

# Qualification d'un nouveau banc d'Essais ThermoHYdrauliques (BETHY) dédié à l'étalonnage de calorimètres radiométriques en conditions non irradiées.

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>, Magali MURAGLIA<sup>1</sup>, Philippe GUIMBAL<sup>2</sup>, Jean-François VILLARD<sup>2</sup>, Damien FOURMENTEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aix-Marseille Université, LISA EA 4672, 13397 cedex 20, MARSEILLE France

<sup>2</sup> CEA, Direction de l'Energie Nucléaire, Département d'Etudes des Réacteurs, Centre de Cadarache, 13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France.

\*Auteur correspondant : christelle.carette@univ-amu.fr

**Résumé** - Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'un programme de recherche CEA/Université d'Aix-Marseille. L'objectif de ce programme est d'améliorer la quantification de l'échauffement nucléaire : paramètre clé pour le dimensionnement thermique des expériences dans les canaux expérimentaux du futur réacteur d'irradiation en cours de construction sur Cadarache (le Réacteur Jules Horowitz). Ce papier présente les premiers essais de qualification d'un nouveau banc d'essais permettant de reproduire et d'imposer à un calorimètre (capteur dédié à la mesure de cet échauffement) un environnement thermique/hydraulique caractéristique d'un canal en cœur du réacteur ainsi que l'étalonnage préliminaire d'une cellule calorimétrique.

## Nomenclature

$H$	Hauteur, $m$	<i>Indices et exposants</i>
$P$	Puissance, $W$	$e$ électrique
$R$	Rayon, $mm$	$f$ fluide caloporteur
$Re$	Nombre de Reynolds	$p$ pied
$T$	Température, $^{\circ}C$	$s$ socle
$V$	Vitesse, $m.s^{-1}$	

## 1. Contexte et objectifs

Dans un réacteur nucléaire, le phénomène de fission nucléaire s'accompagne d'une libération d'énergie et d'une production indirecte ou directe de particules chargées et neutres interagissant par la suite avec la matière (cf. Figure 1).

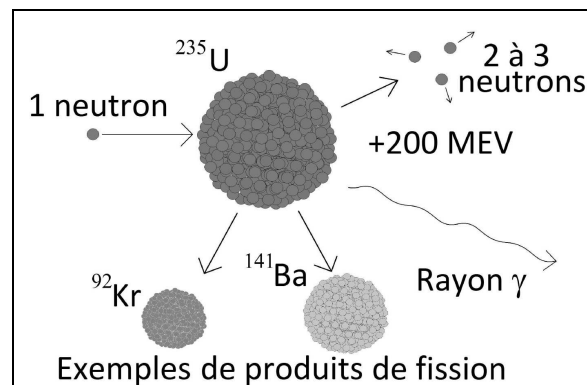


Figure 1 : Réaction de fission de l'uranium 235 ( $^{235}\text{U}$ )

Ces interactions conditionnées par différents paramètres (nature, énergie et direction de la particule incidente, nature physico-chimique, forme et dimensions de la matière cible, température,...) induisent alors des transferts d'énergie. Ces « dépôts » d'énergie surviennent d'une part au voisinage immédiat de la réaction de fission par le biais des interactions entre les particules chargées et la matière, et d'autre part dans des zones plus éloignées du fait des interactions des photons et des neutrons. Ces particules non chargées produisant à leur tour des particules chargées sur un nouveau site de réaction déposent peu à peu leur énergie dans la matière. Ce dépôt d'énergie, traduit sous forme d'agitation thermique, engendre un échauffement de la matière qui est appelé échauffement nucléaire et qui est communément exprimé en W/g d'échantillon. La connaissance et la maîtrise précises de cet échauffement nucléaire constituent des enjeux majeurs dans les emplacements expérimentaux des réacteurs de recherche d'irradiation (Material Testing Reactors MTR). En effet, cette grandeur représente un paramètre clé pour la prédiction des températures mises en jeu dans le cœur/réflecteur de ce type de réacteur et par conséquent pour le dimensionnement thermique des systèmes et des dispositifs d'irradiation [1] associés aux expériences scientifiques intégrées dans les canaux expérimentaux : dimensionnement thermique assurant des conditions opératoires souhaitées et maîtrisées lors des études sur le vieillissement accéléré des matériaux de structure et sur le comportement de combustibles nucléaires sous irradiation. Cependant la précision associée à la quantification expérimentale ou numérique de ce paramètre est actuellement insuffisante (jusqu'à  $\pm 20\%$  d'écart entre les résultats expérimentaux et numériques) [1-2]. Par conséquent afin d'améliorer sa détermination et rendre ainsi les outils de calculs plus prédictifs dès le démarrage du nouveau MTR en cours de construction sur le site de Cadarache (le réacteur Jules Horowitz, RJH), 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 », est mené depuis fin 2009. Ce programme a un double objectif [3]. Le premier objectif est de développer un nouveau dispositif CARMEN. Ce dispositif permettra de mesurer en ligne simultanément l'échauffement nucléaire, les flux neutroniques (rapides et thermiques) et les flux photoniques dans les emplacements expérimentaux des canaux du RJH au moyen de différents détecteurs (calorimètre, thermomètre gamma, chambre à ionisation, chambres à fission, collectrons). Grâce à ces mesures, une interprétation combinée pourra être conduite pour aboutir in fine, en particulier, à une meilleure connaissance de l'échauffement nucléaire et de son origine. Le second objectif porte sur l'optimisation de la méthode de mesure qui permet de quantifier directement l'échauffement nucléaire lors de ces expériences en pile : la calorimétrie radiométrique. Pour cela, une approche analytique en thermique hors milieu irradié couplant travaux expérimentaux et numériques a été développée ciblant le capteur et sa méthode d'étalonnage préliminaire par effet Joule hors flux nucléaires. Cette approche a d'ores et déjà permis d'étudier la réponse d'une première configuration de capteur pour certaines conditions externes fluidiques et thermiques imposées [4-5] et de proposer une nouvelle configuration plus sensible pour la première campagne d'irradiation du prototype de CARMEN en périphérie du réacteur OSIRIS (MTR basé sur SACLAY) [6]. L'amélioration de l'étape préliminaire d'étalonnage hors flux sera réalisée grâce à des expériences conduites dans un nouveau Banc d'Essais ThermoHYdrauliques nommé BETHY.

Ce papier présente tout d'abord les caractéristiques géométriques, hydrauliques et thermiques de ce banc BETHY. Ensuite des premiers résultats de qualification métrologique de ce banc sont montrés pour un écoulement laminaire ou turbulent ascensionnel pour deux modes thermiques. Enfin une cellule calorimétrique est testée. Une courbe d'étalonnage est présentée et discutée.

## 2. Qualification du banc BETHY

Ce nouveau banc d'Essais Thermohydrauliques a été conçu et développé afin d'étudier la réponse de différents calorimètres et de les étalonner en fonction de différentes sollicitations thermiques et hydrauliques externes représentatives des conditions présentes au sein d'un canal d'expérimentation du réacteur RJH et variables selon le régime de puissance du réacteur.

### 2.1. Présentation des caractéristiques géométriques, hydrauliques et thermiques du banc BETHY

Ce banc se compose de quatre parties : une veine hydraulique instrumentée, une boucle fluide caloporteur, un système de chauffe externe et un système de contrôle-commande/acquisition.

La géométrie de la veine hydraulique instrumentée correspond à un canal expérimental de petite taille situé en cœur du réacteur Jules Horowitz. En fait le cœur du RJH (de forme cylindrique avec un diamètre de 60 cm et une hauteur de 60 cm) sera constitué de 37 alvéoles (cf. Figure 2). 34 d'entre elles seront occupées par des éléments combustibles. Parmi ces 34 alvéoles, 7 seront « évidées » au centre et seront utilisées comme canaux d'essais. Ces 7 canaux correspondront aux canaux d'essais dits de petite taille. Les 3 dernières alvéoles ne contenant pas d'éléments combustibles, constitueront des canaux d'essai de plus grande dimension (98 mm de diamètre) pouvant accueillir jusqu'à trois dispositifs expérimentaux simultanément.

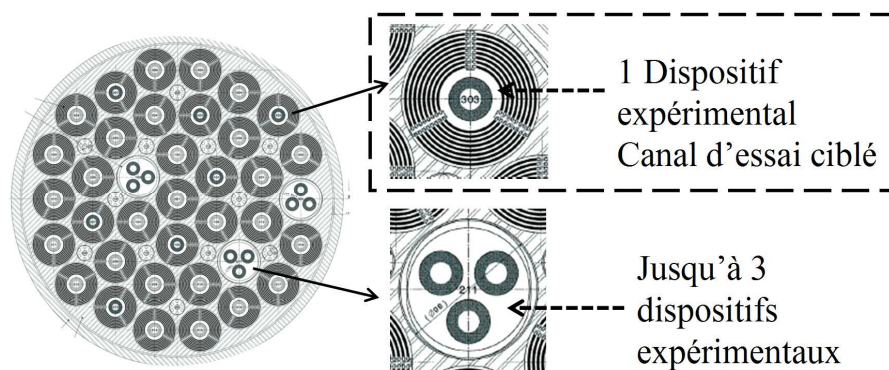


Figure 2 : Cœur du RJH (à gauche), deux types de canaux expérimentaux (à droite).

La veine hydraulique du banc BETHY correspond donc à un canal cylindrique vertical de 102 cm de hauteur constitué de quatre zones concentriques (cf. Figure 3). La première zone externe est un tube guide principal métallique de 40 mm de diamètre externe et 37 mm de diamètre interne. La deuxième zone interne en contact avec le tube guide correspond à un manchon d'épaisseur variable selon le diamètre hydraulique souhaité (de 3 mm à 19 mm). La troisième zone mobile située au centre du canal accueille le dispositif expérimental (tube cellule à l'extrémité du tube prolongateur). La dernière zone intermédiaire située entre le manchon et le dispositif correspond à une lame d'eau en écoulement dédiée à l'évacuation de l'énergie. Cette veine hydraulique est instrumentée en amont et en aval par deux capteurs de pression absolue et sur toute sa hauteur utile jusqu'à 54 thermocouples. Ces thermocouples insérés grâce à 18 bagues (possédant chacune 3 passages étanches réparties à 120° les uns par rapport aux autres et espacées de 4 cm entre elles) peuvent être positionnés en profondeur (dans la lame d'eau ou en paroi interne du manchon ou en contact avec le dispositif). L'écoulement au sein de la lame verticale annulaire est assuré par une boucle fluide régulée en débit et en température. Cette boucle fluide est constituée d'un circuit hydraulique (pompe

+ débitmètres + électrovannes), d'un tube réchauffeur (<3kW), d'un groupe froid (<7kW) et d'un homogénéisateur. Elle permet d'imposer un écoulement ascendant ou descendant. Deux plages de vitesses sont possibles : une première allant de 0,1 m/s à 2 m/s (soit  $Re$  compris entre 322 et 6376 à 23°C) et une deuxième allant de 2 m/s à 8 m/s (soit  $Re$  jusqu'à 25504 à 23°C) pour le plus petit diamètre hydraulique. La température d'entrée de veine est comprise entre 20 et 40°C (ce qui correspond à la plage possible en réacteur RJH).

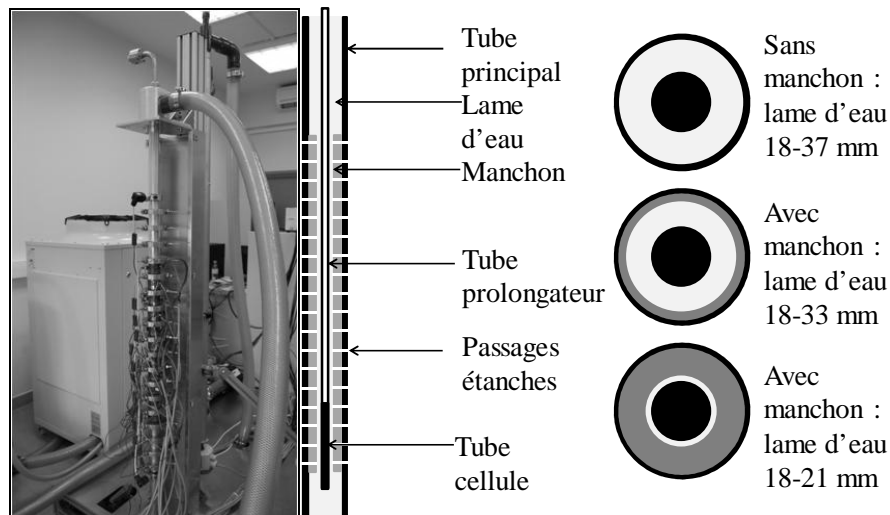


Figure 3 : Photo du banc BETHY (à gauche), schéma des zones concentriques constituant la veine hydraulique (à droite).

Cette veine instrumentée et cette boucle fluide sont associées à un système de chauffage externe situé en périphérie du tube guide principal et dédié à un apport supplémentaire d'énergie représentatif de l'apport induit par le milieu environnant le canal d'expérimentation. Ce système de chauffe externe comprend 11 éléments chauffants capables de fournir à pleine puissance 650W chacun (cf. Figure 3). Ces éléments chauffants équipés chacun d'un thermocouple sont disposés dans la hauteur utile de la veine instrumentée de part et d'autre des bagues instrumentées. Ils peuvent être réglés en température ou en puissance et de façon indépendante les uns des autres afin d'imposer différents profils de température.

## 2.2. Résultats et discussions

Dans le présent papier ne seront traitées que les expériences pour lesquelles la veine hydraulique est régie par un écoulement ascendant. Plus précisément, différentes expériences ont été menées dans la petite plage de vitesses afin d'établir différents profils axiaux de température au centre de la lame d'eau annulaire selon les deux modes thermiques du banc.

### 2.2.1. Mode thermique sans système de chauffe extérieur

La première série d'expériences correspond à la qualification du premier mode thermique du banc c'est-à-dire un mode de fonctionnement sans utilisation du système de chauffe externe. Ces expériences ont été réalisées pour une consigne de température d'entrée de veine fixée à 23°C (valeur de la température attendue en entrée du cœur du réacteur RJH) et pour différentes vitesses d'écoulement (soit 0,1 m/s ( $Re = 322$ ), 1 m/s ( $Re = 3216$ ) et 2 m/s ( $Re = 6376$ )). Cette première série d'expériences a permis de déterminer l'homogénéité spatiale de la température dans la lame d'eau, de vérifier la reproductibilité des mesures (cf. Figure 4), et de confirmer la faible influence de la vitesse du fluide caloporteur sur le profil axial de

température (cf. Figure 5). Le système de régulation est à optimiser afin de réduire les oscillations de la température observées et de réduire les écarts types.

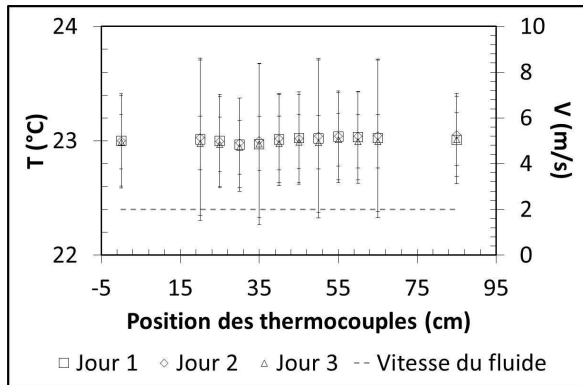


Figure 4 : Profil axial de la température dans la lame d'eau à 2 m/s.

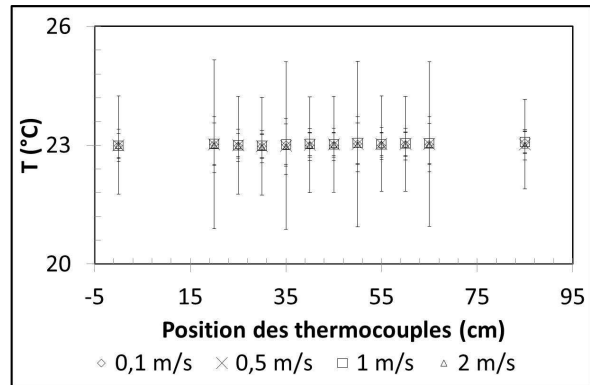


Figure 5 : Profil axial de la température dans la lame d'eau pour différentes vitesses.

### 2.2.2. Mode thermique avec système de chauffe extérieur

La deuxième série d'expériences a été conduite en utilisant le système de chauffe externe (deuxième mode) suivant deux protocoles. Le premier protocole correspond à l'application d'un flux constant sur chaque élément chauffant (consigne de 125 W). Le second protocole consiste à imposer un flux constant sur les éléments chauffants en entrée de veine (4 premiers éléments à la consigne de 125 W). Ces deux protocoles ont permis d'obtenir les profils axiaux de température fournis à la figure 6.

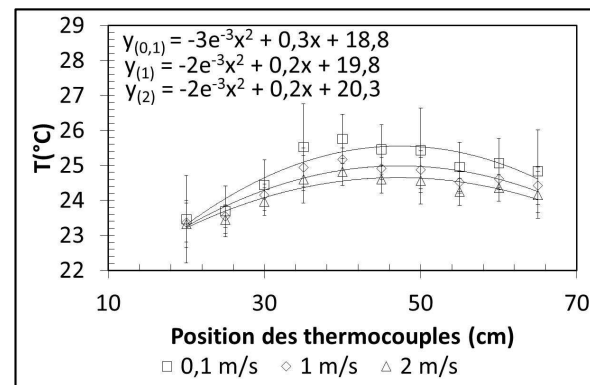
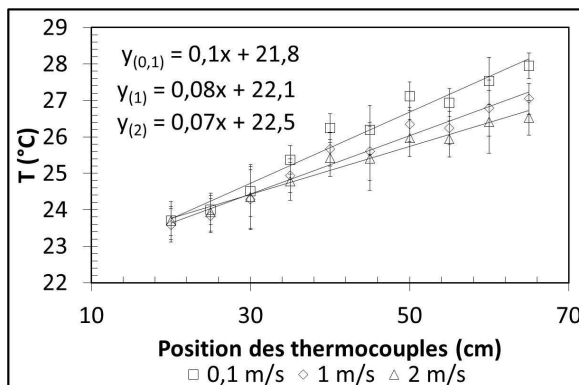


Figure 6 : Profils axiaux de la température dans le cas de deux protocoles pour différentes vitesses du fluide caloporteur : 11 colliers chauffants activés (à gauche), 4 colliers chauffants activés (à droite).

L'influence de la vitesse de l'écoulement sur la température est observée. Plus la vitesse augmente, plus la température de sortie de veine diminue. Lorsque tous les éléments chauffants sont activés, le profil de température est linéaire. Par contre, lorsque seulement certains colliers chauffants sont utilisés, un profil incurvé est obtenu. Ce dernier, encore à optimiser, est intéressant car il se rapproche des conditions en milieu irradié avec un échauffement nucléaire maximal dans le plan médian du cœur.

## 3. Courbe d'étalonnage hors flux nucléaires

Dans ce paragraphe, le tube cellule du banc BETHY contient une cellule calorimétrique afin d'étudier sa réponse dans des conditions d'étalonnage.

### 3.1. Présentation de la cellule calorimétrique

La cellule calorimétrique testée correspond à l'une des deux cellules constituant le calorimètre différentiel non adiabatique utilisé dans le prototype du dispositif CARMEN : la cellule de référence. En fait, ce type de calorimètre comprend deux cellules identiques (cf. Figure 7) : l'une dite de mesure contenant un échantillon de graphite, l'autre dite de référence sans échantillon. En milieu irradié, la cellule de référence est utilisée pour déterminer le dépôt d'énergie sur la structure des cellules et pour remonter ainsi par une mesure différentielle à l'échauffement nucléaire de l'échantillon uniquement. Chaque cellule est constituée de trois parties : une tête, un piédestal et un socle (du haut vers le bas sur la figure 7).

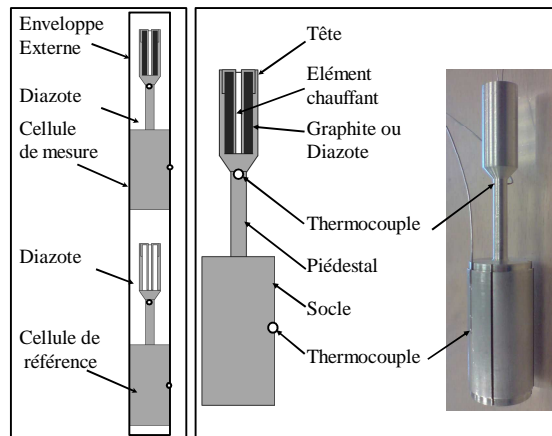


Figure 7 : Schéma du calorimètre et des cellules calorimétriques (à gauche) et photo d'une cellule calorimétrique [4-5] (à droite).

Chaque tête contient en son centre un élément chauffant qui est utilisé pour calibrer chaque cellule en simulant l'échauffement nucléaire par effet Joule. Le socle en contact avec l'enveloppe du calorimètre sert à évacuer l'énergie vers le fluide caloporteur. L'échantillon de graphite se situe autour de l'élément chauffant dans le cas de la cellule dite de mesure, et est remplacé par du gaz (diazote) dans le cas de la cellule dite de référence. Chaque cellule est instrumentée par deux thermocouples de type K positionnés respectivement en partie haute du piédestal et sur le socle en paroi externe à mi-hauteur (cf. Figure 7). L'échauffement nucléaire peut être alors déterminé à partir des deux mesures de différence de température effectuées respectivement aux bornes de la cellule de mesure et aux bornes de la cellule dite de référence positionnée à la même côte et à partir des courbes d'étalonnage des deux cellules. L'étalonnage de la cellule de référence, est présenté dans le paragraphe suivant. Il a été effectué dans le banc BETHY en se plaçant dans des conditions similaires à celles imposées à une cellule calorimétrique précédemment étudiée dans un bain thermostatique à débordement [4-5] (température axiale homogène) afin d'effectuer une comparaison de leur réponse et d'étudier l'influence de la vitesse du fluide caloporteur. Les caractéristiques géométriques de la cellule calorimétrique du prototype du dispositif CARMEN et de celle précédemment étudiée sont données dans le tableau 1. La cellule calorimétrique du prototype CARMEN possède un piédestal de rayon plus petit et un socle d'hauteur plus petite :

Cellule calorimétrique	Ancienne cellule [4-5]		Cellule étudiée	
	$R$	$H$	$R$	$H$
	mm	mm	mm	mm
Piédestal	1,8	20	1	40
Socle	8,5	35	8,5	15

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques de deux cellules calorimétriques

### 3.2. Influence de la vitesse du fluide caloporteur

L'étape d'étalonnage préliminaire à la mise en pile effectuée hors flux nucléaires consiste à injecter une puissance électrique dans l'élément chauffant situé dans la tête de la cellule calorimétrique par incrémentation (cf. Figure 8). Pour chaque puissance injectée, la réponse de la cellule définie par la différence de température moyenne ( $T_p - T_s$ ) est déterminée dans la phase stationnaire. Puis cette différence de température est tracée en fonction de la puissance électrique injectée afin d'obtenir la courbe d'étalonnage fournie à la Figure 9.

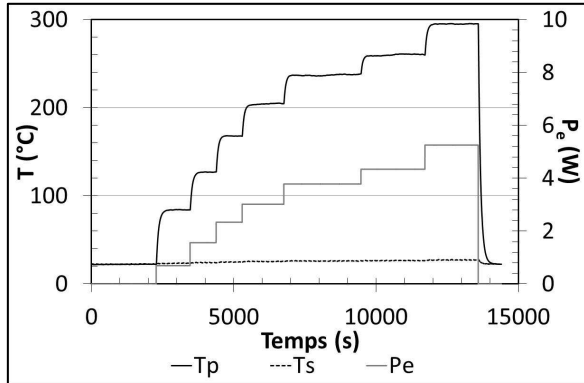


Figure 8 :  $T_p$  et  $T_s$  en fonction du temps pour diverses  $P_e$  ( $V_f = 0,5$  m/s).

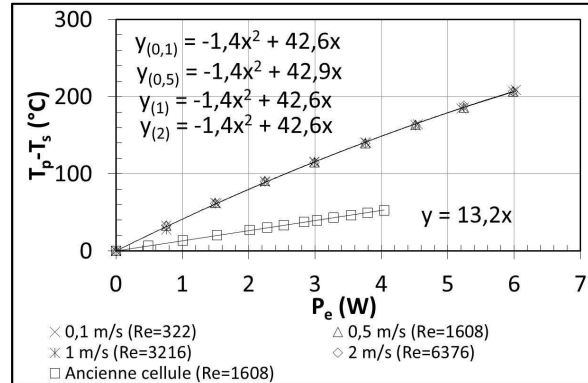


Figure 9 : Courbe d'étalonnage pour différentes vitesses du fluide caloporteur.

La réponse de la cellule a été déterminée pour une température de fluide caloporteur égale à  $23^\circ\text{C}$  et pour quatre vitesses imposées allant d'un régime de convection forcée laminaire ( $Re = 322$ ) à un régime de convection forcée turbulente ( $Re = 6376$ ). D'une part, la figure 9 confirme que par rapport à la configuration calorimétrique précédemment étudiée [5], la réponse de la cellule relative au dispositif CARMEN est plus sensible. Ceci est dû au changement de dimension du piédestal (diminution de son rayon et augmentation de sa longueur) qui entraîne une augmentation de la résistance thermique entre les deux prises de température. Cette augmentation de sensibilité s'accompagne cependant d'un inconvénient. La réponse de la cellule calorimétrique n'est plus linéaire contrairement à la celle de la précédente configuration. La linéarité était due à un comportement thermique spécifique caractéristiques d'un capteur à écoulement de chaleur directionnel par conduction. Cette nouvelle tendance d'ordre 2 traduit donc d'un nouveau comportement thermique pour cette nouvelle cellule. En effet, cette nouvelle cellule est plus résistive, ce qui entraîne une température plus importante au sein de la cellule pour une même puissance imposée. Ceci engendre alors une augmentation des transferts de chaleur radiaux à travers la couche de gaz dans l'enveloppe (transferts conductifs + radiatifs) et donc une diminution de l'énergie évacuée par le socle. D'autre part, la figure 9 montre que le régime de convection influence peu la réponse de la cellule calorimétrique. Ceci s'explique par le fait que le régime laminaire est déjà suffisant pour évacuer l'énergie injectée (faible dépôt localisé dans la tête) et obtenir une température de la paroi externe de l'enveloppe quasi isotherme. En conclusion la sensibilité de cette cellule calorimétrique dépend de la puissance injectée mais ne dépend pas de la vitesse de l'écoulement pour une source localisée dans la tête. Le comportement sera à étudier lors d'une source localisée sur toute la structure.

### 4. Conclusion et perspectives

Un banc d'Essais ThermoHYdrauliques conçu pour étudier la réponse de cellules calorimétriques dédiées à la mesure de l'échauffement nucléaire a été récemment réceptionné (septembre 2012). Ce banc BETHY constitué d'une veine hydraulique instrumentée, d'une

boucle de fluide régulée et d'un système de chauffe externe permet de reproduire différentes conditions thermiques et fluidiques représentatives de celles présentes dans un canal d'expérimentation de petit diamètre en cœur du réacteur Jules Horowitz. Des premiers essais de ce banc ont été menés dans deux modes thermiques de fonctionnement (avec ou sans activation du système de chauffe externe) pour la plus petite plage de vitesses et dans le cas d'un écoulement forcé ascendant. Ces premiers essais ont permis de vérifier certaines caractéristiques métrologiques de ce banc (reproductibilité, temps de réponse, stabilité). Ils ont montré qu'il est possible d'imposer différentes conditions limites thermiques à la lame d'eau (température constante, profil axial de température spécifique). L'influence de la vitesse du fluide caloporteur sur ces conditions limites a été observée. De nouvelles études paramétriques systématiques vont être menées afin d'établir de nouveaux profils de température. Le banc sera également qualifié pour la deuxième plage de vitesses et dans le cas d'un écoulement descendant.

Une cellule calorimétrique de référence correspondant à celle développée pour le prototype du dispositif CARMEN, a été intégrée dans le porte-cellule du banc BETHY afin de réaliser son étalonnage par effet Joule. Le mode thermique sans système de chauffe externe a été appliqué afin de comparer sa courbe d'étalonnage à celle obtenue pour une configuration précédemment testée dans un dispositif prémaquette (température homogène). La cellule plus résistive s'avère plus sensible mais possède une réponse non linéaire en fonction de la puissance injectée. Le régime d'écoulement a peu d'influence sur la réponse du capteur. De nouvelles campagnes d'étalonnage vont être conduites dans le cas du calorimètre complet (cellule de mesure + cellule de référence) en activant le système de chauffe externe. La réponse des deux éprouvettes sera étudiée en fonction de différents profils axiaux de température. Un protocole impliquant un déplacement des éprouvettes sera testé afin de se rapprocher des conditions opératoires en réacteur.

## Références

- [1] 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 (ISRDI4)*, 22-27 Mai 2011, Omni Mount Washington Resort, USA
- [2] B.M Makgopa *et al.*, Simulation of the In-Core Calorimeter Experiment in the SAFARI-1 Reactor, *Proc. Int. Conf. of Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications*, Juin 2009, Marseille, France.
- [3] 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, *Trans. of European Research Reactor Conference (RRFM 2012)*, 18 - 22 Mars 2012, République Tchèque, Prague.
- [4] J. Brun *et al.*, Numerical and experimental calibration of calorimetric sample cell dedicated to nuclear heating measurements, *IEEE, Transactions on Nuclear Sciences*, Volume: 59 , Issue: 6 , Part: 2, pp 3173 – 3179
- [5] C. Reynard-Carette *et al.*, Heat transfers associated to a non adiabatic differential calorimeter for nuclear heating measurements inside an experimental channel of the Jules Horowitz Reactor, *Proc. Eurotherm 2012*, Septembre 2012, Poitiers, France.
- [6] D. Fourmentel *et al.*, Nuclear Heating Measurements in Material Testing Reactor: a Comparison Between a Differential Calorimeter And a Gamma Thermometer, *IEEE, Transactions on Nuclear Sciences*; publication acceptée.