

# Influence de l'échauffement de structure sur la réponse d'une cellule calorimétrique prototype dédiée à la mesure de l'échauffement nucléaire

Cédric DE VITA<sup>1\*</sup>, Julie BRUN<sup>1</sup>, Michel CARETTE<sup>1</sup>, Christelle REYNARD-CARETTE<sup>1</sup>, Abdallah LYOUSSI<sup>2</sup>, Hicham AMHARRAK<sup>1</sup>, Damien FOURMENTEL<sup>2</sup>, Jean-François VILLARD<sup>2</sup>, Philippe 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, Instrumentation Sensors and Dosimetry Laboratory, 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 : [cedric.devita@etu.univ-amu.fr](mailto:cedric.devita@etu.univ-amu.fr))

**Résumé** - L'échauffement nucléaire, paramètre incontournable dans le dimensionnement thermique des futurs dispositifs expérimentaux du Réacteur Jules Horowitz (RJH), est classiquement mesuré dans les réacteurs de recherche par un calorimètre différentiel non adiabatique permanent à noyau de graphite [1]. Ce type de calorimètre fait l'objet de nombreuses études afin de l'adapter à différentes gammes de mesure et d'améliorer son étalonnage hors pile [2][3]. Dans cette optique, une nouvelle cellule calorimétrique prototype, instrumentée d'une source de chaleur supplémentaire, a été conçue. L'objectif est d'obtenir une courbe d'étalonnage dans des conditions proches de celles en réacteur. Ce papier se focalise sur l'étude de la réponse de cette nouvelle cellule calorimétrique en fonction de différentes conditions imposées (puissance délivrée, type de convection).

## Nomenclature

$T_n$	Thermocouple n ou Température n, °C	$Re$	Nombre de Reynolds
$R$	Résistance, $\Omega$	$P_{tête}$	Puissance dans la tête, W
$i$	Intensité de courant, A		

## 1. Introduction

Les travaux présentés dans ce papier sont réalisés dans le programme de recherche IN-CORE, Instrumentation for Nuclear radiation and Calorimetry Online in REactor, créé en 2009 par le CEA et l'Université d'Aix-Marseille. Ils s'inscrivent dans le cadre du nouveau réacteur expérimental de recherche : le réacteur Jules Horowitz (RJH) [4]. L'un des buts de ce programme est de quantifier précisément l'échauffement nucléaire, paramètre primordiale dans le dimensionnement thermique de futurs dispositifs expérimentaux [5], dès le démarrage du RJH. Cet échauffement exprimé en W/g (masse de l'échantillon) correspond à l'énergie déposée dans un matériau à la suite de différentes interactions rayonnements/matière. Il peut être quantifié en réacteurs d'irradiations à partir de différents capteurs/détecteurs de façon indirecte (chambre à ionisation, chambre à fission, collectrons) ou directe (calorimètre ou thermomètre gamma), en ligne ou en post irradiation (dosimétrie). Ce papier focalise sur la calorimétrie. De nombreux types de calorimètre existent : des calorimètres simple cellule [6] avec des échantillons de natures différentes, inox ou molybdène[8], fer [8], aluminium [9] ainsi que des calorimètres différentiels et multi cellules [5] Les études menées dans le cadre du programme IN-CORE portent sur un calorimètre différentiel non adiabatique permanent à noyau de graphite développé et dimensionné initialement pour un échauffement en cœur du réacteur OSIRIS de l'ordre de 13 W/g [1]. Ce calorimètre a fait l'objet d'études numériques et expérimentales dédiées à son optimisation selon la plage ciblée ainsi qu'à son étalonnage hors pile [2][10][11]. Par exemple une étude paramétrique en thermique a permis de proposer une nouvelle géométrie de calorimètre plus sensible [2] pour le premier dispositif multi

capteurs CARMEN-1 dédié à la détermination de profils axiaux des flux de neutrons, de photons et de l'échauffement nucléaire dans les quatre canaux en périphérie du réacteur OSIRIS (échauffement plus faible  $< 2\text{W/g}$ ). La réponse de ce type de calorimètre a été étudiée en milieu non irradié dans des conditions d'étalonnage classiques (simulation de l'échauffement localement au sein du noyau de graphite par effet Joule au moyen d'une résistance chauffante) pour différentes conditions externes du fluide caloporteur [3][12] et lors de campagnes d'irradiation [13]. Les études hors irradiations ont montré que la réponse non linéaire de ce capteur plus sensible dépendait notamment de la puissance injectée et de la température atteinte dans le capteur du fait de l'augmentation des transferts thermiques parasites (conduction dans le gaz et effets radiatifs). Or les études en pile ont confirmé que la température atteinte dans le calorimètre était bien supérieure à celle atteinte lors de l'étalonnage classique du fait du dépôt d'énergie présent sur tout le calorimètre (structure + noyau). Par exemple une différence de température de plus de  $150^\circ\text{C}$  est obtenue entre les conditions irradiées (canal H9) et non irradiées pour un échauffement de  $1.7\text{W/g}$ . Par conséquent, les conditions d'étalonnage hors pile doivent être modifiées afin de se rapprocher des conditions présentes en réacteur. Dans ce but, une nouvelle cellule calorimétrique de géométrie similaire à celle du dispositif CARMEN-1 a été conçue. Cette cellule prototype intègre une source de chaleur supplémentaire, simulant sur sa structure, le dépôt d'énergie induit par les interactions rayonnements/matière. Ce papier se focalise sur l'étude de la réponse de cette nouvelle cellule. Dans un premier temps, une description détaillée de cette cellule calorimétrique ainsi que du dispositif expérimental associé seront exposés. Dans un second temps la réponse de cette nouvelle cellule sera comparée à celle du dispositif CARMEN dans des conditions d'étalonnage classique. Ensuite les résultats obtenus pour différents protocoles expérimentaux (chauffage localisé : tête ou socle, et chauffage simultané : tête et socle) appliqués à la nouvelle cellule en convection naturelle ou forcée seront présentés et discutés.

## **2. Dispositif expérimental et protocole d'étalonnage**

Ce paragraphe est consacré à la présentation de la nouvelle cellule calorimétrique et du dispositif expérimental qui permet sa première caractérisation en convection naturelle ou en régime laminaire de convection forcée pour différents protocoles de chauffage.

### **2.1. Présentation de la cellule calorimétrique prototype et de son principe de fonctionnement**

Le design de la cellule calorimétrique prototype correspond à celui l'une des deux cellules constituant le calorimètre différentiel non adiabatique utilisé dans le dispositif CARMEN : la cellule de mesure. En fait, ce type de calorimètre comprend deux cellules identiques (cf. Figure 1) : l'une dite de mesure contenant un échantillon de graphite, l'autre dite de référence sans échantillon remplacé par de l'azote. La cellule de référence est utilisée pour déterminer le dépôt d'énergie sur la structure des cellules et pour remonter ainsi par mesure différentielle à l'échauffement nucléaire uniquement dans l'échantillon. Chaque cellule est constituée de trois parties : une tête, un piédestal et un socle (cf. Figure 1) et instrumentée par deux thermocouples de type K positionnés respectivement en partie haute du piédestal, T1, et sur le socle en paroi externe à mi-hauteur, T3 (cf. Figure 1). Le socle en contact avec l'enveloppe instrumenté (cf. Figure 1) du calorimètre sert à évacuer l'énergie vers le fluide caloporteur (dans le cas général de l'eau est utilisée). Dans chaque tête des cellules calorimétriques traditionnelles se trouve un élément chauffant localisé au centre. Cet élément chauffant permet de simuler lors de l'étalonnage hors pile l'échauffement nucléaire reçu uniquement par l'échantillon de graphite grâce à un dépôt d'énergie générée par effet Joule. La courbe d'étalonnage de chaque cellule est alors définie par la différence de température moyenne T1-T3 obtenue en régime thermique stationnaire en fonction de la puissance injectée.

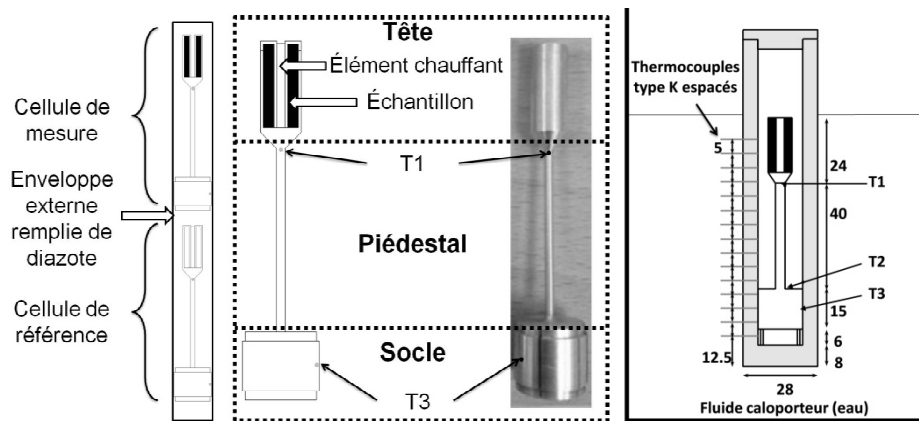


Figure 1 : Schéma du calorimètre et des cellules calorimétriques utilisés dans le dispositif CARMEN-1 (à gauche), photo détaillée d'une cellule calorimétrique (au centre), présentation de l'enveloppe instrumentée intégrant la cellule de mesure (en mm) (à droite).

Dans le cas de la cellule calorimétrique prototype possède une deuxième source de chaleur. Elle est instrumentée au niveau du socle par un fil résistif qui permet de réaliser un échauffement électrique de la partie la plus massive de la structure de la cellule. Le socle a été conçu en deux parties (cf. Figure 2) : la première partie correspond à un cylindre rainuré accueillant le fil résistif, la seconde partie à un cylindre annulaire inséré autour de la première partie pour compléter le socle. Le fil résistif est un alliage composé de Nickel à 80% et de Chrome à 20% de résistance de  $1,75 \Omega \pm 0,22 \Omega$  (mesuré en 4 fils à une température ambiante de  $23^\circ\text{C}$ ).

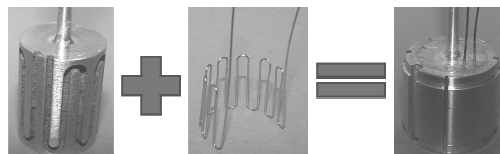


Figure 2 : Détails du nouveau socle de la cellule prototype.

Cette cellule calorimétrique prototype possède également les particularités suivantes. D'une part l'échantillon de graphite ainsi que le porte échantillon ont été remplacé par un cylindre en aluminium de taille équivalente. D'autre part un thermocouple supplémentaire T2 a été ajouté à la base du piédestal pour définir une nouvelle réponse (T1-T2) de la cellule.

## 2.2. Présentation du dispositif expérimental associée à la cellule prototype

Dans cette partie, est présenté, le dispositif expérimental associé à cette cellule prototype pour étudier sa réponse lors de divers études menées dans ce papier (cf. Figure 3). Ce dispositif expérimental comprend :

- La cellule calorimétrique prototype insérée dans une enveloppe instrumentée (cf. Figure 1) : enveloppe cylindrique en laiton (de 123 mm de hauteur, de 17 mm de diamètre interne, et de 28 mm de diamètre externe) fermée, remplie en air et instrumentée de 15 thermocouples de type K de 0,5 mm de diamètre répartis verticalement avec un pas de 5 mm. Ces thermocouples affleurent la paroi interne de l'enveloppe, et sont utilisés pour établir un profil de température vertical (cf. Figure 1).
- Un bain thermostatique (convection naturelle) ou un bain à débordement (convection forcée) dans lequel est plongée cette enveloppe. Ces bains permettent d'imposer des conditions thermiques et fluidiques particulières lors de l'étalonnage.
- Deux alimentations électriques de laboratoire ayant une plage de distribution d'intensité en courant de 0-5A et une plage de tension de 0 à 30V. Ces alimentations sont utilisées

pour injecter de manière indépendante du courant dans les différents éléments chauffants de la cellule prototype calorimétrique.

- Deux thermocouples de type K de 1 mm insérés dans le bain pour contrôler la température de celui-ci.
- Un système d'acquisition connecté à un ordinateur qui permet de récupérer toutes les données relatives aux expériences avec un échantillonnage de 5s (température du bain, de l'enveloppe et du calorimètre et tensions).

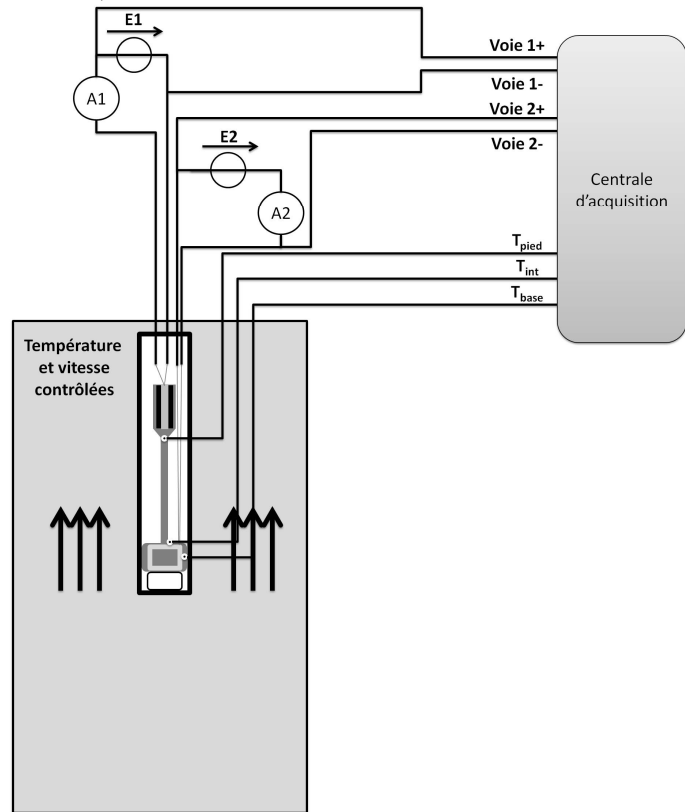
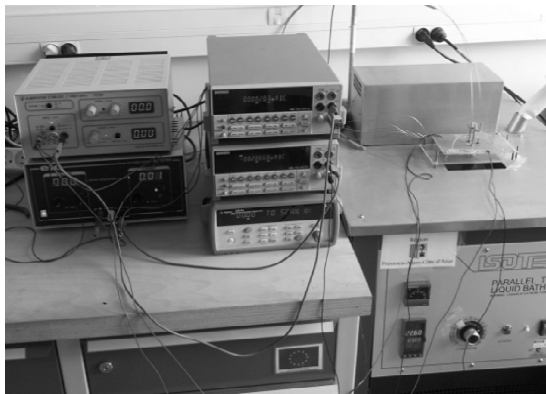


Figure 3 : *Dispositif expérimental associé à la cellule calorimétrique prototype (à gauche) et schéma de principe (à droite).*

### 2.3. Présentation des protocoles d'étalonnage

Afin d'étudier la réponse de la cellule prototype durant les expériences d'étalonnage, trois protocoles très similaires ont été appliqués. Le premier protocole correspond à un étalonnage traditionnel n'utilisant que l'élément chauffant situé dans la tête de la cellule. Après l'établissement de la température du bain (fixée à 23°C pour tous les résultats présentés dans ce papier) et de la vitesse du fluide ( $Re=1604$  dans le cas du bain à débordement), une intensité de courant électrique est appliquée à cet élément chauffant jusqu'à atteindre le régime stationnaire du calorimètre (palier de stabilité de 30 minutes au minimum).

Ensuite la puissance injectée par effet Joule est augmentée par pas de 0,25W sur une plage de 0W à 6W. Dans le cas du deuxième protocole opératoire, l'élément chauffant qui est activé correspond à celui inséré dans le socle. Dans le cas du dernier protocole les deux éléments chauffants sont employés en injectant la même puissance massique.

La courbe présentée dans la Figure 4 donne un exemple d'évolution temporelle des températures T1, T2, T3 de la cellule prototype dans le cas du premier protocole pour des conditions de fluide caloporteur en convection naturelle. Cette courbe confirme que pour chaque valeur de puissance, la cellule calorimétrique atteint un état stationnaire après avoir accumulé de l'énergie. Elle montre par

ailleurs que les températures au bas du piédestal T2 et sur le socle augmentent peu et sont très proches. Ce type de courbe est ensuite exploité pour déterminer la courbe d'étalonnage de la cellule.

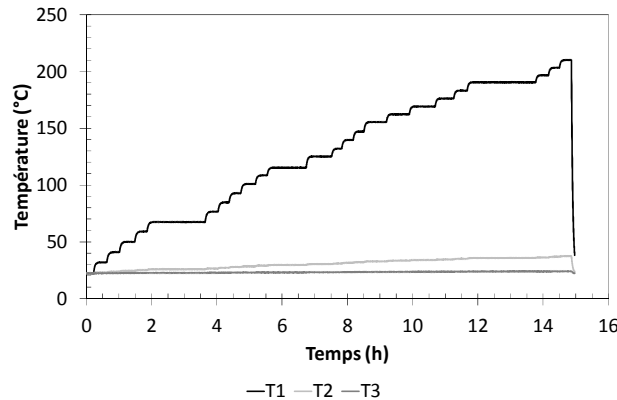


Figure 4 : Évolution de la température de T1, T2, T3 au cours du temps pour différentes intensités électriques réalisées sur trois jours.

### 3. Résultats et discussions

Après avoir comparé les courbes d'étalonnage de la cellule prototype et de celle du dispositif CARMEN-1 dans le cas d'un étalonnage traditionnel (premier protocole), l'influence des zones chauffées sur la réponse de la cellule prototype est étudiée en convection naturelle et/ou forcée.

#### 3.1. Comparaison des courbes d'étalonnage de la cellule prototype et de la cellule du dispositif CARMEN-1 (étalonnage traditionnel)

Les courbes d'étalonnage de la cellule du dispositif CARMEN-1 et de la cellule prototype sont présentées dans la Figure 5 dans des mêmes conditions de convection forcée. Cette figure montre que le même comportement s'opère. En effet, les réponses des deux types de cellule sont des réponses polynomiales. Le changement de structure de la tête et du socle n'a pas influé sur le type de régression décrivant la réponse. Par contre ces changements ont entraîné une modification de l'amplitude. La cellule prototype a perdu en sensibilité par rapport à la cellule calorimétrique du dispositif CARMEN-1.

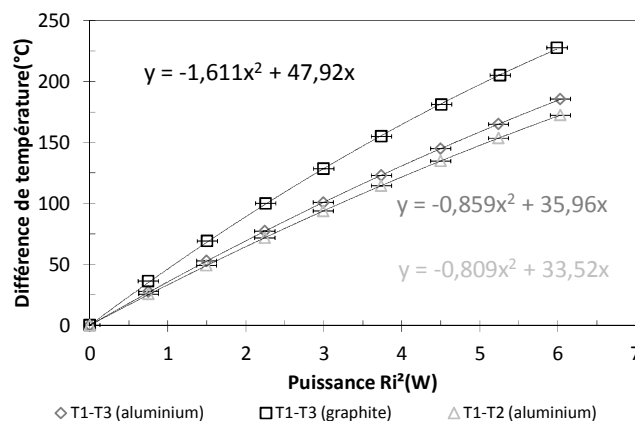


Figure 5 : Réponses de la cellule prototype et de la cellule initiale en fonction de la puissance injectée dans la tête.

On constate également sur la Figure 5 que la différence de température (T1-T2) est légèrement plus faible que la différence de température (T1-T3). En effet le thermocouple T3, étant en contact direct avec la paroi qui échange avec le fluide caloporteur, a une température plus faible. Par ailleurs, les échanges sont donc suffisants pour atteindre une température presque homogène dans le

socle et dans le bas du piédestal. L'utilisation de la différence de température T1-T3 permet donc d'obtenir une sensibilité un peu plus grande.

### 3.2. Influence de la zone du chauffage local sur la courbe d'étalonnage pour différents types de convection

Dans ce paragraphe, une étude comparative des courbes d'étalonnage de la cellule prototype pour un chauffage localisé dans la tête (premier protocole) et dans le socle (deuxième protocole) et pour différentes convections (naturelle et forcée) est présentée (cf. Figure 6). Seule la différence de température entre T1 et T3 est considérée. On constate deux comportements différents selon la localisation du chauffage. La courbe d'étalonnage devient linéaire dans le cas d'un chauffage uniquement par le socle du fait des faibles températures atteintes  $\sim 50^{\circ}\text{C}$  (bons échanges de chaleur directement à la paroi et pas de transferts thermiques parasites). La sensibilité est alors constante mais beaucoup plus faible de l'ordre de  $1,52^{\circ}\text{C/W}$  au lieu de  $36,56^{\circ}\text{C/W}$  au maximum pour l'autre protocole. Ces courbes d'étalonnage pour les deux protocoles dépendent très peu du type de convection comme précédemment montré [10][12]. Dans le cas d'un chauffage par le socle la sensibilité de  $1,52^{\circ}\text{C/W}$  en convection forcée ( $\text{Re} = 1604$ ) devient égale à  $1,43^{\circ}\text{C/W}$  en convection naturelle.

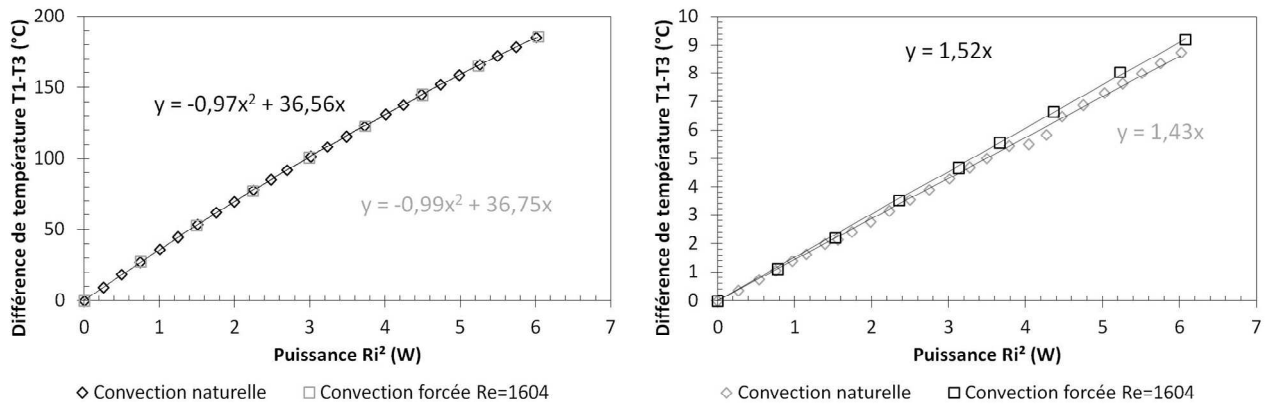


Figure 6 : Réponse de la cellule prototype pour un chauffage dans la tête (à gauche) et pour un chauffage localisé dans le socle (à droite) en fonction de la puissance

### 3.3. Influence d'un chauffage simultané sur la courbe d'étalonnage en convection naturelle

Ce paragraphe est consacré à l'étude de la réponse de la cellule prototype dans le cas des protocoles 1 et 3 correspondant respectivement à un chauffage localisé dans la tête et un chauffage simultané (injection d'une même puissance massique dans la tête et le socle). Quelque soit le protocole, la courbe d'étalonnage est tracée en fonction de la puissance électrique injectée dans la tête (cf. Figure 7). Cette figure montre que dans le cas d'un chauffage simultané la courbe d'étalonnage est encore quadratique. Les températures atteintes sont supérieures à celles établies dans le cas d'un étalonnage traditionnel. Par ailleurs la sensibilité de l'éprouvette dans ce mode de chauffage est plus grande mais décroît plus vite. Par conséquent, malgré des températures atteintes toujours inférieures à celles en réacteur, on constate un changement de la courbe d'étalonnage. Ceci confirme que la méthode d'étalonnage mettant en œuvre un chauffage localisé uniquement dans la tête n'est pas satisfaisante pour ce type de capteur.

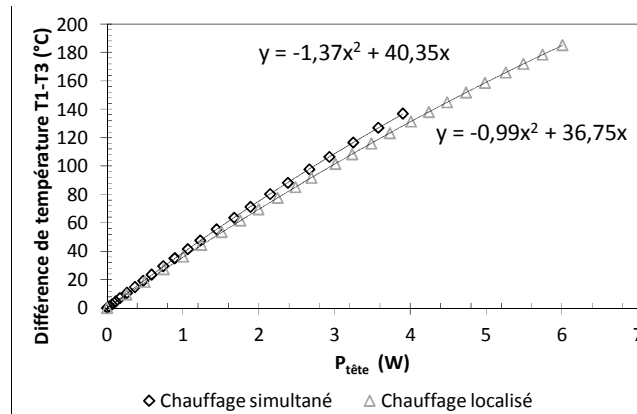


Figure 7 : Réponses de la cellule prototype pour un chauffage simultané et un chauffage localisé dans la tête en fonction de la puissance injectée dans la tête (convection naturelle)

#### 4. Conclusions et perspectives

Lors d'un étalonnage, traditionnel hors pile, d'un calorimètre différentiel dédié à la quantification de l'échauffement nucléaire, seul le noyau est chauffé localement par effet Joule. La simulation expérimentale du dépôt d'énergie nucléaire dans la structure n'est pas effectuée. Par conséquent, pour se rapprocher lors de cet étalonnage des conditions thermiques réelles atteintes en pile, une nouvelle cellule calorimétrique prototype a été conçue et développée permettant de chauffer également une partie de sa structure (socle).

Nous avons tout d'abord montré que ce changement de design modifiait la réponse de la cellule dans le cas d'une utilisation traditionnelle (chauffage localisé dans la tête) en effectuant une comparaison avec la cellule calorimétrique du dispositif CARMEN-1. Cette cellule prototype s'avère moins sensible. La réponse de cette cellule a alors été étudiée pour deux autres protocoles. Nous avons montré une différence de réponse. Un chauffage simultané (tête + socle) conduit à une augmentation de la sensibilité de la cellule prototype cependant plus dépendante de la puissance (perte de linéarité plus grande). Cette étude confirme qu'il est nécessaire de modifier la méthode d'étalonnage hors pile en prenant en compte l'échauffement de structure.

Par conséquent une nouvelle cellule prototype va être développée afin d'étendre le dépôt d'énergie dans d'autres zones de la structure de la cellule (notamment au niveau du piédestal). Ce nouveau type de cellule prototype sera ensuite monté en calorimètre (avec et sans échantillon). Ce nouveau calorimètre sera alors étudié dans ces nouvelles conditions. Son comportement sera comparé à celui présent en réacteur.

#### 5. Références

- [1] H. Carcreff, V. Clouté-Cazalaa, L. Salmon, "Development, Calibration and Experimental Results Obtained With an Innovative Calorimeter (CALMOS) for Nuclear Heating Measurements", IEEE TNS, Vol. 59, N°4, pp. 1369-1376, 2012
- [2] J. Brun, C. Reynard, O. Merroun, A. Lyoussi, M. Carette, A. Janulyte, Y. Zerega, J. Andre, G. Bignan, J-P Chauvin, D. Fourmentel, C. Gonnier, P. Guimbal, J-Y. Malo, J-F. Villard, "Numerical and experimental calibration of calorimetric sample cell dedicated to nuclear heating measurements", IEEE TNS, Vol. 59, Issue: 6, Part: 2, pp 3173 – 3179
- [3] J. Brun, C. De Vita, C. Reynard-Carette, A. Lyoussi, M. Carette, M. Muraglia, "Étude expérimentale des échanges thermiques associés à un calorimètre non adiabatique différentiel dédié à la mesure des échauffements en réacteur de recherche d'irradiation", SFT2013, Gérardmer, France

- [4] A. Lyoussi, D. Fourmentel, J-F. Villard, J-Y. Malo, P. Guimbal, H. Cracreff, C. Gonnier, G. Bignan, J-P. Chauvin, C. Reynard-Carette, J. Brun, O. Merroun, M. Carette, M. Muraglia, A. Janulyte, Y. Zerega, J. André, "Advanced methodology and instrumentation for accurate on line measurements of neutron, photon and nuclear heating parameters inside Jules Horowitz MTR Reactor", RRFM 2012, Mars 2012, République Tchèque, Prague.
- [5] F. Malouch, "Development and Experimental Validation of a Calculation Scheme for Nuclear Heating Evaluation in the Core of the OSIRIS Material Testing Reactor", Proc. Int. Symp. on Reactor Dosimetry (ISR14), Mai 2011, Omni Mount Washington Resort, USA
- [6] M. Tarchalski, K.Pytel, P. Siréta, A. Lyoussi, J.Jagielski, C. Reynard-Carette, C. Gonnier, G. Bignan, " Principle of calibration of the simple calorimeter for nuclear heating measurements in MARIA reactor and transposition to the case of JHR reactor", *Proc. ANIMMA 2013, Juin 2013, Marseilles, France*.
- [7] B.M. Makgopa, M.Belal, "Benchmark of heat deposition measurement techniques in the SAFARI-1 Reactor using MCNP5", RRFM, Vienne, Autriche, 2009
- [8] M. Varvayanni, N. Catsaros, M. Antonopoulos-Domis, "Evaluation of nuclear heating of small samples in a research reactor core" *Annals of Nuclear Energy* 35, 2008
- [9] M-S Kim, S-Y Hwang, H-S Jung, K-H Lee, "Measurements of Nuclear Heating Rate and Neutron Flux in HANARO CN Hole for Designing the Moderator Cell of Cold Neutron Source", TRTR-IGORR Meeting, Gaithersburg, USA, Septembre 2005
- [10] C. De Vita, J. Brun, M. Carette, C. Reynard-Carette, A. Lyoussi, D. Fourmentel, J-F. Villard, P. Guimbal, J-Y. Malo, " Qualification of an out-of-pile Thermo-HYdraulic test BENCH (BETHY) developed to calibrate calorimetric cells under specific JHR experimental conditions", *ANIMMA Proc. ANIMMA 2013, Juin 2013, Marseilles, France*
- [11] C. Reynard-Carette, A. Lyoussi, J. Brun, M. Muraglia, M. Carette, A. Janulyte, Y. Zerega, J. André, G. Bignan, J-P. Chauvin, D. Fourmentel, C. Gonnier, P. Guimbal, J-Y. Malo, J-F. Villard, "Thermal study of a non adiabatic differential calorimeter used for nuclear heating measurements inside an experimental channel of the Jules Horowitz Reactor", *Proc. Eurotherm 2012, Septembre 2012, Poitiers, France*.
- [12] 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", *Proc. ANIMMA 2013, Juin 2013, Marseilles, France*
- [13] 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 TNS, Vol. 60, Issue:1, Part:2, pp. 328 – 335, 2013*

## Remerciements

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