

CFA/VISHNO 2016

Caractérisation ultrasonore de distances inter-plaques au sein d'un réacteur RHF

M. Chrifi Alaoui^a, G. Zaz^a, Y. Calzavara^b, E. Le Clézio^a et G. Despaux^a

^aUniversité de Montpellier, Institut d'Electronique et des Systèmes, 860 rue de Saint-Priest, CC 05003, 34095 Montpellier Cedex 05, France

^bInstitut Laue Langevin, 71 Avenue des Martyrs, 38000 Grenoble, France
meriem.chrifi-alaoui@umontpellier.fr



LE MANS

Le Réacteur à Haut Flux (RHF) de l'institut Laue-Langevin (ILL) est constitué d'un élément unique composé de 280 plaques combustibles courbées. La distance entre deux plaques et les modifications micrométriques de l'élément durant son cycle de vie (gonflement, couche d'oxyde, etc.) sont des paramètres riches en informations, notamment concernant l'historique d'irradiation. Une première publication présentée au CFA 2014 intitulée « Mesure haute résolution in situ de la distance entre deux plaques combustibles nucléaires » a montré la faisabilité d'une méthode de mesure de distance inter-plaque basée sur l'évaluation du temps de vol de signaux ultrasonores. Le présent article expose les dernières avancées de ce projet. En particulier, l'élément combustible est immergé dans de l'eau déminéralisée permettant le refroidissement de l'élément et la protection contre les rayonnements gamma et neutronique. Cela implique une température variable avec la position du capteur au sein du canal d'eau. Pour garantir la précision de la mesure, celle-ci doit être prise en compte puisqu'elle influence la vitesse ultrasonore dans le milieu. Un nouveau dispositif ultrasonore a donc été conçu et réalisé en respectant une contrainte d'épaisseur de 1 mm permettant son insertion entre deux plaques courbes. Ce dispositif, de type sabre, intègre deux éléments piézoélectriques et permet de mesurer simultanément la température et la distance inter-plaques. En juillet 2015, des mesures de température ont été réalisées sur un élément combustible irradié et prises en compte dans le calcul de la distance. Les résultats obtenus en termes de rapport signal sur bruit et de précision de mesure sont prometteurs et ce dispositif devrait permettre, dans un futur proche, la mise en œuvre d'une imagerie de l'épaisseur du canal d'eau.

1 Introduction

le Réacteur à Haut Flux (RHF) de l'Institut Laue-Langevin (ILL) [1] dispose d'un élément particulier doté notamment de plaques au lieu de crayons combustibles. L'ILL vise à implémenter une méthode de contrôle non-destructive afin de suivre l'évolution et les transformations de ces plaques. C'est ainsi que la distance inter-plaques constitue un paramètre hautement instructif en terme d'historique d'irradiation. La mesure de cette distance, de 1.8 mm en nominal, reste délicate et doit répondre aux contraintes suivantes :

- La faible épaisseur du canal d'eau nécessite deux capteurs miniaturisés pour assurer un contrôle non destructif,
- La résolution désirée est de l'ordre du micron afin de pouvoir détecter toute modification microscopique de la structure de l'élément (gonflement, présence d'une couche d'oxyde...),
- L'accès aux plaques est contraignant puisque l'élément combustible est immergé sous cinq mètres d'eau déminéralisée assurant son refroidissement et la protection contre les rayonnements gamma et neutronique,
- Le système de mesure est intégré dans un environnement hautement radiatif.

Pour répondre à cette problématique, deux transducteurs ultrasonores fonctionnant à hautes fréquences ont été étudiés, développés et montés sur un sabre [2]. La structure de ce dernier résiste à l'environnement radiatif et respecte la contrainte d'épaisseur de 1 mm. De plus, un système mécanique a été réalisé afin d'introduire le dispositif dans l'espace entre deux plaques parallèles.

Grâce à la méthode de pulse-écho, les transducteurs permettent de caractériser des distances à partir de la mesure des temps de vol (ToF) [3] du signal réfléchi par les surfaces des plaques combustibles. Ce temps t est en effet relié à la distance d entre les plaques de combustible et la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore c dans le milieu (eau) par l'équation $d = c * t/2$. Il est ainsi possible de calculer avec précision la distance en temps réel via un système

d'acquisition hautes fréquences et un traitement de signal approprié.

Une expérimentation a été réalisée sur l'élément combustible du Réacteur à Haut Flux de l'ILL en juillet 2015. Le dispositif ultrasonore développé y a été introduit dans l'interstice afin d'effectuer la mesure de la distance inter-plaque. Dans le but de garantir une précision de mesure adéquate, la distance inter-plaque et la température de l'eau du canal y ont été estimées simultanément et au même emplacement. La majorité des paramètres influençant l'expérience est ainsi considérée dans le protocole de mesure. Les différentes composantes du système de mesure ont dévoilé une bonne résistance aux radiations tout au long de la manipulation, ce qui a abouti aux résultats présentés dans le cadre de cet article faisant suite à une publication réalisée au CFA 2014 [4].

2 Matériels et méthodes

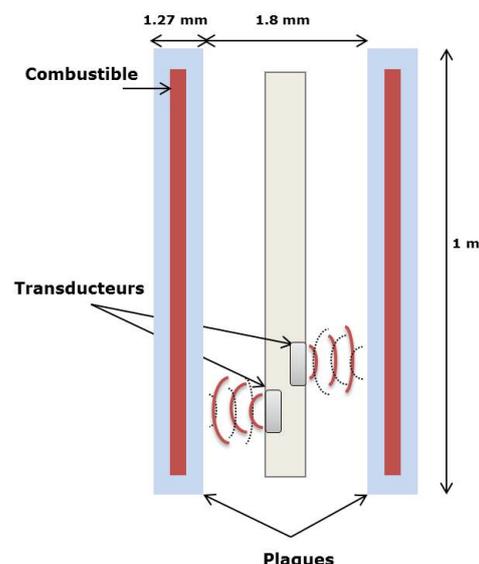


FIGURE 1 – Schéma général du système de mesure. Sabre instrumenté avec deux systèmes d'émission/réception insonifiant de part et d'autre des plaques combustibles.

2.1 Principe de mesure

La mesure de distance inter-plaque par méthode ultrasonore se base sur l'utilisation de deux transducteurs ultrasonores fonctionnant à hautes fréquences (schéma présenté sur la figure 1). Chaque transducteur émet une onde ultrasonore. Celle-ci se propage à travers l'eau jusqu'à atteindre la surface de la plaque combustible, ce qui génère des réflexions qui vont être réceptionnées par le même transducteur, étant à la fois émetteur et récepteur.

La mesure du temps qui sépare l'émission de l'onde ultrasonore et la réception des échos réfléchis permet de remonter à la distance entre la surface de la plaque combustible et l'extrémité du sabre, où est placé le transducteur, via la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans le milieu.

Connaissant ainsi les distances de part et d'autre du sabre et l'épaisseur de ce dernier, la distance inter-plaque pourra donc être déduite.

2.1.1 Support des capteurs

Afin de développer un dispositif de mesure ultrasonore adapté aux contraintes et aux observations déduites lors de l'expérimentation précédente, une étude a été réalisée.

La première étape est la conception du sabre. Puisque les plaques sont courbées et séparées d'une distance nominale de 1.8 mm, le sabre doit respecter les dimensions suivantes : 1 mm d'épaisseur, 10 mm de largeur et 1100 mm de longueur. Il comporte également deux cavités où s'introduisent les capteurs ultrasonores, ainsi qu'une rainure sur chaque face pour intégrer le câble coaxial électrique nécessaire à l'acquisition des signaux.

Ensuite, les capteurs sont insérés dans leurs cavités respectives et des images acoustiques sont réalisées [5, 6, 7] afin de vérifier la planéité des couches de chaque transducteur. Les câbles de raccordement des transducteurs aux éléments électroniques d'environ 15 m chacun sont également placés dans leurs rainures respectives.

Ce sabre est finalement relié, via une pièce métallique, à un système mécanique conçu sous la forme d'un tube en acier inoxydable d'environ 4 m, et grâce auquel le dispositif sera manipulé dans l'interstice entre deux plaques de l'élément combustible. Le dispositif de mesure est conçu de façon à optimiser sa résistance aux radiations. Il est, de plus, étanche puisque les mesures sont réalisées en milieux aqueux. Le schéma du dispositif ultrasonore développé est présenté sur la figure 2.

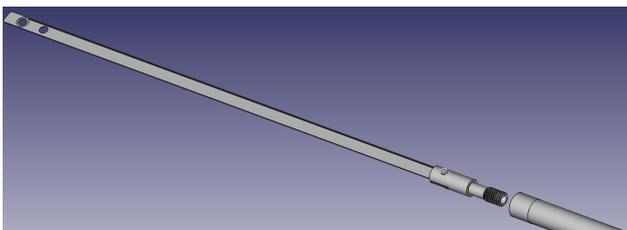


FIGURE 2 – Dispositif de mesure : sabre, pièce métallique et support en acier.

2.1.2 Composition des capteurs

Le transducteur ultrasonore est un élément multicouche conçu et réalisé à l'IES (Institut d'Electronique et des Systèmes, UMR 5214). Il comporte un élément piézoélectrique fonctionnant à une fréquence de l'ordre de 120 MHz. Sa fonction réside dans le fait de convertir le signal électrique en signal acoustique haute fréquence en tant qu'émetteur et l'inverse en tant que récepteur. Une couche d'aluminium est placée sur l'une surface de l'élément piézoélectrique, tandis que sur l'autre surface une couche d'or est déposée, constituant ainsi les deux électrodes. Ce système est ensuite soudé par une fine couche de colle à une ligne à retard en silice (voir figure 3). L'élément multicouche est ainsi conçu et par la suite monté sur l'une des extrémités du sabre qui va s'introduire entre deux plaques combustibles.

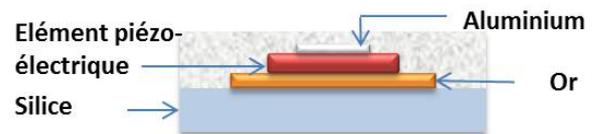


FIGURE 3 – Structure de l'élément multicouche.

Lorsque l'élément piézoélectrique est excité par une impulsion électrique, l'onde ultrasonore générée se propage traversant d'abord les différentes couches du transducteur ultrasonore jusqu'à atteindre la plaque parallèle qui lui fait face. Pour chaque interface rencontrée, des réflexions sont générées et réceptionnées produisant ainsi une série d'échos acoustiques à amplitudes décroissantes. Le signal résultant est présenté sur la figure 4.

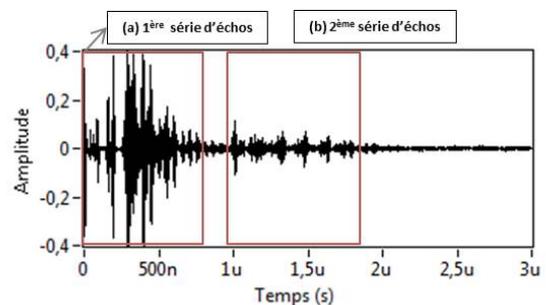


FIGURE 4 – Signal ultrasonore réfléchi (a) Réflexions sur le support en silice (b) Echos réfléchis sur la plaque combustible.

Ainsi, le signal reçu est composé de deux séries d'échos distinctes. La première (figure 4(a)) provient des réflexions lors de la traversée de la ligne à retard en silice de l'élément multicouche. La seconde série (figure 4(b)) correspond aux échos réfléchis suite à la rencontre de la deuxième interface c'est-à-dire la plaque combustible. L'intervalle de temps séparant ces deux séries d'échos correspond au temps nécessaire du parcours d'un aller-retour dans le milieu de propagation. Le signal résultant composé des deux séries de réflexions est acquis par une série d'instruments électroniques commandée par un programme de traitement de signal approprié.

2.1.3 Système d'acquisition

Les signaux ultrasonores réfléchis sont acquis et traités via un système électronique représentant l'interface entre l'ordinateur et le dispositif ultrasonore haute fréquence. Ce système (figure 5) comprend :

- un émetteur/récepteur d'impulsions conçu et développé à l'IES dans le but d'exciter l'élément piézoélectrique et de recevoir sa réponse,
- une carte d'acquisition NI PXIe-5162 dotée d'une résolution de 10 bits et assurant un échantillonnage à 5 Géch/s,
- deux cartes d'amplification RF et une carte de contrôle.

Ces composantes électroniques sont intégrées dans un chassis NI PXIe. Elles sont gérées par un programme développé sous le logiciel LabVIEW et composé de deux parties :

- la première permet la commande de l'électronique de mesure via une interface qui gère les paramètres d'acquisition des signaux acoustiques à haute fréquence,
- la seconde répond à la problématique étudiée en effectuant la mesure de la distance entre deux plaques combustibles que ce soit en temps réel ou en post-traitement.



FIGURE 5 – Système d'acquisition

2.2 Protocole de mesure

La mesure de distance souhaitée est fonction de deux paramètres : le temps de vol nécessaire au parcours de la distance inter-plaque et la vitesse de propagation de l'onde à travers cette distance.

2.2.1 Mesure de vitesse ultrasonore

La vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans l'eau varie en fonction de la température. D'autre part, les caractéristiques des transducteurs varient en fonction de la température, notamment la fréquence de résonance. Cet effet sur la fréquence est étudié et permet donc d'identifier la température du canal d'eau à l'emplacement de mesure de la distance inter-plaque. La température de l'eau est donc mesurée en fonction de la fréquence de résonance du capteur et donne les résultats présentés sur la figure (figure 6).

Cette mesure de température permet de remonter à la mesure de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore

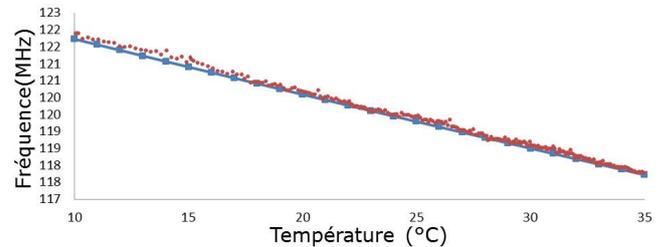


FIGURE 6 – Variation de la fréquence en fonction de la température. les carrés bleus correspondent à la simulation et les points rouges aux mesures expérimentales.

dans l'eau [8]. L'influence de la température du canal d'eau sur la vitesse ultrasonore est donc prise en compte lors de la mesure de la distance inter-plaque.

2.2.2 Mesure du temps de vol

La mesure du temps de propagation de l'onde dans l'eau est réalisée par l'inter-corrélation de la première série d'échos réfléchi sur la silice avec la seconde réfléchi sur la plaque combustible. Ce paramètre, relié à la vitesse de propagation des ondes ultrasonores calculée précédemment via la mesure de la température, permet de mesurer la distance souhaitée.

3 Expériences et résultats

3.1 Expériences

Une expérimentation a été réalisée en juillet 2015 sur l'élément combustible de l'ILL en intégrant l'impact de la variation de la température du canal d'eau. De plus, un positionnement contrôlé et stabilisé du dispositif ultrasonore de mesure a été adopté. En effet, le système est manipulé de façon à être extrait par pas d'un ou deux centimètres, avec une stabilisation parallèle aux plaques, permettant de visualiser en temps réel les acquisitions et d'obtenir le maximum des signaux pour ainsi effectuer des mesures de distance précises.

La disposition du dispositif au sein de l'élément combustible est présentée sur la figure 7.

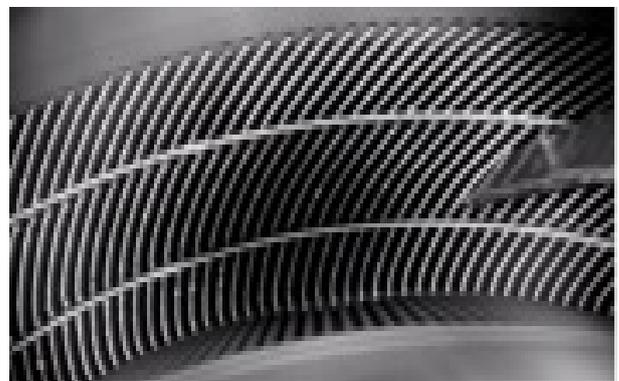


FIGURE 7 – Introduction du dispositif dans l'interstice entre deux plaques combustibles.

3.2 Résultats et analyse

Les signaux ont été enregistrés toutes les 50 ms et les distances ont été estimées en post-traitement. La figure 8 présente les valeurs moyennes de l'épaisseur d'eau estimée à 14 positions le long du canal d'eau.

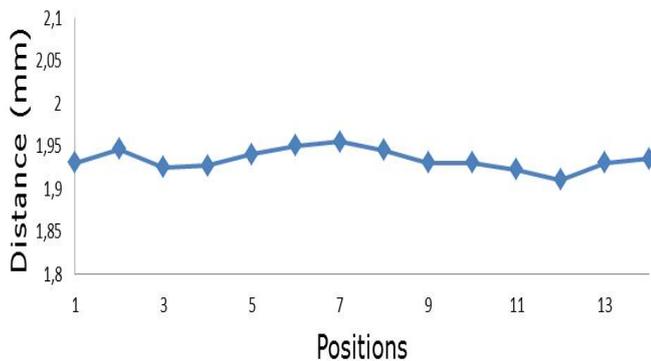


FIGURE 8 – Mesures de distance par pas de 1cm pour 14 positions.

3.2.1 Mesure d'erreur

La température du canal d'eau est mesurée localement dans la piscine et donne une valeur de 28.3 °C, ce qui aboutit à une mesure de vitesse ultrasonore fixée à 1505 m/s avec une estimation d'erreur de $\Delta v = 0.84$ m/s. L'échantillonnage est réglé à une fréquence de $f = 2.5$ Géch/s, en conséquence la période est fixée à $T = 0.4$ ns. L'erreur expérimentale de mesure est calculée de la manière suivante :

$$d = \frac{vt}{2}, \quad (1)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta t}{t}, \quad (2)$$

$$\Rightarrow \Delta d = 24 \mu\text{m}. \quad (3)$$

3.2.2 Analyse

En dépit de la nature fortement irradié de l'environnement de mesure, la qualité des signaux acquis est suffisante pour assurer une identification stable de la distance inter-plaque. De plus, plusieurs observations peuvent être déduites à partir des mesures réalisées et de la mesure d'erreur en fonction des paramètres influents.

Tout d'abord, la distance moyenne est égale à 1,93 mm. Pour chacune des mesures, un très faible écart-type d'environ $\sigma = 1 \mu\text{m}$ est observé en raison de la stabilisation de l'appareil. De légères variations de l'épaisseur sont alors déduites correspondant à un écart-type $\sigma = 25 \mu\text{m}$ liés à des modifications d'épaisseur de la plaque et à l'effet de la variation de la température. L'augmentation maximale du canal d'eau est présente à la position 7, tandis que la diminution maximale est observée à la position 12. Ils correspondent à des épaisseurs de canaux d'eau de $d_7 = 1,95$ mm et $d_{12} = 1,91$ mm respectivement.

La qualité des données expérimentales obtenues in-situ démontre non seulement la résistance aux radiations du dispositif ultrasonore développé, mais aussi la faisabilité de

la mesure simultanée de la température et de l'épaisseur du canal d'eau.

4 Conclusion

Cet article présente les avancées du projet dont l'objectif réside dans la mesure de la distance entre les plaques de l'élément combustible du Réacteur à Haut Flux de l'Institut Laue Langevin, afin d'en déduire l'historique d'irradiation. Les résultats présentés ont été obtenus lors de l'expérimentation de juillet 2015, faisant suite à celle de décembre 2013, afin d'augmenter la précision en prenant en compte tous les paramètres influençant cette mesure. Celle-ci est délicate du fait d'une résolution micrométrique recherchée et d'un accès contraignant à l'élément combustible.

La solution développée pour effectuer la mesure de la distance consiste en un dispositif ultrasonore. Celui-ci comporte deux émetteurs/récepteurs ultrasonores haute fréquence et est introduit et manipulé dans l'interstice inter-plaque via un système mécanique. Le signal reçu par les transducteurs ultrasonores est ensuite traité via un système électronique adapté qui permet de visualiser en temps réel les échos résultants et ainsi d'adapter la position du dispositif pour obtenir des mesures précises de distance et de température. Cette seconde expérimentation a prouvé la faisabilité des mesures simultanées in situ de la température et de l'épaisseur du canal d'eau. Comme lors de la première expérimentation, tous les composants du système ont dévoilé une bonne tenue aux radiations. Ensuite, une étude de stabilité a été réalisée pour relier la qualité de la mesure en termes d'écart-type à la commande de la position du capteur. Il a notamment été montré que, lorsque le dispositif est fixé et optimisé grâce au contrôle du parallélisme des capteurs aux plaques, la précision de l'estimation de l'épaisseur peut être inférieure à $1 \mu\text{m}$.

La prochaine étape réside dans l'adoption de transducteurs focalisés afin d'augmenter la précision et la résolution de mesure. De plus, une imagerie de l'épaisseur de la lame d'eau est envisagée reliant ainsi l'estimation de l'épaisseur de positions réelles le long de la surface de la plaque.

Références

- [1] <http://www.ill.eu/fr/>
- [2] G. Zaz, A. Dekkious, P. A. Meignen, Y. Calzavara, E. L. Clézio, G. Despaux, High frequency transducer dedicated to the high-resolution in situ measurement of the distance between two nuclear fuel plates, *proceedings of the 2015 International Congress on Ultrasonics, Metz, France*. **70**, 191 – 194 (2015)
- [3] Daniele Marioli., Digital Time-of-Flight Measurement for Ultrasonic Sensors, *IEEE* **41**, 93–97 (1992)
- [4] G. Zaz, Y. Calzavara, E. Le Clézio, G. Despaux, Mesure haute résolution in situ de la distance entre deux plaques combustibles nucléaires *Congrès Français d'Acoustique, 22 – 25 Avril 2014 Poitiers*, 1191- 1195.
- [5] Laux D. et al., Determination of high burn-up nuclear fuel elastic properties with acoustic

microscopy, *Journal of Nuclear Materials* **420**, 94-100 (2012).

- [6] Da Fonseca R. J. M. et al., Scanning acoustic microscopy - Recent applications in materials science, *Advanced Materials* **5** (7-8), 508-519 (1993).
- [7] Laux D. et al., Scanning acoustic microscope for mechanical characterization and density estimation of irradiated nuclear fuel, *Progress in Nuclear Energy* **72**, 63-66 (2014)
- [8] Del Grosso V.-A. and Mader C.-W., Speed of sound in pure water, *J. Acoust. Soc. Am.* **52**, 1442-1446 (1972).