



Estimation de temps d'arrivée d'ondes ultrasonores guidées par intercorrélation à court terme de fonctions modales intrinsèques

A. Le Duff^a, P.-C. Ostiguy^b, P. Masson^b et T. Pommeau^a

^aGroupe ESEO, 10 Boulevard Jeanneteau, CS 90717, 49107 Angers, France

^bGroupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada J1K 2R1

alain.le_duff@eseo.fr

Cet article présente une technique de traitement du signal permettant d'estimer les temps d'arrivée de signaux ultrasonores se propageant dans une plaque. Cette méthode s'appuie sur le calcul de d'une intercorrélation à court terme des modes intrinsèques obtenus par une décomposition modale empirique (Empirical Mode Decomposition - EMD) des signaux acoustiques reçus. Une telle méthode permet d'estimer le temps de retard dans la partie cohérente de deux signaux. Cela est particulièrement utile dans des matériaux diffusants comme les composites par exemple. Des résultats expérimentaux, obtenus dans une dans une plaque composite verre/epoxy, équipées de transducteurs piézo-électriques intégrés, montrent que la simplicité et la robustesse de la méthode permettent d'envisager son utilisation pour la localisation de sources d'émission acoustique, par exemple. En effet, dans ce contexte particulier la méthode proposée ne nécessite pas de réglage préalable, la décomposition modale étant guidée par les données.

1 Introduction

L'émission acoustique (EA) est une technique qui permet la détection de défauts dans des matériaux structurels dont, notamment, les composites [1, 2]. Ainsi, l'apparition d'un défaut dans un matériau se traduit par la libération d'une énergie qui engendre des ondes mécaniques qui se propagent dans la structure, de la source d'émission vers les transducteurs de réception. Dans le cas particulier des matériaux composites, les causes possibles de défaut incluent la rupture de matrice, la décohésion fibre-matrice, la rupture de fibre et la délamination [3]. Les techniques d'EA sont mises en œuvre pour établir le comportement d'une structure vis à vis de l'apparition de défauts et permettent de suivre l'initialisation et la propagation de ce type de défaut par une analyse des paramètres pertinents des formes d'ondes des signaux acquis à partir des transducteurs. Un de ces paramètres est la localisation de la source qui peut s'obtenir grâce à des estimations de temps de vol (Time Difference Of Arrival - TDOA) par exemple. Cependant, une telle technique nécessite d'estimer la différence entre les temps d'arrivée de deux signaux obtenus à partir de deux transducteurs. De plus, dans le contexte particulier de surveillance intégrée de structure (Structural Health Monitoring - SHM), il est indispensable d'envisager des algorithmes simples à mettre en oeuvre, précis et robustes.

Des travaux ont montré que ce type de mesure peut être réalisé en utilisant des méthodes basées sur l'estimation du maximum d'amplitude de l'intercorrélation des signaux reçus [4, 5, 6]. Une technique permettant d'adapter ce principe pour des situations dans lesquelles il n'est pas possible d'exploiter la totalité du signal acquis, notamment dans les cas de la propagation des ondes dans un milieu très diffusant, a également été proposée [7]. Dans ce dernier cas, le temps de retard est estimé dans la toute première partie des signaux préalablement filtrés passe-bande en utilisant une intercorrélation à court-terme. Mais une telle méthode nécessite de connaître *a priori* la gamme de fréquences des signaux ce qui n'est pas toujours possible. Notamment, les quatre types d'évènements décrits précédemment ne présentent pas la même largeur de bande fréquentielle. De même, il est envisageable d'utiliser cette méthode pour la détection d'évènements d'autre nature comme les chocs par exemple.

La méthode décrite dans ce travail se propose donc de contourner cet inconvénient en appliquant l'intercorrélation à l'enveloppe du premier mode intrinsèque (Intrinsic Mode Function - IMF) d'une décomposition en mode empirique (Empirical Mode Decomposition - EMD). L'EMD est équivalente à une opération de filtrage dont les paramètres sont guidés par les données. L'intérêt majeur de cette

méthode est de s'adapter à de nombreuses situations différentes sans qu'il soit indispensable de connaître précisément la nature des signaux en terme d'occupation spectrale, et donc de prévoir des réglages particuliers.

2 Estimation du temps de retard

L'algorithme permettant l'estimation du temps de retard entre deux signaux de réception est mené en 5 étapes comme le montre la figure 1 :

- acquisition des signaux ;
- décomposition en modes empiriques ;
- détection d'enveloppe ;
- calcul de l'intercorrélation à court-terme ;
- recherche de la position temporelle du maximum de l'intercorrélation.

2.1 Acquisition des signaux

Dans une première étape, deux signaux, $s_1(t)$ et $s_2(t)$, sont enregistrés à partir de deux transducteurs piézoélectriques solidaires d'une plaque composite puis convertis à l'aide de convertisseurs analogique-numérique (CAN) à la fréquence $F_e = 5$ MHz. La détection des signaux est obtenue par la comparaison du niveau d'un des signaux, choisi comme référence, à un seuil prédéterminé. La figure 2 donne, à titre d'exemple, l'allure de deux signaux numériques, $s_1(k)$ et $s_2(k)$, obtenus dans la partie expérimentale qui sera décrite à la section 3. L'examen de la figure 2 permet de mettre en évidence une différence de temps d'arrivée entre les deux signaux de l'ordre de $70 \mu s$. Ce retard doit alors être estimé pour déterminer la position de la source d'émission acoustique.

2.2 Décomposition en modes empiriques

Le filtrage des signaux est assuré par une EMD dont le principe est expliqué en détail par Huang [8]. Cette étape permet de séparer les composantes hautes-fréquences des signaux acquis, supposées rendre compte des évènements d'EA, des composantes basses-fréquences, données par les IMFs d'ordre plus élevé, et considérées *a priori* comme issues de mouvements parasites et des modes naturels de la plaque. La figure 3 donne à titre d'exemple le résultat d'une EMD sur le signal $s_1(k)$ de la figure 2(a) et l'allure des 5 premières IMFs.

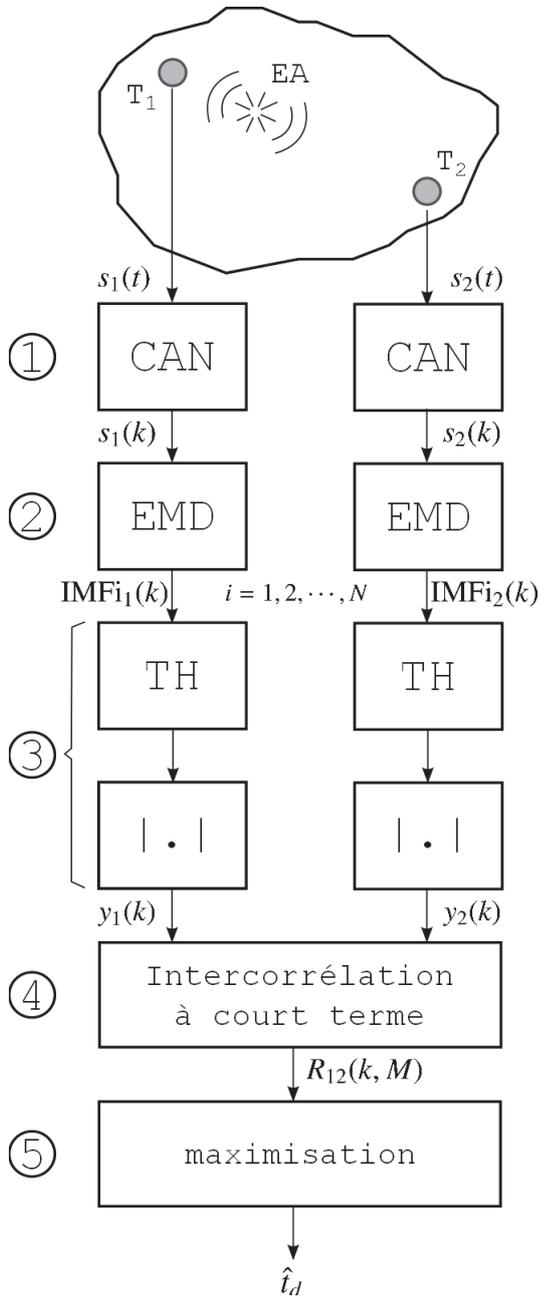


FIGURE 1 – Synoptique de l’algorithme d’estimation, en 5 étapes, du temps de retard entre deux signaux de réception.

2.3 Détection d’enveloppe

La détermination du temps de retard suppose de connaître le temps de propagation de groupe de chaque signaux, c’est-à-dire le délai entre les enveloppes des signaux. Ces enveloppes sont obtenues grâce l’estimation du module des signaux analytiques obtenus par transformée de Hilbert (TH). La figure 3(a) donne, à titre d’exemple, l’allure de l’enveloppe (en rouge) de la première IMF (IMF1) du signal de la figure 2(a). Les signaux alors obtenus et à considérer dans la suite des opérations sont alors $y_1(k)$ et $y_2(k)$.

2.4 Calcul de l’intercorrélacion à court-terme

Une manière simple pour estimer le temps de retard entre deux signaux consiste à estimer la valeur maximum

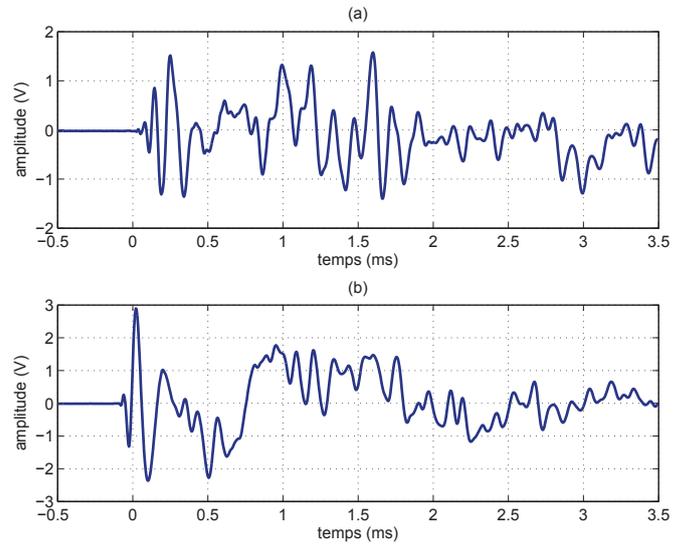


FIGURE 2 – Signaux $s_1(k)$ (a) et $s_2(k)$ (b) enregistrés à partir de deux transducteurs piézoélectriques.

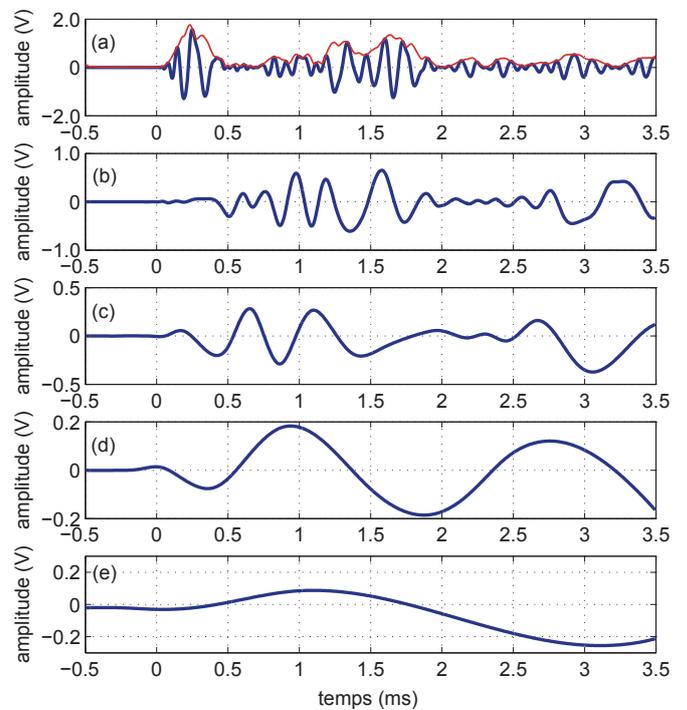


FIGURE 3 – Cinq premières IMFs du signal $s_1(k)$ de la figure 2(a) : IMF1 (a), IMF2 (b), IMF3 (c), IMF4 (d) et IMF5 (e).

de la corrélation entre l’un des signaux $y_1(k)$, choisi comme référence, et le second signal décalé dans le temps $y_2(k)$. Cependant, cette technique est bien adaptée au cas de signaux qui ne diffèrent que d’un décalage temporel et à un rapport d’amplitude près. Dans le cas de la propagation dans un milieu fortement diffusant seule la première partie des signaux, correspondant aux trajets directs et présentant des formes similaires, est facilement exploitable. L’intercorrélacion doit donc être calculée dans cette partie précoce des signaux. Cette zone temporelle des deux signaux est alors sélectionnée grâce à une fenêtre d’observation de M échantillons. De cette manière il est possible de faire varier

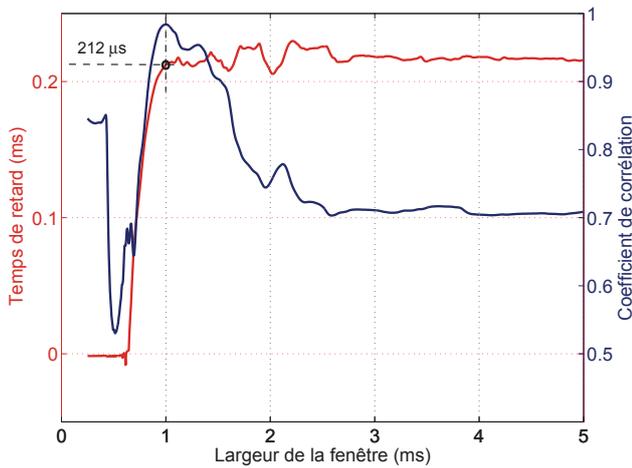


FIGURE 4 – Intercorrélation entre les signaux $y_1(k)$ et $y_2(k)$ (bleu) et temps de retard estimé (rouge) (position : \rightarrow -8 cm).

la largeur des signaux en agissant sur la valeur de M .

L'intercorrélation à court-terme normalisée est alors donnée par

$$R_{12}(k, M) = \begin{cases} \frac{\sum_{l=0}^{M-k-1} y_1(l) \cdot y_2(l+k)}{\sqrt{E_{y_1} E_{y_2}}} & \text{pour } 0 \leq k \leq M \\ \frac{\sum_{l=0}^{M+k-1} y_1(l-k) \cdot y_2(l)}{\sqrt{E_{y_1} E_{y_2}}} & \text{pour } -M \leq k \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Dans cette équation E_{y_1} and E_{y_2} représentent les énergie de $y_1(k)$ et de $y_2(k)$ respectivement, et M est la largeur temporel de la fenêtre d'observation des signaux à partir de laquelle l'intercorrélation est calculée.

2.5 Recherche de la position temporelle du maximum de l'intercorrélation

Enfin, le temps de retard entre les deux signaux est estimé par la recherche du maximum de l'intercorrélation, procédure donnée par

$$\hat{t}_d = \arg \max_{k, M} \{R_{12}(k, M)\}. \quad (2)$$

La prise de décision est faite lorsque l'intercorrélation normalisée atteint sa valeur maximale proche de l'unité. Ainsi, les deux signaux fenêtrés présentent des formes très proches (figure 4). La figure 4 donne, à titre d'exemple, la représentation de $R_{12}(k, M)$, l'intercorrélation entre $y_1(k)$ et $y_2(k)$. Cette fonction atteint sa valeur maximale, proche de 1, lorsque $MT_e = 1$ ms. La largeur temporelle de la fenêtre d'observation est alors optimale et le temps de retard est de l'ordre de $\hat{t}_d = 212 \mu s$.

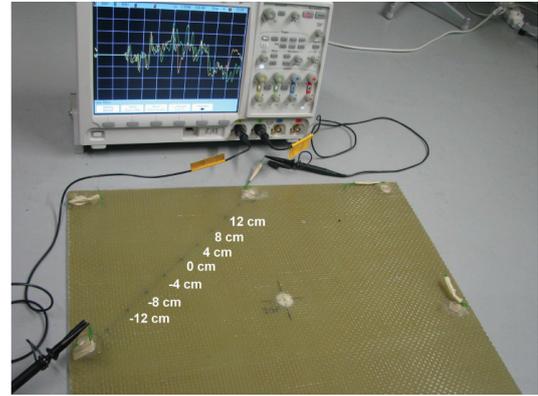


FIGURE 5 – Dispositif expérimental.

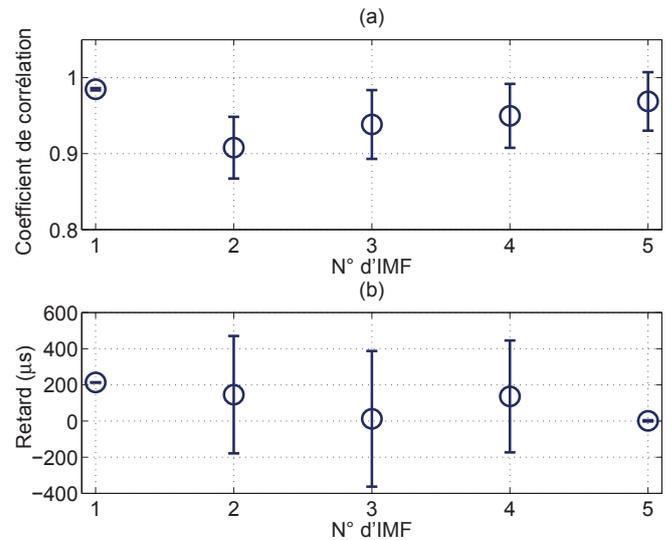


FIGURE 7 – Coefficients de corrélation maximaux (a) et temps de retard estimés correspondants (b) pour chacune des 5 IMFs - Les barres verticales donnent l'erreur à plus ou moins l'écart type (position : +12 cm).

3 Résultats et conclusions

De manière à vérifier les performances de la méthode, une plaque composite en fibre de verre/époxy a été équipée de 8 transducteurs piézoélectriques (Pz27) collés sur la structure elle-même. Par la suite, 7 positions, également réparties sur une droite passant par deux transducteurs espacés d'une distance de 39 cm, ont été définies comme le montre la figure 5. De manière à simuler des événements EA, la plaque a été soumise aux impacts d'une bille d'acier en chute libre. Compte-tenu de la masse de cette bille et de sa hauteur de chute, l'énergie des impacts peut-être estimée de l'ordre de 2 mJ. Pour chaque position, et sur chaque transducteur, 20 signaux ont été enregistrés. La figure 2 donne l'allure de ces signaux pour une distance de +4 cm.

Les résultats sont donnés par les figures 7, 6 et 8 : dans chacune de ces figures les cercles donnent, pour chaque position et chaque IMFs, la moyenne de l'estimation des temps de retard. L'examen de la figure 7 montre, pour une position donnée sur la plaque (+12 cm), qu'il convient de réaliser l'estimation du temps de retard sur la première IMF, i.e. l'IMF1 qui correspond aux composantes hautes-

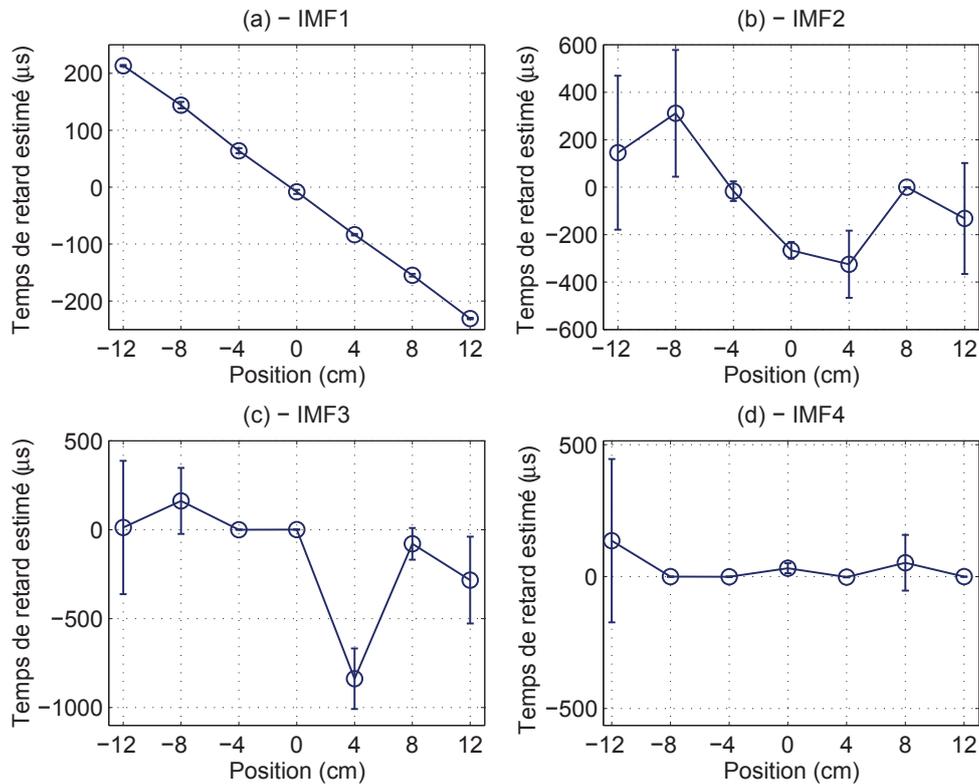


FIGURE 6 – Temps de retard estimés en fonction de la position pour les quatre premières IMFs.

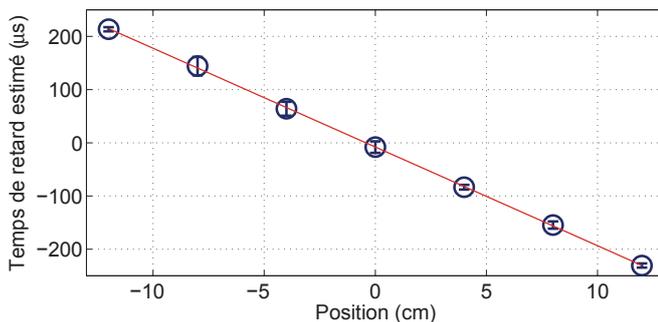


FIGURE 8 – Moyenne des retards en fonction de la position (bleu) et droite de regression (rouge) - Les barres verticales donnent l'erreur à plus ou moins trois fois l'écart type.

fréquences du signal. Dans ce cas, la valeur maximum de l'intercorrélacion des signaux est proche de 1, d'une part, et la moyenne des estimations du retard présentent une variance très faible (barre verticale), d'autre part. Par ailleurs, la figure 6 montre que seules des estimations portant sur les premières IMFs (IMF1) donnent des résultats cohérents et présentent une variance minimale. Cela est confirmé par la figure 8 qui reprend les résultats de la figure 6(a) : les points de mesure s'alignent sur une droite comme le suggère la droite rouge obtenue par une régression linéaire.

Après une procédure de calibration destinée à prendre en compte la vitesse de propagation des ondes, la méthode proposée doit permettre d'estimer de manière simple et robuste la position d'un évènement EA.

Références

- [1] A.G. Beattie, *Acoustic emission, principles and instrumentation*, Journal of Acoustic Emission, vol. 2, pp. 95-128. 1983.
- [2] E. Petitpas and D. Valentin, *Edge Effect on Unidirectional Composite Observed During Acoustic Emission Monitoring of Damage*, J. Mater. Sci. letters, vol. 11, pp. 63-66, 1992.
- [3] D.G. Eitzen, *Acoustic emission - Establishing the fundamentals*, J. Res. Nat. Bur. Stand., vol. 89, pp. 75-100, 1984.
- [4] Brent C. Kirkwood, *Acoustic Source Localization Using Time-Delay Estimation*, MSc Thesis, Technical University of Denmark, 2003.
- [5] Y. Zhang and W. H. Abdulla, *A Comparative Study of Time-Delay Estimation Techniques Using Microphone Arrays*, School of Engineering Report No. 619, The University of Auckland, New Zealand.
- [6] A. Joshua, M. Randolph, *Acoustic time delay estimation and sensor network self-localization : Experimental results*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 118, No2, p. 841-850, 2005.
- [7] A. Le Duff, S.E. Hamdi, G. Plantier, and B. Lascoup, *Time delay estimation for acoustic source location by means of short-time cross-correlation*, IEEE Sensors, pp. 1885 -1888, 2011.
- [8] N. E. Huang and S. P. Shen, *Hilbert-Huang Transform and Its Applications*, World Scientific Publishing Company, 2005.