

Mise en œuvre d'une méthode d'inversion pour la détermination de la puissance résiduelle d'un combustible nucléaire irradié dans le cadre de l'expérience PRESTO

Implementation of an inverse method to determine the decay heat released by an irradiated nuclear fuel sample in the PRESTO experiment framework

Francesco MURATORI^{1,2*}, Frédéric NGUYEN¹, Christian GONNIER¹, Christophe LE NILIOT², Romain ESCHBACH¹

¹CEA, DEN, Cadarache, DER, F-13108 Saint-Paul-lez-Durance, France.

²Aix Marseille Univ, CNRS, IUSTI, Marseille, France.

*(Corresponding author: francesco.muratori@cea.fr)

Résumé – L'expérience PRESTO est une mesure calorimétrique de la puissance résiduelle d'un combustible nucléaire irradié aux temps de refroidissement très courts sur le réacteur RJH. Les contraintes technologiques obligent à réaliser l'expérience dans la région du réacteur, ce qui apporte un niveau de perturbation d'environ 15 % sur les flux thermiques. Il est donc nécessaire de discriminer cette perturbation de la puissance résiduelle du combustible à estimer. Nous mettons en œuvre une méthode inverse pour l'estimation de cette puissance résiduelle.

Mots-clés : Puissance résiduelle ; Expérience PRESTO ; Réacteur Jules Horowitz RJH ; Problème Inverse ; Combustible Irradié.

Abstract – The PRESTO experiment is a calorimetric measurement of the decay heat released by an irradiated nuclear fuel sample in the very short cooling times on the JHR reactor. The experimental constraints require to perform the measurement in the reactor vicinity, which leads to a level of perturbations of about 15 % on measured values. Thus, we need for a method to discriminate perturbations from the fuel sample decay heat. We implement an inverse technique to estimate this source of power.

Keywords: Decay heat; PRESTO experiment; Jules Horowitz Reactor JHR; Inverse problem; Irradiated fuel.

Nomenclature

T	Température, °C.	ρ	Masse volumique, kg.m ⁻³ .
h	Coefficient d'échange thermique, W.m ⁻² .	ξ	coefficient de répartition
k	Conductivité thermique, W.m ⁻¹ .°C ⁻¹ .	ε	bruit de mesure (°C).
c_p	Chaleur spécifique, J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹ .	σ	écart type.
P_r	Puissance résiduelle, W.	ψ	vecteur des paramètres.
p_r	Densité de puissance résiduelle, W.m ⁻³ .	Γ	surface verticale.
t	temps de refroidissement, s.	<i>Indices et exposants</i>	
N_c	Nombre de capteurs.	<i>pis</i>	Piscine du RJH.
N_t	Nombre d'instantanés temporels.	<i>cr</i>	Crayon de combustible.
J	Fonctionnelle, °C ² .	<i>RJH</i>	Réacteur Jules Horowitz.
S	Matrice de sensibilité.	W	Écran en tungstène.
$cov(\cdot)$	Matrice de covariance.	A	Conteneur en acier.
<i>Symboles grecs</i>		N_2	Gaz diazote.

i côté interne.
e côté externe.
mes Mesures.

mod Modèle.
est Valeur estimée.
dep Valeur de départ.

1. Introduction

« La puissance résiduelle est la puissance thermique développée par un réacteur après l'arrêt, provenant essentiellement de la radioactivité du combustible nucléaire et des autres matériaux, ainsi que des fissions résiduelles » (Autorité de Sûreté Nucléaire, ASN) ; son intensité augmente avec le taux de combustion du combustible, jusqu'à un niveau de saturation, et décroît exponentiellement au cours du refroidissement. Cette puissance est à prendre en compte pour la totalité de l'aval du cycle du combustible : les mesures de sauvegarde du réacteur – *e.g* systèmes de protection, déchargement du cœur –, le transport, l'entreposage et le retraitement du combustible, le stockage permanent... Pour cela, il est important de valider les codes de calcul, tel que le formulaire DARWIN [1] du CEA, avec des mesures expérimentales. La calorimétrie a été utilisée pour réaliser des mesures intégrales de la puissance résiduelle à plusieurs échelles de grandeur ; par exemple, on peut citer les mesures réalisées sur des petites plaquettes de U^{233} , U^{235} , Pu^{239} (1978) [2], les réacteurs PHENIX et SUPERPHENIX (1990) [3], les assemblages de combustible usé REP et REB au site d'entreposage Clab (2006) [4], l'expérience MERCI (2008) [5]... Cependant, les temps de réponse de la plupart des calorimètres actuels ne permettent pas leur application pour une mesure de la puissance résiduelle aux temps de refroidissement très courts, là où les changements du niveau de puissance sont plus importants [6].

L'expérience PRESTO (*Power Estimation for Short Time Optimization*) [7], actuellement envisagée au CEA, est une expérience de mesure calorimétrique de la puissance résiduelle d'un combustible nucléaire irradié aux temps très courts, c'est-à-dire entre 1 et 40 minutes de temps de refroidissement (t), sur le Réacteur Jules Horowitz (RJH) [8]. Le calorimètre a été conçu du type « heat-up rate » : la puissance résiduelle est quantifiée sur la base de la puissance stockée dans le combustible et les structures du dispositif expérimental. Les contraintes technologiques obligent à réaliser l'expérience dans l'environnement du réacteur [7] ; ce qui apporte des perturbations non négligeables sur la mesure, correspondant environ à 15% de la puissance à mesurer, et dues à la puissance résiduelle du réacteur lui-même. Afin de pouvoir discriminer la source de la perturbation, la puissance résiduelle est estimée à l'aide d'une méthode inverse. Il s'agit d'un algorithme d'optimisation estimant une fonction inconnue, telle que la puissance résiduelle du crayon, à partir des données expérimentales, telles que des mesures de température, avec une modélisation thermique où les sources de puissance et les transferts thermiques se produisant dans le calorimètre sont bien décrits.

Dans cette communication, nous mettons en œuvre d'une méthode d'inversion pour l'estimation de la puissance résiduelle d'un combustible nucléaire irradié dans l'expérience PRESTO. Cela est réalisé par résolution d'un problème inverse du type « inverse crime » [9] (le même modèle est utilisé pour générer et inverser les « données expérimentales »).

2. Le calorimètre de l'expérience PRESTO

La section au plan médian horizontal du calorimètre est affichée en figure 1. Le dispositif expérimental a un diamètre de 0,1 m et une hauteur de 1 m. Il est placé dans le réflecteur du RJH, en contact avec l'eau de la piscine, où le coefficient d'échange thermique h_{pis} et la température T_{pis} sont environ de $8000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nous avons l'échantillon de combustible en rouge, l'écran en tungstène en violet et le conteneur en acier inoxydable en gris. Les espaces interstitiels sont remplis avec du gaz,

diazote N_2 , pour limiter les échanges thermiques entre combustible et tungstène et avec l'extérieur.

Dans la figure 1, nous avons indiqué la surface verticale du combustible Γ_c , les surfaces verticales internes et externes du tungstène $\Gamma_{W,i}$ et $\Gamma_{W,e}$, et la surface verticale interne de l'acier $\Gamma_{A,i}$. Les surfaces horizontales, en haut et bas du calorimètre, sont indiquées dans les équations qui suivent avec le symbole Ω .

Le nombre de Biot Bi pour le tungstène est de l'ordre de 10^{-3} . Par conséquent, le système réagit en bloc et le champ de température dans le tungstène est presque uniforme. Le nombre de Rayleigh (Ra) est au maximum de l'ordre de 6×10^3 pendant l'expérience ; par conséquent, nous n'avons pas modélisé la convection naturelle dans le gaz et les transferts thermiques dans celui-ci ont été considérés comme purement conductifs.

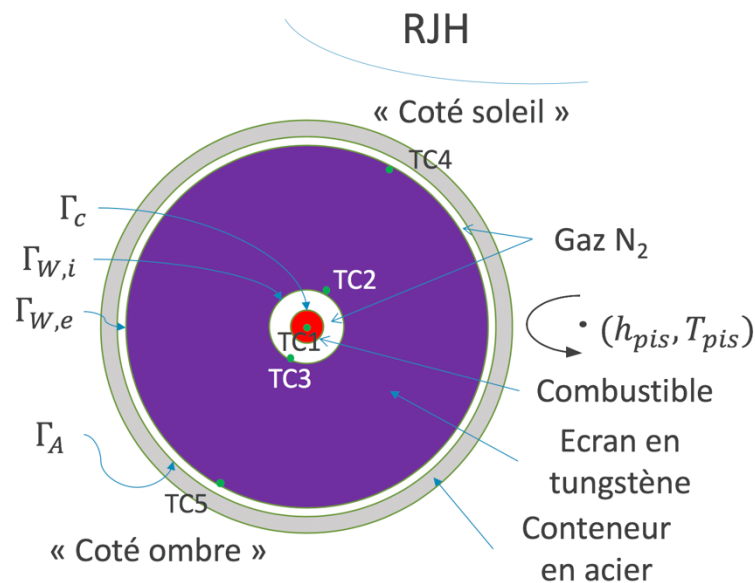


Figure 1 : Le calorimètre de l'expérience PRESTO, avec le positionnement des thermocouples.

2.1. Les sources de puissance

Les principales sources de puissance dans le calorimètre sont : la puissance résiduelle de l'échantillon de combustible $P_{r,cr}$ [W] et les échauffements nucléaires provenant de la puissance résiduelle du RJH. Les deux décroissent exponentiellement dans le temps et sont déposées dans tous les composants du calorimètre : combustible, tungstène et acier (voir la figure 1). La puissance résiduelle du combustible est déposée de façon constante selon la coordonnée angulaire, alors que les perturbations provenant du réacteur mettent en évidence un côté « soleil », en face du réacteur, et un côté « ombre » à l'opposé (voir la figure 1). La modélisation des densités de puissance dans le calorimètre a été réalisée avec l'introduction d'informations a priori, en bon accord avec la physique et la géométrie du système.

2.1.1. Les densités des dépôts de puissance dus à la puissance résiduelle du combustible

La puissance $P_{r,cr}$ est environ de 240 W au début de l'expérience ($t=1$ min) et de 100 W à la fin ($t=40$ min). Elle a été considérée comme complètement absorbée dans le combustible et l'écran en tungstène. Par conséquent, nous avons défini un coefficient de répartition ζ , correspondant à la fraction de puissance déposée dans le combustible ; la valeur du

coefficient a été fixée à 0,6. Les densités des dépôts de puissance dans le combustible ($p_{r,cr \rightarrow cr}$) et dans le tungstène ($p_{r,cr \rightarrow W}$) ont alors été modélisées de la façon suivante :

$$p_{r,cr \rightarrow cr}(r, z, t) = \xi P_{r,cr}(t) \frac{1}{\pi r_{cr}^2} g(z), \quad g(z) \propto \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right), \quad (1)$$

$$p_{r,cr \rightarrow W}(r, z, t) = (1 - \xi) P_{r,cr}(t) \frac{\gamma(r)g(z)}{2\pi}, \quad \gamma(r) \propto e^{-\mu \Delta r}, g(z) \propto \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right). \quad (2)$$

où r_{cr} est le rayon de combustible, $g(z)$ la fonction de distribution axiale de la puissance et $\gamma(r)$ la fonction de distribution radiale de la puissance dans l'écran en tungstène. Les fonctions $g(z)$ et $\gamma(r)$ sont déduites à partir des résultats classiques sur la distribution de la puissance dans le réacteur nucléaire [10].

2.1.2. Les densités des dépôts de puissance dus à la puissance résiduelle du RJH

Les échauffements gamma du RJH dans le calorimètre ont été estimés avec le code TRIPOLI [11] pour les temps des refroidissement $t=2$ min et $t=1$ h ; la puissance totale déposée dans le calorimètre est d'environ 40 W à $t=2$ min et 15 W à $t=1$ h [12]. D'après ces calculs, les échauffements dans le combustible ont été considérés comme négligeables, puisqu'ils sont plus petits que la puissance développée par le combustible lui-même d'au moins un facteur 100. Les densités de puissance dans le tungstène ($p_{r,RJH \rightarrow W}$) et l'acier ($p_{r,RJH \rightarrow A}$) ont alors été modélisées de la façon suivante :

$$p_{r,RJH \rightarrow W}(\theta, t) = P_{r,RJH \rightarrow W}(t) f(\theta) \frac{2}{r_{W,e}^2 - r_{W,i}^2} \frac{1}{H}, \quad (3)$$

$$p_{r,RJH \rightarrow A}(\theta, t) = P_{r,RJH \rightarrow A}(t) f(\theta) \frac{2}{r_{A,e}^2 - r_{A,i}^2} \frac{1}{H}. \quad (4)$$

où $P_{r,RJH \rightarrow W}$ et $P_{r,RJH \rightarrow A}$ sont respectivement les puissances totales déposées dans le tungstène et l'acier au cours du temps, $f(\theta)$ la densité angulaire de puissance – déterminée par le calcul TRIPOLI –, H la hauteur du système, et $r_{W,e}$, $r_{W,i}$ et $r_{A,e}$, $r_{A,i}$ les rayons interne et externe de l'écran en tungstène et du conteneur en acier.

2.2. Les transferts thermiques

Les transferts thermiques se produisant dans le calorimètre sont du type conductifs et radiatifs. Si on considère l'écran en tungstène, le modèle analytique décrivant l'échange thermique est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_W c_{p,W} \frac{\partial T_W}{\partial t} = k_W \Delta T_W + p_{r,cr \rightarrow W}(\vec{x}, t) + p_{r,RJH \rightarrow W}(\vec{x}, t), \\ -k_W \overrightarrow{\nabla T_W} \cdot \hat{e}_r |_{\Gamma_{W,i}} = -k_{N_2} \overrightarrow{\nabla T_{N_2}} \cdot \hat{e}_r |_{\Gamma_{W,i}} + \epsilon_W \sigma_b F_{W,cr} (T_W^4 - T_{cr}^4), \\ -k_W \overrightarrow{\nabla T_W} \cdot \hat{e}_r |_{\Gamma_{W,e}} = -k_{N_2} \overrightarrow{\nabla T_{N_2}} \cdot \hat{e}_r |_{\Gamma_{W,e}} + \epsilon_W \sigma_b F_{W,A} (T_W^4 - T_A^4), \\ -k_W \overrightarrow{\nabla T_W} \cdot \hat{e}_z |_{\Omega} = 0, \\ T_W(\vec{x}, t = 0) = 30 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Où T_W , T_{cr} , T_{N_2} , et T_A sont respectivement les champs de température dans le tungstène, le combustible, le gaz, et l'acier ; ρ_W , $c_{p,W}$, k_W , la masse volumique, la chaleur spécifique et la conductivité thermique de l'écran en tungstène ; k_{N_2} la conductivité thermique du diazote ; ϵ_W , σ_b l'émissivité du tungstène et la constant de Stefan-Boltzmann ; $F_{W,cr}$ et $F_{W,A}$ les

facteurs de forme entre tungstène et combustible et entre tungstène et acier pour les échanges radiatifs ; le vecteur \hat{e}_Γ et \hat{e}_Ω les normales aux surfaces Γ et Ω .

Un outil de calcul, utilisant la technique des volumes finis et l'approximation des facteurs de forme [13], a été programmé, avec le logiciel *Scilab*, pour la résolution du système différentiel (5).

3. Le problème inverse

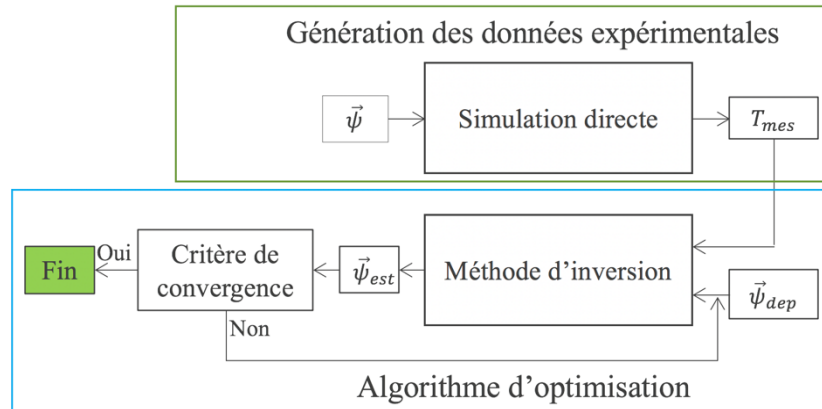


Figure 2 : Schéma du « inverse crime ».

La figure 2 montre le schéma du problème inverse à résoudre (« inverse crime »). D'abord, nous générons les « données expérimentales » en insérant en « input » de l'outil de calcul utilisé (paragraphe 2.2) les valeurs exactes des paramètres à estimer ($\vec{\psi}$). Puis, les pseudo-mesures de température (T_{mes}) obtenues sont bruitées et injectées dans l'algorithme d'optimisation. À cette étape, une solution de départ pour le problème inverse ($\vec{\psi}_{dep}$) est choisie et la méthode d'inversion est mise en œuvre. L'objectif de cette démarche est de trouver une estimation des paramètres $\vec{\psi}_{est}$, dont la distance aux valeurs exactes $\vec{\psi}$ soit contenue dans les limites des incertitudes. Cela est en fait le premier jalon à franchir pour vérifier l'applicabilité de la méthode à des vraies données expérimentales.

3.1. Les paramétrisations des fonctions $P_{r,cr}$ et $P_{r,RJH \rightarrow W}$

Nous voulons estimer la puissance résiduelle du crayon ($P_{r,cr}$), présent dans les équations (1) et (2), et le dépôt de puissance du RJH dans l'écran en tungstène ($P_{r,RJH \rightarrow W}$), présent dans l'équation (3) ; par contre, le dépôt de puissance du RJH dans l'acier ($P_{r,RJH \rightarrow A}$), présent dans l'équation (4), a été considéré comme parfaitement connu.

La tendance physique de la puissance résiduelle est exponentielle décroissante. Sa valeur est calculée en connaissant les concentrations des isotopes composant le combustible au cours du refroidissement, avec les données nucléaires de décroissance [5]. Dans le cadre de ce travail, nous avons vérifié que la puissance résiduelle d'un combustible de UO_2 , irradié dans le réflecteur du RJH, peut être représentée avec une erreur de 1% par une somme de trois exponentielles. Ainsi, l'équation (6a) a été utilisée pour la paramétrisation de $P_{r,cr}$.

Concernant la paramétrisation de la perturbation dans l'écran en tungstène (6b), nous avons considéré une exponentielle basée sur les résultats des calculs TRIPOLI mentionnés au paragraphe 2.1.2.

$$P_{r,cr}(\vec{\psi}, t) = \psi_1 e^{-\psi_2^2 t} + \psi_3 e^{-\psi_4^2 t} + \psi_5 e^{-\psi_6^2 t} \quad (6a) \quad P_{r,RJH \rightarrow W}(\vec{\psi}, t) = \psi_7 e^{-\psi_8^2 t} \quad (6b)$$

3.2. La Génération des données expérimentales

La figure 1 montre le calorimètre de l'expérience PRESTO tel que conçu dans ce travail. Nous avons placé $N_c=5$ thermocouples dans le combustible et le tungstène. Le thermocouple TC1, étant au milieu du combustible, est le plus sensible à la puissance du crayon $P_{r,cr}$ et le thermocouple TC4, étant en face du RJH, est le plus sensible à la puissance du réacteur $P_{r,RJH \rightarrow W}$. Les autres thermocouples ont été positionnés afin de prendre en compte les différences de température entre les côtés soleil et ombre du tungstène.

L'expérience PRESTO se déroule sur un intervalle temporel de 39 minutes : entre 1 minute et 40 minutes depuis la chute des barres du réacteur. Deux étapes préliminaires, l'irradiation du combustible et le refroidissement du calorimètre, ont déjà eu lieu [7]. Les pseudo-mesures de température sont distribuées uniformément sur l'intervalle et séparées par un Δt de 1 s. Par conséquent, nous avons $N_t=2340$ mesures par thermocouple.

Les pseudo-mesures de température sont enfin bruitées avant d'être injectées dans l'algorithme d'optimisation (voir équation (7)). Le bruit ε est additif, de distribution gaussienne (avec moyenne nulle et écart type σ_{mes} de 0,2 °C), et indépendant (les valeurs successives ne sont pas corrélées).

$$T_{mes} = T_{mod}(\vec{\psi}) + \varepsilon \quad (7)$$

3.3. La méthode d'optimisation

Le problème d'optimisation consiste à rechercher le vecteur $\vec{\psi}$, paramétrisant les fonctions inconnues (6a) et (6b), qui minimise la fonctionnelle suivant :

$$J(\vec{\psi}) = \sum_{k=1}^{N_c \times N_t} (T_{mes,k} - T_{mod}(\vec{\psi}, t_k))^2, \quad (8)$$

où T_{mes} et T_{mod} sont respectivement les températures issues des pseudo-mesures (7) et du modèle (5), t_k les instants considérés, et $N_c \times N_t$ le nombre total de mesures. Pour la recherche du minimum de (8), comme le modèle n'est pas linéaire, nous devons utiliser une méthode itérative. Ainsi, nous avons implémenté la méthode de Gauss-Newton selon l'algorithme de Levenberg-Marquard [14] :

$$\vec{\psi}^{p+1} = \vec{\psi}^p + ((S^p)^T S^p + \lambda^p I)^{-1} (S^p)^T (\vec{T}_{mes} - \vec{T}_{mod}(\vec{\psi}^p)), \quad S^p = \left(\frac{\partial T_{mod}}{\partial \vec{\psi}} \right)_{\vec{\psi}^p} \quad (9)$$

Dans la formule (9), p est l'indice de l'itération, λ^p le coefficient de régularisation, I la matrice d'identité, S^p la matrice de sensibilité et $S^T S$ la matrice d'information. L'algorithme s'arrête quand le critère de convergence (10) est satisfait ; cela correspond à une situation où l'écart entre mesures et modèle est essentiellement dû au bruit de mesure. Par conséquent, des itérations supplémentaires n'amélioreraient pas l'estimation des paramètres.

$$J(\vec{\psi}_{est}) \leq N_c N_t \sigma_{mes}^2 \quad (10)$$

Une fois que l'estimation $\vec{\psi}_{est}$ est obtenue, avant le calcul de la matrice de covariance, il faut vérifier que les résidus, c'est-à-dire les écarts entre les mesures et le modèle, aient les mêmes propriétés que le bruit de mesure indiquées au paragraphe 3.2.

La matrice de covariance sur les estimés est calculée avec l'approximation suivante :

$$cov(\vec{\psi}_{est}) \approx \sigma_{mes}^2 (S^T S)^{-1}, \quad (11)$$

où σ_{mes}^2 est la variance associée aux mesures de température (7) et $(S^T S)^{-1}$ la matrice d'amplification des erreurs de mesure. Ainsi, la qualité de l'estimation dépend d'une part de la précision des mesures et, d'autre part, du caractère mal-posé du problème inverse [14]. Le nombre de conditionnement de la matrice de sensibilité réduite est environ 670.

4. Résultats

Les résultats de l'optimisation sont donnés dans le tableau 1. Ici, nous avons reporté la solution exacte $\vec{\psi}$, la solution estimée $\vec{\psi}_{est}$, la différence en valeur absolue entre $\vec{\psi}$ et $\vec{\psi}_{est}$, les écarts types σ_{ψ} associées aux paramètres estimés, et le rapport entre l'écart type et la valeur estimée $\frac{\sigma_{\psi,k}}{\psi_{est,k}}$ de chaque paramètre. Nous voyons que les écarts $|\vec{\psi} - \vec{\psi}_{est}|$ sont de l'ordre des σ_{ψ} et que les rapports $\frac{\sigma_{\psi,k}}{\psi_{est,k}}$ sont inférieurs à 0,4 %. Ce qui signifie que la méthode converge vers la bonne solution et nous avons une bonne identification des paramètres.

	Paramètres de $P_{r,cr}$						Paramètres de $P_{r,RJH \rightarrow W}$	
	ψ_1 [°C.W ⁻¹]	ψ_2 [s ^{-1/2}]	ψ_3 [°C.W ⁻¹]	ψ_4 [s ^{-1/2}]	ψ_5 [°C.W ⁻¹]	ψ_6 [s ^{-1/2}]	ψ_7 [°C.W ⁻¹]	ψ_8 [s ^{-1/2}]
$\vec{\psi}$	71,1	0,107	44	4,74E-2	153,13	1,269E-2	29,63	1,801E-2
$\vec{\psi}_{est}$	70,84	0,1068	44,02	4,738E-2	153,14	1,273E-2	29,67	1,807E-2
$ \vec{\psi} - \vec{\psi}_{est} $	0,27	1,5E-4	4,92E-2	5,8E-5	1,56E-2	4,8E-6	4,25E-2	6,2E-5
σ_{ψ}	0,226	3,84E-4	1,637E-1	1,775E-4	0,118	1,276E-5	5,577E-2	5,78E-5
$\frac{\sigma_{\psi,i}}{\psi_{est,i}}$	3,2E-3	3,6E-3	3,7E-3	3,75E-4	7,7E-4	1E-3	1,8E-3	3,2E-3

Tableau 1 : Comparaison entre les valeurs exactes $\vec{\psi}$, les valeurs estimées $\vec{\psi}_{est}$ et les écarts type σ_{ψ} sur les estimés.

Les figures 4 et 5 montrent les puissances $P_{r,cr}$ et $P_{r,RJH \rightarrow W}$ en fonction des valeurs de départ (« initial guess ») $\vec{\psi}_{dep}$, des valeurs estimées $\vec{\psi}_{est}$ et des valeurs exacts $\vec{\psi}$ des paramètres, et les résidus des thermocouples TC1 et TC2 (voir figure 1). Un écart ponctuel

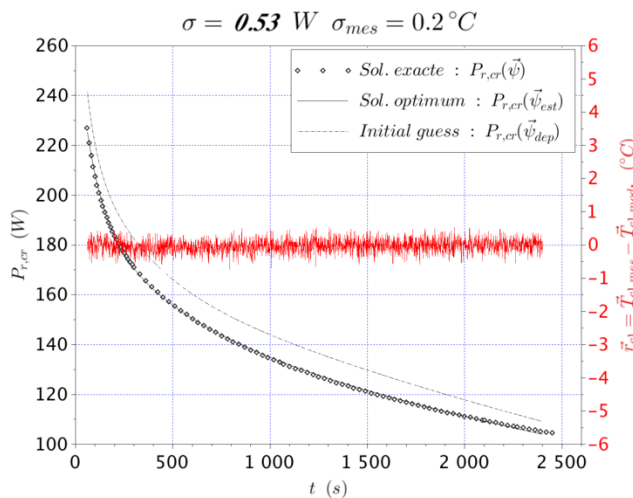


Figure 3 : Comparaison entre la solution exacte, la solution de départ (« initial guess ») et la solution estimée pour la puissance résiduelle du combustible.

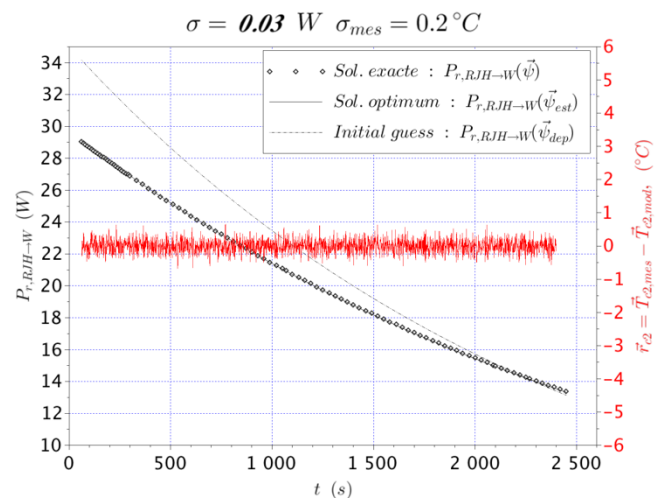


Figure 4 : Comparaison entre la solution exacte, la solution de départ (« initial guess ») et la solution estimée pour le dépôt de puissance du RJH dans l'écran en tungstène.

moyen σ a été également évalué entre $P_{r,cr}(\vec{\psi}_{est})$ et $P_{r,cr}(\vec{\psi})$ et entre $P_{r,RJH \rightarrow W}(\vec{\psi}_{est})$ et $P_{r,RJH \rightarrow W}(\vec{\psi})$ avec la formule de l'écart type. Nous voyons que l'écart σ est plus petit que 1% de la puissance résiduelle et que les résidus résultent non-corrélés. Ainsi, nous arrivons à déterminer à la fois les deux sources de puissance : $P_{r,cr}$ et $P_{r,RJH \rightarrow W}$.

5. Conclusion

La méthode inverse a été implémentée avec succès pour l'estimation de la puissance résiduelle du crayon $P_{r,cr}$. Celle-ci a permis de remonter, à partir des données expérimentales, aux sources de puissance dans le calorimètre telles qu'elles étaient décrites dans le modèle thermique (paragraphe 2.1). Néanmoins, un a priori important a été introduit dans la mise en œuvre de la méthode inverse : le coefficient de répartition de la puissance résiduelle du crayon (ζ , paragraphe 2.1.1) dans le calorimètre a été traité comme un paramètre supposé connu. Ainsi, l'estimation de la puissance résiduelle du crayon ainsi que de son coefficient de répartition constitue l'objectif à atteindre pour la suite de ce travail.

Références

- [1] A. Tsilanizara et al., “*DARWIN: an evolution code system for a large range of applications*”, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY (2000).
- [2] J.L. Yarnell and Ph.J. Bendt, “*Calorimetric Fission Product Decay Heat Measurements for 239Pu, 233U and 235U*”, Report NUREG/CR-0349, LA-7452-MS, Los Alamos Scientific Laboratory, USA (1978).
- [3] G. Gillet, et al., “*Measurement of Decay Heat and Comparison with Predictions*”, Nuclear Science and Engineering, 106, 94-97 (1990).
- [4] F. Sturek, L. Agrenius, *Measurements of decay heat in spent nuclear fuel at the Swedish interim storage facility, Clab*, Svensk Karnbranslehantering AB, Rapport R-05-62, (2006).
- [5] S. Bourganell, *Conception d'une expérience de mesure de la puissance résiduelle d'un crayon irradié : l'expérience MERCI*, thèse de doctorat de l'INPG (2002).
- [6] A. Algora, J.L. Tain, “*Decay heat and nuclear data*”, InTech, (2012).
- [7] F. Muratori, F. Nguyen, C. Le Niliot, C. Gonnier, R. Eschbach, “*Modeling and sensitivity study of an experimental device for a decay heat measurement performed on an irradiated nuclear fuel sample in the very short cooling time range: the PRESTO experiment*”, Congrès Français de Thermique, Nantes 3-6 juin 2019.
- [8] J. Estrade, G. Bignan, X. Bravo, “*The Jules Horowitz Reactor: a new high performance MTR working as an international user facility in support to nuclear industry, public bodies and research institutes*”, RRFM (2015).
- [9] A. Wirgin, “*The inverse crime*”, arXiv, (2008).
- [10] N. Todreas, M. Kazimi, “*Nuclear Systems I: thermal hydraulics fundamentals*”, CRC Press (2012).
- [11] E. Brun et al., “*TRIPOLI-4, CEA, EDF and AREVA reference Monte Carlo code*”, Annals of Nuclear Energy (2014).
- [12] F. Muratori, F. Nguyen, C. Gonnier, C. Le Niliot, R. Eschbach, “*Neutronical aspects of a decay heat measurement: the PRESTO experiment*”, The European Physical Journal Conferences (2020).
- [13] M. Le Bohec, “*Contribution du rayonnement au confort thermique et aux économies d'énergie dans l'habitat*”. Thèse de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers (2017).
- [14] J. Gaspar, “*Fluxmétrie et caractérisation thermiques instationnaires des dépôts des composants face au plasma du Tokamak JET par techniques inverses*”, thèse de doctorat de l'Aix-Marseille Université (2013).

Remerciements

Je souhaite remercier Mickaël Le Bohec pour la contribution qu'il a apportée à la modélisation du rayonnement thermique dans le cadre de ce travail.