



## **Mesure haute résolution in situ de la distance entre deux plaques combustibles nucléaires**

G. Zaz<sup>a</sup>, Y. Calzavara<sup>b</sup>, E. Le Clézio<sup>a</sup> et G. Despaux<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Université Montpellier 2, IES CC082 Place E Bataillon, 34095 Montpellier, France

<sup>b</sup>Institut Laue Langevin, 6, rue Jules Horowitz BP 156, 38042 Grenoble, France  
gilles.despaux@univ-montp2.fr

La plupart des réacteurs à haut flux, destinés à la recherche, disposent d'éléments combustibles composés de plaques et non de crayons. La distance entre deux plaques est un paramètre riche en informations, notamment concernant l'historique d'irradiation. Pour le réacteur à haut flux de l'Institut Laue-Langevin, cette mesure est délicate puisqu'une résolution de l'ordre du micron est recherchée alors que la dimension de l'espace inter-plaque est proche du millimètre. Aujourd'hui, aucun capteur n'est disponible pour effectuer de telles mesures sur des systèmes soumis à de fortes radiations et avec des contraintes d'accès difficiles. Pour répondre à la problématique, deux transducteurs ultrasonores haute fréquence ( $> 100$  MHz) ont été réalisés. Ils sont montés sur une lame d'épaisseur totale de seulement 1 millimètre pour autoriser l'accès à l'espace inter-plaques. Du fait de la haute résolution recherchée sur la mesure, le comportement de ces transducteurs, en tant que systèmes multicouches, a été modélisé. Le but est d'optimiser les propriétés et épaisseurs de chacun des matériaux constituant les transducteurs, l'épaisseur totale du capteur et sa teneur aux radiations. Ces capteurs ont ensuite été intégrés dans un ensemble d'instruments comprenant un système d'acquisition haute fréquence, un traitement de signal et une électronique spécifique récemment conçue pour améliorer le signal d'excitation. La distance inter-plaque est extraite via l'évaluation du temps de vol des échos ultrasonores réfléchis sur les différentes interfaces. Le système démonstrateur conçu a d'ores et déjà permis de prouver, à l'échelle du laboratoire, la faisabilité d'une telle mesure avec une résolution de l'ordre du micron. Les résultats présentés dans ce document correspondent à ceux issus d'une première mesure de distance inter-plaques réalisée, en décembre 2013, au sein d'un véritable élément combustible du réacteur.

## 1 Introduction

Le Réacteur à Haut Flux (RHF) de l'Institut Laue-Langevin (ILL), uniquement dédié à la recherche, possède un cœur constitué d'un élément combustible unique en uranium très enrichi. La modération est assurée par de l'eau lourde afin de ralentir les neutrons produits par la réaction de fission au sein du réacteur [1]. L'ILL produit ainsi le flux continu de neutrons thermiques le plus intense du monde, soit  $1,5 \times 10^{15}$  neutrons par seconde et par  $\text{cm}^2$ . D'une puissance thermique de 58 MW, ce cœur est situé dans une piscine remplie d'eau déminéralisée qui assure une protection vis-à-vis des rayonnements neutrons et gammas. Portant une attention toute particulière aux exigences en matière de sûreté et de sécurité, l'ILL souhaite développer ses outils de contrôle de l'élément combustible. En particulier, la distance inter-plaques est un paramètre riche en informations, notamment concernant l'historique d'irradiation de l'élément. Cette mesure est délicate puisqu'une résolution de l'ordre du micron est recherchée alors que la dimension de l'espace inter-plaque est proche du millimètre, les contraintes d'accès sont difficiles et les systèmes soumis à de fortes radiations.

Basés sur des méthodes magnétiques [2], capacitives [3], optiques [4] ou autres (capteurs à micro-ondes, capteurs à effet tunnel...) [5], des dispositifs permettent aujourd'hui de mesurer des distances avec une résolution pouvant atteindre le nanomètre et avec des fonctionnalités pouvant être adaptées dans des conditions de températures et de pression difficiles. Ces méthodes ne peuvent cependant pas être appliquées à des systèmes fortement radiatifs ou en immersion. Pour répondre à la problématique, deux transducteurs ultrasonores haute fréquence ( $> 100$  MHz) ont été réalisés et montés sur une lame d'épaisseur totale de seulement 1 millimètre. Du fait de la haute résolution recherchée sur la mesure, le comportement de ces transducteurs, en tant que systèmes multicouches, a été modélisé afin d'optimiser les propriétés et épaisseurs de chacun des matériaux constituant les transducteurs, l'épaisseur totale du capteur et sa teneur aux radiations. Ces capteurs ont ensuite été intégrés dans un ensemble d'instruments comprenant un système d'acquisition haute fréquence, un traitement de signal et une électronique

spécifique récemment conçue pour améliorer le signal d'excitation. La distance inter-plaques est extraite via l'évaluation du temps de vol des échos ultrasonores réfléchis sur les différentes interfaces. Une première mesure de la distance inter-plaques au sein de l'élément combustible du RHF à l'arrêt a été réalisée en décembre 2013 démontrant la faisabilité de la méthode et la tenue du dispositif proposé aux radiations.

## 2 Élément combustible

Le RHF de l'Institut Laue-Langevin ne possède qu'un seul élément combustible, modéré par de l'eau lourde. Il est composé de 280 plaques d'uranium hautement enrichi (HEU), 93% d' $^{235}\text{U}$ , séparées par une couche d'eau de 1,8 mm d'épaisseur. Développées selon une développante de cercle, ces plaques sont contenues dans un tube d'une quarantaine de centimètres de diamètre et d'une hauteur de l'ordre du mètre (figure 1).

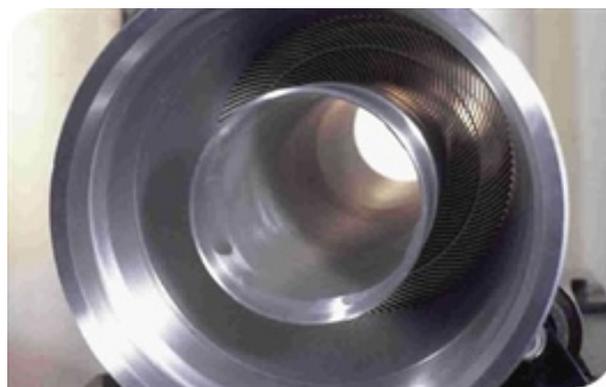


FIGURE 1 – Structure interne d'un élément combustible de réacteur à haut flux [6].

## 3 Matériaux et méthodes

### 3.1 Structure des capteurs ultrasonores

Dans le cadre de la présente étude, un dispositif ultrasonore a été conçu de manière à permettre une mesure

de la distance inter-plaque au sein de l'élément combustible de la figure 1. Associé à une électronique haute fréquence, il comprend un couple de transducteurs fonctionnant en émission-réception et montés sur une lame d'acier inoxydable. Suffisamment fin pour pouvoir être inséré au cœur de l'élément combustible et déplacé entre deux plaques espacées de 1,8 mm, il permet, connaissant la vitesse du son au sein de l'eau et l'épaisseur de la lame, la mesure, à partir de la détermination du temps de vol entre l'émission d'un pulse ultrasonore et la réception de ses échos provenant de chacune des plaques, de la distance inter-plaque (figure 2).

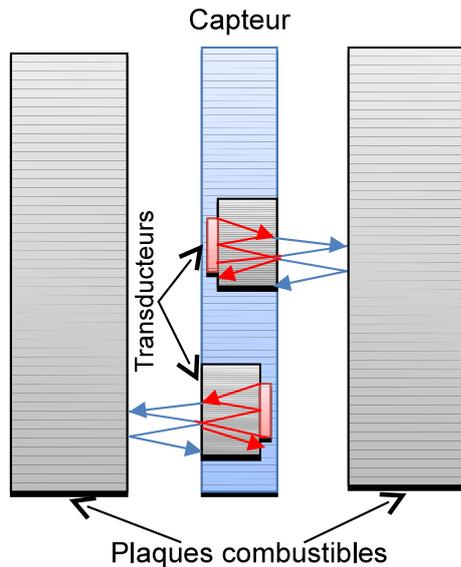


FIGURE 2 – Principe général de la mesure de distance entre deux plaques d'éléments combustibles.

### 3.1.1 lame de support

Du fait de la forme courbée des plaques combustibles et de la distance inter-plaque, une lame d'acier inoxydable a été usinée aux dimensions suivantes : épaisseur de 1 mm, largeur de 16 mm et longueur de 620 mm (voir figure 3(a)). De manière à intégrer les éléments de transduction, deux cavités ont été préparées à l'une des extrémités de la lame et une fente réalisée sur chacune de ses faces afin d'accueillir les connexions électriques et minimiser l'encombrement.

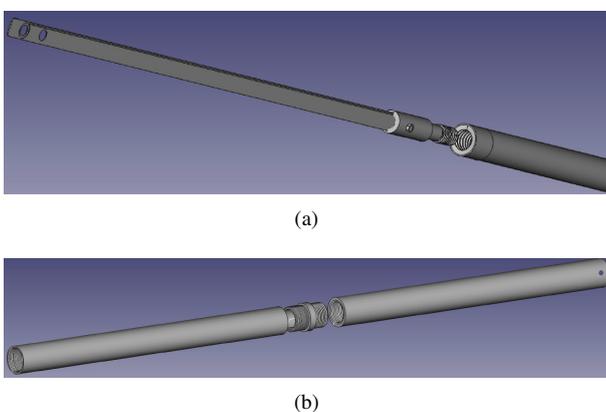


FIGURE 3 – Structure (a) de la lame et (b) de son support.

De manière à autoriser la manipulation du capteur ultrasonore à une distance correspondant à la profondeur

de l'élément combustible étudié, une extension tubulaire en acier inoxydable a été usinée en deux portions conduisant à un diamètre de 22 mm et une longueur de 4 m. Une pièce de connexion a de plus été conçue afin de la relier au capteur (figure 3(b)).

### 3.1.2 Éléments de transduction

Montés à l'une des extrémités de la lame, les éléments transducteurs possèdent chacun la même structure multicouche comprenant un élément piézoélectrique relié sur l'une de ses faces à une électrode d'or par une fine couche de colle. Une couche d'aluminium est déposée sur la seconde surface et joue le rôle d'électrode d'entrée et de sortie des signaux électriques. L'intégralité de ce système est positionnée sur une ligne à retard en silice (figure 4).

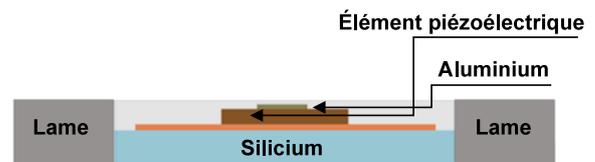


FIGURE 4 – Structure multicouche des transducteurs piézoélectriques insérés au sein de leur lame de support.

Du fait des résolutions recherchées dans le cadre de l'étude, la bande fréquentielle de fonctionnement des transducteurs a été choisie pour s'étendre au delà de 150 MHz. À ces hautes fréquences, la structure multicouche des capteurs joue un rôle central dans la forme des signaux émis et reçus. En effet, lorsque l'élément piézoélectrique est excité par une impulsion électrique, les ondes ultrasonores traversant ces différentes couches produisent, du fait de la présence des différentes interfaces, un signal caractéristique constitué d'une série de salves. Par réciprocity, chaque capteur acquiert ensuite les réflexions du signal dual (correspondant à la série de signaux transmis) sur la plaque combustible après propagation au sein de la couche d'eau (figure 5).

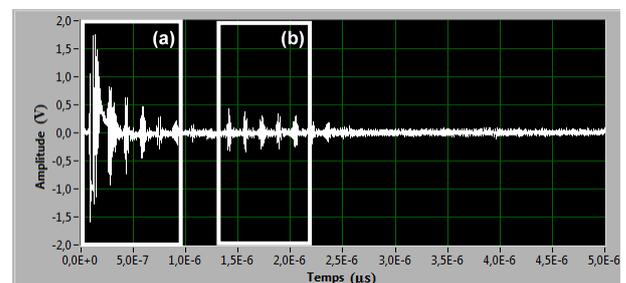


FIGURE 5 – Signaux recueillis par un des transducteurs piézoélectrique contenant deux séries de salves : (a) celle issue de la réflexion des signaux au sein de la structure multicouche du transducteur ; (b) celle correspondant à la réception de la série duale après propagation au sein de la couche d'eau et réflexion sur la plaque combustible.

Afin d'optimiser les propriétés géométriques et mécaniques des différentes couches des capteurs et d'identifier leur influence sur la structure temporelle des signaux finaux, les structures multicouches ont été modélisées [7] et des images acoustiques de microscopie ultrasonore [8]-[12] ont été réalisées afin d'en vérifier

la qualité. La figure 6 présente une image de l'interface

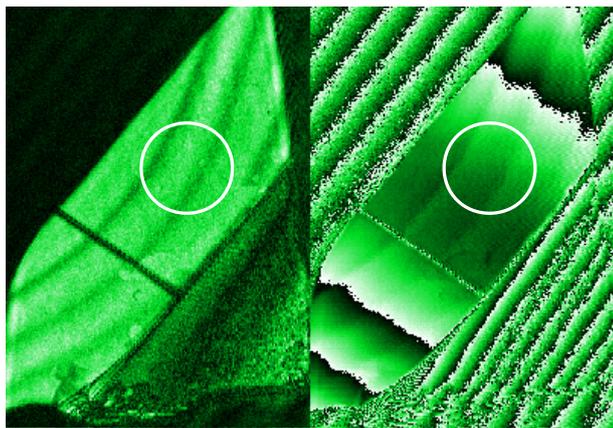


FIGURE 6 – Image de microscopie acoustique de l'interface support – élément piézo électrique. Module à gauche et phase à droite. Le cercle localise la zone qui sera utilisée.

support – élément piézoélectrique. Le cercle de 1 mm de diamètre environ permet de localiser la partie de l'élément piézoélectrique utilisé. La fissure présente en bas à gauche de l'image est la conséquence de l'amincissement de la pastille piézoélectrique réalisé sur un support particulièrement fragile. L'image de phase à droite de la figure 6 permet de certifier que l'amincissement et le polissage sont de bonnes qualités du fait de la faible variation de phase identifiée dans la zone active.

## 4 Système d'acquisition

Le système d'acquisition représentant l'interface entre l'ordinateur et le capteur comprend :

- Une carte NI PXIe1-5162 échantillonnant à 5 Gech/s avec une quantification sur 10 bits, deux cartes pré-amplificatrices et une de contrôle <sup>1</sup>,
- Une carte double émetteur/récepteur conçue spécifiquement à l'IES pour l'optimisation du signal d'excitation. Très large bande, elle permet une adaptation d'impédance pour assurer un fonctionnement optimal avec des longueurs de câbles supérieures à 10 m.
- Un programme autorisant l'acquisition du signal et son traitement, et divisé en deux sous-parties. La première contrôle l'intégralité de l'électronique de mesure et son interface autorise la définition des paramètres d'acquisition des signaux acoustiques hautes fréquences. La seconde permet le calcul de la distance entre le capteur et la plaque de combustible en temps réel ou en post-traitement. À travers une corrélation de la série d'échos réfléchis sur la ligne à retard avec celle réfléchi sur la plaque, elle permet, connaissant la vitesse des ultrasons et la température de la couche d'eau, l'identification du temps de propagation des ondes ultrasonores.

1. la PXIe est une plateforme de type PC dédiée à la mesure et aux systèmes d'automatisation.

## 5 Retour d'expérience

Une expérience in-situ conduisant à une première mesure de la distance inter-plaque au sein d'un élément combustible du réacteur à haut flux a été réalisée les 19 et 20 décembre 2013 à l'Institut Laue-Langevin. Lors de cette expérience, la lame a été positionnée parallèlement aux plaques combustibles et a été manipulée à une distance de 4 mètres environ. L'élément combustible étant immergé au sein d'une piscine assurant le refroidissement du combustible et le confinement des radiations, des mesures n'ont pu être réalisées que dans la partie centrale supérieure de l'élément, en deux positions dont l'une est présentée sur la figure 7.



FIGURE 7 – Positionnement du capteur entre deux plaques de l'élément combustible.

Les dimensions importantes du support en acier inoxydable le rendent relativement lourd et difficile à manier par un opérateur. Celui-ci, devant être situé au dessus de la piscine du réacteur, doit avoir une grande dextérité pour permettre un positionnement de la lame instrumentée dans l'interstice entre deux plaques avec une précision de l'ordre de quelques centaines de microns. La distance de plusieurs mètres entre l'opérateur et la zone à examiner complique aussi notablement la réalisation de la mesure. La conception d'un guide de dispositif sera probablement nécessaire, soulageant l'opérateur.

## 6 Résultats expérimentaux

Des signaux ont été enregistrés toutes les 50 ms et les distances ont été calculées en post-traitement. Elles sont présentées sur le graphe de la figure 8.

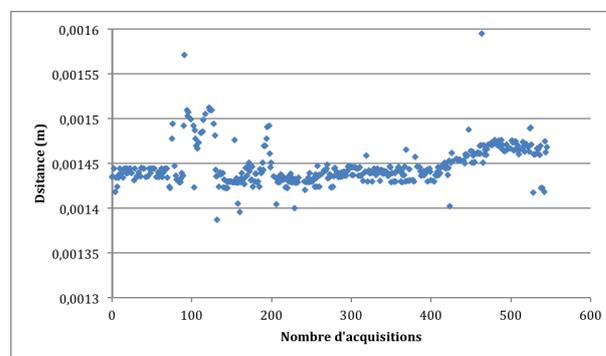


FIGURE 8 – Mesure de la distance inter-plaques.

Ces résultats montrent clairement que, malgré la forte nature radiative de l'environnement contrôlé, la qualité des signaux ultrasonores est suffisante pour assurer une

identification stable des distances inter-plaques pour les deux positions.

Plusieurs observations peuvent être réalisées pour la première position. Pour les 400 premières acquisitions, la distance est identifiée comme étant égale à  $1,44 \pm 0,005$  mm avec une grande stabilité. La différence entre cette valeur et celle initialement escomptée de 1,8 mm peut être expliquée par des problèmes géométriques tels que le non parallélisme des transducteurs pouvant entraîner une modification du trajet acoustique. L'influence de la température ou de la nature précise de l'eau sur la vitesse acoustique doit aussi être prise en compte. Enfin, les mesures ayant été réalisées en extrémités des plaques combustibles, il est possible que celles-ci soient légèrement courbées. Les grandes variations observables entre la 80<sup>e</sup> et la 120<sup>e</sup> acquisition ainsi qu'autour de la 200<sup>e</sup> correspondent à des retraits des capteurs des zones de mesures et ne doivent pas être considérées comme pertinentes. Une légère augmentation de la distance ( $1,47 \pm 0,01$  mm) peut être observée à partir de l'acquisition 400 indiquant probablement une modification de l'épaisseur de l'une ou des deux plaques.

## 7 Conclusion

Les résultats précédemment exposés ont été obtenus dans le cadre d'une expérience réalisée en décembre 2013 et visant à établir la faisabilité de la mesure de la distance inter-plaque au sein d'un élément combustible irradié du réacteur à haut flux situé à l'Institut Laue-Langevin à Grenoble. Cette mesure délicate, puisqu'une résolution de l'ordre du micron est recherchée alors que la dimension de l'espace inter-plaque est proche du millimètre, devrait en particulier permettre d'obtenir des informations sur le combustible et notamment sur son historique d'irradiation.

Pour répondre à cette problématique, un dispositif ultrasonore a été conçu et réalisé à l'Institut d'Électronique de Montpellier. Devant pouvoir être introduit au sein d'un canal d'eau d'épaisseur 1,8 mm situé entre deux plaques courbées, il contient deux transducteurs ultrasonores insérés à l'extrémité d'une lame. D'une épaisseur totale de 1 mm, le dispositif est de plus fixé à un support cylindrique permettant sa manipulation depuis une distance de l'ordre de 4 mètres.

De manière à atteindre une résolution de l'ordre du micron, le système a été conçu pour fonctionner dans une bande de fréquences pouvant s'étendre jusque 150 MHz et intégré à un ensemble de d'instruments autorisant l'acquisition de ces hautes fréquences. À travers la détermination du temps de vol des échos ultrasonores, le système permet la mesure des distances inter-plaques.

La première expérience réalisée en décembre 2013 au sein du réacteur à haut flux a permis de prouver que les différents composants du dispositif ultrasonore, et en particulier la ligne à retard en silice et l'élément piézoélectrique, présentaient une bonne tenue aux radiations. De plus, la qualité des rapports signal à bruit mesurés a été plus que suffisante pour obtenir une estimation stable de la distance inter-plaque. Bien que la validité des valeurs absolues obtenues doive encore être confirmée, l'excellente résolution relative, de l'ordre quelques microns, semble déjà permettre d'identifier des zones de rétrécissement de l'espace inter-plaque.

La faisabilité de la mesure de la distance inter-plaque

a donc été montrée et les contraintes expérimentales attachées au protocole de mesure sont en phase d'analyse afin de permettre, dans les études futures, d'améliorer la précision des résultats. Cette étape nécessitera cependant le développement de modèles plus complexes autorisant la compréhension des phénomènes relatifs à la propagation des ondes au sein de structures non planes.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à particulièrement remercier Laurent Podevin et Alain Portal, respectivement assistant ingénieur et ingénieur d'étude à l'IES - UMR CNRS 5214, pour leurs fortes contributions dans la réalisation des capteurs et de l'électronique associée.

## Références

- [1] <http://www.ill.eu/fr/>
- [2] Mesures sans contact - Méthodes magnétiques et capacitives, *Techniques de l'Ingénieur R 1 331*.
- [3] A. Bruère, Mesure d'épaisseur sans contact par méthode capacitive, *CAPAAB 71*, 7-11 (2010).
- [4] D. Courjon et C. Bainier, *Le champ proche optique : théorie et applications*, collection technique et scientifique des télécommunications - Springer (2001).
- [5] Mesures sans contact - Autres méthodes, *Techniques de l'Ingénieur R 1 334*.
- [6] <http://www.aveva.com/FR/activites-918/cerca-fabrication-de-combustible-pour-reacteurs-de-recherche.html>
- [7] D. L. Folds and C. D. Loggins, Transmission and reflection of ultrasonic waves in layered media, *Journal of the Acoustical Society of America*, **62** (5), 1102-1109 (1977).
- [8] Briggs, G. A. D., *Acoustic Microscopy*. Clarendon Press, Oxford (1992).
- [9] Laux D. et al., Ultrasonic study of UO<sub>2</sub> : effects of porosity and grain size on ultrasonic attenuation and velocities, *Journal of Nuclear Materials*, **300**, 192-197 (2002).
- [10] Laux D. et al., Determination of high burn-up nuclear fuel elastic properties with acoustic microscopy, *Journal of Nuclear Materials*, **420**, 94-100 (2012).
- [11] Da Fonseca R. J. M. et al., Scanning acoustic microscopy - Recent applications in materials science, *Advanced Materials*, **5** (7-8), 508-519 (1993).
- [12] D. Laux et al., Scanning acoustic microscope for mechanical characterization and density estimation of irradiated nuclear fuel Original Research, *Progress in Nuclear Energy*, In Press, Corrected Proof, Available online 12 September 2013.