D'où l'importance de tenir compte, dans le modèle, de la géométrie complète de l'éprouvette, mais également des matériaux qui entourent l'éprouvette et notamment l'enveloppe en acier. Afin d'étudier l'influence de l'épaisseur de l'enveloppe en acier sur le KERMA et sur l'énergie

déposée, nous avons fait varier l'épaisseur de cette dernière, et nous avons calculé le KERMA et l'énergie déposée dans le noyau. Les résultats de simulation obtenus sont tracés dans le noyau de graphite (cf. figure 5), et dans les différents éléments de l'éprouvette « base, piédestal et noyau » après normalisation par la valeur maximale (cf. figure 6).

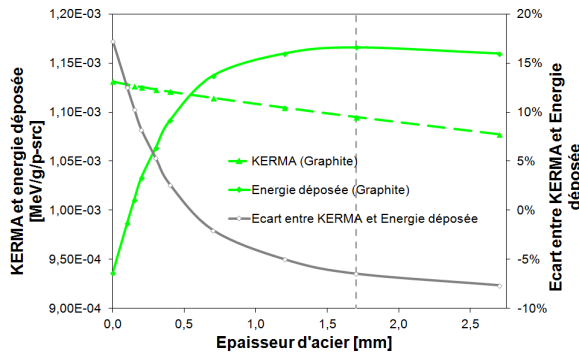


Figure 5 : Comparaison entre le KERMA et l'énergie massique déposée

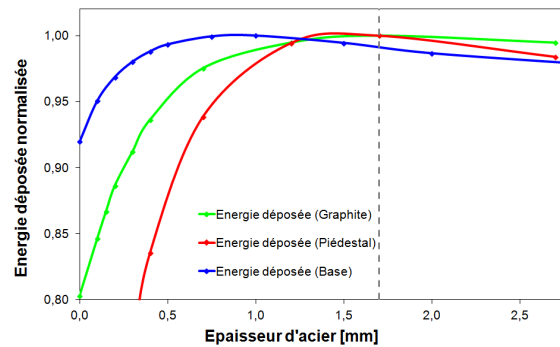


Figure 6 : Variation de l'énergie déposée au niveau de la tête, du piédestal et de la base

D'après la figure 5, l'atténuation des photons à travers l'épaisseur d'acier se traduit par une diminution du KERMA dans le noyau graphite. En absence de l'enveloppe, la tête du calorimètre se trouverait environnée de l'azote uniquement, et l'énergie déposée dans le noyau diminuerait considérablement (cas étudié mais non réaliste). D'après cette étude, l'enveloppe totale en acier doit mesurer au moins 1,7 mm pour atteindre l'équilibre électronique optimal. Cette épaisseur est également suffisante pour atteindre l'équilibre dans le piédestal et dans la base de l'éprouvette (cf. figure 6). Donc, l'épaisseur de l'enveloppe de la configuration actuelle ne permet pas d'atteindre les conditions d'équilibre électronique. Ceci génère une erreur de 2,5 % sur l'énergie déposée.

### 3.2. Influence de la nature des matériaux

#### 3.2.1. Influence de la nature du matériau de l'enveloppe

Afin d'étudier l'influence de la nature du matériau de l'enveloppe sur l'énergie déposée et sur le KERMA dans le noyau, nous avons testé d'autres matériaux tels que le graphite, l'aluminium, le zirconium et le bismuth.

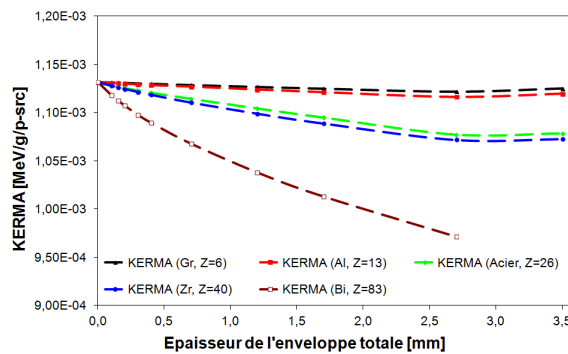


Figure 7 : KERMA en fonction de l'épaisseur de l'enveloppe pour différents matériaux

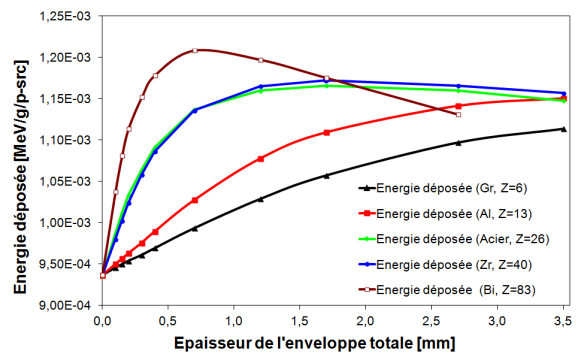


Figure 8 : Energie massique déposée selon l'épaisseur de l'enveloppe pour divers matériaux

D'après la figure 7, l'atténuation des photons gamma à travers l'épaisseur de l'enveloppe se traduit par une diminution du KERMA dans le noyau graphite lorsque le numéro atomique augmente. En effet, plus la densité du matériau de l'enveloppe augmente, plus l'épaisseur nécessaire pour atteindre l'équilibre électronique diminue. Cette épaisseur correspond au libre parcours moyen des électrons dans chaque type de matériaux. D'après cette étude (cf. figure 8),

une épaisseur de 0,7 mm en Bismuth est suffisante pour atteindre l'équilibre électronique contre 1,7 mm dans le cas de l'acier et du zirconium. Par contre, il faut au moins 3,5 mm d'épaisseur dans le cas de l'aluminium et du graphite. La figure 9 représente l'évolution du KERMA et de l'énergie massique déposée dans le noyau de graphite en fonction du numéro atomique Z du matériau de l'enveloppe pour une épaisseur de 0,7 mm (configuration réelle). On constate un écart de 14,7 % sur l'énergie massique déposée entre une enveloppe en acier et une en aluminium. Le choix de l'acier permet de s'approcher des conditions d'équilibre par rapport à l'aluminium, donc ceci permet de minimiser l'erreur sur l'énergie déposée.

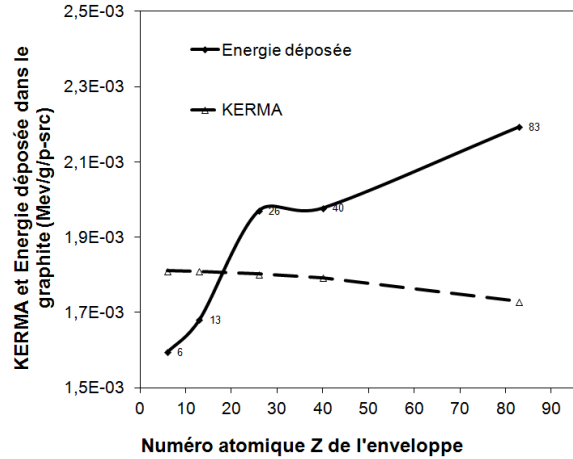


Figure 9 : Evolution du KERMA et de l'énergie déposée en fonction du numéro atomique Z de l'enveloppe

### 3.2.2. Influence de la nature du matériau de l'éprouvette

L'influence de la nature du matériau de la structure du calorimètre sur le KERMA et l'énergie massique déposée dans le noyau graphite est illustrée dans la figure 10. D'après cette figure, on constate que l'atténuation du flux gamma à travers les différents matériaux se traduit par une diminution du KERMA en fonction de Z. En ce qui concerne l'énergie massique déposée dans le noyau de graphite, un faible écart, de l'ordre de 3 %, est observé entre une structure en aluminium et une en acier. Cependant dans le cas des échauffements élevés, l'aluminium sera préférable du fait de sa faible densité (plus faible masse de structure, donc plus faible échauffement total de structure engendré et donc plus faible température atteintes).

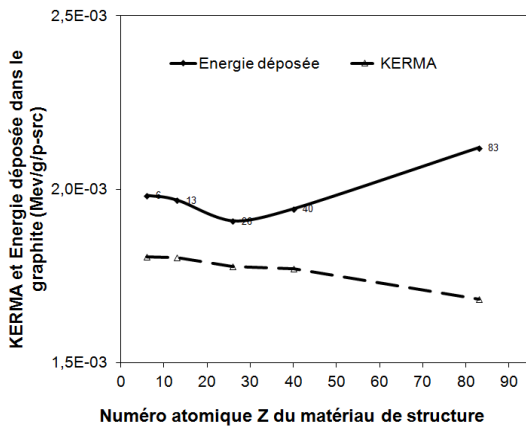


Figure 10 : Evolution du KERMA et de l'énergie déposée selon le matériau de structure

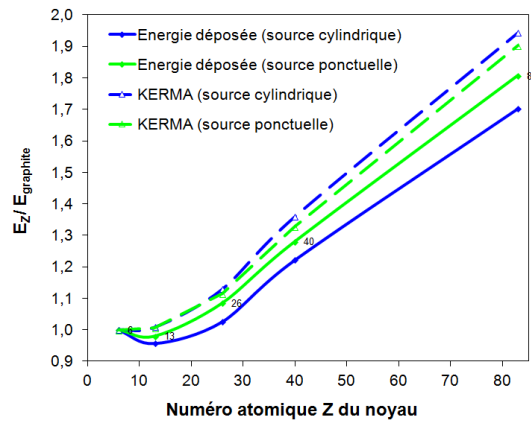


Figure 11 : Evolution du KERMA et de l'énergie déposée en fonction du Z du noyau

Afin d'exploiter les résultats dans le noyau de graphite et de les transposer à d'autres noyaux sensibles, nous avons changé la nature de celui-ci. La figure 11 illustre l'évolution du KERMA et de l'énergie massique déposée en fonction du Z du noyau dans le cas de deux types de source photonique (cylindrique ou ponctuelle). D'après ces résultats, on constate que plus Z augmente, plus l'écart entre le KERMA et l'énergie massique déposée augmente quelque soit le type de source. Cela s'explique par la contribution des électrons générés dans le noyau. Donc, pour mesurer des faibles échauffements, il est préférable d'utiliser un noyau de Z plus élevé afin d'augmenter le dépôt d'énergie.

## 4. Conclusion et perspectives

Une étude paramétrique portant sur le KERMA et l'énergie déposée dans le calorimètre différentiel intégré dans le dispositif de mesure CARMEN-1 a été effectuée en fonction de



l'épaisseur et de la nature de l'enveloppe totale qui entoure le capteur, de la nature du noyau et de la structure, ainsi que du type de source photonique. On a constaté un écart non négligeable entre la valeur de l'échauffement estimée par ces deux grandeurs (KERMA, énergie massique déposée). Ces résultats confirment la nécessité d'évaluer l'échauffement par la grandeur énergie massique déposée par unité de temps. Cette étude montre que l'épaisseur de l'enveloppe du calorimètre actuellement en acier ne permet pas de respecter les conditions d'équilibre électronique. Ceci génère une erreur de 2,5 %. Cependant le choix de l'acier est plus favorable que celui de l'aluminium. Cette étude a montré par ailleurs que la nature des matériaux du calorimètre pourrait être adaptée en fonction de la gamme d'échauffement ciblée. Par exemple, dans le cas d'un faible échauffement, un matériau de numéro atomique élevé sera à privilégier pour le noyau. Cette étude va être d'une part poursuivie par des travaux sur l'éprouvette de référence (éprouvette vide) et complétée d'autre part par le calcul des profils locaux axiaux et radiaux des énergies déposées (au lieu des énergies déposées intégrées). Ces résultats seront alors utilisés comme termes source dans l'équation de la chaleur afin d'étudier le comportement thermique de différents designs de calorimètre.

## Références

- [1] M. Varvayanni, N. Catsaros, M. Antonopoulos-Domis, Evaluation of nuclear heating of small samples in a research reactor core, *Annals of Nuclear Energy* 35, pp. 1414-1420, 2008.
- [2] H. Carcreff, V. Clouté-Cazalaa et L. Salmon, Development, Calibration, and Experimental Results Obtained With an Innovative Calorimeter (CALMOS) for Nuclear Heating Measurements, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 59 (2012) 1369-1376.
- [3] A. Lyoussi, D. Fourmentel, J-F. Villard, J-Y. Malo, P. Guimbal, H. Carcreff, C. Gonnier, G. Bignan, J.-P. Chauvin, C. Reynard-Carette, J. Brun, O. Merroun, M. Carette, M. Muraglia, A. Janulyte, Y. Zerega et J. André, Advanced methodology and instrumentation for accurate on line measurements of neutron, photon and nuclear heating parameters inside Jules Horowitz MTR Reactor, *Trans. of European Research Reactor Conference (RRFM 2012)*, Prague, Czech Republic, 18-22 March 2012.
- [4] D. Fourmentel, C. Reynard-Carette, A. Lyoussi, J-F. Villard, J-Y. Malo, M. Carette, J. Brun, P. Guimbal, Y. Zerega, Nuclear Heating Measurements in Material Testing Reactor: a Comparison Between a Differential Calorimeter And a Gamma Thermometer, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 60 (2013) 328-335.
- [5] J. Brun, C. Reynard-Carette, A. Lyoussi, O. Merroun, M. Carette, A. Janulyte, Y. Zerega, J. Andre, G. Bignan, J-P. Chauvin, D. Fourmentel, C. Gonnier, P. Guimbal, J-Y. Malo and J-F. Villard, Numerical and experimental calibration of calorimetric sample cell dedicated to nuclear heating measurements", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 59 (2012) 3173-3179.
- [6] J. Brun, C. De Vita, C. Reynard-Carette, A. Lyoussi, M. Carette, M. Muraglia, Etude expérimentale des échanges thermiques dans un calorimètre différentiel non adiabatique pour la mesure d'échauffements nucléaires, Congrès annuel de la Société Française de Thermique, SFT 2013, 28 au 31 mai 2013, Gérardmer, France.
- [7] J. Brun, C. Reynard-Carette, A. Lyoussi, C. De Vita, M. Carette, M. Muraglia, D. Fourmentel, P. Guimbal, J-F. Villard, Comparison of the Thermal Response of Two Calorimetric Cells Dedicated to Nuclear Heating Measurements during Calibration, ANIMMA'2013, Marseille, 2013.
- [8] B.M. Makgopa, M. Belal, Benchmark of heat deposition measurement techniques in the SAFARI-1 reactor using MCNP5, *Transaction RRFM 2009* (Vienna, 22-25 March 2009).
- [9] F. Malouch, "Development and Experimental Validation of a Calculation Scheme for Nuclear Heating Evaluation in the Core of the OSIRIS Material Testing Reactor", *Journal of ASTM International*, 9 (4), p. 423-436, 2012.
- [10] MCNP5 Manual, X-5 Monte Carlo Team, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Los Alamos National Laboratory (2005).

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le FEDER, le Conseil Régional PACA et la Ville de Marseille pour leur soutien financier.