

# Interférométrie par onde de coda : effet de la température sur la propagation d'ondes acoustiques dans une plaque d'aluminium

Eliane BALAA<sup>1</sup>, Alain LE DUFF<sup>2,3</sup>, Guy PLANTIER<sup>2,3</sup>, Rachid EL GUERJOUA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université Libanaise de la Faculté de Génie, Roumieh, Beyrouth, Liban

<sup>2</sup>Groupe Signal Image et Instrumentation (GSII),  
Groupe ESEO, 4 rue Merlet de la Boulaye, BP30629, 49009 Angers Cedex 01, France

<sup>3</sup>Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72085 LE MANS cedex 09, France

Eliane.Balaa@eseo.fr, alain.le\_duff@eseo.fr,  
guy.plantier@eseo.fr, Rachid.Elguerjouma@univ-lemans.fr

**Résumé** – Le travail présenté dans cet article consiste à tester la capacité de la technique d'interférométrie par onde de coda à évaluer les modifications de temps de parcours d'ondes acoustiques ultrasonores dans une plaque d'aluminium soumise à des changements de température. Ce travail emprunte une méthode fréquemment utilisée dans le domaine de la géophysique pour l'évaluer dans le cadre du contrôle non-destructif de matériaux. Cette technique semble être adaptée pour estimer, dans de bonnes conditions, les lois donnant, en fonction de la température, l'évolution des retards d'ondes acoustiques.

**Abstract** – The aim of this work is to evaluate the coda wave interferometry method in order to estimate velocity modification of ultrasound waves in aluminium alloys subjected to temperature changes. This work use, in a non-destructive testing context, a method which is commonly used in geophysics. This technique seems to be adapted to estimate the time-of-flight temperature dependance of acoustic waves.

## 1 Introduction

L'interférométrie par onde de coda, ou CWI (Coda Wave Interferometry), est une technique permettant l'observation, au cours du temps, de changements des conditions de propagation d'ondes acoustiques dans un médium dont les bases ont été posées par Aki [1, 2] au début des années 70. Cette méthode, est utilisée fréquemment dans le domaine de la géophysique pour la surveillance de l'activité sismique [3, 4]. Elle peut être envisagée en contrôle non-destructif (CND), des matériaux, comme le béton [5] ou l'aluminium par exemple [6] afin de détecter la présence de défauts dans une structure, par exemple. De manière à valider cette technique pour le CND, cet article propose d'évaluer la sensibilité de l'onde de coda à des modifications de température dans une plaque mince d'aluminium. Les résultats obtenus sont alors confrontés à un modèle théorique donnant l'évolution, en fonction de la température, des temps de parcours d'ondes ultra-sonores dans la plaque.

## 2 Principe de l'interférométrie de coda

Il est possible de modéliser la réponse impulsionnelle d'un milieu diffusant comme une somme de répliques d'un signal source  $e(t)$  correspondant à une succession de chemins  $C$  différents et indépendants [7]. Le signal de réception résultant,

$x_0(t)$ , est alors donné par l'équation de convolution [8]

$$x_0(t) = \sum_C e(t) * A_C \delta(t - t_C). \quad (1)$$

relation dans laquelle  $t_C$  est le temps de trajet de l'onde sur le chemin  $C$  et  $A_C$  l'amplitude correspondante. Malgré une apparence chaotique et aléatoire ce signal est reproductible, à condition toutefois que les conditions de propagation restent inchangées, c'est à dire que les propriétés physiques du matériau n'évoluent pas au cours du temps. Cependant, l'onde de coda est particulièrement sensible aux variations, même faibles, des conditions de propagation. Il est alors possible d'observer ces modifications dans le nouveau signal de réception

$$x_1(t) = \sum_C e(t) * A_C \delta(t - t_C - t_r) \quad (2)$$

où  $t_r$  représente la variation du temps de parcours de l'onde sur le chemin  $C$  due à la modification des conditions de propagation. La mesure de  $t_r$  permet alors d'estimer la nature de la modification subie par le milieu de propagation.

Deux phénomènes contribuent à la dépendance à la température des ondes diffuses dans l'aluminium. Le premier est la dilatation thermique de la structure qui a pour effet de modifier les longueurs des chemins de propagation. Le second est la dépendance vis à vis de la température des vitesses longitudinale  $c_l$  et de cisaillement  $c_s$ . Ces différents phénomènes ont alors pour conséquence de modifier les temps de parcours des

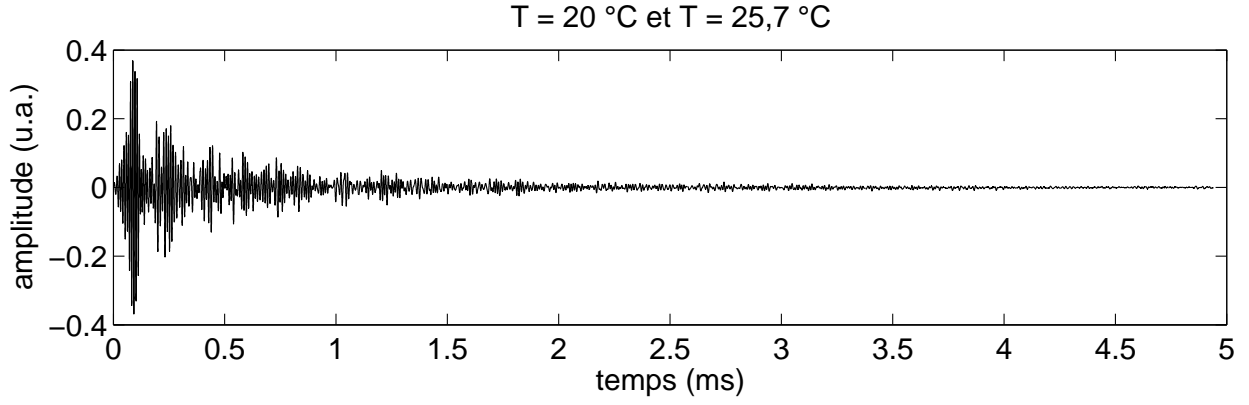


FIG. 1 – Signaux de coda :  $x_0(t)$  ( $T = 20^\circ\text{C}$ ) et  $x_1(t)$  ( $T = 25,7^\circ\text{C}$ ). NB : il n'est pas possible, sur cette figure, de distinguer les deux signaux.

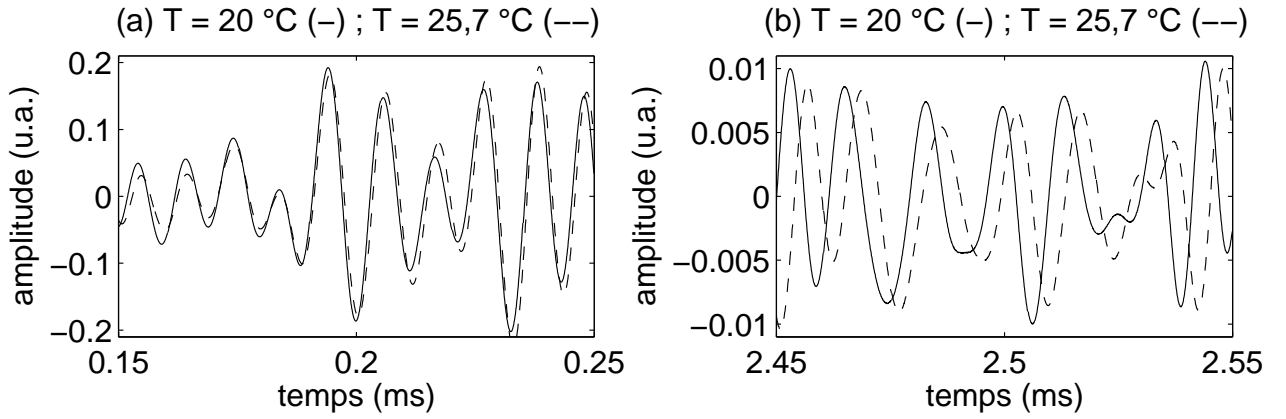


FIG. 2 – Signaux de coda (détails de la figure (1)) :  $x_0(t)$  ( $T = 20^\circ\text{C}$ ) et  $x_1(t)$  ( $T = 25,7^\circ\text{C}$ ). (a) fenêtre d'observation centrée sur 0,2 ms - (b) fenêtre d'observation centrée sur 2,5 ms.

ondes. Par ailleurs, les contributions respectives des ondes longitudinale et de cisaillement au champ diffus dans le matériau sont données par les coefficients  $1/(1+R)$  et  $R/(1+R)$  pour lesquels

$$R = 2 \left( \frac{c_l}{c_s} \right)^3$$

correspond au rapport entre l'énergie des ondes de cisaillement et longitudinale [9]. Le coefficient de dilatation temporel est donc donné par

$$K_T = \alpha + \frac{R}{1+R} \delta_s + \frac{1}{1+R} \delta_l \quad (^\circ\text{C}^{-1}). \quad (3)$$

Dans cette relation,  $\alpha$  est le coefficient de dilatation thermique,  $\delta_s$  et  $\delta_l$  représentant, quant à eux, les coefficients de dilatation temporelle en fonction de la température (liés aux variations relatives des vitesses des ondes longitudinale et de cisaillement). Il faut noter ici que dans le cas de l'aluminium le terme prépondérant est  $R\delta_s/(1+R)$ . Le coefficient  $K_T$  dépend alors principalement des variations de la vitesse de l'onde de cisaillement  $c_s$  liées aux changements de température. La loi donnant

le retard en fonction du temps est alors donnée par

$$t_r(t) = K_T(T - T_0) \cdot t \quad (4)$$

avec  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  la température de référence. La relation (4) fait donc apparaître une dépendance du retard  $t_r$  avec le temps  $t$ , phénomène illustré par la figure 2.

Une manière d'estimer la loi décrite par l'équation (4) consiste à déterminer la fonction d'intercorrélation à court terme des signaux de coda  $x_0(t)$  (signal de référence) et  $x_1(t)$  (signal de réception)

$$\hat{\varphi}_{x_0x_1}^{(\Delta)}(\tau, t) = \int_{t-\frac{\Delta}{2}}^{t+\frac{\Delta}{2}} x_0(t') \cdot x_1(t' + \tau) dt' \quad (5)$$

où  $\Delta$  et  $t$  représentent respectivement la largeur et le centre de la fenêtre glissante. L'estimation de la loi de retard est alors la solution du problème de maximisation

$$\hat{t}_r(t) = \arg \max_{\tau} \{ \hat{\varphi}_{x_0x_1}^{(\Delta)}(\tau, t) \}. \quad (6)$$

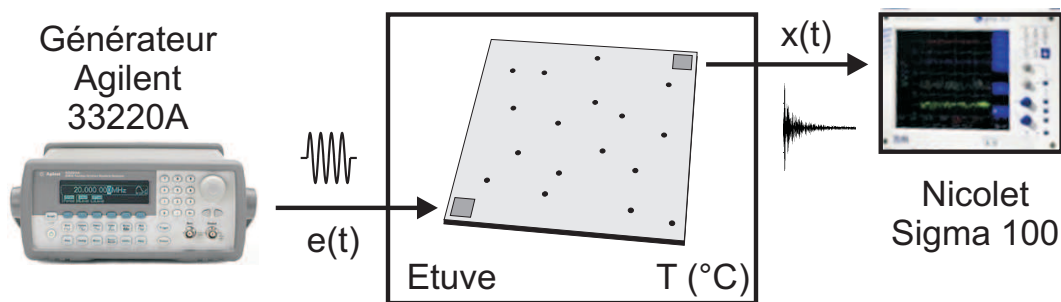


FIG. 3 – Dispositif Expérimental.

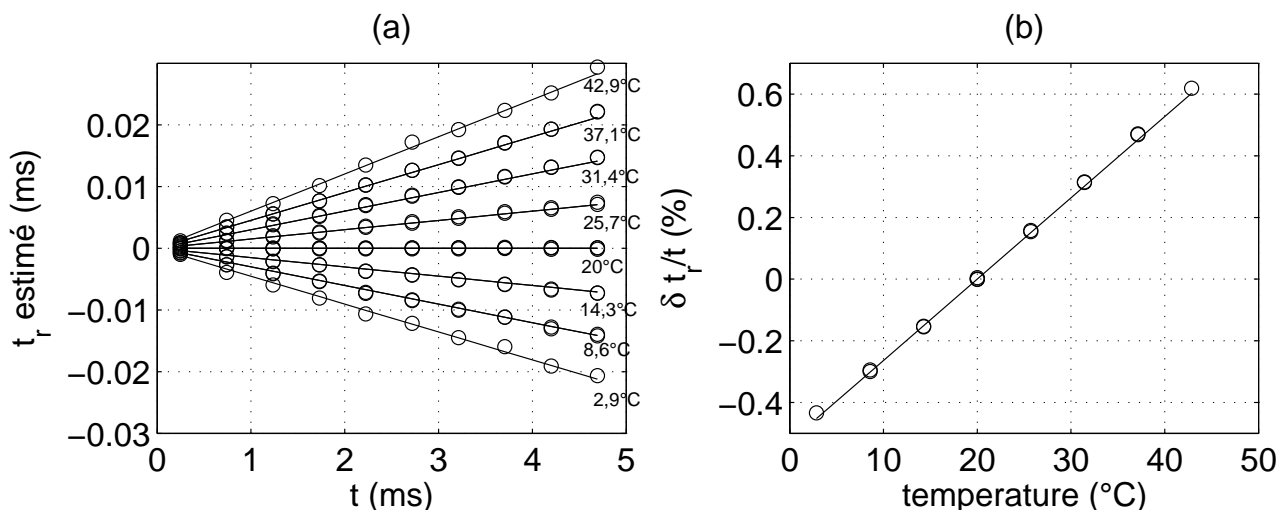


FIG. 4 – (a) Lois de retard estimées en fonction de la température ( $\circ$ ) et lois de retard théoriques (-). (b) Évolution des pentes des lois de retard estimées en fonction de la température ( $\circ$ ) et pente théorique ( $K_T(T - T_0)$ ) (-).

### 3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est décrit par la figure 3 : Une plaque d'aluminium 1050A de dimension 300 mm  $\times$  300 mm  $\times$  1 mm est placée dans une étuve. Le matériau utilisé présente les caractéristiques suivantes :

- $\alpha = 23,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ;
- $c_l = 6270 \text{ m/s}$  ;
- $c_s = 3080 \text{ m/s}$  ;
- $\delta_l = -1,74 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ;
- $\delta_s = -2,44 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Cela conduit à une valeur de

$$K_T \approx -2.64 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

De manière à favoriser la diffusion des ondes acoustiques, cette plaque est percée d'une vingtaine de trous distribués aléatoirement. Le dispositif accueille, par ailleurs, deux transducteurs piézoélectriques de type Pz27 et de dimension 50 mm  $\times$  25 mm, un pour l'émission, l'autre pour la réception. Un générateur de fonction Agilent 33220A fournit un signal d'excitation  $e(t)$  constitué de salves de 4 périodes de sinus de fréquence 100 kHz, répétées toutes les 20 ms. Un système d'acquisition Nicolet

Sigma 100 permet l'enregistrement de 100000 échantillons du signal de réception à une fréquence d'échantillonnage de 20 MHz. De manière à améliorer le rapport signal sur bruit le signal de réception, pour chaque température, est recueilli après un moyennage de 10 acquisitions.

La loi de retard, décrite par l'équation (4), est alors mesurée pour différentes températures comprises entre 2,9 °C et 42,9 °C par paliers de 5,7 °C, la température de référence étant de 20 °C. La fonction d'intercorrélation est calculée sur 10 intervalles sans recouvrement ce qui correspond à une largeur de la fenêtre d'analyse  $\Delta = 0,5 \text{ ms}$ . De manière à s'assurer qu'il n'existe pas de comportement hystérétique, les températures dans l'étuve sont programmées dans l'ordre suivant :

$T = [20 \ 25,7 \ 31,4 \ 37,1 \ 42,9 \ 37,1 \ 31,4 \ 25,7 \ 20 \ 14,3 \ 8,6 \ 2,9 \ 8,6 \ 14,3 \ 20] \text{ } (^\circ\text{C})$ .

### 4 Résultats et conclusion

La figure 4 (a) montre, en fonction de la température  $T$ , l'allure des différentes lois de retard (mesurées à l'aide de la fonc-

tion d'intercorrélation (5) et son optimisation (6)), et théoriques (obtenues grâce à la relation (4)). Il est également possible de représenter l'évolution de la pente de ces droites en fonction de la température  $T$  et de les comparer au terme  $K_T(T - T_0)$  de la relation (4). La figure 4 (b) montre qu'il existe un bon accord entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées des retards en fonction de la température. Ce travail doit malgré tout être complété par une étude de la précision des estimations.

Ce travail expérimental a permis d'aboutir à des résultats préliminaires qui montrent l'intérêt d'utiliser la CWI pour évaluer les effets de la température sur les ondes diffuses dans une plaque d'aluminium. Ces effets étant connus, il est maintenant envisageable d'utiliser cette méthode pour détecter la présence de défauts ou de changements dans une structure. À terme, les auteurs de ce travail envisagent d'appliquer la CWI à l'évaluation de défauts dans des plaques en matériaux composites.

## Références

- [1] Aki, K., Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, *J. Geophys. Res.*, 74, 6215-6231, 1969.
- [2] Aki, K., and B. Chouet, Origin of coda waves : Source, attenuation, and scattering effects, *J. Geophys. Res.*, 80, 3322-3342, 1975.
- [3] C. Pacheco, and B. Chouet, CWP-459 Localizing change with Coda Wave Interferometry : Derivation and validation of the sensitivity kernel.
- [4] A. Grêt, Time-lapse Monitoring with Coda Wave Interferometry, Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 2004.
- [5] C. Payan, Etude du potentiel de l'acoustique non linéaire pour le suivi de l'endommagement du béton, Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée, 2007.
- [6] Lobkis, Oleg I. and Weaver, Coda-Wave Interferometry in Finite Solids : Recovery of  $P$ -to- $S$  Conversion Rates in an Elastodynamic Billiard, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 90, n° 25, pp. 254302, 2003.
- [7] E. Larose, Diffusion multiple des ondes sismiques et expériences analogiques en ultrasons, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2005.
- [8] R. Snieder, The theory of coda wave interferometry, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 163, n° 2-3, pp. 455-473, 2006.
- [9] R.L. Weaver, On diffuse waves in solid media, *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 71, n° 6, pp. 1608-1609, 1982.