

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Caractérisation rhéologique de divers collages ; interprétation des résultats expérimentaux

Naïma Alaoui Ismaïli⁽¹⁾, Mounsif Echcherif Elkettani⁽³⁾, Driss Chenouni⁽¹⁾, Zakhia Lakhlaï⁽²⁾, Bruno Morvan⁽³⁾,
Martine Rousseau⁽⁴⁾, Jean-Louis. Izbicki⁽³⁾.

(1) Laboratoire d'électronique signaux -systèmes et d'informatique B.P.: 1796 Atlas Fès Maroc

(2) Ecole Supérieure de Technologie de Fès B.P.2427 Route d'Immouzer Fès Maroc

(3) Laboratoire Ondes et Milieux complexes, Université du Havre, FRE CNRS 3102
Place Robert Schuman, B.P. 4008, 76610 Le Havre France

(4) Institut Jean Le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie, UMR CNRS 7190, 4 Place Jussieu 75252 Paris Cedex 05

L'étude des ondes guidées de type Lamb dans une structure A/C/A où A est une plaque d'aluminium et C désigne une fine couche de colle supposée isotrope, a fait l'objet de nombreux travaux. Il s'agit ici, dans le cadre du modèle de Jones, de caractériser les constantes de Jones pour des colles dont les propriétés sont variables à cause de l'ajout de graisse. Le problème direct est d'abord résolu afin de déterminer la sensibilité des modes aux constantes de Jones. La détermination expérimentale des courbes de dispersion des ondes guidées permet l'obtention des constantes du modèle de Jones à partir de la résolution du problème inverse. La comparaison des résultats obtenus montre la grande sensibilité des constantes de raideur par rapport la qualité de la colle. Un modèle est présenté afin d'interpréter les résultats expérimentaux obtenus.

1 Introduction

Le collage structural trouve de plus en plus sa place parmi les méthodes d'assemblage. Il améliore la performance globale des assemblages, optimise la définition des structures, permet souvent de simplifier les processus industriels. Il s'adapte à tous les secteurs d'activité (haute technologie, ameublement, bâtiment, carrosserie industrielle, construction aéronautique, automobile,.....)[1-5]. Pour caractériser et contrôler la qualité de l'adhésion au niveau des interfaces collées, nous avons choisi de travailler dans le cadre du modèle de Jones. Il s'agit d'un modèle rhéologique utilisant deux constantes, dites paramètres de Jones, si on considère que la couche de colle est isotrope.

Le modèle de Jones modélise la couche d'adhésif par une interface géométrique avec une répartition surfacique de ressorts travaillant en traction/compression et en cisaillement. Les conditions aux interfaces sont celles données par Jones et Whittier en 1967. Les résonances de la structure dépendent alors des deux constantes de raideur.

La présente étude, consiste à déterminer les paramètres de Jones en utilisant les caractéristiques des modes de Lamb se propageant dans la structure. Il s'agit de traiter le problème inverse c'est-à-dire qu'à partir des données expérimentales concernant les caractéristiques des modes propagatifs, on détermine les paramètres de Jones. La méthode proposée se base sur la résolution de l'équation caractéristique des ondes de Lamb dans le cadre du modèle de Jones. Les expériences sont effectuées sur un ensemble d'échantillons où la colle est mélangée avec de la graisse à des taux variés, pour dégrader la qualité d'adhésion. Le but étant de voir l'évolution des paramètres de Jones (obtenus par résolution du problème inverse), avec le pourcentage de graisse présente dans la colle.

La première partie de ce travail traite le problème direct et la sensibilité des modes aux constantes rhéologiques.

Dans la deuxième partie on résout le problème inverse par une méthode simple et rapide. La méthode de résolution problème inverse a été appliquée à plusieurs structures collées [6-9]. Les résultats obtenus montrent la grande sensibilité des constantes de raideur par rapport à la qualité de la colle.

Dans la dernière partie de ce travail on présente un modèle afin d'interpréter les résultats expérimentaux obtenus.

2 Etude théorique (Problème direct)

2.1 Equation de dispersion

Dans ce paragraphe, nous considérons la structure bicouche composée de deux plaques élastiques (couches P1 et P3). La couche P_2 est modélisée par la surface géométrique $z = 0$, et le processus d'adhésion par deux distributions surfaciques de ressorts travaillant en traction/compression et en cisaillement avec des constantes de raideur, par unité de surface, notées respectivement K_L et K_T , comme le montre la figure 1:

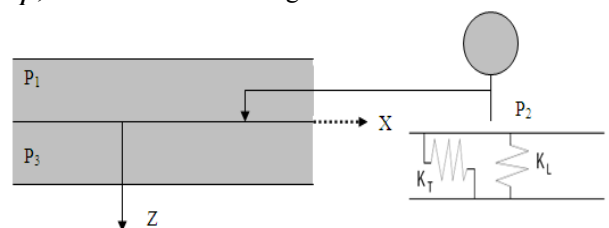


Figure 1 : Géométrie de la structure métal/adhésif/métal.

Les deux couches (P1, P3) sont supposées homogènes, isotropes et parfaitement élastiques, elles sont caractérisées par leur épaisseur ($2h_1$, $2h_3$), leur masses volumiques (ρ_1 , ρ_3), les vitesses de propagation des ondes transversales (c_{T1} , c_{T3}) et les vitesses de propagation des ondes longitudinales (c_{L1} , c_{L3}).

En $z = 0$, les conditions de sauts en déplacement au niveau de l'interface collée sont données par Jones et Whittier [6] et ont été utilisées par un certain nombre d'auteurs, notamment Rokhlin [7] et Drinkwater [8] :

$$\begin{cases} \sigma_{xz1} = \sigma_{xz3} = K_T [u_x] \\ \sigma_{zz1} = \sigma_{zz3} = K_L [u_z] \end{cases}$$

En ce qui concerne les interfaces $z = -2h_1$ et $z = -2h_3$, les conditions aux limites sont des conditions de surface libre, c'est-à-dire que les composantes σ_{xz} et σ_{zz} sont nulles.

L'ensemble de ces conditions nous permet d'obtenir l'équation de dispersion de la structure collée.

La résolution de cette équation se fait par une méthode de minimisation basée sur l'algorithme de Newton-Raphson, connaissant au préalable les constantes physiques caractéristiques de la structure.

Un exemple de courbes de dispersion (fréquence, nombre d'onde) des premiers modes de Lamb pour la structure collée Verre/Verre est donné sur la figure 2.

Les paramètres élastiques d'une plaque de verre sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Plaque	ρ (kg/m^3)	c_L (m/s)	c_T (m/s)
Verre	2490	5825	3485

Table1: paramètres élastiques de la plaque de verre

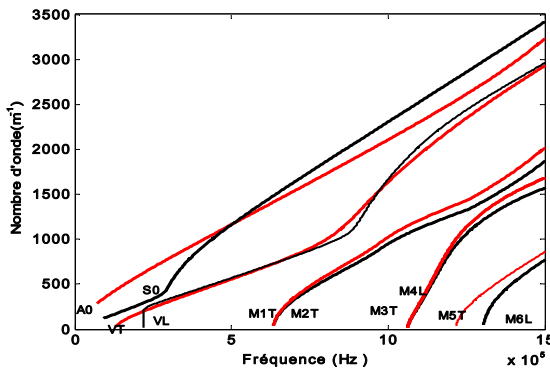


Figure 2: Courbes de dispersion pour $K_T = 8.13 \cdot 10^{10}$ et $K_L = 2 \cdot 10^{11}$.

2.2 Résumé Influence des constantes de raideur K_L et K_T sur les fréquences de résonance.

Pour étudier l'influence de la constante de raideur K_L sur les fréquences de résonance, nous fixons la constante de raideur K_T et faisons varier K_L dans le domaine $[10^{10}, 10^{15}]$. Les résultats sont présentés pour

$K_T = 10^{13}$ et $\bar{k}_x = 0.19$ ou $\bar{k}_x = \frac{k_x}{k_e}$ et c_e représente la vitesse des ondes acoustiques dans l'eau, prise égale à 1500m/s. La figure 3 montre l'évolution des fréquences de résonances en fonction de la variation de $\text{Log}_{10}(K_L)$.

Les modes V_L , M_{2T} et M_{3T} sont très sensibles à la variation de la constante de raideur K_L dans la structure bicouche Verre/Verre où la couche d'adhésif est modélisée par le modèle de Jones. Les autres modes présentent une sensibilité plus faible.

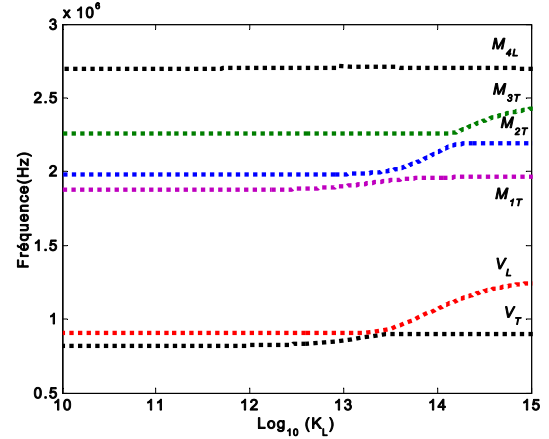


Figure 3 : Evolution des fréquences de résonances en fonction de $\text{Log}_{10}(K_L)$.

Nous fixons la constante de raideur $K_L = 10^{12}$ et nous étudions l'évolution des fréquences de résonance avec le deuxième paramètre K_T . Le domaine de variation de K_T est $[10^{10}, 10^{15}]$.

L'étude de la sensibilité des modes guidés à la variation de la constante de raideur K_T montre que les modes les plus sensibles sont V_L , V_T , M_{1T} et M_{2T} .

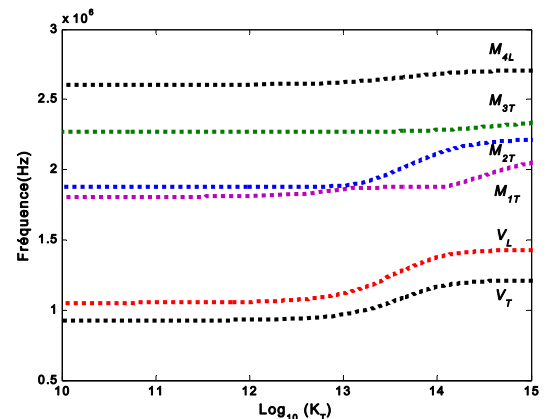


Figure 4 : Evolution des fréquences de résonances en fonction de $\text{Log}_{10}(K_T)$.

Les résultats de simulation de la sensibilité des modes guidés à la variation des constantes de raideur ont une importance capitale pour la résolution du problème inverse. D'après les études précédentes ce sont les modes verticaux qui sont les « bons » modes en vue de résoudre le problème inverse.

3 Méthode adoptée pour la résolution du problème inverse.

Le but est de déterminer les constantes de raideur K_L et K_T dans une structure bicouche Verre/Verre, cette méthode est basée sur la résolution inverse de l'équation caractéristique de la structure bicouche, en y injectant les valeurs du nombre d'onde et de la fréquence comme données du problème pour obtenir les paramètres de raideur K_L et K_T qui minimisent cette équation. Pour cela, on définit un tableau bidimensionnel dont les éléments sont les paramètres mécaniques (K_L, K_T) . Pour chaque couple (nombre d'onde : k_x , fréquence : f) d'un mode de Lamb, nous cherchons le minimum de la valeur que prend l'équation caractéristique des modes de Lamb, le couple (K_L, K_T) donnant cette valeur minimale est la solution de cette équation. Nous obtenons ainsi pour chaque mode un ensemble de solutions dont on calcule la valeur moyenne K_{Lmoy} et K_{Tmoy} , ainsi que l'écart type σ_L et σ_T . Le critère suivant est alors imposé : si le rapport écart type divisé par la valeur moyenne est inférieur à 3% de la valeur moyenne, alors la bonne solution est estimée obtenue. Autrement, l'intervalle des solutions initiales est réduit aux valeurs incluses dans un intervalle de $K_{Lmoy, Tmoy} \pm 3/2 \sigma_{L, T}$ autour de la valeur moyenne, puis la nouvelle valeur moyenne ainsi que l'écart type sont déterminés à nouveau, et ainsi de suite... Cette méthode a ainsi permis de retrouver les mêmes valeurs de K_L et K_T utilisées dans la résolution du problème direct, et nous l'adoptons donc pour l'appliquer sur le traitement des résultats expérimentaux.

4 Etude expérimentale

Nous avons fabriqué quatre assemblages verre/adhésif/verre avec des caractéristiques différentes. Le premier collage est considéré comme étant parfait car la colle ne contient pas de graisse. Pour les autres structures, la colle est mélangée avec de la graisse avec des taux variés. Le taux de graisse est le rapport entre la masse de graisse et la masse de colle. A priori, plus il y a de graisse et moins bonne est l'adhésion. Les caractéristiques des quatre assemblages, notés A₁, A₂, A₃, A₄, sont reportées dans le tableau 2.

Assemblage	$2h(mm)$	$d(mm)$	Taux de graisse
verre/colle/verre	3	0.5	0%
			25%
			50%
			75%

Table2: caractéristiques des quatre assemblages

Notre méthode est alors appliquée sur les différentes mesures expérimentales obtenues. Le tableau 3 présente les variations des constantes de raideur obtenues en fonction du taux de graisse.

Taux de graisse Constantes de raideur	0%	25%	50%	75%
K_L	$1.58 \cdot 10^{13}$	$4.61 \cdot 10^{12}$	$1.74 \cdot 10^{10}$	$4.32 \cdot 10^9$
K_T	$1.42 \cdot 10^{13}$	$5.67 \cdot 10^{12}$	$1.42 \cdot 10^{10}$	$5.54 \cdot 10^9$

Table3: les constantes de raideur en fonction du taux de graisse

Après avoir estimé les paramètres K_L et K_T à partir des mesures expérimentales, nous vérifions que nous retrouvons bien les courbes de dispersion expérimentales avec ces valeurs de K_L et K_T : nous réinjectons ces vitesses dans l'équation caractéristique afin de d'obtenir les courbes de dispersion. Un exemple de ces courbes est alors représenté en traits continus blanc et rouge sur la figure 5. Nous retrouvons donc bien les courbes de dispersion expérimentales.

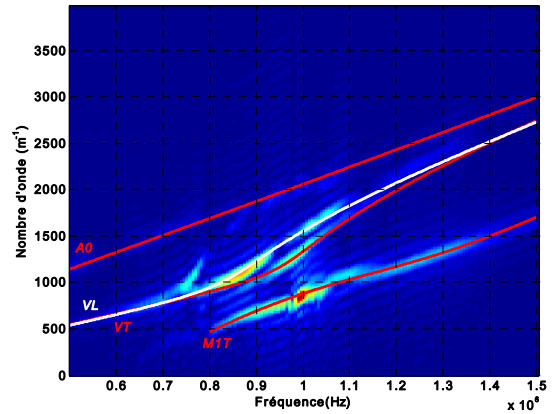


Figure 5: Courbes de dispersion expérimentales et calculées avec les paramètres estimés d'une structure Verre/adhésif/Verre : taux de la graisse 50%.

5 Interprétation des résultats expérimentaux.

Dans cette section, nous présentons un modèle tri couche utilisé pour calculer l'évolution, pour un mélange de graisse et colle donnés, du mode vertical transversal en fonction de la fréquence. Cela nous permet d'interpréter les résultats expérimentaux obtenus. Un modèle classique utilisé en physique des matériaux fournit une valeur pour la vitesse de propagation c_T des ondes transversales en fonction du taux de graisse. Comme il s'agit d'analyser les résultats concernant le mode vertical il n'a pas été jugé utile de modifier la valeur de la célérité longitudinale.

5.1 Modèle tri couche

On prend comme valeur de c_T de l'adhésif l'expression suivante :

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu_{\text{colle}} \mu_{\text{graisse}}}{(p\mu_{\text{colle}} + (1-p)\mu_{\text{graisse}})(p\rho_{\text{graisse}} + (1-p)\rho_{\text{colle}})}}$$

Avec $\mu_{colle} = \rho_{colle} (c_T)^2_{colle}$ et $\mu_{graisse} = \rho_{graisse} (c_T)^2_{graisse}$, p étant les proportions 25%, 50% et 75%.

Les paramètres de la graisse mesurés expérimentalement sur un échantillon massif sont les suivants : $c_{Lgraisse}=1117$ m/s $c_{Tgraisse}=506$ m/s $\rho_{graisse}=1107\text{kg/m}^3$. et pour la colle : $c_{Lcolle}=2590$ m/s , $\rho_{colle}=1160\text{ kg/m}^3$.

Ces paramètres de la graisse et de la colle seront réinjectés dans l'expression donnant la vitesse de propagation c_T des ondes transversales. Le tableau 4 représente les valeurs de vitesse de propagation en fonction de la proportion de graisse p.

proportion p	25%	75%
c_T (m/s)	836	568

Table4: Les vitesses c_T du mélange colle+graisse en fonction du taux de graisse

A partir du tableau précédent nous réinjectons la valeur de la vitesse de propagation c_T dans l'équation de dispersion d'une structure tricoche de type plaque elastique/adhesif/plaque elastique dont le contact est parfait.

Pour chaque proportion de graisse, nous recalculons la courbe du mode vertical transversal que nous traçons sur la figure qui représente les courbes de dispersions expérimentales.

Les résultats recalculés sont donnés dans les figures 6 et 7. On constate une bonne superposition avec les résultats expérimentaux pour un pourcentage de graisse de 25%, contrairement au cas du pourcentage de graisse de 75%, pour lequel une divergence est observée.

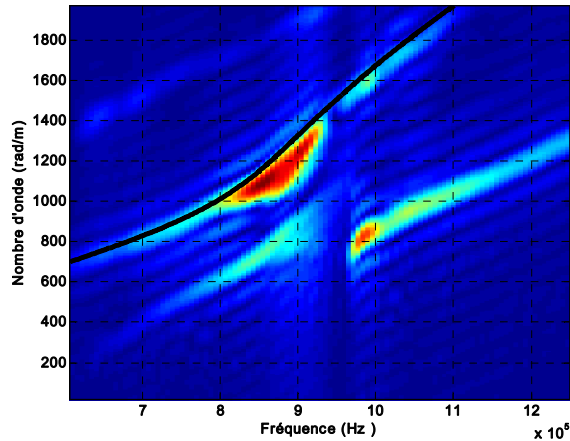


Figure 6: Courbes de dispersion expérimentales et calculées avec les paramètres estimés d'une structure Verre/adhésif/Verre : taux de la graisse 25%.

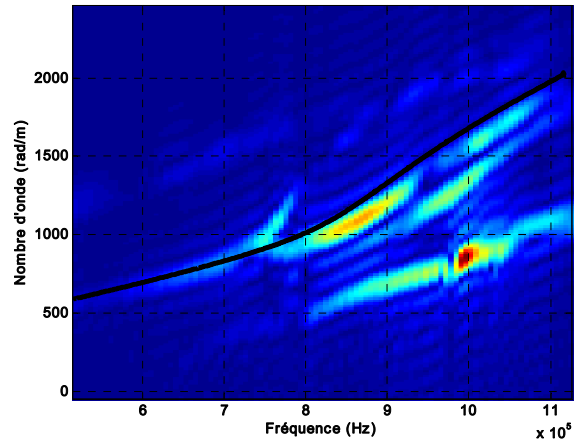


Figure 7: Courbes de dispersion expérimentales et calculées avec les paramètres estimés d'une structure Verre/adhésif/Verre : taux de la graisse 75%.

Comme le montre la figure 7 le modèle tricoche avec contact parfait entre les couches n'est plus satisfaisant pour un pourcentage de graisse de 75%. La divergence pour des pourcentages de graisse de l'ordre de 75% vient du fait de la condition d'interface. Pour cela, les conditions de contact parfait seront remplacés par un délaminage : $u_z = 0$, et $\sigma_{xz} = 0$ dans le métal et dans l'adhésif au niveau du contact.

La figure 8 représente les résultats de simulation avec les nouvelles conditions d'interface relatives au cas de délaminage. Nous remarquons alors un très bon accord entre les courbes de dispersion expérimentales et recalculées.

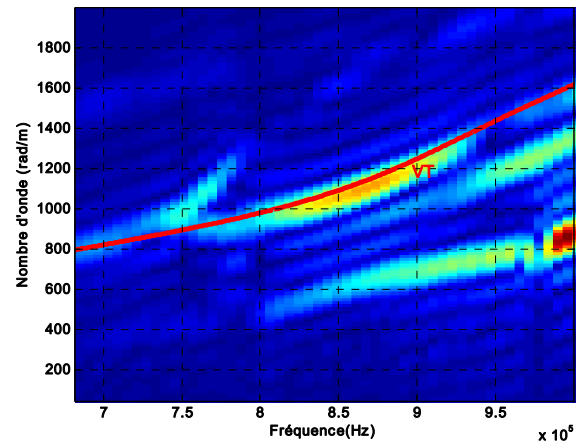


Figure 8: Courbes de dispersion expérimentales et calculées avec les paramètres estimés d'une structure Verre/adhésif/Verre : taux de la graisse 75%.

Conclusion

Dans ce travail les résultats des mesures expérimentales ont été utilisés pour caractériser la qualité de la colle, à partir de l'estimation des constantes de raideur (dans le cadre du modèle de Jones) pour une structure composée de deux plaques élastiques homogènes et isotropes collées.

Quatre types d'assemblages ont été testés afin d'examiner l'influence du taux de la graisse sur la qualité du collage. Les résultats des simulations comparés avec les

résultats expérimentaux montrent l'efficacité de notre méthode de résolution du problème inverse.

Références

- [1] Franklin H, Rousseau M, "Influence des condition de collage sur l'existence d'ondes d'interface entre deux solides élastiques", J. Acustica, 80,147-155 (1994).
- [2] Thompson R. B, Thompson D. O, "Past experiences in the development of tests for adhesive bond strength", 5(8), 583-99 (1991).
- [3] Tiwari A, Henneke II E. et J. Duke. "Acousto-ultrasonic technique for adhesive bond quality", Journal of Adhesion, 34, 1-15 (1991).
- [4] De Barros S, Gama A.L, Rousseau M et Collet B, "Characterization of bonded plates with Lamb and SH waves using a quasi-static approximation", Latin American Journal of Solids and Structures. 1 (4), 379–399 (2004).
- [5] Heller K, Jacobs L.J, Qu J, "Characterization of adhesive bond properties using Lamb waves", NDT&E International; 33, 555-563 (2000).
- [6] Alaoui Ismaili N, Chenouni D, Lakhliai, Echcherif Elkettani M, Izbicki J-L, Morvan B, "Determination of Epoxy Film Parameters in a Tri-Layer Metal/Adhesive/Metal Structure", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 56, 1955-1959, no. 9 (2009).
- [7] Alaoui Ismaili N, Chenouni D, Lakhliai, Echcherif Elkettani M, Izbicki J-L, Morvan B, "Inverse problem to determine an epoxy film parameters in a three layer metal/adhesive/metal structure", Acoustics 08, (2008).
- [8] Alaoui Ismaili N, Chenouni D, Lakhliai, Echcherif Elkettani M, Izbicki J-L, Morvan B. Morvan, "détermination des paramètres élastiques d'un matériau par problème inverse", Méditerranéen Des Télécommunications Et Exposition, 272-275 (2008).
- [9] Jones J. P, Whittier J. S, "Waves at flexibly bonded interface", J. Appl. Mech, 905-908 (1967).
- [10] Rohklin S. I, Wang Y. J, "Analysis of boundary conditions for elastic wave interaction with an interface between two solids", J. Acoust. Soc. Am, 89(2), 503-515 (1991).
- [11] Drinkwater B, Dwyer-Joyce R. S, Cawley P, "A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid-solid interface". Proc. Roy. Soc. Lond. A 452, 2613-2628 (1996).