



HAL
open science

Caractérisation ultrasonore hautes fréquences de la distance inter-plaques au sein de réacteurs RHF

Mériem Chrifi Alaoui, Ghita Zaz, Yoann Calzavara, Emmanuel Le Clézio,
Gilles Despaux

► **To cite this version:**

Mériem Chrifi Alaoui, Ghita Zaz, Yoann Calzavara, Emmanuel Le Clézio, Gilles Despaux. Caractérisation ultrasonore hautes fréquences de la distance inter-plaques au sein de réacteurs RHF. 7ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Jan 2016, Saint-Nazaire, France. hal-01280189

HAL Id: hal-01280189

<https://hal.science/hal-01280189>

Submitted on 29 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation ultrasonore hautes fréquences de la distance inter-plaques au sein de réacteurs RHF

M. Chrifi Alaoui^{1,2}, G. Zaz^{1,2}, Y. Calzavara³, E. Le Clézio^{1,2}, G. Despaux^{1,2}

¹ Université de Montpellier, IES UMR 5214, F-34095 Montpellier, France

² CNRS, IES UMR 5214, F-34095 Montpellier, France

³ Institut Laue Langevin - ILL, 71 Avenue des Martyrs, 38000 Grenoble, France

Post examination of a RHF single element by ultrasound

A high frequency ultrasonic sensor is designed to measure the distance between two plates in an irradiated element with access constraints. The measurement system consists in a double ultrasonic transmitter/receiver mounted on a blade in order to be inserted and manipulated into the interstice between two plates separated by about 2 mm. It operates at frequencies up to 120 MHz and allows the measurement of the inter-plate distance by evaluating the time of flight of the ultrasonic waves.

1. Introduction

Le réacteur à haut flux (RHF) de l'Institut Laue-Langevin (ILL) possède un élément combustible unique constitué d'un noyau d'uranium hautement enrichi. Ce noyau, composé de 280 plaques de combustible courbées, est placé dans une piscine d'eau déminéralisée permettant son refroidissement ainsi qu'une protection aux rayonnements gamma et neutroniques. L'ILL souhaite développer des outils afin de contrôler in situ les modifications de la structure de cet élément. En particulier, la distance inter-plaque constitue un paramètre riche en informations concernant son historique d'irradiation. La mesure de cette distance, proche de deux millimètres, est cependant délicate car une résolution micrométrique est souhaitée en raison des modifications de la structure microscopique des plaques (gonflement, présence d'une couche d'oxyde...). En outre, l'accès à des plaques courbées immergées sous quatre à cinq mètres d'eau est contraignant. Tous les systèmes de mesure sont de plus soumis à des radiations élevées.

Pour répondre à cette problématique, deux transducteurs ultrasonores fonctionnant à hautes fréquences ont été étudiés, conçus et montés sur un sabre. Adaptée à l'environnement radiatif, la structure du sabre respecte la contrainte d'épaisseur de 1 mm. Un système mécanique a été réalisé pour insérer le dispositif dans l'espace entre deux plaques d'une largeur moyenne de 1,8 mm. Sur la base de la méthode de pulse-écho, les transducteurs permettent de mesurer des distances à partir de la mesure des temps de vol (ToF) du signal réfléchi par les surfaces de combustible. Ce temps t est en effet relié à la distance d entre les plaques de combustible et la vitesse du son c dans le milieu (eau) par l'équation $d = ct/2$. Grâce à un système d'acquisition hautes fréquences et à un traitement de signal approprié, il est alors possible de calculer avec précision la distance en temps réel [1].

Un premier dispositif complet a été introduit entre des plaques d'un élément combustible du réacteur de recherche de l'ILL en décembre 2013, et les résultats obtenus ont prouvé la faisabilité de la mesure. Les différentes composantes des transducteurs ultrasonores ont démontré une bonne résistance aux radiations au cours de la manipulation, et la qualité du rapport signal

sur bruit était suffisante pour obtenir une estimation stable de la distance inter-plaque malgré quelques défauts qui restaient à corriger pour effectuer des mesures absolues. Une deuxième expérience a donc été réalisée en juillet 2015. Afin d'augmenter la précision des mesures, la distance inter-plaque et la température de l'eau du canal y ont été estimées en parallèle. La majorité des paramètres influençant l'expérience est donc maintenant prise en compte dans le processus d'identification. Le travail présenté dans le cadre de cet article fait suite à une publication [2] au C2I 2013 et expose les dernières avancées réalisées.

2. Matériels et méthodes

2.1. Principe de mesure

Un double émetteur/récepteur monté sur un sabre a été réalisé pour s'introduire entre deux plaques séparées de 1,8 mm (Figure 1). Le principe général consiste à ce que chaque émetteur/récepteur émette et reçoive une onde ultrasonore, ce qui permettra de mesurer la distance entre son extrémité et la plaque parallèle qui lui fait face. La distance totale entre les plaques est alors déduite à partir de la mesure de l'intervalle de temps qui sépare l'émission d'une impulsion et la réception des échos réfléchis sur la plaque [3]. Ainsi, le temps de vol, la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore et l'épaisseur du sabre sont les paramètres essentiels pour déduire la distance inter-plaques.

2.2. Conception du support des capteurs

Afin de réaliser un prototype de sabre répondant aux besoins en termes de taille, de tenue aux radiations et à la faible atténuation, une étude a été réalisée (Figure 2). Cette étude comprend :

- La conception 3D du sabre sur lequel sont montés les transducteurs,
- La conception du support de manipulation du capteur à une distance d'environ 5 m,
- La réalisation des images acoustiques pour vérifier la planéité des couches composant les transducteurs.

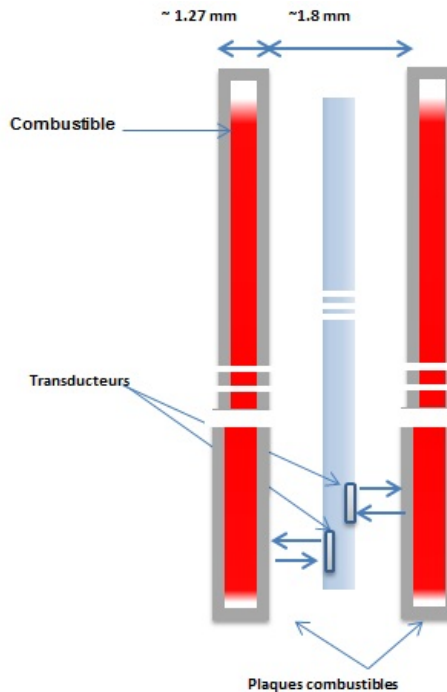
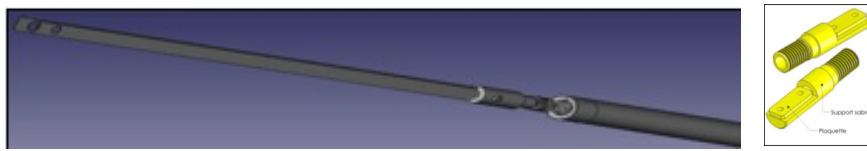


Schéma général du système de mesure. Le sabre instrumenté inclut 2 systèmes d'émission/réception insonifiant de part et d'autre les plaques de combustible.

En raison de la forme incurvée des plaques de combustible et la distance inter-plaque nominale de 1,8 mm, un sabre en acier inoxydable a été conçu en respectant les dimensions suivantes : 1 mm d'épaisseur, 10 mm de largeur et 1100 mm de longueur. Sur ce sabre deux trous sont usinés pour monter les transducteurs à ultrasons. Puis une rainure a été réalisée sur les deux faces du sabre afin d'intégrer des fils coaxiaux (Figure 2.(a)).

Le sabre est introduit entre les plaques par un opérateur via un support de 5 m en forme de tube en acier inoxydable. La liaison entre le sabre et le support est muni d'une pièce métallique vissée sur un côté de la lame et filetée sur l'autre côté au support (Figure 2.(b)). Le câble de raccordement du sabre aux éléments électroniques a une longueur de 15 m. Le sabre de



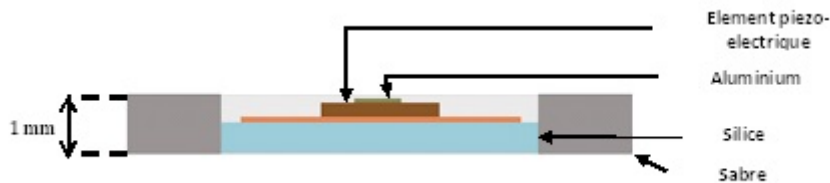
(a) Support du sabre et (b) connexion.

mesure est conçu de façon à optimiser sa résistance aux radiations. Il doit également être étanche puisque les mesures sont réalisées en milieux aqueux.

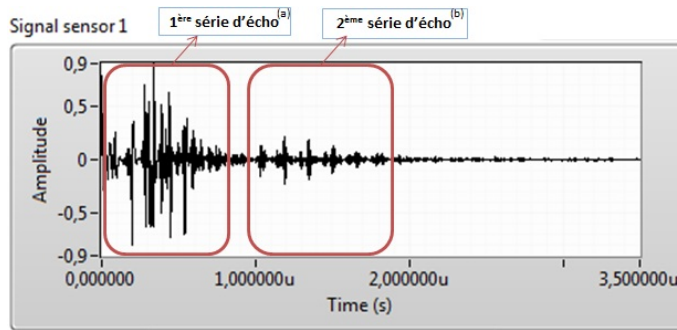
2.3. Composition des capteurs

Pour obtenir la résolution désirée, les émetteurs/récepteurs sont constitués par des transducteurs piézoélectriques fonctionnant à une fréquence de l'ordre de 120 MHz et possédant la même structure multicouche composée d'un élément piézoélectrique soudé sur une surface à une électrode en or (Figure 3). Une couche d'aluminium déposée sur la seconde surface constitue la seconde électrode. L'ensemble du système est soudé par une fine couche de colle à une ligne à retard de silice. Le tout doit être monté sur l'une des extrémités du sabre qui va s'introduire dans l'interstice des plaques de combustible.

Chaque transducteur a pour fonction de convertir le signal acoustique de haute fréquence en un signal électrique ou l'inverse. A l'excitation de l'élément piézoélectrique par une impulsion électrique[4], l'onde ultrasonore générée est émise traversant ainsi les différents milieux de propagation tout en produisant une série d'échos acoustiques à amplitudes décroissantes



Transducteur ultrasonore.



Structure des échos ultrasonores (a) échos au sein de la structure du capteur ; (b) réflexions sur la plaque combustible.

(Figure 4) . Le programme de traitement affiche en temps réel le signal comportant les échos produits. Ces échos forment le résultat des différentes réflexions émises lors du parcours de l'onde. La première série d'échos correspond aux réflexions dues à la fine couche de silice du capteur (Figure 4.(a)). La seconde série (Figure 4.(b)) provient de la deuxième surface rencontrée c'est-à-dire la surface de la plaque. Cette série arrive après un décalage temporel correspondant au temps nécessaire pour parcourir un aller retour dans le couplant. Ces séries d'échos sont acquises puis traitées via un système électronique de traitement de signal approprié.

2.4. Système d'acquisition

Les signaux ultrasonores sont acquis et traités en utilisant un système électronique de traitement de signal comprenant :

- un émetteur/récepteur d'impulsions haute tension permettant d'améliorer le signal d'excitation et intégré à un châssis NI PXIe (Figure 5),
- Une carte d'acquisition NI PXIe1-5162 avec une résolution de 10 bits qui assure un échantillonnage à 5 Géch/s, deux cartes d'amplification RF et une carte de contrôle,
- Un programme développé sous le logiciel LabVIEW permettant l'acquisition et le traitement du signal [5]. Ce programme comprend deux parties :
 - La première commande l'électronique de mesure et son interface permet de définir les paramètres d'acquisition des signaux acoustiques à haute fréquence.
 - La deuxième partie du programme permet la détermination de la distance inter-plaque en temps réel ou en post-traitement. Le principe consiste à inter-corréler la série d'échos réfléchié dans la ligne à retard (silice) avec celle réfléchié par la plaque afin d'en déduire le temps de propagation dans l'eau. En connaissant la vitesse de propagation des ultrasons en fonction de la température, la distance inter-plaque peut être déduite.



Système d'acquisition intégré à un châssis NI PXIe.

3. Expérience et résultats

3.1. Base de mesure

La vitesse du son varie en fonction de la température. Par conséquent, afin de réaliser des mesures précises de distances, il est nécessaire d'évaluer la dépendance de la vitesse en fonction de la température de l'eau au sein du canal séparant deux plaques de combustible. À partir de travaux issus de la littérature [6], la vitesse du son c a été déterminée comme suit :

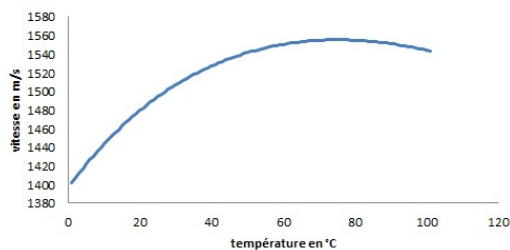
$$c = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5. \quad (1)$$

Le tableau 1 synthétise les valeurs des différents coefficients a_i . L'évolution de la vitesse en

Approximation polynomiale de la dépendance de la vitesse du son c à la température.

Ref.	a_0	a_1	$10^2 a_2$	$10^4 a_3$	$10^6 a_4$	$10^9 a_5$	erreur max m/s	plage température
[6]	1402.388	5.03711	-5.80852	3.342	-1.478	3.146	0.002	0-100 °C

fonction de la température est présentée sur la figure 6. Cette courbe servira, dans les pa-

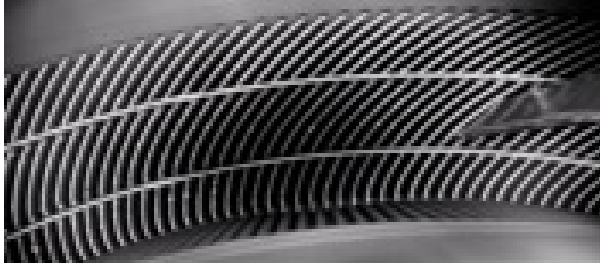


Variation de la vitesse ultrasonore en fonction de la température

graphes suivants, d'abaque permettant de connaître la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le canal d'eau.

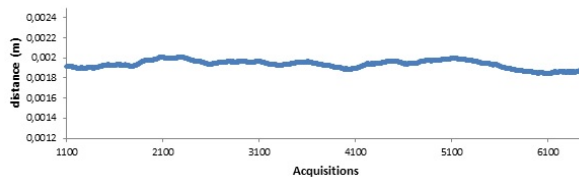
3.2. Expérience

Lors d'une expérience sur le Réacteur à Haut Flux de l'ILL, le sabre a été disposé entre deux plaques de l'élément combustible irradié et maintenu parallèle à ces dernières (Figure 7).



Positionnement du sabre entre deux plaques de l'élément combustible. [7]

La figure 8 présente les résultats de la mesure de la distance lors de l'introduction / retrait du sabre dans l'interstice.



Mesure de la distance inter-plaque.

3.3. Analyse

Sachant que la température de l'eau au sein du canal d'eau est de 27.8°C et en se référant à la courbe de la figure 6, la vitesse ultrasonore est fixée pour les mesures à 1500 m/s avec une estimation d'erreur de $\Delta v = 1,1\text{ m/s}$. L'échantillonnage étant réglé à une fréquence de $f = 2,5\text{ Géch/s}$, la période est fixée à $T = 0,4\text{ ns}$.

Les résultats de la figure 8 montrent clairement qu'en dépit de la nature fortement irradiée de l'environnement, la qualité des signaux ultrasonores est suffisante pour assurer une mesure stable des distances inter-plaques. Celle-ci correspond à une valeur de $1,94 \pm 0,004\text{ mm}$ jusqu'à l'acquisition 6000 avec un écart-type de $0,34\text{ mm}$. Au-delà de l'acquisition 6000, l'épaisseur du canal d'eau est égale à $1,86 \pm 0,004\text{ mm}$ avec un écart type de $0,012\text{ mm}$. L'erreur expérimentale est estimée de la manière suivante :

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

$$\Rightarrow \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta t}{t}, \quad (3)$$

$$\Rightarrow \Delta d = 1,55 \mu\text{m}. \quad (4)$$

4. Conclusion

La faisabilité d'une mesure de distance entre les plaques d'un élément combustible nucléaire irradiée par une méthode ultrasonore haute fréquence a été prouvée. La prise en compte de la température du canal d'eau a permis de réaliser des estimations de l'épaisseur de celui-ci avec des précisions inférieures à $2 \mu\text{m}$. Le suivi de ses variations au cours du déplacement du dispositif de mesure devrait, dans le futur, permettre d'augmenter la précision sur l'estimation de distance. Les effets indésirables de l'électronique de mesure seront également étudiés.

Les auteurs souhaitent remercier sincèrement :

- Laurent PODEVIN pour la réalisation de la partie mécanique et la partie ultrasonore de l'élément de mesure,
- Alain PORTAL pour l'adaptation et la réalisation de la carte de génération des impulsions électriques
- Les opérateurs qui ont fortement contribué à la réussite de la campagne de mesure réalisé à l'ILL lors de l'expérimentation de juillet 2015.

Références

- [1] R. J. M. Da Fonseca, "Scanning acoustic microscopy - recent applications in materials science," vol. 5, pp. 508–519.
- [2] G. Zaz, Y. Calzavara, and G. Despaux, "Capteur acoustique haute fréquence mesurant la distance inter-plaque d'un réacteur nucléaire," in *Instrumentation et interdisciplinarité : Capteurs Chimiques et Physiques*, pp. 103–104.
- [3] Bruere, "Mesure d'épaisseur sans contact par méthode capacitive," vol. 71, pp. 7–11.
- [4] D. Laux, W. d. Weerd, D. Papaioannou, S. Kitajima, V. V. Rondinella, and G. Despaux, "Scanning acoustic microscope for mechanical characterization and density estimation of irradiated nuclear fuel," vol. 72, pp. 63 – 66, symposium E @ E-MRS 2013 {SPRING} {MEETING} Scientific basis of the nuclear fuel cycle. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197013001431>
- [5] W. Grill, K. Hillmann, T. J. Kim, O. Lenkeit, J. Ndop, and M. e. a. Schubert, "Scanning acoustic microscopy with vector contrast," vol. 263â264, pp. 553 – 558. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921452698014781>
- [6] M. C. Del Grosso VA, "Speed of sound in pure water," pp. 1442 – 1446.

- [7] G. Zaz, A. Dekkious, P. A. Meignen, Y. Calzavara, E. L. Clézio, and G. Despaux, "High frequency transducer dedicated to the high-resolution in situ measurement of the distance between two nuclear fuel plates," vol. 70, pp. 191 – 194, proceedings of the 2015 {ICU} International Congress on Ultrasonics, Metz, France. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389215008512>