

# Etude d'un nouveau capteur à transfert thermique radial mesurant l'énergie induite par interactions rayonnements nucléaires/matière.

Julie BRUN<sup>1\*</sup>, Cédric DE VITA<sup>1</sup>, Christelle REYNARD-CARETTE<sup>1</sup>, Michel CARETTE<sup>1</sup>, Hicham AMHARRAK<sup>1</sup>, Adrien VOLTE<sup>1</sup>, Abdallah LYOUSSI<sup>2</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

\* (auteur correspondant : julie.brun@im2np.fr)

**Résumé** - Ce papier présente des études expérimentales hors flux nucléaires sur la réponse d'un nouveau capteur calorimétrique dédié à la mesure de l'énergie induite par interactions rayonnements nucléaires/matière en réacteur. La comparaison des premiers résultats expérimentaux et théoriques confirment que la réponse du capteur est induite par des transferts thermiques conductifs radiaux prédominants. La sensibilité de ce capteur peut être augmentée par la modification de sa géométrie interne et dépend légèrement de la température du fluide caloporteur.

## Nomenclature

$T$	Température, °C	<i>Symboles grecs</i>	
$P$	Puissance électrique, W	$\lambda$	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$H$	Hauteur, m	<i>Indices et exposants</i>	
$r$	Rayon, m	$f$	Point froid de mesure
$R$	Résistance thermique, °C.W <sup>-1</sup>	$c$	Point chaud de mesure
$S$	Sensibilité, °C.W <sup>-1</sup>	$G$	Gaz
		$C$	Couronne

## 1. Contexte

Les expériences réalisées en réacteur nucléaire de recherche de type MTR (Material Testing Reactor) sont primordiales pour l'amélioration de la compréhension du vieillissement de matériaux (tels que ceux de structure des centrales de puissance) et celle du comportement des combustibles nucléaires sous irradiations. Ces expériences apportent notamment des réponses pour la sûreté et la longévité des générations actuelles de ces centrales et permettent de qualifier des concepts pour les futures générations. Face aux enjeux et exigences accrues des scientifiques et exploitants ainsi qu'à l'augmentation de la puissance des outils de modélisation, ces expériences requièrent des moyens expérimentaux et de l'instrumentation de plus en plus performants. Ceci est actuellement renforcé par la construction d'un nouveau MTR (le Réacteur Jules Horowitz (RJH)) qui fournira des conditions plus sévères que celles atteintes dans les MTR européens (en termes de flux neutroniques et photoniques, de déplacement par atome, et d'énergie déposée par interactions rayonnements/matière). L'énergie déposée dans les différents matériaux du réacteur et dans les dispositifs d'irradiation est un paramètre majeur pour le dimensionnement amont des dispositifs expérimentaux d'irradiation. La quantification de ce paramètre est actuellement réalisée par des calorimètres différentiels non adiabatiques, des thermomètres gamma et des calorimètres simple cellule [1-3], possédant chacun des avantages particuliers sans répondre pleinement aux besoins métrologiques [4]. Cependant une meilleure prédiction de ce paramètre nécessite une

optimisation des méthodes d'étalonnage et de mesure, de l'instrumentation associée et des simulations numériques.

Ainsi de nouveaux capteurs et méthodes d'interprétation combinée sont actuellement conçus et étudiés dans le cadre du programme de recherche CEA/AMU dénommé IN-CORE (Instrumentation for Nuclear Radiations and Calorimetry Online in REactor) au sein du Laboratoire commun LIMMEX "Laboratoire d'Instrumentation et de Mesures en Milieux Extrêmes" [5]. L'un des objectifs de ce programme est notamment de développer un dispositif multi-capteurs permettant de mesurer en ligne, dans les canaux du RJH accueillant les futures expériences, les profils axiaux des flux neutroniques et photoniques et de l'énergie déposée par unité de temps et par unité de masse du matériau concerné (communément appelée échauffement nucléaire (exprimée en  $W.g^{-1}$ )). Ainsi un premier prototype de dispositif multi-capteurs nommé CARMEN "CALorimétrie en Réacteur et Mesures des Emissions Nucléaires" a été développé et testé en 2012 en périphérie du réacteur OSIRIS (basé sur Saclay). Ce prototype multi-capteurs regroupait 8 détecteurs. Le nombre de capteurs et par conséquent l'encombrement total étant importants, ce prototype avait été scindé en deux perches expérimentales appelées CARMEN-1P et CARMEN-1N respectivement dédiées aux mesures photoniques et neutroniques [6]. Par conséquent, actuellement des travaux hors milieu irradié focalisent sur le détecteur le plus encombrant, le calorimètre différentiel, afin de réduire sa taille et d'adapter/améliorer ses caractéristiques métrologiques à différentes gammes de mesure.

Ce document focalise sur un nouveau design de calorimètre différentiel récemment conçu et breveté afin de répondre à ces objectifs [7]. Il débute par la description du principe général de fonctionnement des calorimètres différentiels. Ensuite le nouveau design du calorimètre innovant est comparé à celui du calorimètre du dispositif CARMEN (appelé par la suite calorimètre CARMEN) et un modèle analytique 1D établi pour estimer la réponse du nouveau capteur est présenté. Par la suite, des études expérimentales menées dans des conditions de laboratoire hors pile caractéristiques de la phase préliminaire d'étalonnage sont fournies et comparées aux résultats obtenus avec le modèle 1D. Enfin, les influences de la source de chaleur, de la géométrie du capteur et de la température du fluide caloporteur sur sa réponse sont montrées et discutées.

## **2. Du calorimètre différentiel de type CARMEN au calorimètre différentiel innovant CALORRE**

Ce premier paragraphe permet de montrer l'évolution du nouveau type de calorimètre, appelé par la suite CALORRE "CALORimètre à transfert thermique Radial en REacteur nucléaire", par rapport au calorimètre précédemment utilisé. Le calorimètre CALORRE possède les mêmes principes de fonctionnement et de mesures que ceux du calorimètre CARMEN et a un nouveau design assurant des transferts thermiques radiaux prédominants permettant une réduction de taille alors que pour le calorimètre CARMEN les transferts sont majoritairement axiaux.

### **2.1. Principe de fonctionnement et de mesures**

Les calorimètres CARMEN et CALORRE sont des capteurs différentiels non adiabatiques qui échangent avec l'environnement extérieur (c'est à dire avec le fluide caloporteur dans les canaux du réacteur). Ils permettent la mesure de l'énergie déposée dans un échantillon de graphite à partir de l'exploitation de la réponse en température, en régime permanent, de deux cellules calorimétriques superposées [1,2,8,9] : l'une de mesure et l'autre de référence dédiée à éliminer les dépôts d'énergie parasites (hors échantillon) et les potentielles fuites thermiques

relatives aux différents fils présents sur chaque cellule. Plusieurs méthodes de mesures sont utilisées en réacteur [9]. Cependant la plus courante et la moins chronophage et la plus représentative est basée sur deux étapes (voir Figure 1). Tout d'abord, la cellule de mesure est placée à la côte  $z$  afin de mesurer une première différence de température entre un point chaud et un point froid ( $\Delta T_1$ ). Ensuite le calorimètre est déplacé afin de positionner la cellule de référence, à la même côte  $z$ , pour déterminer une seconde différence de température entre son point chaud et son point froid ( $\Delta T_2$ ). La différence entre ces deux écarts de température, l'utilisation des courbes d'étalonnage des cellules et un modèle d'interprétation permettent alors de déterminer l'échauffement nucléaire à la côte  $z$  [2]. Ces courbes d'étalonnage sont effectuées hors milieu irradié en imposant successivement des dépôts d'énergie par effet Joule au moyen d'une source de chaleur électrique générée par un élément résistif intégré dans la tête de chaque cellule du capteur.

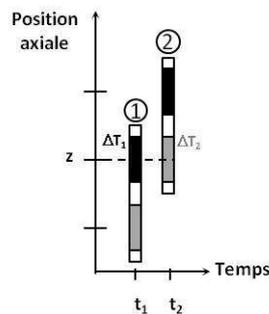


Figure 1 : Schéma du principe de mesures différentielles (en noir cellule de mesure, en gris cellule de référence)

## 2.2. Design des calorimètres

### 2.2.1. CARMEN

Le calorimètre CARMEN est constitué de deux cellules calorimétriques en aluminium de 79 mm de long positionnées l'une au dessus de l'autre dans une enveloppe en acier inoxydable remplie d'azote. La structure de chacune des cellules (voir Figure 2 gauche) est composée de trois zones fonctionnelles (tête, piédestal, base) :

- la première, appelée tête, constitue la partie supérieure des cellules. Elle est composée d'un cylindre creux accueillant l'échantillon et une résistance chauffante dans le cas de la cellule de mesure et seulement une résistance dans le cas de la cellule de référence (voir Figure 3).

- la seconde partie, appelée piédestal, constitue la partie centrale de la cellule et correspond à un barreau cylindrique de 2 mm de diamètre et de 40 mm de haut. Elle permet de privilégier les transferts thermiques axiaux de la tête vers la base. Cette partie est instrumentée, en haut, d'un thermocouple de type K de diamètre 0,5 mm (point chaud  $T_c$ )

- la dernière partie, appelée base, constitue la partie inférieure de la cellule et correspond à un cylindre plein de diamètre 17 mm et de 15 mm de haut en contact avec la surface intérieure de l'enveloppe du calorimètre. Cette partie de la structure permet une évacuation de l'énergie déposée sur la cellule vers le fluide caloporteur. Elle est instrumentée d'un thermocouple de type K de diamètre 0,5 mm (point froid  $T_f$ )

Cette géométrie de cellule à transferts préférentiellement axiaux entraîne un encombrement total du calorimètre de 222 mm. Par conséquent, un nouveau design plus compact grâce à des transferts thermiques radiaux prédominants a été développé pour le calorimètre CALORRE.

### 2.2.2. CALORRE

Dans un premier temps, la zone sensible du calorimètre différentiel CARMEN a été conservée pour le design des cellules du calorimètre CALORRE (conservation de la forme et de la taille de la tête des cellules) afin de pouvoir effectuer ultérieurement une inter-comparaison des mesures de dépôts d'énergie avec les deux calorimètres. Seules les parties piédestal et base ont été modifiées (voir Figure 2 droite).

- Le piédestal devient une partie appelée couronne. Elle correspond à un anneau horizontal de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur entourant la tête à mi-hauteur. Cet anneau permet ainsi de privilégier radialement les transferts thermiques conductifs. Deux ergots cylindriques sont positionnés sur cette couronne afin d'accueillir et sertir deux thermocouples type K de diamètre 0,5 mm pour les mesures des points chaud et froid.

- La base devient une partie appelée ailette. Il s'agit d'un cylindre creux vertical, de 23,1 mm de haut, de 17 mm de diamètre externe et de 0,5 mm d'épaisseur, relié à la couronne. Cette partie en vis à vis de la tête permet de récupérer l'énergie provenant de la couronne et des cavités de gaz environnantes. Elle permet l'évacuation de la chaleur par contact avec la surface interne de l'enveloppe du calorimètre.

Ainsi ce nouveau design permet de diviser la taille de chacune des cellules par 3,4.

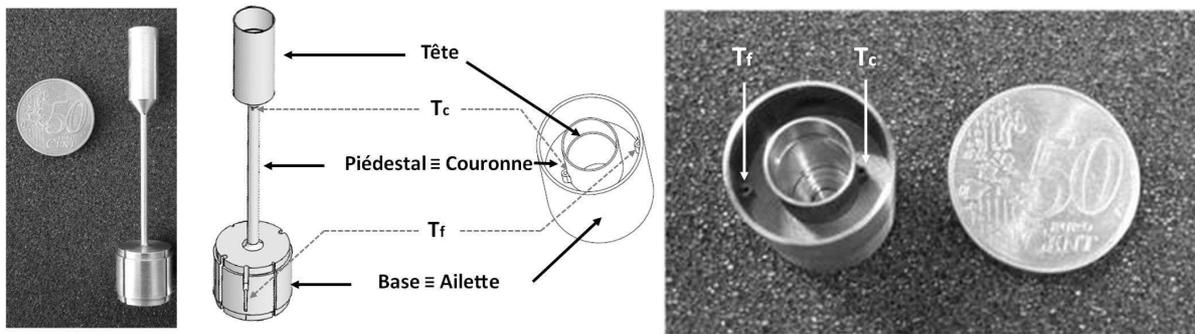


Figure 2 : Photos et schémas d'une cellule du calorimètre de type CARMEN (à gauche) et du calorimètre innovant CALORRE (à droite)



Figure 3 : Assemblages présents dans la tête de la cellule de mesure (à gauche) et de la cellule de référence (à droite)

### 2.3. Modèle Analytique du calorimètre CALORRE

Afin de vérifier l'unidirectionnalité des transferts thermiques dans la direction radiale et d'estimer la sensibilité de ce nouveau capteur, un modèle analytique 1D en régime stationnaire et purement conductif a été établi en considérant les différentes résistances thermiques radiales en parallèle mises en jeu entre la surface externe de la tête (prise de température du point chaud ( $T_c$ )) et la surface interne de l'ailette (prise de température du point froid ( $T_f$ )) (voir Figure 4). On obtient alors :

$$P = \frac{(T_c - T_f)}{R_{eq}} \quad (1)$$

$$\text{avec } R_{eq} = \frac{1}{\left( \frac{1}{R_{G1}} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_{G2}} \right)} = \frac{1}{\left( \frac{4\pi\lambda_G H_G}{\ln \frac{r_{Cext}}{r_{Cint}}} + \frac{2\pi\lambda_C H_C}{\ln \frac{r_{Cext}}{r_{Cint}}} \right)} \quad (2)$$

$R_{eq}$  correspond alors directement à la sensibilité de la cellule calorimétrique définie par

$$S = \frac{\partial(T_c - T_f)}{\partial P} \quad (3)$$

Pour la première configuration de cellule CALORRE développée avec une structure en acier inoxydable ( $\lambda_c = 15,2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $\lambda_g = 0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), une sensibilité de  $11,2^\circ\text{C.W}^{-1}$  a été estimée. Cette valeur sera comparée dans le paragraphe suivant avec les résultats obtenus expérimentalement.

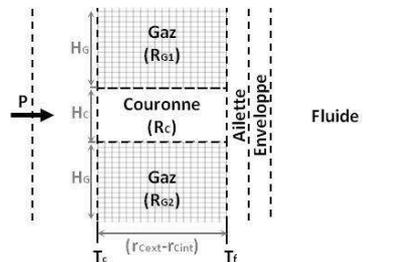


Figure 4 : Schéma du modèle analytique 1D

### 3. Etude expérimentale préliminaire et résultats

Après une brève présentation du dispositif et du protocole expérimentaux utilisés, les résultats présentés dans ce paragraphe concernent l'étude de la réponse la cellule CALORRE pour une variation de la valeur du dépôt d'énergie, de la géométrie de la couronne, et de la température du fluide caloporteur.

#### 3.1. Dispositif expérimental et protocole

Afin d'étudier le comportement de la cellule de mesure du calorimètre CALORRE, un dispositif expérimental similaire à celui utilisé pour les études menées sur les cellules du calorimètre CARMEN a été exploité. Ce dispositif expérimental décrit précédemment [1] se compose synthétiquement (voir Figure 5) :

- d'un bain métrologique à débordement permettant d'imposer et de contrôler la température et la vitesse du fluide caloporteur autour de l'enveloppe accueillant la cellule calorimétrique,
- d'une alimentation électrique stabilisée permettant l'injection de courant dans la résistance chauffante présente au sein du capteur,
- d'une résistance de précision utilisée afin de mesurer de manière fine l'intensité du courant injecté et par conséquent l'énergie déposée par effet Joule au sein du capteur,
- d'une centrale d'acquisition pour l'enregistrement des températures des points chaud et froid de la cellule de mesure ainsi que de l'intensité de courant et de la tension aux bornes de la résistance.

Le protocole appliqué à la cellule calorimétrique consiste à réaliser successivement des incréments croissants de puissance électrique ( $P \leq 6\text{W}$  par pas de  $0,5\text{W}$ ) pour différentes

conditions de fluide caloporteur ( $Re = 1670$ ;  $23^{\circ}C \leq T \leq 43^{\circ}C$ ). Chaque incrémentation est réalisée après avoir atteint un régime stationnaire (voir Figure 6).



Figure 5 : Photo du dispositif expérimental

### 3.2. Influence de la source de chaleur sur la réponse de la cellule calorimétrique CALORRE

L'influence de la source de chaleur sur la réponse de la cellule calorimétrique est présentée pour une température de fluide caloporteur de  $33^{\circ}C$ . Les températures des points chaud et froid ainsi que la différence de température sont données en fonction du temps, sur la Figure 6. A partir de cette figure, les températures moyennes dans les phases stationnaires sont calculées afin d'établir la courbe de réponse de la cellule calorimétrique.

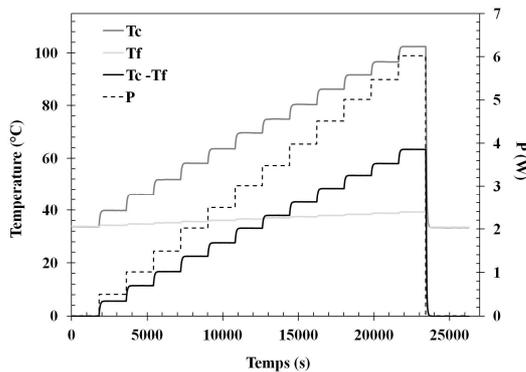


Figure 6 : Courbes temporelles de la cellule de mesure du calorimètre CALORRE

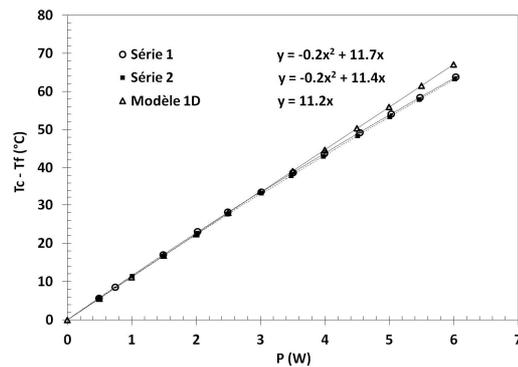


Figure 7 : Courbes de réponse de la cellule de mesure du calorimètre CALORRE

La Figure 7 présente deux courbes de réponse obtenues sur deux jours (Série 1 et Série 2) ainsi que les résultats issus du modèle analytique 1D. Cette figure montre un bon accord entre les résultats expérimentaux et le modèle théorique confirmant une prédominance des transferts thermiques conductifs radiaux. Cependant la réponse expérimentale n'est pas linéaire en fonction de la puissance déposée. Ceci peut notamment s'expliquer par une variation de la conductivité thermique du matériau de structure en fonction de la température atteinte dans la cellule et des pertes thermiques conductives dans le gaz et des pertes radiatives lorsque la température augmente. Cette influence de la source de chaleur sur la perte de linéarité de la réponse était déjà présente pour les cellules CARMEN mais de manière beaucoup plus prononcée compte tenu de températures absolues plus importantes atteintes (un coefficient d'ordre 2 de  $-1,7^{\circ}C \cdot W^{-2}$  contre moins de  $-0,2^{\circ}C \cdot W^{-2}$  dans le cas de la cellule de type CALORRE).

### 3.3. Influence de géométrie de la couronne sur la réponse de la cellule calorimétrique CALORRE

Afin d'étudier l'influence de la géométrie de la couronne sur la réponse du calorimètre CALORRE, une nouvelle cellule a été réalisée. Ses dimensions restent identiques. La

modification correspond à l'ajout de 8 secteurs vides sur la couronne et correspondants à la moitié du volume de la couronne (voir Figure 8 à gauche). Cette cellule sera appelée cellule du calorimètre CALORRE demi-surface. Le modèle analytique 1D estime dans ce cas, sa sensibilité à  $20,8^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$  contre  $11,2^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$  pour le calorimètre CALORRE. La Figure 8 compare les courbes de réponse théoriques et expérimentales de ces deux configurations. Les résultats expérimentaux confirment l'augmentation de sensibilité induite par la résistance thermique due aux interstices de gaz au sein de la couronne et montrent également que cette modification de géométrie n'affecte pas la prédominance des transferts radiaux au sein de cette nouvelle cellule en particulier aux faibles puissances ( $<4,5$  W). Le modèle surestime la réponse du capteur à partir d'une puissance supérieure à  $3,5$  W où la non-linéarité s'accroît. La modification de géométrie de la couronne permettra ainsi d'adapter la sensibilité du capteur suivant le niveau d'échauffement ciblé, et les températures maximales atteintes.

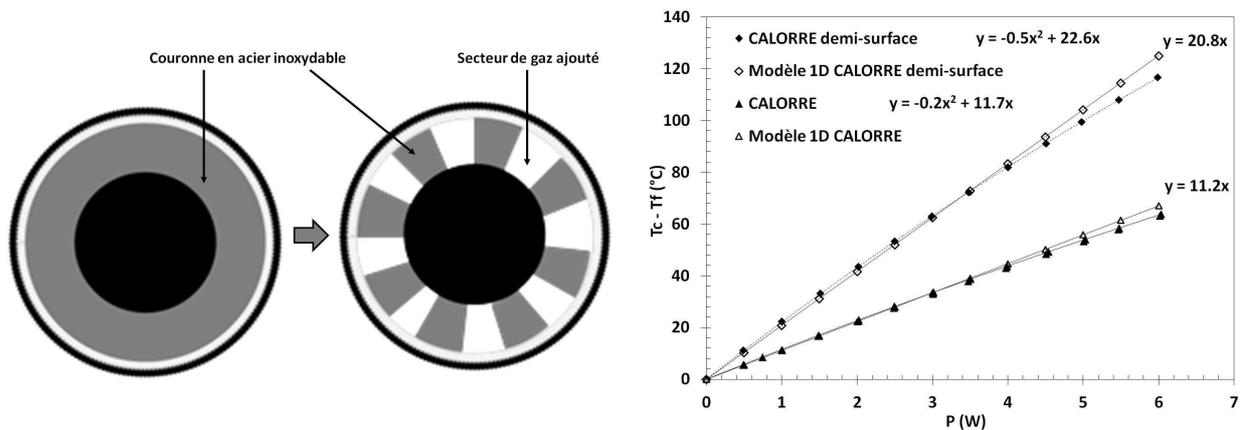


Figure 8 : Schémas d'une cellule calorimétrique CALORRE et CALORRE demi-surface (à gauche) et leurs courbes de réponse obtenues expérimentalement et à l'aide du modèle 1D (à droite)

### 3.3.1. Influence de la température du fluide caloporteur

La Figure 9 donne la réponse de la cellule CALORRE demi-surface, obtenue expérimentalement pour trois températures du fluide caloporteur  $23^{\circ}\text{C}$ ,  $33^{\circ}\text{C}$  et  $43^{\circ}\text{C}$ . Ces courbes montrent qu'une augmentation de cette température entraîne une diminution de sensibilité.

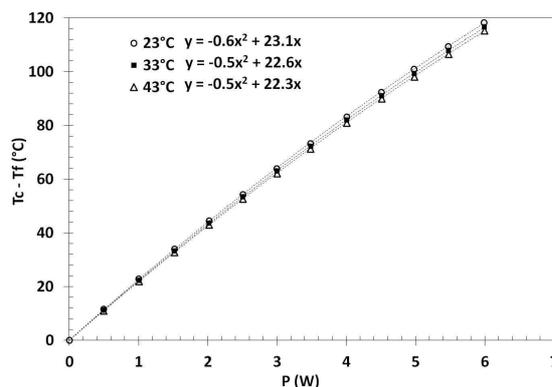


Figure 9 : Influence de la température du fluide caloporteur sur la courbe de réponse de la cellule de mesure de CALORRE demi-surface, obtenue expérimentalement

Par exemple, pour une puissance de  $6\text{W}$  lorsque la température du fluide caloporteur varie de  $23^{\circ}\text{C}$  à  $43^{\circ}\text{C}$ , la différence de température entre le point chaud et le point froid diminue de  $3^{\circ}\text{C}$  et on observe une diminution de sensibilité de  $16,3^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$  à  $16,1^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ . Ce comportement a déjà été observé pour la cellule calorimétrique CARMEN [10].

## 4. Conclusion

Une étude expérimentale portant sur la réponse d'un capteur calorimétrique innovant a été réalisée en laboratoire afin de donner des premiers éléments sur la validation de sa réponse. Ce capteur calorimétrique de type calorimètre différentiel non-adiabatique, possède un nouveau design compact. Un modèle analytique 1D purement conductif a été établi, pour estimer la sensibilité de ce type de calorimètre. Un bon accord entre les résultats expérimentaux et théoriques a été observé pour deux configurations de calorimètre confirmant la prédominance des transferts thermiques conductifs radiaux au sein des cellules, notamment pour des puissances inférieures à 3,5 W. Au delà, la sensibilité du capteur attendue est diminuée. Cette sensibilité dépend également faiblement de la température du fluide caloporteur. Le premier changement de configuration de sa couronne a permis d'augmenter significativement la sensibilité du capteur. Ce type de modification pourra être exploité pour adapter la réponse des capteurs à différentes conditions expérimentales notamment pour les faibles et fortes gammes de dépôts, et couplé à un changement de matériau de structure de la cellule.

## Références

- [1] J. Brun et al., Numerical and Experimental Calibration of a calorimetric cell dedicated to Nuclear Heating Measurements, IEEE TNS Vol 59, N°6 (2012), 3173-3179.
- [2] D. Fourmentel et al., Nuclear Heating Measurements in Material Testing Reactor: A Comparison Between a Differential Calorimeter and a Gamma Thermometer, IEEE TNS Vol 60, N°1 (2013), 328-335.
- [3] M. Tarchalski et al., Principle of calibration of the simple calorimeter for nuclear heating measurements in MARIA reactor and transposition to the case of JHR reactor, Proc. of ANIMMA Int. Conf. (Marseille, France, June 2013)
- [4] J. Brun et al., Comparison Of Calibration Of Sensors Used For The Quantification Of Nuclear Energy Rate Deposition, IEEE TNS, Soumis : en attente d'acceptation
- [5] A. Lyoussi et al., Advanced methodology and instrumentation for accurate on line measurements of neutron, photon and nuclear heating parameters inside Jules Horowitz MTR Reactor, RRFM – IGORR Int. Conf. (Prague, République Tchèque, Mars 2012)
- [6] D. Fourmentel et al., Combined analysis of neutron and photon flux measurements for the Jules Horowitz Reactor core mapping, Proc. of ANIMMA Int. Conf. (Ghent, Belgique, June 2011)
- [7] M. Carette et al., Epreuve pour mesure d'échauffement nucléaire dans un réacteur nucléaire, et cellule calorimétrique comprenant au moins une telle éprouvette, Brevet N° 1553136 déposé le 10 Avril 2015
- [8] J. Brun et al., Comparison of the Thermal Response of Two Calorimetric Cells Dedicated to Nuclear Heating Measurements during Calibration, IEEE TNS Vol 61, N°4 (2014), 2254-2261
- [9] H. Carcreff, Calmos : Innovative device for the measurement of nuclear heating in material testing reactors, Journal of ASTM International (JAI) Vol 9, N°3 (2012)
- [10] J. Brun et al., Etude expérimentale des échanges thermiques dans un calorimètre différentiel non adiabatique pour la mesure d'échauffements nucléaires, Proc. Congrès Soc. Française de Thermique, (Gérardmer, France, Mai 2013)

## Remerciements

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