



**HAL**  
open science

## Potentiel du contrôle ultrasonore d'une plaque masquée par des écrans parallèles

M.A. Ploix, Jean François Chaix, G. Corneloup, F. Baqué

► **To cite this version:**

M.A. Ploix, Jean François Chaix, G. Corneloup, F. Baqué. Potentiel du contrôle ultrasonore d'une plaque masquée par des écrans parallèles. Journées COFREND 2011, May 2011, Dunkerque, France. hal-01300013

**HAL Id: hal-01300013**

**<https://hal.science/hal-01300013>**

Submitted on 9 Oct 2019

**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.

# POTENTIEL DU CONTRÔLE ULTRASONORE D'UNE PLAQUE MASQUÉE PAR DES ÉCRANS PARALLÈLES

## ULTRASONIC TESTING POTENTIAL OF A PLATE MASKED BEHIND PARALLEL SCREENS

PLOIX M.A., CHAIX J.F., CORNELOUP G. – LCND, IUT, Avenue G. Berger – 13 625 Aix-en-Provence

BAQUE F. – CEA Cadarache – 13 108 Saint-Paul-lez-Durance

Tél. +33 (0)4 42 93 90 34 – Fax. +33 (0)4 42 93 90 84

e-mail : marie-aude.ploix@univmed.com

### Résumé

L'inspection en service de structures internes des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium liquide constitue une problématique importante au CEA. Les méthodes ultrasonores permettent de s'affranchir du caractère opaque du sodium, sont insensibles au rayonnement et sont adaptées aux hautes températures. De plus, elles permettent des contrôles depuis l'extérieur du circuit sodium ; c'est dans ce cadre que s'insère cette communication. Il s'agit d'étudier la propagation des ultrasons dans une plaque masquée par n plaques immergées en sodium afin de la contrôler. La nécessité de propager le maximum d'énergie a orienté l'étude vers les ondes de Lamb dans des structures multicouches solide-fluide. La modélisation repose sur la méthode des matrices de transfert et conduit à l'optimisation du couple (angle, fréquence). Une étude expérimentale valide ce modèle sur un ensemble de plaques d'acier inoxydable immergées dans l'eau. Les possibilités de contrôle d'une plaque derrière n écrans sont analysées et discutées.

### Abstract

*The in-service inspection of internal structures of future liquid sodium-cooled fast reactors is an important issue of the CEA. The ultrasonic methods can overcome the sodium opacity, are insensitive to radiation and are adapted to high temperatures. Moreover, they allow to control from outside the circuit sodium; this communication regards this point. The propagation of ultrasounds is studied in a plate masked by n plates immersed in liquid sodium to control it. The need to obtain a maximum of propagating energy directed the study towards Lamb waves in layered solid-fluid structures. The model developed is based on the method of transfer matrix and leads to the optimization of the pair (angle, frequency). An experimental study validates the model on a set of stainless steel plates immersed in water. The possibilities for the control of a plate behind n screens are then analyzed and discussed.*

### CONTEXTE DE L'ETUDE

Le CEA, EDF et AREVA coordonnent un programme de recherche depuis 2006 [1] dont l'un des axes est l'amélioration des performances de contrôle et de réparation des réacteurs de génération IV refroidis au sodium liquide.

Le sodium liquide présente des caractéristiques spécifiques. Tout d'abord, son opacité nécessite des techniques de contrôle de type ondes ultrasonores, électromagnétiques... De

plus, la température élevée (entre 400 et 550°C lorsque le réacteur est en fonctionnement, et environ 200°C lors des contrôles périodiques), et l'activité chimique du sodium liquide ont conduit à développer des instrumentations spécifiques pour l'inspection, comme des traducteurs ultrasonores haute température.

La présente étude vise à analyser la capacité des ultrasons à permettre des mesures de contrôle volumique aussi bien depuis l'intérieur que l'extérieur du circuit sodium (cf. figure 1).

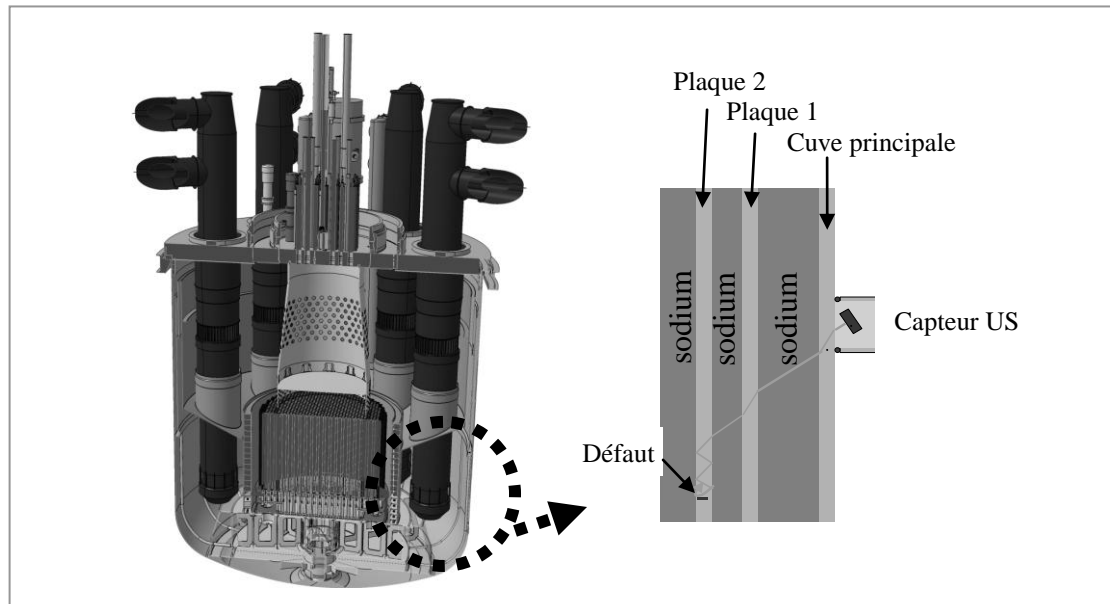


Figure 1 : Inspection depuis l'extérieur du milieu sodium

## TRANSMISSION A TRAVERS PLUSIEURS PLAQUES IMMERGÉES : THEORIE

### Méthode des matrices de transfert

Le besoin de propager un maximum d'énergie à travers des milieux finis a orienté l'étude vers les ondes de Lamb. Ces ondes sont fréquemment utilisées dans des plaques seules, en air avec des traducteurs positionnés au contact, mais rarement dans le cas d'alternances liquide-solide.

Les alternances de plaques en acier et de couches de sodium liquide peuvent être considérées comme un système multicouche (cf. figure 2). La méthode courante pour étudier la propagation des ondes dans les milieux multicouches est la méthode des matrices de transfert [2, 3]. L'idée est de construire la matrice de propagation d'un ensemble de couches à partir des matrices de transfert de chaque couche (reliant vitesses de propagation et contraintes aux interfaces d'entrée et de sortie), en appliquant les conditions de continuité aux interfaces entre chaque couche. On obtient le système d'équations suivant, reliant les vitesses  $v$  et contraintes  $\sigma$  en sortie du multicouche (couches isotropes) avec celle à l'entrée [4] :

$$\begin{bmatrix} v_3^{n+1} \\ \sigma_3^{n+1} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} v_3^0 \\ \sigma_3^0 \end{bmatrix}, \text{ avec } \mathbf{M}_{ij} = \mathbf{A}_{ij} - \mathbf{A}_{i1} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{4j} \\ \mathbf{A}_{41} \end{pmatrix}$$

où  $\mathbf{M}$  est la matrice de transfert du multicouche.

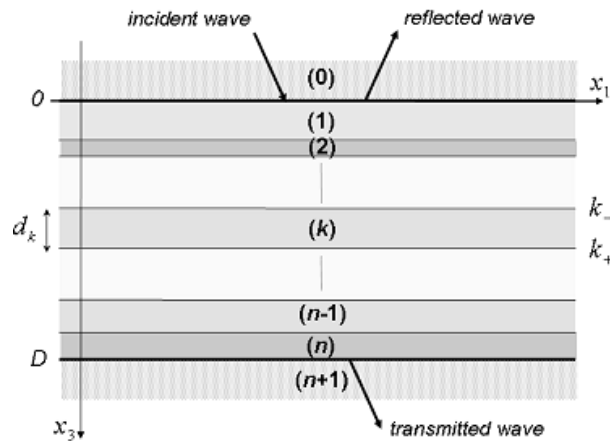


Figure 2 : Schéma d'une structure multicouche

La matrice de transfert du système entier peut alors être utilisée pour calculer les coefficients de réflexion et de transmission sous l'hypothèse d'une onde plane incidente :

$$T = \frac{2Z_0}{\mathbf{M}_{22} + Z_0 \mathbf{M}_{33} \overline{Z}_{n+1} + \mathbf{M}_{32} + Z_0 \mathbf{M}_{33}}$$

$$R = \frac{\mathbf{M}_{32} + Z_0 \mathbf{M}_{33} - \mathbf{M}_{22} + Z_0 \mathbf{M}_{23} \overline{Z}_{n+1}}{\mathbf{M}_{32} + Z_0 \mathbf{M}_{33} + \mathbf{M}_{22} + Z_0 \mathbf{M}_{23} \overline{Z}_{n+1}}$$

avec  $Z_0 = \frac{\rho_0 c_0}{\cos \theta_0}$  et  $Z_{n+1} = \frac{\rho_{n+1} c_{n+1}}{\cos \theta_{n+1}}$ , où  $\theta_0$  et  $\theta_{n+1}$  sont les angles de propagation dans les milieux 0 et n+1 respectivement.

Le calcul prend en compte les réflexions multiples et les conversions de mode. Les ondes de Lamb sont donc modélisées.

### Coefficients de transmission théoriques pour 1 et 2 plaques

Les coefficients de transmission sont calculés et représentés en niveaux de gris sur la figure 3 en fonction de l'angle d'incidence et de la fréquence. Les modes de Lamb apparaissent sous la forme d'une transmission totale (en blanc sur la figure). Notons que les courbes de modes de Lamb sont les mêmes lorsque l'épaisseur de la plaque change, à une homothétie près selon la fréquence, puisque la génération des modes de Lamb est dépendante du produit fréquence x épaisseur.

On peut observer que les modes de Lamb générés dans un système à deux plaques de 2 et 3mm d'acier séparées par 43.8 mm d'eau sont exactement les mêmes que tous les modes de Lamb générés par chaque plaque prise individuellement. Aucun mode supplémentaire n'est donc généré par un système à n plaques (pour des épaisseurs de fluide suffisamment grandes).

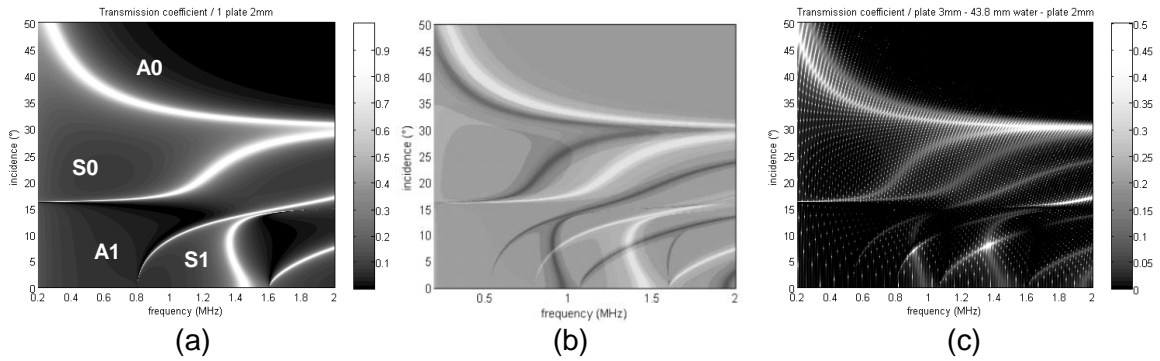


Figure 3 : Coefficients de transmission théoriques : (a) pour une plaque d'acier de 2mm d'épaisseur, (b) pour une plaque d'acier de 2mm et une de 3mm individuellement, superposés graphiquement, (c) pour un système avec une plaque de 2mm et une de 3mm séparées par 43.8mm d'eau.

## TRANSMISSION A TRAVERS PLUSIEURS PLAQUES D'ACIER IMMERGÉES DANS L'EAU : COMPARAISON THEORIE/EXPERIENCE

Divers essais expérimentaux ont été menés en eau, sur des plaques d'acier inoxydable d'épaisseurs 2 et 3 mm, dans différentes configurations afin d'étudier l'influence de différents paramètres : forme d'émission (impulsion, train d'onde), fréquence, nombre de plaques, espacement entre les plaques... Les premiers essais sur une plaque ont pu confirmer la propagation d'ondes de Lamb, avec des angles d'incidence en accord avec la théorie (en particulier 18° pour le mode S0 et 35° pour le mode A0 dans le cas d'une plaque de 2 mm et une fréquence de 1 MHz), comme le montre la figure 4.

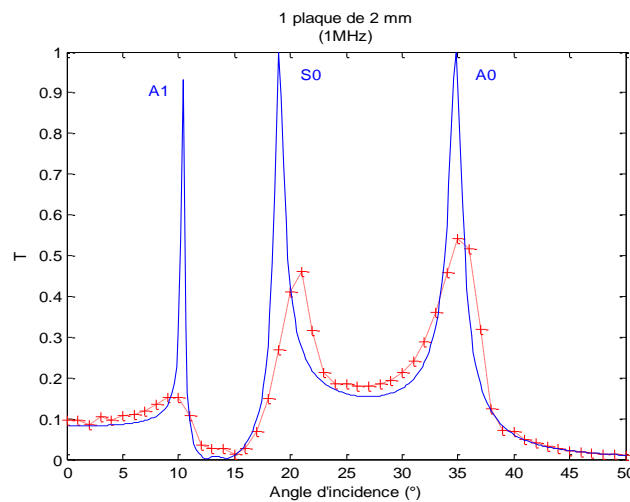


Figure 4 : Coefficients de transmission théoriques (-) et expérimentaux (-+-) sur une plaque d'acier de 2mm immergée en fonction de l'angle d'incidence

### Essais en eau sur deux plaques

Les essais ont été effectués en immersion à l'aide d'un capteur émetteur-récepteur de fréquence centrale 1 MHz, qui émet une impulsion. Deux angles d'incidence ont été choisis, 18° et 35°, permettant de générer les modes de Lamb S0 et A0 respectivement, dans la seconde plaque, de 2 mm d'épaisseur. Les ondes sont renvoyées en direction du capteur

par une fente usinée dans la seconde plaque. Cela revient globalement à un essai de double transmission. Un exemple de signaux acquis en éloignant le capteur progressivement (vis-à-vis de la position qui correspond au maximum d'amplitude reçue) est montré sur la figure 5.

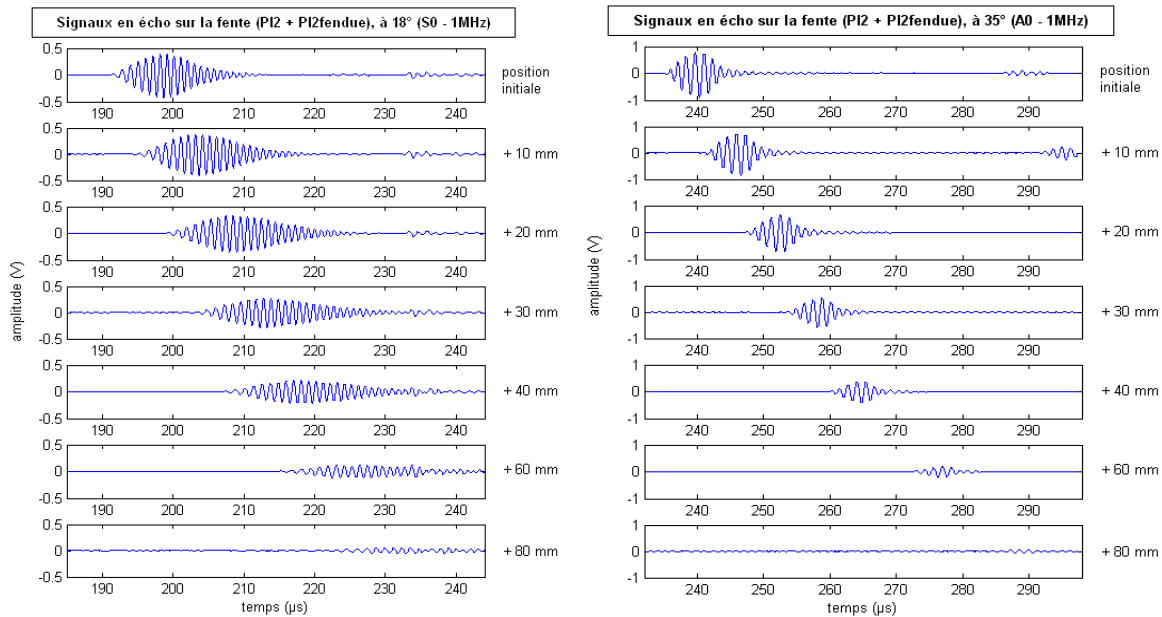


Figure 5 : Exemples de signaux acquis pour des incidences de 18° et 35°

L'amplitude maximale des signaux reçus est représentée en fonction de la distance du capteur à la fente, et les résultats sont présentés dans le tableau 1.

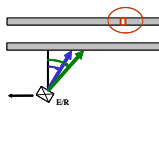
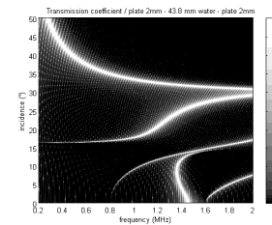
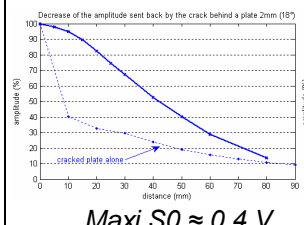
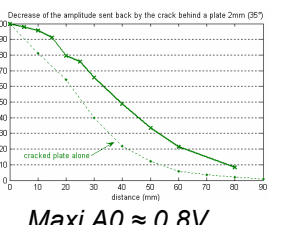
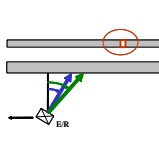
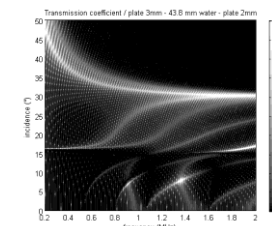
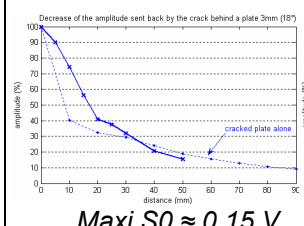
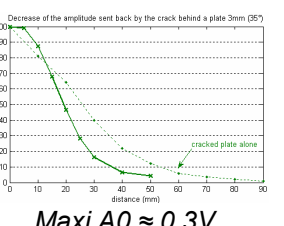
Essais	Coefficients de transmission théoriques	Résultats	
		S0 (à 18°)	A0 (à 35°)
2 plaques de 2mm 		 <b>Maxi S0 ≈ 0.4 V</b>	 <b>Maxi A0 ≈ 0.8V</b>
1 plaque de 3mm et 1 plaque de 2mm 		 <b>Maxi S0 ≈ 0.15 V</b>	 <b>Maxi A0 ≈ 0.3V</b>

Tableau 1 : Résumé des résultats expérimentaux sur deux plaques

Les essais montrent qu'il est possible de générer une onde de Lamb dans une plaque masquée par une autre dans l'eau, même si elles ne sont pas de la même épaisseur.

L'amplitude décroît globalement de manière significative lorsque la distance à la fente augmente. On observe que la décroissance relative de l'amplitude est moins rapide dans le

cas de deux plaques d'épaisseurs identiques que lorsque les épaisseurs sont différentes. Elle est également moins rapide pour les cas avec deux plaques que pour le cas avec une seule. On peut penser que les deux plaques s'alimentent l'une l'autre en énergie puisque les ondes de Lamb émettent dans l'eau tout le long de leur trajet (on parle d'onde de Lamb rampante, ou « leaky Lamb wave »).

L'amplitude absolue est quant à elle plus grande lorsque les deux plaques sont de même épaisseur. Le mode A0 est plus énergétique que le mode S0.

## Essais en eau sur trois plaques

La même procédure expérimentale que précédemment est appliquée ici. La dernière plaque est toujours la plaque fendue de 2 mm d'épaisseur. Les deux mêmes angles d'incidence 18° et 35° sont donc choisis, afin de viser la détection de la fente dans la dernière plaque. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

	Essais	Coefficients de transmission théoriques	Résultats	
			S0 (à 18°)	A0 (à 35°)
3 plaques de 2mm				
1 plaque de 3mm et 2 plaques de 2mm			<i>S0 non détecté</i>	

Tableau 2 : Résumé des résultats expérimentaux sur trois plaques

Les essais montrent qu'il est possible de générer un mode de Lamb dans une plaque immergée masquée par deux autres plaques, excepté dans le cas du mode S0 avec une plaque de 3 mm et deux plaques de 2 mm qui n'a pas pu être identifié.

Comme précédemment, l'amplitude reçue diminue de manière significative lorsque le capteur est éloigné de la fente. On observe que la décroissance de l'amplitude du mode A0 légèrement plus lente dans les cas à trois plaques que dans les cas à une et deux plaques.

## CONCLUSIONS

Les résultats théoriques en termes de coefficients de transmission en fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence sont obtenus à l'aide de la méthode des matrices de transfert. Ils sont comparés aux résultats expérimentaux obtenus en eau, et montrent une bonne concordance.

Un défaut artificiel de type fente peut être détecté dans une plaque immergée située derrière un ou deux écrans en générant des ondes de Lamb dans la dernière plaque. L'atténuation constatée à ce stade est compatible avec les conditions industrielles de contrôle. Cette technique d'inspection montre donc un réel potentiel.

La poursuite de l'étude se focalisera sur l'identification de la plaque contenant le défaut, et la localisation du défaut. Des essais à plus grande échelle (plaques plus épaisses) seront effectués en eau, puis en sodium liquide afin de qualifier la méthode.

## Références bibliographiques

- [1] G. Gobillot, F. Baqué, C. Lhuillier, P.H. Brau, M.A. Ploix, J.M. Augem, J.F. Saillant, Ultrasonic Techniques for Improving Inspection of Sodium-cooled Systems, 4 p., ANIMMA International Conference, Marseille, France 7-10 June (2009)
- [2] A.H. Nayfeh, Elastic wave propagation in fluid-loaded multiaxial anisotropic media, Journal of the Acoustical Society of America 89 (2), pp. 542-549 (1991)
- [3] B. Hosten, M. Castaings, Transfer matrix of multilayered absorbing and anisotropic media. Measurements and simulations of ultrasonic wave propagation through composite materials, Journal of the Acoustical Society of America 94 (3), pp. 1488-1495 (1993)
- [4] D.L. Folds, C.D. Loggins, Transmission and reflection of ultrasonic waves in layered media, Journal of the Acoustical Society of America 65 (5), pp. 1102-1109 (1977)