Modélisation des faisceaux ultrasonores réfléchis et transmis par une plaque composite

Catherine POTEL[1-2], Aziz Ur-REHMAN1[3], Jean-François de Belleval[1]

En raison de leurs bonnes propriétés mécaniques pour une faible masse, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés, notamment dans l'industrie aéronautique. De manière générale, les matériaux composites auxquels nous allons nous intéresser dans toute la suite de l'article sont des stratifiés à fibres de Carbone, noyées dans une matrice en résine époxy.

Introduction

Les fibres sont constituées par des centaines ou milliers de filaments de tergal ou de rayonne oxydés à chaud, puis chauffés pour qu'il ne reste plus que des atomes de Carbone [1]. Ces fibres sont de plus orientées suivant une même direction de l'espace : l'assemblage est donc unidirectionnel. Un assemblage de fibres s'appelle un renfort, et l'ensemble du renfort et de la matrice constitue ce que l'on appelle un ***pli*** dont l'épaisseur, dans ce type de matériau, est de l'ordre de 0.13 mm. Les propriétés mécaniques de chaque pli dépendant de la direction suivant laquelle on le sollicite, il est donc ***anisotrope***. A l'échelle macroscopique, ce pli peut être considéré comme homogène et transversalement isotrope dans un plan perpendiculaire à l'axe des fibres. La superposition de plusieurs plis, avec des orientations propres à chacun, constitue un ***stratifié***. Un empilement courant est celui où l'orientation des fibres de chaque pli est à 45° de celle du pli précédent (voir figure 1). La cellule de base est donc constituée d'un empilement de quatre plis. Un tel composite est noté $[0°/45°/90°/135°]_P$ où P est le nombre de répétitions de la cellule de base, encore appelée "supercouche". D'autres empilements sont possibles, comme celui où chaque pli est à 90° du précédent (voir figure 1).

Ce type de stratifié est très utilisé dans l'industrie aéronautique (caissons de voilure, d'empennage, de fuselage, biellos, ...) et il est nécessaire de vérifier d'une part sa bonne fabrication (bonne adhérence entre les plis, empilement correct, absence de porosités ou de bulles...), et d'autre part sa bonne tenue lors de son utilisation (rupture de fibres, délaminage, impact...). Parmi les méthodes existantes de contrôle non destructif, les techniques ultrasonores sont très utilisées pour contrôler ce type de matériaux. Si ces techniques sont souvent bien maîtrisées en ce qui concerne les matériaux isotropes, il n'en est pas de même, surtout pour des incidences obliques, pour les matériaux anisotropes et qui plus est multicouches. Le contrôle et l'évaluation non des-

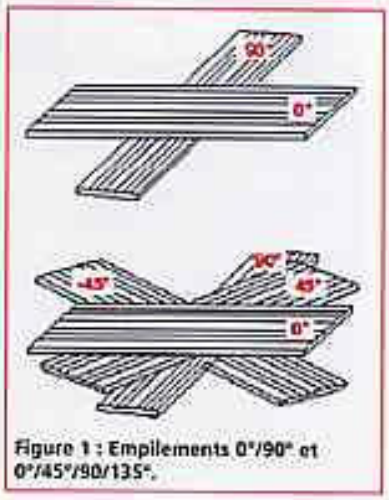

Figure 1 : Empilements 0°/90° et 0°/45°/90/135°.

(1) Université de Technologie de Compiègne, LGmS, UPRES ass. CNRS 6066, BP 20529, 60 205 COMPIEGNE Cedex e-mail : Catherine.Potel@utc.fr
(2) Université de Picardie Jules Verne, IUT de l'Aisne, Département GGP de Soissons
(3) actuellement Division of Engineering Mechanics, School of Mechanical & Production Engineering, Nanyang Technological University, Nanyang Avenue, Singapore 639697

tructifs de ces matériaux par ultrasons nécessite donc à la fois une bonne connaissance de la propagation des ondes ultrasonores à l'intérieur de chaque pli du composite [2] et la prise en compte de la géométrie du transducteur. En effet, lorsque l'on étudie la réflexion et la transmission d'un faisceau ultrasonore à travers une plaque, il faut prendre en compte la nature bornée de ce faisceau, et non plus supposer les ondes comme étant planes. Par ailleurs, la nécessité d'employer un milieu de couplage entre le transducteur ultrasonore et le milieu à étudier conduit généralement à plonger ce dernier dans l'eau. On considère donc ici un transducteur plan ou focalisé, excité par un signal monochromatique, immergé dans un fluide.

Le but de l'étude est de déterminer le champ réfléchi dans un plan symétrique du plan source par rapport à la normale à l'interface, et le champ transmis dans un plan parallèle au plan source (voir figure 2). Parmi les méthodes qui existent pour traiter ce genre de problème [3-8], nous allons utiliser celle du ***spectre angulaire d'ondes planes*** [9] pour tenir compte de la propagation du faisceau ultrasonore dans le fluide et de la transmission à travers la structure multicouche.

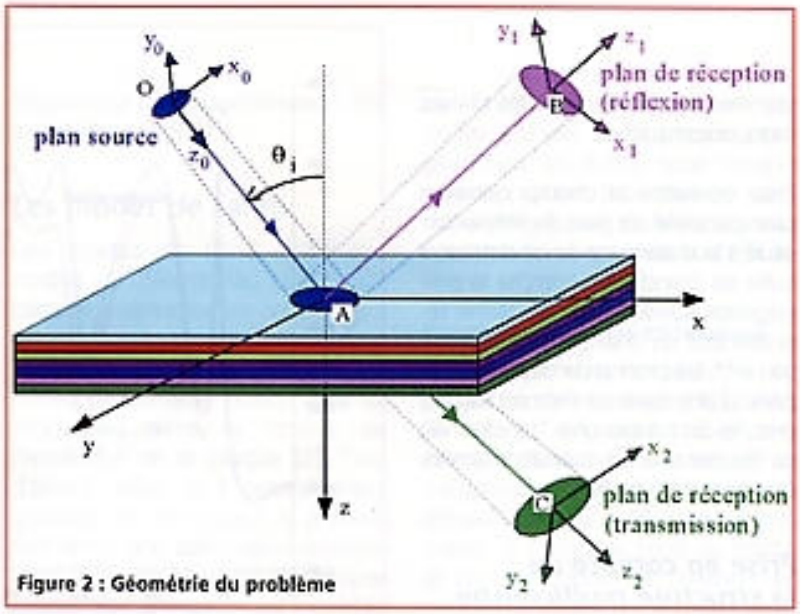

Figure 2 : Géométrie du problème

Principes théoriques

Géométrie du problème

De manière générale, on considère une plaque multicouche plongée dans un fluide, dont le matériau constituant chaque couche peut être ***anisotrope***, d'orientation et d'épaisseur quelconques. L'absorption, c'est-à-dire la manière dont le matériau atténue l'amplitude des ondes lors de leur propagation est également prise en compte. L'empilement des couches peut être périodique ou non. Dans le premier cas, une cellule de base du matériau est répétée un certain de nombre de fois, soit P fois. Comme on l'a vu dans l'Introduction, un empilement courant est celui où l'orientation des fibres de chaque pli est à 45° de celle du pli précédent. Un tel composite est noté $[0°/45°/90/135]_P$ où P est le nombre de répétitions de la cellule de base, encore appelée "supercouche" (voir figure 1).

Lorsque l'on étudie la réflexion et la transmission d'un faisceau ultrasonore à travers ce genre de plaque, il faut prendre en compte la nature bornée de ce faisceau, alors que la modélisation mathématique en ondes planes monochromatiques suppose des ondes d'extension infinie dans l'espace. On considère ici un transducteur plan ou focalisé, excité par un signal monochromatique, immergé dans un fluide. Le déplacement particulaire est supposé connu dans le plan de la face avant du transducteur (ou à son voisinage). La normale à ce plan fait un angle θ_i avec la normale aux interfaces de la plaque.

Comme on l'a vu dans l'Introduction, le but de l'étude est de déterminer le champ réfléchi dans un plan symétrique du plan source par rapport à la normale à l'interface, et le champ transmis dans un plan parallèle au plan source (voir figure 2) Parmi les méthodes qui existent pour traiter ce genre de problème, (on peut citer des méthodes d'intégration numérique ou encore des méthodes asymptotiques développées autour des angles pour lesquels une onde de Rayleigh se propage [3-8]), le formalisme utilisé ici est celui du ***spectre angulaire d'ondes planes*** [9] pour tenir compte de la propagation du faisceau ultrasonore dans le fluide et de la transmission à travers la structure multicouche. Une fois le champ décomposé en ondes planes, la méthode des matrices de transfert est utilisée pour obtenir la réflexion et réfraction d'une onde plane monochromatique par la structure.

Principe du spectre angulaire en régime monochromatique

Un champ acoustique, ici le vecteur déplacement particulaire, est supposé connu dans un plan de référence. Dans la pratique ce plan est celui de la face avant du transducteur ou de son voisinage (voir figure 3). Au moyen d'une transformée de Fourier, que l'on effectue numériquement grâce à une FFT, ce champ peut être exprimé ›

comme une somme d'ondes planes monochromatiques.

Pour connaître le champ dans un plan parallèle au plan de référence, situé à la distance z de ce dernier, il suffit de prendre en compte la propagation suivant z par un terme représentatif du changement de phase : e^{-jkz}. Le champ de déplacement particulaire dans ce même plan est ensuite donné par une Transformée de Fourier inverse, calculée numériquement par une FFT.

Prise en compte de la structure multicouche

Coefficients de réflexion et de transmission en ondes planes

On vient de voir comment le champ de déplacement particulaire peut être ***décomposé*** en ***ondes planes monochromatiques*** de pulsation ω. Il faut donc maintenant, pour chacune de ces ondes, connaître la réponse de la structure multicouche. Pour cela, nous avons développé un modèle qui utilise la ***méthode des matrices de transfert*** [10]. Cette méthode consiste à multiplier entre elles les matrices de propagation de chaque couche constituant le multicouche. L'état acoustique étant décrit par six grandeurs, ces matrices sont toutes d'ordre 6, et la matrice de transfert de tout le multicouche sera donc également d'ordre 6, quel que soit le nombre des couches. La matrice de propagation de chaque couche s'obtient en écrivant les conditions aux limites à l'interface séparant deux couches successives, c'est-à-dire l'égalité des déplacements et des contraintes particulaires. L'état acoustique du matériau à une interface est donc connu dès lors que l'on connaît celui à une interface précédente. De proche en proche, il est alors facile d'obtenir la matrice de transfert du multicouche complet. Il ne reste plus ensuite qu'à écrire les conditions aux limites aux interfaces extrêmes de la plaque, et à résoudre un système linéaire dont deux des huit inconnues sont le ***coefficient de réflexion*** R et le ***coefficient de transmission*** T [11].

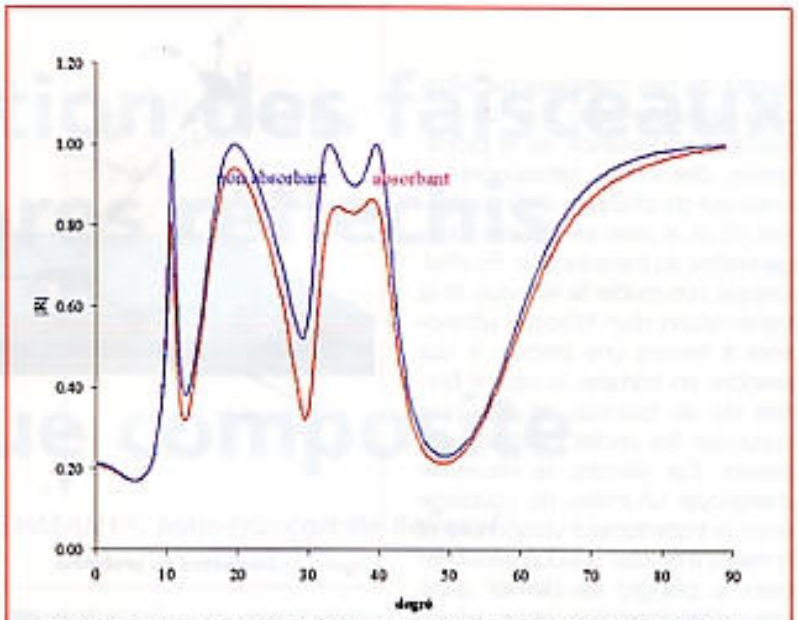

Figure 3 : Modules des coefficients de réflexion en ondes planes pour une plaque composite en carbone/époxyde [0°/45°/90°/135°]$_s$ plongée dans l'eau, en fonction de l'angle d'incidence, pour une fréquence égale à 3 MHz. Courbe bleue : le milieu est considéré comme non absorbant. Courbe rouge : le milieu est absorbant.

Champs réfléchis et transmis

Chaque onde plane monochromatique subit un changement de phase lorsqu'elle parcourt la distance OAB (pour le cas de la réflexion, voir figure 2) ou la distance OAC (pour le cas de la transmission). Il suffit ensuite de combiner tous les termes correspondant d'une part à la décomposition du champ dans un plan de référence comme on l'a vu au § A-2, et d'autre part à la structure multicouche et au changement de phase subi par l'onde, pour obtenir les champs de déplacement particulaires dans le plan de réception, soit pour les champs réfléchis, soit pour les champs transmis [12].

Principe du calcul

Le principe du calcul est donc le suivant :

① Le déplacement particulaire est simulé suivant le plan du transducteur par une expression analytique. Des mesures expérimentales prenant en compte un transducteur réel peuvent également être utilisées, ce qui permet de simuler entièrement une expérience.

② Ce champ est décomposé en ondes planes dont on connaît la propagation, et l'on en déduit les angles d'incidence de chaque onde plane monochromatique.

③ Pour chaque onde plane oblique monochromatique, les coefficients de réflexion et de transmission sont calculés par la méthode des matrices de transfert.

④ Une FFT permet ensuite de revenir au domaine spatial, ce qui permet de reconstituer le champ de déplacement dans un plan de réception correspondant au champ réfléchi ou transmis.

Nous avons développé un logiciel correspondant à ce formalisme, qui

a été validé sur des cas simples. Nous allons voir dans la suite quelques résultats sur des plaques multicouches immergées.

Interaction de faisceaux ultrasonores avec des plaques multicouches immergées

On considère des plaques composites en Carbone/Epoxyde, immergées dans l'eau, de séquences 0°/90° ou 0°/45°/90°/135° (voir figure 1), dont les matériaux constituant les couches peuvent être considérés comme absorbants ou non. Chaque pli peut être assimilé à une couche homogène transversalement isotrope. Dans le cadre de la propagation des ondes, ce type de milieu peut être représenté par un milieu de classe hexagonale [2], dont l'axe d'ordre 6 est parallèle aux fibres. Dans ce type de milieu, la loi de Hooke généralisée fait intervenir cinq constantes élastiques indépendantes, notées $c_{\alpha\beta}$. Pour rendre compte de l'atténuation dans les matériaux, ces constantes sont complexes.

Les paragraphes suivants présentent quelques résultats pour des configurations particulières. Un premier cas intéressant à étudier est celui de la propagation des ***modes de Lamb*** (§ B-1) qui sont des modes de plaque. Lorsque l'épaisseur de la plaque augmente, son comportement, suivant la fréquence de contrôle, peut être assimilé à celui d'un milieu périodique semi-infini, et certains modes particuliers que nous avons appelés ***"modes de Rayleigh multicouches"*** se propagent alors (§ B-2). Par ailleurs, il est important de connaître l'évolution des champs réfléchis et/ou transmis lors d'une modification d'empilement (§ B-3), et d'approfondir la notion de validité de l'hypothèse d'homogénéisation des composites (§ B-4).

Les modes de Lamb

Les modes de Lamb sont des modes de plaque qui présentent certains avantages par rapport aux autres types d'ondes élastiques comme les ondes de volume et les ondes de surface, puisqu'elles se propagent dans la totalité de l'épaisseur de la plaque [2]. Tout d'abord, elles sont naturellement guidées par une plaque et présentent donc une atténuation relativement faible au cours de leur propagation. Par ailleurs, il est possible de choisir des modes pour lesquels il n'y a pas de zone morte dans l'épaisseur de la tôle. Enfin, la présence d'un défaut modifiant la propagation de ces ondes, un déplacement sur une ligne permet de contrôler toute une surface [13].

Obtention des modes de Lamb

Les modes de Lamb se propagent dans une plaque entourée de vide. Lorsque cette plaque est plongée dans un fluide, on appelle ces modes "modes de Lamb généralisés". Le terme anglais est "leaky Lamb waves" pour bien signifier qu'il y a une fuite d'énergie dans le fluide. L'écriture des conditions aux limites pour une structure *vide/plaque/vide*, conduit à l'annulation d'un déterminant. La recherche des nombres d'onde annulant le déterminant permet ainsi d'obtenir les courbes de dispersion des modes de Lamb. Dans le cas d'une plaque homogène isotrope, des expressions analytiques permettent d'obtenir ces courbes, mais ce n'est plus le cas lorsque le milieu est anisotrope, et encore moins lorsque le milieu est multicouche anisotrope. On est alors obligé d'utiliser un modèle tel que le nôtre. Une autre manière d'obtenir les courbes de dispersion des modes de Lamb est de rechercher les minima du module du coefficient de réflexion (en ondes planes) de la plaque plongée dans un fluide, sous réserve que le rapport des masses volumiques du fluide et des matériaux constituant les couches soit très inférieur à l'unité.

Faisceaux réfléchis et transmis

A titre d'exemple, considérons une plaque en carbone/époxyde [0°/45°/90°/135°]$_s$, d'épaisseur 0.45 mm, plongée dans l'eau, excitée par un transducteur plan de fréquence nominale égale à 3 MHz et de diamètre 12.7 mm. Le tracé du module du coefficient de réflexion en ondes planes en fonction de l'angle d'incidence (voir figure 3), présente des minima correspondant aux modes de Lamb, et l'on va particulièrement s'intéresser au mode apparaissant pour une incidence égale à 12°. Le profil réfléchi de la figure 4-a) montre le déplacement latéral du faisceau (en l'absence de déplacement, il devrait être centré sur zéro) tandis que le profil transmis de la figure 4-b) montre un élargissement du faisceau dû à l'onde de Lamb qui se propage dans la plaque en rayonnant de l'énergie au cours de sa propagation.

Voyons maintenant le comportement du matériau lors de la propagation d'ondes de surface que nous avons appelées *"ondes de Rayleigh multicouche"*.

Les modes de Rayleich multicouche

Rappels théoriques en ondes planes

Nous avons mis en évidence des ondes analogues aux ondes de Rayleigh, mais qui ont des propriétés particulières : les *"ondes de Rayleigh multicouche"*. Ces ondes se propagent à la surface d'un milieu multicouche périodique semi-infini, l'interface supérieure étant en contact avec le vide. Dans les mi- ▸

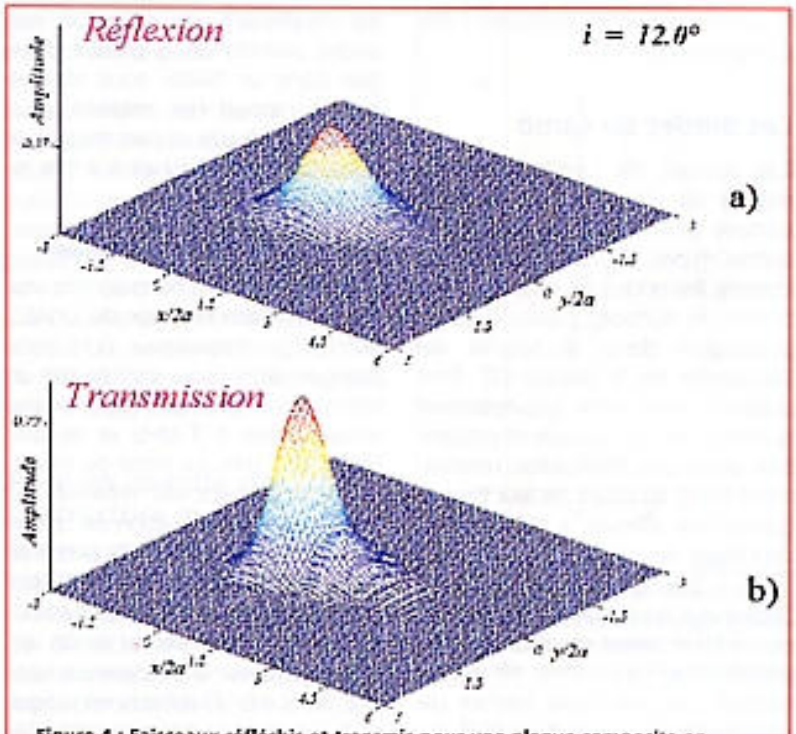

Figure 4 : Faisceaux réfléchis et transmis pour une plaque composite en carbone/époxyde $[0°/45°/90°/135°]_1$ plongée dans l'eau ; θ_i = 12° et f = 3 MHz. Matériau considéré comme absorbant.

lieux isotropes, les ondes de Rayleigh sont la combinaison linéaire de deux ondes inhomogènes et correspondent à l'annulation d'un déterminant d'ordre 2, lorsque l'on écrit les conditions aux limites. Lorsque le milieu est anisotrope périodique, les *"ondes de Rayleigh multicouche"* sont la combinaison de trois ondes inhomogènes qui sont les ***ondes de Floquet***, ces ondes étant les modes de propagation du milieu périodique infini.

La principale différence entre les ondes de Rayleigh en milieu homogène infini et les *"ondes de Rayleigh multicouche"* en milieu multicouche anisotrope périodique infini réside dans le caractère dispersif de ces dernières. En effet, en milieu homogène, quelle que soit la fréquence, la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh est identique, ce qui correspond à un certain angle θ_R. En milieu multicouche périodique, il existe des couples (angle, fréquence) pour lesquels ces ondes existent [14]. L'écriture des conditions aux limites conduisant à l'annulation d'un déterminant d'ordre 3, un balayage à la fois angulaire et fréquentiel permet d'obtenir des courbes de dispersion de ces modes, telles que celles de la figure 5, pour un multicouche en carbone/époxyde de séquence d'empilement 0°/45°/90/135° infini. Ainsi, à la fréquence de 3 MHz, quatre modes de *"Rayleigh multicouche"* existent, et nous allons particulièrement nous intéresser au mode ③, à 25.9°.

Lorsque le milieu composite est suffisamment épais, il peut se comporter comme un milieu semi-infini. C'est le cas d'un composite en carbone/époxyde $[0°/45°/90/135°]_6$ comportant 24 plis, à la fréquence de 3 MHz. Si l'on examine les modules des coefficients de réflexion en ondes planes de la figure 6 pour un tel milieu, on constate que pour un milieu non absorbant, le module du coefficient de réflexion est égal à 1 autour de 26°, alors que pour un milieu absorbant, le module présente un creux à l'angle égal à 25.9°. Ceci est tout à fait caractéristique de la propagation d'une onde de Rayleigh multicouche : en onde plane, et en milieu non absorbant, il n'y a pas de rayonnement du côté opposé à l'insonification, et donc toute l'énergie est réfléchie, ce qui correspond à un module égal à 1.

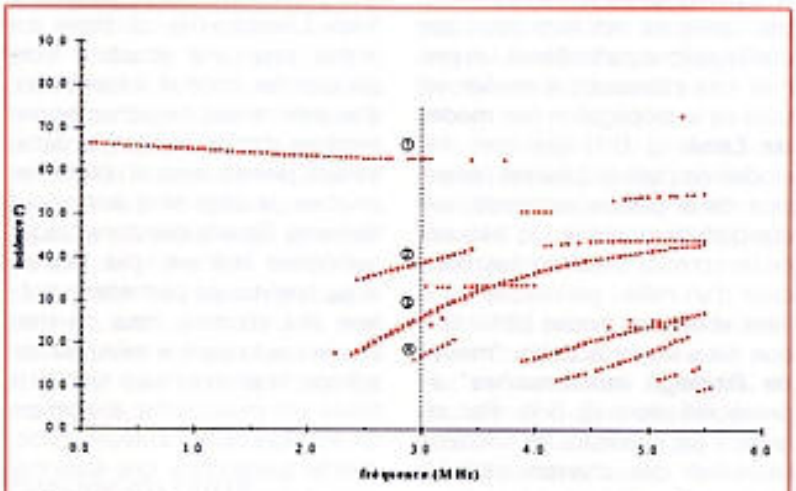

Figure 5 : Courbes de dispersion des ondes de Rayleigh multicouches pour un milieu multicouche périodique infini 0°/45°/90°/135° non absorbant.

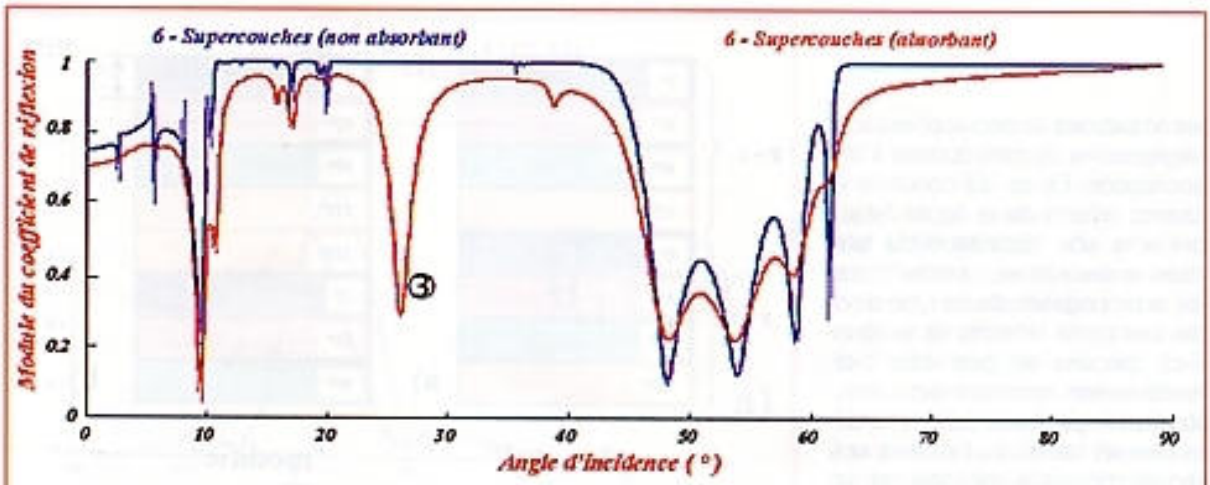

Figure 6 : Modules des coefficients de réflexion en ondes planes pour une plaque composite en carbone/époxyde $[0°/45°/90°/135°]_6$ plongée dans l'eau, en fonction de l'angle d'incidence ; f = 3 MHz. Courbe bleue : le milieu est considéré comme non absorbant. Courbe rouge : le milieu est absorbant.

Champs ultrasonores réfléchis et transmis

Les figures 7 présentent, lors de la propagation d'une "onde de Rayleigh multicouche", les profils réfléchis et transmis pour une plaque composite en carbone/époxyde $[0°/45°/90°/135°]_6$ plongée dans l'eau et insonifiée par un transducteur plan de diamètre 12.7 mm et de fréquence nominale égale à 3 MHz. Une première remarque concerne le champ transmis de la figure 7-b) qui est pratiquement nul, ce qui confirme que la plaque se comporte comme un milieu semi-infini. En effet, l'onde de Rayleigh multicouche décroît en fonction de la profondeur et

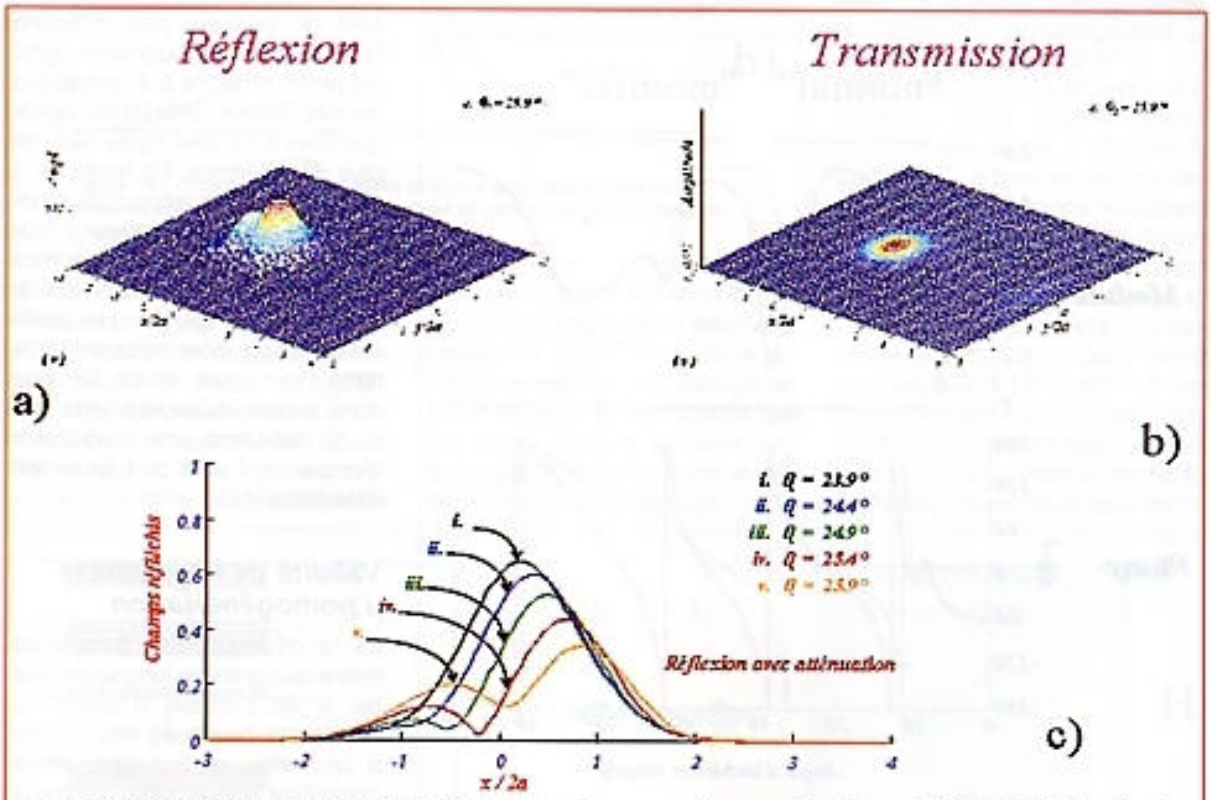

Figure 7 : Faisceaux réfléchis a) et transmis b) pour une plaque composite en carbone/époxyde $[0°/45°/90°/135°]_6$ plongée dans l'eau ; θ_i = 25.9° et f = 3 MHz : propagation d'une *onde de Rayleigh* multicouche. Matériau considéré comme absorbant. c) : profils réfléchis calculés en géométrie bi-dimensionnelle.

les amplitudes de déplacement sont négligeables du côté opposé à l'insonification. En ce qui concerne le champ réfléchi de la figure 7-a), il présente une séparation du faisceau en deux lobes, caractéristique de la propagation de ce type d'onde. Les profils réfléchis de la figure 7-c), calculés en géométrie bidimensionnelle, montrent des caractéristiques générales comme le déplacement latéral du faisceau, une région d'intensité minimale, et un étalement du champ ultrasonore.

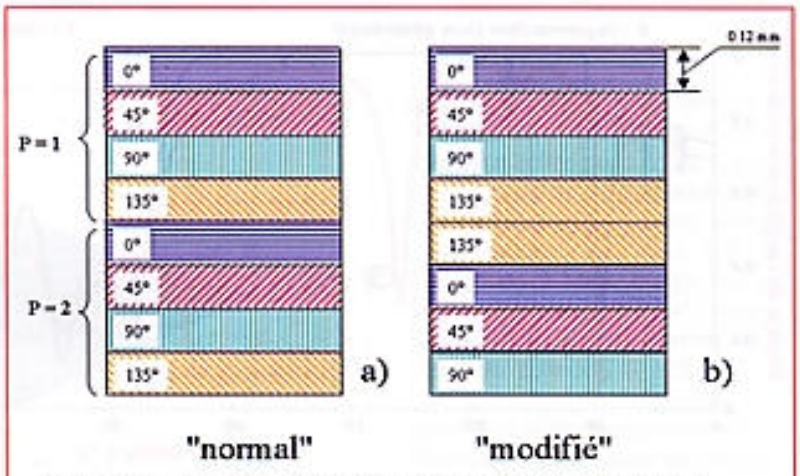

Figure 8 : Empilement $[0°/45°/90°/135°]_2$ sans erreur a) et avec erreur b).

Influence du changement d'orientation d'une couche dans l'empilement

Lors de la fabrication d'un composite périodique, une erreur d'empilement peut se produire. Par exemple, la figure 8-a) présente une plaque $[0°/45°/90/135°]_2$ en configuration dite "normale". Si l'on imagine qu'un opérateur pose deux plis à 135° et continue ensuite normalement l'empilement, on obtient la configuration dite "modifiée" de la figure 8-b).

Pour contrôler que les empilements sont corrects, on utilise un transducteur plan de diamètre 12.7 mm et de fréquence nominale égale à 3 MHz. Le faisceau incident a une forme gaussienne.

L'examen des coefficients de réflexion en ondes planes pour les deux configurations (voir figure 9) montre que les coefficients sont proches à faible incidence, mais sont de plus en plus différents quand l'incidence augmente. Ainsi, les profils réfléchis à 4° présentent de très faibles différences, tandis que ceux à 10° (voir figure 10-a) ont plus de différence. En revanche, à 12°, il y a propagation d'un mode de Lamb pour la configuration "normale", comme le montre le minimum du module du coefficient de réflexion de la figure 8. Les profils réfléchis sont alors nettement différents (voir figure 10-b). On peut donc penser qu'au voisinage d'un mode de Lamb une modification d'empilement sera plus facilement détectable [12].

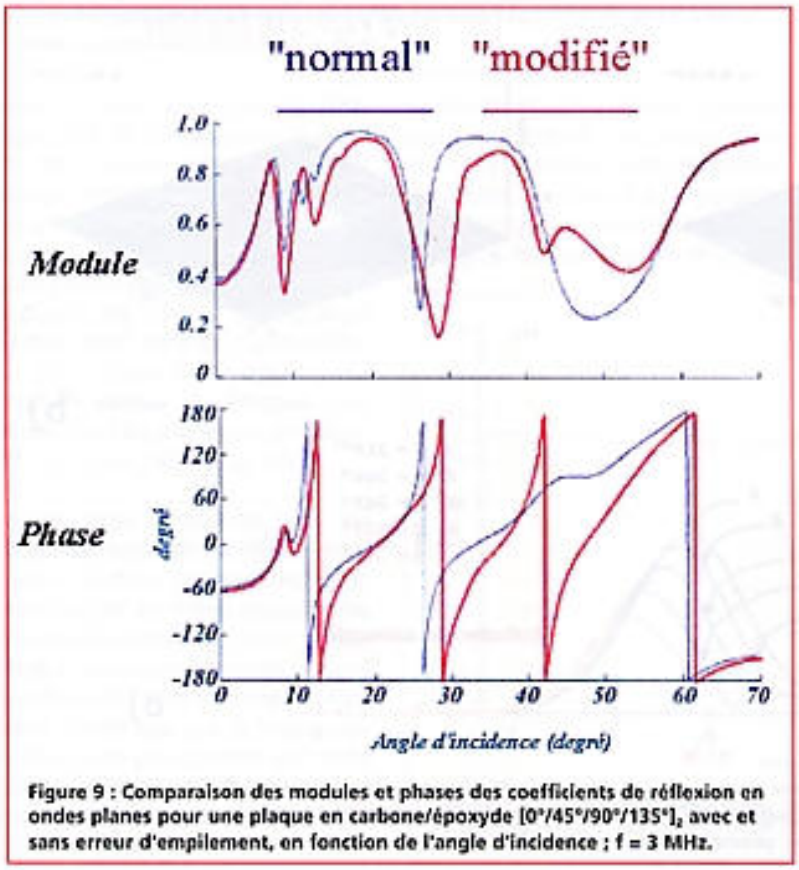

Figure 9 : Comparaison des modules et phases des coefficients de réflexion en ondes planes pour une plaque en carbone/époxyde $[0°/45°/90°/135°]_2$ avec et sans erreur d'empilement, en fonction de l'angle d'incidence ; f = 3 MHz.

Validité de l'hypothèse d'homogénéisation

Par un développement dans le domaine des grandes longueurs d'onde, il est possible d'obtenir les constantes élastiques équivalentes à un milieu multicouche, et de considérer alors le milieu comme un milieu homogène, comme l'illustre la figure 11. Ce développement suppose que toutes les longueurs

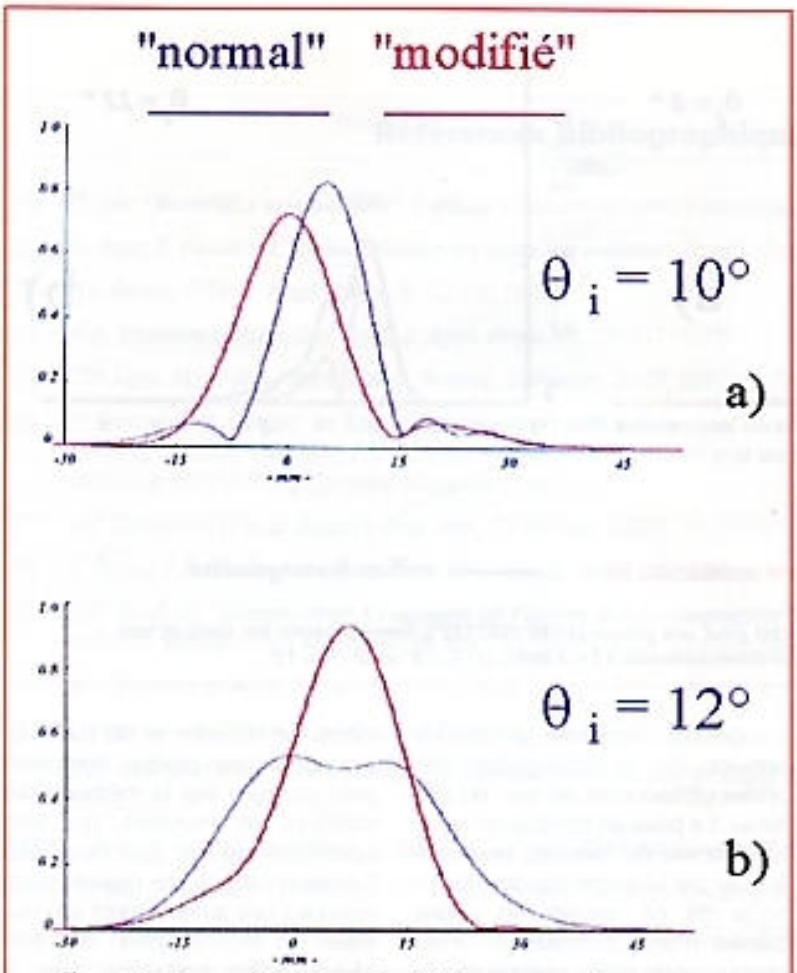

Figure 10 : Comparaison des profils réfléchis pour une plaque en carbone/époxyde [0°/45°/90°/135°]$_s$ avec et sans erreur d'empilement : θ_i = 10° a) et θ_i =12° b) ; f = 3 MHz.

d'onde sont très supérieures à l'épaisseur d'une supercouche. Ainsi, pour un composite en Carbone/Epoxyde de séquence 0°/90°, on estime généralement que le domaine de l'homogénéisation est valide quand la fréquence est inférieure à 2.5 MHz, alors que lorsque la séquence est 0°/45°/90°/135°, ce domaine se réduit à une fréquence inférieure à 1 MHz. En réalité, le domaine de validité de l'homogénéisation dépend du type d'onde que l'on étudie. Ainsi, le domaine sera beaucoup plus réduit dans le cas des *"ondes de Rayleigh multicouche"* que dans le cas des ondes de Lamb. En effet, un composite 0°/45°/90°/135° sera homogénéisé de la même manière qu'un composite 0°/90°/45°/135°. Dans le cas des "ondes de Rayleigh multicouche", l'amplitude des ondes décroît en fonction de la profondeur, et l'ordre d'empilement des couches a donc de l'importance. En revanche, dans le cas des ondes de Lamb, on a vu au § B-1 qu'elles se propagent dans la totalité de l'épaisseur, et sont donc moins sensibles à l'ordre d'empilement des couches.

L'angle d'incidence a également une importance. Ainsi, à faible incidence, le domaine de validité de l'homogénéisation est beaucoup plus grand que lorsque l'incidence augmente. A titre d'exemple, les faisceaux réfléchis d'un composite [0°/45°/90°/135°]$_6$ homogénéisé et non homogénéisé à 2 MHz, sont très proches jusqu'à 8°, comme le montre la figure 12-a) et présentent des différences à 12° (voir figure 12-b). La prise en compte des couches n'est donc pas nécessaire à faible incidence, même en dehors du domaine de validité de l'homogénéisation, mais doit être prise en compte dans le calcul lorsque l'incidence augmente [15]. De la même manière, à 0.75 MHz, donc en très basse fréquence pour un composite [0°/90°]12 des différences commencent à apparaître entre les profils réfléchis du composite et ceux du mi-

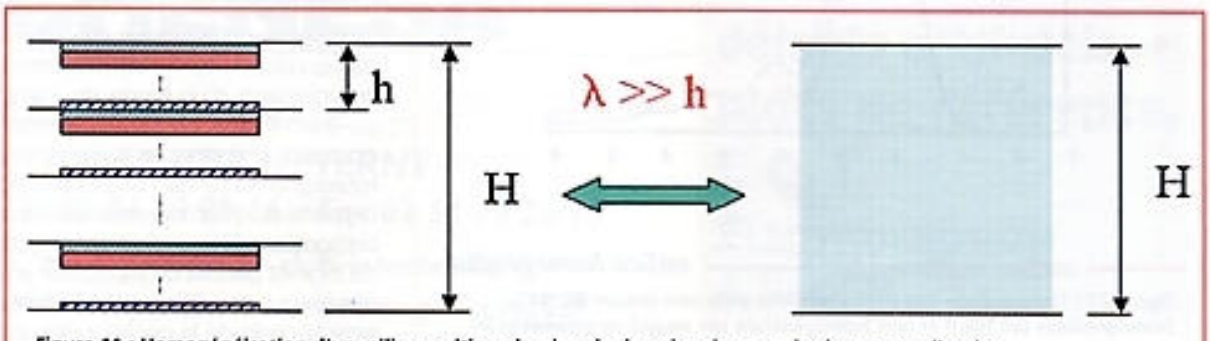

Figure 11 : Homogénéisation d'un milieu multicouche dans le domaine des grandes longueurs d'onde.

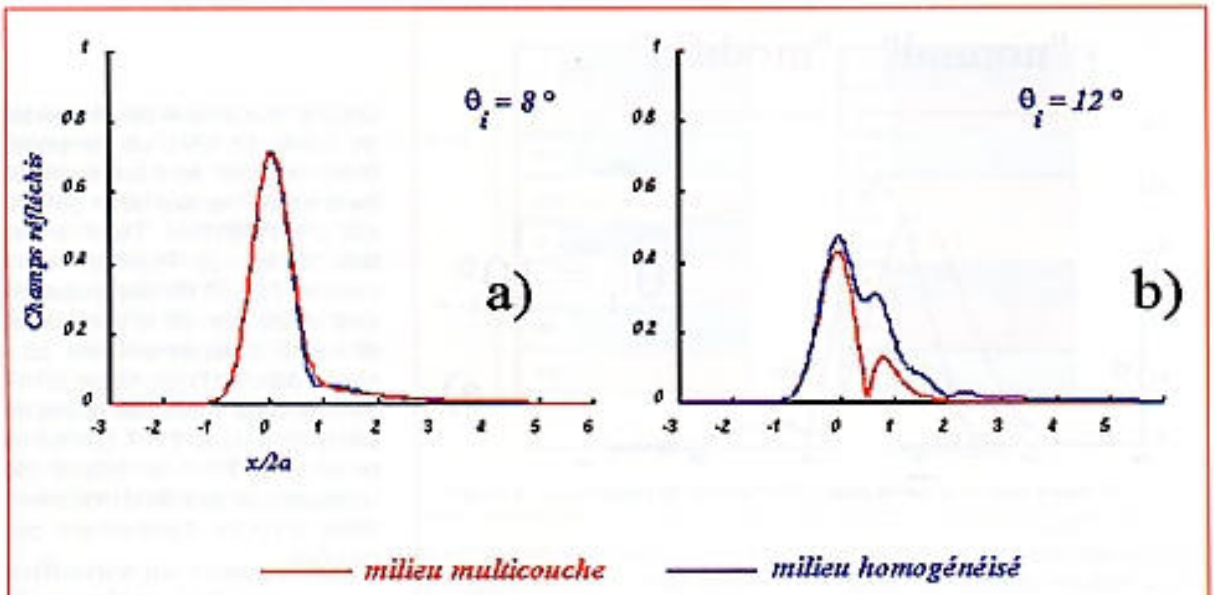

Figure 12 : Comparaison des profils réfléchis pour une plaque $[0°/45°/90°/135°]_s$ homogénéisée (en bleu) et non homogénéisée (en rouge) en géométrie bi-dimensionnelle à f = 2 MHz. a) : θ_i = 8° et b) : θ_i = 12°.

lieu homogénéisé correspondant pour un angle d'incidence égal à 12°, comme le montre la figure 13.

Conclusion

Le contrôle et l'évaluation non destructive par ultrasons des milieux multicouches anisotropes, type composites, nécessite la compréhension de la propagation des ondes ultrasonores au sein du matériau. La prise en compte de la nature bornée du faisceau peut s'effectuer par la décomposition numérique de ce dernier en ondes planes monochromatiques. Pour chaque onde plane oblique monochromatique, le calcul des coefficients de réflexion et de transmission pour une plaque composite peut s'obtenir par la méthode des matrices de transfert, qui offre l'avantage de ne pas nécessiter l'utilisation d'une trop grande place mémoire lors du traitement informatique. La reconstruction des faisceaux, après interaction avec la plaque composite, est ensuite obtenue par convolution, dans des plans de réflexion et/ou de transmission. Le code de calcul ainsi développé aide donc à la prédiction du comportement ultrasonore des milieux composites, et des effets correspondant aux changements de certains paramètres, comme la fréquence de l'onde incidente, l'angle d'incidence, ou les caractéristiques du milieu (modification d'empilement). Il permet également de visualiser la forme des faisceaux au voisinage d'un mode de Lamb ou d'un "*mode de Rayleigh multicouche*". Il donne également des renseignements sur la validité de l'hypothèse d'homogénéisation des composites. En conclusion, ce type de logiciel permet de modéliser entièrement une expérience, et facilite ainsi le choix de la configuration de contrôle. ■

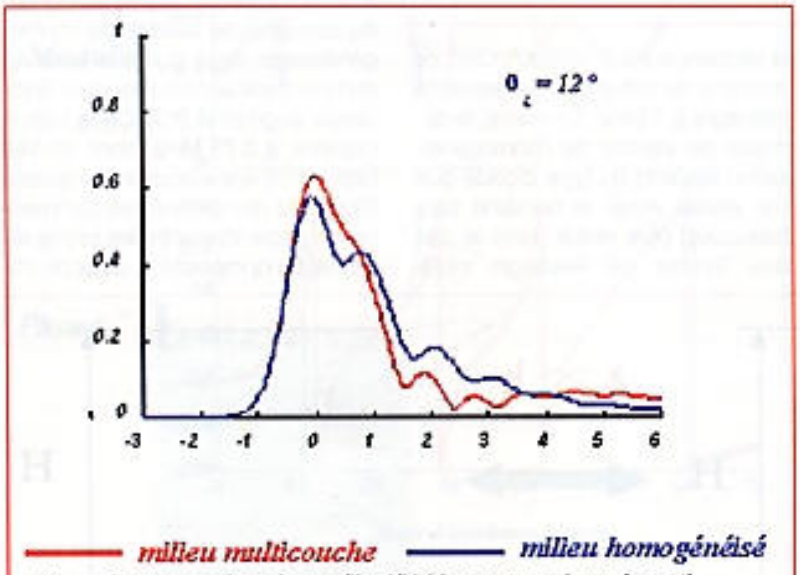

Figure 13 : Comparaison des profils réfléchis pour une plaque $[0°/90°]_{12}$ homogénéisée (en bleu) et non homogénéisée (en rouge) en géométrie bi-dimensionnelle : θ_i = 12° et f = 0.75 MHz.

Références bibliographiques

[1] D. Gay, **"Matériaux composites"**, 3e édition, Traité des Nouvelles Technologies, Série Mécanique, Hermes, (1991).

[2] D. Royer, E. Dieulesaint, **"Ondes élastiques dans les solides"**, Tome 1 : Propagation libre et guidée, Masson, (1996).

[3] H.L. Bertoni, T. Tamir, **Appl. Phys.**, 5, 157-172, (1973).

[4] M.A. Breazeale, L. Adler, G.W. Scott, **J. Appl. Phys.**, 48, 530-537, (1973).

[5] TDK Ngoc, Mayer W.G., **IEEE Trans. Sonics. Ultrason.**, SU-27, 229-236, (1980).

[6] M. Rousseau, Ph. Gatignol, **in Acoustic Interaction with submerged elastic structures**, Part I, 207-241, edited by A. Guran, J. Ripoche, F. Ziegler, Series on stability, **vibration and control of systems Series B**, Vol 5, World Scientific Publishing Company, Singapore, (1996).

[7] J.M. Claeys, O. Leroy, **J. Acoust. Soc. Am.**, 72, 585-590, (1982).

[8] S. Zeroug, F.E. Stanke, **J. Acoust. Soc. am.**, 100, (3), 1339-1348, (1996).

[9] J.W. Goodman, **"Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie"**, Masson et Cie, (1972), traduit de **"Introduction to Fourier optics"**, McGraw-Hill Book Company, New-York, (1968).

[10] W.T. Thomson, **J. Appl. Phys.**, 21, 89-93, (1950).

[11] C. Potel, J.F. de Belleval, **J. of Applied Physics** ,74,4, 2208-2215, (1993).

[12] A.U. Rehman, C. Potel, J.F. de Belleval, **Ultrasonics International'97**, Delft (The Netherlands) - Ultrasonics, 36, 343-348, (1998).

[13] C. Potel, S. Baly, J.F. de Belleval, O. Petillon, J.L. Arnaud, **Cofrend Nantes'97**, 1, 363-367, (1997).

[14] C. Potel, S. Devolder, A.U. Rehman, J.F. de Belleval, J.M. Gherbezza, O. Leroy, M. Wevers, **J. Appl. Phys.**, 86, (2), (1999).

[15] A.U. Rehman, C. Potel, J.F. de Belleval, **Cofrend Nantes'97**, 2, 533-537, (1997).

POUR VOS CONTRÔLES NON-DESTRUCTIFS

CHÊNESA

87 RUE NATIONALE
41700 COUR CHEVERNY
Tél 02 54 79 95 16 • Fax 02 54 79 26 10
E. mail chenesa @ club-internet.FR
web http : //www.advl.org/chenesa/

réalise vos défauts artificiels blocs de référence, I. Q. I. ELECTROÉROSION À FAÇON

Lecteur Information n° 22