HAL
open science

Localisation de l'écho de défaut dans un signal ultrasonore

Yaya Sidibe, Fabrice Druaux, Dimitri Lefebvre, Fernand Leon, Gerard Maze

To cite this version:

Yaya Sidibe, Fabrice Druaux, Dimitri Lefebvre, Fernand Leon, Gerard Maze. Localisation de l'écho de défaut dans un signal ultrasonore. QUALITA2013, Mar 2013, Compiègne, France. hal-00823165

HAL Id: hal-00823165

https://hal.science/hal-00823165

Submitted on 16 May 2013

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.

Localisation de l'écho de défaut dans un signal ultrasonore

Y.Sidibe, F.Druaux, D.Lefebvre
Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique du Havre: GREAH, Normandie Université, Université le Havre, 26 Rue Philippe Lebon 76600 Le Havre, France.

F.Leon, G.Maze
Laboratoire Ondes et Milieux Complexes: LOMC, UMR CNRS 6294, Normandie Université, Université le Havre, Place Robert Schuman, 76610 Le Havre, France.

Résumé — **Le contrôle par contact est le plus répandu dans l'inspection des systèmes mais son application exige un accès facile au système. La nécessité de développer une technique de contrôle sans contact pour des systèmes difficiles d'accès est donc justifiée. La contribution proposée s'inscrit dans cette démarche pour le diagnostic de défaut des systèmes immergés (par exemple des pales d'hydroliennes). Les mesures sont réalisées par échographie ultrasonore et la méthode développée utilise les outils de traitement du signal ainsi qu'un modèle de propagation des ondes de Lamb dans la structure. L'algorithme proposé permet de détecter et localiser à distance des défauts de surface dans des structures de géométrie simple.**

Mots clés—détection de défauts ; localisation de défauts ; traitement du signal ; acoustique ultrasonore ; ondes de Lamb.

I. INTRODUCTION

L'utilisation des ondes de Lamb pour le contrôle des systèmes est de plus en plus fréquente. Elles présentent l'avantage d'une grande sensibilité aux anomalies et une capacité de propagation importante sur de longues distances. Découvertes en 1917 par Horace Lamb [1], les ondes de Lamb ont fait l'objet de plusieurs recherches dans le cadre du contrôle non destructif (CND). Les premières applications pour la détection des défauts ont été l'œuvre de Firstone et Ling [2,3] et depuis, elles ont été largement utilisées. Le but de cette étude est de localiser une anomalie de surface dans une plaque d'acier immergée sans le moindre contact et de permettre un diagnostic rapide de son état. La plaque est excitée par un faisceau ultrasonore via un transducteur. Les signaux ultrasonores se propagent dans l'eau et se réfléchissent sur la plaque. La propagation de l'onde d'un milieu à un autre fait apparaître des phénomènes de réflexion et de transmission (Snell-Descartes). Ce dernier effet apparaît à chaque extrémité de la plaque. L'onde transmise est à l'origine de la présence des ondes de Lamb dans la plaque et toute anomalie est donc perçue par ces ondes comme une extrémité. Le signal obtenu contient de nombreuses informations à cause de la superposition des différentes ondes dans la plaque. Ceci motive le développement d'une méthode capable de réduire cette quantité d'informations d'une part et d'autre part de détecter et de localiser le défaut. La méthode présentée utilise un échantillon de référence sans défaut. Les autres échantillons de même dimension et de même propriétés physiques comportent éventuellement des défauts qui sont localisés par comparaison. La méthode consiste en une série de recalages du signal par seuillage et de renversements pour définir la plage utile qui est comprise entre les échos provenant des extrémités de la plaque référence.

L'organisation du document est la suivante. La deuxième partie porte sur la théorie des ondes de Lamb pour la plaque immergée. La troisième partie donne le modèle théorique relatif à la géométrie de la plaque et l'algorithme de détection et localisation. La quatrième partie montre les résultats expérimentaux obtenus avec l'algorithme proposé et valide le modèle théorique. La cinquième partie montre comment la méthode peut être exploitée in-situ et la partie six est réservée à la conclusion.

II. THEORIE DES ONDES DE LAMB

Résultant d'un couple d'onde de surface, il existe deux modes de Lamb. Le mode symétrique et le mode antisymétrique (figure 2). Les équations traduisant respectivement ces deux modes sont les suivantes :

$$(k^2+s^2)^2\mathrm{ch}(qd).\mathrm{sh}(sd) - 4k^2qs\mathrm{ch}(sd).\mathrm{sh}(qd) + \frac{\rho_l}{\rho_s}\frac{{C_l}^2}{{C_t}^2}\frac{q}{r}(k^2-s^2)(k^2-r^2)\mathrm{sh}(qd)\mathrm{sh}(sd) = 0 \quad (1)$$

$$(k^2+s^2)^2\mathrm{sh}(qd).\mathrm{ch}(sd) - 4k^2qs\mathrm{sh}(sd).\mathrm{ch}(qd) + \frac{\rho_l}{\rho_s}\frac{{C_l}^2}{{C_t}^2}\frac{q}{r}(k^2-s^2)(k^2-r^2)\mathrm{ch}(qd)\mathrm{ch}(sd) = 0 \quad (2)$$

$$q^2 = k^2 - {k_l}^2\,;\; s^2 = k^2 - {k_t}^2$$

$$k = \frac{\omega}{c}\,;\, k_l = \frac{\omega}{C_l}\,;\, k_t = \frac{\omega}{C_t}$$

ρ_l et ρ_s sont respectivement la résistivité du liquide (eau) et du solide (plaque), k, k_l et k_t représentent respectivement les modules des vecteurs d'onde incidente, longitudinale et transversale, ω est la pulsation (rad/s), C, C_l et C_t sont respectivement les vitesses de propagation de l'onde incidente, longitudinale transmise et transversale transmise, d est la demi épaisseur de la plaque (figure 1).

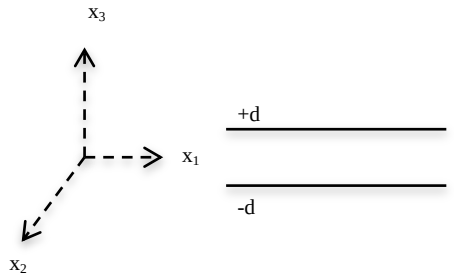

Figure 1. Plaque immergée

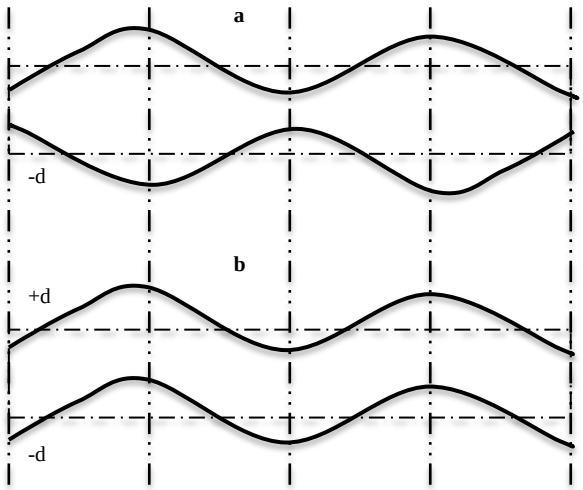

Figure 2. Modes de Lamb : a) symétrique, b) antisymétrique

Le mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation (x_1) pour le mode symétrique et perpendiculaire à x_1 pour le mode antisymétrique.

III. MODELE THEORIQUE DES TRAJETS D'ONDE DANS LA PLAQUE IMMERGEE

Le transducteur T tourne autour de la plaque en décrivant un cercle de rayon l (figure 3). La position de T est repérée par l'angle θ qui varie de 0° à 360°. Il réalise des opérations successives d'émission-acquisition avec un pas de 1°. Quatre plaques ont été utilisées. On dispose d'une part de deux plaques de référence et d'autre part de deux plaques avec de grandes fissures. Le tableau 1 donne les différents paramètres des plaques défectueuses utilisés dans l'expérience. Le modèle est limité à l'intervalle [0° 180°] à cause de la symétrie de l'objet et de la nature débouchant du défaut.

Plaques	P_1 : Largeur L=60mm, épaisseur =1.5mm δ=2/3
	P_2 : Largeur L=194mm, épaisseur =1.5mm δ =1/4
Vitesses des ondes dans la plaque	C_l = 5790 m/s, C_t = 3100 m/s
Transducteur	Fréquence centrale: 200 kHz
Oscilloscope	Base de temps: 0.1 ms/carreau
	Nombre de points d'enregistrement: 10000
	Fréquence d'échantillonnage: 10 MHz
Vitesse de l'onde dans l'eau	C_e =1470 m/s

Tableau 1. Paramètres d'expérience.

$\delta * L$ est la distance entre le défaut et la première extrémité de la plaque vue par le transducteur lors de l'acquisition. Cette extrémité est nommée B_1 pour chaque angle d'acquisition et la deuxième extrémité est appelée B_2. Les deux extrémités sont repérées conformément à la position du transducteur dans le dispositif suivant:

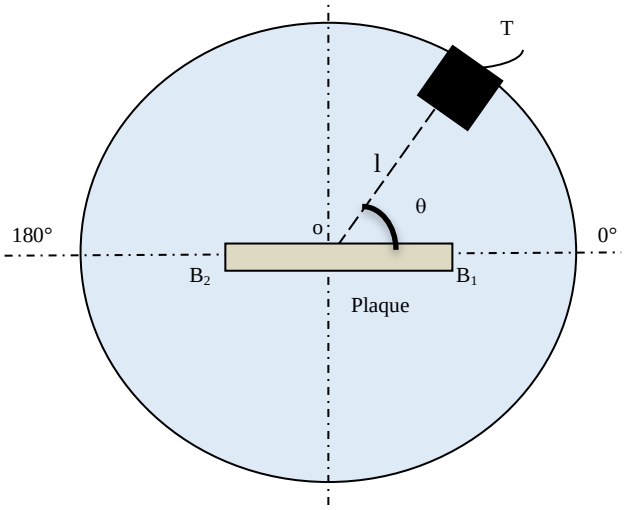

Figure 3. Dispositif expérimental

III.1 Formulation théorique du problème

Plusieurs trajets d'ondes sont possibles (figure 4), F est le défaut sur la plaque.

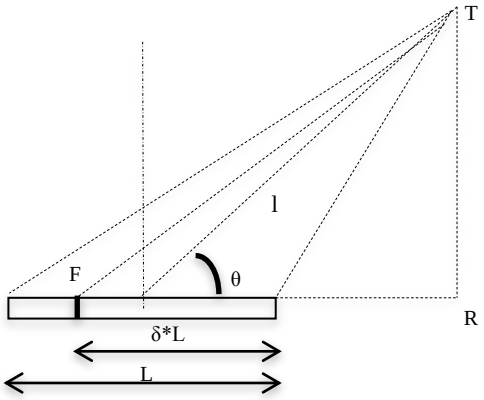

Figure 4. Plaque avec défaut.

On distingue des trajets directs (figure 5, réflexion directe sur l'extrémité B_1, réflexion directe sur l'extrémité B_2). Des trajets indirects (figure 6, T-B_1- B_2-T).

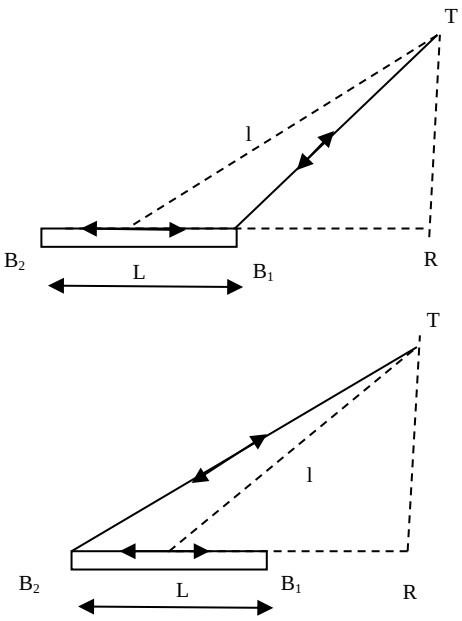

Figure 5. Trajets d'ondes directs.

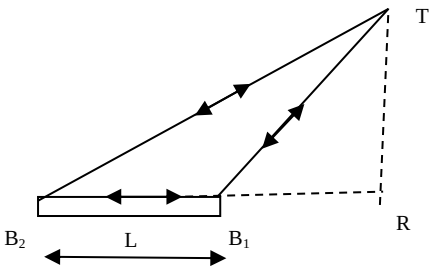

Figure 6. Trajets d'ondes indirects.

En utilisant la relation liant la vitesse, le temps et la distance (la distance l entre le transducteur et le milieu de la plaque est connue), on exprime le temps des trajets directs du transducteur aux extrémités (3a) et (3b) et du transducteur au défaut F (3c).

$$t_{TB_1} = \frac{2\sqrt{l^2 + \frac{L^2}{4} - lL\cos(\theta)}}{C_e} \qquad (3a)$$

$$t_{TB_2} = \frac{2\sqrt{l^2 + \frac{L^2}{4} + lL(\cos(\theta))}}{C_e} \qquad (3b)$$

$$p(\delta) = \frac{2\sqrt{l^2 + (\delta - 0.5)^2 L^2 + 2lL(\delta - 0.5)\cos(\theta)}}{C_e} \qquad (3c)$$

Les équations (3a), (3b), (3c) représentent le double du temps mis respectivement par l'onde entre le transducteur et les points B_1, B_2, F. Le temps des trajets bouclés est déterminé de la même manière et fait intervenir les vitesses C_l et C_t des modes de Lamb. L'ensemble de ces trajets coexiste dans le signal enregistré (figure 7).

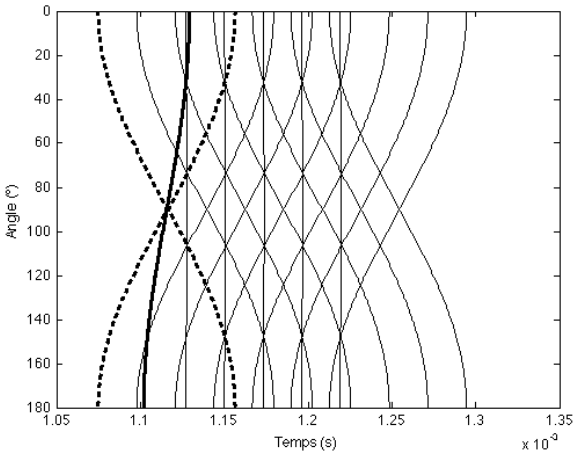

Figure 7. Signature théorique généralisée d'une plaque avec défaut

Le modèle théorique réduit correspond à l'intervalle limité par B_1 et B_2 (figure 8).

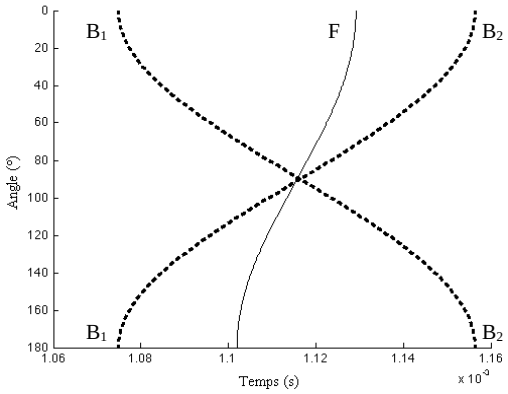

Figure 8. Signature théorique réduite d'une plaque avec défaut

III.2 Algorithme de détection et localisation

L'algorithme de détection et localisation permet dans un premier temps d'extraire l'intervalle [B_1 B_2] des signaux de mesures et ensuite de déterminer la position du défaut. Soient *S* et *D* les signaux enregistrés pour les plaques de référence et de test, de taille respective *N* et *O* points. La figure 9 donne un exemple de signal ultrasonore acquis respectivement pour une plaque de référence et une plaque de test :

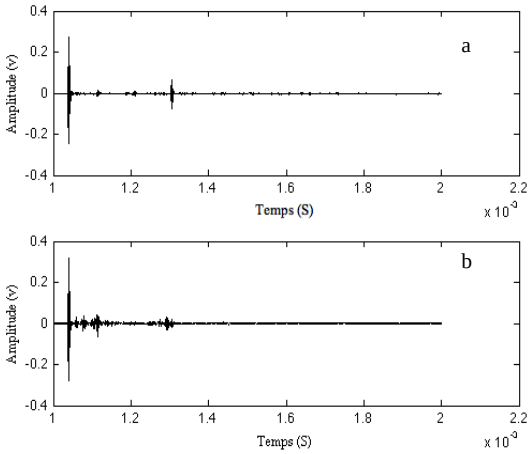

Figure 9. a) Signal de référence, b) signal de test

Etape 1 : Premier recalage et renversement

E(S) et *E(D)* sont les ensembles d'indices *i* et *j* des termes des séries *S* et *D* dont l'amplitude est supérieure au seuil $\eta = \mu + k.\sigma$. μ et σ sont respectivement la moyenne et l'écart type de la série *S*. *k* est un paramètre d'ajustement.

$$E\ (S) = \{i \geq 1\ /\ |s_i| \geq\ \eta\} \qquad (4a)$$

$$E\ (D) = \{j \geq 1\ /\ |d_j| \geq\ \eta\} \qquad (4b)$$

S_1' *et* D_1' sont les sous ensembles de termes de *S* et *D*, définis selon les équations 6a et 6b:

$$i_s = \min\big(\ E(S)\big) \qquad (5a)$$

$$i_d = \min\big(\ E(D)\big) \qquad (5b)$$

$$S_1' = \{s_i \in S\ /\ i \in [i_s, i_s + N_e]\} \qquad (6a)$$

$$D_1' = \{d_j \in D\ /\ j \in [i_d, i_d + N_e]\} \qquad (6b)$$

Ne =min (N - i_s, $O - i_d$) est la plus petite longueur des deux séries. S_1'' *et* D_1'' représentent les séries S_1' *et* D_1' renversées :

$$S_1'' = \{s_{Ne}', s_{Ne-1}', \dots\dots, s_1'\} \qquad (7a)$$

$$D_1'' = \{d_{Ne}', d_{Ne-1}', \dots\dots, d_1'\} \qquad (7b)$$

Etape 2 : Deuxième recalage et renversement

$E''(S_1'')$ et $E''(D_1'')$ sont les ensembles d'indices *i* et *j* des termes des séries S_1'' *et* D_1'' dont l'amplitude est supérieure au seuil $\alpha = \mu' + k'\sigma'$. μ' et σ' sont respectivement la moyenne et l'écart type de la série S_1'', k' est un paramètre d'ajustement.

$$E''\ (S_1'') = \{i \geq 1\ /\ |s_i''| \geq\ \alpha\} \qquad (8a)$$

$$E''\ (D_1'') = \{j \geq 1\ /\ |d_j''| \geq \alpha\} \qquad (8b)$$

S_2' *et* D_2' sont les sous ensembles de termes de S_1'' *et* D_1'', définis selon les équations (10a) et (10b):

$$i_s'' = \min\big(\ E''\ (S_1'')\big) \qquad (9a)$$

$$i_d'' = \min\big(\ E''\ (D_1'')\big) \qquad (9b)$$

$$S_2' = \{s_i'' \in S_1''\ /\ i \in [M_e, M_e + N_e]\} \qquad (10a)$$

$$D_2' = \{d_j'' \in D_1''\ /\ j \in [M_e, M_e + N_e]\} \qquad (10b)$$

$Me = \min\ (i_s'',\ i_d'')$ est la plus petite des origines. S_2'' *et* D_2'' représentent les séries S_2' *et* D_2' renversées, elles sont utilisées pour la localisation des défauts dans la suite.

$$S_2'' = \{s_{Me}', s_{Me-1}', \dots\dots, s_1'\} \qquad (11a)$$

$$D_2'' = \{d_{Me}', d_{Me-1}', \dots\dots, d_1'\} \qquad (11b)$$

Etape 3 : Transformée d'Hilbert

La transformée d'Hilbert est l'un des outils le plus utilisé dans le traitement temporel des signaux. Associée à un signal *x(t)*, elle est défini par:

$$\mathrm{H}\{x(t)\} = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau}\ d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\ t-\tau)x(\tau)\ d\tau$$
$$= g(t) * x(t) \qquad (12)$$

C'est une opération de filtrage du signal *x(t)* par un système linéaire de réponse impulsionnelle $(t) = \frac{1}{\pi t}$. Elle est utilisée pour définir le signal analytique *z(t)* associé à *x(t)* :

$$z(t) = x(t) - j\mathrm{H}\{x(t)\}$$

x(t) et H*(x(t))* sont en quadrature de phase.

$$\mathrm{F}\big(z(t)\big) = \mathrm{F}(x(t) - j\mathrm{H}\{x(t)\}) = x(f) - \mathrm{F}\big(g(t) * x(t)\big)$$
$$= X(f) - \mathrm{F}\left(\frac{1}{\pi t}\right) * X(f)$$
$$= X(f)\big(1 + j\mathrm{sign}(f)\big) = 2U(f)X(f)$$

U(t) est l'échelon d'Heaviside. Le signal analytique ne possède pas de fréquence négative, son amplitude instantanée définit l'enveloppe de *x(t)* selon l'équation (13).

$$e(t) = |\ z(t)| \qquad (13)$$

Cette formule est appliquée aux séries temporelles après le deuxième recalage pour l'extraction des enveloppes $e_s(t)$ et $e_d(t)$.

Etape 4 : *Lissage des enveloppes*

Le lissage est réalisé par convolution des séries obtenues avec une gaussienne G de paramètres (ω, σ_g).

$$G(t) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_g} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\omega}{\sigma_g}\right)^2} \qquad (14)$$

ω est le centre de la gaussienne et σ_g sa largeur. Ces deux paramètres sont laissés au choix de l'utilisateur.

$$e'_s(t) = G(t) * e_s(t) \qquad (15a)$$

$$e'_d(t) = G(t) * e_d(t) \qquad (15b)$$

σ_g a un effet direct sur l'amplitude du signal à lisser. Une valeur trop élevée de ce paramètre conduit à une perte d'amplitude du signal et inversement (figure 10).

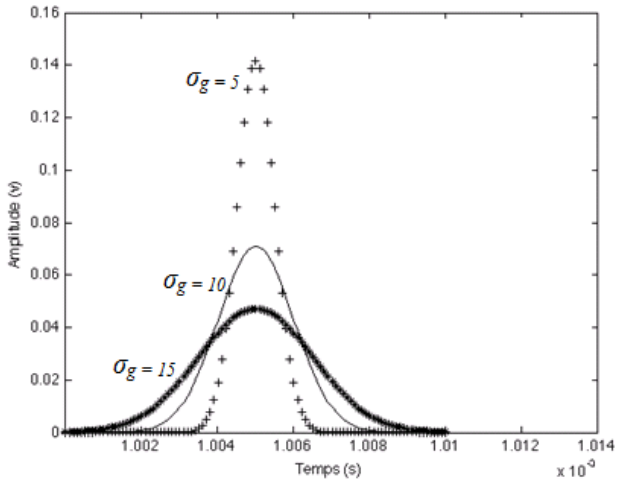

Figure 10. Influence du choix du paramètre σ_g

ω permet de déplacer le centre de la gaussienne (figure 11).

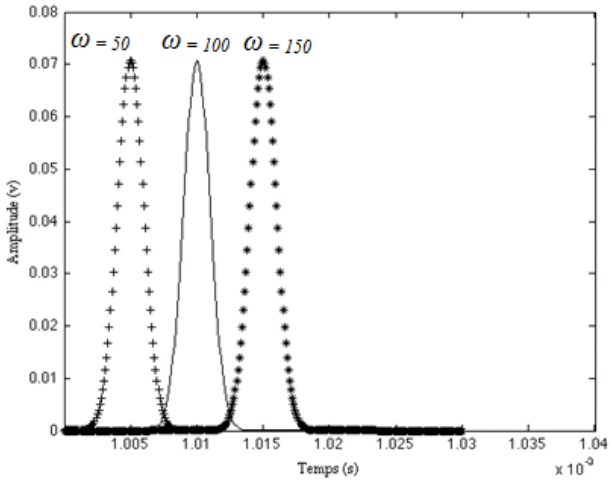

Figure 11. Influence du choix du paramètre ω

Etape 5 : Détection et localisation des défauts

La détection et la localisation sont obtenues par analyse du résidu qui résulte de la soustraction des enveloppes lissées des séries S''_2 *et* D''_2 selon l'algorithme de la figure 12.

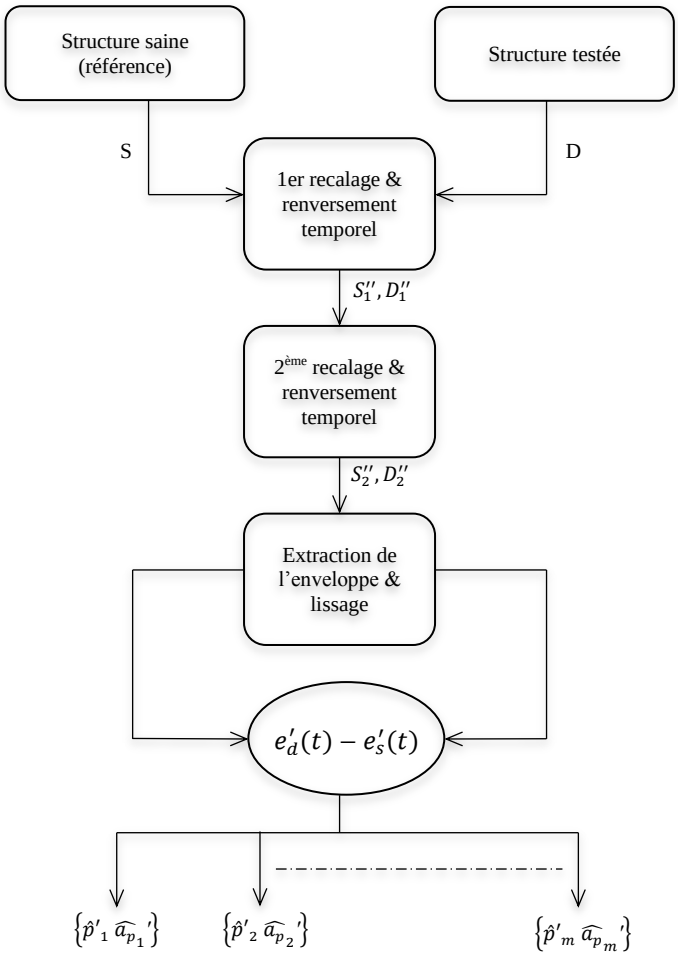

Figure 12. Algorithme de localisation de défaut

L'analyse consiste à extraire l'indice i' du terme d'amplitude maximale du résidu.

$$i' = \arg\max(e'_d(t) - e'_s(t))$$

Cette estimation permet de retrouver la position $\widehat{p'}$ du défaut dans la série initiale ainsi que son amplitude $\widehat{a_p}'$.

$$\widehat{p'} = i' + i''_d \qquad (16a)$$

$$\widehat{a_p}' = \max\left(e'_d(\widehat{p'}) - e'_s(\widehat{p'})\right) \qquad (16b)$$

On notera que la méthode de détection et de localisation peut également être appliquée sur les enveloppes non lissées. On obtiendra alors des estimations $\hat{p}$ de la position du défaut et $\widehat{a_p}$ de son amplitude.

IV. VALIDATION EXPERIMENTALE

Le dispositif expérimental est installé au laboratoire des ondes et milieux complexes LOMC. La plaque est suspendue dans une cuve de 3m de diamètre et 2m de hauteur par deux fils attachés à ses extrémités supérieures.

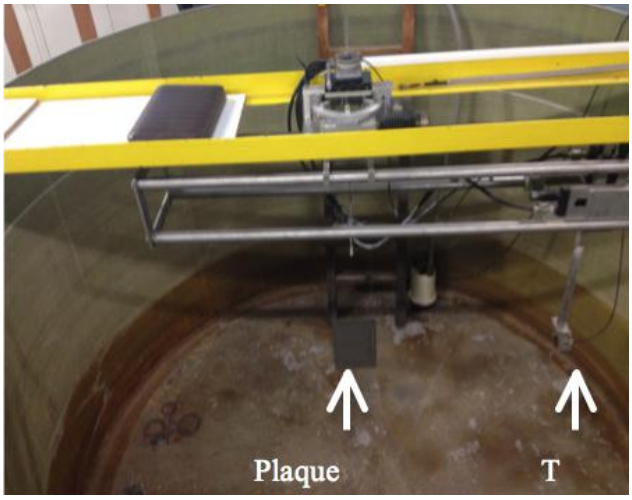

Figure 13. Dispositif expérimental

Les résultats de détection et localisation obtenus pour les plaques P_1 et P_2 sans lissage sont donnés sur les figures 14 et 15. Sur ces figures les signatures théoriques (en trait interrompu pour les extrémités et en trait plein pour les défauts) ont été superposées aux mesures (en trait interrompu étoiles pour les extrémités et en trait pointillé pour les défauts).

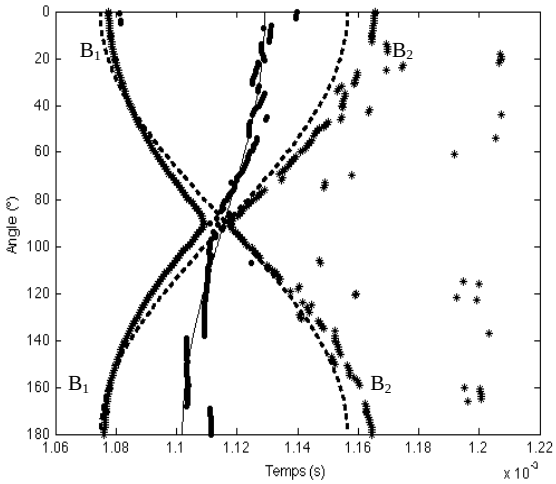

Figure 14. Plaque P_1 : détection et localisation de la saignée sans lissage

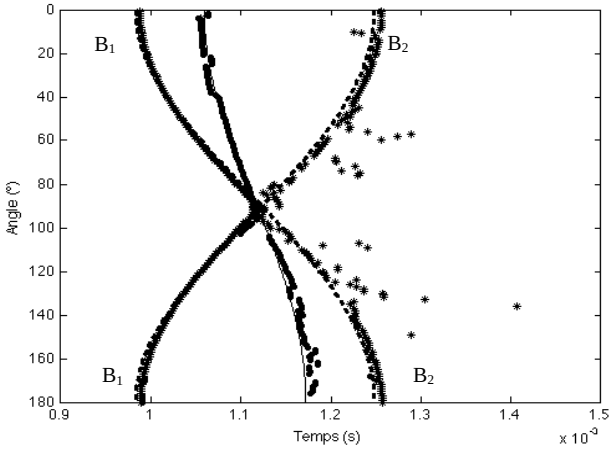

Figure 15. Plaque P_2 : détection et localisation de la saignée sans lissage

On notera une bonne adéquation générale du modèle et des mesures pour un large secteur angulaire [20° ; 160°]. Le premier écho est facilement localisé à partir du signal acquis. Il faut noter qu'une valeur trop importante du seuil η engendre la non-détection du premier écho. Le deuxième écho est plus difficile à localiser à cause du mélange de plusieurs modes introduits par la réflexion sur le défaut des modes de Lamb. Une valeur trop faible du seuil α engendre la non-détection du deuxième écho. On remarque que le défaut est correctement localisé et que sa position temporelle est fonction de l'angle d'acquisition. Néanmoins des valeurs aberrantes non négligeables apparaissent dans la localisation des défauts. Elles sont dues aux variations brusques présentes dans l'enveloppe des signaux. Pour palier à ce problème nous réalisons un lissage par gaussienne des enveloppes (étape 4 de l'algorithme). Les résultats obtenus après lissage des enveloppes sont représentés par les figures 16 et 17:

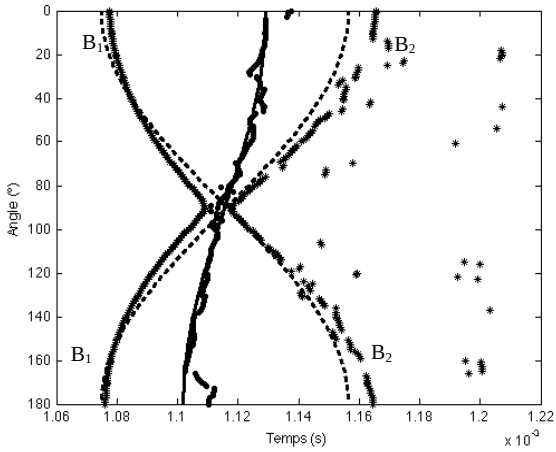

Figure 16. Plaque P_1 : détection et localisation de la saignée avec lissage

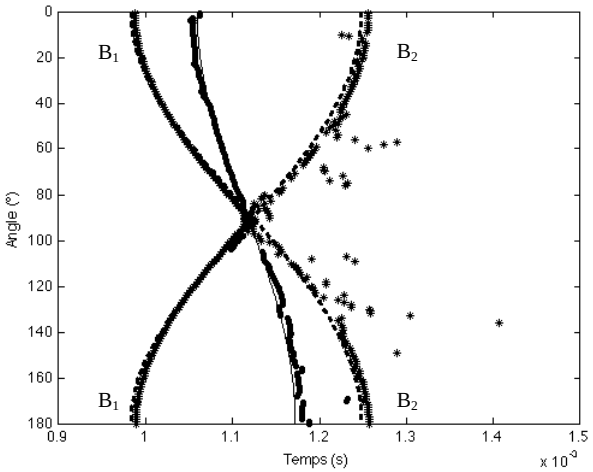

Figure 17. Plaque P_2 : détection et localisation de la saignée avec lissage

D'après les figures 16 et 17, nous constatons une nette amélioration des résultats dans la localisation de la saignée pour les plaques P_1 et P_2. Ces résultats expérimentaux valident la méthode proposée ainsi que le modèle théorique des défauts de plaque.

V. LOCALISATION DU DEFAUT A PARTIR DU MODELE POUR UN ANGLE INCONNU

Dans cette partie nous montrons comment la méthode peut être utilisée in situ lorsque l'angle d'incidence de la mesure n'est pas connu (par exemple si les acquisitions sont réalisée en mer depuis un navire en déplacement au dessus du site inspecté). Un signal est pris au hasard parmi les acquisitions de la plaque P_2.

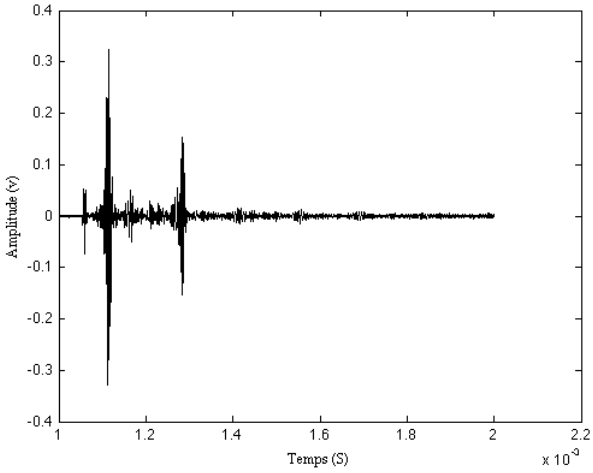

Figure 18. Signal de test

Les extrémités B_1 et B_2 sont déterminées. Le signal de test est ensuite recalé (figure 19).

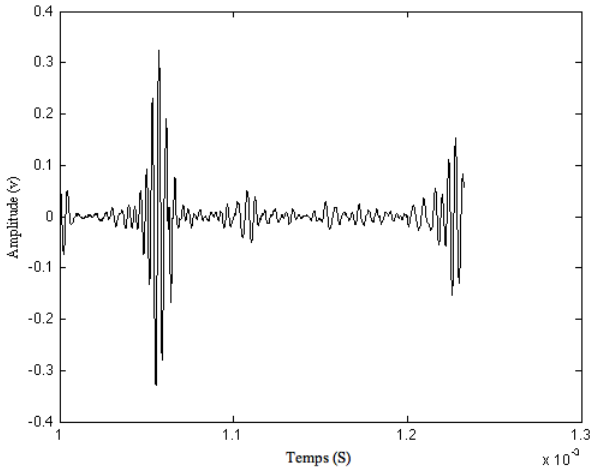

Figure 19. Signal de test après recalage

A l'issu de cette étape, on trouve l'angle d'acquisition θ = 31° du signal par rapport à l'extrémité la plus proche B_1. La plaque étant symétrique, on tient compte uniquement des angles compris dans l'intervalle [0° ; 90°].

L'angle θ étant déterminé, on récupère le signal référence correspondant et on applique l'algorithme de localisation pour déterminer la position temporelle du défaut. Les différentes étapes sont données par les figures suivantes.

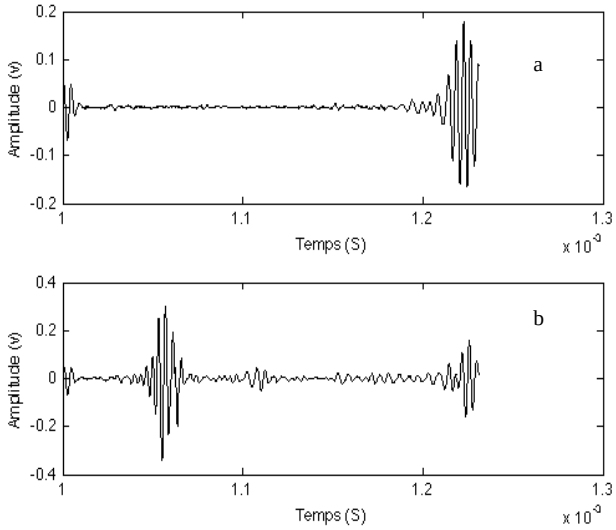

Figure 20. Signaux après 2ème renversement, **a)** référence, b) test

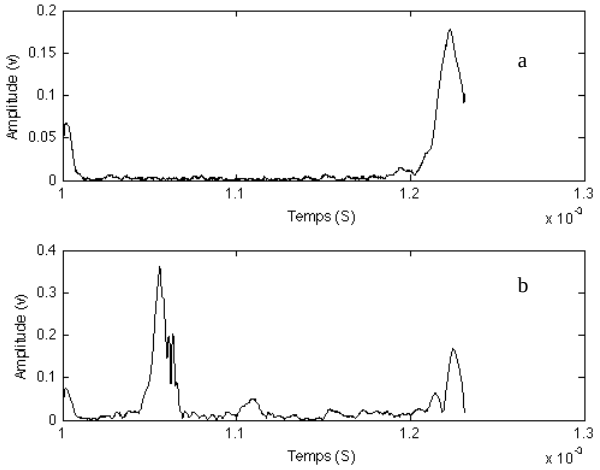

Figure 21. Enveloppes des signaux après 2ème recalage, a) référence, b) test

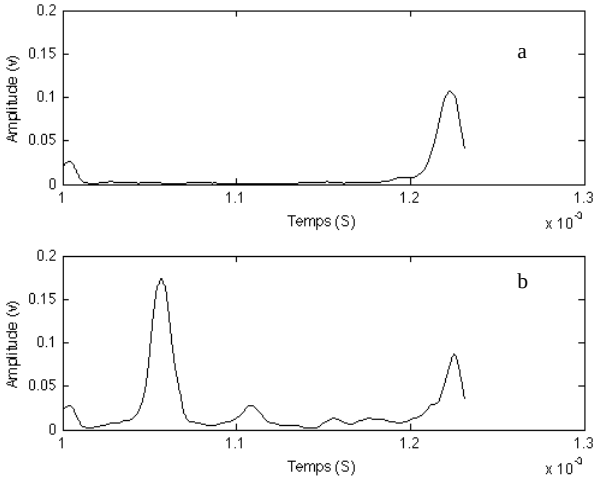

Figure 22. Enveloppes des signaux après lissage, a**)** référence, b) test

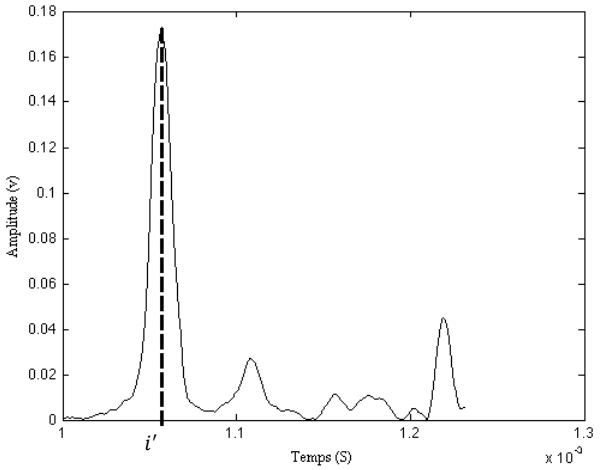

Figure 23. Différence des enveloppes lissées, a**)** référence, b) test

La position temporelle du défaut est $\widehat{p'} = 1{,}064\,\mathrm{ms}$. La connaissance de ce couple (position-angle) permet de remonter à la position réelle du défaut par substitution dans l'équation (3c). La valeur de δ est obtenue par résolution de l'équation du second degré. Pour le couple ($\widehat{p'} = 0{,}001064$, θ = 31°) on obtient δ= 0.26 et le produit δ*L=50,7mm est très proche de la valeur réelle (50mm). L'erreur est inférieure à 2%.

VI. CONCLUSION

Dans cette étude, la recherche des échos émanent des extrémités de la plaque est déterminante dans la localisation des défauts. L'approche proposée s'est révélée efficace dans la localisation de grande fissure. L'avantage de l'approche proposée est qu'elle localise le défaut indépendamment du type d'onde dans la plaque. Néanmoins, elle est conditionnée à un bon choix des seuils. Les résultats obtenus dans la localisation des défauts (fine fissure ou trou) sont moins significatifs mais néanmoins exploitables. Notons aussi que nous nous sommes restreint à l'exploitation de mesures dans un même plan et que les symétries de l'objet étudié peuvent compliquer la localisation. Nos travaux futurs permettront d'améliorer la détection et la localisation pour ce type de défauts. La localisation de défauts dans les structures complexes sera ensuite étudiée.

REFERENCES

[1] Lamb H, 1917, On waves in an elastic plate, *Proceedings of the Royal Society, A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 93, P.114–128.

[2] Firestone F.A, Ling D.S, 1954, *Method and Means for Generating and Utilizing Vibration Waves in Plates*, USA.

[3] Firestone F.A, Ling D.S, 1945, *Propagation of Waves in plates*, Technical report, Sperry products, Danbury, CT, USA.

[4] Tua P.S, Quek S.T, Wang Q, 2004, Detection of cracks in plates using piezo-actuated Lamb waves, *Smart Materials and Structures* 13, P.643–660.

[5] Lee B.C, Staszewski W.J, 2007, Lamb wave propagation modelling for damage detection: damage monitoring strategy, *Smart Materials and Structures* 16, P.260–274.

[6] Satoshi K, Shiro B, Inserra C and Matsumoto E, 2009, Nonlinear ultrasonic characterization of Lamb wave in a plate with contacting Interfaces, *ICROS-SICE International Joint Conference* P.18-21, *Fukuoka International Congress Center, Japan*.

[7] Lefebvre J.P, Lasaygue P, Potel C, 2004, L'acoustique ultrasonore et ses applications, *Acoustique et Techniques*, 36, P.4-11.

[8] McFadden P.D, 1982, Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration, *journal of vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, 34, p.53-59.