



HAL
open science

Détection de bulles dans les matériaux composites fibreux en cours de fabrication

Naïm Samet, Pierre Maréchal, Hugues Duflo, Pascal Pareige

► **To cite this version:**

Naïm Samet, Pierre Maréchal, Hugues Duflo, Pascal Pareige. Détection de bulles dans les matériaux composites fibreux en cours de fabrication. *Revue des composites et des matériaux avancés = Journal of Composite and Advanced Materials*, 2013, 23, pp.111 - 123. 10.3166/rcma.23.111-123 . hal-03840854

HAL Id: hal-03840854

<https://hal.science/hal-03840854>

Submitted on 1 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Détection de bulles dans les matériaux composites fibreux en cours de fabrication

Naïm Samet, Pierre Maréchal, Hugues Duflo, Pascal Pareige

*Laboratoire Ondes et Milieux Complexes
LOMC FRE CNRS 3102, Université du Havre
rue Bellot, F-76600 Le Havre
naim.samet@univ-lehavre.fr*

RÉSUMÉ. La fabrication de matériaux composites à partir d'une matrice fibreuse permet d'obtenir d'excellentes propriétés mécaniques. Néanmoins, les procédés de fabrication associés posent le problème de la minimisation des défauts liés à des bulles gazeuses restées piégées au cours de l'imprégnation. En effet, l'écoulement de la résine le long des fibres, même sous pression, peut donner lieu à des porosités résiduelles qui peuvent être sources de défauts sur le produit fini. Plus particulièrement, la détection de bulles est mise en œuvre en vue de l'élaboration de matériaux composites par un procédé de type Resin Transfer Molding (RTM). Pour cela, nous proposons une méthode de détection ultrasonore, au moyen d'un transducteur multi-élément.

ABSTRACT. The fabrication of composite materials from a fibrous matrix provides excellent mechanical properties. However, the manufacturing processes involved is questioning on the minimization of related defects due to trapped gas bubbles during the impregnation. Indeed, the resin flow along the fibers, even under pressure, can result in residual porosity i.e. sources of defects on the finished product. In particular, the detection of bubbles is implemented for the development of composite materials by a Resin Transfer Molding (RTM) process. For this, we propose a method of ultrasonic detection, using a phased array transducer.

MOTS-CLÉS : matrice fibreuse, résine, RTM, bulle, ultrasons, transducteur multi-élément.

KEYWORDS: fibrous matrix, resin, RTM, bubble, ultrasound, phased-array transducer.

Extended abstract

Composite materials are widely used, mainly for the trade-off between density and mechanical properties. One way of progress is an improvement of the fabrication process. One of the most usual manufacturing process for composite materials is the Resin Transfer Molding (RTM) process. It consists in the impregnation of a fibrous matrix by a fluid resin. When the fibrous matrix is impregnated by the resin flow, its movement can lead to trapped gas bubbles. This phenomenon is not only due to the fiber threads and meshes, but also to the resin viscous properties. It can be explained by local transitions between laminar and turbulent flows, what is commonly summarized by a local Reynolds number. Therefore, when a localized turbulent flow arises, gas bubbles can be trapped either between the threads (micro-bubbles) or between the meshes (macro-bubbles). In order to observe clearly this phenomenon, this study focuses on the case of macro-bubbles. In that purpose, we propose an ultrasonic setup that allows to observe dense materials and possible porosities behind an opaque wall, such as a steel mold. In the experimental setup, a phased array transducer is placed in contact with the external face of a three layered sandwich composed of two plates, between which fibers and resin are inserted, mimicking a mold with fibers and resin located inside (Samet *et al.*, 2011). Using this configuration, the echoes resulting from the phased array focal laws are recorded, each echo corresponding to an elementary depth scan (A-scan). The assembly of these elementary scans as a function of the center position of each focal law results in a 2D map (B-scan) which allows to locate the variability of the spatial properties, such as density, elasticity, or viscosity, as well as porosity defects. In order to reach this objective, two preliminary steps are necessary and developed respectively. The first one concerns the characterization of a propagation medium in terms of ultrasonic longitudinal velocity c and attenuation α . These two parameters are depending on the frequency, as a function of the visco-elastic properties of the propagation medium (Samet *et al.*, 2012). The second preliminary step deals with the detection of air bubbles evolving in a viscous fluid. The ultrasonic phased array transducer is used to detect and characterize the relationship between the effective diameter D_b and velocity v_b of air bubbles through the associated Reynolds number. The result using an ultrasound method is compared in good agreement with that obtained using a video capture. These experimental results are both in accordance with theoretical results involving the viscosity ratio between the immersion viscous fluid simulating the resin, and the air bubble mimicking the gas macro-bubbles observed during the injection of the resin. On the basis of these preliminary results, these methods are applied to a realistic configuration. This practical configuration consists in several fiber matrices immersed in a viscous fluid, through which an air bubble is moving. Using the displacement characterization method previously described, the positions and speeds of bubbles can be deduced. From these results, a bubble moving between fiber matrix is slowed down, sliding and rubbing along the fiber meshes. From these results, the evolution of the gas bubbles can be related to the fibrous medium, the way they are arranged and to the viscous resin flow.

1. Introduction

Lors de la fabrication de matériaux composites, plus particulièrement lors de l'imprégnation de la matrice fibreuse par l'écoulement de résine, des bulles de gaz peuvent rester piégées. Ces résidus gazeux peuvent donner lieu à des porosités, sources de défauts du produit fini. Dans cette étude, la détection de bulle est mise en œuvre pour une élaboration de matériaux composites, par un procédé de type Resin Transfer Molding (RTM). Pour cela, nous proposons une méthode de détection ultrasonore, au moyen d'un transducteur multi-élément (Samet *et al.*, 2011), dont les échos sont relevés pour chacune des lois focales et constituent le signal élémentaire (A-scan) du système émetteur-récepteur multi-élément. Ces signaux assemblés dans l'espace, permettent de réaliser des plans de coupe, afin de localiser le défaut en profondeur, mais aussi des cartographies 2D (C-scan) qui donnent la possibilité de localiser les défauts et/ou les variabilités des propriétés spatiales.

Une première partie porte sur la caractérisation de fluides ou solides en termes de vitesse c et atténuation α ultrasonores en fonction de la fréquence, directement liées aux propriétés mécaniques du milieu, *i.e.* constantes élastiques et visco-élasticité. En particulier, pour un fluide newtonien, la dépendance fréquentielle de l'atténuation peut être reliée à la viscosité η du fluide.

Une deuxième partie concerne la détection des tailles et vitesses de bulles de gaz en déplacement dans un milieu visqueux. Dans cet objectif, la détection ultrasonore de bulles de gaz (air) est testée dans un flux de fluide modèle (huile silicone). Les résultats obtenus sont comparés à ceux observés lors d'une capture vidéo, et validés par des modèles théoriques d'évolution de bulle en milieu visqueux sous l'effet des forces visqueuses et d'Archimède. Le rapport des viscosités $\alpha = \eta_l / \eta_g$, du liquide (fluide visqueux) et de la bulle (air) respectivement, conditionne la vitesse de la bulle considérée sphérique pour de petits nombres de Reynolds.

Après ces deux étapes de calibration, la troisième partie concerne la mise en application de cette mesure ultrasonore sur une préforme fibreuse (verre, carbone...) immergée dans un écoulement visqueux. Les bulles ainsi détectées sont localisées, et leurs parcours et vitesses peuvent être reconstitués. Au moyen de ces résultats, l'évolution des bulles peut être reliée au type de milieu fibreux et/ou à la nature des fibres et leur arrangement.

2. Caractérisation ultrasonore de fluides visqueux

2.1. Configuration

Le dispositif d'émission-réception ultrasonore est constitué d'un générateur d'impulsions et d'un transducteur mono-élément de fréquence centrale $f_0 = 15$ MHz qui émet en incidence normale dans une structure tri-couche. Les épaisseurs des

plaques et couche fluide, de la structure tri-couche verre/huile silicone/aluminium étudiée (figure 1) sont choisies pour leurs propriétés en lien avec le procédé RTM.

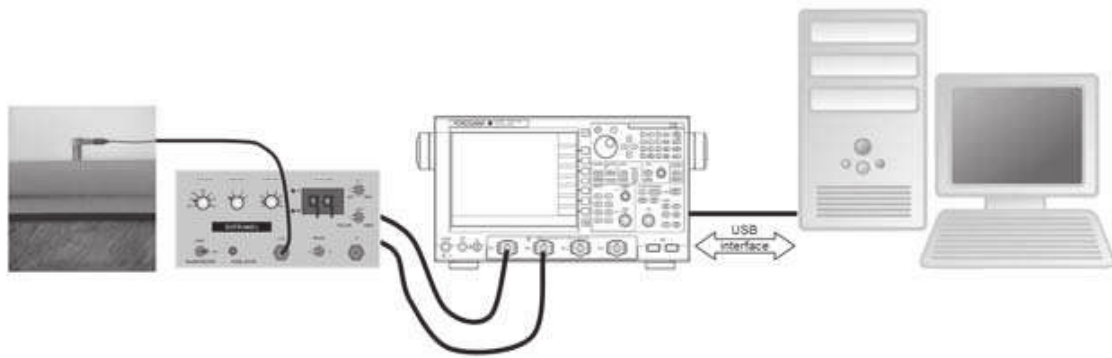


Figure 1. Configuration expérimentale : transducteur mono-élément de fréquence centrale $f_0 = 15$ MHz, structure tri-couche étudiée verre/huile/aluminium (couches indexées 1/2/3), transducteur émetteur/récepteur mono-élément, oscilloscope et PC

Par ailleurs, le rapport des épaisseurs d_n à la longueur d'onde $\lambda_n = c_n/f_0$ du transducteur est dimensionné de façon à avoir des échos d'aller-retour distincts (Samet *et al.*, 2011). Les échos résultants $s_{1r}(t)$ et $s_{2r}(t)$, respectivement après un et deux allers-retours dans la couche d'huile silicone, sont extraits (figure 2).

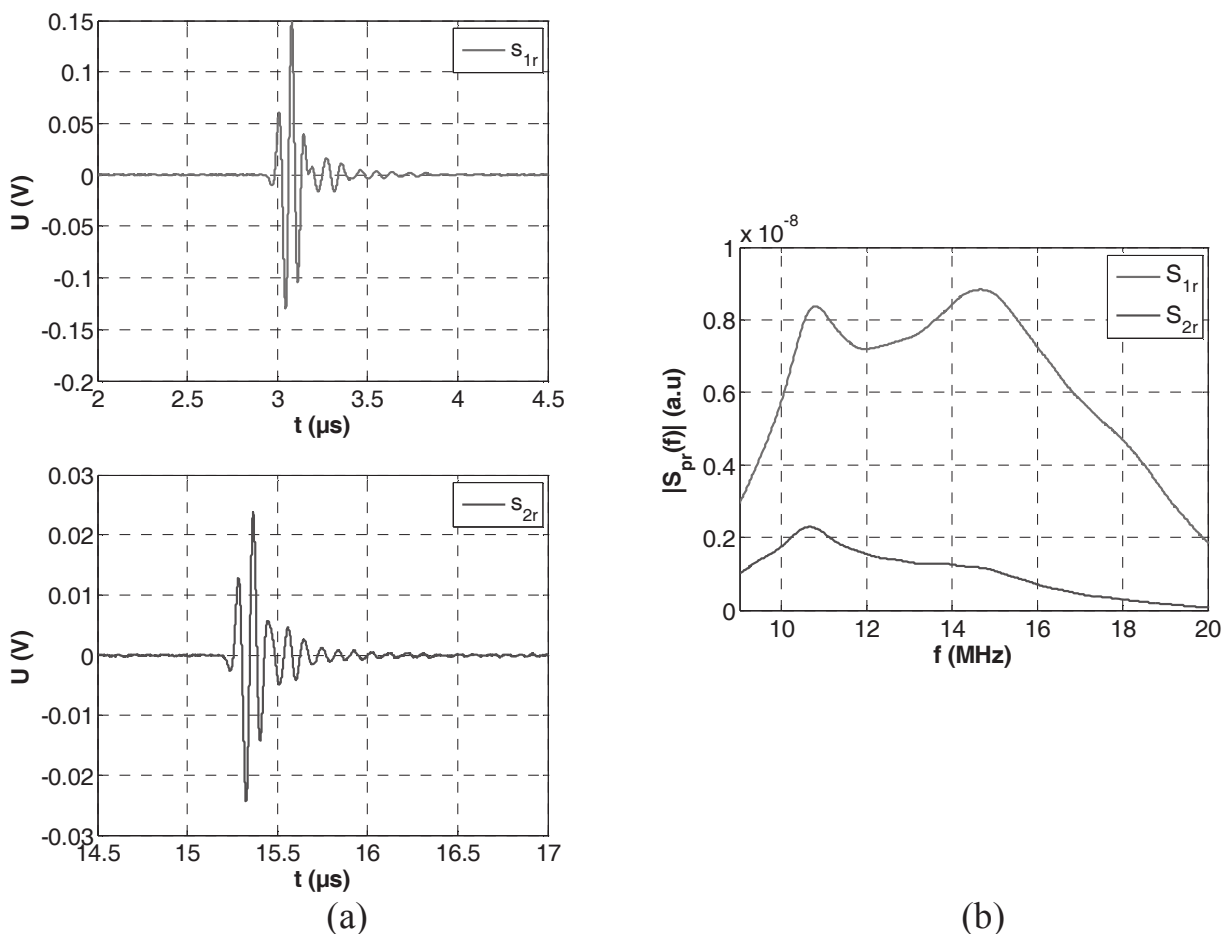


Figure 2. (a) Échos $s_{1r}(t)$ et $s_{2r}(t)$ et (b) spectres $S_{1r}(f)$ et $S_{2r}(f)$, respectivement après un et deux allers-retours dans l'huile silicone

2.2. Théorie

En tenant compte des réflexions aux interfaces dans la structure tri-couche, la fonction de transfert $T(f) = S_{2r}(f)/S_{1r}(f)$ s'écrit :

$$T(f) = e^{+j2\pi f \frac{2d_2}{c_L(f)}} e^{-2d_2 \cdot \alpha_L(f)} R_{21} R_{23} \quad (1)$$

avec R_{21} et R_{23} respectivement les coefficients de réflexion du milieu 2 (huile) vers le milieu 1 (verre) et du milieu 2 vers le milieu 3 (aluminium). Ces coefficients de réflexion R_{pq} s'écrivent en fonction des impédances acoustiques des milieux d'indices p et q , résultant elles-mêmes du produit de la masse volumique ρ par la vitesse longitudinale c_L du milieu, respectivement $Z_p = \rho_p c_{L,p}$ et $Z_q = \rho_q c_{L,q}$:

$$R_{pq} = \frac{Z_q - Z_p}{Z_q + Z_p} \quad (2)$$

La vitesse c_L (équation (3)) est déterminée à partir de la phase $\phi(f) = \text{Arg}(T(f))$ et l'atténuation α_L (équation (4)) est déterminée à partir du module $|T(f)| = |S_{2r}(f)/S_{1r}(f)|$ de la fonction du transfert :

$$c_L(f) = 2\pi f \frac{2d_2}{\phi(f)} \quad (3)$$

$$\alpha_L(f) = -\frac{1}{2d_2} \ln \left(\left| \frac{T(f)}{R_{21} \cdot R_{23}} \right| \right) \quad (4)$$

où d_2 est l'épaisseur du fluide à caractériser.

Au regard des distances de propagation, l'effet de la diffraction $D(f)$ n'est pas significatif dans cette configuration expérimentale. En effet, la fonction de correction de diffraction $D'(f)$ a été évaluée numériquement (Samet *et al.*, 2012). Ainsi, le module $|D'(f)|$ et la phase $\Phi_{D'}$ relatifs à la fonction de correction de diffraction $D'(f)$ ne sont pas significatifs avec respectivement : $0,995 \leq |D'(f)| \leq 1,03$ et $0 \leq \Phi_{D'}/\Phi_T(f) \leq 0,0001$.

3. Résultats

3.1. Vitesses

Les trois références d'huile silicone peuvent être distinguées par leur vitesse et considérées comme non dispersives dans la bande de 9 à 18 MHz (vitesse constante) ce qui permet de considérer les coefficients de réflexion liés à c_L comme constants.

Le tableau 1 donne la vitesse (équation (3)) pour les trois références d'huile silicone moyennée dans la bande de 9 à 18 MHz et sur dix mesures.

3.2. Atténuation

L'atténuation en fonction de la fréquence des trois références d'huile silicone peut être ajustée par une fonction puissance (He, 1999) :

$$\alpha_L(f) = \alpha_0 f^n \quad (5)$$

où α_0 et n sont deux coefficients caractéristiques du milieu fluide.

L'expérience a démontré que l'identification de α_0 et n (Samet *et al.*, 2012) permet de discriminer la viscosité dynamique η . Cette méthode permet d'envisager de différencier la viscosité entre deux états de polymérisation, cependant sans être en mesure d'attribuer une valeur précise à la viscosité.

Tableau 1. Mesures de vitesse c_L (m/s) et coefficients liés à l'ajustement de l'atténuation en loi de puissance $\alpha_L = \alpha_0 f^n$, avec α_0 (Np.m⁻¹.MHz⁻ⁿ) et f (MHz) dans la bande de 9 à 18 MHz, relevés pour les trois références d'huile : 47V20, 47V100, 47V1000

Référence	47V20	47V100	47V1000
c_L (m/s)	976	978	987
α_0 (Np.m ⁻¹ .MHz ⁻ⁿ)	0,70	2,00	2,31
n	1,87	1,62	1,60

c_L : vitesse (m/s) ; α_0 : atténuation relative à la fréquence de puissance n (Np.m⁻¹.MHz⁻ⁿ) ; n : terme de puissance en fréquence.

4. Détection des tailles et vitesses de bulles dans un milieu visqueux

4.1. Dispositif

Le dispositif expérimental permet de confronter deux méthodes expérimentales (ultrasonore et vidéo) afin de mesurer la vitesse et la taille des bulles d'air en montée libre dans un canal rectangulaire fermé (figure 3). Le canal est une structure tri-couche (PMMA/huile/PMMA) équivalente à celle décrite dans la première partie qui respecte la structure du moule RTM. Les plaques en PMMA assurent la visibilité et le suivi de bulles se fait au moyen d'une caméra à 30 images/s. Un transducteur multi-élément est placé en face et à la même hauteur que la caméra afin de pouvoir enregistrer simultanément des acquisitions ultrasonores lors du passage de la bulle

(Samet *et al.*, 2011). Le transducteur multi-élément utilisé comporte 128 éléments de longueur 7 mm et de largeur 0,25 mm séparés par une distance inter-élément de 0,25 mm soit un pas (pitch) de 0,5 mm. Afin d'améliorer la résolution, une loi focale de 32 éléments focalisant au fond du fluide a été utilisée. Le balayage est effectué avec une fréquence d'acquisition $f_{acq} = 20$ Hz, et une durée d'acquisition $T_{acq} = 10$ s.

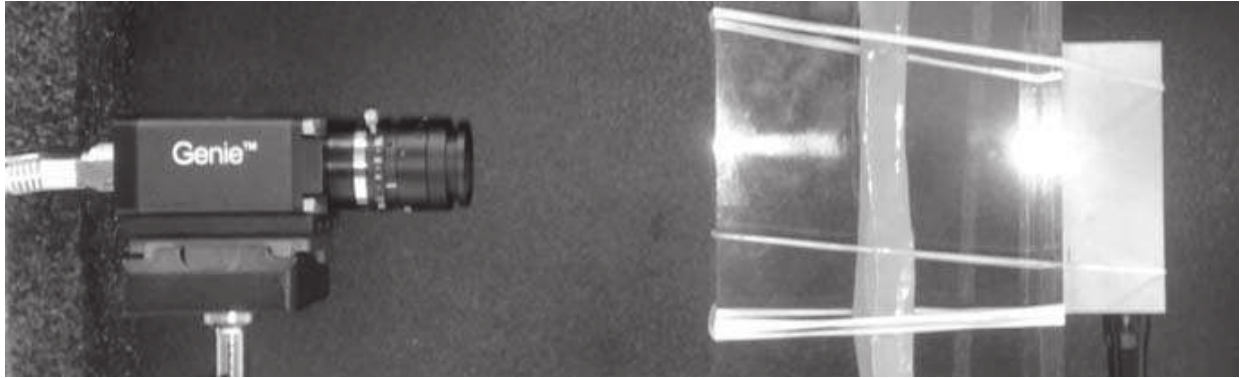


Figure 3. Dispositif expérimental de suivi des bulles (Samet *et al.*, 2011)

4.2. Théorie

4.2.1. Vitesse de bulle

La vitesse d'une bulle nécessite d'avoir à la fois les informations de position et de date. L'utilisation du transducteur multi-élément (Samet *et al.*, 2011) décrit précédemment permet d'obtenir une matrice de données à trois dimensions : $s(t, x_{lf}, t_{acq})$. Chaque dimension correspond respectivement au temps de propagation d'aller-retour $t \in [0 ; t_{max}]$, à la position de la loi focale $x_{lf} \in [0 ; X_{lf}]$ et à la date d'acquisition $t_{acq} \in [0 ; T_{acq}]$. Pour chaque A-scan (signal (temps, amplitude)), l'amplitude maximale est relevée sur l'écho d'aller-retour dans la couche fluide (ou air). On obtient ainsi une cartographie (x_{lf}, t_{acq}) de dimension $N_{lf} \times N_{acq}$, constituant le C-scan (figure 4a). La position est celle de la loi focale, sur une hauteur totale $X_{lf} = 48$ mm, ce qui correspond aux positions balayées par les $N_{lf} = 97$ lois focales de $N = 32$ éléments générées successivement sur les 128 éléments. La date est déterminée par celle d'acquisition, avec une durée totale des acquisitions enregistrées $T_{acq} = 10$ s pour un nombre d'acquisition fixé à $N_{acq} = 201$ acquisitions.

Une estimation de la vitesse de déplacement peut être réalisée sur le C-scan (équation (8)) résultant d'une acquisition (figure 4), aux erreurs d'échantillonnages spatial et temporel près. Les pas d'échantillonnages spatial et temporel sont, dans cette configuration donnés respectivement par $dx_{lf} = 0,5$ mm et $dt_{acq} = 0,05$ s. Ces valeurs ont une incidence directe sur la qualité de la mesure de vitesse *via* un relevé (x_{lf}, t_{acq}) . L'expression de la vitesse effective v_{eff} recherchée est fonction des coordonnées position-temps $(x_{lf,1}, t_{acq,1})$ et $(x_{lf,2}, t_{acq,2})$ des points considérés, soit $v_{eff} = \Delta x_{lf} / \Delta t_{acq}$. En considérant la précision de la mesure de position de loi focale et de date d'acquisition, on a :

$$v_{eff} = \frac{x_{lf,2} \pm (dx_{lf} / 2) - x_{lf,1} \mp (dx_{lf} / 2)}{t_{acq,2} \pm (dt_{acq} / 2) - t_{acq,1} \mp (dt_{acq} / 2)} \quad (6)$$

soit au premier ordre :

$$v_{eff} \approx \frac{\Delta x_{lf}}{\Delta t_{acq}} \pm \frac{dx_{lf}}{\Delta t_{acq}} \pm \frac{(\Delta x_{lf} \pm dx_{lf}) \cdot dt_{acq}}{(\Delta t_{acq})^2} \approx \left(1 \pm \frac{dt_{acq}}{\Delta t_{acq}} \right) \left(\frac{\Delta x_{lf} \pm dx_{lf}}{\Delta t_{acq}} \right) \quad (7)$$

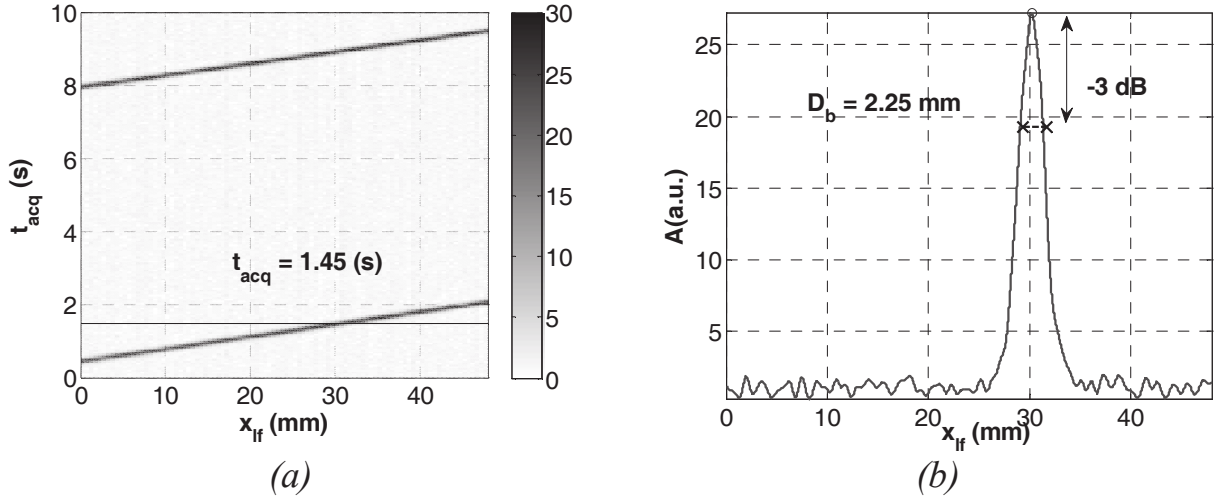


Figure 4. Méthode ultrasonore pour la détermination de la taille d'une bulle d'air
(a) C-scan et (b) acquisition à $t_{acq} = 1,45$ s

La vitesse effective $v_{eff} \approx 31 \pm 0,34$ mm/s que l'on cherche à mesurer dépend du sens d'évolution de la bulle par rapport au sens de balayage. Effectivement, si la bulle évolue dans le même sens que le sens de balayage, la vitesse effective nommée vitesse avant v_{av} ($> v_{eff}$) s'écrit comme suit :

$$v_{av} = \frac{(N_{lf} - 1) \cdot dx_{lf}}{t_{acq,2} - t_{acq,1} - \frac{N_{lf}}{N_{lf} + 1} dt_{acq}} \quad (8)$$

Sinon, elle est nommée vitesse arrière v_{ar} ($< v_{eff}$) et s'écrit :

$$v_{ar} = \frac{(N_{lf} - 1) \cdot dx_{lf}}{t_{acq,2} - t_{acq,1} + \frac{N_{lf}}{N_{lf} + 1} dt_{acq}} \quad (9)$$

Le terme $N_{lf}/(N_{lf} + 1)$, compris entre 1/2 et 1, vient, selon le cas (équations (8) et (9)), s'ajouter ou se soustraire du temps d'acquisition entre deux positions

différentes. Par la suite, seul le sens avant est utilisé et toutes les mesures sont effectuées dans les mêmes conditions.

4.2.2. Modèle théorique

Comme l'a montré Hadamard (1911), la force de frottement visqueux est liée aux viscosités du liquide η_l et du gaz η_g , avec rapport de viscosité $\alpha = \eta_l/\eta_g$, et le coefficient $A = (1+(2\alpha/3))/(1+\alpha)$ modifiant le coefficient de traînée C_g :

$$F_\eta = \frac{1}{2} \rho_l C_g S v_b^2 \quad (10)$$

avec ρ_l la masse volumique du fluide visqueux dans lequel la bulle s'écoule, S la section de la bulle de diamètre D_b et v_b la vitesse de la bulle. Un développement du coefficient de traînée C_g en fonction du nombre de Reynolds de la bulle en milieu fluide visqueux $R_e = \rho_l v_b D_b / \eta_l$ est, selon Keh et Shiau (2000) :

$$C_g = \frac{24}{R_e} A \left(1 + \frac{3}{8} A^2 R_e + \frac{9}{40} R_e^2 \ln(R_e) + o(R_e^2) \right) \quad (11)$$

En substituant l'expression de C_g (équation (11)) dans celle de la force de frottement visqueux F_η (équation (10)), puis en exprimant le principe fondamental de la dynamique, on obtient une équation différentielle. En substituant R_e par son expression en fonction de v_b , la solution physique à cette équation différentielle est déterminée par itérations successives avec la résolution de :

$$\frac{dv_b}{dt} = K_0 + K_1 v_b + K_2 v_b^2 + K_3 v_b^3 \cdot \ln(K_{\ln} v_b) \quad (12)$$

avec K_0, K_1, K_2, K_3 et K_{\ln} des constantes liées aux autres paramètres physiques et dimensionnels, en particulier du diamètre de la bulle D_b .

Comme l'ont montré Haberman et Sayre (1958) (équation (75), p. 32), une correction des effets de bord est effectuée avec une pondération de la force de frottement visqueux (équation (10)) par un coefficient K_w .

Cette correction dépend du rapport de viscosité $\alpha = \eta_l/\eta_g$, et du rapport de diamètre de bulle D_b relativement à celui du conduit D_c , soit $\lambda = D_b/D_c$. Dans le cas d'une bulle d'air dans un fluide visqueux, on peut considérer $\alpha \gg 1$ et le coefficient de correction des effets de bord K_w devient :

$$K_w = \frac{1 + 1,1379\lambda^5}{1 - 1,4033\lambda + 1,1379\lambda^5 - 0,72603\lambda^6} \quad (13)$$

Dans notre configuration expérimentale, la section dans laquelle la bulle s'écoule est de géométrie rectangulaire de dimensions (a, b) ; il convient donc d'établir un

rayon de conduite équivalent R_c . En cherchant à déterminer la distance moyenne du bord de la bulle jusqu'à la paroi par une approche intégrale, on obtient :

$$R_{c,int} = \frac{2}{\pi} \left[\text{Arctan} \left(\frac{a}{b} \right) \cdot R_{c,a} + \text{Arctan} \left(\frac{b}{a} \right) \cdot R_{c,b} \right] \quad (14)$$

avec les rayons moyens équivalents $R_{c,a}$ et $R_{c,b}$:

$$R_{c,a} = \frac{b}{4} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2} + \frac{b}{a} \ln \left(\frac{a}{b} + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2} \right) \right) \quad (15)$$

$$R_{c,b} = \frac{a}{4} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{b}{a} \right)^2} + \frac{a}{b} \ln \left(\frac{b}{a} + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a} \right)^2} \right) \right) \quad (16)$$

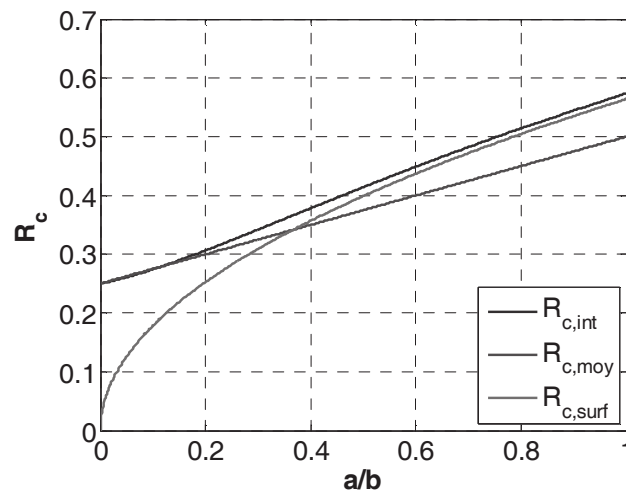


Figure 5. Rayon de conduite équivalent en fonction du rapport b/a selon l'approche intégrale $R_{c,int}$ (équation (14)), selon la valeur moyenne $R_{c,moy}$, et selon l'équivalence de la surface $R_{c,surf}$

Dans notre configuration expérimentale (figure 5), la conduite rectangulaire de dimensions $a = 6$ mm et $b = 42$ mm donne $R_c \approx 12,1$ mm (équation (14)). Cette valeur est très proche de la valeur moyenne $R_{c,moy} = (a+b)/4 = 12$ mm, mais très éloignée de la valeur par équivalence des surfaces $R_{c,surf} = (ab/\pi)^{1/2}$ comme l'illustre la figure 5. Pour une bulle de diamètre $D_b = 2R_b = 3$ mm, on obtient $\lambda = R_b/R_c = 0,262$, ce qui donne (équation (13)) une correction d'effet de bord $K_w = 1,535$.

4.3. Résultats

Les mesures de la vitesse ont été effectuées, dans le cas de la méthode ultrasonore, selon l'équation (8) pour quatre bulles de tailles différentes. Le diamètre de la bulle est estimé à partir du C-scan (figure 4b) à un instant donné t_{acq} à -3 dB du maximum du signal réfléchi sur la bulle. La valeur du diamètre affichée est une moyenne sur plusieurs valeurs à des instants t_{acq} différents.

La vitesse v_b de la bulle étant fonction de son diamètre D_b (équation (12)), l'évolution des vitesses de bulles est tracée en fonction de leurs diamètres selon le modèle théorique (Keh, Shiau, 2000) et pour les deux méthodes optique et ultrasonore (figure 6). La correction de l'effet de bord selon Haberman et Sayre (1958) permet de recalibrer les courbes théoriques (milieu infini) dans le cas d'un milieu fini, en cohérence avec les courbes expérimentales (vidéo et ultrasons).

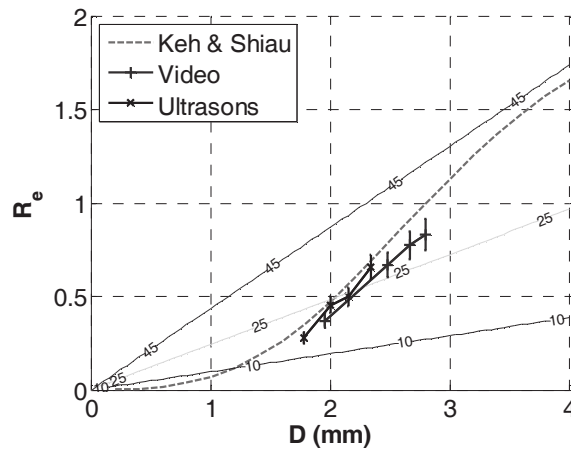


Figure 6. Comparaison des mesures expérimentales par ultrasons ($-x-$) et vidéo ($-+-$) avec le modèle théorique (Keh, Shiau, 2000) ($---$). Mesures effectuées en utilisant des bulles calibrées de diamètre $0 \leq D_b \leq 4$ mm et de vitesse $10 \leq v_b \leq 45$ mm/s pour des nombres de Reynolds faibles $0 \leq Re \leq 2$

5. Application sur une préforme fibreuse immergée dans un fluide visqueux

5.1. Détection de bulle

Le dispositif expérimental décrit précédemment permet d'observer les différents plis d'une préforme fibreuse (figure 7a). Par différenciation avec la composante statique du signal, le mouvement d'une bulle est détecté et sa vitesse peut être évaluée (figure 7b).

$$s_B(d, x_{fl}) = s(d, x_{fl}, t_{acq} = 5s) = s_{B,static}(d, x_{fl}) + s_{B,dynamic}(d, x_{fl}) \quad (17)$$

avec $d = c_L \cdot t/2$ correspondant à la profondeur de l'écho relevé à la date t .

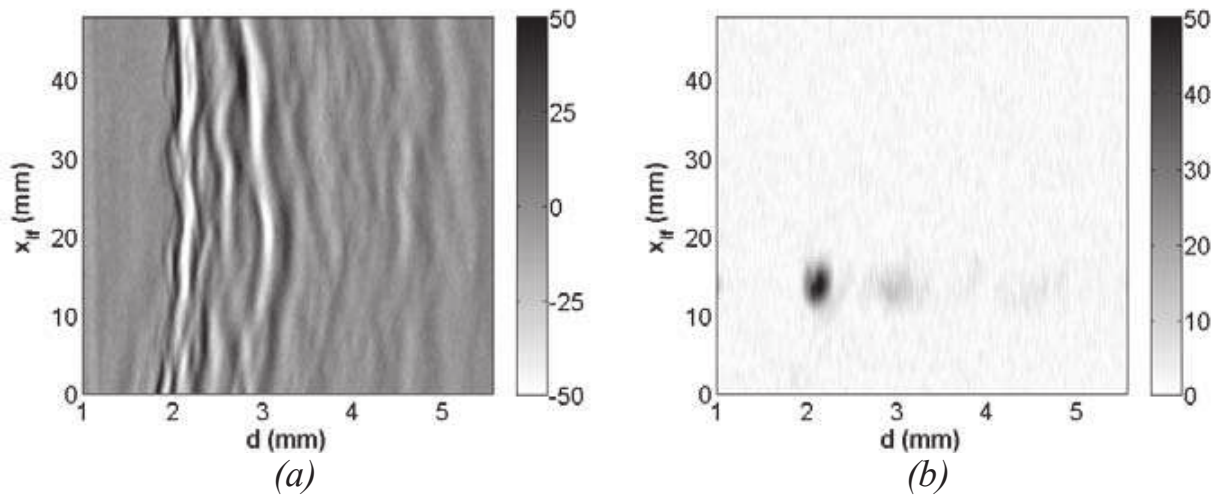


Figure 7. Détection et localisation d'une bulle d'air dans une matrice fibreuse (trois plis de fibre de verre) en présence d'un fluide visqueux à la date $t_{acq} = 5$ s : (a) B-scan, localisation des plis en profondeur, (b) B-scan, localisation de bulle en profondeur par soustraction des échos statiques

5.2. Diamètre et vitesse de bulle

La bulle est en mouvement entre les plis avec une vitesse quasi uniforme (figure 8). Cependant, on peut distinguer des variations de vitesse localement, ainsi qu'une variation de l'amplitude du signal rétrodiffusé. Cela est lié à la déformation de la bulle qui s'adapte au passage du chemin qu'elle se fraye entre les plis. Les valeurs moyennes de la vitesse $v_b \approx 10$ mm/s et le diamètre $D_b \approx 3$ mm de la bulle ont pu être identifiés en fonction de la position x_{if} .

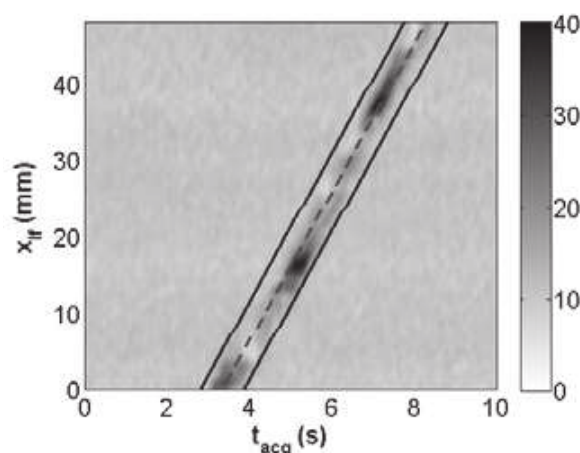


Figure 8. Détection de la position, de la vitesse et du diamètre instantanés de la bulle d'air en mouvement dans une matrice fibreuse (trois plis de fibre de verre) en présence d'un fluide visqueux : C-scan, localisation spatiotemporelle et détermination de la vitesse moyenne de la bulle (trait pointillé)

6. Conclusion

Dans le cadre de cette étude, différentes grandeurs du matériau à caractériser ont pu être mesurées. Des milieux fluides de viscosités différentes ont été différenciés *via* les paramètres d'ajustement de l'atténuation ultrasonore. En perspective, l'atténuation et la vitesse effectives peuvent être reliées à l'état de polymérisation d'une résine. Ensuite, le cas d'une bulle en déplacement dans un fluide visqueux a été étudié et validé expérimentalement permettant de relier le diamètre D_b à la vitesse v_b d'une bulle d'air en remontée gravitationnelle. Par ailleurs, le dispositif ultrasonore a été mis en œuvre pour faire de l'imagerie de plis immergés dans un fluide visqueux. Cette dernière technique a permis, par soustraction de la composante statique des signaux, de faire ressortir le signal rétrodiffusé par une bulle en déplacement entre des plis du milieu fibreux. Les perspectives portent sur l'amélioration de la précision de mesure et sur l'étude de nouvelles configurations, telle que celle en incidence oblique, qui permettrait d'exploiter l'effet Doppler associé au mouvement de bulles.

Bibliographie

- Haberman W., Sayre R.M. (1958, Octobre). *Motion of rigid and fluid spheres in stationary and moving liquids inside cylindrical tubes*. Report 1143, NS 715-102.
- Hadamard J. (1911). Mouvement permanent lent d'une sphère liquide et visqueuse dans un liquide visqueux. *CR Acad. Sci.*, vol. 152, p. 1735-1738.
- He P. (1999). Experimental verification of models for determining dispersion from attenuation. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control*, vol. 46, p. 706-714.
- Keh H., Shiau S. (2000). Effects of inertia on the slow motion of aerosol particles. *Chem. Eng.Sci.*, vol. 55, p. 4415-4421.
- Samet N., Marechal P., Duflo H. (2011). Ultrasound monitoring of bubble size and velocity in a fluid model. *NDT&E*, vol. 44, p. 621-627.
- Samet N., Marechal P., et Duflo H. (2012). Ultrasonic characterization of a fluid layer using a broadband transducer. *Ultrasonics*, vol. 52, p. 427-434.