

# Etude de la propagation guidée des ondes ultrasonores dans les structures tri-couche planes. Application au contrôle ultrasonore non destructif de la qualité de collage des tôles.

B. BOUGAZE <sup>(1\*)</sup>, M. SIDKI <sup>(2\*)</sup>

\* Equipe d'Acoustique et de Vibration, Département de Physique, Faculté des Sciences, BP 20 Route Ben Maâchou 24000 El Jadida, Maroc.

<sup>(1)</sup> bougaizen@hotmail.com

<sup>(2)</sup> sidkimouncif@hotmail.com

## 1. Introduction :

Dans l'industrie des transports (aéronautique, aérospatial, automobile,...) le collage remplace de plus en plus le rivetage, le vissage et le soudage. Il est indispensable de disposer de moyen fiable et économique de surveiller l'état de l'assemblage collé à divers stades de son utilisation, tant que possible sans le dégrader pour des raisons évidentes de coût de fabrication.

L'utilisation des ondes ultrasonores guidées comme moyen de contrôle passe inéluctablement par l'étude et la compréhension de la propagation guidée de ces ondes dans les structures tri-couches. La littérature scientifique est abondante en articles sur ce sujet.

Lowe et Cawley [1] ont montré que les ondes de Lamb sont fortement sensibles aux propriétés mécaniques et épaisseurs des adhérents mais restent insensibles aux propriétés de la couche de colle. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Nagy et Adler [2]. Heller [3] combine la technique laser de génération des ondes ultrasonores à la transformée de Fourier bidimensionnelle (2D-FFT) pour déterminer expérimentalement les courbes de dispersion d'une structure tri-couche (deux tôles d'aluminium liées avec une couche de colle) et une structure bi-couche (la même couche de colle adhérente à l'une des tôles d'aluminium). Les résultats obtenus montrent que les modes mesurés dans les deux structures sont identiques à ceux d'une des tôles d'aluminium seule.

Seifried [4] combine le modèle analytique, la méthode des éléments finis et des mesures expérimentales pour une meilleure compréhension de la propagation des ondes guidées dans une structure tri-couche constituée de deux tôles d'aluminium liées par une couche de colle. Les éléments recherchés dans ce travail sont le réseau de dispersion, le champ des déplacements et les courbes d'atténuation.

Les travaux de recherche que nous présentons ici s'inscrivent dans la même optique de compréhension de la propagation ultrasonore dans une structure tri-couche modélisant deux tôles d'aluminium liées par une couche de colle en résine époxy. Par une résolution précise de l'équation caractéristique, nous déterminons le réseau de dispersion de la structure et proposons une nouvelle interprétation de ce réseau. Nous déterminons, par la suite, le champ des déplacements et analysons la répartition de l'énergie ultrasonore dans les éléments de la structure. Enfin, nous étudions la possibilité de caractérisation de la qualité de collage des tôles à partir du réseau de dispersion de la structure. La modélisation mathématique de la qualité de collage est faite selon les conditions aux interfaces définies par Pilarski [5].

## 2. Méthode et résultats :

La solution de l'équation de propagation des ondes ultrasonores dans la structure tri-couche est recherchée en termes de potentiels scalaire et vectoriel. Les constantes d'intégration intervenant dans ces potentiels sont déterminées à partir des conditions aux limites suivantes :

- sur les faces libres de la structure, les contraintes normales et tangentielles sont nulles.

- aux interfaces tôles-colle (cas d'un contact parfait), il y a continuité des déplacements et des contraintes.

Ces conditions conduisent à un système d'équations homogène écrit sous la forme matricielle :  $[A] [C] = [0]$ .  $[A]$  est une matrice 12x12 fonction des propriétés géométriques et mécaniques de la structure, de la fréquence d'excitation  $f$  et du nombre d'onde  $k$ .  $[C]$  est un vecteur dont les composantes sont les 12 constantes d'intégration.

L'équation caractéristique (ou de dispersion) i.e.  $\det[A]=0$  est résolue numériquement pour en déterminer les racines  $k$  (nombres d'onde) et leur évolution en fonction de la fréquence  $f$  : réseau de dispersion. Cette étape délicate et cruciale est conduite de la manière suivante :

Deux programmes sont élaborés; le premier (programme iso-contours) est utilisé pour obtenir une première impression des courbes de dispersion sans gaspiller beaucoup de temps dans un calcul intensif, de grande précision des racines de l'équation caractéristique (figure 1). Le résultat de ce programme est ensuite exploité par un deuxième programme permettant d'obtenir, avec grande précision, le réseau de dispersion (figure 2). La technique numérique utilisée est basée sur la méthode de la bisection combinée à une procédure d'interpolation.

La structure tri-couche étudiée ici est constituée de deux tôles d'aluminium liées par une couche de colle en résine époxy. Les propriétés géométriques et mécaniques de la structure sont données sur le tableau ci-dessous :

Matériau	Epaisseur (mm)	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Vitesse longitudinale (m/s)	Vitesse Transversale (m/s)
Aluminium	0.9398	2700	6450	3100
Colle	0.25	1106	771	370

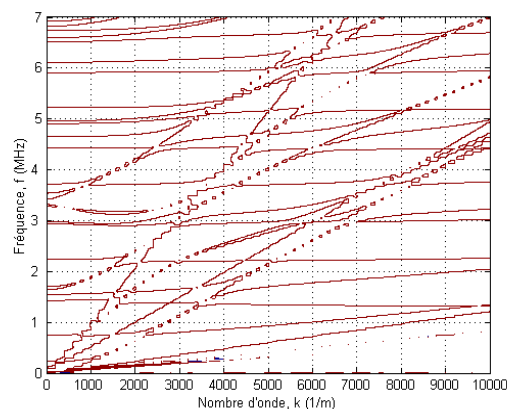
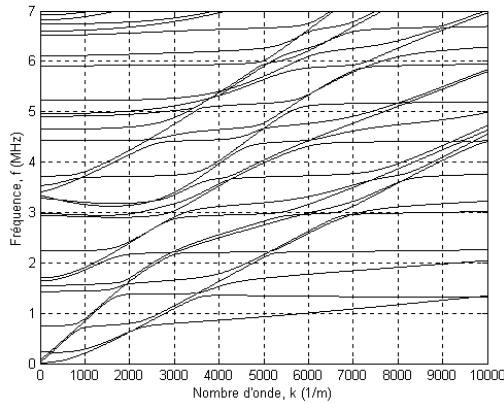


Figure 1 : Première impression des courbes de dispersion (AL/C/AL)

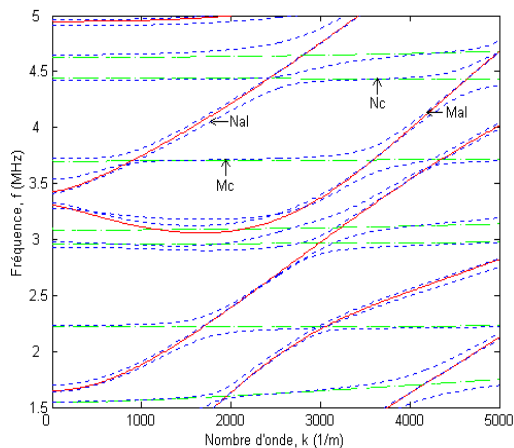
$$\Delta f = 500 \text{ Hz et } \Delta k = 200 \text{ m}^{-1}.$$



**Figure 2 :** les courbes de dispersion raffinée (AL/C/AL)  $\Delta f = 500 \text{ Hz}$  et  $\Delta k = 20 \text{ m}^{-1}$ .

Nous présentons sur la figure.3, un zoom de la superposition artificielle, sur la gamme de fréquence de 1.5-5 MHz et la gamme de nombre d'onde de 0-5 000 $\text{m}^{-1}$ , de trois réseaux de dispersion :

- tôle d'aluminium seule (courbes en trait plein)
- couche de colle seule (courbes en tirets)
- structure tri-couche (courbes en trait pointillé).



**Figure 3 :** la superposition des trois réseaux

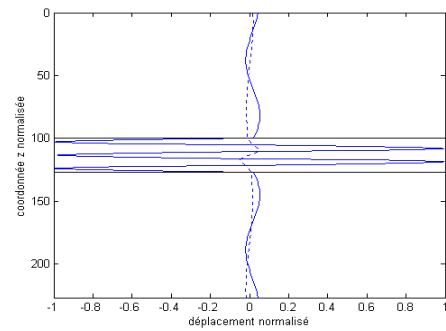
Nous mettons ainsi en évidence que chaque mode de la structure tri-couche se compose de portions qui suivent des modes d'une tôle d'aluminium seule et d'autres (quasi horizontales) qui suivent des modes de la couche de colle seule.

Pour étudier la répartition énergétique des modes de dispersion dans la structure, le champ des déplacements est déterminé via le calcul des vecteurs propres de la matrice [A].

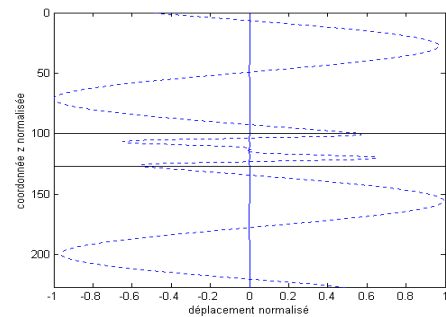
La figure 4 présente les composantes longitudinale ( $u_x$ ) et transversale ( $u_z$ ) du déplacement correspondantes à deux paires ( $f, k$ ) sur le même mode identifiées sur la figure 3. l'axe des ordonnées représente l'épaisseur de la structure tri-couche normalisée à l'épaisseur de la tôle d'aluminium. L'axe des abscisses représente les déplacements normalisés.

La figure.4a montre que le mode  $M_c$  pris de la partie qui suit le mode de la couche de colle seule, se propage principalement dans la couche de colle et il n'y a pratiquement aucun déplacement appréciable dans les tôles d'aluminium. Par contre la figure.4b montre que le mode  $M_{al}$  pris de la partie longeant le mode de la tôle

d'aluminium seule, se propage de manière prépondérante dans les tôles d'aluminium. Le même constat est à faire lorsque l'on considère les deux points  $N_c$  et  $N_{al}$ .



(a) Point  $M_c$



(b) Point  $M_{al}$

**Figure 4:** les champs de déplacement pour les deux paires ( $f, k$ ) identifiées sur la figure.3.

- Trait en pointillé ----- déplacement transversale  $u_z$
- Trait plein ----- déplacement longitudinale  $u_x$

Pour étudier l'influence du contact (aluminium/colle et colle/aluminium) sur les courbes de dispersion, nous introduisons les conditions de continuité aux interfaces définies par Pilarski [5] :

- Continuité des contraintes de part et d'autre des interfaces :  $T_{ZZ}^+ = T_{ZZ}^-$  ;  $T_{XZ}^+ = T_{XZ}^-$
- Relation de proportionnalité entre les contraintes et la différence des composantes du déplacement de part et d'autre de l'interface :

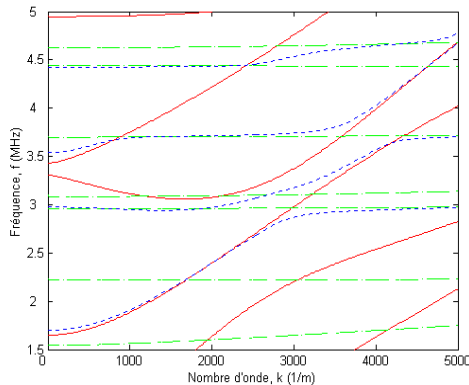
$$T_{ZZ}^+ = P_N (U_Z^+ - U_Z^-) ; T_{XZ}^+ = P_T (U_X^+ - U_X^-)$$

Le contact parfait du système étudié dans cette recherche est obtenu numériquement lorsqu'on donne aux paramètres  $P_N$  et  $P_T$  qui caractérisent l'interface la valeur  $10^{17} \text{ N.m}^{-3}$  (figures 2,3).

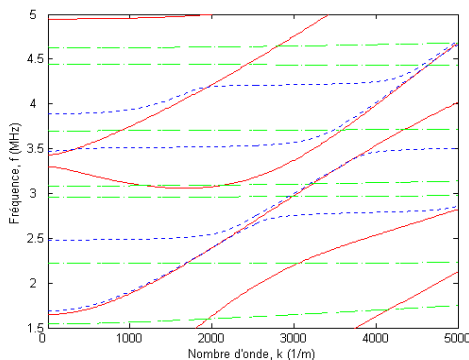
Les figures 5,6,7,8,9 présentent les quatre courbes choisies du modèle tri-couche pour différentes valeurs de  $P_N$  et  $P_T$ . Les autres modes évoluent de la même manière.

Au fur et à mesure de la diminution de la qualité de collage i.e. diminution des valeurs de  $P_N$  et  $P_T$ , les portions quasi horizontales qui suivaient les modes d'une couche de colle glissent vers les basses fréquences en accusant soit un rétrécissement soit un élargissement. Pour les valeurs des paramètres de Pilarski inférieures à  $1.5 \cdot 10^{12}$ , les modes qui suivaient les modes d'une tôle d'aluminium commencent à disparaître. A la valeur  $10^{11}$ , Seules les portions quasi horizontales restent et s'alignent avec les mêmes portions des autres courbes (le reste des courbes de

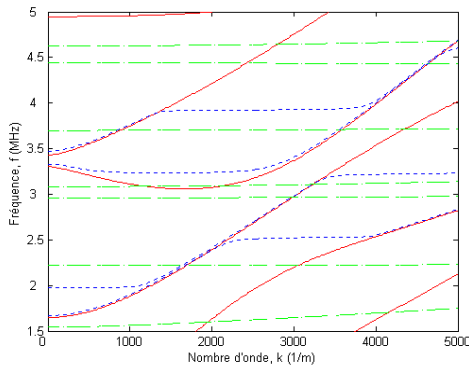
dispersion de la structure tri-couche non choisies) pour donner exactement les modes prévus pour une couche de colle (la figure 9).



**Figure 5:**  $P_N=P_T=10^{17}N.m^{-3}$  (contact parfait)

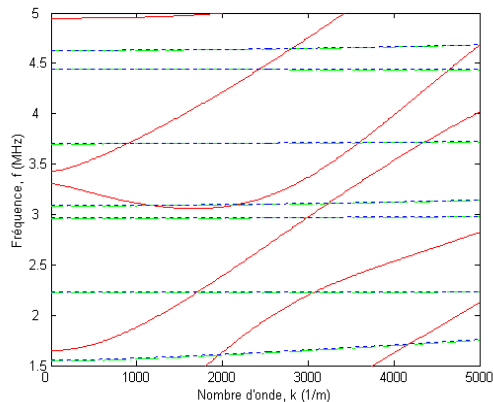


**Figure 6:**  $P_N=P_T=2.10^{13}N.m^{-3}$



**Figure 7:**  $P_N=P_T=5.10^{12}N.m^{-3}$

**Figure 8:**  $P_N=P_T=1.5 \cdot 10^{12}N.m^{-3}$



**Figure 9:**  $P_N=P_T=1.10^{11}N.m^{-3}$ .

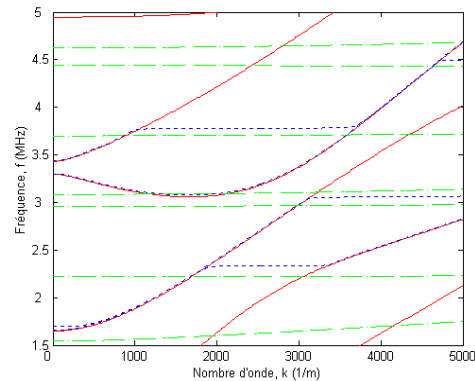
### 3. Conclusion :

Par une résolution numérique précise de l'équation caractéristique, les courbes de dispersion d'une structure tri-couche composée de deux tôles d'aluminium collées ont été déterminées. Ces courbes mettent en évidence l'existence, pour chaque mode de la structure tri-couche, de portions qui suivent des modes d'une tôle d'aluminium seule et d'autres (quasi horizontales) qui suivent des modes de la couche de colle seule.

Par ailleurs, la détermination du champ des déplacements dans la structure a montré que la répartition énergétique de l'onde ultrasonore est confinée à la couche de colle lorsque le mode de propagation est situé dans la portion qui suit le mode de la couche de colle seule et elle est prépondérante dans la couche d'aluminium si le mode est situé dans la portion qui suit le mode de la tôle d'aluminium seule.

Enfin, l'impact de la qualité de contact entre les tôles d'aluminium sur les courbes de dispersion de la structure tri-couche a été étudié. L'analyse et l'interprétation de l'évolution progressive, du contact parfait au décollement total, de ces courbes a permis de dégager des critères de caractérisation de la qualité de collage.

### Références :



[1] Lowe

MJS, Cawley P. The applicability of plate wave techniques for inspection of adhesive and diffusion bonded joints. J Nondestruct Eval 1994; 13(4): 185-200.

[2] Nagy PB, Adler L. Nondestructive evaluation of adhesive joints by guided waves. J Appl Phys 1989; 66(10): 4658-63.

[3] Heller K, Jacobs LJ, Qu J. Characterization of adhesive bond properties using lamb waves. NDT E Int 2000;33:555-63.

[4] Seifried Robert, Jacobs LT, Qu J. Propagation of guided waves in adhesive bonded components. NDT E Int 2002; 35:317-28.

[5] A. Pilarski, J. L. Rose, K. Balasubramaniam. J. Acoust. Soc. Am. 87(2), 532-542, 1990.