



Cartographie Ultrasonore d'une Plaque de Composite RTM : Estimation de l'Atténuation Locale

N.T. Duong, J. Duclos, P. Maréchal et P. Pareige
Université du Havre, LOMC, UMR 6294 CNRS, 75 rue Bellot, 76058 Le Havre, France
duongn@univ-lehavre.fr

L'industrie aéronautique utilise maintenant le procédé RTM (Resin Tranfert Molding) pour réaliser des structures composites de formes compliquées. Notre laboratoire réalise des plaques de grand format (A3) par injection de résine sous pression dans un moule. Selon des conditions précises d'injection, une porosité peut être créée dans le composite et son pourcentage est maîtrisé (jusqu'à 10% environ). Notre objectif est de relier la porosité à des grandeurs physiques telles que l'atténuation ultrasonore afin de pouvoir réaliser un test non destructif de la plaque. Pour cartographier la porosité, un scan de la plaque est nécessaire et des transducteurs focalisants sont requis afin de donner des résultats locaux. Le dispositif comprend un banc réalisant des déplacements x-y précis d'un transducteur plongé dans l'eau au-dessus de la plaque à étudier. L'étude se fait donc en réflexion; les transducteurs utilisés ont des fréquences de travail voisines de 10 MHz ce qui fournit un faisceau ultrasonore de diamètre inférieur au mm et une profondeur de champ très supérieure à l'épaisseur de la plaque (3.17 mm). La réponse impulsionnelle du transducteur est enregistrée pour chaque point de la plaque et fournit un C-scan des amplitudes maxima et des temps de vol c'est-à-dire une image fidèle de la plaque (surface, intérieur, fond). Ensuite des points particuliers peuvent être sélectionnés pour un traitement plus complet. La comparaison du signal réfléchi en surface et de l'écho de fond conduit à la détermination de l'atténuation quasi ponctuelle, en fonction de la fréquence. Une cartographie en est déduite.

1 Introduction

Les matériaux composites de type RTM possèdent une porosité qui est préjudiciable à leurs propriétés mécaniques [1]. Il est donc nécessaire de la déterminer ou, tout au moins, de l'estimer. Différentes techniques ont été développées pour atteindre ce but [2]. Les méthodes d'investigation peuvent être classées en méthodes destructives et non destructives. Les premières sont appliquées à de petits échantillons. La tomographie X, par exemple, visualise les vides à l'intérieur du matériau et, par comptage, fournit la porosité. En outre, cette méthode nécessite un équipement coûteux. La digestion acide donne également, par différence, le volume des porosités. Les méthodes ultrasonores, non destructives, constituent une alternative à ces méthodes sans toutefois apporter autant de précision mais en permettant une étude sur de grands échantillons. Pour ceci il faut établir un lien entre la porosité et une grandeur physique du composite (par exemple: vitesse, masse volumique, atténuation). On a choisi de mesurer l'atténuation des ondes longitudinales [3, 4] traversant la plaque dans son épaisseur. Cela constitue une approche globale puisque l'atténuation est liée à divers phénomènes (atténuation intrinsèque des constituants, porosité, réflexions internes, diffractions diverses,...) dont les effets sont cumulatifs.

2 Plaques composites

Les plaques composites carbone/époxy soumises à l'expérimentation sont réalisées au LOMC – groupe composites [5]. Elles sont de type CFRC (Carbon Fibre Reinforced Composites), réalisées par la méthode RTM (Resin Tranfert Molding) qui consiste à injecter sous pression dans un moule, de la résine époxy renfermant un renfort en carbone. Les fibres de carbone sont sous forme de tissus (Hextow AS7 satin de 5 12K 500 g.m²) disposés en six épaisseurs (Figure 1). La résine, de type Hexflow RTM6 180°, est injectée sous une pression de 5 bars et cuite à 160°C. Après extraction du moule, la plaque réalisée est recuite 5 heures à 180°C.

Les plaques ainsi réalisées possèdent un taux volumique de fibre de 54% et une masse volumique nominale de 1486 kg/m³. Les plaques réalisées possèdent des dimensions d'environ 400 mm × 300 mm et une épaisseur nominale E=3,17 mm.

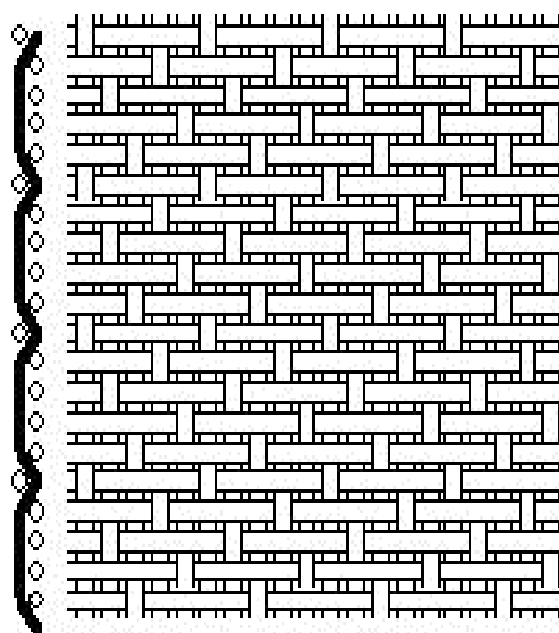


Figure 1 - Tissus constituant les plaques composites.

3 Dispositif expérimental

Pour l'étude ultrasonore de ces plaques on a choisi la méthode de réflexion d'un signal impulsionnel. Cette méthode ne nécessite qu'un minimum de réglages (perpendicularité du faisceau ultrasonore à la plaque). Par ailleurs, avec une impulsion incidente, on distingue bien les origines des différents signaux captés. Pour réaliser une cartographie (C-scan) de la plaque on dispose un transducteur à immersion 50 mm au-dessus de la plaque et on réalise un balayage X-Y précis du transducteur avec une résolution de 50 μm. Le matériel utilisé comprend un bâti X-Y-Z Mistras (Figure 2) complété par son dispositif de commande et son traitement du signal (logiciel UTwin). L'eau de la cuve est maintenue à une température constante et homogène par un système à double cuve.

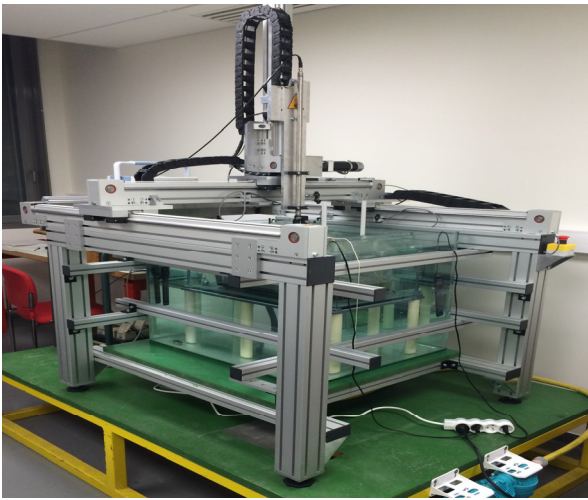


Figure 2 - Dispositif expérimental X-Y-Z.

Les transducteurs utilisés dans cette étude sont sphériques, de fréquence nominale de 10 MHz, focalisants, de distance focale 2" et de diamètre 0.5" ou 0.25". L'excitation électrique consiste en une impulsion d'amplitude 10 V, de durée 0,1 à 0,2 μ s et dont la forme dépend beaucoup du transducteur.

La tache focale possède la forme d'un ellipsoïde (Figure 3a) de longueur L et de largeur l (ou diamètre) fonction de la fréquence et du seuil considéré. Ces valeurs sont calculées, à partir des données du constructeur, pour une valeur de l'amplitude ultrasonore, à -6dB du maximum de l'amplitude ultrasonore obtenu à la distance focale. Les variations sont reportées sur la figure 3b pour les transducteurs de focale 2" et de diamètres 0.25" (bleu) et 0.5" (rouge) en fonction de la fréquence.

On note que le transducteur de 0.5" possède une tache focale de dimensions L = 17,5 mm et largeur l = 0,61 mm à 10 MHz. Pour le second transducteur (diamètre 0.25"), ces dimensions deviennent respectivement 55,6 et 1,22 mm.

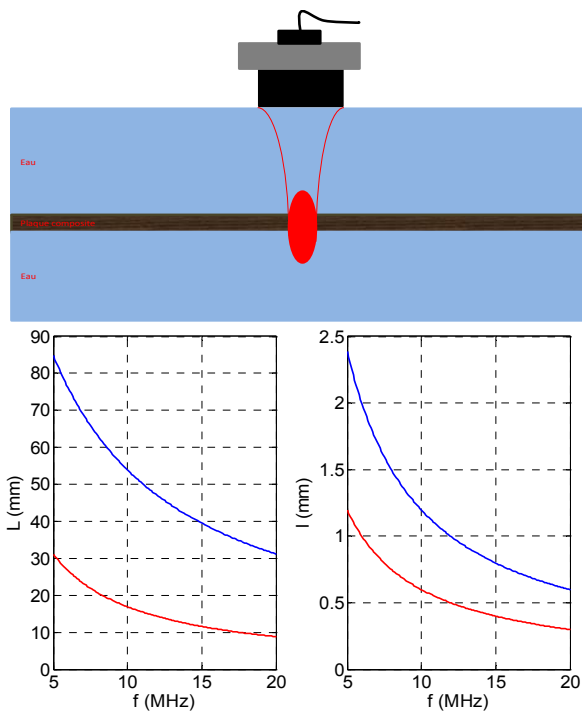


Figure 3 - (a) Réflexion d'un faisceau focalisant sur une plaque et (b) dimensions, à -6dB du maximum, de la tache focale des transducteurs.

Par la suite, on constatera que le transducteur de diamètre 0.5" est plus adapté à la réalisation d'images C-Scan tandis que celui de diamètre 0.25" convient davantage aux mesures d'atténuation.

4 Cartographie

Chaque signal obtenu par réflexion comprend plusieurs échos successifs (Figure 4) : l'écho de réflexion en surface (le plus important), de nombreuses réflexions internes, l'écho de fond (réflexion sur la face arrière de la plaque), de nouvelles réflexions internes... A l'aide de fenêtres logicielles, on peut sélectionner des domaines d'étude à l'intérieur du signal (par exemple les échos de surface et de fond). A l'intérieur d'une fenêtre on sélectionne une grandeur telle que le maximum d'amplitude, le temps de vol correspondant. Cette grandeur scalaire positive est stockée pour chaque point X-Y. Elle ne représente qu'une petite partie de l'information contenue dans le signal. Le regroupement des valeurs obtenues lors du balayage fournit les points d'une cartographie. Les grandes dimensions de la plaque et la finesse du pas de balayage peuvent entraîner un volume important de données.

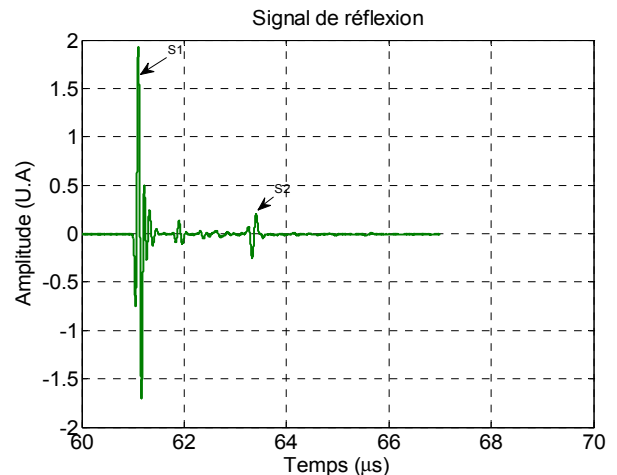


Figure 4 - Signal obtenu par réflexion sur la plaque.

L'écho de fond permet de repérer la perte d'amplitude subie par les ultrasons après un aller et retour dans la plaque. C'est l'effet conjugué de l'atténuation intrinsèque, de la porosité, des réflexions internes et à l'interface eau/composite. La fréquence centrale des transducteurs de 10 MHz autorise une bonne séparation des deux échos sur une plaque de petite épaisseur (durée de l'impulsion assez brève) ainsi qu'un bon niveau de l'écho de fond (beaucoup plus faible à 15 MHz, par exemple).

Les C-scans sont réalisés avec un transducteur 10 MHz focalisant à 2", de diamètre 0.5" et disposé à 50 mm de la plaque. Sa petite tache focale, associée au pas fin (0.2 mm) du balayage assurent des images précises. Sur la figure 5 on représente une cartographie limitée à 40×35 mm² (pour mieux faire ressortir les détails). Les maxima de l'écho de surface sont représentés sur la figure 5a ; ceux de l'écho de fond sur la figure 5b. Le C-scan de l'écho de surface renseigne sur la première couche rencontrée par le faisceau. Lors des deux couches croisées de fibres sont sous la surface (Figure 1), la réflexion est forte (couleur rouge) ; tandis que les interstices entre les fibres de la première couche contiennent de la résine, entraînant une réflexion plus faible (couleur verte).

Sur cette figure 5a, on peut retrouver la période selon x (égal à 5) de recouvrement des fibres (environ 3,2 mm). La figure 5b montre que l'écho de fond ne présente aucune périodicité puisque le faisceau a traversé deux fois les 6 couches de tissus (superposées sans correspondance précise entre les fibres) et des zones de porosités diverses. Le signal faible (en bleu) traduit principalement l'atténuation intrinsèque et la diffusion par les vides de résine.

Les amplitudes collectées en surface et au fond sont normalisées (comprises entre 0 et 1). Par la suite, on sépare les échos de fond en trois domaines : amplitude élevée (couleur rouge), amplitude moyenne (couleur verte) et amplitude faible (couleur bleue).

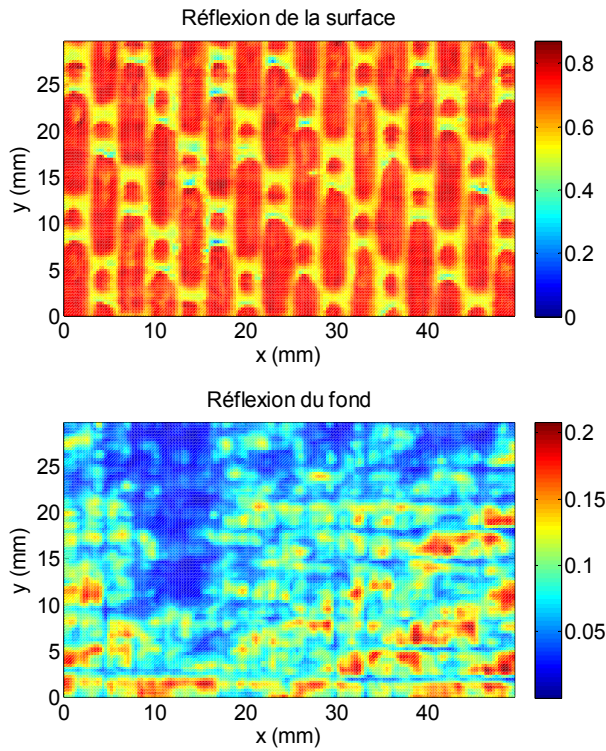


Figure 5 - (a) C-scan de l'écho de surface
(b) C-scan de l'écho de fond.

5 Calcul de l'atténuation

Le calcul de l'atténuation est réalisé simplement lorsque les ondes incidente et réfléchi sont planes. Dans ce cas, notons $s_1(t)$ et $s_2(t)$ respectivement l'écho de surface et l'écho de fond (Figure 6). Les transformées de Fourier associées à ces échos sont notées respectivement $\underline{S}_1(f)$ et $\underline{S}_2(f)$. Elles sont liées l'une à l'autre par la fonction de transfert suivante :

$$\underline{R}(f) = \frac{\underline{S}_2(f)}{\underline{S}_1(f)} = - \frac{4z}{(1+z)^2} \exp(-2\gamma E). \quad (1)$$

Dans cette expression, E est l'épaisseur de la plaque, $z = Z_2/Z_1$, le rapport des impédances acoustiques Z_2 de la plaque et Z_1 du fluide et γ est la constante de propagation. La constante de propagation comporte un terme d'atténuation α , fonction de la fréquence f, et un terme de propagation à la vitesse de phase $V(f)$:

$$\gamma = \alpha + j \frac{2\pi f}{V}. \quad (2)$$

La constante de propagation comporte un terme d'atténuation α , fonction de la fréquence f, et un terme de propagation à la vitesse de phase $V(f)$. Le module R de $\underline{R}(f)$ est :

$$R = \frac{4z}{(1+z)^2} \exp(-2\alpha E). \quad (3)$$

On déduit de ce module l'atténuation α , fonction de la fréquence f :

$$\alpha = -\frac{1}{2E} \ln\left(\frac{4z}{(1+z)^2 R}\right). \quad (4)$$

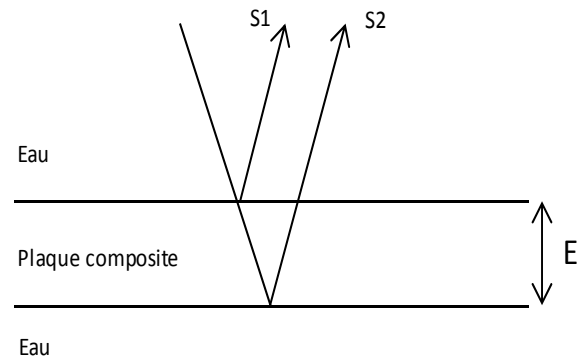


Figure 6 - Réflexion d'un signal bref.

Cette méthode nécessite quelques remarques. Elle est applicable lorsque les transducteurs sont plans et si la diffraction peut être négligée. Ce n'est pas le cas ici. Il faut s'assurer que le transducteur focalisant se comporte comme un transducteur plan dans le domaine focal où est positionnée la plaque. Par ailleurs, la limitation précise des signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ n'est pas simple à cause des réflexions internes qui se superposent à ces deux signaux. Cette considération diffère fortement ce cas de celui d'une plaque homogène. Enfin, en cas d'atténuation forte, l'écho de fond est très faible ce qui dégrade le rapport signal sur bruit et augmente l'imprécision sur le calcul d'atténuation.

Nous avons testé expérimentalement les transducteurs à notre disposition pour comparer leur comportement dans le domaine focal. Le test consiste à mesurer l'atténuation d'une plaque de PMMA (plexiglas) de 3mm d'épaisseur, dont les caractéristiques ont déjà été déterminées [6] par des mesures de transmission suivies de l'identification des paramètres de la plaque (épaisseur, masse volumique, atténuation, vitesse de phase). Lors des essais, la distance entre la plaque et le transducteur est modifiée et, à chaque fois, l'atténuation du plexiglas est calculée. On constate que le transducteur utilisé pour réaliser les C-scans est trop focalisant et que l'atténuation obtenue dans le plexiglas ne possède jamais les variations espérées, pour toutes les distances transducteur-plaque. Par contre, le second transducteur (diamètre 0.25") possède une tache focale plus étendue et l'atténuation du plexiglas obtenue est très proche de celle connue lorsque la distance est bien choisie (43 mm à deux mm près). Les résultats de cette comparaison sont reportés sur la figure 7. L'atténuation mesurée avec le transducteur focalisant est en bleu; celle obtenue antérieurement est en rouge. La valeur de l'atténuation dans la plaque de plexiglas est donnée par la formule :

$$\alpha = 1,4 \cdot 10^{-4} f^{0,85} \quad (5)$$

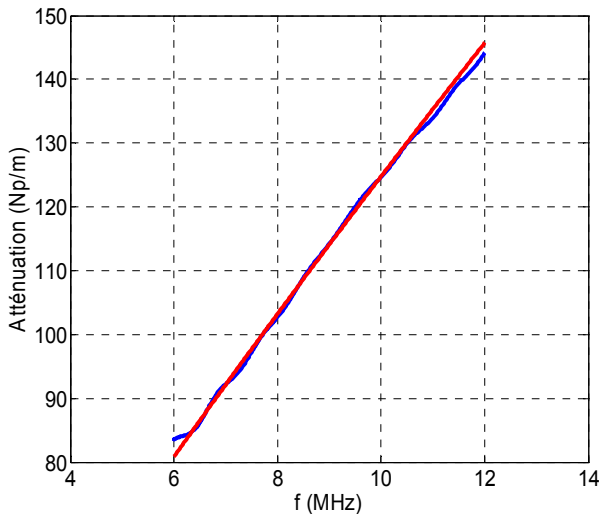


Figure 7- Atténuation de la plaque de plexiglas d'épaisseur 3 mm.

Ensuite, nous mesurons, dans les mêmes conditions (même distance, même impulsion) l'atténuation en trois points d'une plaque RTM (Figure 8). Ces points sont choisis à partir du C-scan de la figure 5 : points avec atténuation forte (bleu), moyenne (vert) ou faible (rouge). Pour les calculs, nous avons besoin des valeurs d'impédance de l'eau et des plaques mesurées. Pour l'eau nous prenons $Z_1 = 1,496$ MRa; le plexiglas a une masse volumique de 1190 kg/m^3 et la vitesse des ondes longitudinales est 2760 m/s aux environs de 10 MHz soit $Z_2 = 3,28$ MRa. Pour la plaque RTM, nous utilisons une valeur moyenne pour l'impédance $Z_2 = 4,31$ MRa (soit une masse volumique de 1486 kg/m^3 et une vitesse de 2900 m/s). En toute rigueur, les impédances de la plaque RTM ne sont pas identiques aux deux interfaces eau/plaque. Cependant, nous avons pu vérifier que des petites variations de l'impédance Z_2 n'ont pas une nette influence sur la mesure de l'atténuation.

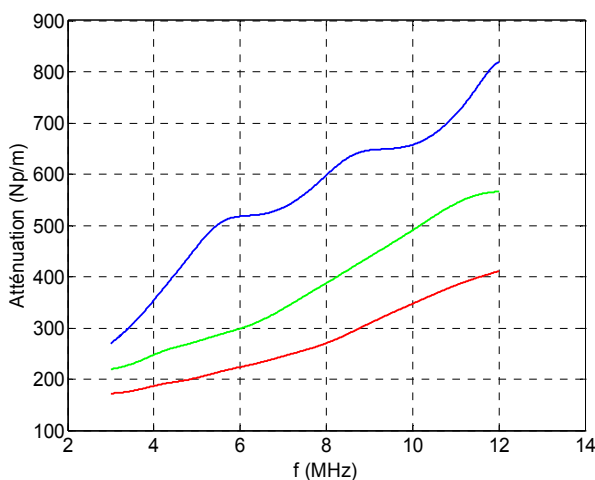


Figure 8- Atténuation d'une plaque RTM en trois points différents.

6 Résultats

Nous présentons quelques cartographies de l'atténuation sur une petite surface de la plaque. Tout d'abord (Figure 9a) à la suite d'un C-scan, l'atténuation est calculée, en chaque point, par la méthode présentée ci-dessus (équations (1) à (4)) ; la grandeur présentée sur l'image est l'atténuation à la fréquence 8 MHz (au maximum d'efficacité du transducteur). L'atténuation calculée à la fréquence 4 MHz (Figure 9b) est plus faible en chaque point, en accord avec les relevés de la figure 8. Ensuite (Figure 9c) nous simplifions le calcul de α en remplaçant, pour chaque point du C-scan, les transformées de Fourier de s_1 et s_2 par les valeurs des amplitudes A_1 et A_2 représentées, respectivement, sur les images figure 5a et figure 5b (c'est-à-dire les maxima des échos de surface et de fond). L'expression calculée (sans aucune transformée de Fourier) de R' se substituant à \underline{R} est donc :

$$R' = \frac{A_2}{A_1} \quad (6)$$

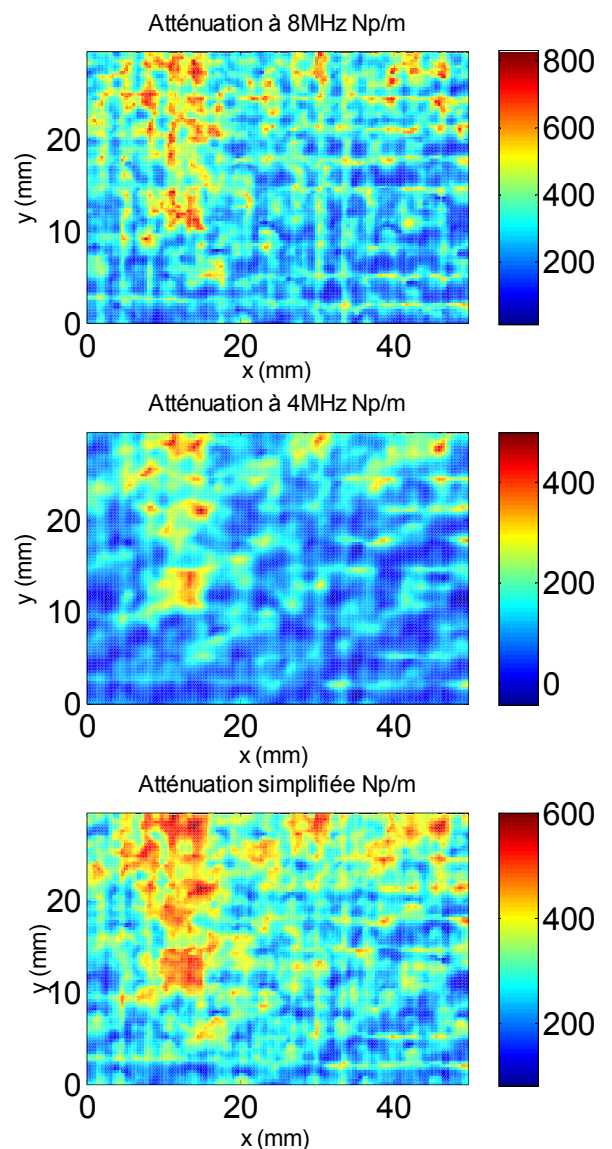


Figure 9- Cartographie d'une plaque RTM.
(a) Méthode normale à 8 MHz
(b) Méthode normale à 4 MHz
(c) Méthode simplifiée.

On a donc localement une estimation constante de l'atténuation indépendante de la fréquence. La comparaison des figures 9a et 9c montre que la simplification fournit rapidement une localisation des zones de forte atténuation, même si les valeurs de celle-ci sont approchées.

7 Conclusion

La méthode développée permet d'accéder à une valeur satisfaisante de l'atténuation en divers points d'une plaque composite de faible épaisseur, ceci avec différents niveaux de précision. Des transducteurs focalisants s'avèrent indispensables et leur emploi sélectif a été justifié par des mesures sur des plaques homogènes connues. Les résultats montrent que l'atténuation est très variable sur la plaque choisie. La méthode nécessite beaucoup de temps pour l'enregistrement des données ainsi que pour leur traitement. Par contre, le matériel nécessaire n'est pas spécialement sophistiqué. Le lien entre l'atténuation et le taux de porosité reste à établir. On peut envisager d'utiliser des relations déjà existantes [7] mais valables pour des matériaux de nature différente (céramiques, aciers) ou bien à considérer directement la multidiffusion dans les composites [8]. Procéder par comparaison avec des échantillons de porosité connue est une méthode beaucoup plus attractive car le milieu étudié n'a pas de structure simple.

Références

- [1] Y. Ledru, *Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques*, Thèse, Toulouse. (2009).
- [2] J. E. Little, X. Yuan, M. I. Jones, Characterization of voids in fiber reinforced composite materials, *NDT&E International* **46**, 122-127 (2012).
- [3] H. Jeong, D. K. Hsu, Experimental analysis of porosity-induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites, *Ultrasonics* **33**(3), 195-203 (1995).
- [4] M. Daniel, S. C. Wooh, I. Komsky. Quantitative porosity characterization of composite materials by means of ultrasonic attenuation, *Journal of Nondestructive Evaluation* **11** N°1, 1-8 (1992).
- [5] S Arnaud, *Contribution à la compréhension de la formation de défauts d'élaboration par RTM d'un composite stratifié*, Thèse, Caen (2013).
- [6] A. El Mouhtadi, *Caractérisation ultrasonore de plaques viscoélastiques homogènes et composites*, Thèse, Le Havre (2012).
- [7] D. N. Boccaccini, A. R. Boccaccini, Dependence of ultrasonic velocity on porosity and pore shape in sintered materials, *Journal of Nondestructive Evaluation* **16**, N°4, 1878-1892 (1997).
- [8] S. Lonné, A. Lhémy, P. Calmon, S. Biwa, F. Thévenot. Modeling of ultrasonic attenuation in unidirectional fiber reinforced composites combining multiple-scattering and viscosity losses, *Review of Nondestructive Evaluation* **23**, 875-882 (2004).