



HAL
open science

Cartographie et caractérisation acoustiques des matériaux composites : application à l'évaluation du taux volumique de porosité dans un matériau composite RTM

Ngoc Tan Duong

► **To cite this version:**

Ngoc Tan Duong. Cartographie et caractérisation acoustiques des matériaux composites : application à l'évaluation du taux volumique de porosité dans un matériau composite RTM. Matériaux. Université du Havre, 2015. Français. NNT : 2015LEHA0023 . tel-01412178

HAL Id: tel-01412178

<https://theses.hal.science/tel-01412178>

Submitted on 8 Dec 2016

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Université du Havre, École Doctorale S.P.M.I.I.

Discipline : SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

Spécialité : Acoustique

Présentée et soutenue publiquement le

16 Décembre 2015

Par

Ngoc Tan DUONG

Cartographie et caractérisation acoustiques des matériaux composites : Application à l'évaluation du taux volumique de porosité dans un matériau composite RTM.

JURY

MM	Gilles DESPAUX	Professeur, Université de Montpellier II	Rapporteur
	Joseph MOYSAN	Professeur, Université d'Aix-Marseille	Rapporteur
	Marc LETHIECQ	Professeur, Université de Tours	Examineur
	Jean DUCLOS	Professeur Émérite, Université du Havre	Examineur
	Pascal PAREIGE	Professeur, Université du Havre	Examineur
	Laurent BIZET	Maître de Conférences, Université du Havre	Examineur
	André BAILLARD	Docteur, Aircelle, Gonfreville-l'Orcher	Examineur

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été effectué dans le groupe Ondes Acoustiques au Laboratoire Ondes et Milieux Complexes de l'Université du Havre. Je tiens à remercier tout d'abord mes directeurs de thèse Messieurs Pascal PAREIGE et Jean DUCLOS de m'avoir donné l'opportunité de travailler dans un sujet très intéressant qui m'a énormément appris et dans une ambiance de travail non seulement professionnelle mais aussi très agréable. Merci pour leur patience, leur orientation et le temps consacré au suivi de ces travaux. Je remercie également Monsieur Laurent BIZET pour son encadrement exemplaire et ses précieux conseils.

Je souhaite remercier Messieurs Joseph MOYSAN, Professeur à l'Université d'Aix Marseille et Gilles DESPAUX, Professeur à l'Université de Montpellier d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse et pour leurs remarques très constructives.

Je tiens ensuite à remercier également Messieurs Marc LETHIECQ, Professeur à l'Université de Tour et André BAILLARD, Docteur-Ingénieur chez Aircelle (groupe Safran) pour leur acceptation de juger ce travail.

Je tiens plus particulièrement à remercier Cédric LE BER pour l'élaboration des plaques composites RTM.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des membres du groupe Ondes Acoustiques pour leurs encouragements et pour les moments enrichissants partagés.

Merci enfin mes parents, ma femme et mon fils pour tout ce qu'ils m'apportent.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 :.....	5
Propagation ultrasonore en milieu viscoélastique	5
<i>1.1 Propagation en milieu infini</i>	5
1.1.1 Notion d'élasticité	5
1.1.2 Equation de propagation dans le cas d'un matériau viscoélastique isotrope.....	6
1.1.3 Atténuation et vitesse de phase des ondes	8
<i>1.2 Caractérisation en transmission et en réflexion d'une plaque à faces parallèles..</i>	11
1.2.1 Coefficient de réflexion et de transmission aux interfaces fluide/solide et solide/fluide 11	11
1.2.2 Mesure de l'atténuation en un point par réflexion.....	14
1.2.3 Mesure de l'atténuation par double transmission	16
1.2.4 Mesure de l'impédance de surface	18
<i>1.3 Simulation de signaux</i>	20
1.3.1 Coefficients de transmission et de réflexion d'une plaque viscoélastique	21
1.3.2 Principe de la simulation	26
1.3.3 Résultats obtenus avec la plaque plexiglas.....	27
1.3.4 Modélisation d'une plaque composite.....	30
<i>1.4 Conclusion</i>	32
Chapitre 2 : Etude des transducteurs	33
<i>2.1 Etude théorique.....</i>	33
2.1.1 Principe de calcul	33
2.1.2 Transducteur plan	34
2.1.3 Transducteur focalisant	36
2.1.4 Transducteur multi éléments	38
2.1.5 Résultats obtenus	42
<i>2.2 Etude expérimentale</i>	52

2.2.2	Mesure de l'atténuation	54
2.3	<i>Effets de la diffraction</i>	55
2.4	<i>Conclusion</i>	57
Chapitre 3 : Plaques carbone-époxy étudiées.....		58
3.1	<i>Matériaux composites</i>	58
3.1.1	Généralités	58
3.1.2	Application dans l'aéronautique	60
3.1.3	Les composites à renfort de fibres continues.....	60
3.1.4	Mise en œuvre de pré imprégnée.....	67
3.1.5	Mise en œuvre par le procédé RTM	69
3.2	<i>Porosité dans les matériaux composites</i>	71
3.2.1	Porosité	71
3.2.2	Les types de défaut dans la plaque composite RTM	72
3.3	<i>Production de plaques RTM</i>	72
3.3.1	Matériaux de l'étude	73
3.3.2	Viscosité	74
3.3.3	Nombre capillaire	75
3.3.4	Equipements utilisés	76
3.4	<i>Conclusion</i>	79
Chapitre 4 : Cartographie ultrasonore d'une plaque de composite RTM.....		80
4.1	<i>Objectifs</i>	80
4.2	<i>Définition des différents scans</i>	80
4.2.1	A-scans	80
4.2.2	B-scans	81
4.2.3	C-scans	81
4.3	<i>Cartographie de l'amplitude de l'écho réfléchi par une plaque de composite</i>	81
4.3.1	Résultats à 15 dB	83

4.3.2	Résultats à 30 dB	85
4.4	<i>Cartographie de l'atténuation des ondes ultrasonores par une plaque de composite RTM 87</i>	
4.4.1	Technique expérimentale.....	87
4.4.2	Cas de la plaque RTM1012	90
4.4.3	Cas des plaques RTM11xx.....	94
4.4.4	Cartographies des plaques RTM11xx	95
4.5	<i>Exploitation des résultats</i>	101
4.5.1	Profils de l'évolution de l'atténuation selon le sens d'injection.....	101
4.5.2	Résultats obtenus	102
4.6	<i>Conclusions.....</i>	104
Chapitre 5	: Relation entre porosité et atténuation d'une plaque composite	106
5.1	<i>Principe de la tomographie rayon X</i>	106
5.2	<i>Relation entre porosité moyenne et atténuation ultrasonore moyenne mesurée à l'aide transducteurs plans sur des échantillons d'un nombre de plis différents</i>	107
5.2.1	Mesure de porosité	107
5.2.2	Mesure de l'atténuation	109
5.3	<i>Analyse des données de la tomographie X de la plaque RTM1012</i>	116
5.3.1	Détermination du seuillage de l'image tomographique.....	117
5.3.2	Analyses des bulles de l'image tridimensionnelle RTM1012	122
5.3.3	Conclusion.....	127
5.4	<i>Relation entre porosité et atténuation ultrasonore mesurée à l'aide de transducteurs focalisant sur l'échantillon RTM1012.....</i>	129
5.4.1	Objectifs	129
5.4.2	Relation entre porosité et atténuation en fonction de la fréquence.....	131
5.5	<i>Relation entre porosité et atténuation en fonction de l'amplitude</i>	136
5.6	<i>Conclusion</i>	142
Chapitre 6	: Imagerie 3D des défauts.....	143

<i>6.1 Principe</i>	<i>143</i>
<i>6.2 Mise en œuvre</i>	<i>144</i>
<i>6.3 Validation de la méthode</i>	<i>150</i>
<i>6.4 Résultats de la plaque pré imprégnée B01</i>	<i>152</i>
<i>6.5 Résultats de la plaque RTM1012</i>	<i>157</i>
<i>6.6 Conclusion</i>	<i>161</i>
Conclusion et perspectives	162
Bibliographie	165

Introduction générale

Les matériaux composites ont un rôle grandissant dans les domaines scientifiques et industriels surtout ceux liés à l'aéronautique. Plusieurs méthodes sont développées pour la production de ces matériaux composites. Parmi celles-ci la méthode Resin Transfer Molding (RTM) est encore aujourd'hui très utilisée car elle présente de nombreux avantages. Cette méthode permet de réaliser des plaques composites de grandes dimensions et de formes complexes. Pourtant, le procédé d'élaboration des plaques RTM induit la création de porosité. Ceci provient de la technique elle-même qui consiste à injecter sous pression de la résine chaude dans un moule où sont disposés des tissus de fibres. La porosité, lorsque son taux est élevé (quelques %) provoque une diminution des propriétés mécaniques du matériau au cours du cycle de vie de celui-ci [1]. La détermination et la maîtrise du taux de la porosité deviennent indispensables. Actuellement, il existe certaines méthodes efficaces pour déterminer ce taux de porosité, telles que la tomographie à rayon X ou l'attaque acide [2]. Mais, ces méthodes sont coûteuses ou destructives et dans tous les cas elles ne sont pas adaptées à un contrôle en ligne des pièces composites.

Parmi les techniques d'évaluation non destructive qui peuvent être envisagées [3 4], la technique basée sur la propagation d'ondes ultrasonores est une bonne alternative. Cette méthode, sans être exacte, présente un bon compromis entre la qualité d'inspection et la facilité de mise en œuvre. Elle permet de contrôler les pièces composites sans les endommager, sans modifier les propriétés des matériaux et reste sans danger pour les utilisateurs. Classiquement, les ondes sont générées par des transducteurs à couplage direct (avec gel) ou à couplage indirect (jet d'eau ou immersion) [5 6]. Le transducteur de contact direct a une meilleure dynamique mais il est plus difficile d'assurer un bon contrôle du couplage et, donc une bonne reproductibilité des mesures, comparativement au transducteur à couplage indirect. Cette dernière technique nécessite quant à elle soit un système à jet d'eau soit une cuve d'immersion. Les transducteurs utilisés peuvent être de type plan ou focalisant. Le transducteur mono élément plan est souvent utilisé en contrôle classique. Il effectue une mesure moyennée sur la surface de la plaque insonnée par le faisceau qui est de l'ordre de grandeur de la surface du transducteur. Les transducteurs focalisants permettent d'inspecter un volume avec une meilleure résolution spatiale, dépendant de la taille de la tache focale du transducteur utilisé. En parallèle à la technologie mono élément, il existe celle des multi-éléments (Phased Array). Les transducteurs sont constitués d'un grand nombre des petits

éléments piézoélectriques juxtaposés [7]. L'intérêt de ce transducteur focalisant est l'étendue de sa surface d'inspection, sa rapidité de mesure et une tache focale réglable par ajustement de certains paramètres de configuration, telles que la distance focale et le nombre d'éléments actifs, les lois de retard, etc...

Le but principal de ce travail est tout d'abord d'effectuer des cartographies du taux de la porosité de plaques de composites RTM à partir de mesures acoustiques. Les mesures sont réalisées tant par des transducteurs plans et focalisants que mono ou multi-éléments. Il s'agit alors d'établir une relation entre le taux de porosité et un paramètre de l'onde ultrasonore. Le paramètre retenu est l'atténuation ultrasonore. Le taux de porosité a été rendu variable au sein d'un même échantillon composite par un choix judicieux des paramètres d'injection. Ces échantillons sont réalisés au laboratoire à partir d'un banc d'élaboration et suivant un protocole du type de ceux utilisés dans l'industrie.

Secondairement la mise au point d'une méthode acoustique de localisation et d'identification d'inhomogénéités internes à une plaque de composite a été entamée. L'objectif est de fournir une image tomographique à partir d'une insonation ultrasonore comme la tomographie à rayons X le permet.

Dans tous les cas on ne s'intéresse qu'aux pores inter torons de fibre (100 μ m et plus) et pas aux pores intra torons de fibre qui sont 100 fois plus petites.

Ce travail de thèse est présenté dans un manuscrit composé six chapitres.

Le chapitre 1 rappelle dans un premier temps la théorie de la propagation ultrasonore en milieux viscoélastique. On présente tout d'abord les lois de comportement d'un milieu homogène linéaire isotrope viscoélastique. Les relations entre les constantes de viscoélasticité et l'atténuation des ondes ultrasonores sont établies. En tenant compte de la dispersion et de l'absorption, l'atténuation suit une loi qui est une fonction d'une puissance de la fréquence. La relation entre atténuation et vitesse est construite par les modèles de O'Donnell et Szabo. On s'intéresse également aux principes de mesure en transmission et réflexion de la vitesse et de l'atténuation d'une plaque à faces parallèles. Pour finir, la modélisation d'une plaque composite pré imprégné termine le chapitre 1.

Dans le second chapitre, on établit les expressions des champs de pression des différents transducteurs qui seront utilisés : plan, focalisant mono élément et multi éléments. La simulation numérique des champs de pression et des taches focales des différents

transducteurs permettent d'apprécier a priori leurs conditions d'utilisation et les performances qu'on peut en escompter. Ces études sont vérifiées en partie par des relevés expérimentaux effectués sur des matériaux homogènes de référence.

Le chapitre 3 présente les matériaux composites en général et certaines notions de base nécessaires à la perception du problème acoustique à traiter. La structure et les constituants des matériaux analysés sont présentés. Deux types d'élaboration des matériaux composites sont décrits dont principalement celui du procédé RTM. Les caractéristiques des divers types de porosités rencontrées au sein de ces matériaux après leur mise en œuvre sont exposées. Le matériel et le protocole d'élaboration des plaques composites par le procédé RTM au laboratoire sont présentés.

Le chapitre 4 est consacré à la présentation des dispositifs expérimentaux mis au point et utilisés pour les mesures acoustiques. Les protocoles de mesure sont décrits. Les signaux mesurés sont présentés. La prise en considération des amplitudes des échos ou de l'atténuation des ondes est envisagée. L'atténuation est calculée suivant deux manières qui sont discutées. La première est couteuse en temps de calcul et donne des résultats en fonction de la fréquence. La seconde, plus rapide, donne une atténuation indépendante de la fréquence. L'exploitation de ces signaux est proposée sous la forme d'image 2D (deux dimensions) en niveaux de gris). Des cartographies acoustiques donnent une image reflétant le taux de porosité des plaques composites. Les profils de l'atténuation suivant le sens de l'injection de la résine sont obtenus et permettent un lien entre la variation du taux de porosité et des paramètres d'injection.

Le chapitre 5 a pour but d'établir une relation entre la porosité d'un composite et l'atténuation d'une onde ultrasonore. Le taux de porosité est donné par des relevés tomographiques à rayons X. Deux lots de matériaux composites sont analysés.

Pour le premier lot l'atténuation est mesurée par un transducteur plan et par la méthode fréquentielle. Les grandeurs comparées sont des valeurs moyennes tant de la porosité que de l'atténuation sur des volumes d'environ 1500 mm^3 . Les échantillons de ce lot diffèrent par le nombre de plis de fibre dont ils sont constitués. Les résultats obtenus sont discutés.

Pour le second lot d'échantillons, des transducteurs focalisés ont été utilisés et l'atténuation est mesurée par les deux types de mesure précédemment décrites. Le volume de matériaux analysé est alors de l'ordre de quelques dizaines de mm^3 . La méthode d'exploitation des données tomographiques est décrite et la distribution de la porosité est finement analysée à

partir de ces données. Pour les deux méthodes une loi de corrélation entre porosité et atténuation est obtenue. Les résultats sont analysés et comparés.

Le chapitre 6 est consacré à la présentation des premiers résultats d'un traitement particulier des signaux ultrasonores que nous appelons «tomographie ultrasonore» . Certains auteurs ont déjà abordé ce sujet avec des méthodes complexes qui permettent de visualiser la structure interne du matériau composite sur des échantillons de taille réduite. La méthode proposée dans ce chapitre reste simple, comme celles ayant permis les cartographies, et repose sur le calcul de la réponse impulsionnelle. Dans un premier temps la méthode de traitement de la réponse impulsionnelle est présentée sur un signal simulé. La performance de la méthode à séparer des échos très proches est étudiée. Les résultats de la représentation tomographique ultrasonore de la structure d'un matériau composite pré imprégnée sont présentés. Les premiers résultats pour une plaque composite RTM sont obtenus. Une visualisation en 3D est obtenue et comparée à la tomographie à rayons X.

Une conclusion résume les principales avancées issues de ce travail.

Chapitre 1 :

Propagation ultrasonore en milieu viscoélastique

Dans ce premier chapitre nous rappelons quelques éléments de propagation ultrasonore dans un milieu viscoélastique homogène [8]. Nous utiliserons ces fondamentaux au calcul de la transmission et de la réflexion qui accompagnent le passage d'un milieu à un autre. Ensuite nous déterminerons la transmission à travers une plaque et la réflexion sur cette plaque. Enfin nous montrerons que ces phénomènes de réflexion et de transmission permettent la détermination de l'atténuation et de la vitesse de phase de la plaque [9 10]. Le calcul de ces grandeurs sera fait pour une plaque homogène et pour une plaque stratifiée.

Les milieux intervenants dans ce travail sont des composites qui ne peuvent être compris que si nous avons étudié préalablement un milieu viscoélastique. Ces matériaux ont un comportement intermédiaire entre celui d'un solide élastique idéal et celui d'un liquide visqueux. D'un point de vue mécanique, l'élasticité d'un matériau traduit sa capacité à conserver et à restituer de l'énergie après déformation tandis que la viscosité d'un matériau représente sa capacité à dissiper l'énergie. C'est-à-dire que la viscoélasticité comporte d'une part un comportement élastique et d'autre part un comportement visqueux provoquant une évolution des propriétés mécaniques du matériau dans le temps. Le matériau viscoélastique se trouve donc dans un état mécanique particulier où les comportements d'élasticité et de viscosité sont présents simultanément.

On considère que l'onde émise est plane d'extension infinie ce qui, nous le verrons plus loin, est presque réalisé avec des transducteurs « plans » [11].

1.1 Propagation en milieu infini

1.1.1 Notion d'élasticité

Par hypothèse, un solide anisotrope caractérisé par sa matrice des constantes de rigidité et traversé par une onde, est localement en mouvement. Cette matrice des rigidités C permet de relier les champs de déformation ε aux contraintes σ par la loi de Hooke sous la forme :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}; i, j, k \text{ et } l \in \{1, 2, 3\} \quad (1.1)$$

C_{ijkl} est un tenseur d'ordre 4. Dans le cas le plus général, il se compose de 21 coefficients indépendants mais ce nombre peut être diminué en fonction des propriétés de symétries présentées par le matériau considéré.

1.1.2 Equation de propagation dans le cas d'un matériau viscoélastique isotrope

L'équation du mouvement résulte de l'application du principe fondamental de la dynamique (sans les forces externes) avec ρ la masse volumique du matériau par:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{im}}{\partial x_m} \quad (1.2)$$

Dans cette expression le champ de déplacement particulaire est noté :

$$\vec{u} = \{u_1, u_2, u_3\} \quad (1.3)$$

Alors que le tenseur des déformations peut être écrit sous la forme :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.4)$$

En injectant la loi de Hooke dans l'équation de déplacement, on obtient l'équation de propagation dans un solide anisotrope :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \quad (1.5)$$

On obtient ainsi un système d'équations différentielles du second ordre. La solution de ce système de trois inconnues $\{u_1, u_2, u_3\}$ s'écrit sous la forme :

$$u_i = U_i e^{-i(k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3)} ; i \in \{1, 2, 3\} \quad (1.6)$$

Avec $\vec{U}(U_1, U_2, U_3)$ la polarisation de l'onde qui indique la direction du mouvement des particules, $\vec{k}(k_1, k_2, k_3)$ le vecteur d'onde donne la direction de propagation de l'onde et ω la pulsation qui est reliée avec la fréquence par $\omega = 2\pi f$.

Dans le cas d'un matériau viscoélastique isotrope possédant les mêmes propriétés dans toutes les directions, la matrice de rigidité peut être écrite sous la forme :

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix}$$

Les propriétés mécaniques élastiques d'un matériau isotrope sont déterminées par deux constantes d'élasticité indépendantes λ et μ . On pose classiquement :

$$C_{11} = 2\mu + \lambda; C_{12} = \lambda \quad (1.7)$$

Les constantes λ et μ sont appelées coefficients de Lamé.

Le tenseur de rigidité peut s'exprimer selon l'équation suivante :

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} ; i \text{ et } j \in \{1, 2, 3\} \quad (1.8)$$

δ_{ij} est le symbole de Kronecker défini par :

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (1.9)$$

En injectant la loi de Hooke isotrope dans l'équation de déplacement (1.2), on trouve l'équation de propagation dans un solide isotrope :

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_m}{\partial x_i \partial x_m} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_m \partial x_m} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}; i \in \{1, 2, 3\} \quad (1. 10)$$

Avec cette équation, on peut distinguer deux types d'ondes, une onde transversale T dont les particules se déplacent dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation et une onde longitudinale dont le déplacement est parallèle à la direction de propagation. Les ondes qui se propagent dans un solide viscoélastique isotrope infini selon deux modes L et T sont appelées ondes de volume. Les vitesses peuvent s'exprimer en fonction des coefficients de Lamé :

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{et} \quad c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1. 11)$$

1.1.3 Atténuation et vitesse de phase des ondes

1.1.3.1 Atténuation

Lorsqu'une onde ultrasonore se propage à travers un milieu viscoélastique, elle entraîne principalement des phénomènes de dispersion et d'atténuation dus aux caractéristiques élastiques et dissipatives du matériau. Dans les matériaux viscoélastiques, les coefficients d'élasticité sont complexes. Donc, pour résoudre le problème de propagation, on définit une constante de propagation complexe, $\gamma = \alpha + i\beta$. La partie réelle résume les propriétés d'amortissement du matériau tandis que la partie imaginaire est liée à la propagation. La solution harmonique est alors sous forme :

$$e^{-\gamma x} e^{i\omega t} = e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - \beta x)} \quad (1. 12)$$

Donc α est le coefficient de l'atténuation et β est la constante de propagation. Cette solution nous montre qu'une onde plane est atténuée de $e^{(-\alpha x)}$ lors d'une distance parcourue x .

En tenant compte du phénomène d'absorption, dû au comportement viscoélastique des matériaux, on ajoute un terme d'amortissement à la loi de comportement :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \eta_{ijkl} \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial t}; \quad i, j, k \text{ et } l \in \{1, 2, 3\} \quad (1. 13)$$

Les constantes de rigidité C_{ijkl} montrent les relations élastiques linéaires entre les contraintes et les déformations et les propriétés dissipatives du matériau sont reliées par les coefficients de viscosité η_{ijkl} . L'équation d'onde longitudinale unidimensionnelle peut donc séparer les parties réelle et imaginaire comme suite :

$$\begin{cases} C_{11}(\alpha^2 - \beta^2) - 2\alpha\beta\omega\eta_{11} = -\rho\omega^2 \\ (\alpha^2 - \beta^2)\omega\eta_{11} + 2\alpha\beta C_{11} = 0 \end{cases} \quad (1.14)$$

Ou bien :

$$\begin{cases} \alpha^2 - \beta^2 = \frac{-\rho\omega^2}{C_{11}\left(1 + \left(\frac{\omega\eta_{11}}{C_{11}}\right)^2\right)} \\ 2\alpha\beta = \frac{\rho\omega^3 \frac{\eta_{11}}{C_{11}}}{C_{11}\left(1 + \left(\frac{\omega\eta_{11}}{C_{11}}\right)^2\right)} \end{cases} \quad (1.15)$$

Ces équations décrivent des relations entre des propriétés des ondes acoustiques et des propriétés mécaniques du milieu propagé. Après les avoir résolues, on obtient l'atténuation viscoélastique de la forme suivante :

$$\alpha^2 = \frac{\rho\omega^2}{2C_{11}} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega\eta_{11}}{C_{11}}\right)^2}} + \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega\eta_{11}}{C_{11}}\right)^2} \right) \quad (1.16)$$

En supposant que les effets de viscosité sont faibles devant les effets de l'élasticité, on peut simplifier :

$$\alpha(\omega) \approx \frac{1}{2} \frac{\eta_{11}}{C_{11}} \frac{1}{V_L} \omega^2 \quad \text{avec} \quad V_L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad \text{et} \quad \left(\frac{\omega \eta_{11}}{C_{11}} \right)^2 \ll 1 \quad (1.17)$$

1.1.3.2 Vitesse de phase

Lors de la propagation d'une onde plane dans un milieu viscoélastique homogène isotrope, on a introduit une constante de propagation complexe dépendant de la fréquence :

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + i \frac{\omega}{v(\omega)} \quad (1.18)$$

Cette relation décrit bien les comportements dispersif et atténuant du milieu de propagation. Sa partie imaginaire correspond au terme propagatif lié à la vitesse de phase. A cause des relations de Kramers-Kronig, ces deux grandeurs sont liées entre elles. On peut rappeler l'existence de deux modèles basés sur deux approches différentes : le modèle quasi-local de O'Donnell et le modèle causal temporel de Szabo.

En utilisant des hypothèses de faibles variations de l'atténuation et de la vitesse de phase dans un domaine fréquentiel fini, O'Donnell [12] propose une formule reliant la dispersion et l'atténuation comme suivante :

$$\frac{1}{v(f_0)} - \frac{1}{v(f)} = \frac{2}{\pi} \int_{\omega_0}^{\omega} \frac{\alpha(u)}{u^2} du \quad (1.19)$$

Dans laquelle, $v(\omega_0)$ est la vitesse de phase à une fréquence de référence f_0 . Cette équation permet de trouver la vitesse de phase en fonction de la fréquence en connaissant l'évolution de l'atténuation. De nombreux auteurs pensent que l'atténuation suit une loi de puissance, définie par :

$$\alpha(f) = \alpha_0 f^n \quad (1.20)$$

Où α_0 est le coefficient d'atténuation et n est un nombre réel positif. A partir de cette relation, en développant l'équation (1.19), O'Donnell trouve les relations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{1}{v(f)} - \frac{1}{v(f_0)} = \frac{\alpha_0}{\pi^2} \ln\left(\frac{f}{f_0}\right) & \text{pour } n = 1 \\ \frac{1}{v(f)} - \frac{1}{v(f_0)} = -\frac{\alpha_0}{\pi^2 (n-1)} (f^{n-1} - f_0^{n-1}) & \text{pour } n \neq 1 \end{cases} \quad (1.21)$$

En parallèle, Szabo [13 14] a proposé un autre modèle en utilisant un opérateur de pertes dans le domaine temporel relié à l'atténuation par une transformée de Fourier inverse. Les résultats deviennent alors :

$$\begin{cases} \frac{1}{v(f)} - \frac{1}{v(f_0)} = \frac{\alpha_0}{\pi^2} \ln\left(\frac{f}{f_0}\right) & \text{pour } n = 1 \\ \frac{1}{v(f)} - \frac{1}{v(f_0)} = \frac{\alpha_0}{2\pi} \tan\left(\frac{n\pi}{2}\right) (f^{n-1} - f_0^{n-1}) & \text{pour } n \neq 1 \end{cases} \quad (1.22)$$

Il se trouve que, dans des domaines usuels, ces deux séries d'expressions donnent des valeurs numériques très proches.

1.2 Caractérisation en transmission et en réflexion d'une plaque à faces parallèles

Nous devons ensuite étudier la réflexion et la transmission à travers une plaque d'épaisseur constante. Les signaux utilisés sont des signaux brefs (impulsions) donc les différents échos se trouvent bien séparés temporellement. Nous déterminons maintenant les coefficients de transmission et réflexion à une interface [15].

1.2.1 Coefficient de réflexion et de transmission aux interfaces fluide/solide et solide/fluide

Dans ce paragraphe, on étudie la réflexion et la réfraction d'une onde acoustique d'incidence normale sur la surface séparant deux milieux homogènes viscoélastiques et isotropes (fluide noté 1 et solide noté 2). Ces milieux sont caractérisés par les constantes de propagation complexes γ_f, γ_s et les masses volumiques ρ_f, ρ_s .

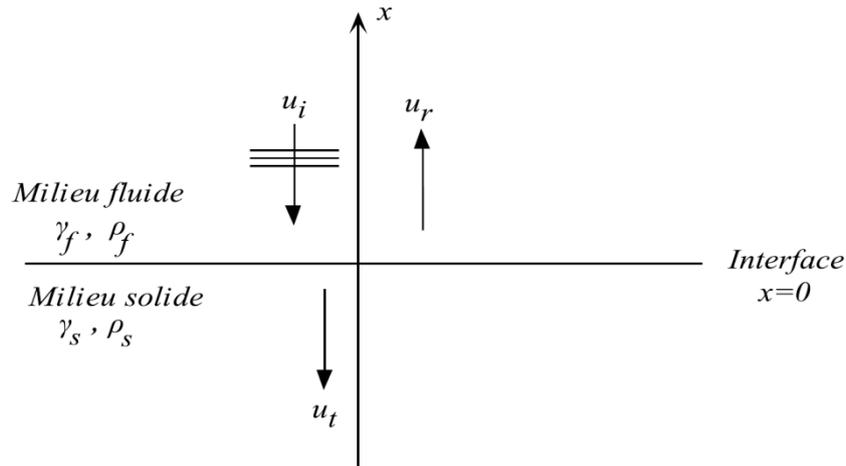


Figure 1 - 1 : Onde réfléchie et onde transmise à l'interface fluide/solide

On considère une onde plane harmonique qui se propage dans le fluide avec une incidence normale. Lors de l'interaction avec l'interface fluide/solide, l'onde incidente se divise en une onde réfléchie dans le fluide et une onde réfractée dans le solide. Afin de déterminer les coefficients de réflexion et de transmission, on utilise les conditions limites à l'interface :

- Continuité des déplacements normaux en $x=0$:

$$u^{(t)}(0,t) = u^{(i)}(0,t) + u^{(r)}(0,t) \quad (1.23)$$

- Continuité des contraintes normales en $x=0$:

$$\sigma_{xx}^{(t)}(0,t) = \sigma_{xx}^{(i)}(0,t) + \sigma_{xx}^{(r)}(0,t) \quad (1.24)$$

On note les déplacements des différentes ondes :

- $u^{(i)} = e^{-\gamma_f x} e^{i\omega t}$: déplacement particulière de l'onde incidente dans le fluide.
- $u^{(r)} = a_r e^{\gamma_f x} e^{i\omega t}$: déplacement particulière de l'onde réfléchie dans le fluide.
- $u^{(t)} = a_t e^{-\gamma_s x} e^{i\omega t}$: déplacement particulière de l'onde transmise dans le fluide.

Après avoir développé les équations (1.23) et (1.24), on obtient :

$$\begin{cases} a_t - a_r = 1 \\ \frac{\rho_s}{\gamma_s} a_t + \frac{\rho_f}{\gamma_f} a_r = \frac{\rho_f}{\gamma_f} \end{cases} \quad (1.25)$$

Les coefficients de réflexion et de transmission sont alors :

$$\begin{cases} T_{12} = \frac{a_t}{a_i} = \frac{u^{(t)}(0,t)}{u^{(i)}(0,t)} = \frac{\frac{2\rho_f}{\gamma_f}}{\frac{\rho_f}{\gamma_f} + \frac{\rho_s}{\gamma_s}} \\ R_{12} = \frac{a_r}{a_i} = \frac{u^{(r)}(0,t)}{u^{(i)}(0,t)} = \frac{\frac{\rho_f}{\gamma_f} - \frac{\rho_s}{\gamma_s}}{\frac{\rho_f}{\gamma_f} + \frac{\rho_s}{\gamma_s}} \end{cases} \quad (1.26)$$

On peut définir les impédances acoustiques complexes des milieux par :

$$\begin{cases} Z_f = -\frac{\sigma_{xx}^{(i)}(x,t)}{v^{(i)}(x,t)} = \frac{i\omega\rho_f}{\gamma_f} \\ Z_s = -\frac{\sigma_{xx}^{(t)}(x,t)}{v^{(t)}(x,t)} = \frac{i\omega\rho_s}{\gamma_s} \end{cases} \quad (1.27)$$

Avec $v^{(i)}(x,t)$ et $v^{(t)}(x,t)$ sont des vitesses particulières dans le fluide et le solide.

Les coefficients de transmission et de réflexion, en amplitude, à l'interface fluide/solide peuvent être écrits donc en fonction des impédances acoustiques complexes sous les formes :

$$T_{12} = \frac{2Z_f}{Z_s + Z_f} \quad \text{et} \quad R_{12} = \frac{Z_f - Z_s}{Z_s + Z_f} \quad (1.28)$$

Les coefficients de transmission et de réflexion de l'interface solide/fluide sont aussi obtenus et donnés par cette relation :

$$T_{21} = 2 - T_{12} = \frac{2Z_s}{Z_s + Z_f} \quad \text{et} \quad R_{21} = -R_{12} = \frac{Z_s - Z_f}{Z_s + Z_f} \quad (1.29)$$

1.2.2 Mesure de l'atténuation en un point par réflexion

Parmi les méthodes utilisées pour déterminer l'atténuation du matériau de la plaque à faces parallèles, on utilise deux méthodes en immersion [16] ne nécessitant qu'un seul transducteur plan jouant les rôles d'émetteur et de récepteur : la réflexion (ou pulse echo) et la double transmission [17]. Commençons par la réflexion.

On utilise uniquement les deux premiers échos réfléchis successivement aux interfaces de la plaque d'épaisseur E (écho de surface et écho de fond). La distance entre le transducteur et la surface de la plaque est d_1 .

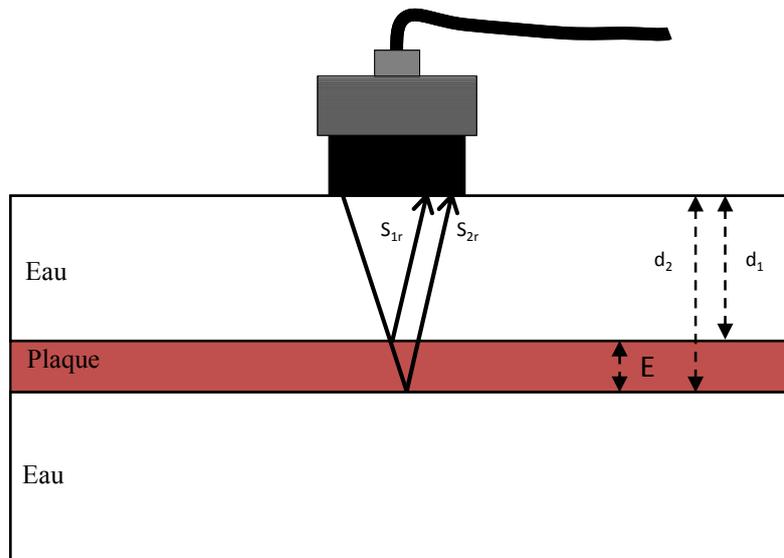


Figure 1 - 2 : Configuration méthode double réflexion

Soient s_{1r} et s_{2r} les deux échos réfléchis qui correspondent à la réflexion à la surface et au fond de la plaque représentés sur la Figure 1 - 2. Les transformées de Fourier de deux signaux temporels, notés $S_{1r}(\omega)$ et $S_{2r}(\omega)$ sont données par :

$$S_{1r}(\omega) = R_{12}(\omega) S_0(\omega) e^{-2\alpha_f(\omega)d_1} e^{-i\frac{\omega 2d_1}{v_f}} \quad (1.30)$$

Et

$$S_{2r}(\omega) = R_{21}(\omega)T_{12}(\omega)T_{21}(\omega)S_0(\omega)e^{-2\alpha_f(\omega)d_1}e^{-2\alpha_p(\omega)E}e^{-2i\omega\left(\frac{d_1}{v_f} + \frac{E}{v_p}\right)} \quad (1.31)$$

Expressions dans lesquelles $S_0(\omega)$ est la transformée de Fourier de l'onde incidente à la surface. On trouve l'expression du rapport des transformées $S_{1r}(\omega)$ et $S_{2r}(\omega)$, parfois abusivement appelé « réflexion double » :

$$R_{double}(\omega) = \frac{S_{2r}(\omega)}{S_{1r}(\omega)} = - \left[\frac{4 \frac{\rho_p v_p}{\rho_f v_f}}{\left(1 + \frac{\rho_p v_p}{\rho_f v_f}\right)^2} \right] e^{-2\alpha_p(\omega)E} e^{-2i\omega\left(\frac{E}{v_p}\right)} \quad (1.32)$$

En corrélant des fonctions expérimentale et théorique de la réflexion, on pourra déterminer des grandeurs physiques de la plaque. La différence de phase entre ces deux signaux $\Delta\phi_r$ nous permet de trouver la vitesse de phase :

$$v_p(\omega) = \frac{2E\omega}{\pi - \Delta\phi_r} \quad \text{avec} \quad \Delta\phi_r = -\frac{2\omega E}{v_p(\omega)} + \pi \quad (1.33)$$

L'atténuation de la plaque est déterminée par :

$$\alpha_p(\omega) = -\frac{1}{2E} \left[\ln(|R_{double}(\omega)|) - \ln \left(\frac{4 \frac{\rho_p v_p}{\rho_f v_f}}{\left(1 + \frac{\rho_p v_p}{\rho_f v_f}\right)^2} \right) \right] \quad (1.34)$$

Ou bien, en introduisant les impédances $Z=\rho v$:

$$\alpha_p(\omega) = -\frac{1}{2E} \left[\ln(|R_{double}(\omega)|) - \ln \left(\frac{4 \frac{Z_p}{Z_f}}{\left(1 + \frac{Z_p}{Z_f}\right)^2} \right) \right] \quad (1.35)$$

1.2.3 Mesure de l'atténuation par double transmission

Comme pour la méthode de double réflexion, un transducteur servant d'émetteur-récepteur et un réflecteur sont nécessaires. La plaque est située entre le transducteur et le réflecteur. Dans cette méthode on effectue une comparaison entre les signaux réfléchis par le réflecteur avec et sans plaque. Les distances entre la plaque et le transducteur et le réflecteur sont respectivement d_1 et d_2 , s_{1t} et s_{2t} sont les signaux transmis dans les cas sans plaque et avec plaque (Figure 1 - 3). L'onde ultrasonore transmise dans le fluide seul est considérée comme le signal de référence.

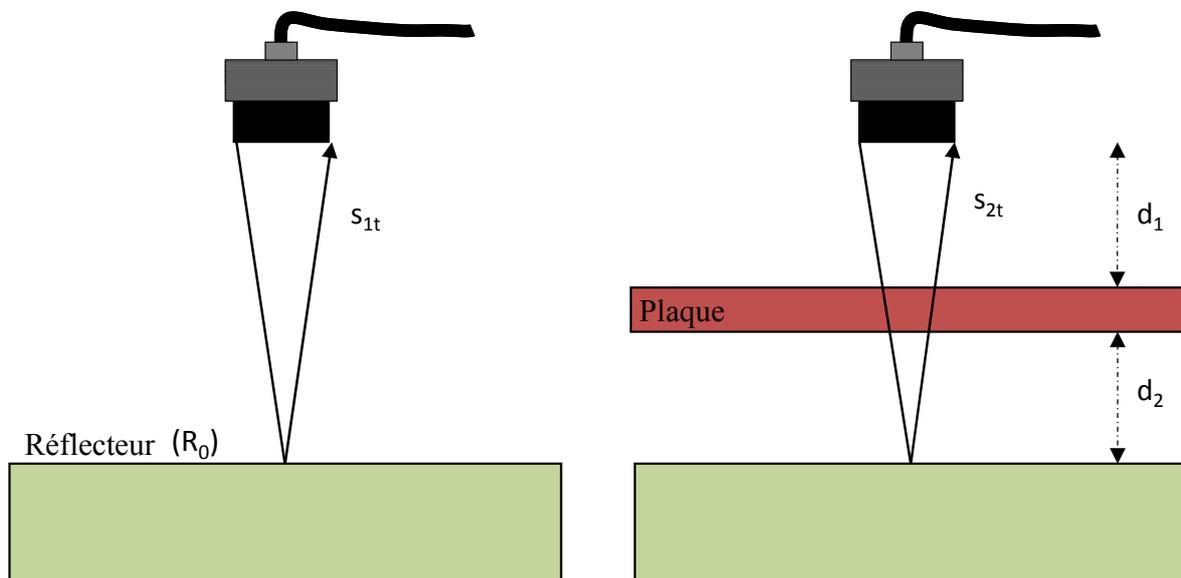


Figure 1 - 3 : Configuration méthode double transmission : (a) sans la plaque (à gauche) et (b) avec la plaque (à droite)

- Mesure sans la plaque représentée par Figure 1-3(a) :

On calcule la transformée de Fourier $S_{1t}(\omega)$ du signal $s_{1t}(t)$:

$$S_{1t}(\omega) = S_0(\omega) R_0 e^{-2\alpha_f(\omega)(d_1+d_2+E)} e^{-i \frac{2\omega(d_1+d_2+E)}{v_f}} \quad (1.36)$$

- Mesure avec la plaque Figure 1 - 3(b) :

Le signal transmis $s_{2t}(t)$ est récupéré lors de la deuxième mesure. Son spectre s'écrit :

$$S_{2t}(\omega) = S_0(\omega) e^{-2\gamma_f(\omega)(d_1+d_2)} R_0 (T_{12}T_{21})^2 e^{-2\gamma_p(\omega)E} \quad (1.37)$$

Finalement, on trouve le coefficient de transmission :

$$T_{double}(\omega) = \frac{S_{2t}(\omega)}{S_{1t}(\omega)} = \frac{e^{-2\gamma_f(\omega)(d_1+d_2)}}{e^{-2\gamma_f(\omega)(d_1+d_2+E)}} (T_{12}T_{21})^2 e^{-2\gamma_p(\omega)E} \quad (1.38)$$

Ou bien :

$$T_{double}(\omega) = (T_{12}T_{21})^2 e^{-2(\gamma_p(\omega)-\gamma_f(\omega))E} \quad (1.39)$$

La différence de phase entre les deux signaux s'écrit :

$$\Delta\phi_t = -2\omega E \left(\frac{1}{v_p(\omega)} - \frac{1}{v_f(\omega)} \right) + \pi \quad (1.40)$$

La vitesse de phase est déduite par :

$$v_p(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{v_f(\omega)} - \frac{\Delta\phi_t - \pi}{2\omega E}} \quad (1.41)$$

L'atténuation est déterminée aussi par la formule suivante :

$$\alpha_p(\omega) = \frac{1}{2E} \left[2 \ln(T_{12}T_{21}) - \ln(|T_{double}(\omega)|) \right] + \alpha_f(\omega) \quad (1.42)$$

On remarque que la mesure de l'atténuation et de la vitesse de phase nécessitent de connaître l'atténuation et la vitesse de phase dans le fluide. On estime que l'atténuation dans l'eau est nulle aux fréquences usuelles. La vitesse de phase de l'eau est déduite de la mesure de sa température.

Incontestablement, la mise en œuvre de la méthode par double réflexion est plus simple car elle ne nécessite pas d'assurer le parallélisme entre transducteur, plaque et réflecteur. Il n'y a pas de manipulation entre les deux mesures à effectuer (positionner ou retirer la plaque). De plus, la connaissance des propriétés d'atténuation de l'eau n'est pas nécessaire.

1.2.4 Mesure de l'impédance de surface

On voit que le calcul de l'atténuation nécessite de connaître l'impédance du matériau constituant la plaque. Sa détermination directe n'est pas possible, on utilise une comparaison avec un matériau connu. On utilise une plaque de plexiglas dont on connaît bien les propriétés. On fait donc deux mesures, une avec une plaque de plexiglas, une autre avec la plaque inconnue placée à la même distance du transducteur. Le schéma de mesure est montré sur la Figure 1 - 4.

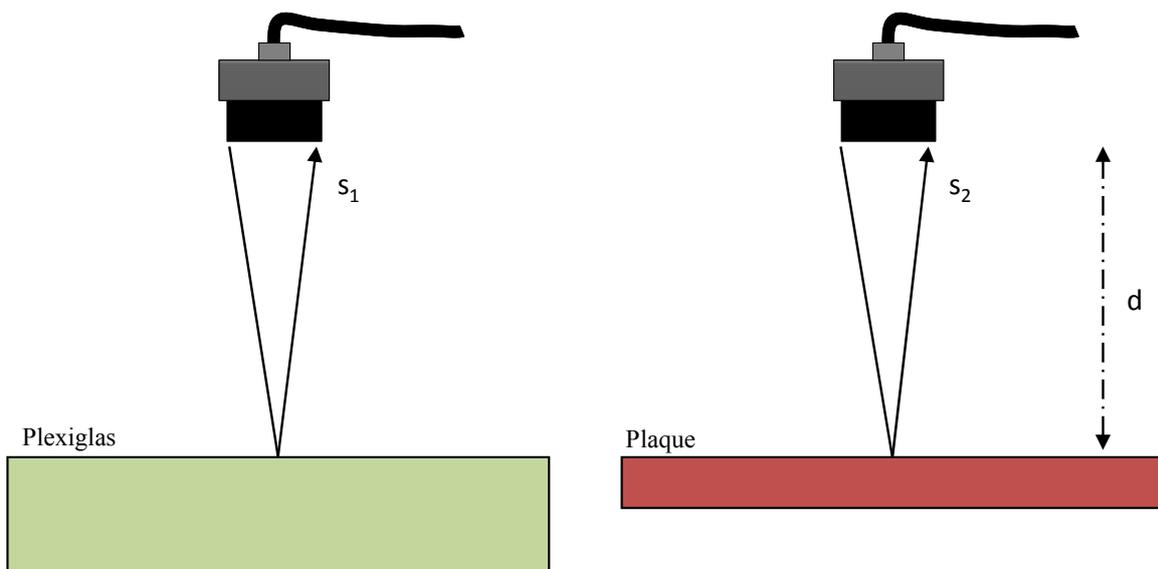


Figure 1 - 4 : Schéma de mesure pour le calcul de l'impédance

On obtient alors les deux signaux réfléchis s_1 et s_2 . Leurs transformées de Fourier sont calculés par les équations :

$$S_1(\omega) = R_{01}(\omega) S_0(\omega) e^{-2\alpha_f(\omega)d} e^{-i\frac{\omega 2d}{v_f}} \quad (1.43)$$

$$S_2(\omega) = R_{02}(\omega) S_0(\omega) e^{-2\alpha_f(\omega)d} e^{-i\frac{\omega 2d}{v_f}} \quad (1.44)$$

Le rapport des transformées est :

$$R = \frac{S_2(\omega)}{S_1(\omega)} = \frac{R_{02}(\omega)}{R_{01}(\omega)} \quad (1.45)$$

Si on connaît bien l'impédance de la plaque de plexiglas, on peut déduire l'impédance de la plaque composite car :

$$R_{02}(\omega) = R_{01}(\omega) \frac{S_2(\omega)}{S_1(\omega)} = \frac{Z_f - Z_p}{Z_f + Z_p} \quad (1.46)$$

Et

$$Z_p(\omega) = Z_f(\omega) \frac{1 - R_{02}(\omega)}{1 + R_{02}(\omega)} \quad (1.47)$$

Z_p et Z_f sont des impédances de plaque composite et de l'eau.

Pour simplifier le calcul, on peut remplacer le rapport de deux spectres par le rapport de l'amplitude crête-crête des deux pics a_1 et a_2 des deux premiers échos $s_1(t)$ et $s_2(t)$:

$$\frac{S_2(\omega)}{S_1(\omega)} \approx \frac{a_2}{a_1} \quad (1.48)$$

Un exemple est fourni sur la Figure 1 - 5. Le signal réfléchi par le plexiglas est en bleu. Il est sans problème car les deux échos, de surface et de fond, sont bien séparés et seuls. La plaque composite (courbe rouge) fournit un signal plus complexe contenant les échos de surface et de fond mélangés à des échos issus de réflexions internes à la plaque. La présence de ces échos, perturbant les échos principaux nous conduit à utiliser les amplitudes crête-crête des premières oscillations qui sont les moins affectées. Nous avons pu vérifier, en prenant deux plaques différentes et homogènes que la méthode utilisant les amplitudes des signaux est équivalente à celle utilisant le rapport des transformées de Fourier.

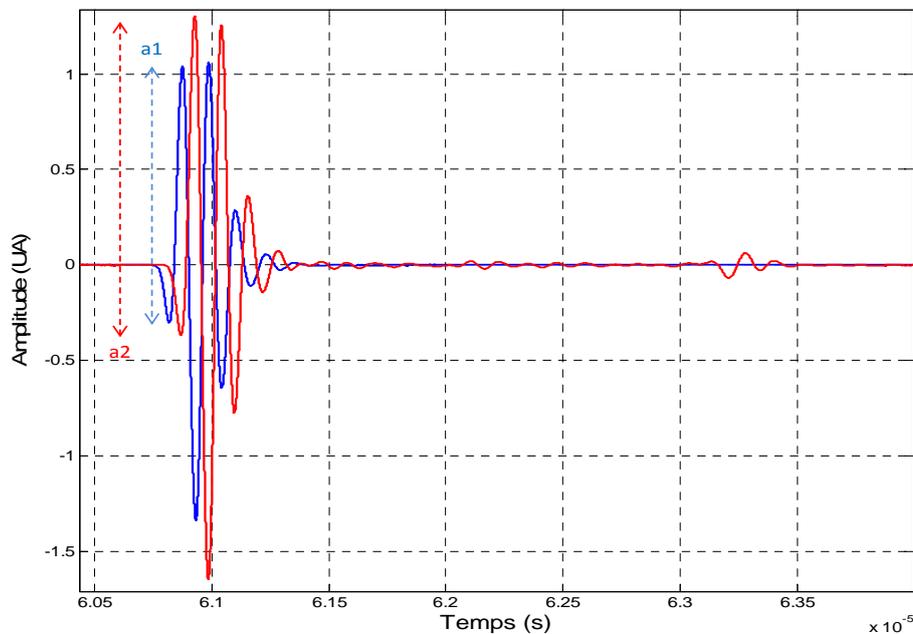


Figure 1 - 5 : Signal réfléchis sur plaque plexiglas (bleu) et sur plaque composite (rouge)

1.3 Simulation de signaux

Avant de procéder à des mesures d'atténuation sur des plaques composites, on se propose de calculer les signaux que l'on doit obtenir dans les différents cas envisagés ci-dessus : en réflexion, en double transmission. On envisage aussi d'utiliser des plaques différentes : homogène ou stratifiée. Pour cela, il faut calculer les coefficients de transmission et de réflexion définis au paragraphe 1.2.

1.3.1 Coefficients de transmission et de réflexion d'une plaque viscoélastique

La configuration théorique est présentée dans la Figure 1 - 6. Il s'agit de calculer les coefficients de transmission et de réflexion lors de propagation d'une onde plane de type longitudinale à travers d'une plaque viscoélastique isotrope à face parallèles d'épaisseur E .

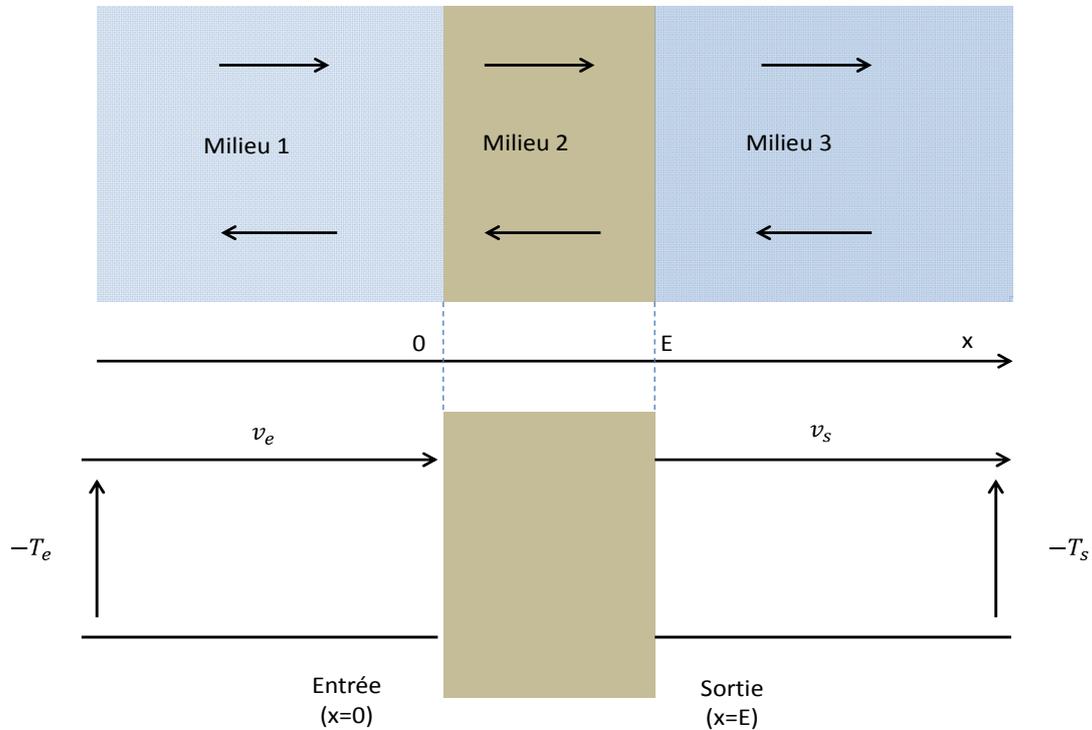


Figure 1 - 6 : Configuration théorique

Le schéma au-dessus présente les trois milieux dans lesquels se propagent les ondes. Tandis que le schéma au-dessous est le schéma contenant le quadripôle équivalent. Ses coefficients A , B , C , et D sont définis par l'expression (1. 49) reliant les contraintes et vitesses particulières d'entrée et de sortie:

$$\begin{pmatrix} -T_e \\ v_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -T_s \\ v_s \end{pmatrix} \quad (1. 49)$$

Les ondes dans la plaque (milieu 2) sont notées :

$$u_2(x, t) = e^{j\omega t} \left[M e^{-\gamma_2 x} + N e^{\gamma_2 x} \right] \quad (1. 50)$$

Avec :

- γ_2 : constante de propagation.
- v_e et v_s : vitesses.
- T_e et T_s : contraintes.

La vitesse et la contrainte dans le milieu 2 sont exprimées par :

$$v_2(x, t) = \frac{\partial u_2}{\partial t} = j\omega u_2 \quad (1.51)$$

Et

$$T_2(x, t) = c_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = c_2 \gamma_2 [-Me^{-\gamma_2 x} + Ne^{\gamma_2 x}] e^{j\omega t} \quad (1.52)$$

Le coefficient d'élasticité c_2 du milieu 2 et la constante de propagation γ_2 sont reliés par la relation suivante :

$$c_2 \gamma_2 = j\omega Z_2 \quad (1.53)$$

On peut écrire des vitesses et contraintes aux limites $x=0$ et $x=E$:

$$\begin{aligned} v_e = v_2(0, t) &= j\omega e^{j\omega t} [M + N] \\ T_e = T_2(0, t) &= j\omega Z_2 e^{j\omega t} [-M + N] \\ v_s = v_2(E, t) &= j\omega e^{j\omega t} [Me^{-\gamma_2 E} + Ne^{\gamma_2 E}] \\ T_s = T_2(E, t) &= j\omega Z_2 e^{j\omega t} [-Me^{-\gamma_2 E} + Ne^{\gamma_2 E}] \end{aligned} \quad (1.54)$$

Ou bien :

$$j\omega e^{j\omega t} \begin{bmatrix} e^{-\gamma_2 E} & e^{\gamma_2 E} \\ -Z_2 e^{-\gamma_2 E} & Z_2 e^{\gamma_2 E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s \\ T_s \end{bmatrix} \quad (1.55)$$

Donc :

$$M = \frac{e^{-j\omega t} e^{\gamma_2 E}}{2j\omega Z_2} (Z_2 v_s - T_s) \quad (1.56)$$

$$N = \frac{e^{-j\omega t} e^{-\gamma_2 E}}{2j\omega Z_2} (Z_2 v_s + T_s)$$

En connaissant M et N, on peut déduire v_e et T_e :

$$v_e = \frac{e^{\gamma_2 E}}{2Z_2} [Z_2 v_s - T_s] + \frac{e^{-\gamma_2 E}}{2Z_2} [Z_2 v_s + T_s] \quad (1.57)$$

Et :

$$T_e = \frac{e^{\gamma_2 E}}{2} [-Z_2 v_s + T_s] + \frac{e^{-\gamma_2 E}}{2} [Z_2 v_s + T_s] \quad (1.58)$$

Ou bien :

$$v_e = v_s ch(\gamma_2 E) + (-T_s) \frac{sh(\gamma_2 E)}{Z_2} \quad (1.59)$$

$$-T_e = v_s Z_2 sh(\gamma_2 E) + (-T_s) ch(\gamma_2 E)$$

On peut écrire sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} -T_e \\ v_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch(\gamma_2 E) & Z_2 sh(\gamma_2 E) \\ \frac{sh(\gamma_2 E)}{Z_2} & ch(\gamma_2 E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -T_s \\ v_s \end{bmatrix} \quad (1.60)$$

La matrice de transfert est donc :

$$[M] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch(\gamma_2 E) & Z_2 sh(\gamma_2 E) \\ \frac{sh(\gamma_2 E)}{Z_2} & ch(\gamma_2 E) \end{bmatrix} \quad (1.61)$$

On peut déduire aussi les valeurs de sorties en fonction des valeurs d'entrée :

$$v_s = v_e ch(\gamma_2 E) + (T_e) \frac{sh(\gamma_2 E)}{Z_2} \quad (1.62)$$

$$T_s = v_e Z_2 ch(\gamma_2 E) + T_e ch(\gamma_2 E)$$

Les ondes dans les milieux 1 et 3 peuvent s'écrire :

$$u_1(x, t) = e^{j\omega t} [e^{-\gamma_1 x} + P e^{\gamma_1 x}] \quad (1.63)$$

$$u_3(x, t) = e^{j\omega t} [Q e^{-\gamma_3 x}]$$

Si P est l'onde réfléchie en $x=0$ et $[Q e^{-\gamma_3 x}]$ est l'onde transmise en $x=E$.

Les vitesses et contraintes dans ces deux milieux sont exprimées dans les formules :

$$v_1 = j\omega u_1$$

$$v_3 = j\omega u_3$$

$$T_1(x, t) = j\omega Z_1 e^{j\omega t} [-e^{-\gamma_1 x} + P e^{\gamma_1 x}] \quad (1.64)$$

$$T_3(x, t) = -j\omega Z_1 e^{j\omega t} [Q e^{-\gamma_1 x}]$$

Aux interfaces :

$$\begin{aligned}
 v_e &= j\omega e^{j\omega t} [1 + P] \\
 T_e &= j\omega Z_1 e^{j\omega t} [-1 + P] \\
 v_s &= j\omega e^{j\omega t} [Q e^{-\gamma_1 E}] \\
 T_s &= -j\omega Z_1 e^{j\omega t} [Q e^{-\gamma_1 E}]
 \end{aligned}
 \tag{1.65}$$

En remplaçant ces formules dans les équations (1.62), on obtient :

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{-Z_2 \operatorname{sh}(\gamma_2 E) + \frac{Z_1^2}{Z_2} \operatorname{sh}(\gamma_2 E)}{2Z_1 \operatorname{ch}(\gamma_2 E) + Z_2 \operatorname{sh}(\gamma_2 E) + \frac{Z_1^2}{Z_2} \operatorname{sh}(\gamma_2 E)} \\
 Q &= \frac{2Z_1 e^{\gamma_1 E}}{Z_2 \operatorname{sh}(\gamma_2 E) + 2Z_1 \operatorname{ch}(\gamma_2 E) + \frac{Z_1^2}{Z_2} \operatorname{sh}(\gamma_2 E)}
 \end{aligned}
 \tag{1.66}$$

Le coefficient de transmission est T :

$$T = \frac{U_t(E)}{U_i(0)} = \frac{1}{\operatorname{ch}(\gamma_2 E) + 0.5 \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \operatorname{sh}(\gamma_2 E)}
 \tag{1.67}$$

Le coefficient de réflexion est R :

$$R = \frac{U_r(0)}{U_i(0)} = \frac{\left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right) \operatorname{sh}(\gamma_2 E)}{2\operatorname{ch}(\gamma_2 E) + \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \operatorname{sh}(\gamma_2 E)}
 \tag{1.68}$$

Il faut noter que les grandeurs définies dans ce paragraphe sont différentes de celles définies aux paragraphes 1.2.2 et 1.2.3 où les signaux avaient une forme impulsionnelle (signaux brefs) permettant une séparation temporelle entre différents échos. Dans ce paragraphe 1.3.1,

les signaux dans la plaque ne sont pas brefs. Un signal affecte en même temps les deux faces de la plaque. On peut dire, par opposition au premier cas présenté, que les signaux sont ‘‘longs’’. En calculant la réponse (réflexion) à une impulsion, on obtient la réponse complète (tous les échos) en utilisant la formule (1. 68) alors que les relations (1. 30) et (1. 31) donnent uniquement les échos de surface et de fond (respectivement) résultant de l’impulsion incidente. Il en est de même pour la transmission. La relation (1. 67) donne tous les échos transmis à travers la plaque.

1.3.2 Principe de la simulation

La simulation consiste à calculer les signaux réfléchis ou transmis à partir d’un signal incident. On choisit comme signal incident $s_i(t)$ un signal réel, on calcule ensuite sa transformée de Fourier (FFT) $S_i(f)$ puis celle du signal transmis ou réfléchi, en utilisant la relation appropriée (1. 67) ou (1. 68). Enfin, on utilise la transformée inverse pour avoir le signal correspondant $s_r(t)$ ou $s_t(t)$.

Les calculs sont effectués en utilisant des signaux « longs » qui donnent tous les échos possibles en transmission ou réflexion. Ils peuvent aussi être réalisés en « signaux brefs » afin de déterminer un seul des échos.

Ensuite on détermine l’évolution de la vitesse de phase et de l’atténuation en fonction de la fréquence. Si le matériau simulé est homogène et de propriétés connues, on peut comparer la grandeur calculée par simulation à celle donnée directement par une relation d’O’Donnel (1. 21) ou de Szabo (1. 22). Les résultats obtenus par simulation sont théoriquement les mêmes puisque la simulation utilise les propriétés imposées des matériaux. Toutefois, les conditions de calcul peuvent entraîner des différences sensibles (Fig.1.9 et Fig.1.10). Ces comparaisons permettent donc de constater l’influence de l’échantillonnage, du nombre de points de FFT sur la précision des calculs d’atténuation, en vue des calculs sur des signaux réels.

Enfin, on propose une modélisation d’un composite idéal c'est-à-dire dont la structure est périodique. Les composites réalisés avec des prés imprégnés (voir chapitre 3) sont une bonne représentation des milieux stratifiés périodiques. On compare le signal réfléchi réel au signal simulé en donnant aux caractéristiques de la plaque des valeurs précises.

1.3.3 Résultats obtenus avec la plaque plexiglas

1.3.3.1 En réflexion

La plaque utilisée est en plexiglas d'épaisseur 3 mm. En signaux longs, on détermine les FFT de tous les signaux réfléchis $s_R(t)$ en utilisant la relation :

$$R = \frac{S_R}{S_0} = \frac{(Z_1^2 - Z_2^2)sh(\gamma_2 E)}{(Z_1^2 + Z_2^2)sh(\gamma_2 E) + 2Z_1 Z_2 ch(\gamma_2 E)} \quad (1.69)$$

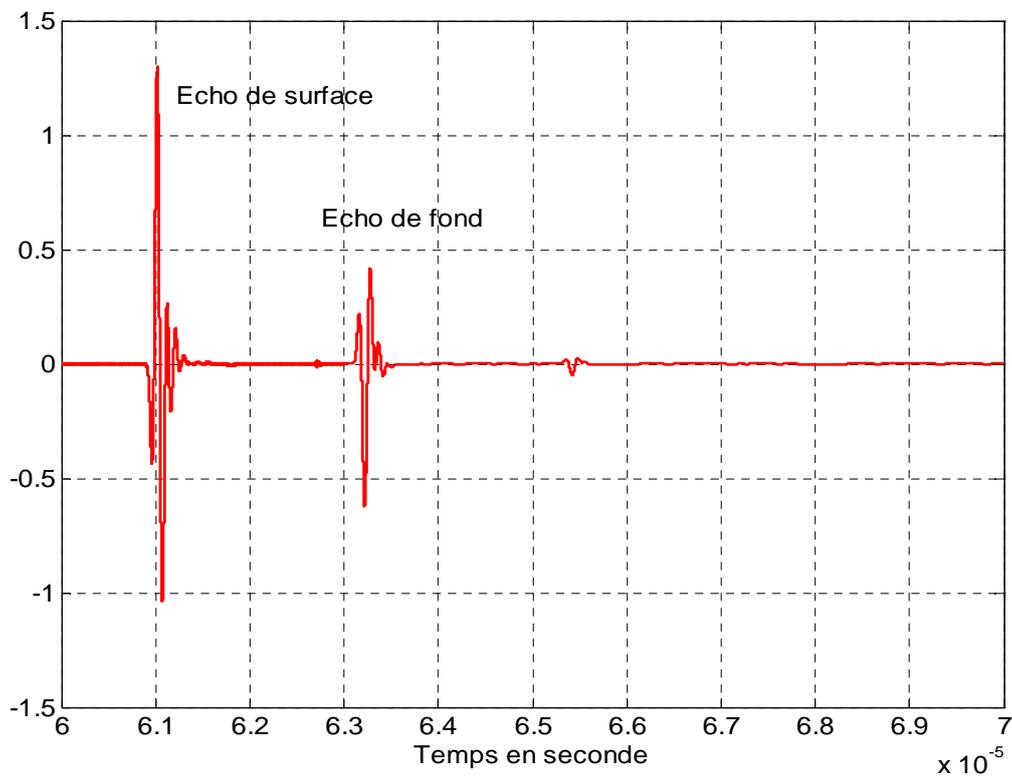


Figure 1 - 7 : Signaux réfléchis sur une plaque de plexiglas d'épaisseur 3 mm

1.3.3.2 En double transmission

Avec des signaux longs, on détermine tous les signaux $s_i(t)$ revenant vers le transducteur émetteur, après réflexion sur une surface de coefficient de réflexion -1, en utilisant la relation :

$$T = \frac{S_T}{S_0} = - \left[\frac{1}{ch(\gamma_2 E) + 0.5 \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1} \right) Z_1 Z_2 sh(\gamma_2 E)} \right]^2 \quad (1.70)$$

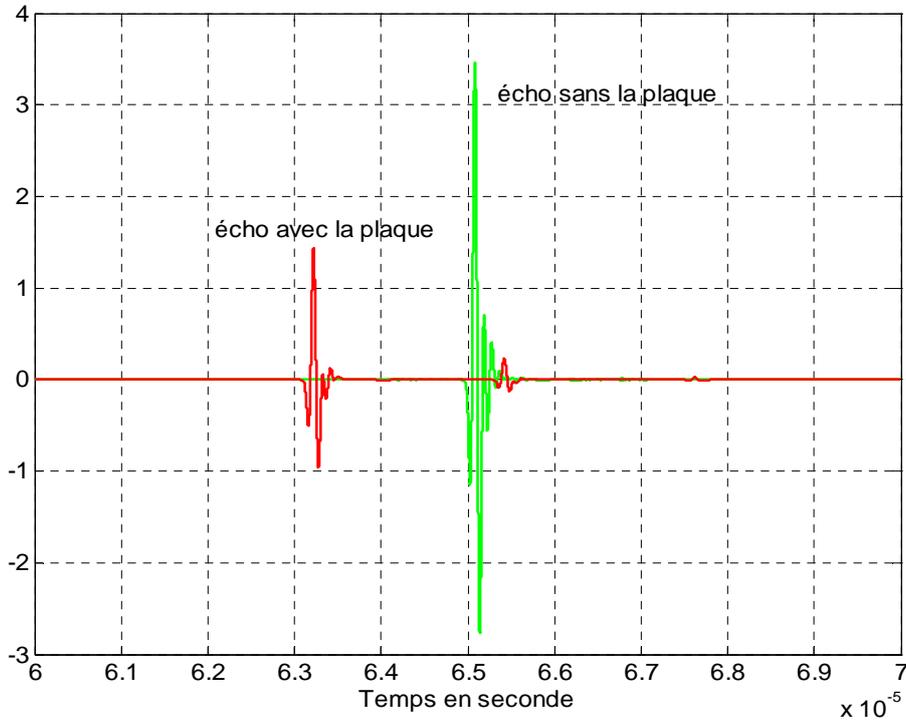


Figure 1 - 8 : Signaux transmis en double transmission par une plaque de plexiglas d'épaisseur 3 mm.
Signal avec la plaque (rouge) – signal sans la plaque (vert)

1.3.3.3 Calcul de la vitesse de phase

Les signaux précédents ont été obtenus en utilisant le plexiglas dont les caractéristiques ont déjà été déterminées avec une bonne précision [10]. Dans le modèle de Szabo, on caractérise le plexiglas par $\alpha_0 = 1.4 \cdot 10^{-4}$ et $n = 0.85$, on ajoute la valeur de la vitesse $V = 2760$ m/s pour la fréquence $f_0 = 10$ MHz et la masse volumique 1190 kg/m³. Valeurs que l'on reporte dans l'expression de la vitesse :

$$\frac{1}{v(f)} - \frac{1}{v(f_0)} = \frac{\alpha_0}{2\pi} \tan\left(\frac{n\pi}{2}\right) (f^{n-1} - f_0^{n-1}) \quad (1.71)$$

Les calculs effectués sur les signaux simulés ont nécessité des calculs de FFT avec 2^{19} points. On utilise les relations (1.33) pour la double réflexion et (1.41) pour la double transmission.

La différence entre les résultats du calcul et de la théorie signifie que la précision des calculs de simulation n'est pas encore suffisante. On peut chiffrer la précision avec laquelle la vitesse est calculée à partir de la simulation de la réflexion (par exemple). On note V_{ci} et V_{ri} les valeurs obtenues de la vitesse calculée directement et de la vitesse calculée à partir de la réflexion, pour la même fréquence.

$$précision = \frac{\sum |V_{ci} - V_{ri}|}{\sum |V_{ci}|} \quad (1.72)$$

La différence relative entre les vitesses simulée et « théorique » ne dépasse pas $9 \cdot 10^{-5}$, la réflexion donnant toujours une vitesse supérieure. La mesure de la vitesse de groupe est effectuée par corrélation entre ces signaux réfléchis ou signaux transmis. Les valeurs obtenues sont respectivement 2757.1 m/s et 2756.9 m/s.

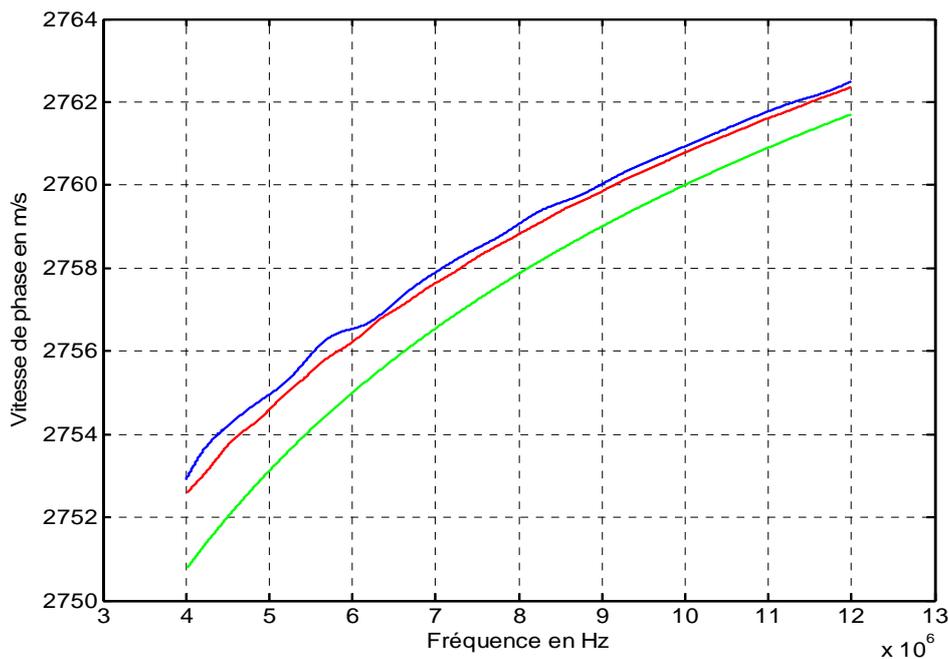


Figure 1 - 9 : Vitesse de phase du plexiglas – Calcul direct par la formule de Szabo (vert) – Calcul à partir de la simulation des signaux réfléchis (bleu) – Calcul à partir des signaux transmis (rouge).

1.3.3.4 Calcul de l'atténuation

Le matériau choisi, est encore du plexiglas. Son atténuation est donnée par la loi de puissance [18 19] $\alpha = 1.410^{-4} f^{0.85}$. Le calcul de l'atténuation est réalisé à partir des signaux simulés en réflexion et transmission (relation (1.34) pour la réflexion et relation (1.42) pour la double transmission). Les calculs ont été effectués pour une bande passante comprise entre

4 et 12 MHz. On constate que les valeurs prises par l'atténuation sont très proches des valeurs attendues. Toutefois la précision obtenue est un peu moins bonne que pour la vitesse de phase. On définit une précision relative en comparant les valeurs prises par l'atténuation obtenue par réflexion A_r (par exemple) et A_c calculée par la loi de puissance.

$$précision = \frac{\sum |A_{ci} - A_{ri}|}{\sum |A_{ci}|} \quad (1.73)$$

La précision est de l'ordre de $3 \cdot 10^{-3}$ pour les deux déterminations de l'atténuation. Ce qui est un peu moins bon que pour la vitesse de phase. On peut penser que de ce fait, la vitesse de phase pourrait être une grandeur plus intéressante que l'atténuation pour caractériser la porosité d'une plaque. Il n'en est rien car ses variations sont très faibles.

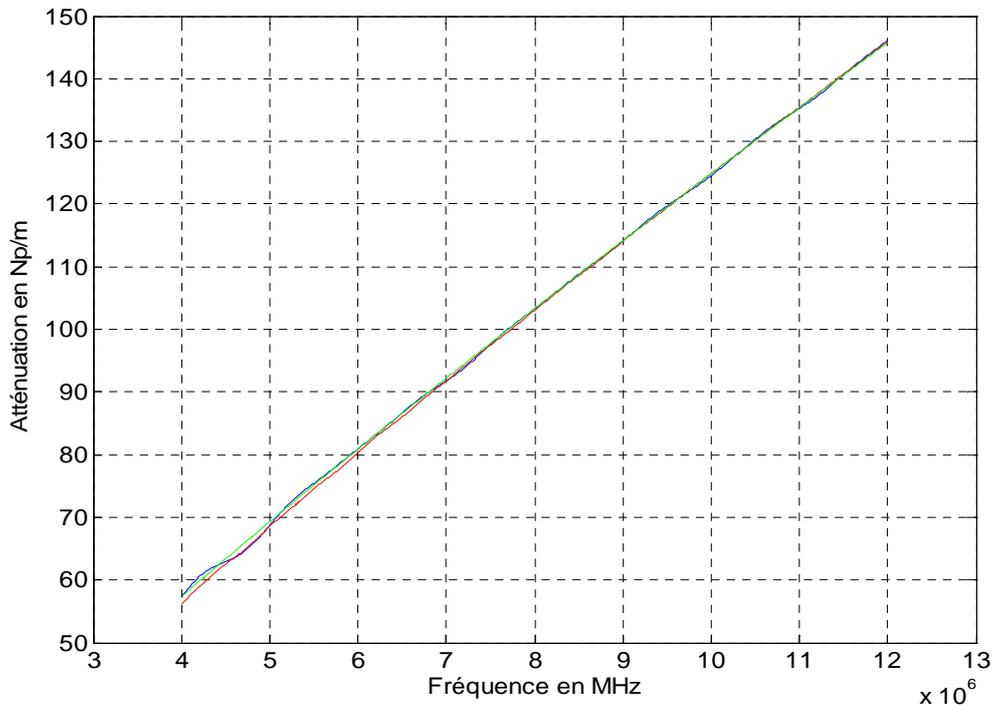


Figure 1 - 10 : Atténuation du plexiglas en fonction de la fréquence – Calcul direct (vert) – Calcul à partir des signaux réfléchis simulés (bleu) – Calcul à partir des signaux transmis (rouge).

1.3.4 Modélisation d'une plaque composite

La caractérisation du comportement d'une onde plane en incidence normale se propageant dans une structure multicouche est un sujet intéressant. Certains auteurs [20 21] s'intéressent à la simulation de la réponse électroacoustique du multicouche par la méthode de décomposition en séries de Debye. Dans ce travail de thèse, on s'intéresse à la modélisation

du signal se propageant à travers des plaques « pré-imprégnés » réalisés en empilant plusieurs couches identiques contenant les fibres et la résine. Les plis sont distribués de façon quasi périodique. Cette simulation s'applique à la réflexion sur une plaque homogène et à la double transmission à travers cette plaque. Concrètement, la plaque est notée B01 et constitue une référence.

Pour déterminer la réflexion double sur la plaque composite, on utilise le modèle décrit au paragraphe 1.3.1. La plaque se compose de 8 plis considérés identiques. Chaque pli comporte trois matériaux d'épaisseur constante : une couche de résine, une couche de fibres imprégnées de résine, une seconde couche de résine identique à la première. Chaque couche admet un quadripôle doté de 4 coefficients A, B, C et D (voir expression (1. 61)) dont la valeur dépend des caractéristiques attribuées au matériau. Un pli est lui aussi représenté par un quadripôle issu du produit des trois précédents. Enfin, la plaque a un quadripôle issu du produit de 8 quadripôles identiques. Le quadripôle de la plaque est calculé pour chaque fréquence et donne la valeur de la réflexion et de la transmission.

Les résultats concernent la plaque pré imprégné B01. Les valeurs attribuées aux différents matériaux constitutifs sont les suivants :

- Epaisseur 2.3 mm.
- Nombre de plis : 8.
- Masse volumiques résine = 1530 kg/m^3 .
- Masse volumique fibres imprégnées de résine = 1770 kg/m^3 .
- Vitesses à 10 MHz : résine = 3270 m/s ; fibres= 2700 m/s.
- Taux volumiques de résine et de fibre =50 %.
- Taux massiques résine=42 % fibres=58 %.
- Les deux milieux sont considérés comme viscoélastiques avec les mêmes coefficients $n=1.1$ et $\mu=5 \cdot 10^{-6}$.

Les signaux calculé et mesuré sont montrés dans la Figure 1 - 11. On constate que ces deux signaux se ressemblent beaucoup. La petite différence signifie que les plis dans la plaque B01 ne sont pas aussi parfaitement répartis et que les valeurs attribuées ne sont pas optimisées.

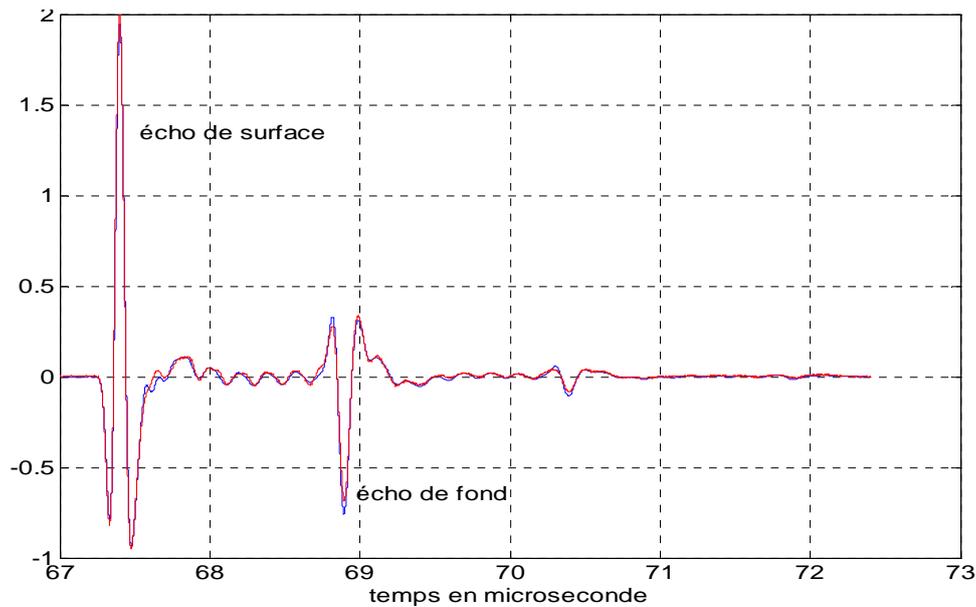


Figure 1 - 11 : Signal calculé (bleu) et signal mesuré (rouge) de la plaque B01

Le procédé de simulation est correct, et donne une bonne réponse temporelle si la plaque utilisée est homogène ou à structure périodique.

1.4 Conclusion

On s'est intéressé dans ce chapitre à la mise en équation des coefficients de réflexion et de transmission d'une onde incidente normale à une plaque. Deux méthodes peuvent ainsi être envisagées pour la suite de ces travaux. Le choix de ne retenir que la méthode de la double réflexion repose principalement sur des considérations de simplicité de mise en œuvre expérimentale et sur le fait que le milieu fluide n'a pas besoin d'être précisément connu.

Les variations des paramètres vitesses et atténuation ont été analysées. Si la précision sur les mesures de vitesse était légèrement meilleure que celle de l'atténuation, c'est toutefois l'atténuation qui est choisi comme paramètre d'étude. En effet la dynamique des variations de l'atténuation en fonction de la fréquence est bien meilleure et fait de l'atténuation un critère d'étude plus significatif.

Pour finir, un modèle simple permet par problème inverse de comparer le signal temporel obtenu avec le signal réel réfléchi par une plaque de composite pré imprégné. La correspondance est bonne pour cette structure périodique. Le modèle est toutefois trop simple pour pouvoir être utilisé avec une plaque avec des couches à répartition aléatoire (non parallèles) comme pour les plaques de type RTM.

Chapitre 2 : Etude des transducteurs

Pour effectuer des mesures acoustiques, il faut des transducteurs, dont les propriétés soient bien connues. On envisage de mesurer des atténuations et comme on l'a vu au chapitre 1, la mesure est facilitée si l'onde incidente est plane. On veut également réaliser des cartographies de bonne précision. Dans le premier cas, il faut des transducteurs plans et dans le second, des transducteurs focalisants. Ces derniers permettent de détecter des défauts dont la dimension est comparable à la tache focale de transducteur. La connaissance des caractéristiques des transducteurs est donc très importante. Elle permet une bonne utilisation dans ces cas distincts. Le but de ce chapitre est de caractériser les transducteurs utilisés par la suite. Il s'agit d'études théoriques et expérimentales des transducteurs plans, focalisant mono élément et du transducteur multi éléments. Ce travail nous permet d'utiliser des transducteurs convenables selon nos besoins. En plus, il nous permet d'identifier un transducteur focalisant capable de fournir des signaux utilisables pour le calcul de l'atténuation.

2.1 Etude théorique

2.1.1 Principe de calcul

Dans ce travail nous avons développé un calcul qui décrit le champ ultrasonore dû à un émetteur dont la surface émissive vibre avec une vitesse normale uniforme, l'excitation étant créée par des oscillations continues. Ce calcul donne la distribution de la pression acoustique le long et en dehors de l'axe de symétrie.

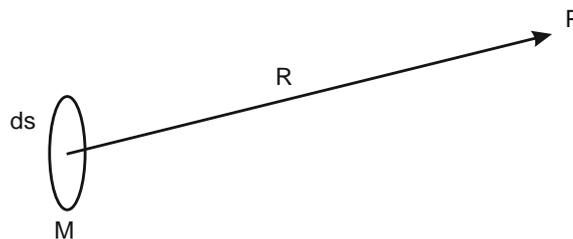


Figure 2 - 1 : Pression en un point

On utilise la méthode de Fresnel donnant la pression en un point P, à distance R de l'élément de surface ds qui crée une onde sphérique [22]:

$$d_p = \frac{j}{\lambda} p_0 \frac{e^{-jkR}}{R} ds \quad (2.1)$$

Où p_0 est la pression en ds , λ est la longueur d'onde. Dans l'écriture, on omet le terme temporel $e^{j\omega t}$.

2.1.2 Transducteur plan

2.1.2.1 Calcul de la pression en un point P sur l'axe z

On note a le rayon du transducteur, V_F la vitesse de propagation dans l'eau, λ la longueur d'onde.

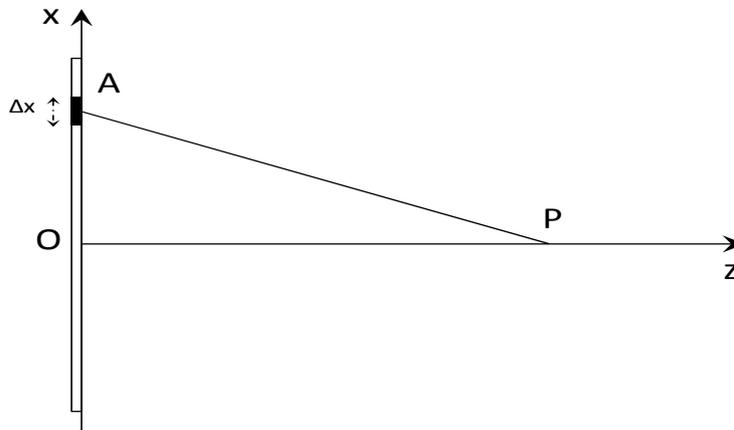


Figure 2 - 2 : Schéma de calcul d'un point sur axe

On calcule la pression au point P sur l'axe Oz créée par un secteur circulaire dont le rayon est $OA=x$ et la largeur est Δx . La contribution d'un anneau circulaire est déterminée par l'expression suivante :

$$\Delta A(x) = \frac{1}{AP} \frac{1}{\lambda} 2\pi x \Delta x e^{-j\omega \left(\frac{AP}{V_F} \right)} \quad (2.2)$$

Où :

$$AP = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (2.3)$$

La contribution de tous les points de la surface active du transducteur constitue la pression au point P. Elle est obtenue en sommant les $\Delta A(x)$ pour x variant de 0 à a .

2.1.2.2 Calcul de champ de pression en un point Q hors de l'axe

Sur le même principe, on somme encore les effets de petites surfaces Δs situées sur la couronne de rayon x . Mais les distances MQ ne sont pas identiques.

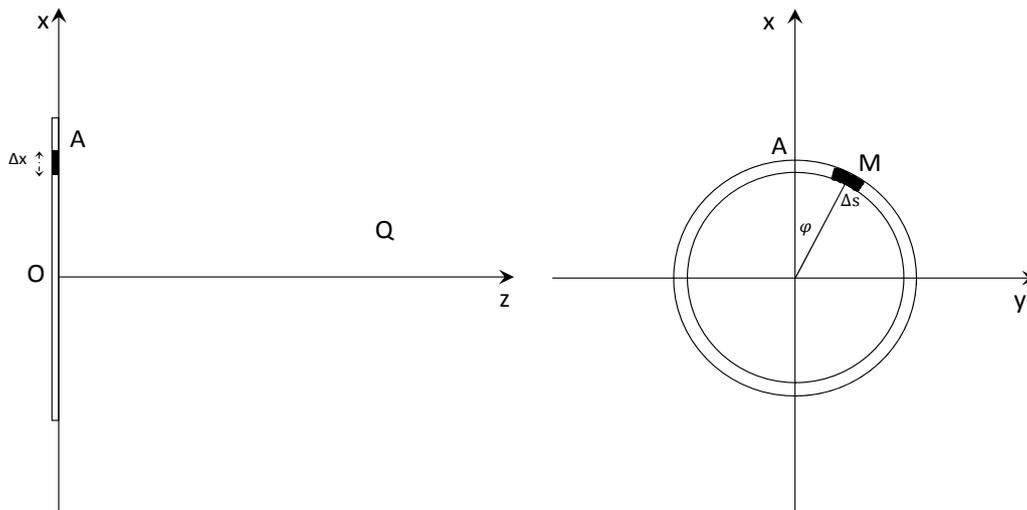


Figure 2 - 3 : Schéma de calcul d'un point hors de l'axe
 (a) Coupe dans le plan xOz (à gauche) et (b) Coupe dans le plan xOy (à droite)

On suppose que les coordonnées du point Q sont $(x_0, 0, z_0)$. Alors que les coordonnées du point M sont déterminées par $(x \cos \varphi, x \sin \varphi, 0)$. On déduit donc :

$$\Delta s = x \Delta \varphi \Delta x \text{ avec } \Delta \varphi = \frac{2\pi}{n} (n \text{ entier}) \quad (2.4)$$

La contribution de Δs est donnée par la formule suivante :

$$\Delta A(x, \varphi) = x \Delta \varphi \Delta x \frac{1}{MQ} \frac{1}{\lambda} e^{-j\omega \left(\frac{MQ}{V_F} \right)} \quad (2.5)$$

La pression au point Q est obtenue par sommation sur φ puis sur x .

2.1.3 Transducteur focalisant

2.1.3.1 Description

La focalisation d'un transducteur mono-élément est obtenue par ajout d'une lentille acoustique. Pour ce faire, une lame adaptatrice plane peut être collée en premier lieu sur un élément piézo-électrique plat, puis la lentille est ajoutée par moulage [23].

Le calcul de la pression du faisceau émis par un transducteur focalisant peut facilement être réalisé en admettant que la pastille piézoélectrique plane émet (sur une surface limitée) une onde quasi plane. Après la traversée de la lentille concave en plexiglas (rayon de courbure R), les rayons acoustiques sont dirigés vers l'axe Oz de la pastille (Figure 2 - 4). La surface de la lentille, découpée en éléments de surface élémentaires, transmet des pinces ultrasonores de petite section. La sommation peut être réalisée en tous points de l'axe et proche de celui-ci. On calcule soit la pression, soit l'intensité proportionnelle au carré de la pression [24 25]. On définit, autour du point où se situe le maximum de la pression, une zone à -3 db ayant une longueur selon Oz appelée profondeur de champ et selon l'axe Oy , perpendiculaire à l'axe Oz , un diamètre appelé résolution latérale.

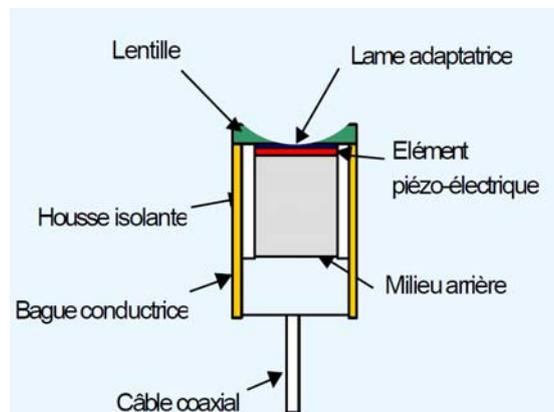


Figure 2 - 4 : Configuration d'un transducteur focalisant

2.1.3.2 Calcul de la pression en un point P sur l'axe z

On note a le rayon du transducteur. La lentille possède un rayon R , son centre est C . On considère un élément de surface Δs centré en M . θ est l'angle entre MC et l'axe Oz . L'onde élémentaire décrit le trajet BMP , traversant le matériau acrylique (vitesse V_L) puis l'eau (vitesse V_F). La distance BM est aussi notée z_M .

$$BM = R - \sqrt{R^2 - x^2} \quad (2.6)$$

$$\cos\theta = \frac{R - BM}{R}$$

Enfin la distance MP s'exprime par :

$$MP = \sqrt{x^2 + (z - z_M)^2} \quad (2.7)$$

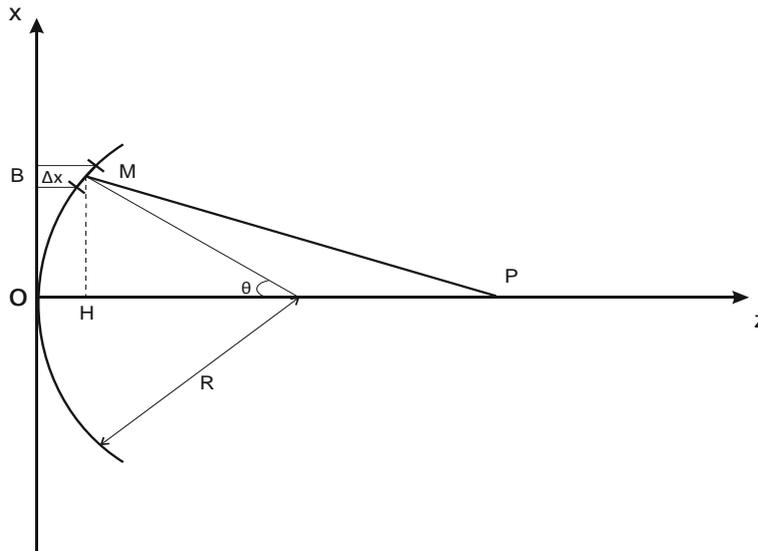


Figure 2 - 5 : Schéma de calcul d'un point sur axe – Coupe selon le plan xOz

La pression au point P sur l'axe Oz, créée par un secteur circulaire dont le rayon est $OB=x$ et

la largeur $\frac{\Delta x}{\cos(\theta)}$, est donnée par :

$$\Delta A(x) = \frac{1}{MP} \frac{1}{\lambda} 2\pi x \Delta x \frac{R}{R - z_M} e^{-j\omega \left(\frac{MP}{V_F} + \frac{BM}{V_L} \right)} \quad (2.8)$$

Ensuite, la pression en P est obtenue en sommant sur l'ensemble des ΔA .

2.1.3.3 Calcul de la pression en un point Q hors de l'axe

On somme encore les effets de petites surfaces Δs situées sur la couronne de rayon x , au point M. On calcule la pression au point Q, situé dans le plan xOz alors que M se déplace dans le plan xOy. Cette fois la distance MQ est variable lorsque M se déplace sur la

couronne. Les coordonnées du point Q sont $((x_0, 0, z_0))$. Les coordonnées du point M sont $(x \cos \varphi, x \sin \varphi, z_M)$. On déduit donc :

$$MQ^2 = (x_0 - x \cos \varphi)^2 + (x \sin \varphi)^2 + (z_0 - z_M)^2 \quad (2.9)$$

$$\Delta s = x \Delta \varphi \frac{\Delta x}{\cos \theta} \text{ avec } \Delta \varphi = \frac{2\pi}{n}$$

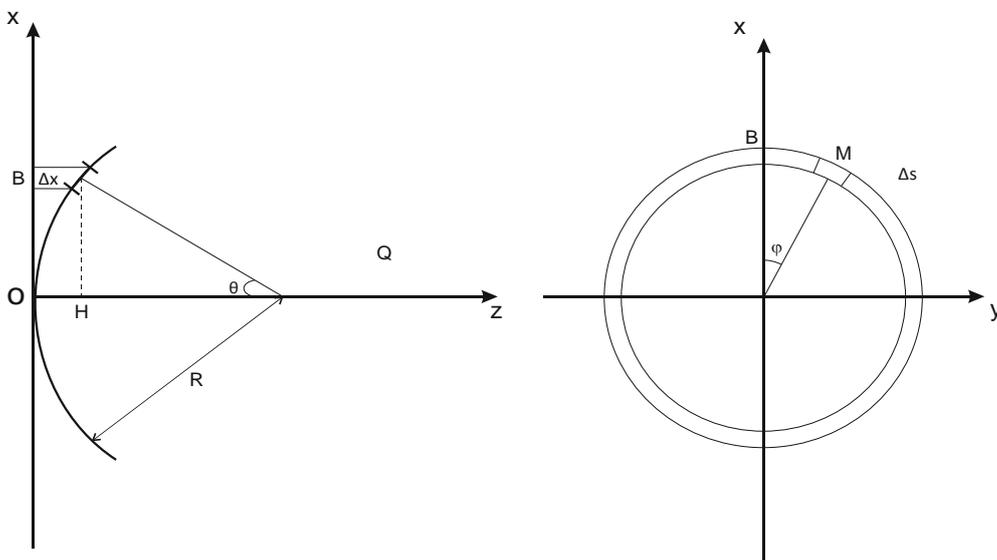


Figure 2 - 6 : Schéma de calcul d'un point hors axe – Coupe dans le plan xOz – Coupe dans le plan xOy

La contribution en Q de Δs est donc :

$$\Delta A(x, \varphi) = x \Delta \varphi \frac{\Delta x}{\cos \theta} \frac{1}{MQ} \frac{1}{\lambda} e^{-j\omega \left(\frac{MQ}{V_F} + \frac{z_M}{V_L} \right)} \quad (2.10)$$

La pression au point Q est obtenue en sommant successivement sur φ et sur x .

2.1.4 Transducteur multi éléments

Nous serons amenés à utiliser des transducteurs multiéléments au chapitre 4. Il est donc indispensable de présenter également leur principe. Ces transducteurs utilisent des réseaux de pastilles piézoélectriques élémentaires disposées en ligne ou en matrice. Nous nous

limitons aux transducteurs linéaires utilisés. Leur utilisation est limitée ici à la focalisation en un point à une distance que l'on impose et possédant des qualités de focalisation choisies.

2.1.4.1 Description

Un transducteur multiéléments linéaire est constitué d'une succession d'éléments piézoélectriques de largeur a , de longueur b , séparés du pas d . Les éléments sont alimentés individuellement par la même impulsion et n'interagissent pas entre eux. On peut introduire des décalages temporels entre les électrodes afin de réaliser une focalisation comme pour un transducteur mono-élément.

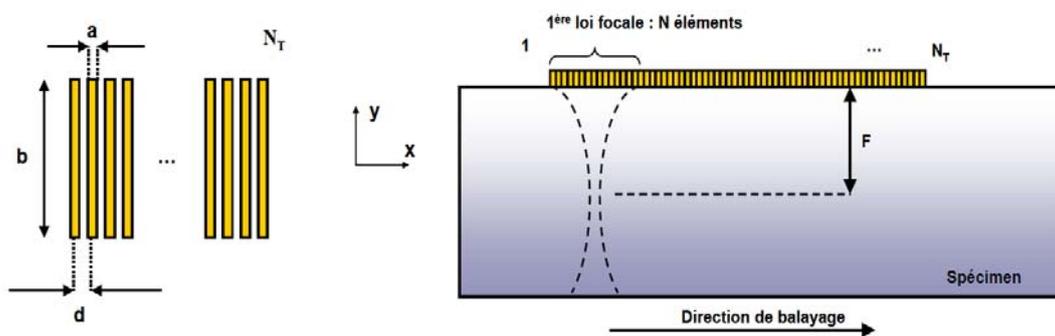


Figure 2 - 7 : (a) Dimension des éléments constituant la sonde (à gauche) et (b) Illustration d'une distance focale F (à droite)

Pour focaliser en un point, chaque élément émet une onde sphérique avec un retard calculé [26] afin de focaliser au point focal choisi. Les échos des signaux, reçus en retour, par chaque élément du capteur sont ensuite retardés avant d'être additionnés.

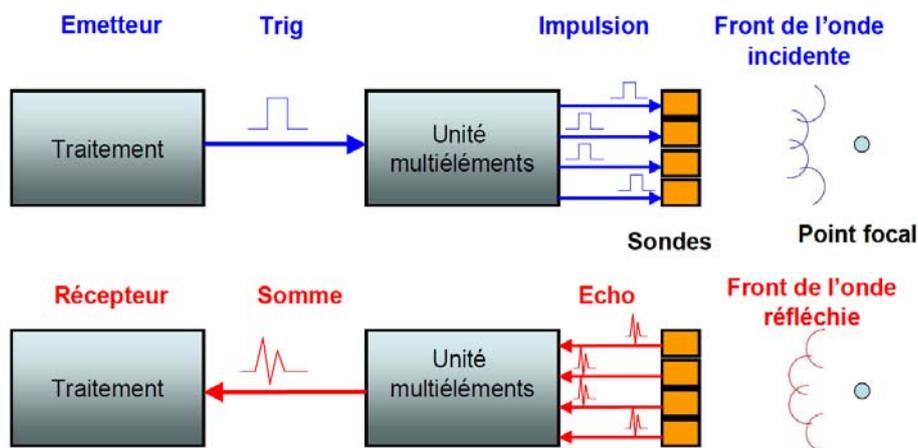


Figure 2 - 8 : Emission et réception dans l'unité multi éléments

2.1.4.2 Etablissement de la loi focale

Etablir une loi focale consiste à :

- choisir les électrodes actives destinées à réaliser la focalisation.
- définir une distance focale F.
- calculer le retard temporel entre les impulsions appliquées aux électrodes.

Le changement des éléments actifs permet un décalage du point focal selon Ox et nécessite une nouvelle loi focale.

Dans l'exemple suivant, on utilise simultanément N=16 éléments actifs qui focalisent en un point qui peut être déplacé en changeant les N éléments d'un bout à l'autre de la barrette.

Les éléments sont numérotés de 0 à N-1 (de gauche à droite), ils sont en nombre pair.

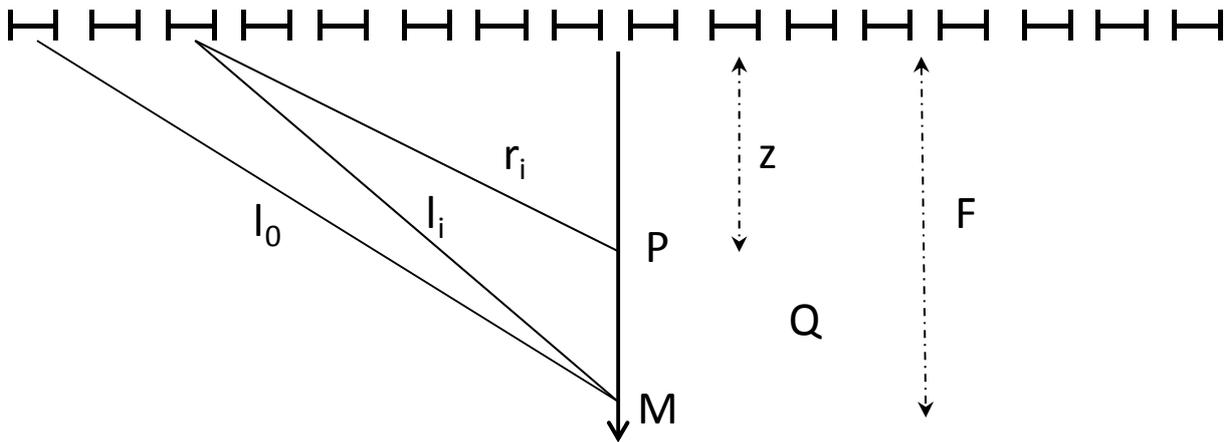


Figure 2 - 9 : Schéma de calcul

Dans le cas d'une propagation dans un seul milieu, le temps nécessaire de chaque élément pour atteindre le point focal M est déterminé par :

$$t(n_i) = \frac{l_i}{V} = \frac{F}{V} \left(\sqrt{1 + \left(\left(n_i - \frac{N-1}{2} \right) \frac{d}{F} \right)^2} \right) \quad (2. 11)$$

La référence temporelle est celle des éléments extrêmes ($n_i=0$ et $n_i=N-1$). Soit :

$$t(0) = \frac{F}{V} \left(\sqrt{1 + \left(\left(\frac{N-1}{2} \right) \frac{d}{F} \right)^2} \right) \quad (2.12)$$

Le retard à imposer à l'élément n_i est donc $\Delta t(n_i) = t(n_i) - t(0)$

La loi de retard dépend des éléments utilisés par la loi focale, de la distance focale F choisie, de la vitesse ultrasonore dans le milieu et de la distance inter-éléments d du transducteur multiéléments. La loi de retard donnée ici concerne les éléments $n=0$ à $n=N-1$ et permet la focalisation à la distance F pour $x = (N-1) \frac{d}{2}$. Le balayage électronique dans la direction x consiste à changer les éléments actifs et à adapter la loi de retard conservant F .

2.1.4.3 Calcul de pression

Selon le principe de Huygens, la pression reçue ponctuellement est l'intégrale des contributions de chaque élément de surface élémentaire [27]. La pression au point P est donc calculée par la formule suivante :

$$A(z) = \frac{a}{\lambda r_i} e^{-j\omega \left(\frac{r_i}{V} - \Delta t(n_i) \right)} \quad (2.13)$$

$$r_i = z \left(\sqrt{1 + \left(\left(n_i - \frac{N-1}{2} \right) \frac{d}{z} \right)^2} \right)$$

De même principe, la pression au point $Q(x,z)$ hors de l'axe est déterminée par :

$$A(z) = \frac{a}{\lambda r_{Qi}} e^{-j\omega \left(\frac{r_{Qi}}{V} - \Delta t(n_i) \right)} \quad (2.14)$$

$$r_{Qi} = z \left(\sqrt{1 + \left(\left(n_i - \frac{N-1}{2} \right) \frac{d}{z} - \frac{x}{z} \right)^2} \right)$$

2.1.5 Résultats obtenus

2.1.5.1 Résultats obtenus avec transducteur plan

On présente d'abord les résultats concernant un transducteur plan de 10 MHz et de diamètre 0.5". Ce transducteur sera ensuite utilisé dans l'eau à une distance de 50 mm des plaques. Le calcul du champ de pression est réalisé sur le volume compris entre 45 et 55 mm selon l'axe z et de 0 à 5 mm selon l'axe y.

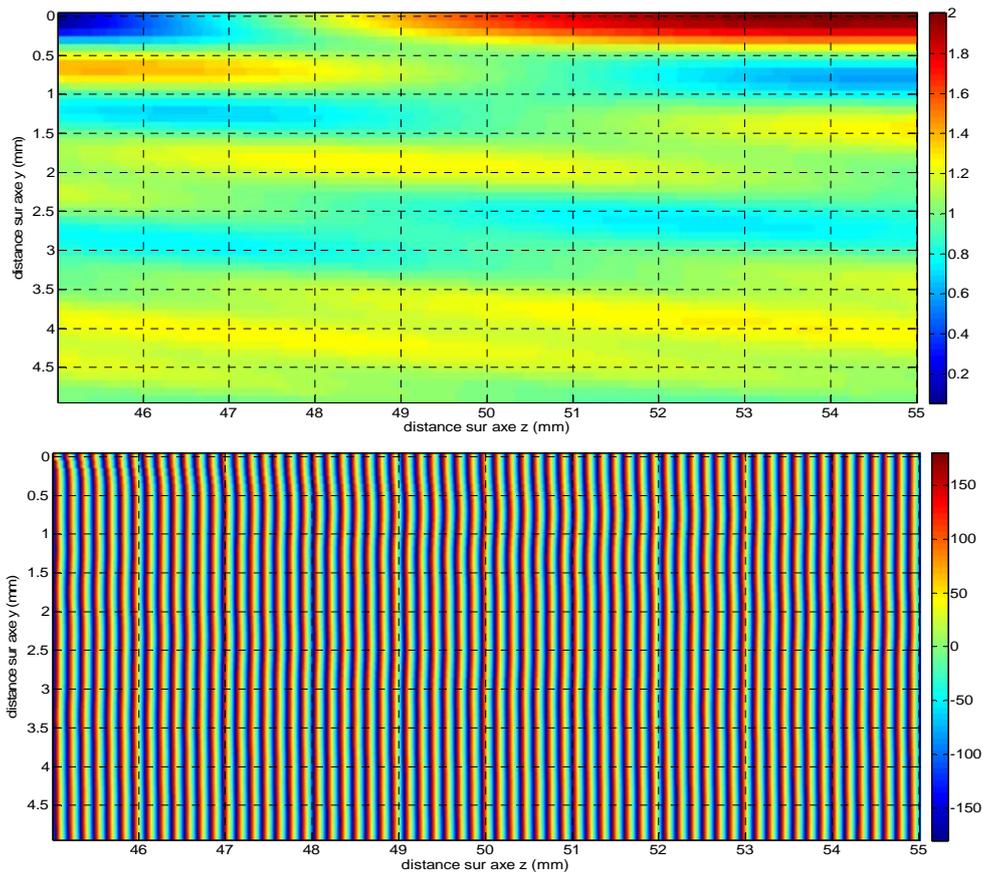


Figure 2 - 10 : Transducteur plan à 10 MHz (diamètre 0.5'')
(a) Module de la pression (en haut) et (b) Phase de la pression (en bas)

L'amplitude de la pression et la phase à 10 MHz sont présentés dans la Figure 2 - 10. Le calcul a été réalisé en incrémentant z pour chaque valeur de y. De ce fait, la phase présente les discontinuités habituelles à $+\pi$ ou $-\pi$. Le développement de la phase n'a pas été réalisé afin de mieux montrer les écarts par rapport à l'onde plane. On constate une inhomogénéité des amplitudes due au fait que les distances sont très inférieures à la distance de Fresnel du transducteur (270 mm à 10 MHz).

L'amplitude et la phase de la pression sur l'axe z (entre 50 et 550 mm) et sur l'axe y à la distance de $z=50$ mm de ce transducteur sont détaillés dans la Figure 2 - 11.

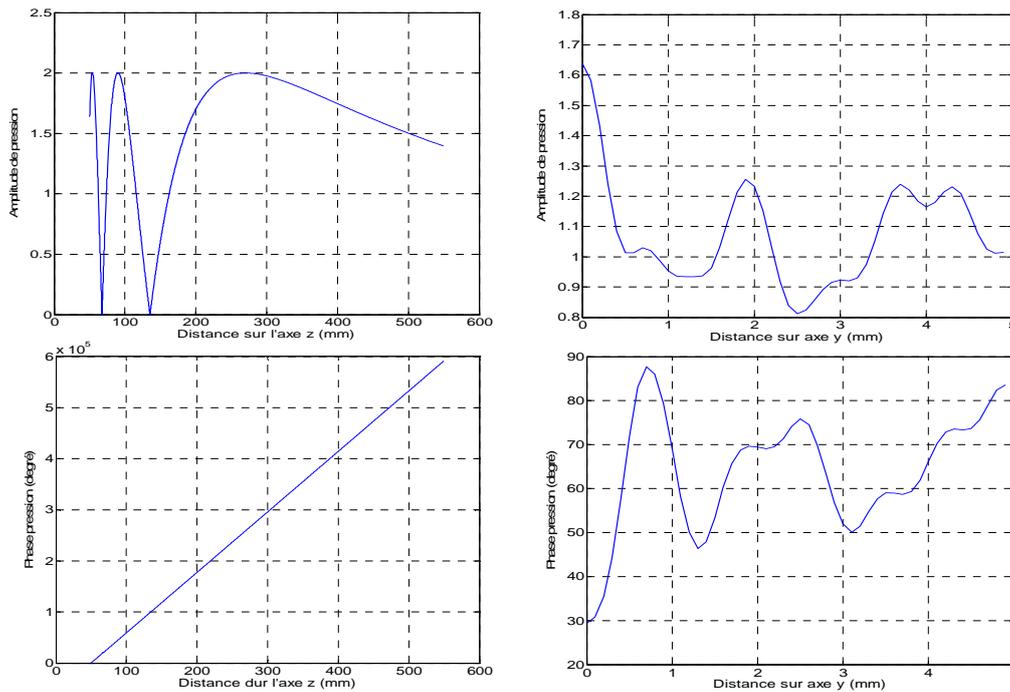


Figure 2 - 11 : Pression et phase acoustique selon l'axe z (à gauche) et selon l'axe y à z=50 mm (à droite).

2.1.5.2 Résultats obtenus avec transducteur focalisant mono élément

Dans ce travail, on utilise certains transducteurs focalisant mono élément de 10 MHz avec des paramètres différents tels que la distance focale et le diamètre du transducteur. Cela fournit des taches focales différentes selon les besoins des études dans des cas concrets. Nous utilisons des transducteurs de fréquence centrale de 10 MHz, de focale 1" ou 2", de diamètre 0.25" ou 0.5". Pour chaque transducteur, on calcule :

- La distance focale : maxima de pression sur l'axe z.
- La profondeur de champ à -3 dB : c'est la distance sur l'axe z séparant deux points de pression maximale par racine de 2.
- La résolution latérale à -3 dB à la distance focale : c'est la distance sur l'axe y perpendiculaire à l'axe z séparant deux points de pression maximale par racine de 2.

Dans ce travail de thèse, nous utilisons des transducteurs de fréquence centrale 10 MHz, de focale 1" ou 2", de diamètre 0.25" ou 0.5".

➤ *Transducteur focalisant 10 MHz de diamètre 0.5" et de distance focale 1"*

Les premiers résultats sont ceux d'un transducteur focalisant exemplaire, c'est-à-dire réalisant une focalisation presque parfaite. Il possède une fréquence centrale de 10 MHz,

possède un diamètre de 0.5" et une distance focale 1" à la fréquence centrale. Le rayon de courbure de la lentille concave est de 12.05 mm.

La pression est calculée dans un domaine de z compris entre 22 et 28 mm et pour y inférieur à 1 mm. Le module et la phase sont donnés dans la Figure 2 - 12. La focalisation est manifeste, la résolution latérale à 10 MHz est de 0.32 mm et permet au faisceau d'interagir avec les macros pores présents dans une plaque composite.

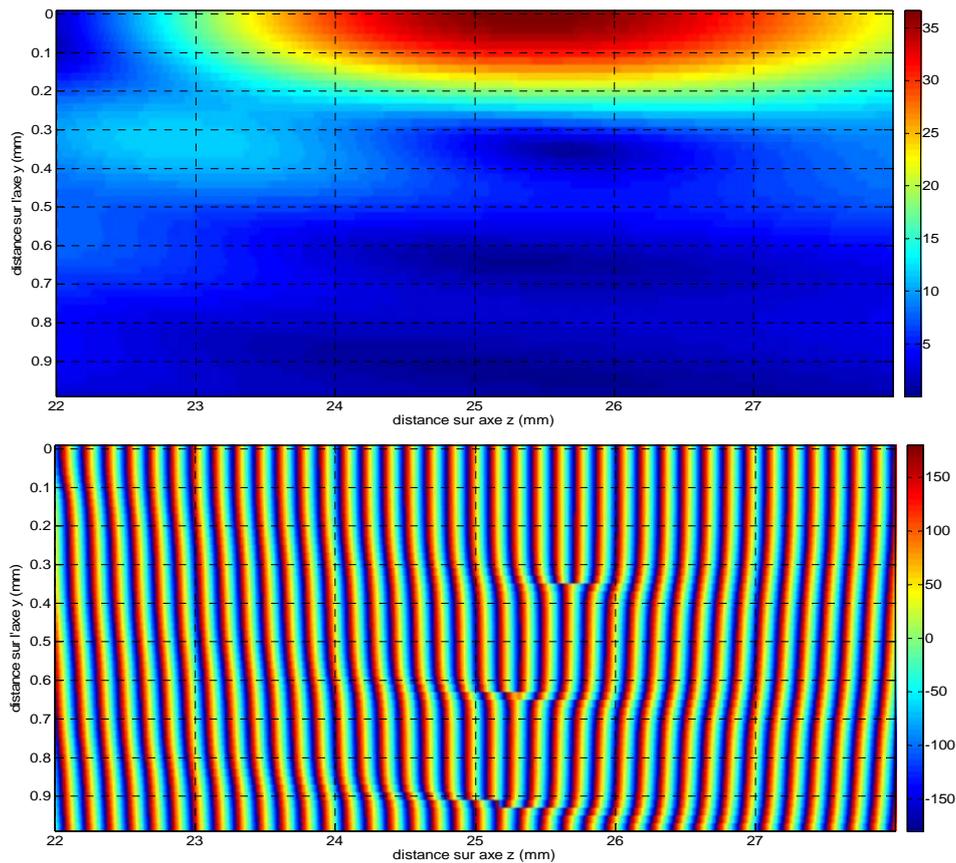
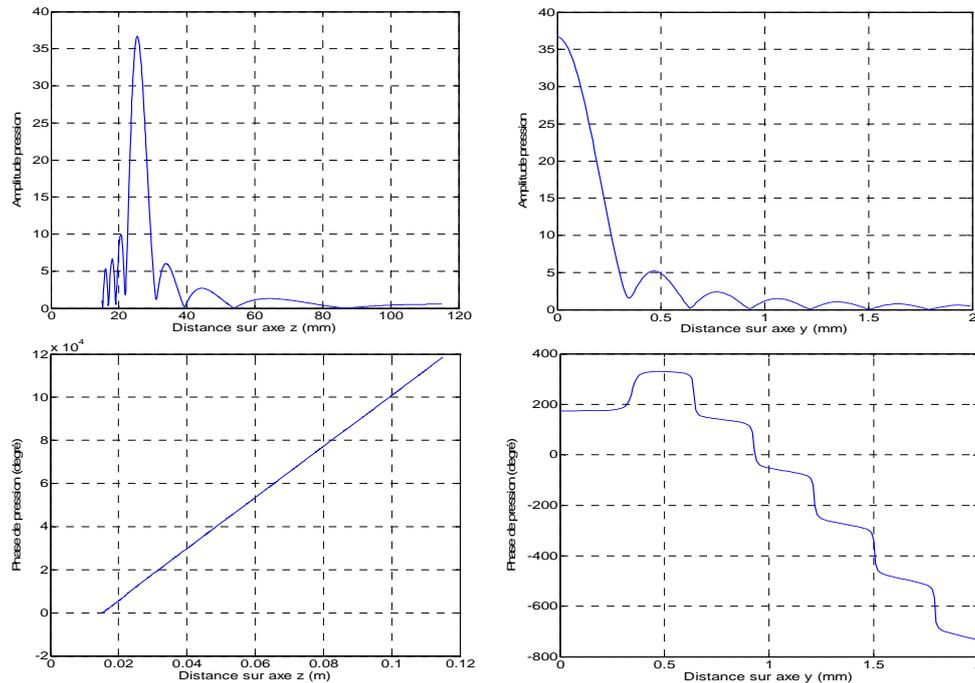


Figure 2 - 12 : Transducteur focalisant à 1" à 10 MHz (diamètre 0.5")
(a) Module de la pression (en haut) et (b) Phase de la pression (en bas)

Le module et la phase de la pression sont précisées (Figure 2 - 13) selon l'axe z (entre 15 et 115 mm) et selon l'axe y à $z=1"$. Les variations de la phase, par rapport à l'onde plane, apparaissent plus nettement.

Les calculs ont été réalisés à d'autres fréquences (entre 4 et 16 MHz). Ils fournissent, pour chaque fréquence, la distance focale (au maximum du module sur l'axe z), la profondeur de champ (à -3 dB) et la résolution latérale (à -3 dB) mesurée au point focal. On voit que la distance focale varie peu avec la fréquence et que la profondeur de champ et la résolution

latérale diminuent lorsque la fréquence augmente. Tout ceci est typique d'un transducteur focalisant correctement.



**Figure 2 - 13 : Transducteur focalisant à 1" à 10 MHz (diamètre 0.5")
Pression : module et phase développée selon l'axe z (à gauche) et selon l'axe y à z=1" (à droite)**

Les dimensions de la profondeur de champ et de la résolution latérale sont données dans le Tableau 2 - 1. La résolution latérale est à comparer à la longueur d'onde 0.149 mm.

Fréquence (MHz)	4	6	8	10	12	14	16
Distance focale (mm)	24.3	25	25.3	25.4	25.5	25.5	25.5
Profondeur de champs -3dB (mm)	8.7	6.1	4.7	3.7	3.1	2.6	2.4
Résolution latérale -3dB (mm)	0.72	0.52	0.4	0.32	0.28	0.24	0.2

Tableau 2 - 1 : Transducteur focalisant à 1" à 10 MHz (diamètre 0.5") - Calcul de tache focale en fonction de la fréquence

➤ *Transducteur focalisant 10 MHz de diamètre 0.5" et de distance focale 2"*

Ce transducteur possède un diamètre de 0.5" et une distance focale de 2" à 10 MHz. Son rayon de courbure est R=24.5 mm. On explore le volume contenant la pression maximale

entre 44 mm et 61 mm selon l'axe z et de 0 mm à 2 mm selon l'axe y. La Figure 2 - 14 présente le champ de pression et sa phase à 10 MHz. Sur cette figure, on voit clairement la tache focale et l'évolution de phase entre $-\pi$ et $+\pi$ donnée par la fonction arc-tangente. Les variations de la phase restent très éloignées de celles du transducteur plan.

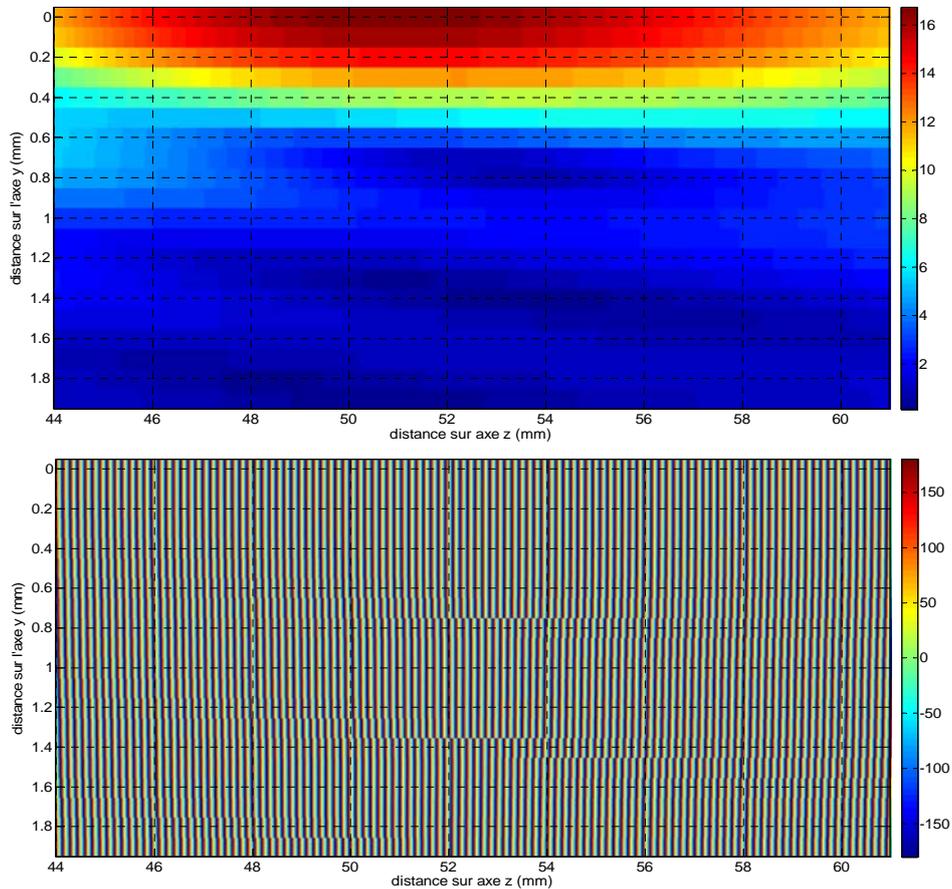


Figure 2 - 14 : Transducteur focalisant à 2" à 10 MHz (diamètre 0.5")
(a) Module de la pression (en haut) et (b) Phase de la pression (en bas)

Un détail des variations de la pression est donné dans la Figure 2 - 15. La pression est calculée sur l'axe z entre 15 et 115 mm, montrant un maximum à 50.8 mm. La phase déroulée montre que l'onde se propage dans l'eau avec la vitesse $V_L=1490$ m/s.

A droite, on représente la pression au maximum sur l'axe z.

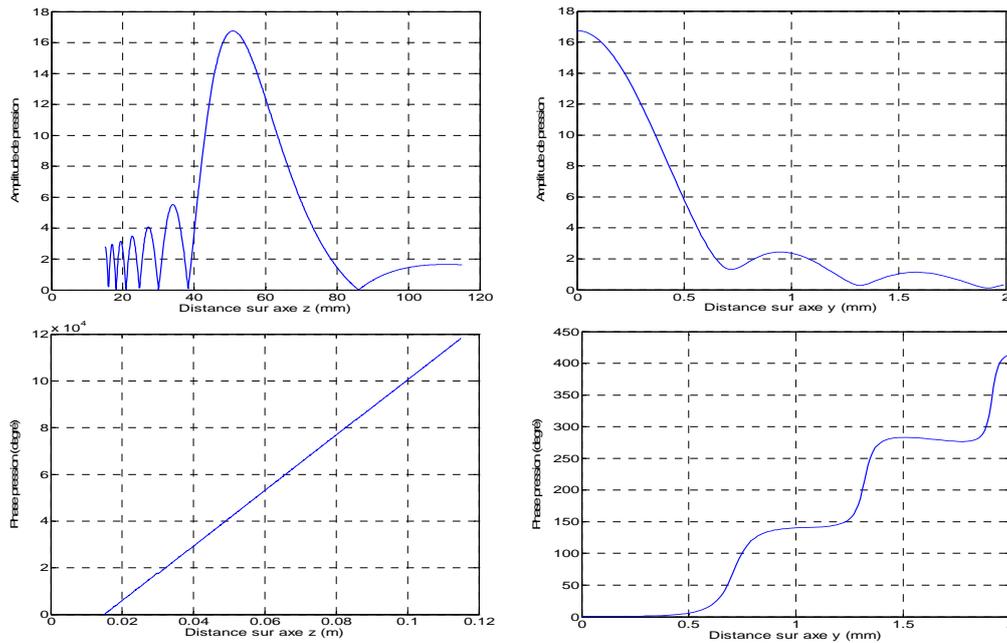


Figure 2 - 15 : Transducteur focalisant à 2'' à 10 MHz (diamètre 0.5'')
Pression : module et phase développée sur l'axe z (à gauche) et sur l'axe y à z=2'' (à droite).

Les calculs des profondeurs de champ et de résolution latérale sont réalisés à plusieurs fréquences. Les résultats sont montrés dans le Tableau 2 - 2.

Fréquence (MHz)	4	6	8	10	12	14	16
Distance focale (mm)	43.4	47.7	49.8	50.8	51.4	51.8	52.1
Profondeur de champ -3dB (mm)	30	24.5	19.9	16.6	14.1	12.2	10.8
Résolution latérale -3dB (mm)	1.32	0.96	0.76	0.62	0.52	0.46	0.4

Tableau 2 - 2 : Transducteur focalisant à 2'' à 10 MHz (diamètre 0.5'') - Calcul de tache focale en fonction de la fréquence

On retrouve ici un résultat important rencontré lors de l'étude du premier transducteur : lors de l'augmentation de la fréquence, la profondeur de champ et la résolution latérale diminuent. Par contre la distance focale varie sensiblement (et augmente avec la fréquence). Le domaine utile est de forme à peu près elliptique et assez allongé. Donc si le transducteur est utilisé pour réaliser des cartographies de plaques d'épaisseur de 3 à 4 mm, il assurera une focalisation dans toute l'épaisseur de la plaque. Alors que le précédent transducteur permet, en fonction des réglages de la distance, de focaliser plus précisément sur une face ou l'autre.

➤ *Transducteur focalisant 10 MHz de diamètre 0.25" et de distance focale 2"*

Le transducteur focalisant utilisé est un transducteur à immersion de 10 MHz, de 0.25" de diamètre et de 2" de distance focale. Son rayon de courbure est de 59.3 mm. Le calcul du champ de pression est réalisé sur un volume défini par : z compris entre 44 et 61 mm, y inférieur à 2 mm. Ce domaine ne nous permet pas de bien visualiser entièrement la tache focale du transducteur. La pression théorique (module et phase) est représentée Figure 2 - 16. Le module montre une focalisation moins prononcée que dans les deux cas précédents. La forme de la zone focale n'est plus celle d'un ellipsoïde. Sa largeur augmente lorsque z croît. Par contre, selon z, la pression reste forte dans un domaine très important (quelques dizaines de mm) en conservant une largeur selon y de l'ordre du mm. L'évolution de la phase est semblable à celle du transducteur plan : l'onde est proche de l'onde plane (certainement même plus proche que celle du transducteur plan !). On ne pourra pas réaliser des cartographies très précises avec ce transducteur car sa résolution latérale n'est pas assez bonne. Par contre l'onde plane qu'il produit sur un volume de forte longueur permet de l'utiliser comme transducteur plan de très faible diamètre. Il doit permettre de mesurer l'atténuation de façon plus locale.

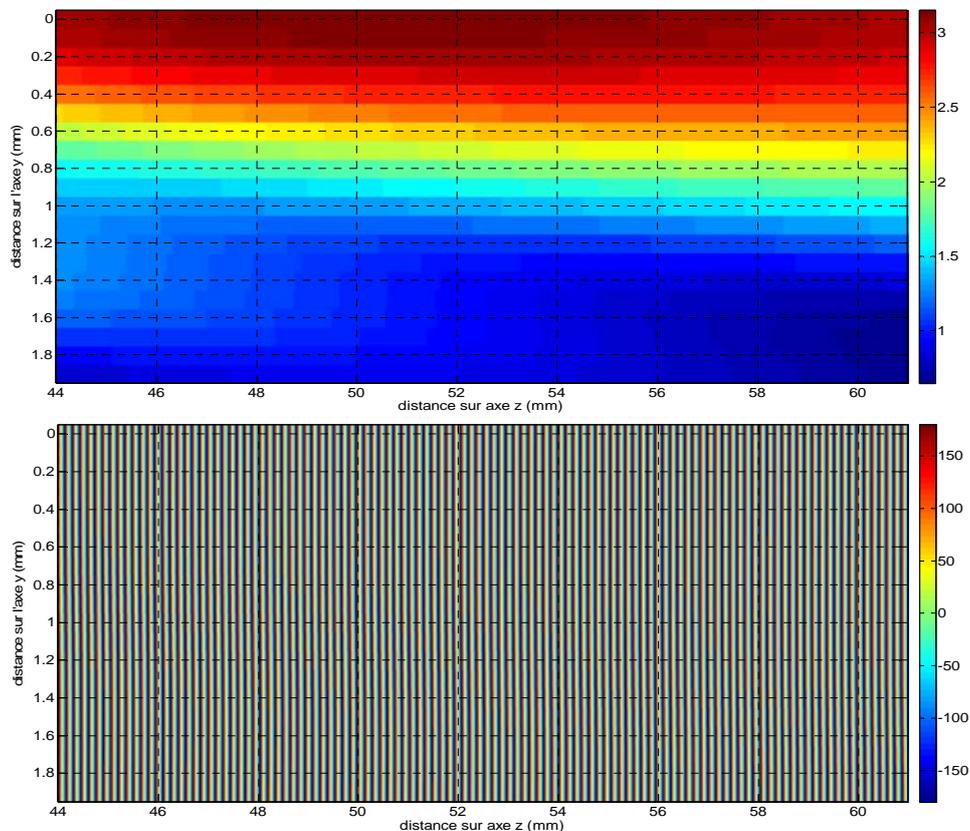


Figure 2 - 16 : Transducteur focalisant à 2" à 10 MHz (diamètre 0.25")
(a) Module de la pression et (b) Phase de la pression

Comme pour les exemples précédents, on calcule le module et la phase de la pression sur l'axe z (de 15 à 115 mm) et pour y inférieur à 2 mm lorsque z égale 2". Les variations de phase selon y, à z constant, sont très inférieures à celles des transducteurs précédents.

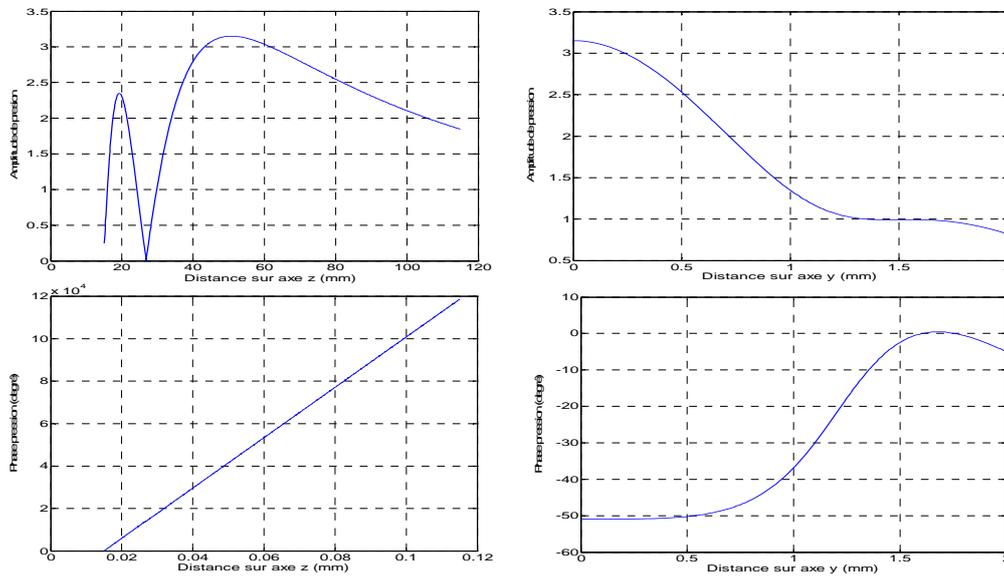


Figure 2 - 17: Transducteur focalisant à 2" à 10 MHz (diamètre 0.25")

Pression : module et phase développée selon l'axe z (à gauche) et selon l'axe y à z=2" (à droite)

Les dimensions de la tache focale à -3 dB en fonction de la fréquence sont ensuite calculées. Les résultats dans le tableau indiquent que dans ce cas particulier, la distance focale augmente beaucoup si la fréquence croît. Il en est de même pour la profondeur de champ qui augmente très fortement alors que la résolution latérale diminue. La structure de quasi onde plane est donc plus étendue que dans un transducteur plan standard. On a même un chevauchement des zones à -3 dB obtenus à des fréquences différentes. Si une impulsion est réfléchiée dans ce domaine de distance, ses différentes composantes seront relativement bien conservées.

Fréquence (MHz)	4	6	8	10	12	14	16
Distance focale (mm)	24	34	42.9	50.8	57.8	64.1	69.7
Profondeur de champs -3dB (mm)	30.4	41.8	50.5	58.7	64.8	69.4	73.1
Résolution latérale -3dB (mm)	1.52	1.42	1.34	1.26	1.2	1.14	1.08

Tableau 2 - 3 : Transducteur focalisant à 2" à 10 MHz (diamètre 0.25") - Calcul de tache focale en fonction de la fréquence

2.1.5.3 Résultat du transducteur multi élément à haute résolution 10L128-I2

Le transducteur multiéléments à haute résolution 10L128-I2 (Olympus) se compose de $N = 128$ éléments d'une fréquence centrale de 10 MHz (Figure 2 - 7(a)). Chaque élément possède une largeur $a = 0.25$ mm et une longueur $b = 7$ mm. Le pas séparant deux éléments est $d = 0.5$ mm. On génère un faisceau focalisé avec $N = 16$ éléments pour chaque loi focale et avec un pas de 1 élément entre chaque loi focale. Cette configuration permet un déplacement « électronique » de 113 pas. Les lois focales sont administrées par le logiciel TomoView associé à une unité d'acquisition TomoScan Focus LT.

On s'intéresse à la pression dans l'eau sur l'axe z perpendiculaire. On calcule la valeur de z donnant le maxi et la zone à -3 dB (profondeur de champ). Au maximum, on détermine la largeur de la tache selon x , à -3 dB (résolution latérale). On ne dispose pas d'informations sur la largeur de la tache focale selon y puisqu'il n'y a pas focalisation selon cet axe.

On étudie la variation de la tache focale en fonction du nombre d'éléments et de la distance focale et de la fréquence. Le Tableau 2 - 4 montre la relation entre la tache focale et la distance focale dans le cas de 16 éléments et à 10 MHz.

Distance focale (mm)	10	15	20	25	30	40
Z max (mm)	9.90	14.65	19.2	23.58	27.7	35.13
Profondeur de champs -3dB (mm)	1.73	3.6	6.2	9.25	12.7	20.4
Résolution latérale -3dB (mm)	0.176	0.256	0.336	0.40	0.48	0.608

Tableau 2 - 4 : Variations de la tache focale en fonction de la distance focale

Comme on s'y attendait, plus la distance focale augmente, plus les dimensions de la tache focale augmentent (en conservant le même nombre d'éléments actifs).

L'étude de la tache focale indique, dans le Tableau 2 - 5, la dépendance de la profondeur de champs et de la résolution latérale en fonction du nombre d'éléments actifs à une focale fixe de 15 mm et à la fréquence 10 MHz.

Nombre d'éléments actifs	8	16	24	32	40	48
Z max (mm)	11.6	14.56	14.90	14.95	15.00	15.00
Profondeur de champ -3dB (mm)	9.05	3.60	1.75	1.00	0.70	0.50
Résolution latérale -3dB (mm)	0.416	0.256	0.192	0.160	0.120	0.106

Tableau 2 - 5 : Variation de la tache focale en fonction du nombre d'éléments actifs

On constate que si le nombre d'éléments augmente, la tache focale se rapproche du point. On étudie ensuite la relation entre la profondeur de champs et la résolution latérale avec la fréquence dans le cas d'une distance focale de 15 mm et de 16 éléments actifs. C'est la configuration que l'on va utiliser par la suite.

La Figure 2 - 18 présente les lois focales, la pression selon z et la pression selon x du transducteur multi éléments avec cette configuration.

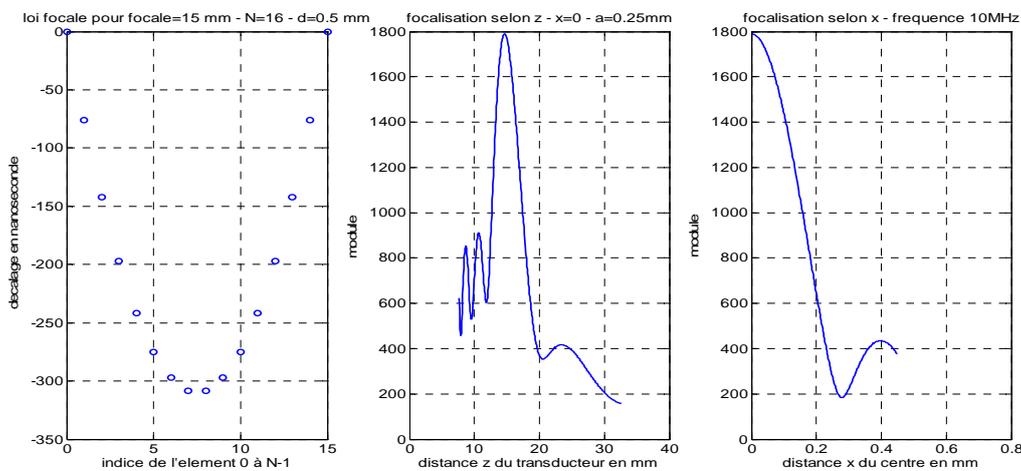


Figure 2 - 18 : (a) Lois focales (à gauche), (b) Pression selon l'axe z (au centre), (c) Pression selon l'axe x (à droite)

Il faut noter que la loi focale donnée sur la Figure 2 - 18 n'est pas le temps de propagation $t(n_i)$ calculé par la formule (2. 11) mais de la différence ici $t(n_i) - t(0)$ représentant le retard de l'impulsion appliquées à l'électrode n_i par rapport aux électrodes 0 et N-1.

Le Tableau 2 - 6 montre la variation de la profondeur de champs et de la résolution latérale en fonction de la fréquence (N=16).

Fréquence (MHz)	5	7.5	10	12.5	15
Z max (mm)	13.75	14.40	14.65	14.75	17.85
Profondeur de champ -3dB (mm)	6.5	4.7	3.60	2.95	2.50
Résolution latérale -3dB (mm)	0.48	0.336	0.256	0.208	0.176

Tableau 2 - 6 : Variation de la tache focale en fonction de la fréquence

On constate que plus la fréquence augmente plus les dimensions de la tache focale diminuent (comme pour un transducteur mono-élément).

2.2 Etude expérimentale

Il est utile de vérifier expérimentalement certaines propriétés mises en évidence par le calcul. En particulier pour les transducteurs mono-élément destinés à la réalisation de cartographie ou de mesure d'atténuation. Nous avons réalisé deux sortes de relevés. Le premier consiste à enregistrer les signaux réfléchis (écho de surface et écho de fond) par une plaque plane et homogène de plexiglas et à examiner leur forme lorsque la distance plaque-transducteur varie. Le second n'est qu'un complément de la première étude : il consiste à calculer l'atténuation des ondes longitudinales dans le plexiglas, en appliquant toujours la même méthode [28].

On envisage d'utiliser le transducteur focalisant à 2" pour 10 MHz (diamètre 0.25") pour le calcul. Il faut s'assurer donc que ce transducteur se comporte comme un transducteur plan dans le domaine focal où est positionnée la plaque.

2.2.1 Suivi des échos réfléchis.

Ce travail consiste à utiliser la réflexion d'une impulsion sur une plaque de PMMA (plexiglas) d'épaisseur 5 mm. On relève l'écho de surface et l'écho de fond lorsque la distance entre plaque et transducteur varie. On considère que l'atténuation dans l'eau est négligeable. Si l'onde est plane, la forme des deux signaux doit être conservée. Les relevés des amplitudes de l'écho de surface (bleu) et de l'écho de fond (rouge) sont montrés dans la Figure 2 - 19 dans le cas du transducteur plan 10 MHz diamètre 0.5". Sur la figure suivante (Figure 2 - 20) on donne les résultats obtenus avec les transducteurs focalisant à 2" pour 10 MHz (diamètres 0.5" et 0.25").

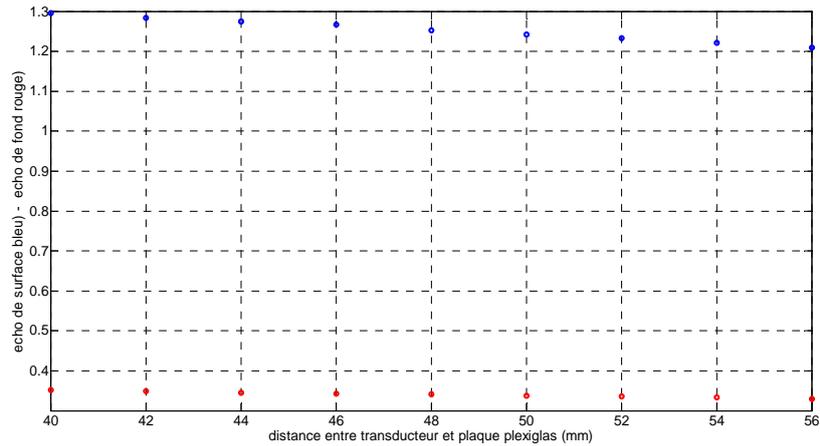


Figure 2 - 19 : Transducteur plan 10 MHz, diamètre 0.5" Relevés de l'amplitude de l'écho de surface (bleu) et de fond (rouge) en fonction de la distance

Les résultats obtenus avec le transducteur plan 10 MHz peuvent servir de référence. Bien que le transducteur travaille dans le champ proche, la variation de l'amplitude des échos de surface et de fond est faible et leur rapport reste bien constant en fonction de la distance entre transducteur et la plaque.

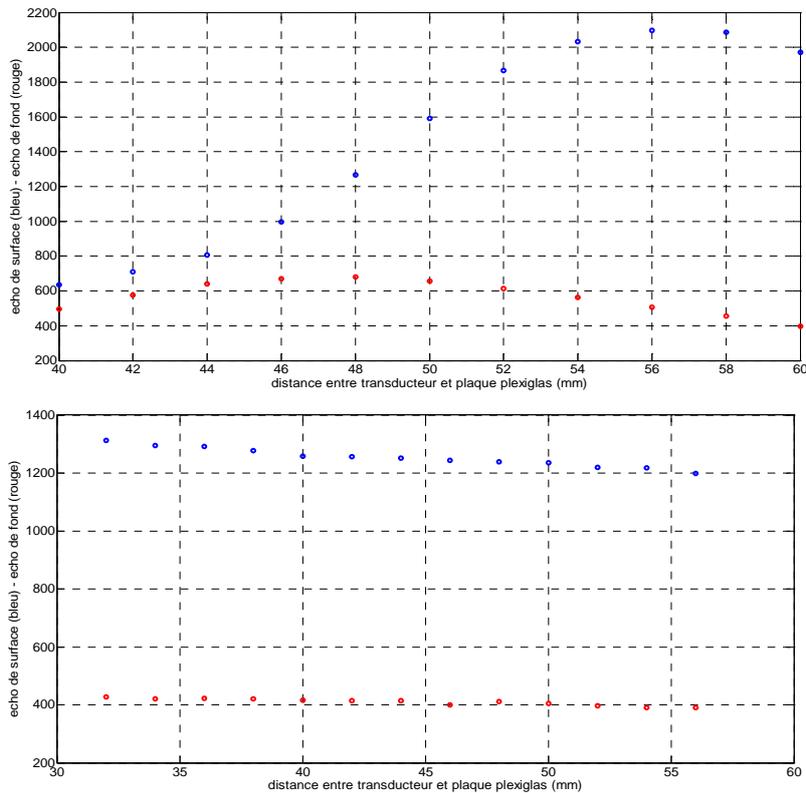


Figure 2 - 20 : Relevés de l'amplitude de l'écho de surface (bleu) et de fond (rouge) en fonction de la distance (a) Transducteur focalisant de diamètre 0.5" (au-dessus) et (b) Transducteur focalisant de diamètre 0.25" (au-dessous)

Ces résultats montrent, que pour le transducteur de 0.5" de diamètre, les maxima des deux échos sont obtenus pour des distances très différentes. Ceci est dû à la bonne focalisation réalisée par ce transducteur. Si on utilise ce transducteur pour faire de mesures d'atténuation, il est clair que les calculs donneront des résultats variant fortement avec la distance. Par contre, pour le transducteur de 0.25" il y a une bonne stabilité des amplitudes des échos en fonction de la distance. Ceci confirme que ce transducteur focalisant donne une onde quasiment plane dans le domaine de travail.

Une autre étude supplémentaire est réalisée pour le transducteur focalisant de 0.25", de même manière mais avec la plaque pré imprégnée B01. Les variations des amplitudes des échos de surface et de fond en fonction de la distance sont montrées dans la Figure 2 - 21.

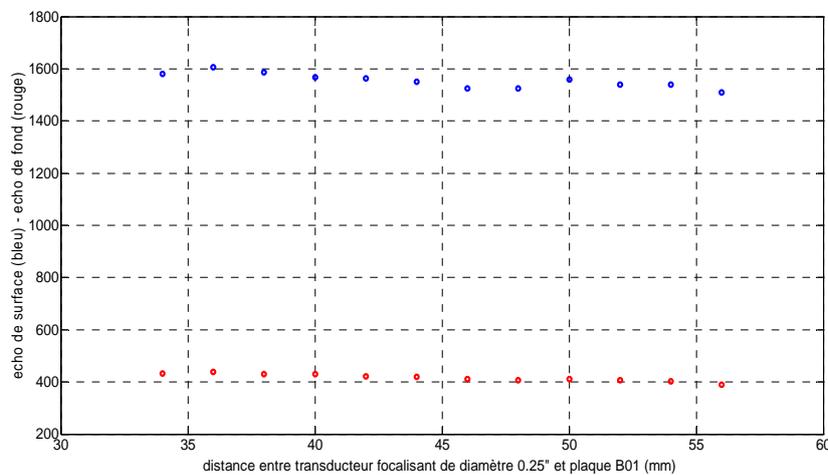


Figure 2 - 21 : Relevés de l'amplitude de l'écho de surface (bleu) et de fond (rouge) en fonction de la distance à la plaque composite B01.

2.2.2 Mesure de l'atténuation

Le test a été repris avec une plaque de plexiglas d'épaisseur 3 mm (au lieu de 5 mm dans l'étude précédente) et prolongé par la mesure de l'atténuation du matériau. Cette plaque a, par le passé fait l'objet de mesures d'atténuation par des mesures en transmission (suivies de l'identification de paramètres de la plaque tels que l'épaisseur, la masse volumique, l'atténuation, la vitesse de phase). Lors des essais, la distance entre la plaque et le transducteur est modifiée et, à chaque fois, l'atténuation est calculée. Les résultats sont portés sur la Figure 2 - 22. Les distances plaque-transducteur utilisées ont été choisies dans le même domaine.

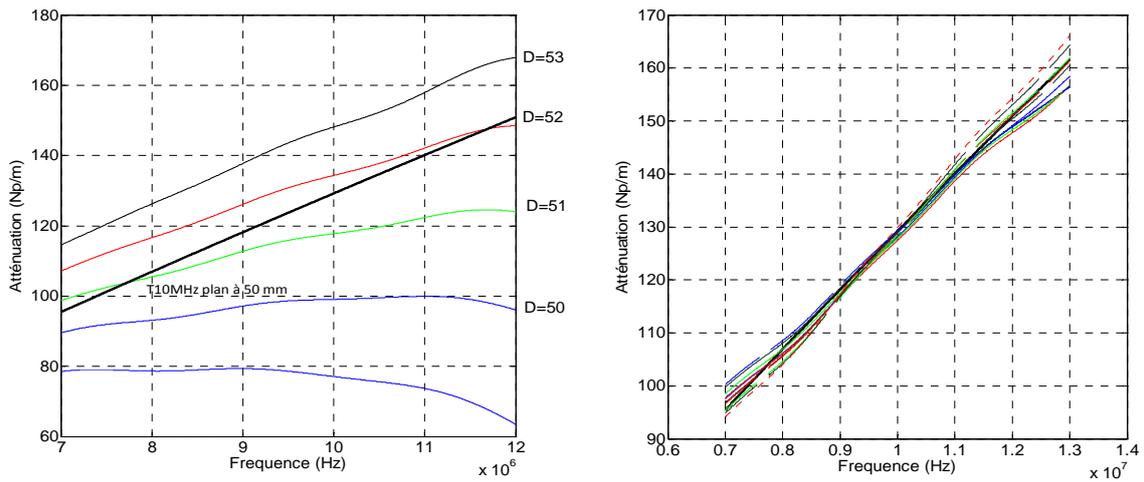


Figure 2 - 22 : Atténuation mesurée du plexiglas - distance variable
(a) Transducteur focalisant 0.5'' de diamètre (b) Transducteur 10MHz focalisant 0.25''

On constate que le transducteur de diamètre 0.5" est trop focalisant et que l'atténuation mesurée dans le plexiglas dépend très fortement de la distance transducteur-plaque. On a reporté sur cette figure l'atténuation de référence (en noir). Le second transducteur (diamètre 0.25") possède une tache focale plus étendue et la mesure de l'atténuation du plexiglas est très proche de la référence lorsque la distance est bien choisie (43 mm à deux mm près). L'atténuation mesurée avec le transducteur focalisant est comparée à la référence qui est représentée en noir. Toutes les distances conduisent à de bonnes valeurs de l'atténuation dans le domaine 9-11 MHz, bande passante du transducteur.

La valeur de l'atténuation de référence est donnée par la formule :

$$\alpha = 1.4 \cdot 10^{-4} f^{0.85} \quad (2.15)$$

2.3 Effets de la diffraction

Dans le chapitre 1, les ondes théoriques utilisées étaient des ondes planes, c'est à dire d'extension infinie. On a pu définir et calculer la réflexion par une plaque (idem pour la transmission). Dans ce chapitre nous abordons les vérifications expérimentales : les ondes planes sont fabriquées par des transducteurs. On peut constater que ces ondes sont bien imparfaites. Le transducteur « plan » délivre une onde qui, au mieux approche l'onde plane à une distance appelée distance de Fresnel, séparant le champ proche du champ lointain.

Il y a quelques décennies, des mathématiciens ont imaginé et déterminé une correction de la diffraction dans le cas simple suivant. Lorsque deux transducteurs « idéaux » sont placés l'un

en face de l'autre sur un même axe, le récepteur ne capte pas l'onde plane qu'aurait pu délivrer l'émetteur s'il n'y avait pas de diffraction. L'onde réelle, au niveau du récepteur, produit le même effet qu'une onde plane si on lui applique un coefficient correctif.

William [29] a proposé le terme correctif (appliqué à la pression moyenne) exact suivant :

$$D = 1 - \frac{4}{\pi} e^{-ikz} \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-ik\sqrt{z^2 + 4a^2 \cos^2(\theta)}} \sin^2(\theta) d\theta \quad (2.16)$$

Dans laquelle a est le rayon de transducteur et $k = \frac{\omega}{V}$ est le nombre d'onde. Où V est la vitesse dans l'eau et ω la pulsation de l'onde harmonique.

Roger et Van Buren [30] ont proposé une formule approchée :

$$D = 1 - e^{-iu} \left[J_0(u) + iJ_1(u) \right] \quad (2.17)$$

$$\text{Avec } u = \frac{\omega a^2}{2V}$$

Ceci est valable dans le cas de deux transducteurs disposés face à face. Lorsqu'il y a une plaque entre les deux, il faut faire intervenir les ondes longitudinales et transversales produites dans le milieu solide.

Dans une étude antérieure, cette configuration a été utilisée pour identifier les paramètres d'une plaque homogène [10]. La correction approchée, mise au point pour cette occasion, n'a pas apporté des différences sensibles aux résultats obtenus. La cause en est, peut être aussi, que les plaques utilisées sont d'épaisseur faible devant les distances plaque-transducteur ce qui entraîne des corrections trop faibles, inférieures aux erreurs expérimentales (d'alignement, de numérisation, de température,...).

Pour ces différentes raisons nous avons omis de réaliser une correction de diffraction. Et une raison supplémentaire nous semble déterminante : pour calculer une correction, il faut connaître les caractéristiques de la plaque. Ce qui n'est pas encore réalisé pour un composite.

2.4 Conclusion

Après les études théorique et expérimentale des transducteurs, on peut faire quelques remarques :

Les transducteurs plans, utilisés dans leur champ proche, ne fournissent pas une onde tout à fait plane, mais les calculs d'atténuation qu'ils permettent sont satisfaisants.

Les transducteurs focalisant possédant une profondeur de champ suffisante permettent d'envisager des relevés cartographiques en utilisant les échos de surface et de fond, donc pour réaliser des photographies ultrasonores simultanées de la surface et du fond d'une plaque. C'est le cas du transducteur 10 MHz de diamètre 0.5" de focale 2".

Le transducteur focalisant 10 MHz de 1" (diamètre 0.5") possédant la tache focale la plus petite et peut permettre une mise au point précise sur une surface unique. Dans ce cas, la cartographie sera faite dans un seul plan.

Le transducteur focalisant à 2" à 10 MHz de diamètre 0.25" fournit une quasi onde plane de faible diamètre. Ce transducteur possède donc les propriétés d'un transducteur plan permettant une exploration fine associée à une possibilité de calcul de l'atténuation. On utilise donc ce transducteur pour faire la cartographie de la grandeur atténuation.

Le transducteur multi élément peut être utilisé comme un mono-élément focalisant. Son utilisation présente des avantages tels que la rapidité et la résolution latérale ajustable. Il permet donc d'économiser du temps de travail. Par contre l'espacement entre deux éléments successifs impose le pas de balayage électronique (ici : 0.5 mm). Nous ne l'utiliserons que pour une comparaison avec les transducteurs mono-éléments.

Chapitre 3 : Plaques carbone-époxy étudiées

Dans ce chapitre, une introduction succincte sur les différents types de matériaux composites sera tout d'abord présentée. Nous nous concentrerons par la suite sur les composites à matrice organique (CMO) stratifiés haute performance. Les grands types de procédés de mise en œuvre des CMO seront ensuite décrits puis nous nous focaliserons plus précisément sur les procédés RTM [31] et pré imprégné par autoclave.

3.1 Matériaux composites

3.1.1 Généralités

Un matériau est dit composite lorsqu'il est constitué de deux ou plusieurs éléments distincts et non-miscibles dont les qualités se combinent en synergie afin d'obtenir des propriétés particulières en réponse à un besoin spécifique. Les matériaux composites CMO contiennent des fibres qui apportent au composite leurs propriétés renforcées et qui assurent la tenue mécanique du composite et une matrice polymère qui sert à lier les fibres du renfort ainsi qu'à répartir les efforts. Des charges et additifs sous forme de poudre ou de liquide peuvent être ajoutés au composite afin de modifier certaines propriétés secondaires.

L'utilisation des matériaux composites est de plus en plus répandue pour la fabrication de structures soumises à de fortes sollicitations mécaniques et qui doivent rester légères. Les matériaux composites carbone/époxy combinent des performances mécaniques élevées pour chacun des composants ainsi qu'une densité faible par rapport aux alliages métalliques. Pourtant, la qualité de fabrication n'est pas encore optimale. La porosité après élaboration est en particulier un des facteurs les plus significatifs qui peuvent dégrader la qualité globale des composites.

Les matériaux composites constituent trois familles en fonction du type de matrice utilisé :

➤ *Les composites à matrice céramique (CMC) :*

Les céramiques possèdent plusieurs atouts. Elles peuvent résister à des températures très élevées, sont plus légères que plusieurs métaux, et présentent une bonne stabilité chimique. Le principe des CMC est donc de rendre les céramiques moins cassantes en leur donnant une structure composite, c'est-à-dire en les façonnant sous forme de renforts et de matrice. C'est

pour cette raison que les CMC s'adressent aux applications très hautes température. Ils sont principalement utilisés dans des domaines de haute technicité tels que l'automobile, le nucléaire, l'aéronautique et le spatial. Malheureusement, leur domaine d'utilisation est fortement limité par leur grande fragilité et leur coût de revient est très élevé à cause des procédés de fabrication employés qui expliquent la faible diffusion de ces matériaux.

➤ *Les composites à matrice métallique (CMM) :*

Les métaux possèdent de bonnes qualités telles que la ductilité, la bonne tenue au vieillissement et au feu. Il s'agit donc de concilier ces qualités avec la légèreté et les bonnes caractéristiques mécaniques propres aux structures composites. Les CMM sont des matériaux performants, les bonnes caractéristiques intrinsèques des métaux (haute résistance et rigidité) permettent de s'appuyer sur le comportement matriciel et de ne renforcer que certaines zones. Pourtant, ils sont pénalisés par un coût de revient élevé, et la présence d'un environnement corrodant ainsi que l'utilisation à haute température restent des points faibles. Les CMM sont principalement utilisés dans l'industrie de l'automobile, de l'électronique et de l'aérospatiale.

➤ *Les composites à matrice organique (CMO) :*

Les inconvénients des composites à matrice métallique et céramique, notamment le prix de fabrication, empêchent la production en grandes séries. Les CMO sont donc les composites les plus répandus car ils ont des coûts réduits et présentent de bonnes propriétés mécaniques à température faible.

Parmi des composites à matrice organique, on distingue généralement deux types de CMO :

- de grande diffusion :

Peu coûteux, ils représentent près de 95 % des CMO fabriqués et sont utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées. La production se fait en grande série et les pièces peuvent être de grandes dimensions à fibres courtes ou longues.

- à haute performance :

Ils possèdent des qualités mécaniques supérieures, ils sont notamment employés dans l'aéronautique, le nautisme, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle avec un coût de fabrication plus élevé. Les cadences de production sont également plus faibles.

3.1.2 Application dans l'aéronautique

Les composites sont utilisés depuis les débuts de l'aéronautique en raison de leur légèreté. Actuellement, l'utilisation des composites à haute performance résulte du souci constant d'économie de carburant. Sur le plan mécanique, le rapport entre les propriétés et la masse spécifique permet de comparer les matériaux entre eux, et cette comparaison est favorable aux composites. La résistance aux chocs et les propriétés électriques sont d'autres propriétés à optimiser pour les matériaux de structure, en particulier pour les composites polymère-carbone.

Dans la génération actuelle des avions civils, la proportion de composites à matrice organique (CMO) dans les pièces de structure ne cesse d'augmenter. Les bords d'attaque des ailes sont, depuis déjà longtemps réalisés en composites. Par exemple, dans le BOEING 787 DREAMLINER, le fuselage lui-même est réalisé en grande partie en composites. En pourcentage de masse structurale, le BOEING 777 est constitué de 12 % de composites et de 50 % d'aluminium alors que le BOEING 787 en contient respectivement 50% et 20 %.

L'utilisation des matériaux composites dans l'aéronautique a permis un gain de masse de 20 % à 40 % pour des performances égales.

3.1.3 Les composites à renfort de fibres continues

Dans les matériaux composites, chaque constituant possède un rôle précis lié à ses caractéristiques physiques et chimiques. Les propriétés finales dépendent non seulement des différents constituants, du taux volumique des fibres, de l'orientation des fibres mais aussi de la synergie des propriétés via l'interface fibre/matrice.

3.1.3.1 Renfort

Le renfort fibreux supporte les efforts mécaniques appliqués grâce à ses bonnes propriétés mécaniques notamment en résistance et en rigidité. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes : linéiques (fils, mèches), surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelles (tresses, tissus complexes, etc.).

❖ Fibres

Il existe des fibres synthétiques et des fibres naturelles. Parmi les fibres le plus utilisées dans l'industrie, on trouve :

➤ *les fibres de verre*

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.

Il existe une large gamme de fibres de verre distinctes. Elles sont les renforts les plus utilisées actuellement (95 % des renforts) dans diverses applications tels que les infrastructures, les transports, l'électricité et l'électronique. Les fibres de verre présentent plusieurs avantages :

- une bonne adhérence à toutes les résines.
- une bonne résistance à la température.
- une dilatation thermique faible.
- de bonnes propriétés diélectriques.
- une bonne résistance à l'humidité.

Par contre, les fibres de verre sont fragiles. Leur structure amorphe leur confère des caractéristiques mécaniques isotropes mais leur module de Young est faible et leur densité plutôt élevée par rapport aux autres fibres limitent fortement leur utilisation pour des applications structurales.

➤ *Fibres d'aramide :*

Dans le début des années 1970, Du Pont Company a introduit l'aramide Kevlar™, une fibre organique à haut module. C'était la première fibre organique utilisée comme renfort dans des matériaux composites avancés. Les fibres d'aramide sont issues des polyamides aromatiques par synthèse chimique à basse température. Elles ont des bonnes propriétés telles qu'une faible densité, une haute résistance spécifique à la traction, et une bonne tenue à la fatigue. Pourtant, ces fibres présentent aussi des désavantages tels qu'une mauvaise tenue au feu, une mauvaise adhésion avec les résines ainsi qu'un prix encore trop élevé.

Aujourd'hui, cette fibre est utilisée dans diverses parties structurelles, y compris les plastiques renforcés, la balistique, les pneus, cordes, câbles, le remplacement de l'amiante, les tissus enduits et les vêtements de protection.

➤ *Fibres de carbone :*

Développées dans les années soixante, elles sont rapidement acceptées comme renfort pour des applications structurales. Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère

de base, appelé précurseur. Deux matériaux précurseurs différents sont couramment utilisés à l'heure actuelle pour produire des fibres de carbone: la rayonne, le poly acrylonitrile (PAN). Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. De manière générale, les fibres de carbone possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, une excellente tenue à haute température et elles ne sont pas sensibles à l'attaque d'agents chimiques ou de l'humidité.

Le prix de ces fibres est relativement élevé et elles sont principalement utilisées pour les composites hautes performances en aéronautique, aérospatiale et construction industrielle.

➤ *Fibres naturelles :*

Actuellement, les fibres naturelles deviennent une alternative aux fibres synthétiques dans le cas d'applications spécifiques. L'intérêt le plus important des fibres naturelles est la facilité de leur recyclage. Leur qualité est difficile à maîtriser car elle dépend beaucoup de l'environnement. Parmi les fibres naturelles, le lin, le chanvre, le jute, et le sisal sont les plus utilisées pour les composites.

Le Tableau 3 - 1 résume les propriétés typiques de différentes fibres citées [33].

Fibre	Densité	Module d'élasticité (GPa)	Résistance en traction (MPa)	Résistance en compression (MPa)	Allongement à rupture (%)	Diamètre (µm)
Verre E	2.6	72	2500	1000-1200	4.5	10-20
Verre R	2.5	85	3500	1300	5.2	3-30
Aramide	1.45	120-130	2800-3000	300-500	2.5	12
Carbone (HR)	1.8	230-250	3000-4000	1100-1800	1.3	6-8
Carbone (HM)	1.9	400-500	2700	1300	0.5	8
Naturelle	1,2-1,5	50-60	700-1500	500-1000	3	20-30

Tableau 3 - 1 : Propriétés mécaniques moyennes des renforts fibreux

❖ Structures de renfort

Les matériaux composites sont des matériaux hétérogènes dont les propriétés dépendent non seulement des propriétés intrinsèques des constituants mais aussi de l'interface matrice/renfort, de l'orientation de pli ou bien des caractéristiques géométriques de renfort. Il est donc nécessaire de créer une architecture convenable aux besoins de fabrication.

Il existe donc de différents types de géométrie des renforts :

➤ *Unidirectionnels*

Dans un pli unidirectionnel, les mèches de fibres sont continues et parallèles entre elles. Les renforts unidirectionnels possèdent une direction prolongée d'orientation des fibres et présentent de très bonnes propriétés mécaniques dans le sens longitudinal mais moindre dans les autres directions.

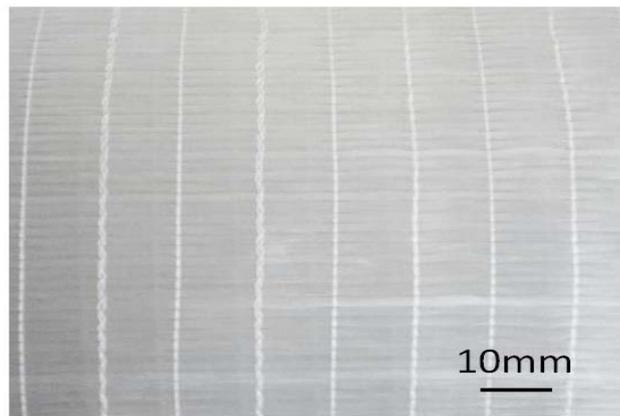


Figure 3 - 1 : Quasi unidirectionnel tissu de verre cousu

➤ *Mats :*

En ce qui concerne les renforts multidirectionnels aléatoires, les mèches de fibres sont disposées sans aucune orientation préférentielle et généralement agglomérées par un liant. Les mats sont fabriqués à partir des fils coupés en fibres de verre du diamètre de filament unique 9 μm . Les mats possèdent des propriétés isotropes dans le plan.

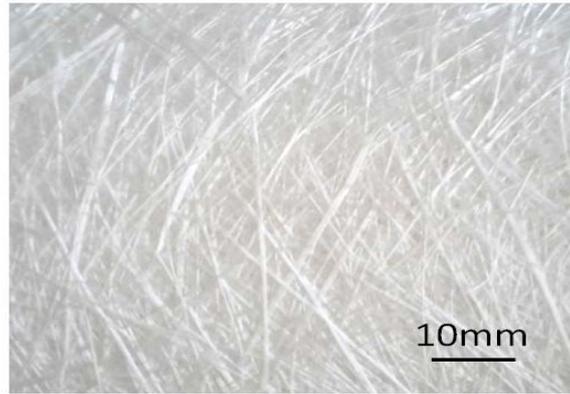


Figure 3 - 2 : Mat de fibres de verre coupées (mèches de 50 mm)

➤ *Tissus :*

Les tissus bi-axiaux se composent de mèches entrelacées dans deux directions perpendiculaires. Différentes variantes de tissage existent :

- Taffetas : chaque mèche de trame passe alternativement au-dessus puis en dessous de chaque mèche de chaîne.
- Sergé : ce tissu se caractérise par deux paramètres m et n . La trame passe au-dessus de m fils de chaîne, laquelle repasse au-dessus de n fils de trame.
- Satin : chaque mèche passe sous un nombre $n-1$ de mèches transversales avant de passer à son tour au-dessus de la n -ième.

On montre dans la Figure 3 - 3 un exemple de tissu sergé de verre.



Figure 3 - 3 : Tissu sergé

3.1.3.2 Matrice

La matrice est un liant qui maintient en place la dispersion des fibres, les protège physiquement et chimiquement. De plus, il joue un rôle important pour assurer la liaison

mécanique entre les éléments de renfort. Les matrices organiques sont les plus utilisées. Elles sont réalisées à base de polymères et regroupées en deux grandes familles :

➤ *Thermodurcissables*

Pour des raisons de facilité de mise en œuvre, ce sont les polymères utilisables à l'état liquide qui ont été initialement choisis pour servir de matrice et qui continuent à être le plus souvent employés. Au cours de la réticulation, un réseau tridimensionnel de molécules se crée selon la forme souhaitée. Les matrices thermodurcissables représentent environ 70 % des composites transformés en Europe.

Les résines thermodurcissables principalement utilisées sont :

– Polyesters :

Les polyesters insaturés sont utilisés dans les applications "grande diffusion". Elles se présentent sous la forme d'une solution de polyacide et de polyalcool qui se rigidifie sous l'action d'un catalyseur et de la chaleur.

– Epoxydes

Les résines époxydes constituent la résine type des composites dits "hautes performances". Elles sont souvent associées à un renfort en fibres de carbone pour fabriquer des pièces structurales pour l'aéronautique. Elles possèdent de bonnes propriétés jusqu'à 170 °C et une bonne adhésion aux fibres.

– Phénoliques

Les résines phénoliques possèdent une bonne tenue au feu, ce qui explique leur forte utilisation dans le domaine du transport. Pourtant, ces résines présentent quelques désavantages tels que la fragilité, la toxicité et la sensibilité à l'humidité.

– Vinylesters

Ces résines ont une bonne tenue à la fatigue et à la corrosion mais sont combustibles.

Le Tableau 3 - 2 résume les propriétés mécaniques de principales résines thermodurcissables [32].

Résine	Densité (kg/m ³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance en traction (MPa)	Allongement à rupture (%)	Tenue à la température en continu (°C)
Polyester	1.2	2.9-3.1	50-60	2-3	120
Epoxyde	1.1-1.4	3	50-120	3-8	150-200
Vinylester	1.1	3.4-3.5	70-85	2-5	100-140
Polymide	1.4-1.5	4-20	30-40	>1	250-300
Phénolique	1.3	50	50	1-1.5	120-150

Tableau 3 - 2 : Propriétés mécaniques de résines thermodurcissables

➤ *Thermoplastiques*

Les thermoplastiques sont employés depuis moins longtemps que les thermodurcissables. Les molécules des polymères thermoplastiques ont une structure linéaire. Les thermoplastiques sont beaucoup plus visqueux à l'état fondu que les thermodurcissables. Ils sont mis en forme par chauffage et durcissent au cours du refroidissement. Cette facilité de mise en forme est malheureusement associée à une sensibilité de la température qui pénalise leur utilisation dans les composites à hautes performances. Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont les polypropylènes et les polyamides dont les propriétés sont résumées dans Tableau 3 - 3.

Résine	Densité (kg/m ³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance en traction (MPa)	Tenue à la température en continu (°C)
Polyamide	1140	1.2-1.5	60-85	65-100

Polypropylène	1200	1.1-1.4	20-35	100
---------------	------	---------	-------	-----

Tableau 3 - 3 : Propriétés mécaniques des résines thermoplastiques

3.1.3.3 Charges et additifs

Des charges et additifs peuvent être ajoutées à la matrice du composite afin de lui conférer de nouvelles propriétés ou d'en améliorer certaines.

Les charges sont des particules qui peuvent être minérales, métalliques ou organiques. L'incorporation des charges à la matrice augmente certaines propriétés notamment le module d'élasticité, et la dureté. Pourtant, elles provoquent aussi une réduction de la résistance à la traction et à la flexion du composite. Il existe plusieurs types présentés (voir sur si.ens-cachan.fr) dans la Figure 3 - 4.



Figure 3 - 4 : Exemples des charges utilisées dans les composites à matrice organique : (a) micro billes de verre, (b) noir de carbone, (c) silice

Il peut être nécessaire d'ajouter des additifs dans la résine pour déclencher ou accélérer la réaction de polymérisation. Les additifs possibles sont encore nombreux :

- Stabilisants, qui retardent les dégradations dues à l'oxygène.
- Ignifugeants ou retardateurs de flamme.
- Agents de démoulage.
- Colorants

3.1.4 Mise en œuvre des pré imprégnés

Les pré-imprégnés sont des ensembles de fibres déjà partiellement imprégnées de résine. Cette technologie est la plus répandue dans la production de pièce aéronautiques ou à forte contraintes mécaniques et géométriques. Les matériaux composites pré imprégnés ont permis de maîtriser parfaitement les contraintes de rigidité. L'avantage par rapport à l'injection

d'une résine dans un renfort sec est une meilleure tenue à l'impact grâce à la présence de particules thermoplastiques dans la résine qui augmentent fortement sa viscosité et rendent donc très difficile l'imprégnation du tissu sec.

Le pré-imprégné est une fibre imprégnée de résine dont on va déclencher sa polymérisation et donc son durcissement par élévation de la température, selon un rythme de cuisson indiqué. Le choix parmi les pré-imprégnés peuvent se faire sur des critères tels que les propriétés mécaniques, thermiques des fibres, la température de polymérisation de la résine, la pégosité, la drapabilité et la durée de vie.

La mise en œuvre des pré-imprégnées se décompose en :

➤ *Préparation :*

Le pré-imprégné carbone-époxyde est stocké à froid et est mis à température ambiante quelques heures avant son utilisation. Cela empêche l'humidité atmosphérique de se condenser en surface lors de la mise en œuvre et qui pourrait impliquer l'apparition de porosité lors de la cuisson. La surface de moule doit être préalablement recouverte d'un agent de démoulage.

➤ *Positionnement :*

La surface supérieure d'empilement est couverte par un tissu d'environnement léger à base de nylon, puis on recouvre ce dernier par un film de démoulage perforé. Une fois le positionnement fait, le système de mise sous vide est installé puis testé. Il faut deux tuyaux à vide, le premier étant connecté à la pompe à vide tandis que le deuxième mesure la valeur réelle de vide. Généralement, on effectue plusieurs dégazages sous vide après le positionnement afin d'assurer l'évacuation de tout air piégé. La fréquence et la température de dégazage dépendent du rôle final et de la taille des pièces réalisées. D'ailleurs, il vaut mieux préparer des pièces d'essai pour optimiser le cycle de dégazage.

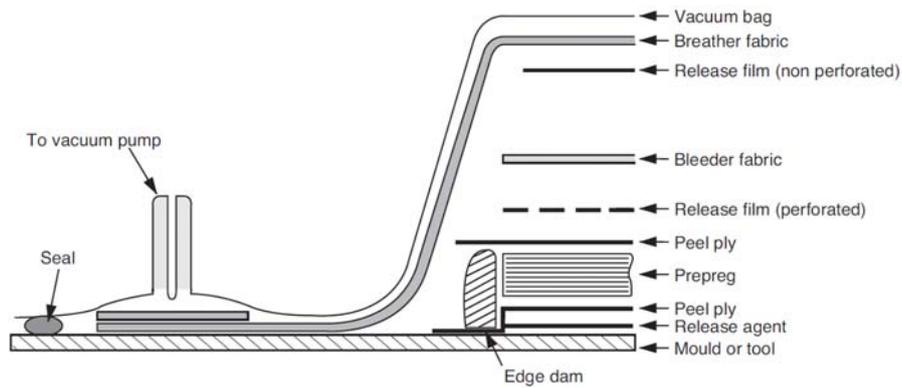


Figure 3 - 5 : Préparation de pré-imprégnée pour autoclave [33]

➤ *Cuisson :*

Généralement, le cycle de cuisson commence entre 0.3 °C/min et 2 °C/min jusqu'à la température finale de cuisson (180 °C). Le vide est maintenu sous le film de mise sous vide tout au long de la polymérisation en autoclave. La pression est établie à 7 bars.

3.1.5 Mise en œuvre par le procédé RTM

Le procédé de mise en œuvre « Resin Transfer Molding » (RTM) est un procédé d'élaboration des matériaux composites appartenant à la famille des « Liquid Composite Molding » (LCM). Précisément, c'est un procédé de moulage où une résine de faible viscosité (de l'ordre de 0.1 Pa.s) est injectée par une pompe à des pressions modérées (de 2 à 5 bars) dans un moule rigide, fermé et préalablement chauffé. Cette méthode présente plusieurs avantages :

- Réalisation des pièces composites ayant une géométrie complexe avec deux faces lisses, une épaisseur finale et un taux volumique des fibres bien contrôlé.
- Réduction des coûts liés à l'utilisation des pré-imprégnés.
- Obtention de pièces reproductibles.

De plus, il y a beaucoup moins de problèmes de conditionnement et de stockage des matières premières et ce procédé est automatisable.

Malgré tous ses avantages, le procédé RTM est difficile quand au remplissage du moule pour des pièces de grandes dimensions car la résine doit parcourir de très longues distances. De plus, l'étape d'injection de la résine est une phase délicate qu'il est nécessaire de la simuler via des outils de simulation numériques afin de concevoir des moules adaptés. De plus de nombreux essais de mise au point sont nécessaires. L'optimisation du procédé n'est donc pas

triviale du fait du nombre important de paramètres à maîtriser et de leurs interactions qui peuvent être la source de la formation de défauts tels que les zones sèches ou les vides. Ces défauts sont néfastes pour la bonne tenue mécanique des structures composites surtout si elles sont utilisées en tant que structures primaires dans l'aéronautique.

Le principe du fonctionnement de ce procédé est relativement simple. Il se déroule selon trois étapes [34].

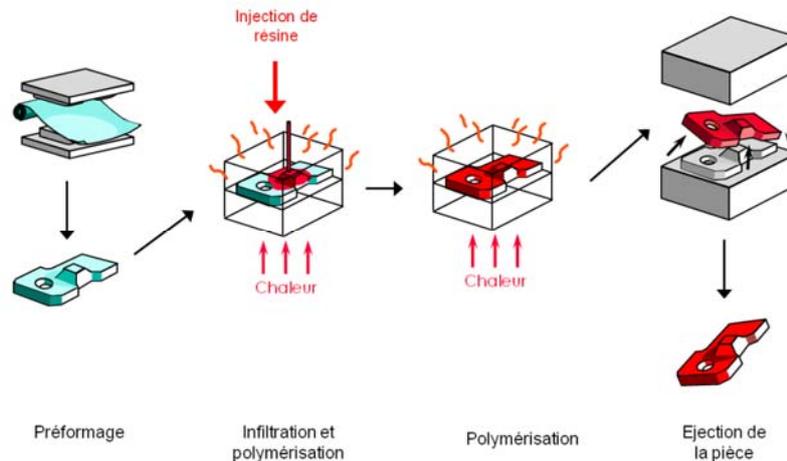


Figure 3 - 6 : Etape du procédé RTM

➤ *Préformage*

Le procédé RTM commence par la fabrication de la préforme. Sa complexité dépend de la géométrie et des propriétés mécaniques souhaitées pour la pièce. On peut utiliser des tissus secs ou poudrés afin de fabriquer des préformes. La préforme est ensuite placée dans l'entrefer du moule. Enfin, le moule est solidement fermé. Les résines sont dégazées afin de limiter la formation des bulles d'air lors de l'injection.

➤ *Infiltration de résine*

La résine est ensuite injectée dans la préforme à faible pression (inférieure à 10 bars) dans le moule fermé et chauffé. Plusieurs stratégies d'injection peuvent être envisagées. L'injection peut se faire en un ou plusieurs points notamment en une ligne par une rampe d'injection. L'injection peut être assistée par le vide à l'évent. En effet le fait d'aspirer le système sous vide favorise la diffusion du système réactif dans le moule, et permet ainsi d'améliorer l'imprégnation du renfort, ce qui évite la formation de zones sèches et des défauts. Une fois le moule rempli, les événements sont fermés et une surpression peut être appliquée afin d'éliminer ou de diminuer des éventuelles bulles d'air. Il s'agit du « gavage ».

➤ Polymérisation et démoulage

Le moule est chauffé lors de l'injection et est maintenu fermé sous pression afin de garantir son étanchéité. La polymérisation se fait alors, entraînant le durcissement de la pièce moulée. Lors de cette phase, la résine change de l'état liquide à l'état solide de manière irréversible et le moule est souvent chauffé selon un cycle.

3.2 Porosité dans les matériaux composites

3.2.1 Porosité

La porosité peut être définie comme l'ensemble des pores d'un matériau. Un pore est une « très petite cavité d'un corps », emprunté au latin « porus » signifiant « conduit, passage » (définition dictionnaire CNRTL). La porosité peut être caractérisée par divers paramètres, l'un des principaux étant la fraction volumique de porosité, ou taux de porosité, et qui correspond au rapport du volume des vides contenus dans le milieu sur le volume total du milieu. La porosité est considérée comme une propriété caractéristique d'un milieu poreux. Dans un matériau composite, la porosité se présente sous forme de petites cavités emprisonnant en général du gaz.

Shoeller [35] a distingué deux types de pores :

- Pores ouverts : vides qui communiquent avec l'extérieur. Les pores dits pénétrants relient au moins deux faces du matériau poreux.
- Pores fermés : pores isolés de l'extérieur du matériau.

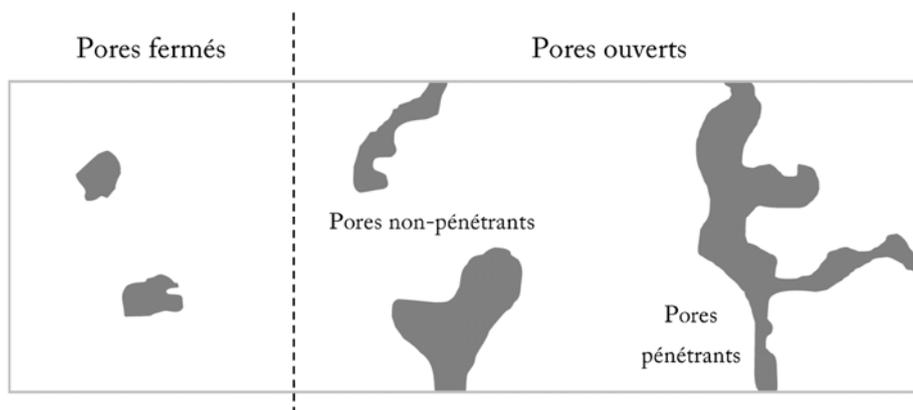


Figure 3 - 7 : Différent types des pores : fermées et ouvertes [36]

Dans le matériau composite, il est nécessaire de distinguer la porosité, des vides de petite taille avec d'autres types de défaut comme les fissures.

Dans le cadre de notre étude, la porosité correspond aux défauts dans le matériau composite RTM après l'injection et avant l'utilisation du matériau. Chaque type de procédé d'élaboration de matériaux composites amène à des classements de défauts spécifiques.

3.2.2 Les types de défaut dans la plaque composite RTM

Les défauts obtenus par RTM peuvent être classés en deux familles :

- Micro vides : bulles intra mèche dont la taille caractéristique varie entre 1 et 10 μm .

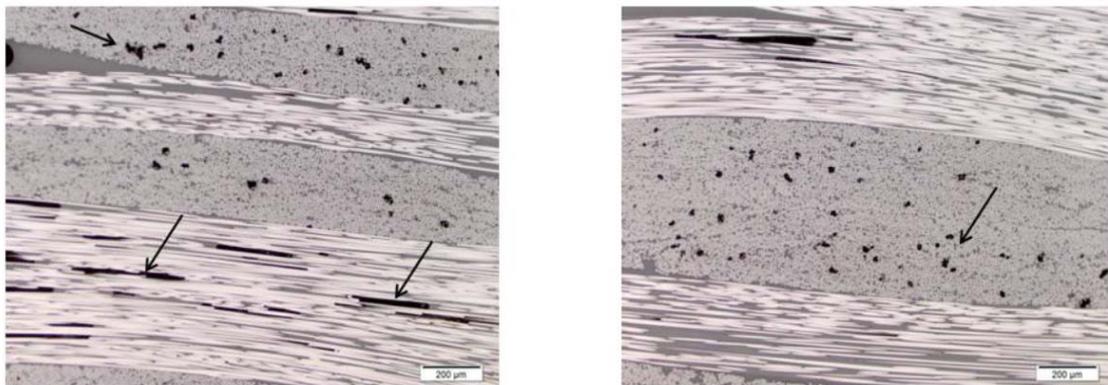


Figure 3 - 8 : Micro vides

- Macro vides : bulles inter mèche dont la taille caractéristique est comprise entre 0.1 et 1 mm.

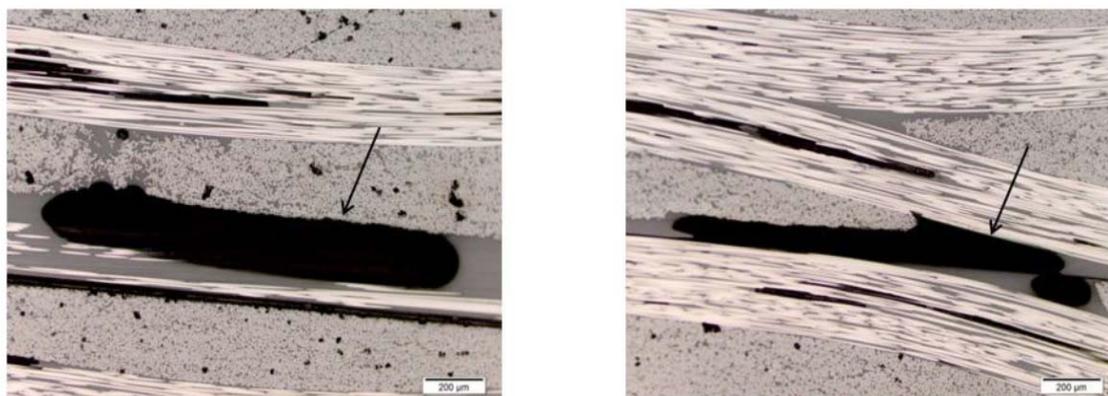


Figure 3 - 9 : Macro vides

3.3 Production de plaques RTM

Les plaques composites RTM sont réalisées par des membres du groupe composites du LOMC. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration université-entreprise et fait suite à de précédentes études. Les pièces fabriquées sont constituées de couches de tissus liés par

une matrice époxy. Les plis élémentaires sont empilés selon une orientation unique. L'objectif de ce travail est de produire des plaques composites 300x400x3 mm³ par le procédé RTM à différents taux volumiques globaux de porosité en faisant varier les conditions d'injection, afin de réaliser des plaques à porosité contrôlée.

3.3.1 Matériaux de l'étude

Nous traitons ici plusieurs plaques composites réalisées au LOMC. Les fibres de carbone sont sous forme de tissus (Hextow AS7 satin de 5 12K 500 g/m²) disposés en six épaisseurs (Figure 3 - 10). Les mèches sont constituées de 12 000 fibres de carbone AS7 de haute résistance et de déformation. Le renfort a une masse surfacique de 500 g/m².

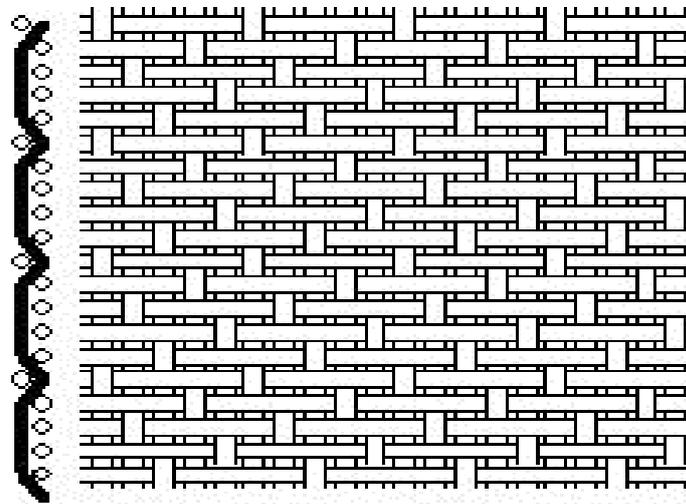


Figure 3 - 10 : Tissu Satin 5

La résine thermodurcissable époxy, de type Hexflow RTM6 180°, utilisée est une des résines certifiée pour le RTM dans les structures aéronautiques. Les plaques ainsi réalisées possèdent un taux volumique de fibre de 53 % et une masse volumique nominale de 1486 kg/m³. Les plaques réalisées possèdent 6 et 7 plis des dimensions d'environ 400 par 300 mm et d'épaisseur nominale 3.17 mm. On a une série de plus d'une vingtaine de plaques à notre disposition.

Quelques propriétés des fibres et des mèches sont montrées dans Tableau 3 - 4 [37].

Fibre	Résistance en traction	4.83 MPa
	Module d'Young	241 Gpa

	Déformation de rupture	1.8 %
	Densité	1.79
	Diamètre	6.9 μm
	Taux de carbone	94 %
Mèche 12k	Masse linéique	0.8 g/m
	Section	0.45 mm^2

Tableau 3 - 4 : Propriétés du renfort carbone

La perméabilité du tissu a été mesurée auparavant par Sébastien Guérault [37]. Elle varie en fonction du taux de fibres suivant la Figure 3 - 11. Sachant que les travaux s'orientent vers des taux volumiques de fibres supérieurs à 53 %, des mesures complémentaires ont été réalisées cette année (points orange) par l'équipe composite de LOMC.

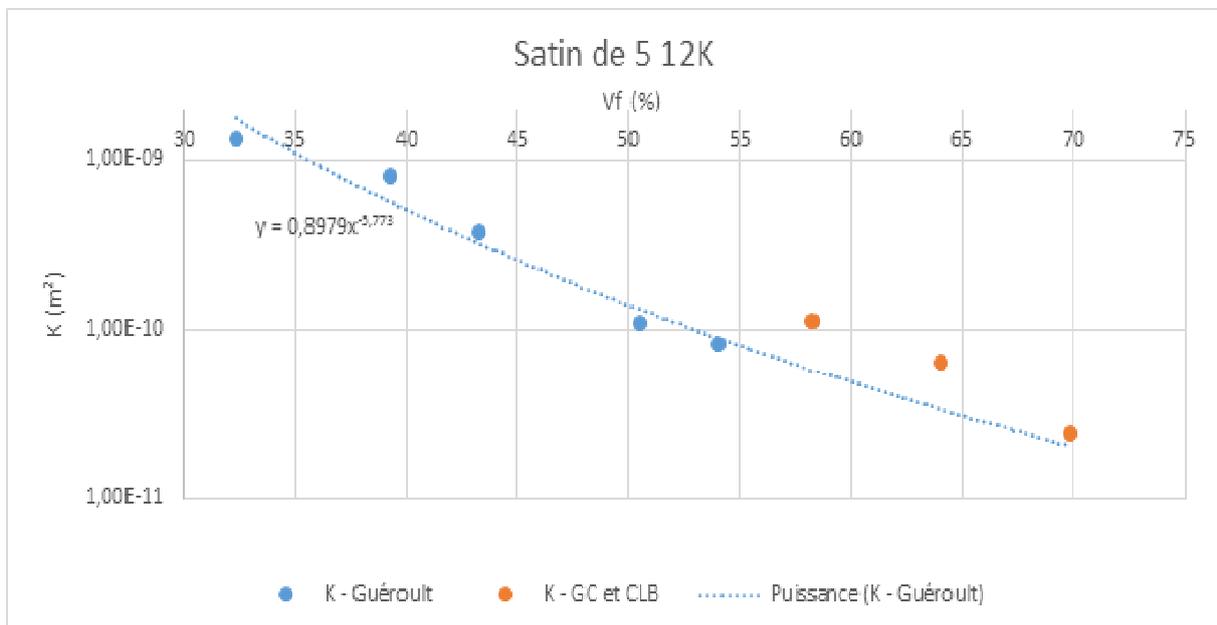


Figure 3 - 11 : Perméabilité du Satin de 5 12K en carbone AS7 en fonction du taux volumique de fibres

3.3.2 Viscosité

La viscosité de la résine évolue en fonction de la température. Sébastien Arnaud a mesuré cette dépendance dans la Figure 3 - 12.

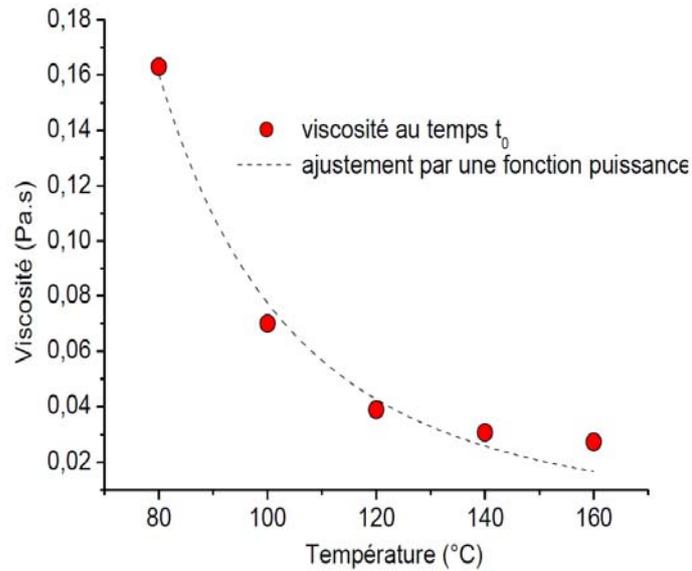


Figure 3 - 12 : Evolution de la viscosité en fonction de la température

Ces résultats sont en très bon accord avec ceux présentés par [38].

3.3.3 Nombre capillaire

L'idée principale dans la fabrication de plaques RTM à porosité maîtrisée est d'obtenir une zone de transition où la porosité varie selon le sens de l'injection. Cette zone est caractérisée par l'évolution du taux de porosité et la position à partir de laquelle apparaissent des porosités dans la plaque. Un paramètre représentatif de la vitesse d'injection est appelé nombre capillaire. Son expression est donnée par :

$$C_a = \frac{\mu v_r}{\gamma} \quad (3.1)$$

Avec :

- μ : la viscosité dynamique de la résine.
- γ : la tension de surface liquide vapeur.
- v_r : la vitesse de front de résine.

On suppose que la viscosité dynamique et la tension de surface liquide sont constants au cours d'une injection ce qui signifie qu'une injection RTM à débit constant équivaut à un nombre capillaire constant.

Ce paramètre a été introduit dans cette problématique par [39]. Ces auteurs ont montré que la zone de transition est uniquement fonction du nombre capillaire.

La formation et la localisation des pores sont engendrées par les forces visqueuses et les forces capillaires intervenant lors de l'écoulement du fluide à travers le renfort fibreux. Leur importance relative et le milieu fibreux décide de la formation des micros vides ou des macros vides dans le composite [31].

On suppose que la viscosité dynamique et la tension de surface liquide sont constants au cours d'une injection ce qui signifie qu'une injection à débit constant équivaut à un nombre capillaire constant.

3.3.4 Equipements utilisés

3.3.4.1 Moule utilisé

La fabrication des plaques composites RTM réalisée dans notre laboratoire nécessite un moule et un contre moule comme dans la Figure 3 - 13.

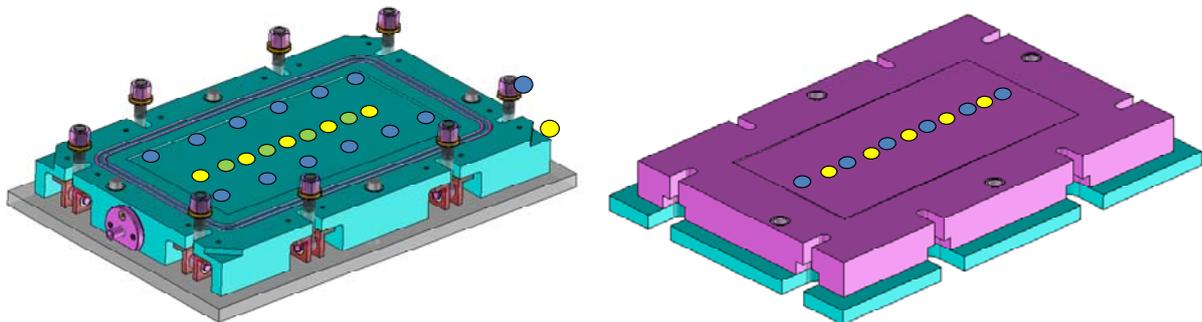


Figure 3 - 13: (a) Moule et (b) Contre moule

Ces moules ont une taille de $300 \times 400 \text{ mm}^2$ et de 3 mm de l'épaisseur. Le moule est équipé de 12 capteurs de pression (bleu) 4 de flux (vert) et 5 sondes de température (jaune). Le contre moule est muni de 6 capteurs de pression et 5 sondes de température. L'ensemble de ce moule est présenté dans la Figure 3 - 14. Il est symétrique. L'injection peut donc être réalisée des deux côtés.



Figure 3 - 14 : Moule complet

3.3.4.2 Piston d'injection

Le dispositif de l'injection est montré dans la Figure 3 - 15. Sa capacité est de 10 litres. Il est équipé d'un système de dégazage à pompe à vide. L'injection de la résine est contrôlée par débit ou par pression. La température dans le piston et le manchon de transfert est calibrée et maximale à 200 °C.



Figure 3 - 15 : Piston d'injection

3.3.4.3 Système de chauffage

On utilise l'étuve industrielle XL1400 comme dans la Figure 3 - 16. Cette étuve a une dimension intérieure de 1000mm de largeur, 1000 mm de profondeur et 1400 de hauteur. La température peut atteindre à 300 °C avec une vitesse de montée de 8 °C par minute. Cette

étuve possède une homogénéité en volume avec une petite incertitude, 1.2 °C à 100 °C, 2.5 °C à 200 °C et 3 °C à 300 °C.



Figure 3 - 16 : Etuve XL1400

3.3.4.4 Cycle d'injection

La plaque RTM réalisée au LOMC suit le cycle d'injection suivant.

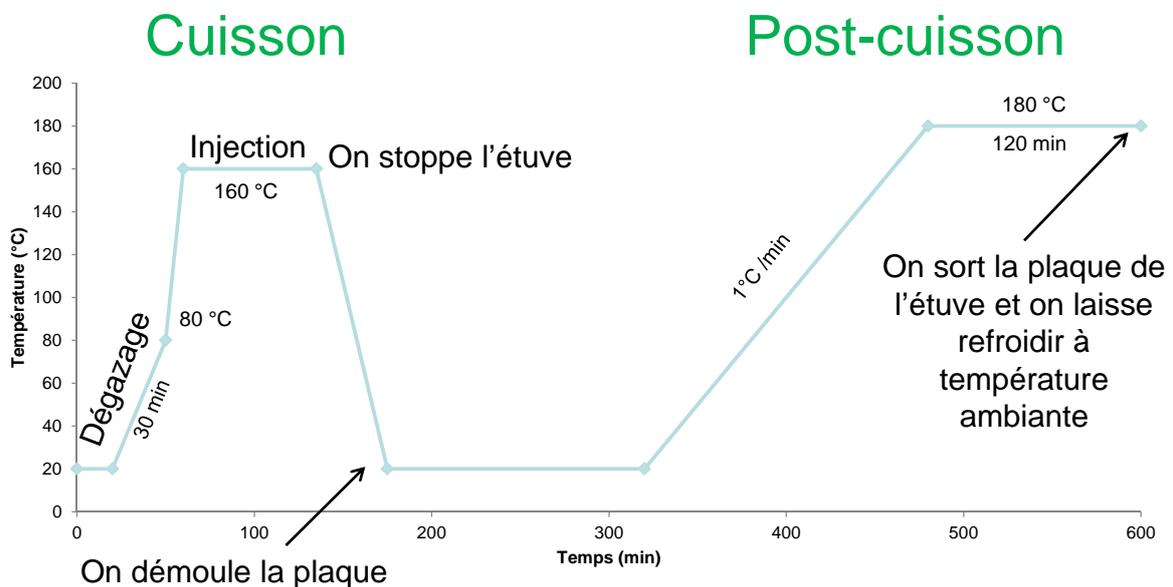


Figure 3 - 17 : Cycle d'injection

Lors de la fabrication, la résine doit suivre un cycle d'injection. Le cycle comprend un préchauffage de la résine à 80 °C, cette opération se déroule dans un piston d'injection, une injection dans le moule préalablement chauffé à 120 °C. Une fois dégazée, la résine est

injectée dans le moule, le manchon de transfert assure la montée en température de la résine de 80 °C à 160 °C entre le piston et le moule. Une fois l'injection terminée, la plaque est cuite à 160 °C pendant 75 minutes. La cuisson terminée, le moule est alors refroidi en quelques heures, et la plaque est démoulée. Enfin la plaque subit une post-cuisson :

- de 20 à 100°C : rampe de 3°C/min
- de 100 à 180 °C : rampe de 1°C/min
- palier de 120 minutes à 180°C.

On peut effectuer quelques modifications du cycle pour adapter des cas concrets. Une fois la polymérisation terminée, le moule est refroidi et ouvert afin de sortir la pièce finie. Cette dernière étape peut être éventuellement suivie d'une post-cuisson afin de finaliser la réticulation de la résine. Des opérations de finition peuvent être nécessaires. Toutes ces étapes peuvent être automatisées ce qui facilite l'augmentation des cadences dans l'industrie.

3.4 Conclusion

Ce chapitre n'appelle pas de réelle conclusion. Il a pour but de bien décrire le cadre dans lequel les travaux qui suivent s'inscrivent. La description des matériaux composites pré imprégné montrent bien que ce sont des composites qui ont très peu de chance d'avoir un taux de porosité mesurable. La plaque B01, déjà cité dans ce document, est de cette catégorie. Il n'en est pas de même pour les plaques de composites RTM. Les chercheurs en matériau du laboratoire sont capables d'élaborer à façon ce dernier type de plaques et donc de créer des plaques à gradient de taux de porosité. La suite de ce travail concerne la mesure de ce taux de porosité.

Chapitre 4 : Cartographie ultrasonore d'une plaque de composite RTM

4.1 Objectifs

Les plaques ont été étudiées par la méthode de la réflexion ultrasonore pour détecter et mettre en évidence les différences de niveau de porosité entre les matériaux élaborés.

Dans notre travail, afin de réaliser les mesures en réflexion, nous avons choisi une technique en immersion car la mise en œuvre est plus facile qu'avec des transducteurs de contact par gel ou par air [5 40]. Afin d'éliminer le maximum de paramètres devant être pris en compte, la température de l'eau a été maintenue constante à 23 °C en permanence. L'impédance acoustique de l'eau est ainsi une constante dans nos expériences. Avant de commencer une mesure, l'absence de bulle d'air à la surface des transducteurs émetteur-récepteur ainsi que le parallélisme entre le transducteur et la plaque sont toujours vérifiés par optimisation du signal reçu. Toutes les mesures sont faites en incidence normale. Pour toutes ces raisons cette technique assure une excellente reproductibilité des mesures grâce à la maîtrise de l'interface eau/plaque. Ce type de mesure pourrait ainsi être aussi mis en application sur un banc de contrôle acoustique à jet d'eau [3].

L'objectif est donc d'évaluer l'état interne de la structure d'une pièce composite par la méthode ultrasonore. Chaque enregistrement fournit des A-scan et de ce fait des B-scan et C-scan. Ceci nous permet de vérifier la totalité d'une pièce, de détecter la présence de défauts et d'évaluer leur taux par une méthode non destructive. Le défaut concerné par cette étude est la porosité ou le taux de vide.

4.2 Définition des différents scans

4.2.1 A-scans

En chaque point d'analyse d'une plaque on enregistre les variations d'amplitude de l'impulsion émise en fonction du temps de propagation. La représentation classique d'un A-scan montre donc l'amplitude de l'écho en fonction du temps. Dans certains cas cette représentation peut être redressée. Il s'agit de rendre positives toutes les variations par un repliement de toutes les parties négatives du signal.

4.2.2 B-scans

Il s'agit d'une figure qui contient plusieurs A-scan issus d'une même ligne d'étude. Un B-Scan représente en deux dimension les variations d'amplitude des mesures ponctuelles sur toute une longueur (ou largeur) d'une plaque en fonction du temps. Un B-scan, permet de tracer le profil de propagation suivant la profondeur de la pièce. On représente donc un B-Scan comme une image géométrique (longueur vs épaisseur) avec une échelle de couleur (amplitude).

4.2.3 C-scans

C'est une autre possibilité de représentation. Il s'agit d'une représentation de données en deux dimensions affichée comme une vue de dessus de la pièce à inspecter (longueur vs largeur). L'information sur toute la surface est acquise sur chaque signal temporel à un même temps ou sur une même fenêtre temporelle. Cette fenêtre est définie par une porte informatique. Dans cette porte une information comme par exemple le maximum des amplitudes est enregistrée. Le temps auquel est prise cette information d'amplitude est associé à une distance dans la plaque. Un C-Scan est donc une image géométrique (longueur vs largeur) avec une échelle de couleur (amplitude) donnant une information ponctuelle pour un plan à une distance donnée ou une information moyennée pour une couche prise entre deux épaisseurs données.

Dans tous les cas, la corrélation des données ultrasonores avec la position réelle de la sonde se fait généralement à l'aide de dispositifs électromécaniques appelés codeurs. Le codeur enregistre l'emplacement de chaque acquisition de données par rapport à un modèle de balayage donné défini par l'utilisateur et en fonction de la résolution.

4.3 Cartographie de l'amplitude de l'écho réfléchi par une plaque de composite

La méthode présentée dans cette partie fait référence à celle élaborée au laboratoire et utilisée dans le cadre de la thèse de doctorat, soutenue en décembre 2013 par Sébastien Arnaud [2], intitulée : «Contribution à la compréhension de la formation de défauts d'élaboration par RTM d'un composite stratifié Carbone/Epoxy – Influences sur le comportement hygrothermique et abattement des propriétés thermomécaniques».

L'utilisation de capteurs multiéléments répond aux critères de rapidité d'enregistrement et d'analyse des signaux. La tache focale est ajustable en changeant les paramètres tels que le

nombre d'éléments actifs et la profondeur focale. La dimension de la tache focale reste toutefois dépendante de la largeur des éléments actifs.

Cette analyse a été menée dans une cuve dont le positionnement en x, y, z est finement réglable de façon à garantir le parallélisme entre la surface de la plaque et celle de la surface active du capteur. Les plaques ont été analysées à l'aide du dispositif multiélément FOCUS LT de marque Olympus qui contient un système d'émission-réception multiéléments Tomoscan piloté par le logiciel d'interface Tomoview. Le capteur utilisé est une sonde 10L128-12 en immersion contenant 128 éléments dont 16 actifs simultanément :



Figure 4 - 1 : Capteur multi éléments – 10 MHz, 128 éléments

Le dispositif expérimental est présenté dans la Figure 4 - 2.

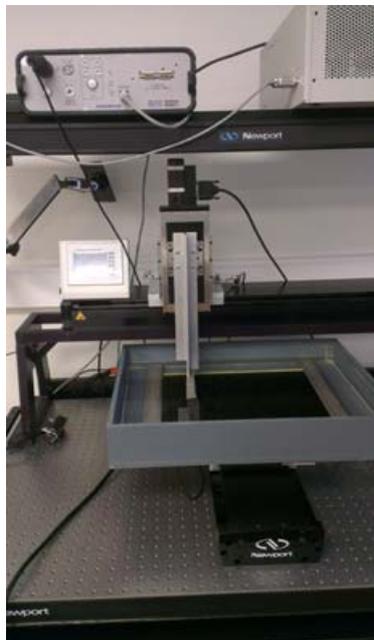


Figure 4 - 2 : Dispositif expérimental

Tous les éléments, distants de 0.5 mm, travaillent en émission-réception de façon synchrone par lot de 16 avec un pas de déplacement de un élément ce qui permet des enregistrements tous les 0.5 mm sur 56 mm par bande. Le déplacement latéral du capteur est effectué par pas de 1mm. La vitesse d'enregistrement est de 17 mm/s. La tache focale de ce transducteur

dépend du nombre d'éléments actifs et de la profondeur focale. Il faut donc définir une configuration et une loi focale pour focaliser à 15 mm.

La loi de focale (exprimée en nanosecondes) choisie est :

0 – 76.24 – 142.04 – 197.2 – 241.55 – 274.93 – 297.25 – 308.43 – 308.43 – 297.25 – 274.93 – 241.55 – 197.2 – 142.04 – 76.24 – 0

Ici les données fournies au FOCUS LT pour qu'il focalise à la seconde interface de la plaque sont :

- La distance entre le capteur et la plaque qui est de 15mm.
- L'épaisseur de la plaque qui est estimée constante et égale à 3.17 mm.
- Les vitesses de propagation dans le composite (2910m/s) et l'eau (1480m/s).
- Les données sont tout d'abord enregistrées au format « .rdt » puis converties et traitées sous MATLAB©.

Etant données les dimensions des plaques et la largeur du transducteur une acquisition totale nécessite 5 balayages dans le sens de la longueur des plaques. Les données sont donc enregistrées en plusieurs bandes. Leur nombre dépend du rapport entre la largeur de la barrette et la largeur de plaque composite. Les données obtenues sont ensuite traitées à l'aide d'un programme mis au point à cet effet (sous MATLAB©) pour recaler les 5 bandes de données enregistrées entre elles en un fichier unique. Cette reconstruction permet l'obtention des données nécessaires à l'extraction d'un C-scan.

Les enregistrements ont été effectués avec les gains pré-réglés de 15 et 30 dB du FOCUS LT.

4.3.1 Résultats à 15 dB

L'exploitation des relevés A-Scan à 15 dB est difficile car si l'écho de surface (S_1) n'est jamais saturé et pourrait donc servir de référence pour un traitement des signaux, l'écho de fond (S_2) voit son amplitude très fortement atténuée pour deux raisons : d'une part la porosité volontairement créée par un choix judicieux de paramètres d'injection et d'autre part les multiples réflexions se produisant aux interfaces résine/fibre. En effet dans un volume défini par la surface insonnée et l'épaisseur de la plaque, la répartition et l'orientation de ces interfaces est assez aléatoire.

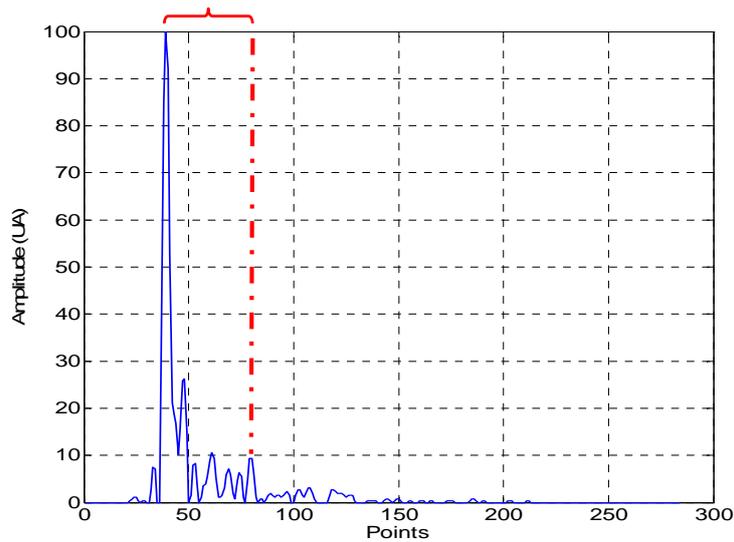


Figure 4 - 3 : Exemple de signal temporel relevé avec un gain de 15 dB

Dans la Figure 4 - 3, l'accolade marque les deux échos S_1 et S_2 réfléchis par les deux interfaces de la plaque. Les signaux délivrés par le FOCUS LT sont d'emblée redressés. L'unité de l'axe des temps est le point avec 40 ns/point.

A partir de ces temporels il est possible de faire la cartographie de l'amplitude des échos de fond.

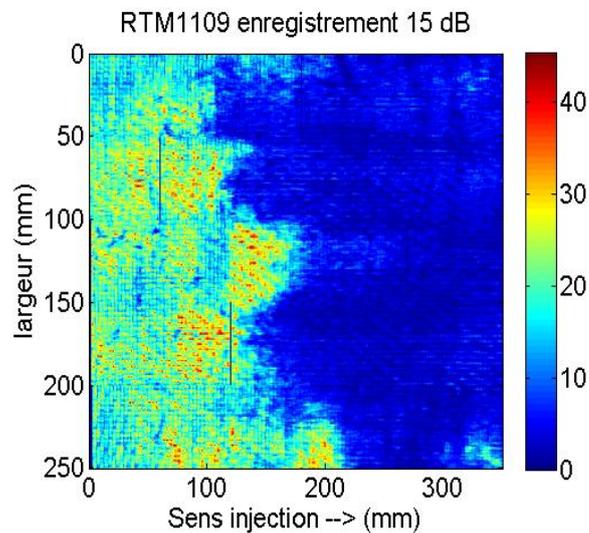


Figure 4 - 4 : Exemple de cartographie de l'amplitude de l'écho de fond S_2 pour une plaque (RTM 1109)

Elle est réalisée par multiélément sur une surface de $250 \times 350 \text{ mm}^2$ et relevée avec un gain 15 dB (Figure 4 - 4). Les graduations présentes dans la longueur et la largeur des cartographies correspondent aux dimensions de la zone scannée des plaques.

Pour chaque relevé l'échelle des couleurs varie de 0 à X %. Le bleu qui représente le 0 correspond à un niveau de S_2 nul. Le niveau maxi (100 %) est fixé par le logiciel Tomoview en fonction des paramètres d'acquisition. De ce fait toutes les échelles des cartographies des différentes plaques n'ont pas obligatoirement la même valeur maximale X%. L'absence de référence de porosité ne permet pas de comparer des C-Scan entre eux.

Lors des enregistrements à 15 dB l'autre problème rencontré est, qu'avec un tel gain, l'écho de fond est souvent proche de zéro et ne permet pas de distinguer sur une cartographie des zones à différents de taux de porosité dès que celle-ci prend des valeurs conséquentes. Alors que les paramètres d'élaboration ont été choisis pour créer une porosité variable et croissante dans le sens de l'injection, on observe sur le C-scan de la Figure 4 - 4 du côté de l'évent de sortie une vaste zone monochrome bleue (S_2 d'amplitude nulle) qui ne permettent aucune interprétation.

4.3.2 Résultats à 30 dB

Les signaux acquis sont maintenant enregistrés avec une amplification de 30 dB. Il résulte de ce réglage que l'écho S_1 renvoyé par la première interface (eau/plaque) est toujours saturé et n'est donc plus exploitable.

L'écho S_2 réfléchi par la seconde interface (plaque/eau) présente une meilleure dynamique du fait de l'augmentation du gain. Suivant le nombre de défauts rencontrés lors d'un aller et retour dans la plaque l'amplitude de l'écho de fond est de nature différente :

- Lorsque la structure ne présente que peu ou pas de défaut l'écho S_2 est saturé au même titre que l'écho S_1 (Figure 4 - 5(a)). Il n'est pas possible de différencier l'état de la plaque entre deux points, l'information étant alors la même.
- Lorsque la structure présente un nombre de défauts plus conséquent l'écho S_2 n'est plus saturé et des variations sont alors visibles (Figure 4 - 5(b)). Les variations de l'amplitude de l'écho S_2 sont alors sources d'information.

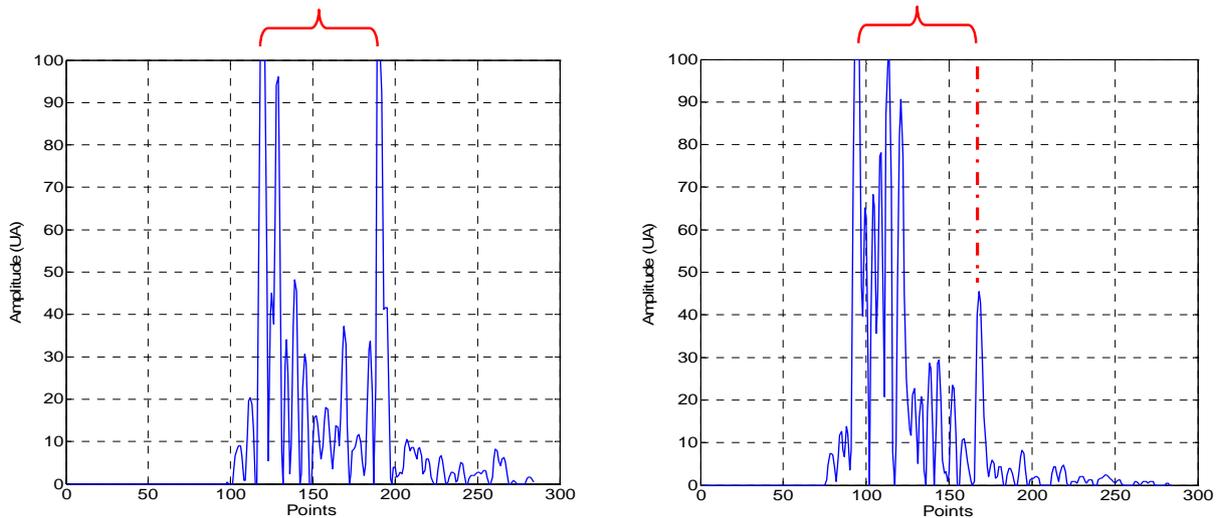


Figure 4 - 5 : (a) Signal acquis près du point d'injection (b) Signal acquis près de l'événement de sortie

Dans la Figure 4 - 5, l' accolade marque les deux échos S_1 et S_2 réfléchis par les deux interfaces de la plaque en deux points différents. Les signaux délivrés par le FOCUS LT sont d'emblés redressés. L'unité de l'axe des temps est le point avec 25 ns/point.

A partir de ces temporels il est possible de faire la cartographie de l'amplitude des échos de fond. Le niveau 100 % correspond au niveau d'amplitude du signal S_2 saturé.

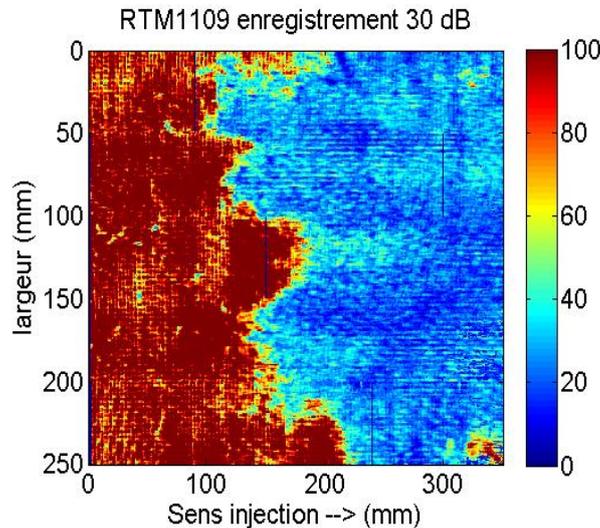


Figure 4 - 6 : Exemple de cartographie de l'amplitude de l'écho de fond S_2 pour une plaque (RTM 1109)

Elle est réalisée par multiélément sur une surface de $250 \times 350 \text{ mm}^2$ et relevée avec un gain de 30 dB (Figure 4 - 6).

Les graduations présentes dans la longueur et la largeur des cartographies correspondent aux dimensions de la zone scannée des plaques.

On constate que la précision gagnée dans la zone la plus poreuse près de l'évent de sortie se fait au détriment de celle située près du point d'injection.

Cette méthode ultrasonore a pour résultat de détecter les défauts de structure au-delà d'un seuil. Ce seuil est difficilement estimable et dépend entre autre du réglage du gain d'amplification. Lorsque l'écho S_2 n'est pas saturé les variations d'amplitude mettent en évidence les variations de taux de porosité entre les différentes plaques [2]. Dans ces zones les analyses C-Scan ne fournissent qu'une information qualitative de la répartition des défauts.

Dans le but d'avoir une définition de la porosité aussi bien dans la zone d'injection que dans la zone de l'évent, mais aussi de pouvoir quantifier les cartographies une méthode expérimentale plus maitrisable et mettant en œuvre des transducteurs mono-élément a été développée.

4.4 Cartographie de l'atténuation des ondes ultrasonores par une plaque de composite RTM

4.4.1 Technique expérimentale

La méthode reste celle de la réflexion normale d'un signal impulsionnel. Les enregistrements ont été effectuées avec deux types de transducteurs mono élément focalisant (10 MHz, focale 2" et diamètre de 0.25" ou 0.5").



Figure 4 - 7 : Transducteur focalisant Olympus

Pour réaliser des images nettes des cartographies les transducteurs focalisant de 0.5" de diamètre sont utilisés. Pour réaliser les mesures de l'atténuation de la plaque on utilise les transducteurs focalisant de 0.25" de diamètre. Ces derniers capteurs se comportent comme des

transducteurs plans avec une tache focale de 1.22 mm de diamètre et de 55 mm de long (valeurs calculées à -3 dB, dans l'eau à la fréquence 10 MHz).

L'eau de la cuve est maintenue à une température constante et homogène par un système de double cuve. Le transducteur est positionné 43 mm au-dessus de la plaque et on réalise un balayage X-Y précis. Le matériel utilisé (Figure 4 - 8) comprend principalement un bâti X-Y-Z complété par un dispositif de commande (MISTRAS) et un logiciel d'acquisition et traitement du signal (UTwin d'Eurosonics).

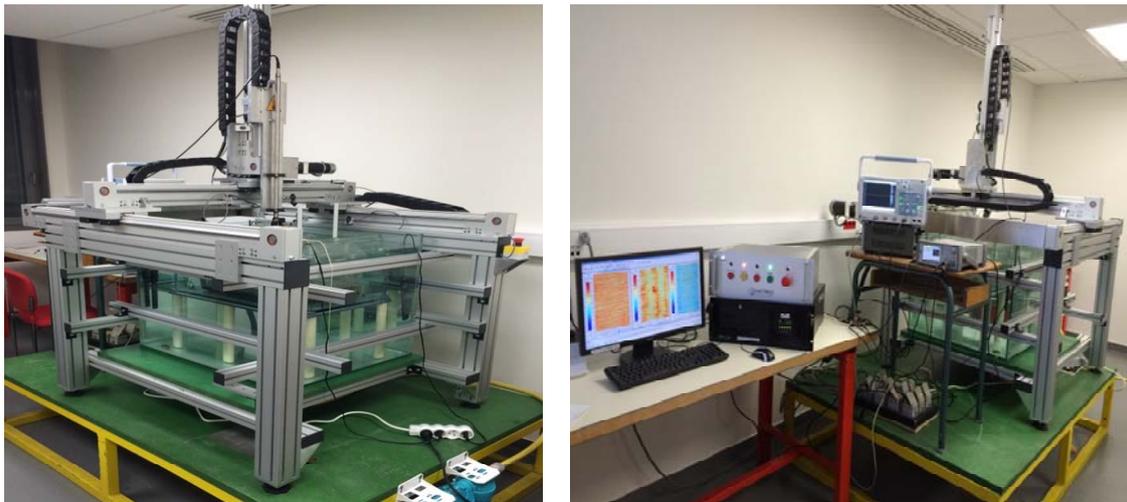


Figure 4 - 8 : Montage expérimental

L'excitation électrique consiste en une impulsion d'amplitude 10V, de durée 0.1 à 0.2 μ s suffisamment courte pour pouvoir séparer au mieux les échos des réflexions issues des interfaces fibre/résine et des bulles d'air contenues dans la plaque. Le gain est de 11.5 dB. Chaque signal A-scan acquis est constitué d'environ 800 points dont 260 échantillons utiles (entre l'écho de surface et l'écho de fond), car la fréquence d'échantillonnage est de 100 MHz. Les C-scan sont réalisés avec un balayage fin : le pas de déplacement mécanique est de 0.2 ou 0.5 mm. Un oscilloscope de contrôle Yokogawa et une station de travail complètent le dispositif. L'oscilloscope permet l'enregistrement de signaux particuliers avec un faible bruit et une résolution supérieure (au moins 10 bits) en vue d'un calcul spécifique..

En chaque point de mesure un signal A-Scan est enregistré. Les signaux acquis sont de la forme de celui de la Figure 4 - 9.

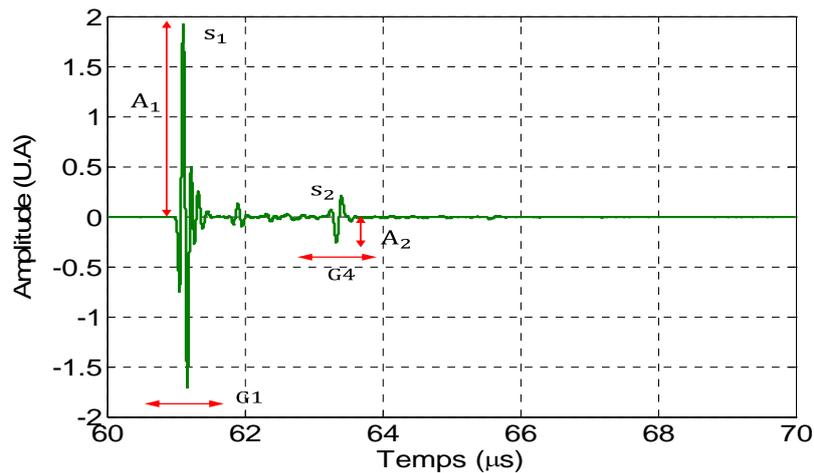


Figure 4 - 9 : Signal temporel réfléchi mesuré avec un transducteur focalisant mono élément.

Les signaux de chaque A-Scan sont structurés en 3 parties :

- L'écho réfléchi par la face supérieure d'amplitude A_1 , appelé écho de surface ou S_1
- L'écho réfléchi par la face inférieure d'amplitude A_2 , appelé écho de fond ou S_2
- Entre S_1 et S_2 une série d'échos dont le nombre, l'amplitude et la localisation temporelle dépendent de la nature des « défauts » existant dans l'épaisseur du composite en ce points. Ils sont appelés échos intermédiaires. Ils ne sont pas exploités dans les travaux présentés dans ce chapitre.

La Figure 4 - 9 montre un exemple type de signal avec parmi les échos intermédiaires une assez importante réflexion juste avant 62 μ s.

Des portes (G_1 et G_4 sur la Figure 4 - 9), permettent si nécessaire de faire l'acquisition des valeurs maximales absolues de l'amplitude sur des domaines temporels choisis.

Un exemple est donné pour illustrer ces propos. Comme cela a été montré dans le chapitre 2, on utilise le transducteur focalisant mono élément 10 MHz de 2" de distance focale et de 0.5" de diamètre pour faire des relevés cartographiques. Si on synchronise les deux portes G_1 et G_4 avec les échos de surface et de fond et qu'on enregistre en tous points de la plaque les maximums absolus des amplitudes dans ces deux portes, on obtient alors des cartographies de l'écho de surface et l'écho de fond. On n'exploite ici qu'une petite partie de l'information contenue dans le signal. Chaque valeur de l'amplitude correspond à une couleur. Un exemple est donné sur la Figure 4 - 10.

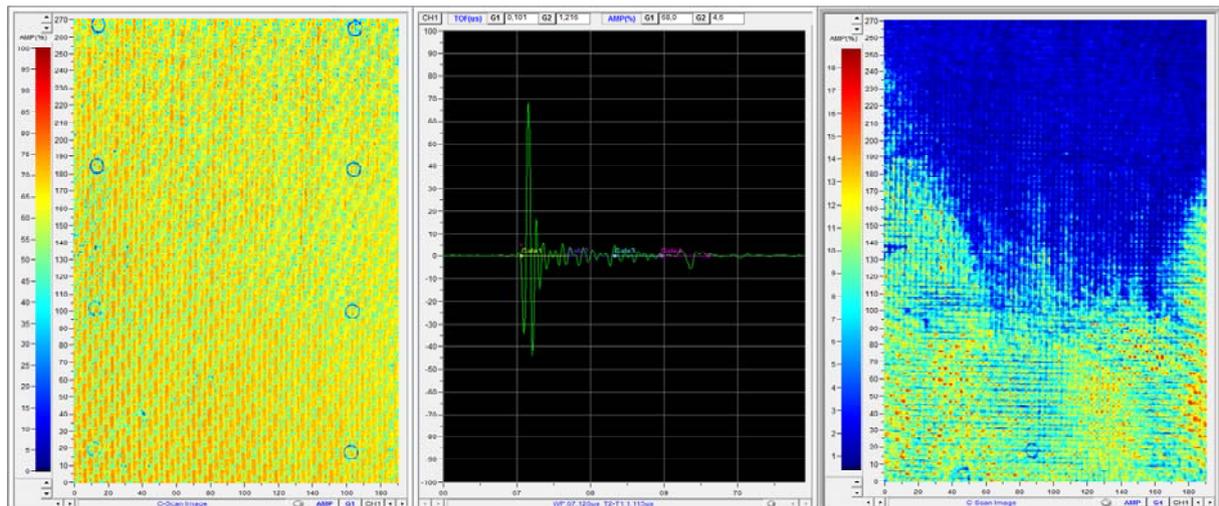


Figure 4 - 10 : C-Scan des échos de la surface (à gauche) et des échos de fond (à droite) d'une plaque composite. Au centre un des signaux temporels

Dans le paragraphe qui suit tous les résultats de l'étude présentée sont dans un premier temps ceux d'une plaque appelée « RTM1012 ». La plaque RTM1012 est fabriquée par le procédé RTM. Elle possède 6 plis de fibres de carbone satin 5. On travaille sur un échantillon $62.9 \times 54.8 \times 3.17 \text{ mm}^3$. Cette étude est très détaillée.

Dans un second temps les résultats concernant une série d'environ une vingtaine de plaques appelées « RTM11xx » de $300 \times 250 \times 3.17 \text{ mm}^3$ seront présentés de façon plus globale. Toutes les plaques à porosité contrôlée ont été réalisées au LOMC.

4.4.2 Cas de la plaque RTM1012

Pour réaliser des cartographies et des mesures de l'atténuation deux transducteurs focalisant de diamètre différents sont utilisés. Pour illustrer ces propriétés, des cartographies de la surface et du fond sont présentées Figure 4 - 11 et Figure 4 - 12 pour la plaque RTM1012. La cartographie de l'écho de fond renseigne immédiatement sur la présence de la porosité entraînant des pertes par réflexions internes.

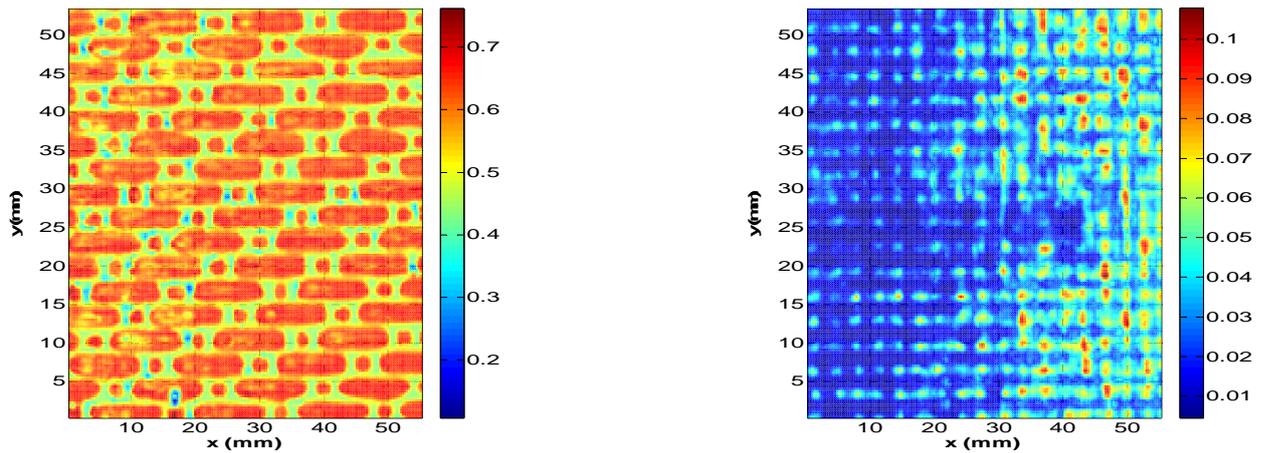


Figure 4 - 11 : (a) Cartographie (à gauche) de l'écho de surface et (b) Cartographie (à droite) de l'écho de fond de la plaque RTM1012, avec un transducteur focalisant 10 MHz, 0.5" de diamètre

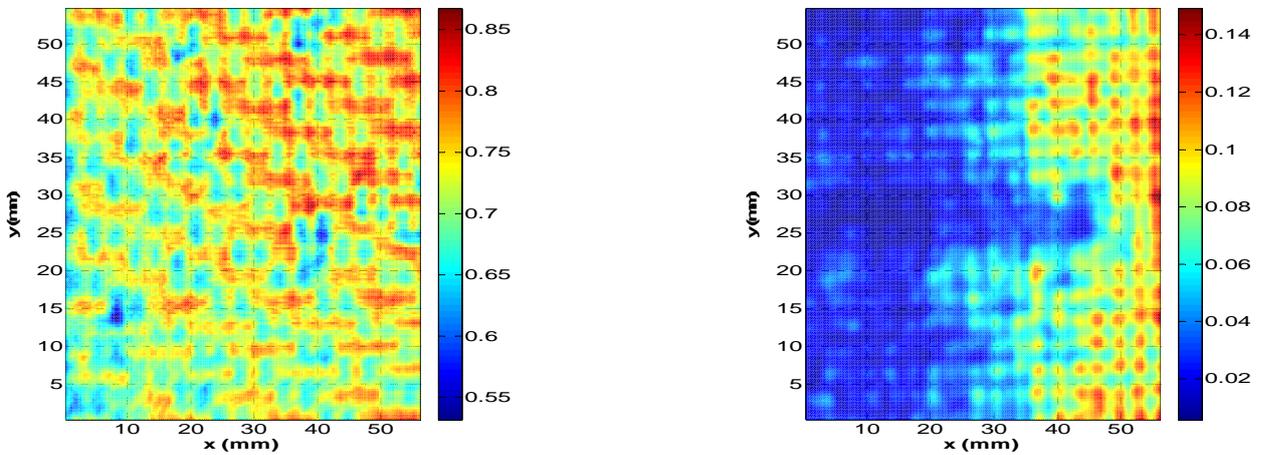


Figure 4 - 12 : (a) Cartographie (à gauche) de l'écho de surface et (b) Cartographie (à droite) de l'écho de fond de la plaque RTM1012, avec un transducteur focalisant 10 MHz, 0.25" de diamètre

Ces résultats montrent clairement que le transducteur possédant la tache focale la plus petite donne des images plus précises. Sur la cartographie (à gauche) de l'écho de surface de la Figure 4 - 11 on retrouve bien l'état de la surface de la plaque (Figure 4 - 13). Le C-scan de l'écho de surface renseigne sur la première couche rencontrée par le faisceau. Lorsque deux couches croisées de fibres sont sous la surface, 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, on peut retrouver la période (égale à 5) de recouvrement des fibres (environ 16 mm). Au-delà de la structure fibreuse on y décèle en bleu la présence de pores ouverts en surface.

Les informations données par les cartographies de l'écho de fond se ressemblent globalement. 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. Toutefois les amplitudes faibles (en bleu) traduisent principalement l'atténuation intrinsèque et la diffusion par les vides de résine. Les Figure 4 - 11(b) et Figure 4 - 12(b) montrent que l'écho de fond présente une certaine périodicité discrète alors que le faisceau a traversé deux fois les 6 couches de tissus (superposées, sans correspondance précise entre les fibres) et des zones de porosités diverses.

Les échelles des couleurs des amplitudes des cartographies sont toutes les quatre différentes ce qui ne permet pas une analyse aisée de ces résultats. La Figure 4 - 13 est la photographie de la surface de l'échantillon, à comparer avec la Figure 4 - 11(a).

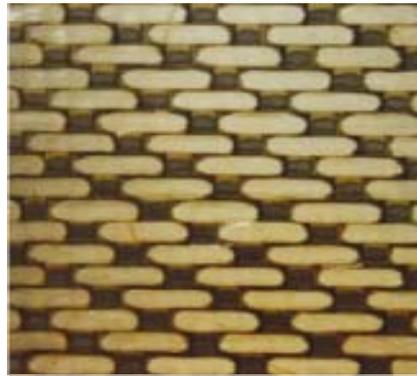


Figure 4 - 13 : Photo de la surface de l'échantillon RTM1012

4.4.2.1 Atténuation dépendant de la fréquence

Le calcul de l'atténuation peut être réalisé simplement lorsque les ondes incidente et réfléchie sont planes en prenant en considération le coefficient de réflexion $R(f) = S_2(f) / S_1(f)$ où f est la fréquence. On utilise donc le transducteur focalisant 10MHz de 0.25" de diamètre, de 2" de distance focale.

En chaque point la valeur de R est calculée à partir des mesures. Pour le calcul de $z = Z_2/Z_1$ nous prenons $Z_1=1.496$ MRa pour l'eau ; cette valeur est constante car la température du fluide est constante. Pour la plaque RTM, la valeur est calculée à chaque point (chapitre 1). Pour donner un ordre de grandeur la valeur moyenne de l'impédance Z_2 est de 4.31 MRa (soit une masse volumique de 1486 kg/m^3 et une vitesse de 2900 m/s).

Les calculs de l'atténuation (chapitre 1 – page 15) sont réalisés point par point sur toute la surface de la plaque dans une bande passante comprise entre 4 et 11 MHz. On peut alors extraire des cartographies de l'atténuation à diverses fréquences. La Figure 4 - 14 montre les résultats obtenus à 4 MHz et 8 MHz. Les échelles des couleurs donnent les valeurs de l'atténuation en Np/m.

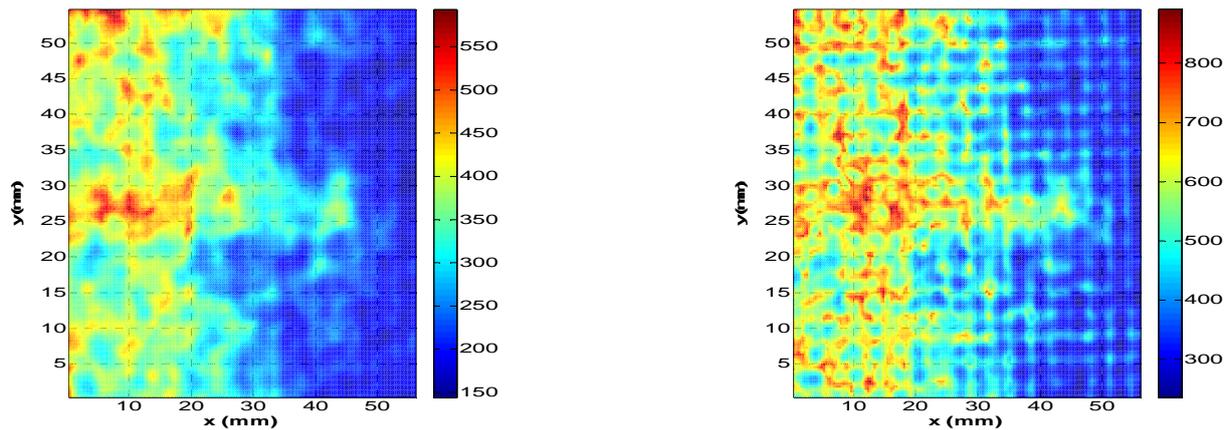


Figure 4 - 14 : (a) Atténuation à 4 MHz (à gauche) et (b) Atténuation à 8 MHz (à droite) de la plaque RTM1012

En observant ces cartographies, on constate que la cartographie à 8 MHz est de meilleure qualité que celle à 4 MHz. Ceci résulte du fait que, plus la fréquence augmente plus la longueur d'ondes diminue (inspection plus fine des défauts), mais aussi que la bande passante du transducteur est à son maximum à 8 MHz bien qu'on utilise un transducteur 10 MHz (maximum d'efficacité du transducteur). Ceci justifie que par la suite les cartographies obtenues par cette méthode soient présentées à 8 MHz.

4.4.2.2 Atténuation dépendant de l'amplitude

Les valeurs de l'atténuation données par les cartographies fréquentielles sont les plus justes, pour ne pas dire exactes, qu'on puisse obtenir. Les calculs de cette atténuation demandent beaucoup de temps (calculs des transformées de Fourier et des impédances de surface) surtout dans le cas où la surface inspectée est grande. Une autre méthode a été développée, pour lever cette difficulté, qui ne dépend plus de la fréquence mais seulement des amplitudes des signaux : cette méthode est dite méthode de calcul de l'atténuation simplifiée [41]. L'atténuation simplifiée est obtenue en prenant en considération le rapport $R = A_2 / A_1$, c'est-à-dire le rapport des amplitudes de l'écho de fond A_2 et l'écho de la surface A_1 au lieu du rapport des transformées de Fourier des mêmes échos. En réalisant les mêmes calculs que ceux décrits dans le chapitre 1, on obtient alors une cartographie dite « atténuation simplifiée » [28 42] (Figure 4 - 15). Les échelles des couleurs donnent les valeurs de l'atténuation en Np/m. La grandeur obtenue R n'est pas l'atténuation, grandeur définie pour chaque fréquence, mais ses variations sont globalement correctes. En particulier, ses valeurs obtenues (en Np/m) sont toujours proches de celles de l'atténuation à la fréquence optimale du transducteur (8MHz) Cette méthode est beaucoup plus rapide que la précédente.

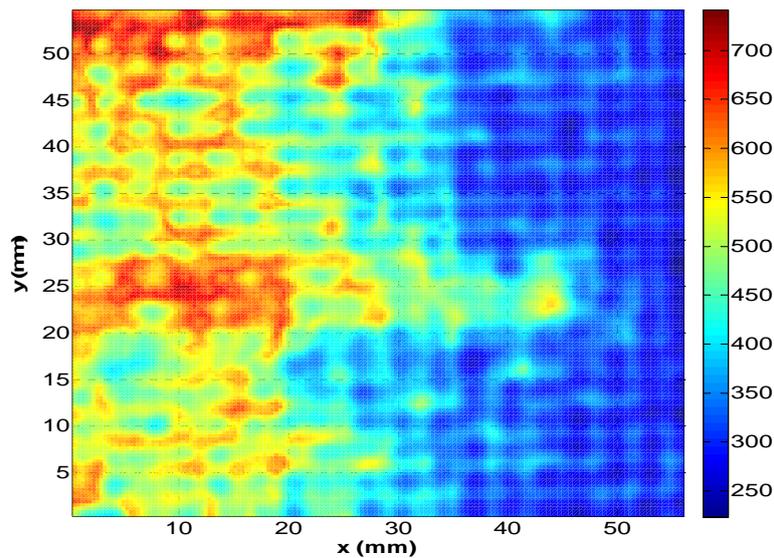


Figure 4 - 15 : Cartographie de l'atténuation « simplifiée » de la plaque RTM1012

On a donc localement une estimation constante de l'atténuation indépendante de la fréquence. La comparaison entre les Figure 4 - 14 et Figure 4 - 15 montre que la simplification fournit, rapidement (car sans transformée de Fourier), une localisation correcte des zones d'atténuation différentes. Même si les valeurs de l'atténuation sont approchées, cette méthode fournit toutefois la cartographie d'une grandeur physique. Il devient alors possible de comparer des résultats de mesures effectuées sur deux plaques différentes ce que l'exploitation des signaux bruts ou des signaux issus des mesures par multiéléments ne pouvaient pas permettre.

4.4.3 Cas des plaques RTM11xx

Une série d'environ une vingtaine de plaques appelées « RTM11xx » de grande dimensions ($300 \times 250 \times 3.17 \text{ mm}^3$) ont été analysées par des transducteurs multi éléments et mono élément focalisant. Les C-scan réalisés avec le transducteur multi élément ainsi que ceux réalisés avec le transducteur mono élément focalisant de diamètre de 0.25" sont présentés en parallèle. Les cartographies réalisées avec le transducteur focalisant sont toutes des cartographies d'amplification « simplifiée ». En effet pour l'échantillon RTM1012 de 33 cm^2 , le temps de traitement pour obtenir l'atténuation dépendant de la fréquence avoisine les 5 heures contre 10 minutes pour obtenir l'atténuation dépendant de l'amplitude. Pour des raisons de temps de calcul il n'a pas été envisagé de faire des cartographies de l'atténuation en fonction de la fréquence pour les plaques RTM11xx de 750 cm^2 .

Sur les images les plaques sont cartographiées sur des surfaces de 250x350 mm² avec le capteur multiélément et sur des surfaces de 200x300 mm² avec le capteur focalisant. Sur l'exemple de la plaque RTM1131 (Figure 4 - 16) le cadre rouge matérialise la zone communément analysée.

Les échelles des images de l'amplitude obtenues avec un gain de 30 dB sont en % et caractérisent l'amplitude de l'écho de fond : 100 % étant à rattacher à l'écho saturé. Les échelles des images de l'atténuation sont en Np/m et caractérisent l'atténuation de l'onde ultrasonore qui a effectué un aller/retour dans la plaque.

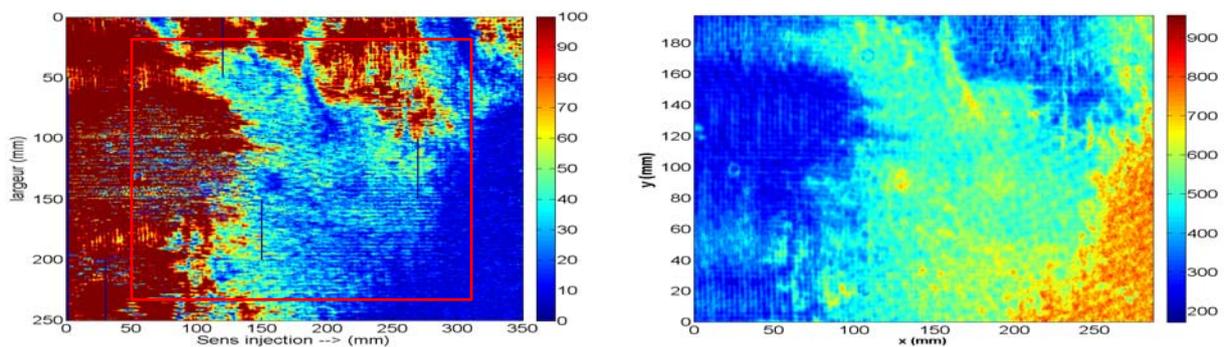


Figure 4 - 16 : (a) Cartographie des amplitudes à 30 dB (à gauche) et (b) Cartographie de l'atténuation simplifiée de la plaque RTM1131 (à droite)

4.4.4 Cartographies des plaques RTM11xx

Le projet dans lequel s'inscrit ce travail a pour but d'analyser certains critères d'élaboration des plaques RTM et leurs conséquences sur la qualité du produit fini. Ainsi plusieurs lots de plaques ont été élaborés au LOMC avec des paramètres différents, comme la pression et le débit d'injection ou le taux de fibre. Les chercheurs et industriels compétents dans le domaine de matériaux ont analysé leurs travaux à la lumière des informations fournies par les analyses ultrasonores. Quelques résultats sont ici sommairement présentés afin de valoriser la technique de cartographie mise au point.

Le but commun à toutes ces expériences est de réaliser des plaques composites RTM ayant une porosité la plus constante possible dans le sens de la largeur et variable suivant le sens d'injection. La porosité est variable et croissante (sans excéder 10 %) entre le point d'injection et l'évent de sortie de la résine. La connaissance de l'allure de la variation du taux de porosité dans une zone de transition, appelée la « marche », est un des buts majeurs de ce projet.

4.4.4.1 Cas des plaques « gavées »

L'objectif est de produire des plaques contenant le moins de défauts. Ces plaques fournissent des valeurs de référence pour le CND (matériau de calibration). Les cartographies de deux plaques de même épaisseur sont présentées. Elles ont des taux de fibres différents (plaque RTM1101 : 53 % de fibres (6 plis) / plaque RTM1102 : 60 % de fibres (7 plis)).

Ces plaques ont été injectées à un débit « optimal » de $160 \text{ cm}^3/\text{min}$ (établis en fonction du nombre capillaire Ca optimal pour un taux de fibres donné), puis lessivées jusqu'à ce que l'on n'observe plus de bulles dans la résine dans le conduit de sortie après l'évent du moule. Enfin, le moule fermé au niveau de l'évent, les plaques ont été mises sous pression (7/8 bars) jusqu'au temps de gel de la résine (soit 50 min environ). Pour la plaque RTM1102, une fuite est apparue pendant la mise sous pression au niveau du joint d'étanchéité.

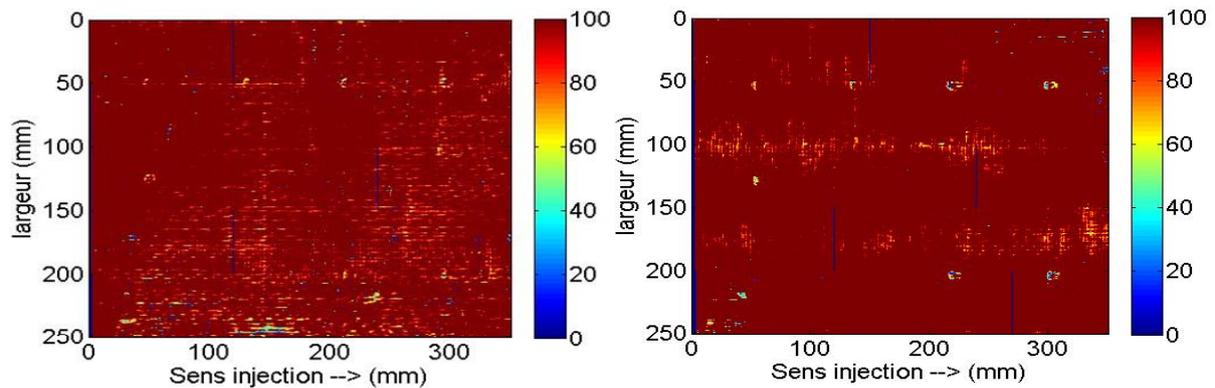


Figure 4 - 17 : (a) Cartographies des amplitudes à 30dB des plaques RTM1101 (à gauche) et (b) RTM 1102 (à droite)

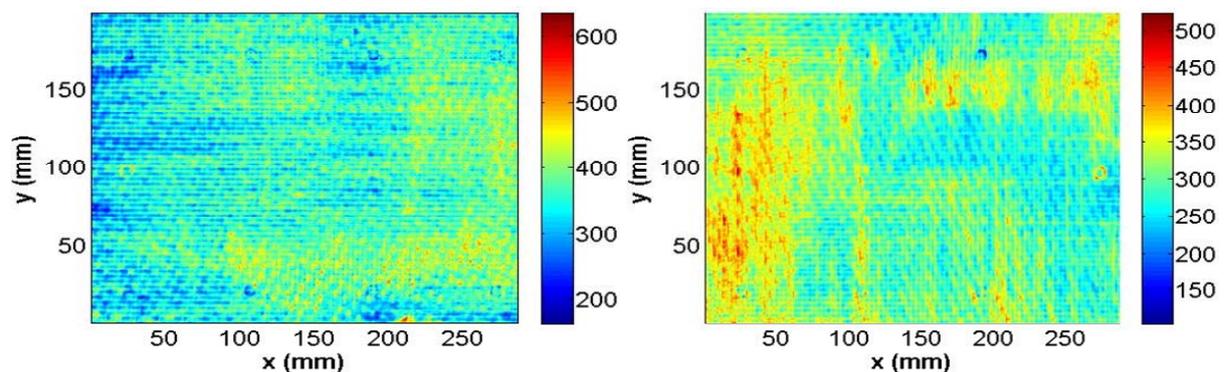


Figure 4 - 18 : (a) Cartographies de l'atténuation simplifiée des plaques RTM1101 (à gauche) et (b) RTM1102 (à droite)

Ces deux plaques auraient dû être identiques. L'atténuation observée sur la plaque RTM1101 est très faible et très homogène (Figure 4 - 18(a)). Le taux de porosité en principe proche de 0 % vu les conditions d'élaboration semble pouvoir être relié à une atténuation de l'ordre de

300 Np/m. Le problème d'étanchéité en créant un dégazage incomplet a grandement altéré la qualité de la plaques RTM1102 qui présente des poches de porosité non nulle (Figure 4 - 17(b) et Figure 4 - 18(b)). Les cartographies obtenues avec le capteur multi éléments (Figure 4 - 17) sont très pauvres en information et ne permettent pas de distinguer la différence de qualité des deux plaques.

4.4.4.2 Cas des plaques élaborées à l'identique

Dans le but de vérifier la cohérence des résultats tant d'élaboration que de contrôle, des plaques ont été réalisées avec le même protocole et les mêmes paramètres. La température du moule est de 165 °C, le taux volumique de fibres est de 53 %, le débit est de 67 cm³/min et le nombre capillaire vaut 2.3x10⁻³.

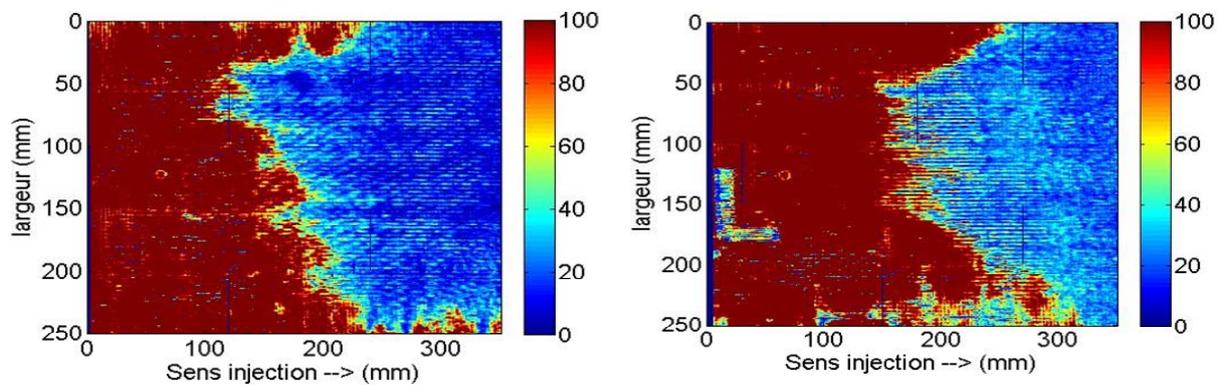


Figure 4 - 19:(a) Cartographies des amplitudes à 30dB des plaques RTM1108 (à gauche) et (b) RTM 1111 (à droite)

Le L en bleu sur la cartographie RTM 1111 n'est que l'image d'un marqueur qui a été déposé sur la plaque lors de cet enregistrement.

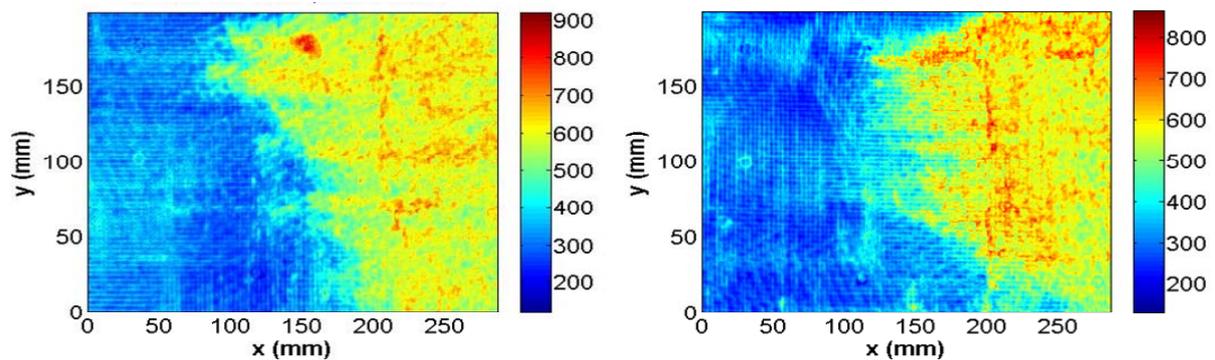


Figure 4 - 20 : (a) Cartographies de l'atténuation simplifiée des plaques RTM1108 (à gauche) et (b) RTM1111 (à droite)

Les images montrent un comportement en termes de distribution de porosité proche du modèle établi par les collègues des « matériaux », c'est-à-dire un palier de faible porosité,

puis un autre de forte porosité. Les longueurs des paliers à faible porosité sont du même ordre de grandeur pour les deux plaques (X_{min} environ égal à 130 mm). Pour des plaques identiquement élaborées, la répétabilité des résultats acoustiques montre la fiabilité de la méthode d'analyse. Les cartographies de l'atténuation (Figure 4 - 20) montrent toutefois dans les zones poreuses plus de détails de la distribution du taux de porosité que sur la Figure 4 - 19. Les échelles des couleurs qui donnent les valeurs de l'atténuation en Np/m ont des plages plus étendues que pour celles des plaques « gavées » indiquant que la porosité atteint des taux plus élevés.

4.4.4.3 Cas des plaques élaborées avec des vitesses d'injection minimale et maximale

Ces plaques sont réalisées dans le but de tester des injections à débit maximal et minimal. Les modèles prédisent que le bas débit doit faire apparaître un palier de faible porosité, puis un autre de forte porosité avec un X_{min} très court alors que le haut débit doit donner des plaques à porosité homogène. La plaque RTM1106 a été injectée avec un débit de $8 \text{ cm}^3/\text{min}$ et la plaque RTM1114 avec un débit de $450 \text{ cm}^3/\text{min}$. Dans les deux cas le taux volumique de fibre est de 53 %. La plaque RTM1106 a été injectée avec une préforme plus courte (200 mm de longueur plutôt que 400 mm) afin de pouvoir terminer l'imprégnation de la préforme avant que ne débute la réticulation de la résine.

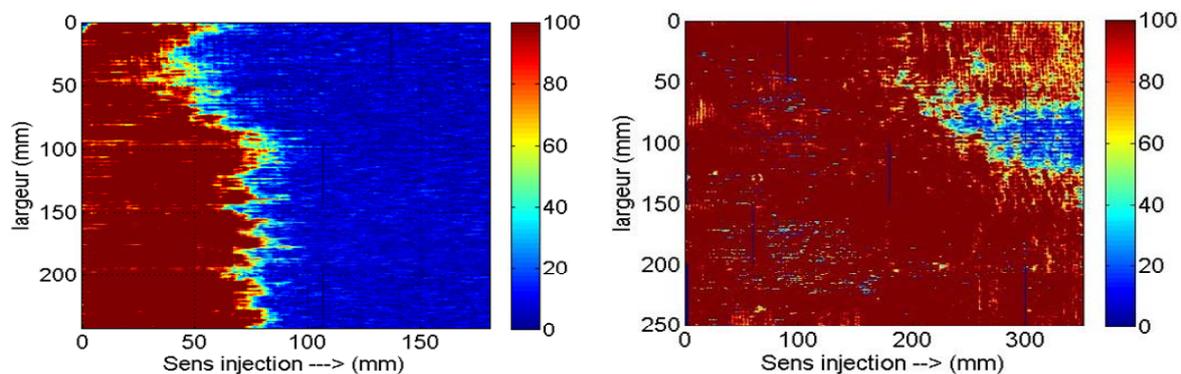


Figure 4 - 21 : (a) Cartographies des amplitudes à 30dB des plaques RTM1106 (à gauche) et (b) RTM 1114 (à droite)

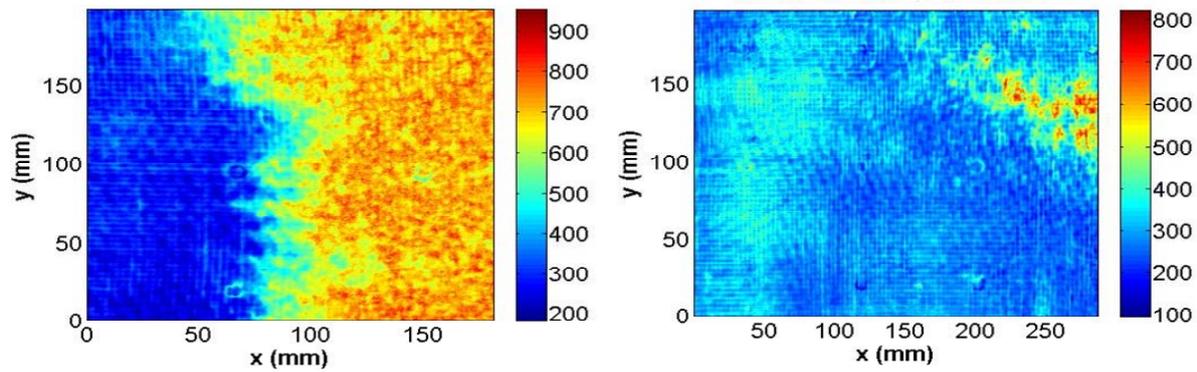


Figure 4 - 22 : (a) Cartographies de l'atténuation simplifiée des plaques RTM1106 (à gauche) et (b) RTM1114 (à droite)

Les images montrent le comportement attendu en termes de distribution de porosité. Pour la plaque RTM1106 la longueur du palier à faible porosité est assez court (X_{min} environ égal à 50 mm). Pour la plaque RTM1114 le taux de porosité est faible et constant sur l'ensemble de la plaque sauf au niveau de l'évent de sortie où une poche de porosité n'a pu être évacuée. Sur la cartographie des amplitudes à 30 dB de la plaque RTM1106 la complète homogénéité bleue du palier à forte porosité montre à l'évidence que l'écho de fond est nul sur toute la zone, ne donnant ainsi aucune information sur cette partie de la plaque contrairement à la cartographie de l'atténuation simplifiée qui laisse apparaître des nuances.

4.4.4.4 Cas des plaques à taux volumique de fibre de 60 %.

Jusqu'alors la série de plaque étudiée possèdent toujours un taux volumique de fibre de 53 %. On augmente ce taux de 53 % à 60 % en ajoutant un pli supplémentaire à épaisseur de moule constante.

La réalisation des premières plaques à 60 % avec le même protocole que pour les plaques à 53 % a mis en évidence la présence d'un écoulement préférentiel sur les bords du moule et la création d'une zone sèche en milieu de plaque. Cet écoulement était dû au changement du taux de fibres, qui a diminué la perméabilité, et à la légère surépaisseur (0.1 mm) provoqué par le pli supplémentaire.

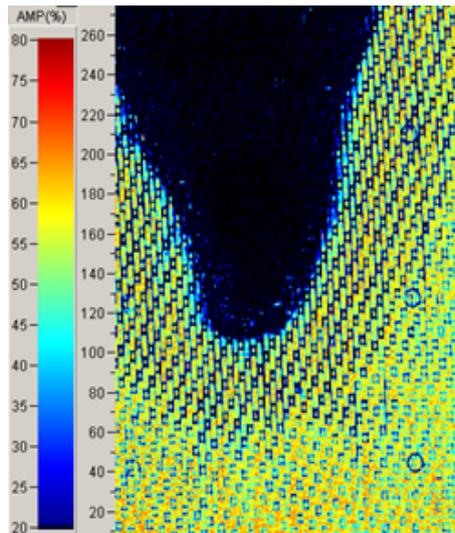


Figure 4 - 23 : Echo de surface de la plaque RTM1113

Dans la Figure 4 - 23, la zone bleu foncé est la zone sèche.

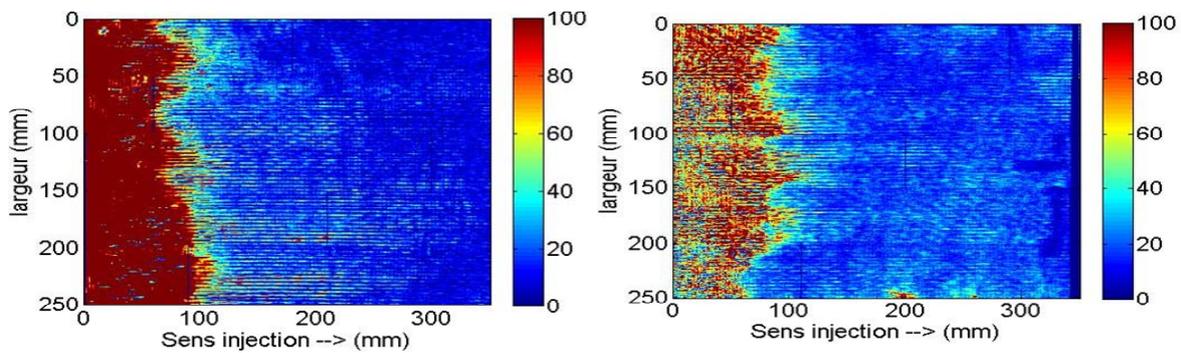


Figure 4 - 24 : (a) Cartographies des amplitudes à 30dB des plaques RTM1120 (à gauche) et RTM 1122 (à droite)

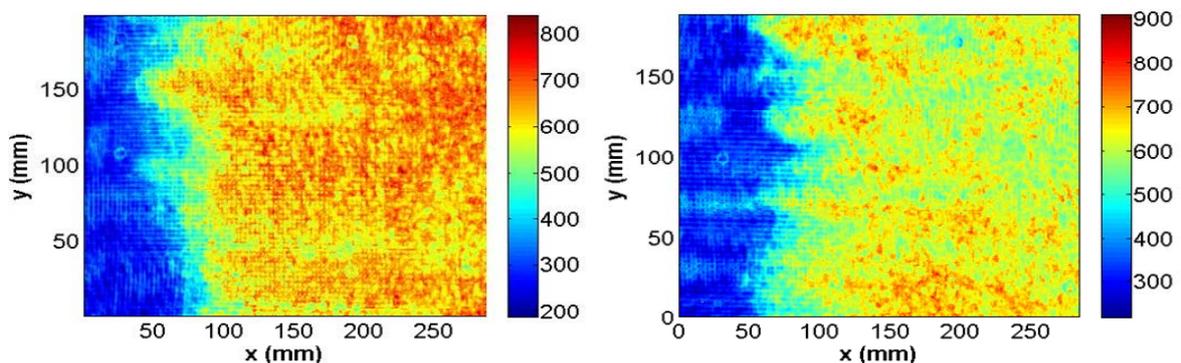


Figure 4 - 25 : (a) Cartographies de l'atténuation simplifiée des plaques RTM1120 (à gauche) et RTM1122 (à droite)

Ce problème a été supprimé en modifiant en profondeur le protocole d'élaboration ce qui a permis l'obtention de plaques à porosité contrôlée avec des paliers de porosité de différents taux pour un même Xmin. Les plaques RTM1120 et RTM1122 ont un même Xmin d'environ

60 mm mais la plaque RTM1120 présente une atténuation moyenne sur le palier haut d'environ 750 Np/m alors que celle de la plaque RTM1122 n'est que de 650 Np/m. Cette dernière appréciation n'est pas réalisable sur les cartographies des amplitudes à 30 dB.

4.5 Exploitation des résultats

4.5.1 Profils de l'évolution de l'atténuation selon le sens d'injection

L'analyse des cartographies C-Scan a montré que dans de nombreux cas la répartition de la porosité comportait deux zones bien distinctes contenant pour l'une de faibles taux de défauts et pour l'autre de forts taux. Ces profils en forme de marche ont été observés sur les plaques non gavées avec une régularité assez variable sur la largeur des plaques. Le fait d'avoir des cartographies simplifiées de l'atténuation en Np/m permet de tracer l'évolution des profils de porosité et de les comparer. Ces profils étant des fonctions de la valeur des débits d'injection et des nombres capillaires correspondants on peut déduire de l'analyse de ces courbes l'influence des réglages des paramètres d'élaboration. L'atténuation moyenne est calculée sur toute la largeur des plaques et pour différentes positions de l'abscisse x suivant le sens d'injection.

Étant donné la densité de points de mesure des cartographies de l'atténuation il est possible de tracer en quasi continu l'évolution de la valeur moyenne (calculée selon y) de l'atténuation en fonction de la distance parcourue entre le point d'injection et l'évent de sortie.

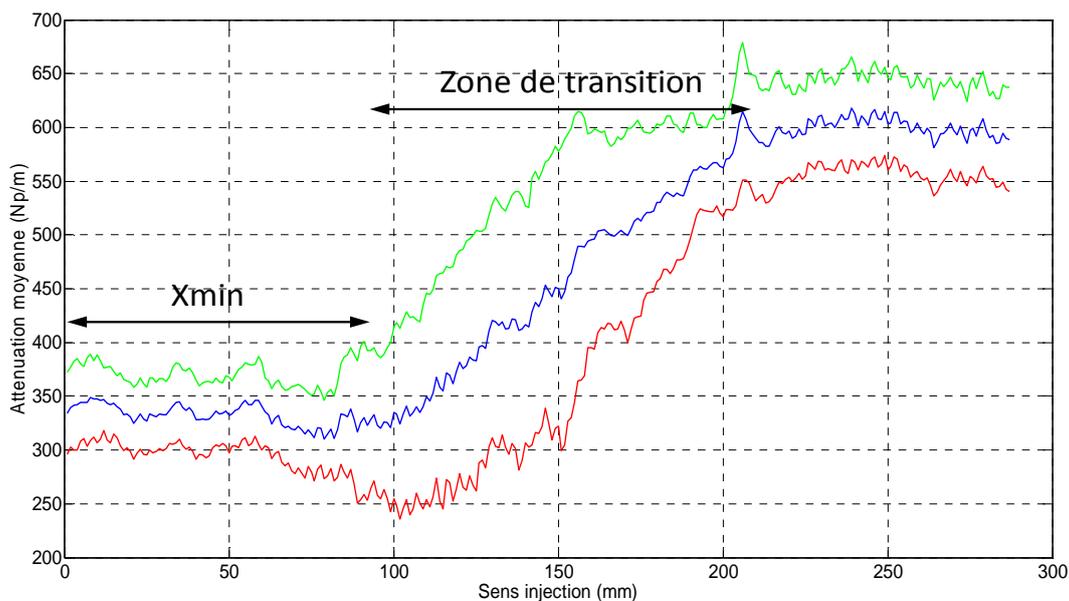


Figure 4 - 26 : Atténuation moyenne selon le sens d'injection de la plaque RTM1111

Dans la Figure 4 - 26, les courbes en vert et en rouge représentent l'évolution des valeurs max et min de l'atténuation pour chaque ligne de front $x=cste$ et la courbe bleue est la moyenne.

Il apparait trois zones assez distinctes, qui diffèrent entre elles par leur niveau d'atténuation :

- la première zone, souvent en forme de palier, est attenante au point d'injection et présente une atténuation assez faible et contient donc moins de défauts.
- la deuxième zone, zone de transition en forme de pente, caractérise une augmentation de l'atténuation plus ou moins forte et plus ou moins rapide.
- la troisième zone, souvent en forme de palier, est attenante à l'évent et présente une atténuation assez forte et contient donc plus de défauts.

Le paramètre X_{min} [2] désigne l'étendue de la zone de la plaque dans laquelle le taux de vide est minimal, c'est-à-dire la longueur du premier palier. La zone de transition est celle durant laquelle la porosité évolue en fonction de la distance.

4.5.2 Résultats obtenus

L'ensemble des résultats présentés ci-après le sont sous une forme plus allégée en points. Seule est représentée l'évolution de la valeur moyenne de la porosité, calculée sur une bande de largeur $\Delta x=10$ mm. L'estimation de X_{min} est repérée par une double flèche.

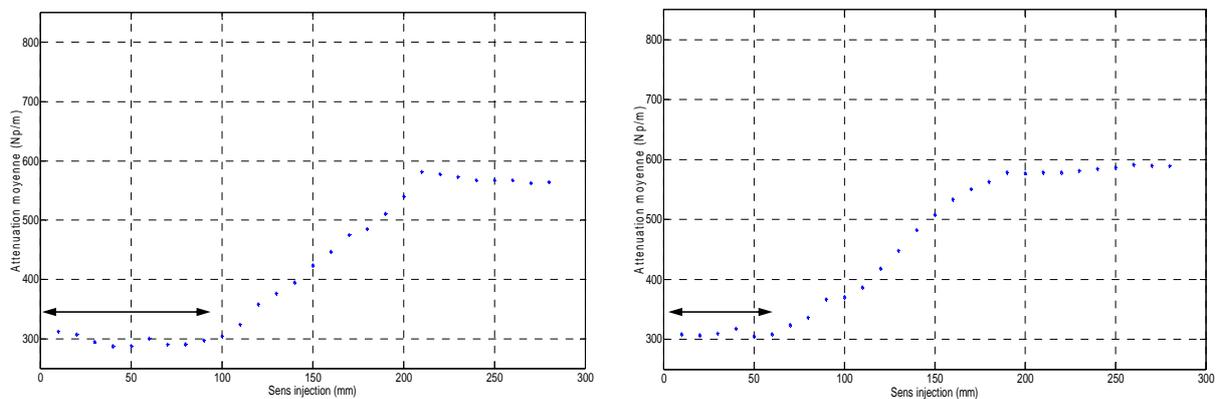


Figure 4 - 27 : (a) Atténuation simplifiée moyenne selon sens d'injection plaque RTM1108 (à gauche) et (b) plaque RTM1109 (à droite)

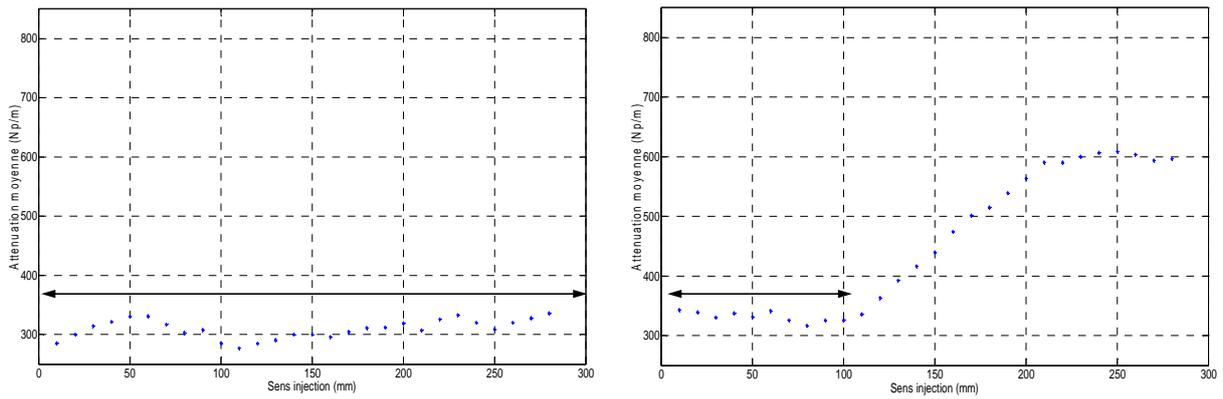


Figure 4 - 28 : (a) Atténuation simplifiée moyenne selon le sens d'injection plaque RTM1110 (à gauche) et (b) plaque RTM1111 (à droite)

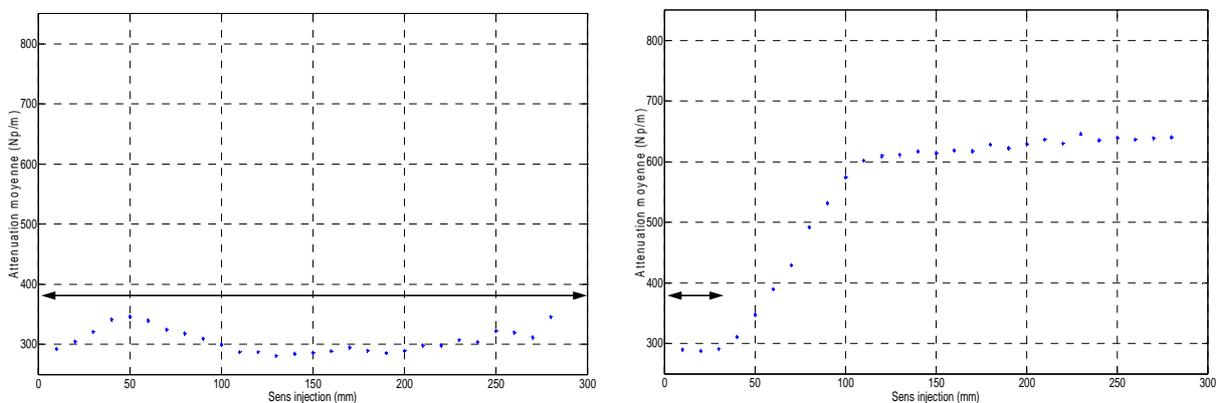


Figure 4 - 29 : (a) Atténuation simplifiée moyenne selon le sens d'injection plaque RTM1114 (à gauche) et (b) plaque RTM1120 (à droite)

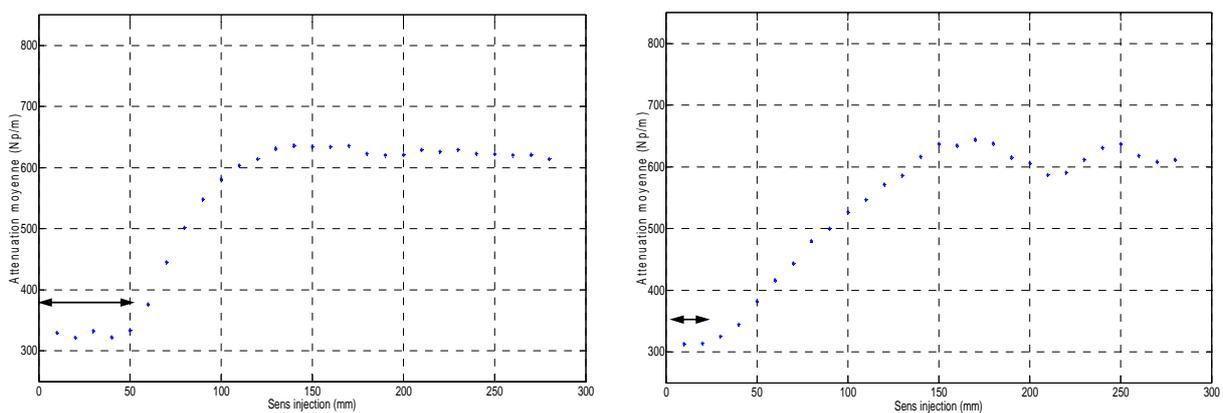


Figure 4 - 30 : (a) Atténuation simplifiée moyenne selon le sens d'injection plaque RTM1122 (à gauche) et (b) plaque RTM1124 (à droite)

Pour chaque plaque la longueur X_{min} est mesurée. Le tableau suivant résume les résultats, reliés à L , la longueur de la plaque. On regroupe, pour 8 plaques, les valeurs prises par le nombre capillaire et la longueur X_{min} ramenée à la longueur L .

Plaque	RTM 1108	RTM 1109	RTM 1110	RTM 1111	RTM 1114	RTM 1120	RTM 1122	RTM 1124
Xmin/L	0.366	0.2625	1	0.38	1	0.1416	0.241	0.186
Ca	2.25×10^{-3}	1.83×10^{-3}	8.35×10^{-3}	2.08×10^{-3}	8.26×10^{-3}	5.94×10^{-3}	8.39×10^{-4}	9.67×10^{-4}

Tableau 4 - 1 : Résultats des plaques RTM

A partir de ces résultats, on peut établir une relation entre les deux paramètres Xmin/L et le nombre capillaire Ca (Figure 4 - 31). Même s'il manque des points entre $Ca = 3 \cdot 10^{-3}$ et $Ca = 7 \cdot 10^{-3}$ on constate que cette relation suit une loi linéaire comme prévu dans la littérature [2] et que les informations extraites des cartographies sont donc cohérentes.

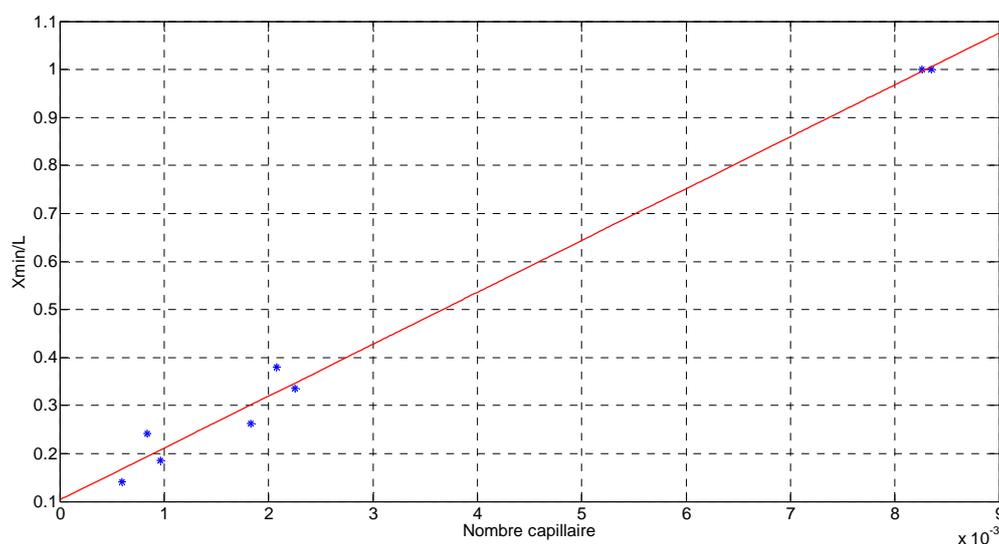


Figure 4 - 31 : Relation entre Xmin et nombre capillaire

4.6 Conclusions

Dans ce chapitre, dans un premier temps, nous avons introduit deux techniques ultrasonores différentes afin d'analyser des plaques composites : techniques mono élément et multi éléments. La première technique fournit de bons résultats qui peuvent être utilisés par la suite afin de quantifier la porosité dans les plaques composites RTM11xx. Tandis que la deuxième technique présente un gros avantage : la rapidité d'analyse. Bien que les résultats obtenus avec cette méthode soient moins précis, ils permettent une analyse globale de la plaque étudiée. Les zones poreuse et saine sont bien distinguées.

Dans le deuxième temps, les résultats d'analyse obtenus sont exploités. Certains auteurs confirment la dépendance de la porosité dans les plaques composites RTM de taux de fibres différent avec des paramètres d'injection par exemple la vitesse d'imprégnation [39]. On a introduit le paramètre X_{min} qui désigne l'étendue de la zone de porosité nulle. On arrive donc à montrer une corrélation entre l'évolution de la porosité en fonction du nombre capillaire. Cette relation linéaire est obtenue avec les résultats de 8 plaques.

Chapitre 5 : Relation entre porosité et atténuation d'une plaque composite

Le contrôle de la porosité dans des pièces composites est très important [44] car une porosité supérieure à 2 % peut entraîner leur rebut. Ce contrôle peut être finement réalisé de façon exacte par tomographie à rayons X [45] sur de petits échantillons. Par contre, sur des pièces importantes et en production, seul un contrôle ultrasonore semble envisageable. Par conséquent, une comparaison des résultats obtenus entre les deux méthodes s'avère indispensable pour conduire à un étalonnage. Cette étude comparative est présentée dans ce chapitre sur des plaques RTM réalisée selon une technique industrielle pour des faibles porosités (<3%). Les données tomographiques ont été fournies par L. Gay/Safran Composites.

Dans les zones dont la porosité est connue par la tomographie X nous effectuons des mesures de réflexion ultrasonore des plaques immergées avec des transducteurs plans ou focalisant. L'atténuation mesurée de chaque plaque dans son épaisseur est comparée au taux de porosité. Pour chaque type d'échantillon on établit une relation entre les deux grandeurs.

5.1 Principe de la tomographie rayon X

La tomographie par absorption des rayons X est la meilleure technique de contrôle permettant de donner d'un matériau sa structure interne à l'échelle micrométrique. Elle permet d'obtenir des informations cachées en utilisant un rayonnement X [46]. Ces informations permettent ensuite la reconstruction de la structure volumique interne d'un objet à partir d'une série d'images réalisées en projection. Cette technique se base sur le principe physique de l'atténuation que subit un flux de photons traversant un milieu. C'est-à-dire que le faisceau est plus ou moins atténué selon le domaine traversé. Les vides présents favorisent le passage des photons alors que les fibres les absorbent. Ainsi la mesure par des détecteurs de ce flux "atténué" permet d'obtenir la carte d'atténuation grâce à des techniques de reconstruction. C'est-à-dire que le faisceau est plus ou moins atténué selon domaine traversé. Les vides présents favorisent le passage des photons alors que les fibres les absorbent. Très utilisée dans le domaine médical, elle suscite de plus en plus d'intérêt en science des matériaux. Elle permet également de localiser très finement toute hétérogénéité, singularité, vide ou inclusion présents dans un objet, ainsi que de vérifier l'assemblage et le positionnement des ensembles mécaniques complexes.

La Figure 5 - 1 présente le principe d'acquisition dans le cas de la tomographie par transmission. Pour effectuer ce travail, on a besoin d'une source et des détecteurs. La pièce à analyser est mise entre la source et des détecteurs. Les photons émis par la source traversent le milieu et l'objet à étudier, puis sont recueillis par les détecteurs.

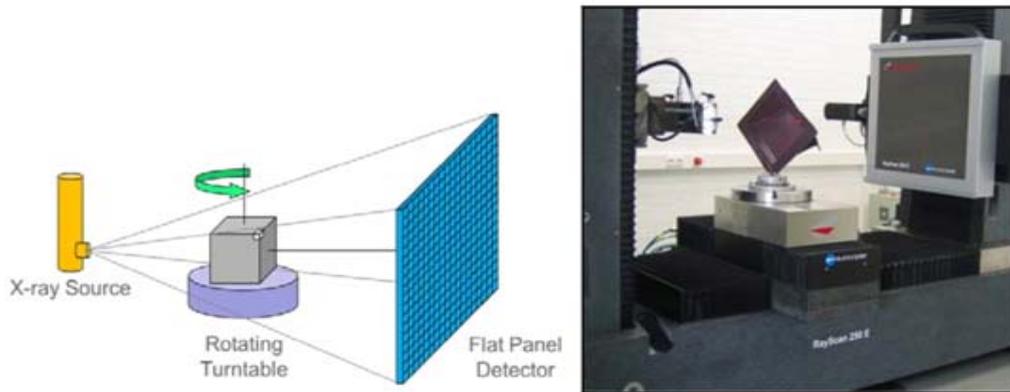


Figure 5 - 1 : Constitution d'un tomographe industriel

L'atténuation des faisceaux émis est directement proportionnelle à la densité du matériau, à son numéro atomique et à l'énergie du faisceau incident. La mesure de l'intensité de flux de rayons X dépend de la fonction d'atténuation linéique du milieu le long de l'axe de propagation. Les données acquises lors de la prise de mesure sont collectées suivant des orientations multiples. La précision dépend de la finesse de résolution. La résolution des micro-tomographes actuels est de l'ordre de 15 μm . À l'aide de ces données, une image numérique en trois dimensions est calculée et reconstruite mathématiquement. Le modèle 3D est présenté ensuite en niveaux de gris ou de couleurs dont chacun traduit point par point le coefficient d'atténuation local du faisceau incident, par la suite après calibration et étalonnage, peut être traduit en échelle de densité.

5.2 Relation entre porosité moyenne et atténuation ultrasonore moyenne mesurée à l'aide transducteurs plans sur des échantillons d'un nombre de plis différents

5.2.1 Mesure de porosité

Les plaques composites considérées dans cette étude possèdent à l'origine 10 plis chacune et leur épaisseur est de l'ordre de 4.5 mm. Afin d'étudier l'influence du nombre de plis sur les propriétés acoustiques du composite, on enlève 4 plis, par polissage, sur une des plaques. On obtient alors une plaque de 6 plis d'environ 2.8 mm avec une face brute et une face polie. L'autre grande différence entre ces plaques composites et celles de la série

RTM11xx est le mode d'empilement des plis. Ces plis élémentaires sont empilés en dirigeant l'axe des fibres selon des angles de 0, +45, 90 ou -45. Cette différence donne des structures internes très différentes qui peuvent avoir une influence sur les propriétés acoustiques de ces matériaux.

Les plaques sont découpées en plusieurs échantillons de 30x15x2.8 mm³ pour la plaque 1 (6 plis) et de 40x15x4.5 mm³ pour la plaque 2 (10 plis). Ces échantillons sont analysés à la tomographie X. Parmi de ces échantillons, 12 ont été choisis de façon représentative en fonction de leur épaisseur et de leur taux moyen de porosité comme résumé dans le Tableau 5 - 1.

Echantillon	1-25	1-27	1-6	1-18	1-23	1-24	2-1	2-31	2-17	2-20	2-23	2-24
Epaisseur (mm)	2.82	2.81	2.89	2.89	2.87	2.87	4.51	4.54	4.54	4.56	4.56	4.56
Taux moyen de porosité (%)	0	0	1	1	2.5	2.5	0	0	1	1	2.4	2.4

Tableau 5 - 1 : Tableau récapitulatif des échantillons

Pour illustrer ces données, trois exemples de tomographie X de ces échantillons sont présentés Figure 5 - 2. Il s'agit des échantillons 2-31, 2-17 et 2-23 respectivement de porosité moyenne égale de 0%, 1% et 2.4%.

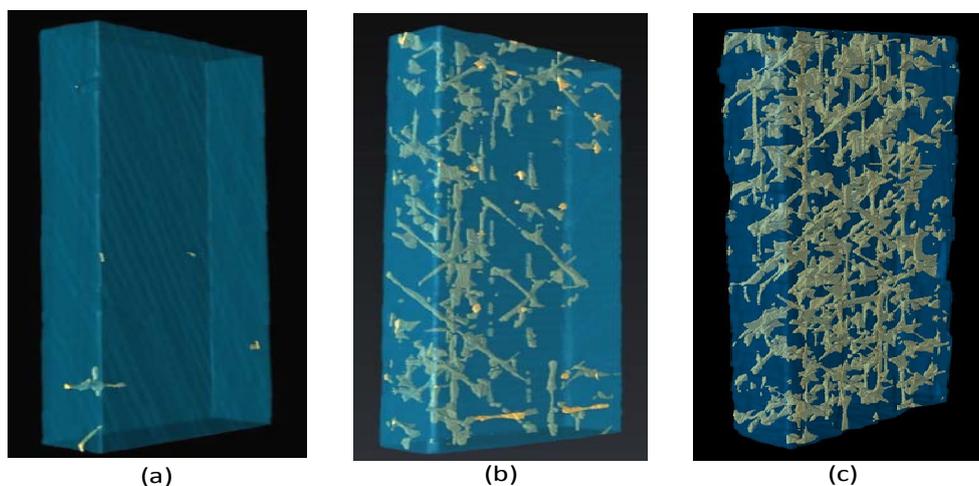


Figure 5 - 2 : Tomographie X de des échantillons (a) 2-31, (b) 2-17 et (c) 2-23. Le code couleur : est 'gris' pour la porosité interne et 'or' pour la porosité de surface

On constate que pour certains échantillons, comme le 2-17, la porosité n'est pas uniformément répartie. La valeur du taux de porosité donnée est une valeur moyenne.

5.2.2 Mesure de l'atténuation

La mesure de l'atténuation est réalisée avec un transducteur plan de 10 MHz et de 0.5" de diamètre par la méthode dépendant de la fréquence [47]. Une cartographie des plaques a été réalisée. Une partie de cette cartographie de la plaque 2 avec la localisation des échantillons 1- 17 - 20 - 23 - 31 (de haut en bas et de gauche à droite) est présentée Figure 5 - 3. On constate ici aussi que la porosité n'est pas uniformément répartie au sein de chaque échantillon. La valeur de l'atténuation à prendre en compte doit, comme la valeur moyenne du taux de porosité, être une valeur moyenne.

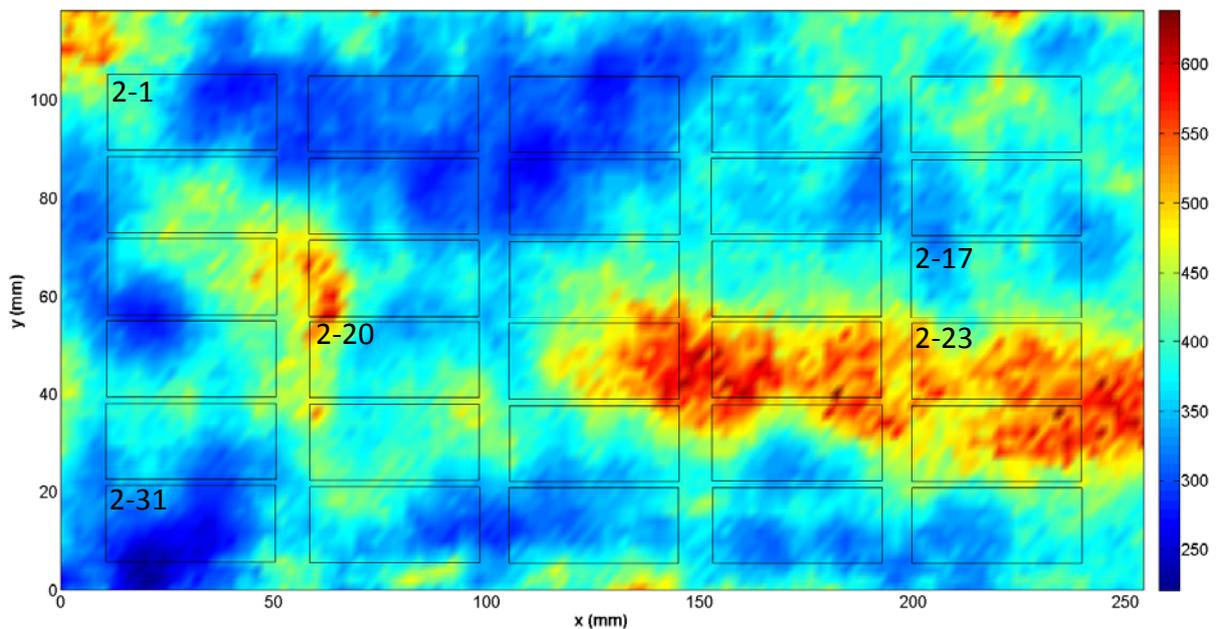


Figure 5 - 3 : Cartographie de l'atténuation à 8 MHz (Np /m)

La Figure 5 - 3, est la cartographie de l'atténuation à 8 MHz sur une partie de la plaque 2, avant la découpe en 36 échantillons : la porosité croît lorsque qu'on passe du bleu au rouge. Les cadres noirs représentent les échantillons de 40x15 mm².

On mesure l'atténuation des ondes longitudinales [48 49] traversant la plaque dans son épaisseur. Sur chaque échantillon, 6 mesures ont été effectuées : 3 sur chaque face, une première au centre de l'échantillon et deux de part et d'autre de la première. L'écart entre les centres des mesures (\longleftrightarrow) est de 5 mm pour la plaque 1 et de 7 mm pour la plaque 2. Les mesures ont été effectuées à 50 mm de distance de l'échantillon de sorte que la section du faisceau incident est alors totalement incluse dans celle de l'échantillon.

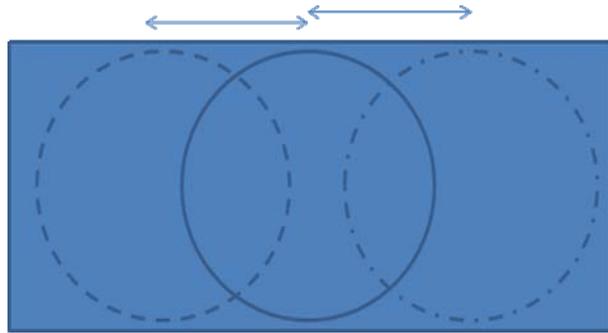


Figure 5 - 4 : Surfaces sur lesquelles ont été mesurées les atténuations avec un transducteur plan

Un exemple de relevé de l'atténuation en fonction de la fréquence pour l'échantillon 1-27 est montré dans la Figure 5 - 5. Les trois courbes continues correspondent aux relevés effectués sur une de deux faces de l'échantillon et les pointillées celles effectuées sur l'autre.

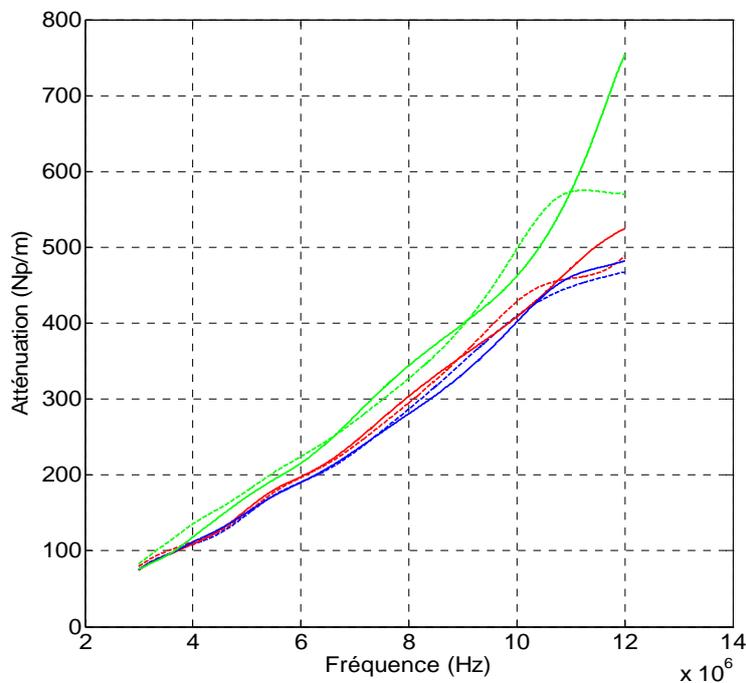
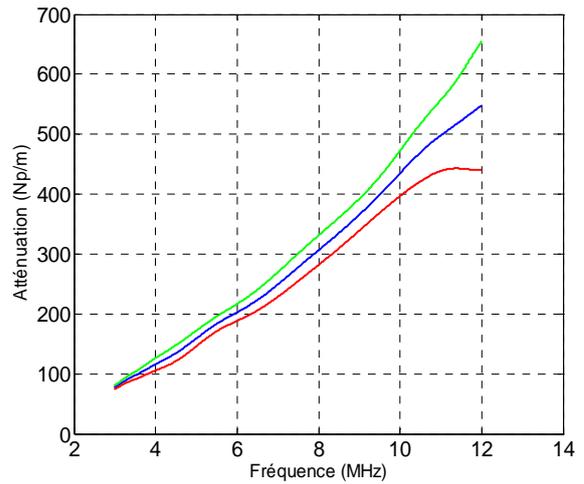
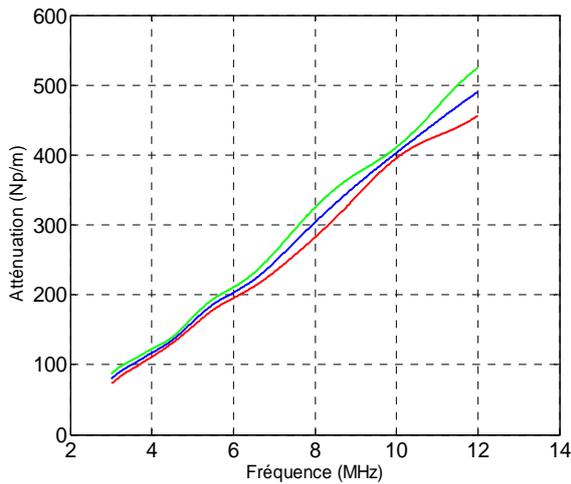
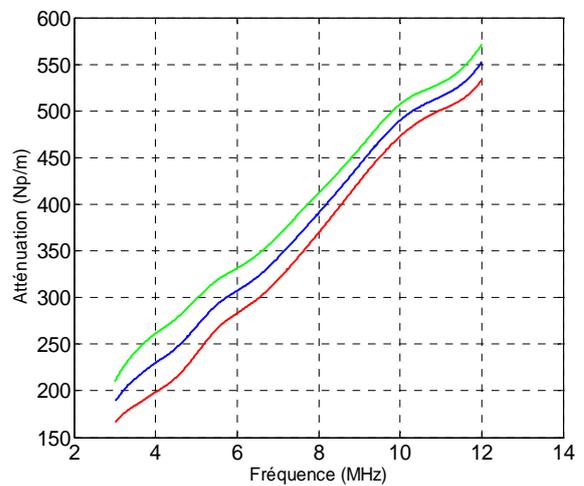
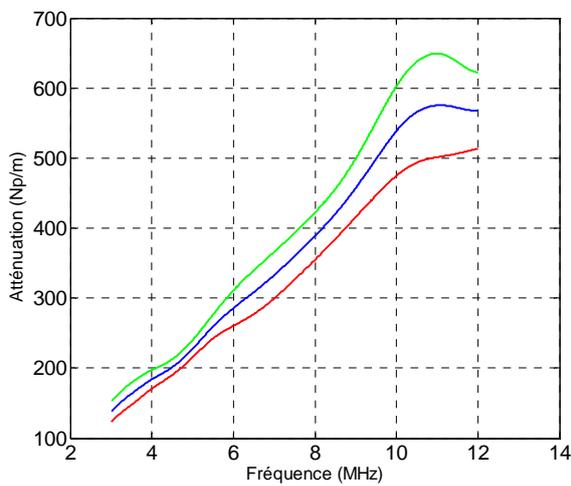


Figure 5 - 5 : Atténuation de l'échantillon 1-27 : chaque couleur correspond à une même zone de mesure

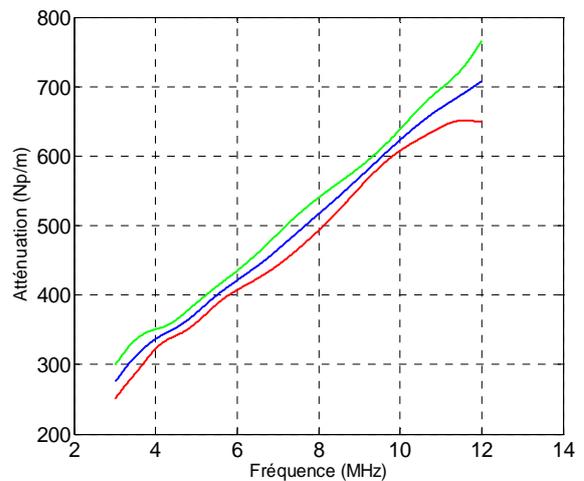
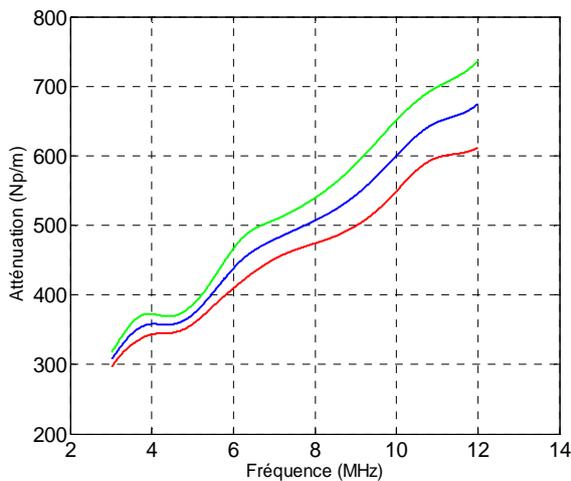
Pour chaque échantillon la valeur moyenne de l'atténuation a ensuite été calculée en fonction de la fréquence. Pour chaque mesure les écarts types ont été calculés. Les résultats obtenus pour l'ensemble des échantillons sont présentés de la Figure 5 - 6 à la Figure 5 - 11. Sur chaque graphique la courbe bleue montre l'atténuation moyenne des 6 mesures d'un échantillon, tandis que les courbes rouge et verte représentent la valeur moyenne plus ou moins l'écart type.



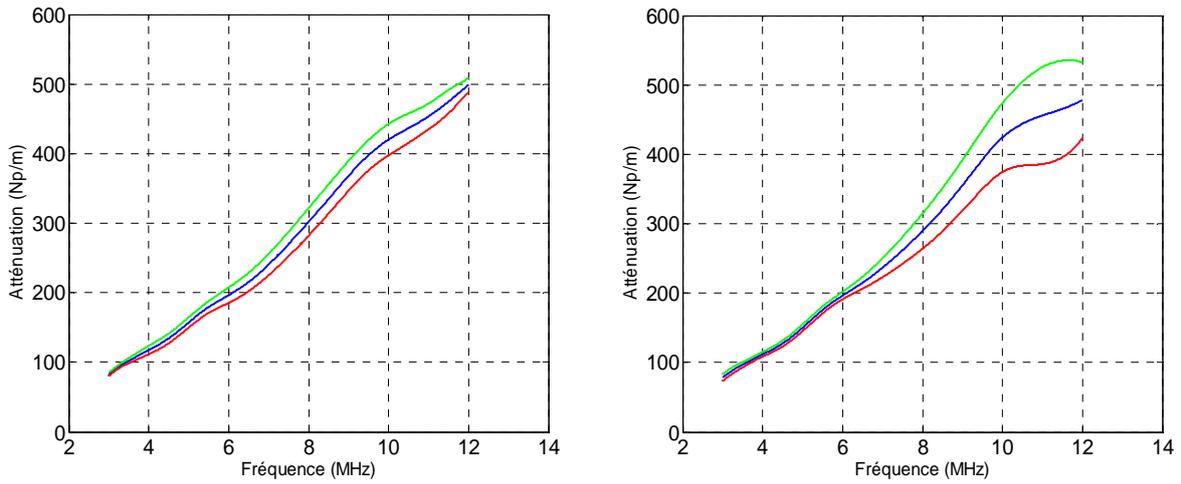
**Figure 5 - 6 : Porosité 0% : (à gauche) Atténuation de l'échantillon 1-25
(à droite) Atténuation de l'échantillon 1-27**



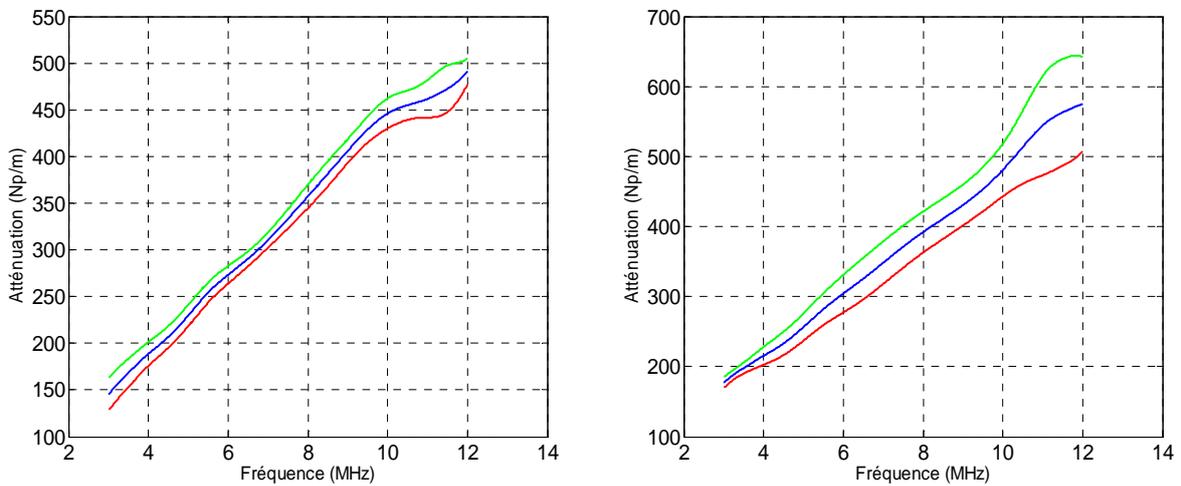
**Figure 5 - 7 : Porosité 1% : (à gauche) Atténuation de l'échantillon 1-6
(à droite) Atténuation de l'échantillon 1-18**



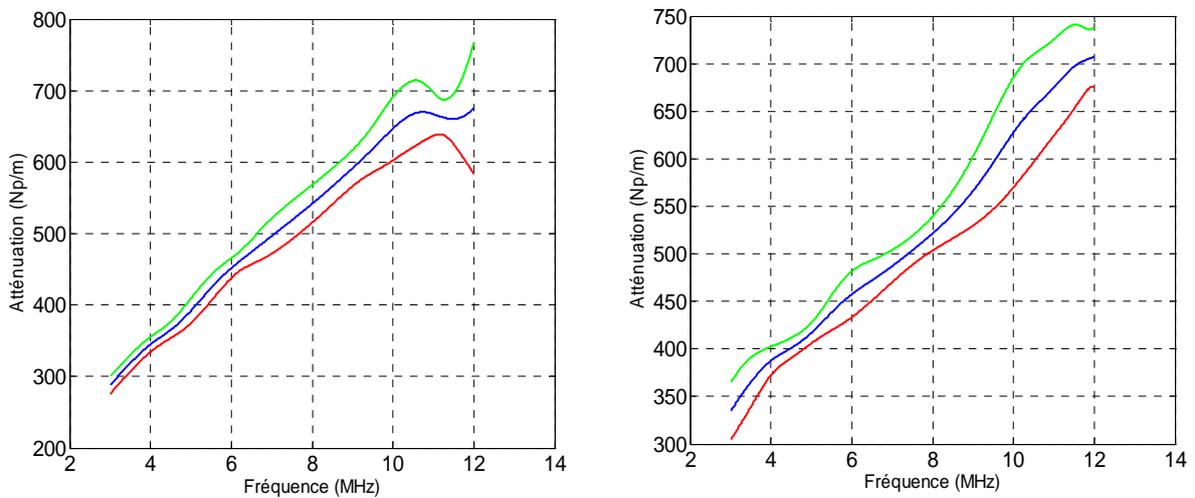
**Figure 5 - 8 : Porosité 2.5% : (à gauche) Atténuation de l'échantillon 1-23
(à droite) Atténuation de l'échantillon 1-24**



**Figure 5 - 9 : Porosité 0% : (à gauche) Atténuation de l'échantillon 2-1
(à droite) Atténuation de l'échantillon 2-31**



**Figure 5 - 10 : Porosité 1% : (à gauche) Atténuation de l'échantillon 2-17
(à droite) Atténuation de l'échantillon 2-20**



**Figure 5 - 11 : Porosité 2.4% : (à gauche) Atténuation de l'échantillon 2-23
(à droite) atténuation de l'échantillon 2-24**

L'observation des courbes appelle plusieurs remarques. On constate que l'atténuation évolue de façon assez linéaire en fonction de la fréquence quelle que soit la porosité. On constate que plus la fréquence augmente plus l'écart type est important. On remarque qu'au-delà de 10 MHz l'évolution de l'atténuation est plutôt divergente. Ce phénomène est d'autant plus visible que l'échantillon présente une certaine inhomogénéité de porosité visible sur les images de tomographie et confirmées par 6 mesures différentes d'atténuation sur chaque échantillon.

En comparant les résultats des échantillons 1 et 2, on peut estimer que l'atténuation est indépendante de leur épaisseur. Pour cela, on s'intéresse à l'atténuation moyenne dans le domaine 5-9 MHz. On représente sur la Figure 5 - 12 les variations de l'atténuation en fonction de la porosité pour chaque plaque. Les droites sont la régression linéaire issue de la moyenne des atténuations calculées pour des porosités identiques.

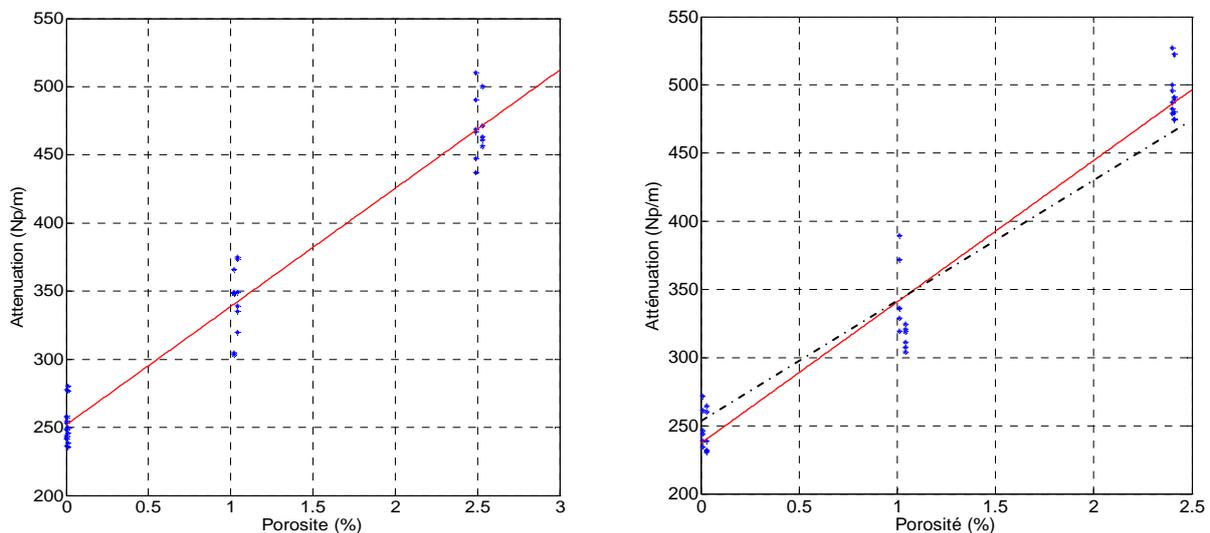


Figure 5 - 12 : Atténuation moyenne entre 5 et 9 MHz (à gauche) Plaque de 6 plis (à droite) Plaque de 10 plis. En pointillé le report de la figure de gauche sur la figure de droite

Les points en bleu sont les valeurs moyennes de l'atténuation sur la gamme 5-9 MHz pour toutes les mesures effectuées sur les échantillons de chaque plaque. La droite rouge est la régression linéaire. Les deux régressions sont très proches.

Si on s'intéresse aux courbes moyennes par lot ayant le même taux de porosité on approxime :

- Pour des taux de 0 % la progression de l'atténuation entre 3 et 10 MHz varie de 100 à 400 Np/m.
- Pour des taux de 1 % la progression de l'atténuation entre 3 et 10 MHz varie de 150 à environ 500 Np/m.

- Pour des taux de 2.4 et 2.5 % la progression de l'atténuation entre 3 et 10 MHz varie de 300 à environ 650 Np/m.

L'évolution moyenne de l'atténuation est tracée dans la Figure 5 - 13 en fonction de la fréquence, par lot de même porosité pour l'ensemble des échantillons. On obtient 3 courbes, une pour chaque taux de porosité : 0% (bleue), 1% (rouge) et 2.5% (verte).

On constate que les trois courbes de la Figure 5 - 13 présentent des pentes assez semblables surtout dans le domaine de fréquence entre 4 et 8 MHz

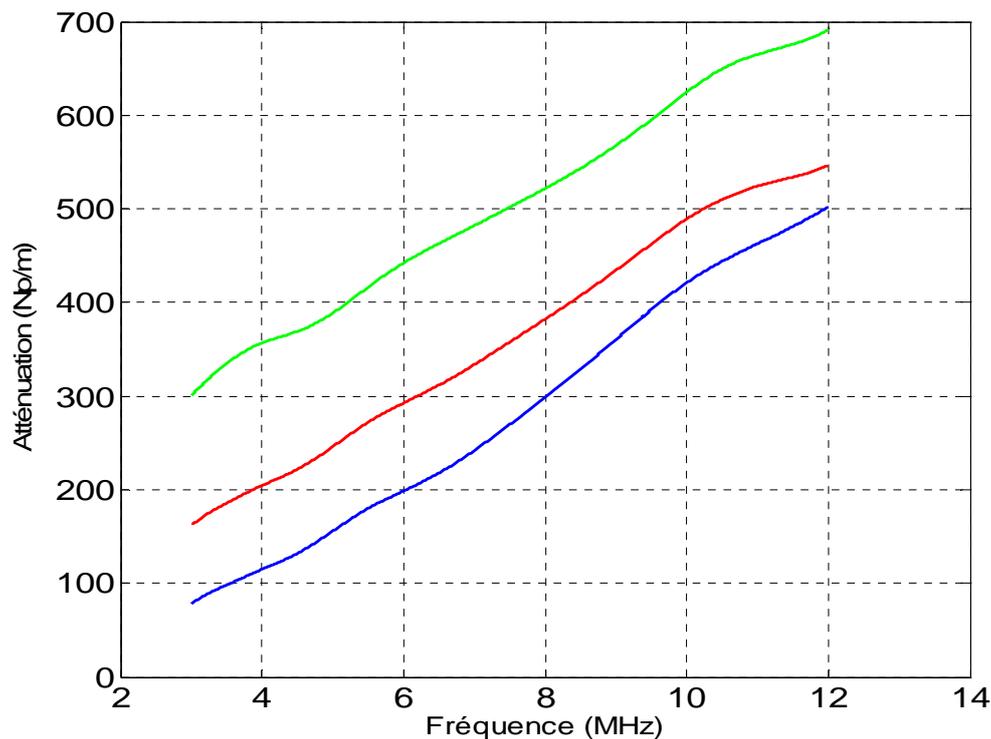


Figure 5 - 13 : Atténuation moyenne des plaques de 0 % (bleu) 1 % (rouge) et 2.5 % (vert)

On peut comparer les résultats obtenus pour différentes porosités à une même fréquence. Ainsi à la fréquence optimale de 8 MHz, on reporte (Figure 5 - 14) les points obtenus pour les porosités 0%, 1% et 2.5% avec les écart-types respectifs 20, 28 et 27 Np/m. On en déduit la relation linéaire suivante entre le taux de porosité et l'atténuation à 8 MHz.

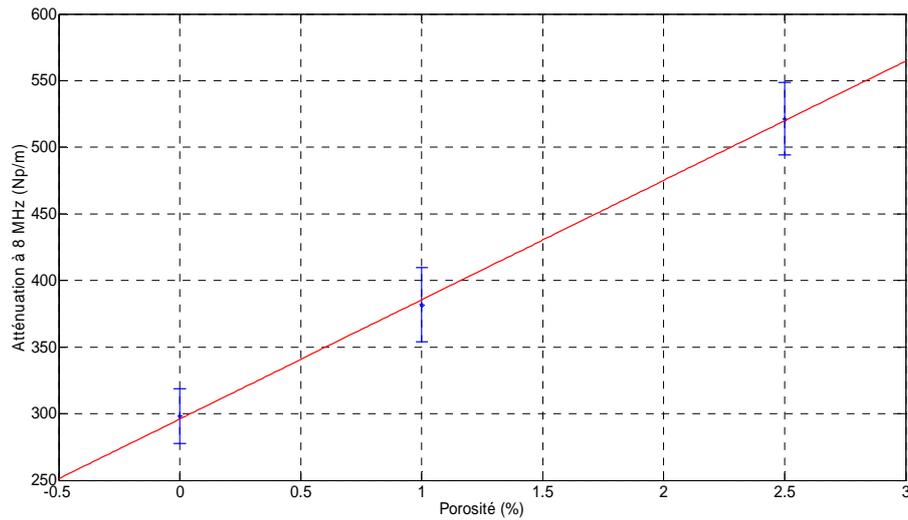


Figure 5 - 14 : Relation entre porosité et atténuation à 8 MHz – Les écarts types sont respectivement de 20, 28 et 27 Np/m

Ainsi à la fréquence optimale de 8 MHz, on en déduit la relation linéaire suivante entre le taux de porosité et l'atténuation.

$$\alpha = 89.56p + 296 \quad (5.1)$$

Les constatations précédentes nous amènent à estimer une relation de forme linéaire reliant la porosité à l'atténuation en fonction de la fréquence, du type :

$$\alpha = af + bp + c \quad (5.2)$$

Dans laquelle, α est l'atténuation en Np/m, f la fréquence en MHz, p le taux de porosité en % et **a**, **b**, **c** sont des constantes caractérisant les propriétés intrinsèques des matériaux et leur porosité.

Sur le domaine 4 – 8 MHz une régression linéaire des courbes de la Figure 5 - 13 permet d'établir les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} \alpha &= 43f + 179 \quad \text{pour } 2.5\% \\ \alpha &= 43f + 30 \quad \text{pour } 1\% \\ \alpha &= 43f - 51 \quad \text{pour } 0\% \end{aligned} \quad (5.3)$$

Dans les trois cas on obtient à peu près le même coefficient **a**. Le décalage de ces droites vient de la variation du taux de porosité. Sur le domaine 4 – 8 MHz on obtient à partir de ces expressions:

$$\alpha = 43f + 93p - 55 \quad (5.4)$$

Cette étude permet d'établir avec satisfaction une relation commune entre la porosité moyenne et l'atténuation ultrasonore moyenne pour des plaques de même structure ayant un nombre de plis différents. Pour chaque échantillon les mesures ont été effectuées à l'aide d'un transducteur plan sur des surfaces d'environ 125 mm² et les taux de porosité ont été considérés sur des volumes d'environ 1260 mm³ et 2700 mm³. La relation obtenue (5.4) est une relation approximative. Une étude plus approfondie et plus précise nécessite une connaissance plus ponctuelle tant de la porosité que de l'atténuation. Ce travail est présenté au paragraphe suivant.

5.3 Analyse des données de la tomographie X de la plaque RTM1012

Pour faire un lien direct avec les résultats du chapitre 4, l'échantillon choisi pour le développement de cette partie de la thèse est le RTM1012. Une tomographie complète de cette plaque a été effectuée par Lionel Gay au centre de recherches de Safran Composites à Itteville (Essonne) qui concentre toutes les expertises du groupe sur les matériaux composites et notamment celles dédiées aux procédés de contrôle non destructifs innovants comme la tomographie par rayons X. Avec ce centre de R&D, Safran vise à faire des composites l'un des matériaux les plus compétitifs de l'aéronautique.

La micro-tomographie à rayons X a permis de reconstituer numériquement, en 3 dimensions, l'organisation interne d'une partie de la plaque composite RTM1012. L'échantillon a été analysé de manière non destructive à une échelle micrométrique sur une surface de 54.8x62.9 mm² pour une épaisseur de 3.09 mm. Les radiographies de l'échantillon ont été enregistrées sur une révolution complète par pas de 1°. Une compilation des données numériques permet de reconstituer l'échantillon suivant un contraste densitométrique. L'échantillon peut ainsi être analysé par transparence à travers 1612 coupes virtuelles (nombre de point en Y) et chaque vue est constituée de 1850 points en X et 91 points en Z avec un pas d'environ 34 µm. Il est ainsi possible d'effectuer des mesures dimensionnelles

dans les 3 dimensions de l'espace, surfaciques ou volumiques. C'est-à-dire d'attribuer, à chaque point de l'espace X, Y, Z un niveau de gris dont la valeur est comprise entre 0 (noir) et 2^{16} (blanc) pour une numérisation effectuée à 16 bits.

Dans le cas d'une plaque composite RTM et compte tenu de la nature des fibres et de la résine, le contraste est moyen et un grand nombre de niveaux de gris sont présents sur les images. En outre, les plaques que nous étudions ont une porosité faible et les taches associées aux pores sont peu nombreuses. La porosité acoustiquement mesurée est principalement celle de macroporosités inter torons qui est bien plus importantes en volume que celle des microvides intra torons. La résolution des images tomographiques est tellement précise que les résultats fournis restituent une image de l'échantillon prenant en compte les contributions tant des macroporosités que de la trame fibreuse. Une bonne comparaison des résultats nécessite donc un seuillage de l'image tomographique. Étant donné que la méthode acoustique développée ne détecte que la porosité macroscopique, il faut éliminer les niveaux de gris trop faibles caractéristiques du renfort fibreux et des microporosités.

5.3.1 Détermination du seuillage de l'image tomographique

En traitement d'image, de nombreuses méthodes sont utilisées pour effectuer un seuillage automatique à partir des histogrammes de l'image pour réduire une image à plusieurs niveaux de gris en une image binaire. Des méthodes pour faire du seuillage d'image à plusieurs niveaux de gris ont été mises au point mais les résultats obtenus ne convergent pas toujours vers une solution unique.

La méthode retenue pour seuiller nos images est la méthode Otsu [50]. Les images ont tout d'abord été converties de 16 bits à 8 bits. On obtient alors des images de coupes, telles que celle présentée dans la Figure 5 - 15, dont les niveaux de gris vont de 0 à 255. Les pores occupent les niveaux de gris les plus proches du noir (vers 0) et le matériau fibreux les niveaux de gris plus blanc (vers 255).

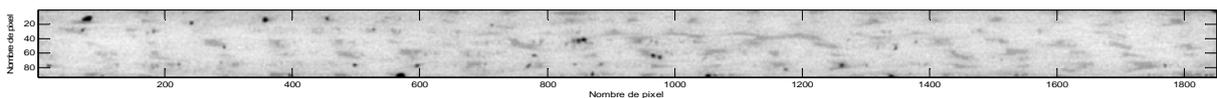


Figure 5 - 15 : Plan de coupe 68 (X,Z) suivant l'axe des Y

Les 1612 coupes suivant l'axe des Y sont traitées par l'algorithme d'Otsu dont l'objectif global est de minimiser la variance entre les deux classes (clair et foncé) différenciée par un seuil et de fournir le niveau de gris les séparant (entre 0 et 255).

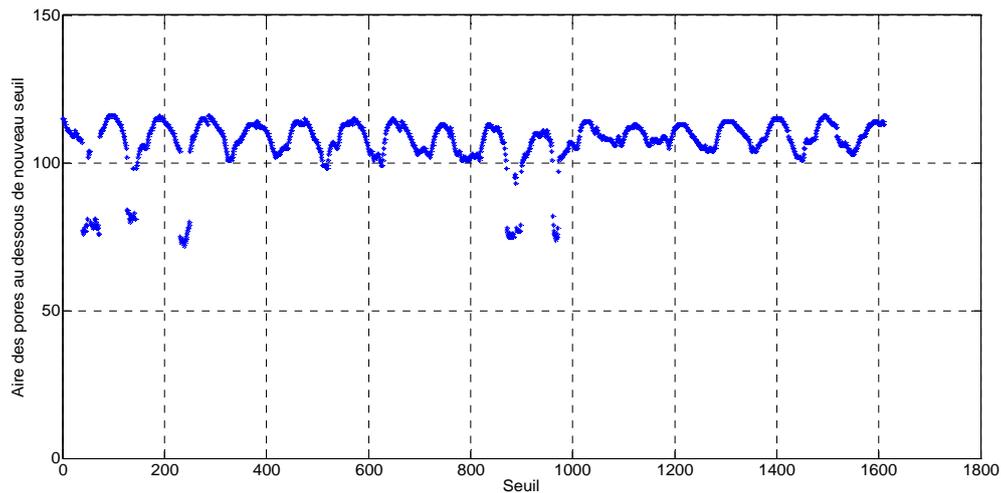


Figure 5 - 16 : Seuil calculé par la méthode Otsu pour les 1612 coupes

On voit sur la Figure 5 - 16 que le seuil d'Otsu présente une certaine périodicité. Celle-ci est certainement liée à la périodicité des pores le long de l'axe des coupes. On constate que la valeur moyenne du seuillage calculé est d'environ 110 à part quelques rares valeurs qui ont un seuil vers 80. L'observation des histogrammes des coupes, comme celui montré dans la Figure 5 - 17 indique pourtant que le niveau moyen de 110 est à l'intérieur du pic correspondant aux niveaux de gris liés au matériau.

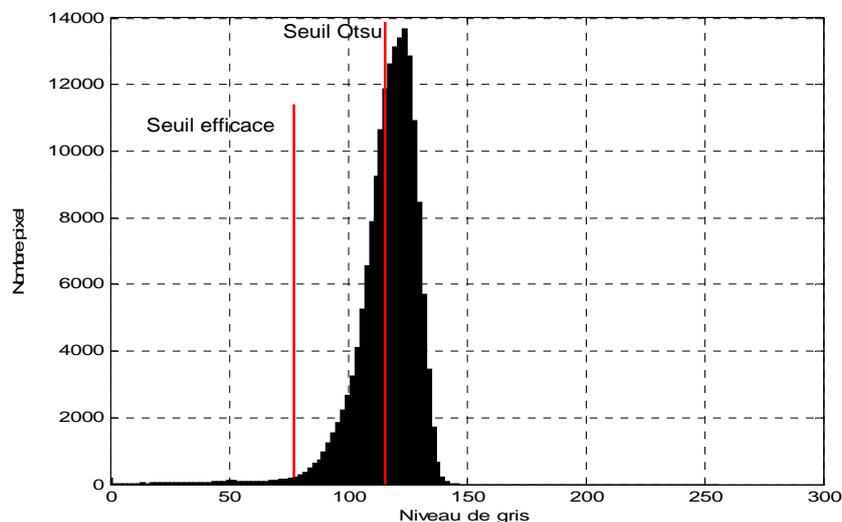


Figure 5 - 17 : Histogramme de niveau gris de la coupe 1000

Une analyse visuelle de cet histogramme permet de distinguer autour du niveau de gris 50 une légère dissymétrie liée aux pixels un peu plus foncés de la matrice : le pic le plus important étant lié au substrat carbone/époxy dont les couleurs représentatives sont un peu plus claires sur les images. Le seuil d'Otsu de 110 est donc trop élevé.

Pour tous les seuils possibles depuis le seuil d'Otsu de 110 jusqu'à une valeur de seuil de 35 un calcul de l'aire des pores a été effectué pour chaque coupe. L'évolution du nombre de pixel en dessous de la valeur de seuillage en fonction du seuil, a été tracée comme montré sur la Figure 5 - 18.

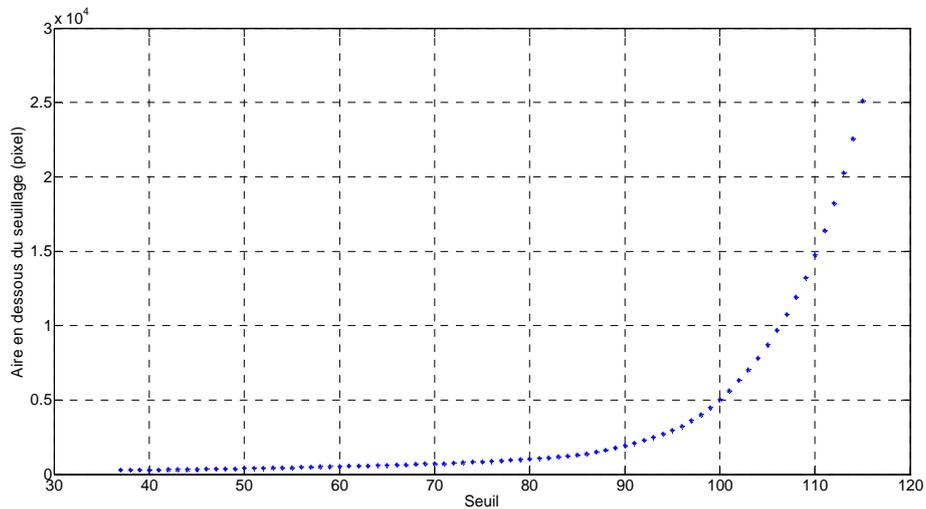


Figure 5 - 18 : Nombre de pixels dont le niveau de gris est inférieur au seuil en fonction du seuil (coupe 68)

De façon cohérente les surfaces obtenues sont très proches pour des coupes voisines. En partant de la valeur correspondant au seuil d'Otsu (la plus à droite), on voit le nombre de pixels, dont le niveau de gris est inférieur au seuil, diminuer rapidement puis, vers 100, une inflexion est observée. Enfin, une nouvelle partie quasiment linéaire apparaît pour des valeurs de seuil inférieures à 80. Pour déterminer le seuil, la même courbe est représentée en échelle semi logarithmique. Cette représentation de la coupe 68 est présentée sur la Figure 5 - 19.

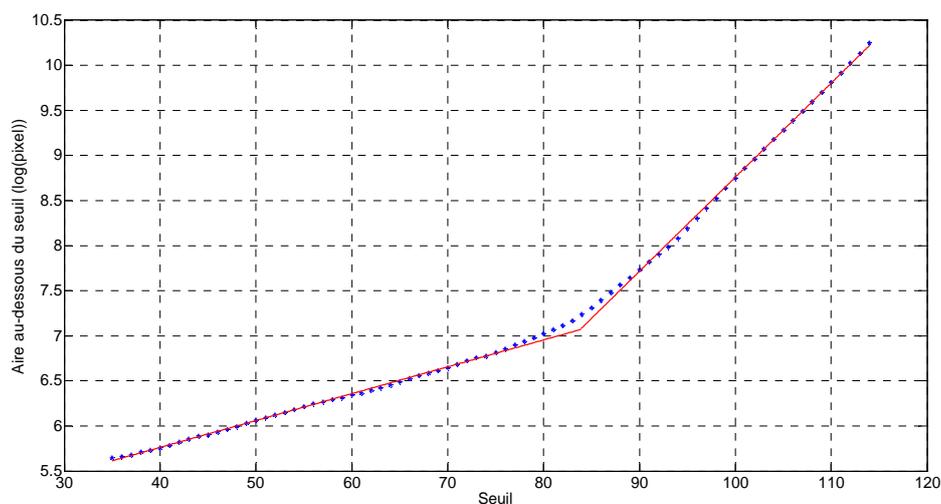


Figure 5 - 19 : Logarithme du nombre de pixels dont le niveau de gris est inférieur au seuil en fonction de seuil (coupe 68) – Seuil efficace identifié à 83

Une brisure de la courbe en deux segments de droite peut alors être facilement mise en évidence définissant un seuil efficace à leur intersection. On trouve dans le cas de la coupe 68 un seuil de 83.

Ce nouveau seuil est plus conforme à l'observation de l'histogramme. Son efficacité dépend de la distribution des niveaux de gris dans les images. Le seuil d'Otsu minimise la variance de deux classes d'objets dans une image. Dans notre cas, il existe au moins trois classes d'objets visibles à l'image : pores, poche de résine et les mèches de fibres. Donc, dans la plupart des cas, le calcul d'Otsu à 2 classes ne peut pas donner un résultat correct sauf si l'une des 3 classes n'est pas suffisamment présente à l'image.

Le travail présenté pour la coupe 68 a été effectué sur l'ensemble des coupes. Un ensemble de seuils différents mais du même ordre de grandeur suivant les coupes est calculé. La Figure 5 - 20 présente l'ensemble des seuils de l'échantillon RTM1012.

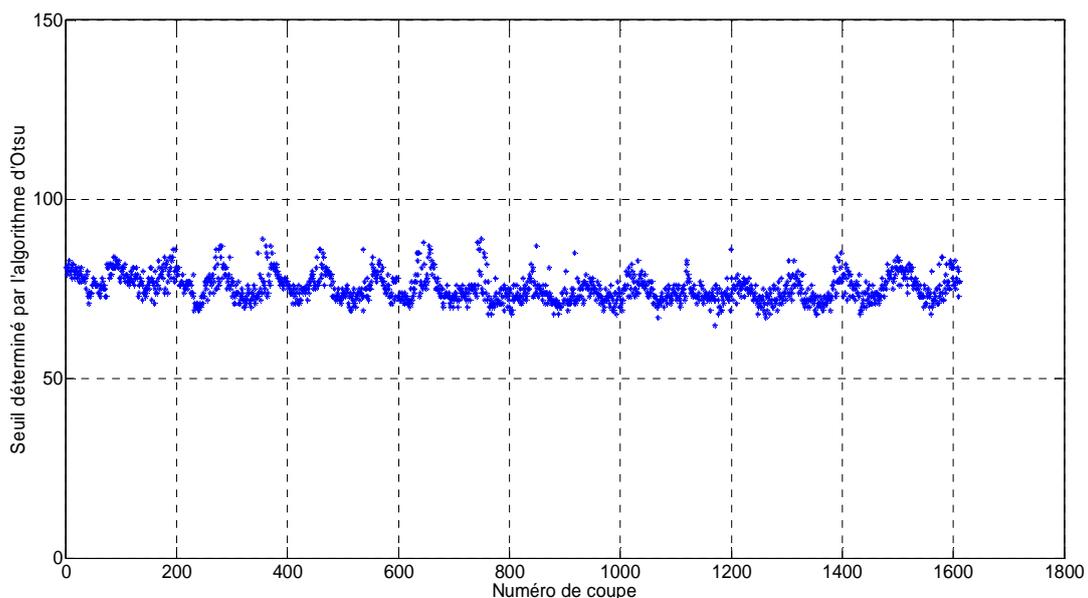


Figure 5 - 20 : Les seuils calculés pour le traitement de la tomographie de l'échantillon RTM1012

La valeur moyenne de l'ensemble des seuils est environ 76. Pour chaque coupe le seuil se situe à environ 50 % de la valeur du niveau de gris maximal observé (on dit toutefois qu'on a « seuillé à 50% »). Le procédé de définition du seuil choisi est empirique et se base sur les informations de l'image. Cette utilisation est pertinente dans le cas où l'on cherche à segmenter des objets dont on connaît l'intensité ce qui est le cas pour des images tomodynamométriques.

Une image de la cartographie de la porosité dans notre échantillon pourrait ainsi être obtenue par un empilement des 91 images 2D dans le plan (X, Y) mais les contributions provenant des fibres affleurant par endroits les surfaces libres de l'échantillon doivent être supprimées. Cette sorte de rugosité de surface ne permet pas une binarisation correcte de la cartographie car ils augmentent fictivement la porosité de surface. Une analyse de l'évolution du taux de porosité sur l'échantillon entier en fonction du nombre d'image supprimée a été effectuée et présentée à la Figure 5 - 21.

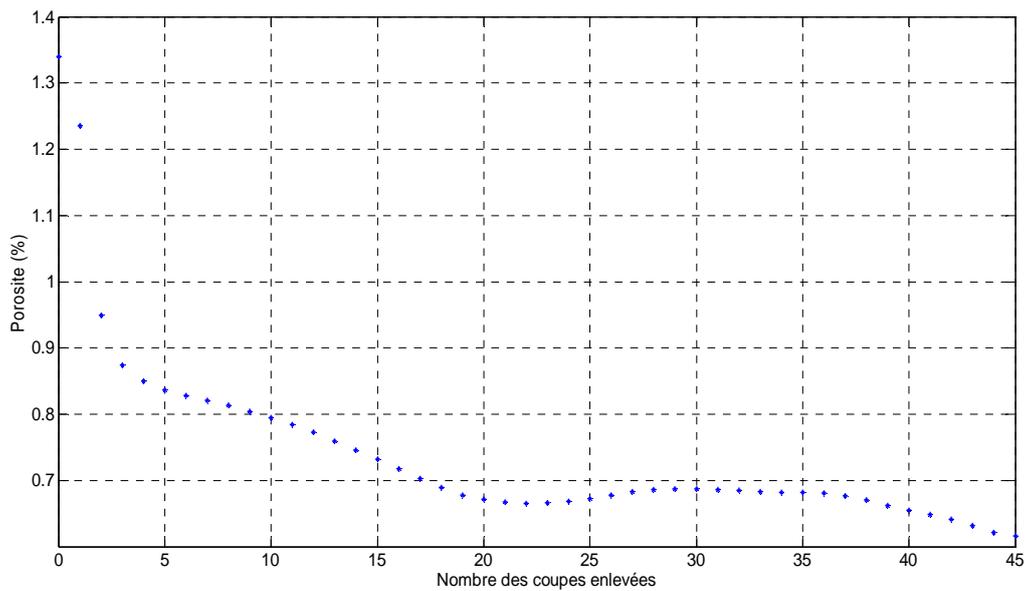


Figure 5 - 21 : Taux de porosité en fonction du nombre de coupes de surface enlevées

On constate qu'après une forte variation la porosité devient lentement décroissante. Sur la base de ces résultats les 5 premières images ont été supprimées de chaque côté de l'échantillon. Avec cette suppression l'influence des fibres superficielles est éliminée sans que celles des pores ouverts présents à la surfaces soit totalement supprimée.

Une tomographie 4D seuillée de l'échantillon, constituée d'un empilement de 81 images seuillées à 50 %, et une cartographie 3D, obtenue par projection suivant l'axe z de cette tomographie, sont présentées Figure 5 - 22 et Figure 5 - 23. Ces représentations vont servir de référence pour les comparaisons à venir avec les mesures ultrasonores.

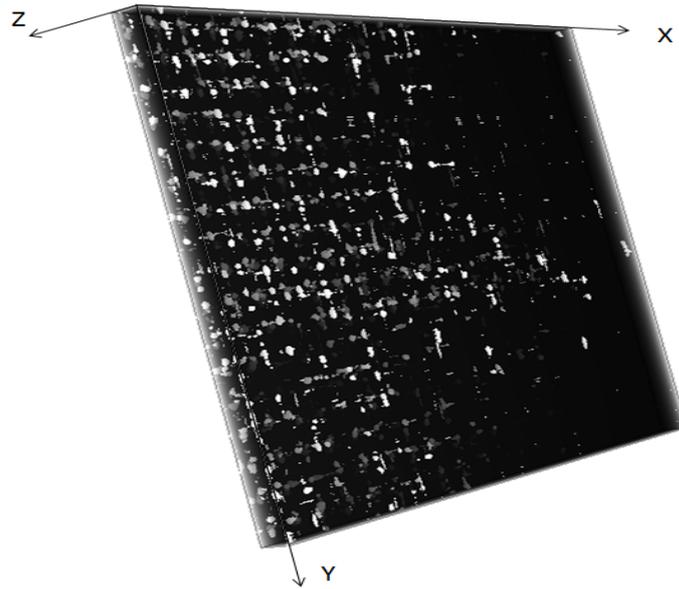


Figure 5 - 22 : Tomographie seuillée de la plaque RTM1012

L'image tridimensionnelle est constituée de 1850x1612x81 voxels de 34 μm /pixel.

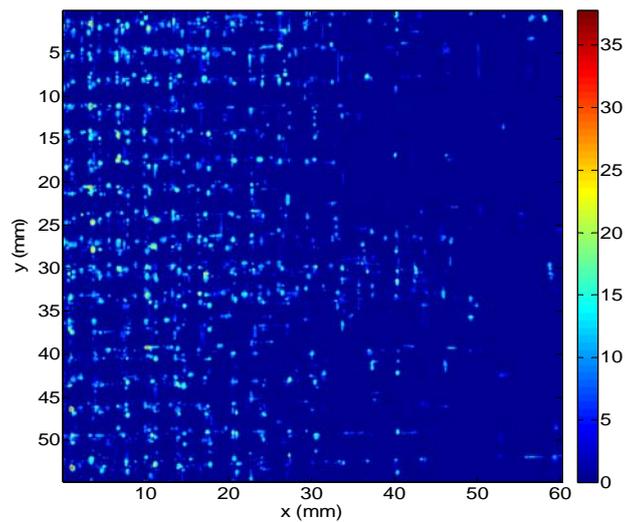


Figure 5 - 23 : Radio tomographique de la plaque RTM1012 - L'échelle donne le taux de porosité par volume élémentaire de $3170 \times (34)^2 \mu\text{m}^3$

5.3.2 Analyses des bulles de l'image tridimensionnelle RTM1012

Il s'agit, par des analyses quantitatives des données issus de la tomographie X, d'extraire le maximum d'information afin d'avoir une connaissance la plus précise possible de l'échantillon RTM1012.

5.3.2.1 Etude du taux des pores

Les volumes de pores sont calculés à partir de toutes les coupes binaires seuillées comme précédemment présenté. Il est possible d'extraire les coupes suivant les différents axes et de calculer la fraction surfacique de pores par coupes. Les résultats sont représentés Figure 5 - 24. Les distances sur chaque axe sont en mm. On note que l'injection se fait selon l'axe X, ici, de droite à gauche.

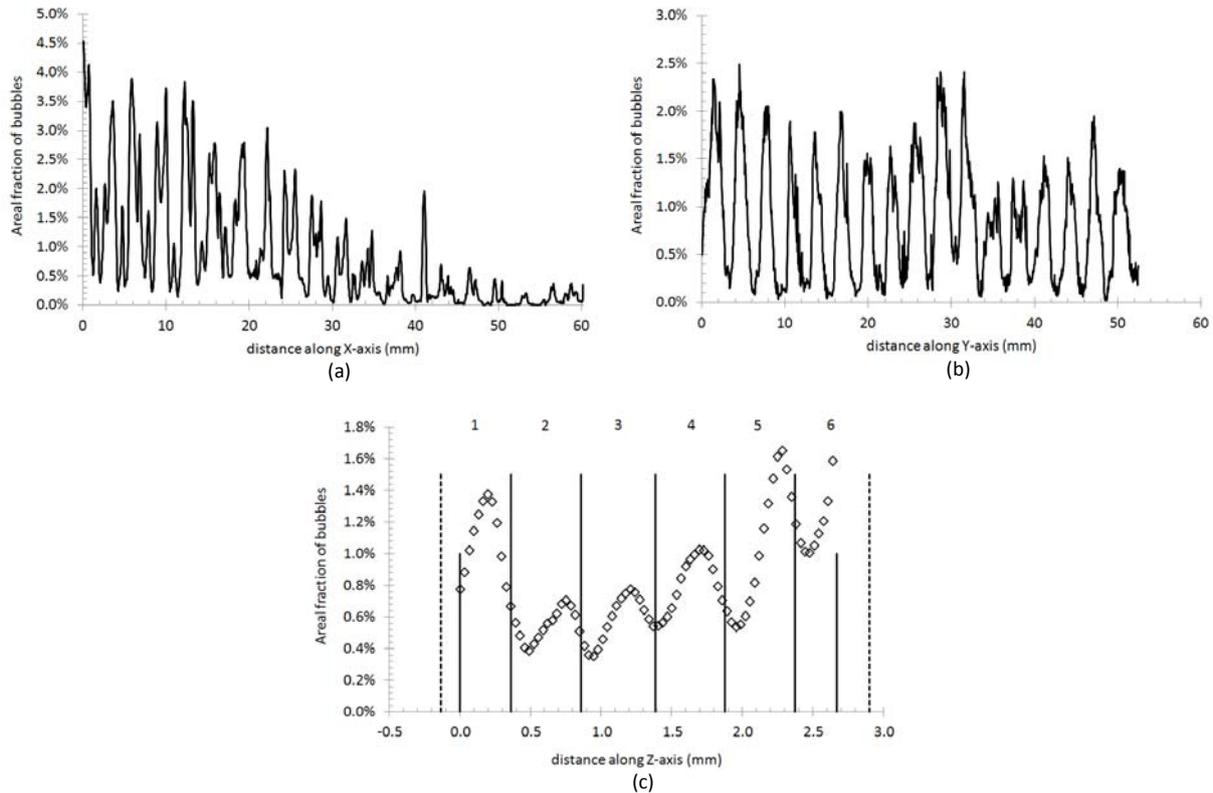


Figure 5 - 24 : Quantification de la fraction surfacique de pores le long des 3 axes (a) l'axe X, (b) l'axe Y et (c) l'axe Z

L'analyse de ces profils permet plusieurs constats.

➤ Hétérogénéité du taux de pores

Le taux de pores tend vers zéro pour les valeurs élevées de X (Figure 5 - 24(a)). Les pores sont plutôt localisés du côté de l'échantillon vers lequel se trouve l'évent de sortie par où s'évacue la résine ($x=0$). Le taux de pores est plus périodique le long de l'axe Y. Suivant l'axe Z le taux de pore est plus faible au cœur de l'échantillon que sur les bords. Cela tend à montrer que les pores se situent davantage dans les plis du bord que dans les plis au centre de l'échantillon. Il peut y avoir une explication physique à ce constat : les pores au centre sont

plus facilement mobiles car ils ont plus d'espaces macropores par lesquels elles peuvent s'échapper et peuvent avoir tendance à se retrouver dans des « impasses » vers les bords.

➤ L'oscillation du taux de pores suivant l'axe d'empilement des plis

Suivant Z il y a des oscillations du taux de pores autour de la valeur moyenne de fraction volumique de l'échantillon de pores, soit 0.837 %. On observe 5 ou 6 larges périodes de variation. Sur la Figure 5 - 24(c), sont indiqués les emplacements des 6 plis, délimités par des traits pleins. Des traits pleins plus courts indiquent les limites de la tomographie seuillée de l'échantillon tandis que les traits en pointillés indiquent la position des deux surfaces réelles de l'échantillon. Les emplacements des plis sont estimés en divisant l'échantillon en six zones égales. En comparant les emplacements des plis suivant Z aux oscillations du taux de pores, on conclut que les maximums locaux du taux de pores se trouvent plutôt au sein des plis tandis que les minimums sont à l'interface des plis. La différence entre minimum et maximum local est de 1 à 2 environ, c'est-à-dire qu'il y a deux fois plus de pores au sein des plis qu'à leur périphérie.

➤ Corrélation entre taux de pores et positionnement des plis dans le plan X, Y

Il est possible de corrélérer le taux surfacique de pores et le positionnement des mèches suivant X et Y. Une méthode est développée pour repérer le positionnement des mèches dans chaque pli. Les images en 8 niveaux de gris sont sélectionnées une à une suivant Z à l'intérieur d'un pli. Pour chacune d'elle une moyenne de la valeur des pixels est effectuée par ligne et par colonne. Un pixel étant plutôt foncé pour les macros pores et plutôt clair pour l'intérieur des mèches. La Figure 5 - 25 (a) montre un exemple d'image : on constate que les pores se trouvent plutôt dans les macros pores et que certaines des mèches dont l'axe est porté par Y sont légèrement ouvertes. Cet effet de déformation est généralement dû à la pression exercée par le fluide lors de l'injection et entraîne la possible présence de pores elliptiques à l'intérieur de ces mèches.

La Figure 5 - 25(b) présente l'évolution des valeurs de niveaux de gris le long d'une colonne suivant Y. Une analyse fine permet de constater que sur la Figure 5 - 25(b) la majorité des espaces inter mèches correspondent aux creux de l'histogramme (la correspondance est soulignée par les lignes verticales en pointillés). Pour avoir des valeurs plus fiables, on effectue la moyenne sur toutes les colonnes. Un exemple de courbe moyennée sur les

colonnes de l'image de la Figure 5 - 25(a) est donné sur le graphe de la Figure 5 - 25(c). On y distingue clairement, selon Y, toutes les mèches et les espaces qui les séparent.

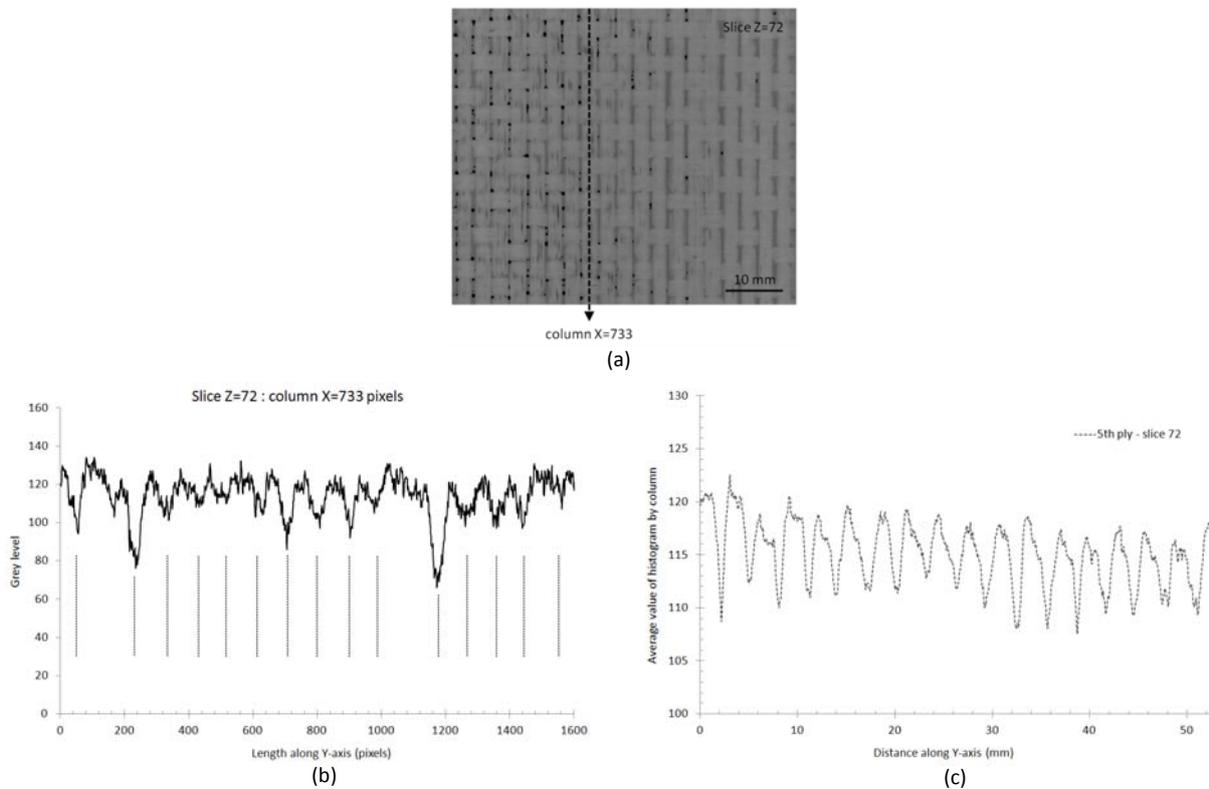


Figure 5 - 25 : a) Exemple d'image (coupe pour Z= 72) à l'intérieur d'un pli, (b) Évolution de la valeur du niveau de gris par pixel selon Y sur une colonne (colonne X=733ème pixel), et (c) Évolution du niveau de gris de la moyenne calculée sur toutes les colonnes à X=cte

5.3.2.2 Etude du volume et du nombre de pores

Il est possible d'extraire les coupes suivant les différents axes et de calculer la fraction surfacique de pores par coupes. Les pores sont extraits par binarisation comme détaillé précédemment. Chaque pore possède alors un volume limité qui peut, comme la position de son centre, être récupéré à partir de l'image tomographique 3D. Le nombre de pores répertorié dans l'échantillon RTM1012 est de 4077 pores.

Le volume ainsi que la position du centre de gravité de chacune des pores a été récupéré. La Figure 5 - 26 montre la distribution du nombre des pores en fonction de leur volume. La distribution est interpolée par une loi exponentielle. Le pore le plus important possède un volume de 0.263 mm^3 .

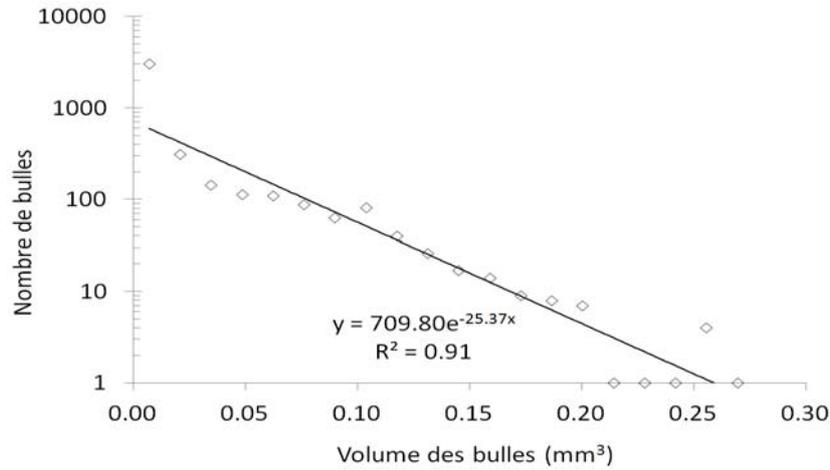


Figure 5 - 26 : Distribution des pores (échelle log) en fonction de leur volume (échelle linéaire)

Il est intéressant d'examiner plus avant si les bulles sont dans des positions privilégiées de l'échantillon localement ou globalement. La Figure 5 - 27 présente la projection des bulles sur les différents plans principaux en fonction de leur taille. Comme constaté auparavant, les bulles sont à des emplacements périodiques et plutôt en haut et en bas suivant Z et plus nombreuses d'un côté de l'échantillon. On constate aussi sur la Figure 5 - 27 que le volume d'une bulle dans l'échantillon n'est pas liée à sa position dans l'échantillon.

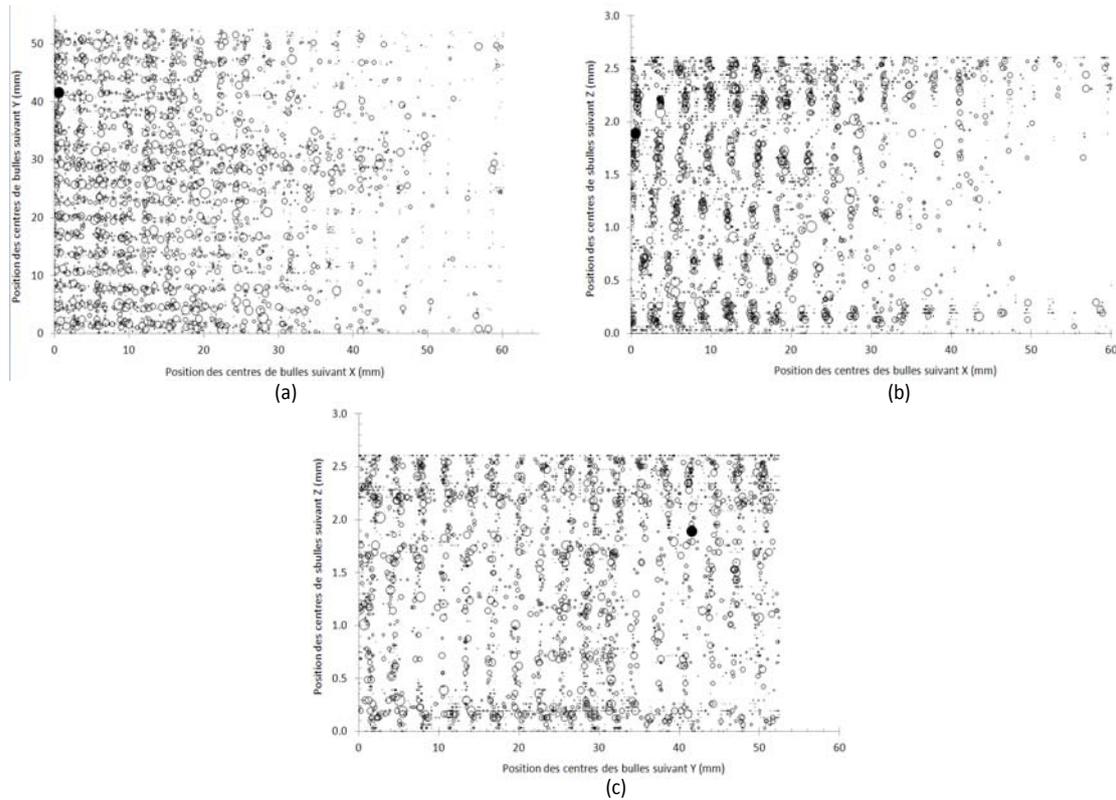


Figure 5 - 27 : Volume des pores en fonction de leur répartition spatiale. L'aire du disque correspond au volume du pore. Le disque plein correspond au plus gros pore de l'échantillon

5.3.2.3 Étude de la forme des pores

A partir des dimensions des pores, il est possible d'estimer la forme des pores présents dans l'échantillon. La Figure 5 - 28 présente le volume des pores en fonction de leur longueur (extension suivant l'axe X), leur largeur (extension suivant Y) et leur hauteur (extension suivant Z). Les trois graphes montrent que la largeur Y est identique voire très légèrement plus grande que la longueur X (Figure 5 - 28(a)) tandis que la hauteur Z est bien moins importante (décalage par rapport à la droite d'équation $X=Z$ ou $Y=Z$ sur les graphes des Figure 5 - 28(b) et Figure 5 - 28(c)). Les pores ont donc, pour un faible part, une forme sphérique et, pour la grande majorité, une forme d'ellipse étirée suivant X ou Y et aplaties suivant Z.

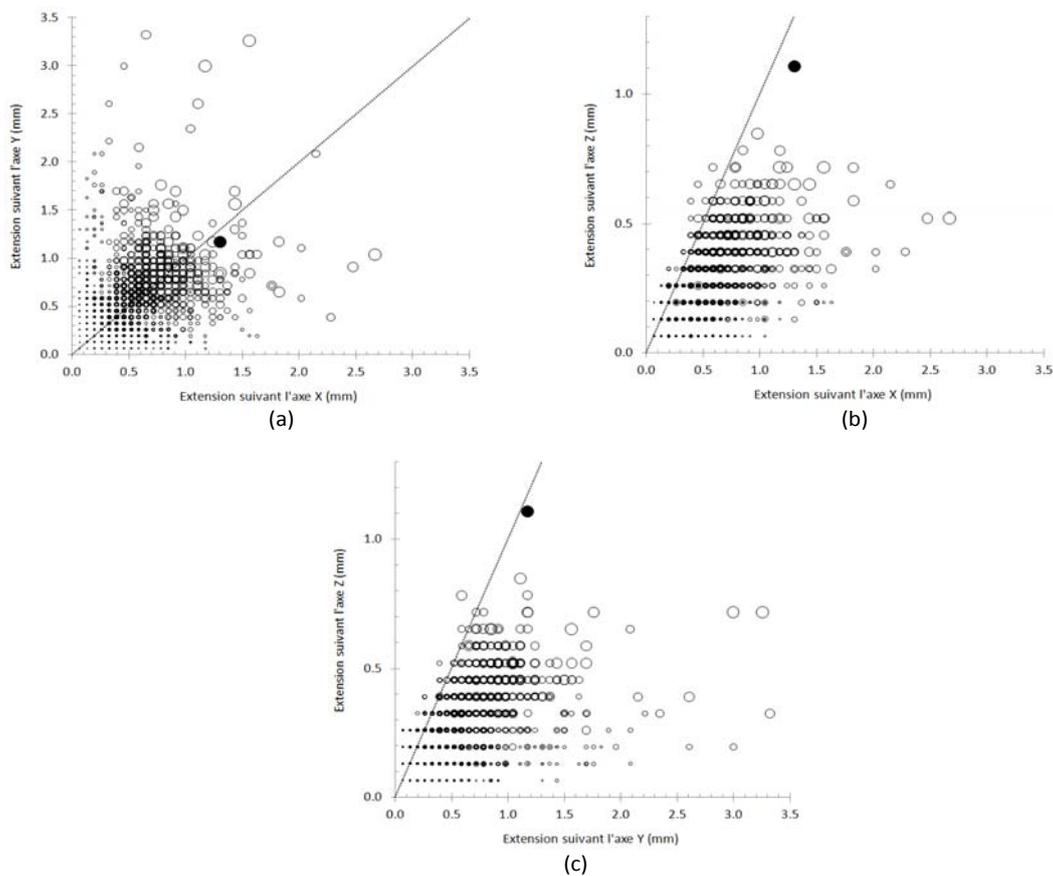


Figure 5 - 28 : Volume des pores en fonction de leur extension suivant les différents axes. L'aire du disque correspond au volume du pore. Le disque plein correspond au plus gros pore de l'échantillon

5.3.3 Conclusion

Une étude a permis la détermination du seuillage des données tomographiques. Il a été montré que ce seuil correspond à environ 50 % de la valeur du niveau de gris maximal observé sur les différentes coupes. Ceci permet d'obtenir une représentation volumique 4D et

une radio tomographique 2D de la plaque RTM1012. Ces résultats serviront de référence dans la suite de ce travail

L'analyse des pores de l'image tridimensionnelle RTM1012 obtenue et de leur distribution permet plusieurs déductions. Les pores plutôt sphériques sont très majoritairement situés dans les macropores, c'est-à-dire entre les mèches d'un même pli. Le fait que les plis sont très proches les uns des autres ne laissent que très peu d'espaces pour la formation de pores entre les plis. Le positionnement des macros pores entre les mèches limite la circulation des pores dans le plan (X, Y) mais pas suivant l'axe des Z. Il y a de ce fait deux fois plus de pores dans les plis supérieurs (5 et 6) et inférieurs (1) que dans les trois plis au centre de l'échantillon. Les pores sont également moins nombreux et semblent plus petits dans une moitié de l'échantillon. On constate aussi que les pores très elliptiques et plus petits peuvent se retrouver bloqués dans les macros pores situés dans les mèches perpendiculaires à l'écoulement. On retrouve également des mèches transverses déformées comme l'illustre la Figure 5 - 29.

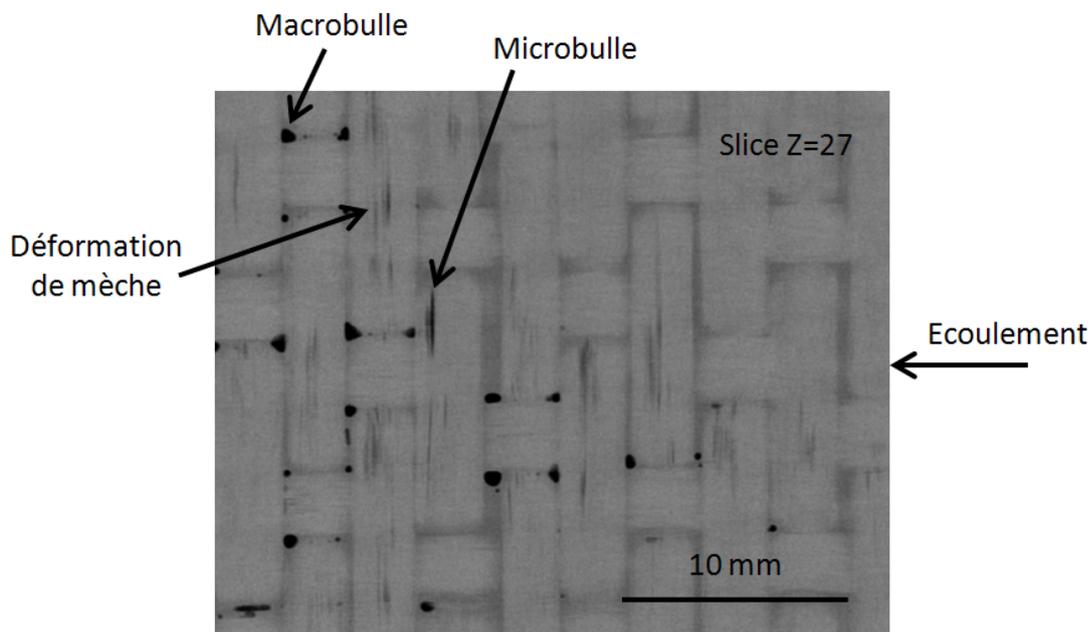


Figure 5 - 29 : Exemples de pores et de déformations dans les mèches perpendiculaires à la direction de l'écoulement

5.4 Relation entre porosité et atténuation ultrasonore mesurée à l'aide d'un transducteur focalisant sur l'échantillon RTM1012

5.4.1 Objectifs

Le but est d'établir une corrélation entre le taux de porosité et l'atténuation ultrasonore mesurée. Une recherche bibliographique sur le thème de la porosité des matériaux composites permet de constater que des travaux de ce type ont déjà été menés sur ce sujet [51 - 55]. Dans la plupart des cas il s'agit de travaux menés à l'aide de transducteurs mono élément plan à immersion ou de contact. Comme ceux présentés dans cette thèse en début de chapitre, les résultats sont intéressants mais la surface d'analyse est toujours liée à la taille de la pastille piézo-électrique du transducteur. Les résultats sont donc des valeurs moyennes de l'atténuation obtenus pour des surfaces de plusieurs centaines de mm². Il n'y a pas une bonne exploitation de la puissance d'analyse que permet la micro tomographie. L'utilisation d'un transducteur focalisant (10MHz, focale 2'', diamètre 0.5 '') a permis au chapitre 4 d'élaborer des cartographies de l'atténuation avec une densité de point de mesure considérable. Toutefois il ne s'agit pas de faire une comparaison point par point car le pas de mesure de la tomographie à rayons X, qui est d'environ 34 μm, reste nettement inférieur à celui des mesures acoustiques, qui a été choisi à environ 0.34 mm (10 fois plus grand).

L'échantillon étudié dans cette partie de la thèse est le RTM1012 dont la connaissance tomographique vient d'être grandement détaillée et dont les cartographies acoustiques ont été présentées au chapitre 4. Le but est d'établir une corrélation entre le taux de porosité et l'atténuation ultrasonore mesurée tant en fonction de la fréquence qu'en fonction de l'amplitude.

L'atténuation de l'onde réfléchi est relevée sur des surfaces d'au moins 1.5 mm² (tache focale du transducteur) tous les 340 μm. Chaque relevé acoustique est donc à mettre en regard d'au moins 100 points de relevé tomographique. Lors du déplacement du capteur entre deux points de mesure acoustique il faut considérer qu'il y a environ la moitié de la surface analysée qui change, soit environ 50 données tomographiques. Avec ce taux de recouvrement la correspondance d'une seule mesure acoustique avec les relevés tomographiques est illusoire. Il s'agit donc de déterminer la surface de référence à partir de laquelle une correspondance entre les mesures de l'atténuation et le taux de porosité devient fiable.

La valeur moyenne de l'atténuation est déterminée sur des surfaces carrées dont la valeur de chaque côté vaut 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 ou 45 fois 340 μm . Ces carrés d'analyse ont donc des côtés dont la longueur varie de 2.72 mm à 15.3 mm (Tableau 5 - 2).

Coefficient de multiplicatif	Coté du carré (mm)	Surface du carré (mm^2)	Nombre de carrés
6	2.04	4.16	754
8	2.72	7.4	440
10	3.4	11.56	272
15	5.1	26.01	110
20	6.8	46.24	64
25	8.5	72.25	42
30	10.2	104.04	25
35	11.9	141.61	20
40	13.6	184.96	16
45	15.3	234.09	9

Tableau 5 - 2 : Tableau récapitulatif des carrés d'analyse utilisés

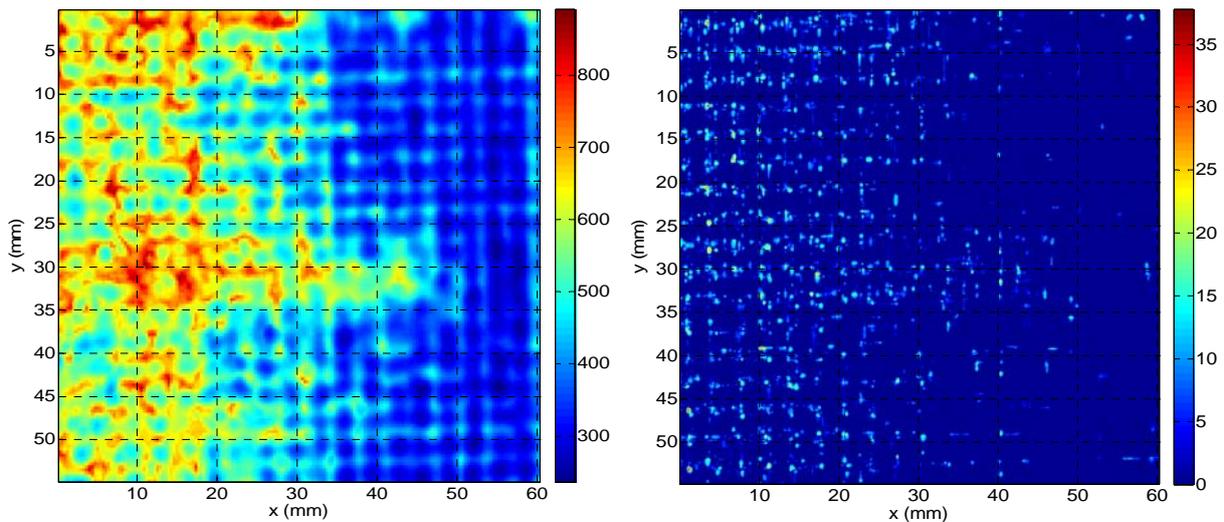
En déplaçant ces carrés d'analyse sur l'ensemble des surfaces des cartographies acoustique et tomographique de l'échantillon RTM1012, on obtient différents couples de valeurs moyennes du taux de porosité et de l'atténuation. On peut prévoir avant tout plusieurs points :

- La surface est analysée avec d'autant plus de points que la taille du carré d'analyse est petit.

- Plus la taille du carré d'analyse est petite plus le taux de porosité moyen donné par la tomographie a la possibilité d'être élevé. Le taux moyen de porosité reste globalement constant mais devient localement plus variable.

5.4.2 Relation entre porosité et atténuation en fonction de la fréquence

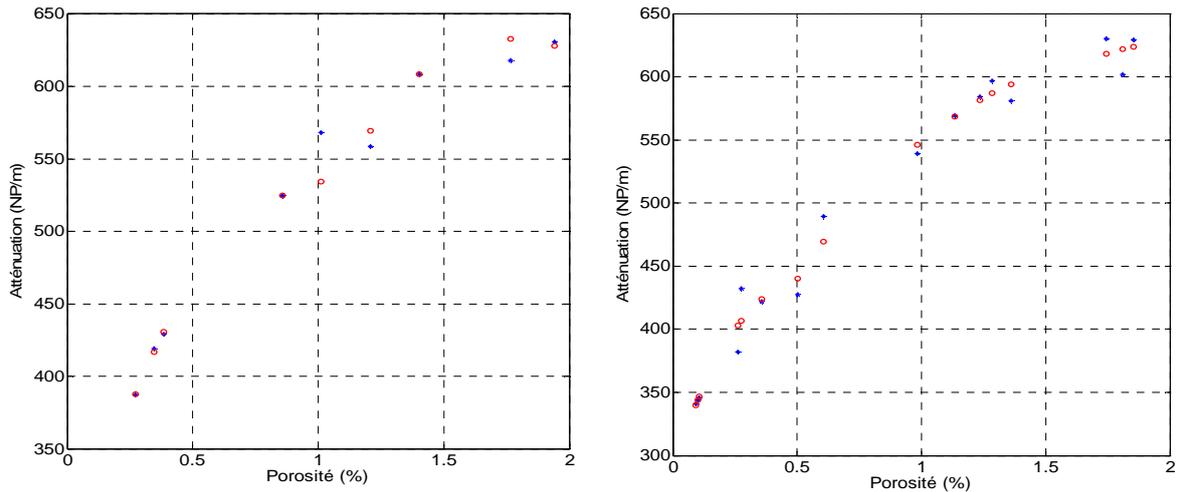
Les données numériques exploitées dans cette partie sont celles issues de la cartographie de l'atténuation à 8 MHz et de la tomographie seuillée et dont les représentations graphiques sont rappelées Figure 5 - 30.



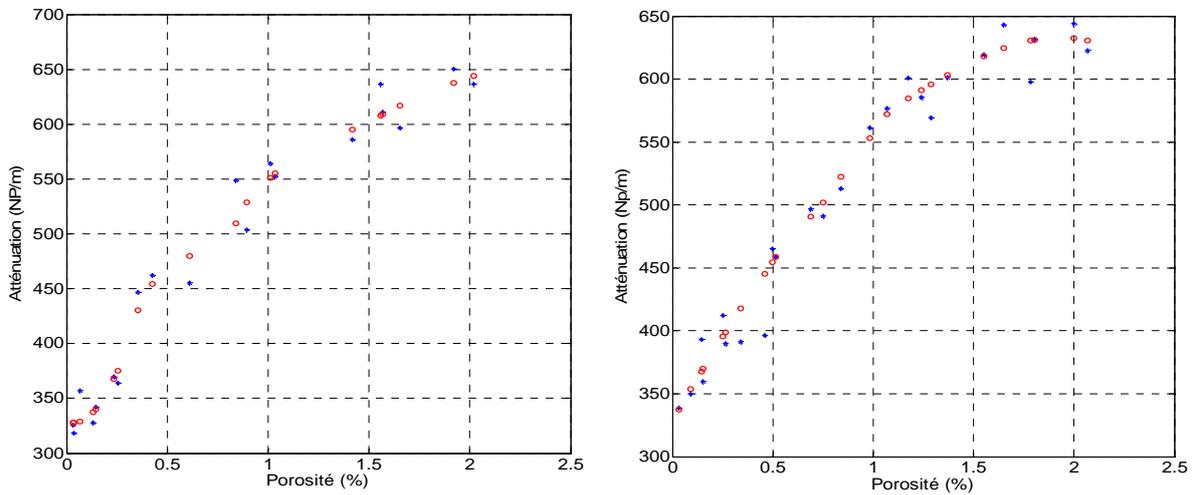
**Figure 5 - 30 : Plaque RTM1012 : Cartographie de l'atténuation à 8 MHz en Np/m (à gauche)
Porosité tomographique en % (à droite)**

Sur les Figure 5 - 31 à Figure 5 - 35 sont présentés les résultats de cette analyse de correspondance. Chaque point bleu correspond au couple de valeurs d'un carré d'analyse et les points rouges sont ceux du meilleur lissage obtenu (plus faibles écarts types).

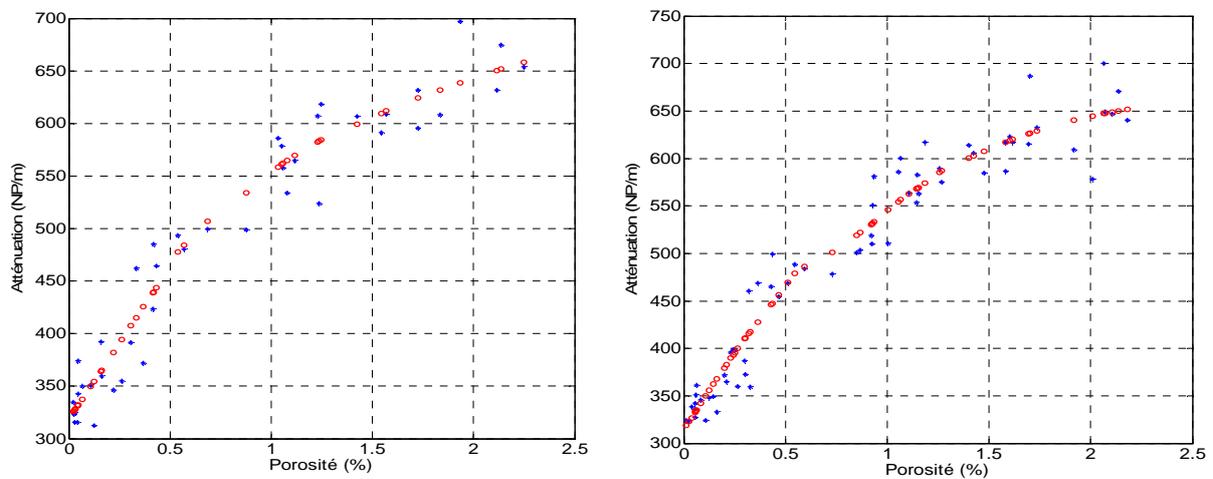
Le lissage est calculée sous MATLAB© à l'aide d'une fonction locale pondérée polynomiale du second ordre appelée fonction RLoess. Cette fonction remplace un point (x_0, y_0) par une régression quadratique sur les points (x_i, y_i) du voisinage de (x_0, y_0) , affectés d'une pondération dépendant de l'éloignement $|x_i - x_0|$ par rapport au point (x_0, y_0) . La fonction RLoess réalise ainsi un lissage non paramétrique déterminé par l'étendue du voisinage de points participant aux régressions locales. Cette étendue est appelée fenêtre de lissage. Le lissage est d'autant plus important que la fenêtre est large. La fenêtre de lissage qui a permis l'obtention de ces régressions est de 50 %, ce qui rend le lissage très efficace.



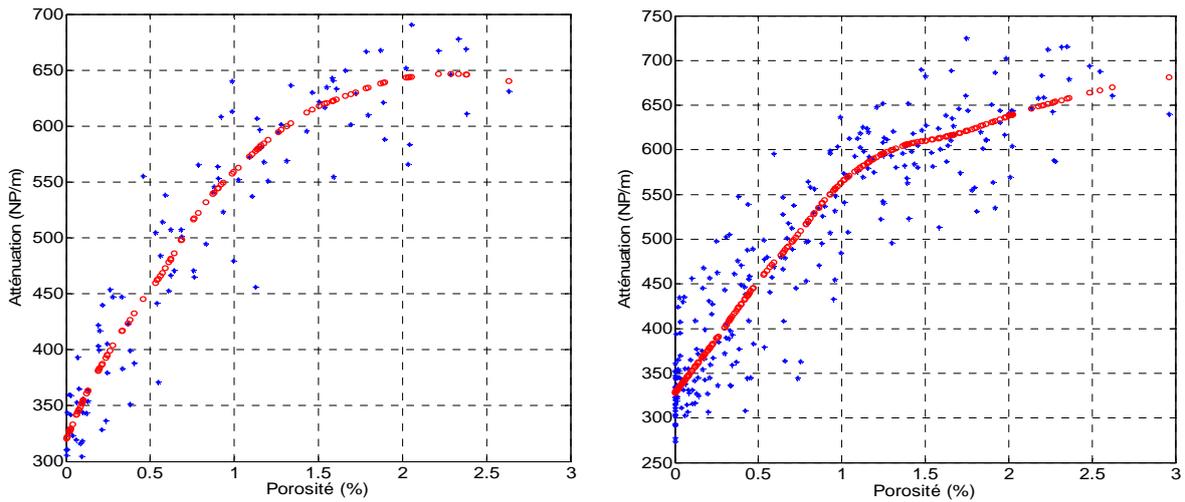
**Figure 5 - 31 : Relation entre porosité et atténuation : (à gauche) Côté du carré de 15.3 mm
(à droite) Côté du carré de 13.6 mm**



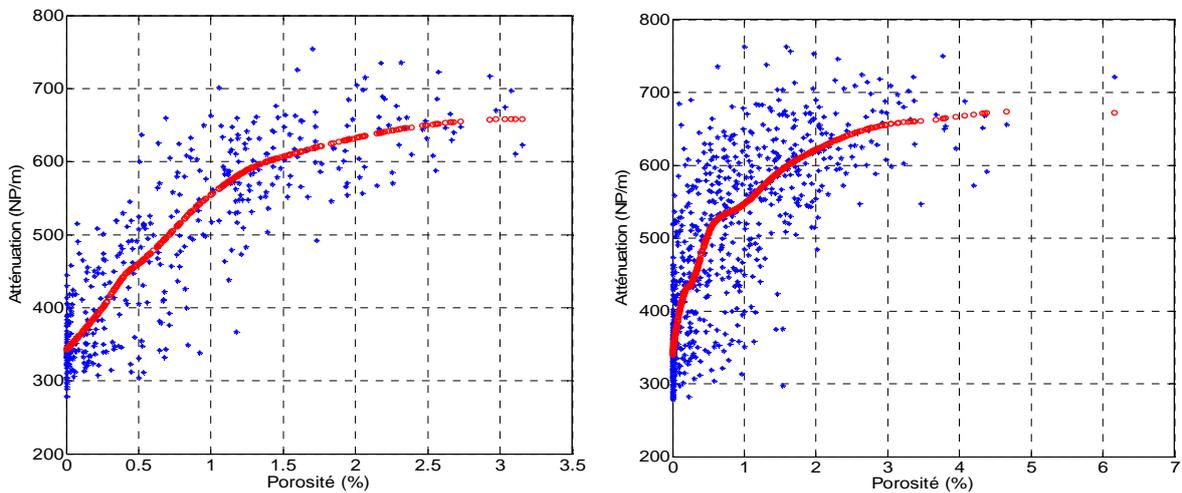
**Figure 5 - 32 : Relation entre porosité et atténuation : (à gauche) Côté du carré de 11.9 mm
(à droite) Côté du carré de 10.2 mm**



**Figure 5 - 33 : Relation entre porosité et atténuation : (à gauche) Côté du carré de 8.5 mm
(à droite) Côté du carré de 6.8 mm**



**Figure 5 - 34 : Relation entre porosité et atténuation : (à gauche) Côté du carré de 5.1 mm
(à droite) Côté du carré de 3.4 mm**



**Figure 5 - 35 : Relation entre porosité et atténuation : (à gauche) Côté du carré de 2.72 mm
(à droite) Côté du carré de 2.04 mm**

On remarque que, plus le côté du carré d'analyse diminue plus la dispersion du nuage de point augmente. Toutes les courbes partent d'une atténuation d'environ 350 Np/m et ont une progression quasi linéaire qui s'incurve vers 650 Np/m.

La courbe rouge correspondant au carré d'analyse de 3.4 mm de côté commence à présenter des irrégularités qui laissent à penser que la limite de validité de la correspondance porosité-atténuation est atteinte. La surface d'analyse limite est alors de 11.56 mm^2 qui est bien inférieure à celle du transducteur plan de 0.5" qui est de 126 mm^2 .

Les régressions obtenues pour des carrés de tailles supérieure ou égale à la valeur limite précédemment définies sont regroupées dans la Figure 5 - 36 et permettent d'obtenir la courbe moyennée rouge de la Figure 5 - 36. Cette courbe $p(\alpha)$ constitue une bonne

approximation de la relation porosité-atténuation de la plaque RTM1012. L'écart-type des différences entre les points bleus et la courbe lissée rouge est de l'ordre de 6 Np/m.

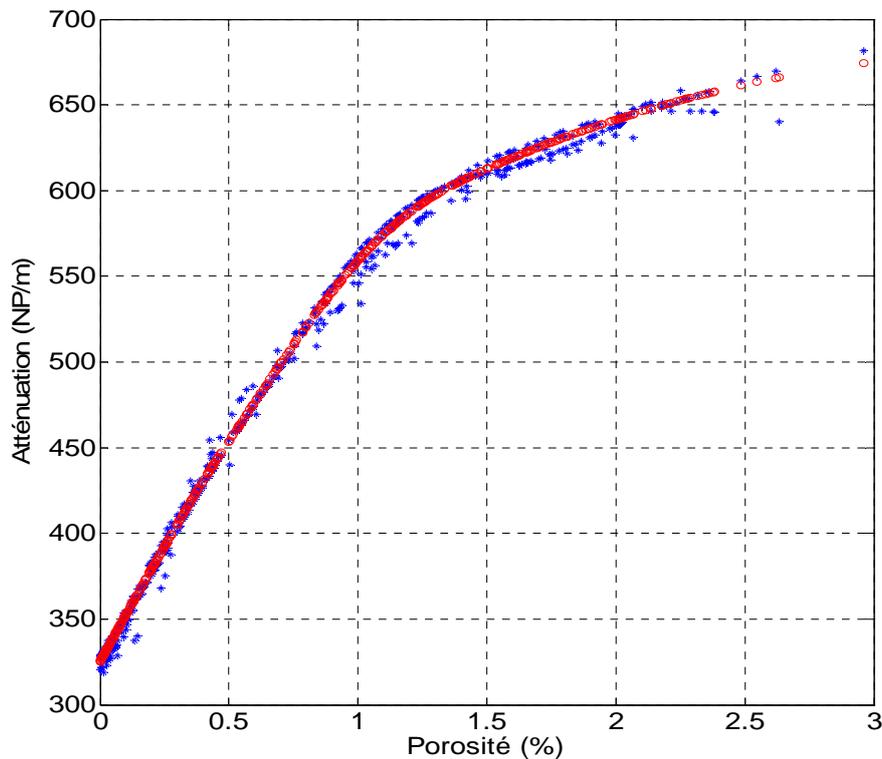


Figure 5 - 36 : Courbe lissée obtenue à partir des courbes précédentes retenues

Cette relation entre la porosité et l'atténuation est valable dans le domaine où la porosité est inférieure de 3 %. Cette plage de porosité est celle communément admise en production des matériaux composites dans l'aéronautique.

La loi qui décrit la relation porosité-atténuation peut être déduite par le fit de la courbe $p(\alpha)$.

$$p = 20.1e^{-\left(\frac{\alpha-1023}{248.4}\right)^2} + 0.4829e^{-\left(\frac{\alpha-501.6}{113.1}\right)^2} \quad (5.5)$$

Pour un carré d'analyse, on calcule la valeur vraie de la porosité à partir des données tomographiques et la valeur donnée par la formule (5. 5) en prenant pour α la valeur moyenne de l'atténuation mesurée. Ce calcul est répété pour l'ensemble des carrés d'analyse de la plaque RTM1012. Lorsque les carrés d'analyse sont grands la concordance est bonne. Les résultats comparatifs sont présentés pour les carrés d'analyse de $K=25$, 10 et 6 fois 0.34mm de côté. On constate que si la correspondance est bonne à « $K=25$ » elle atteint sa limite de similitude à « $K=10$ » et devient difficile à interpréter à « $K=6$ ».

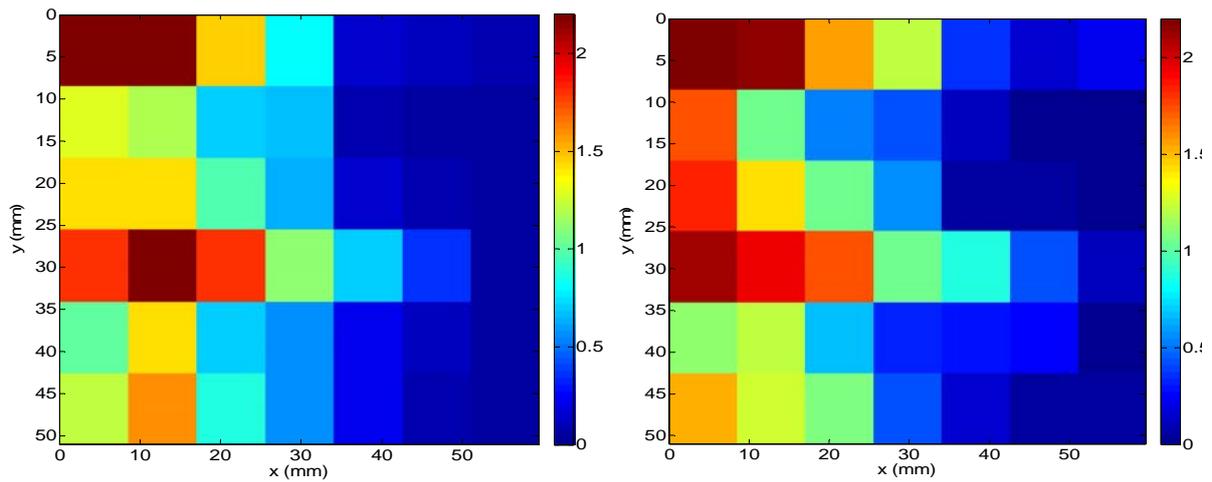


Figure 5 - 37 : Comparaison des cartographies « Formule établie » « tomographie » pour des carrés de 25x0.34mm de côté

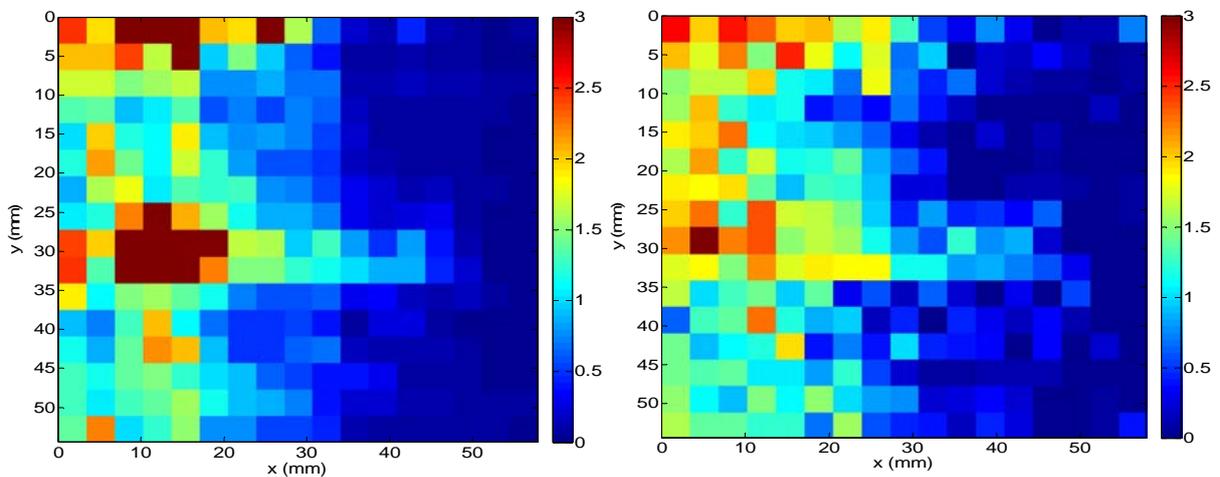


Figure 5 - 38 : Comparaison des cartographies « Formule établie » « tomographie » pour des carrés de 10x0.34mm de côté

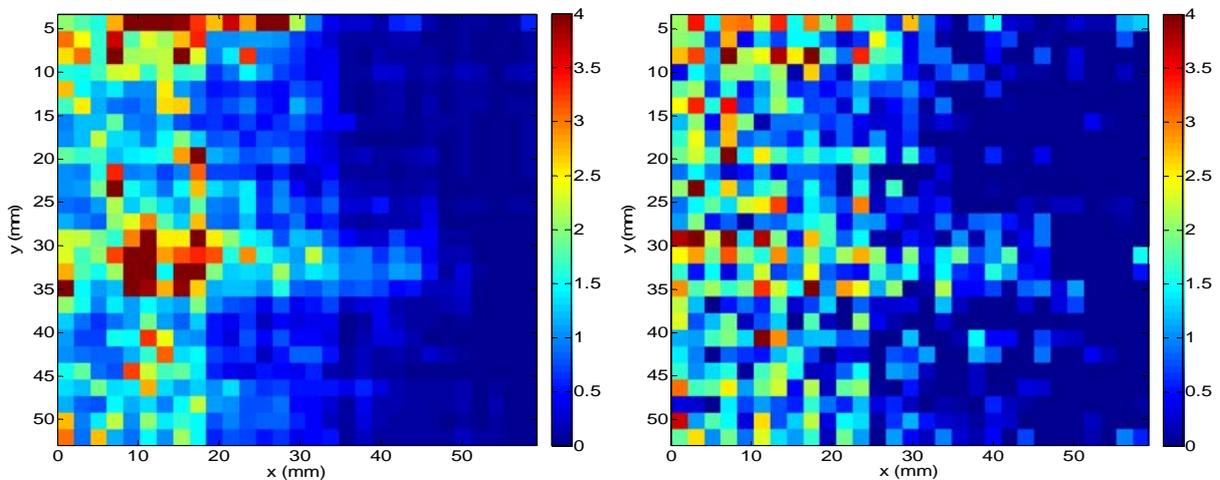


Figure 5 - 39 : Comparaison des cartographies « Formule établie » « tomographie » pour des carrés de 6x0.34mm de côté

Pour l'ensemble des carrés d'analyse on calcule la différence entre les deux porosités obtenues et on en déduit l'écart type. Ce travail a été effectué pour toutes les tailles de carré d'analyse définis par leur coefficient multiplicatif. Les résultats sont donnés dans le Tableau 5 - 3. On constate que les écarts-type augmentent quand la taille du carré diminue mais que cette valeur de l'écart type reste acceptable pour des carrés de taille supérieure à 3.4 mm de côté.

Coefficient multiplicatif	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45
Ecart-type (%)	0.81	0.6	0.486	0.348	0.351	0.336	0.173	0.165	0.132	0.098

Tableau 5 - 3 : Ecart-type de porosité en %, en fonction de la taille du carré

Ceci participe à la validation du choix de la taille du carré d'analyse de référence faite précédemment.

5.5 Relation entre porosité et atténuation simplifiée

La même étude est menée suivant le même principe à partir des atténuations obtenues par la méthode plus rapide qui ne dépend pas de la fréquence mais des amplitudes [42]. Les cartographies prises en considération dans cette partie sont rappelées Figure 5 - 40.

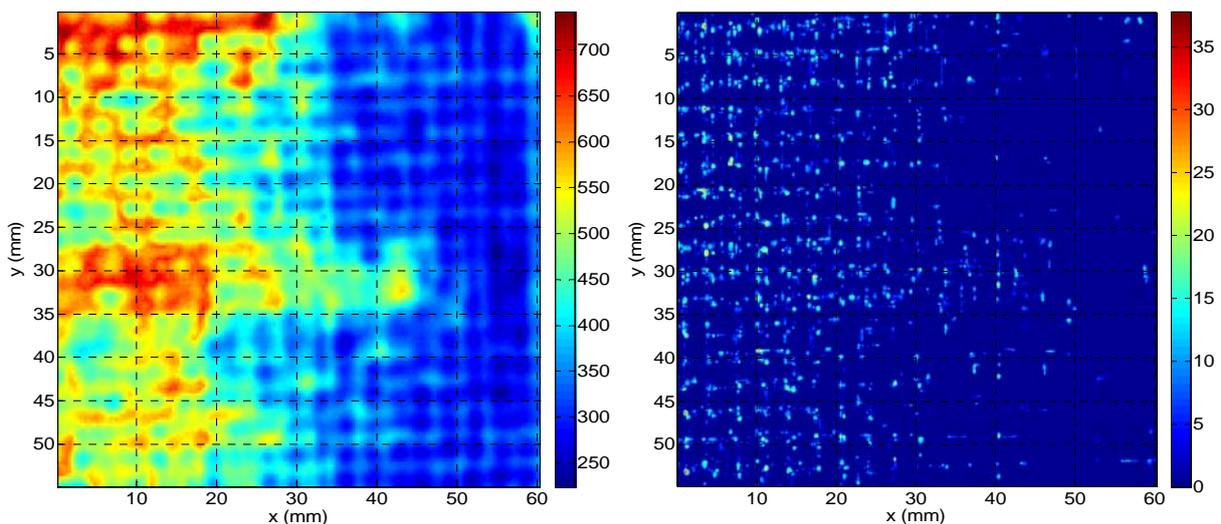
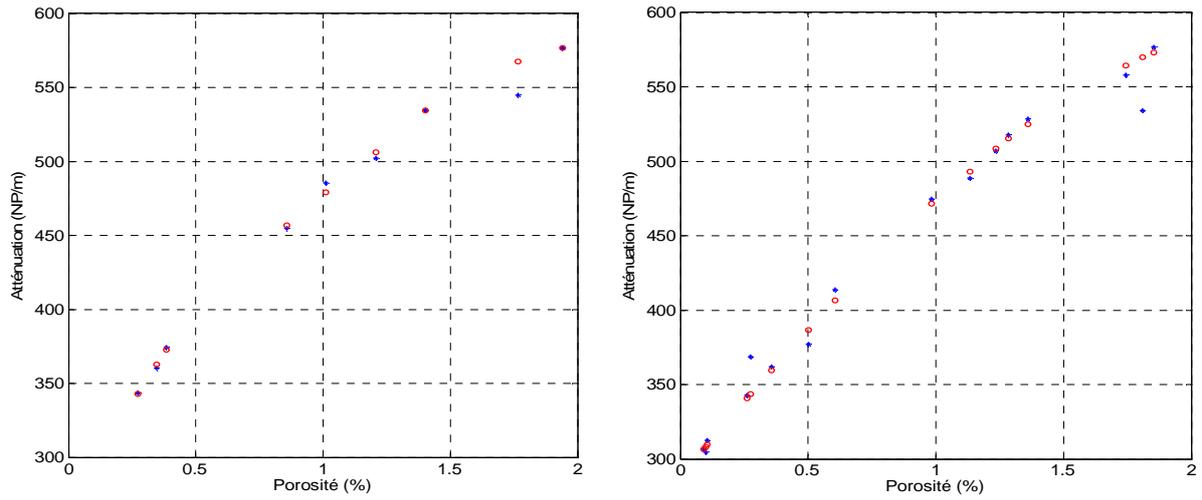
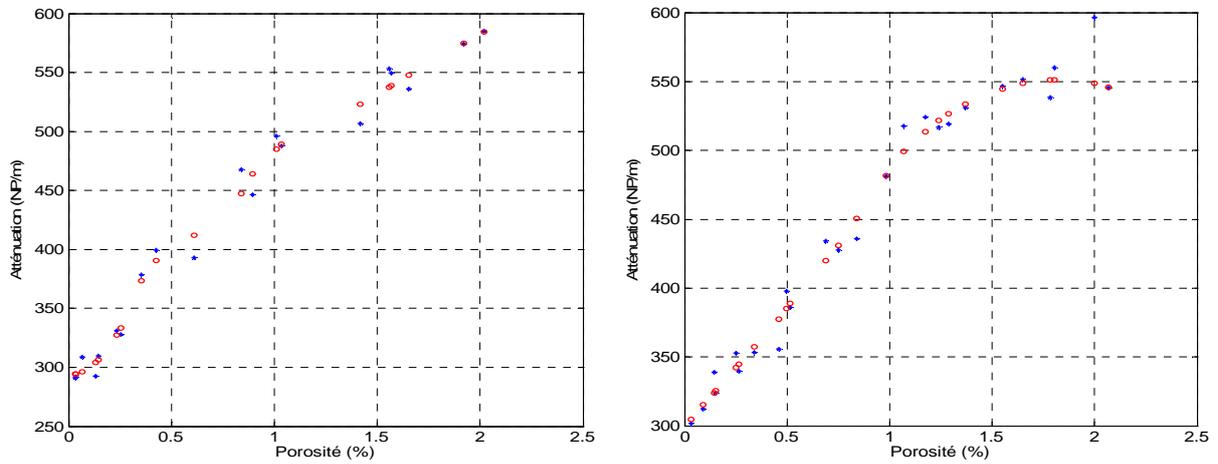


Figure 5 - 40 : Cartographie de l'atténuation simplifiée (à gauche) et la porosité (à droite)

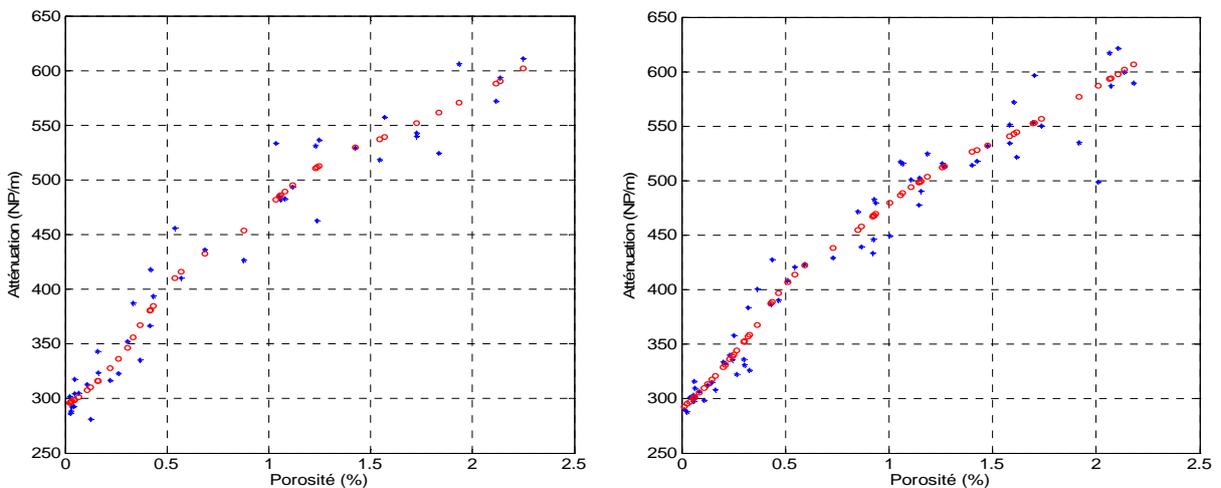
Les résultats des analyses atténuation-porosité en fonction de la taille des carrés d'analyse sont présentés de la Figure 5 - 41 à la Figure 5 - 45.



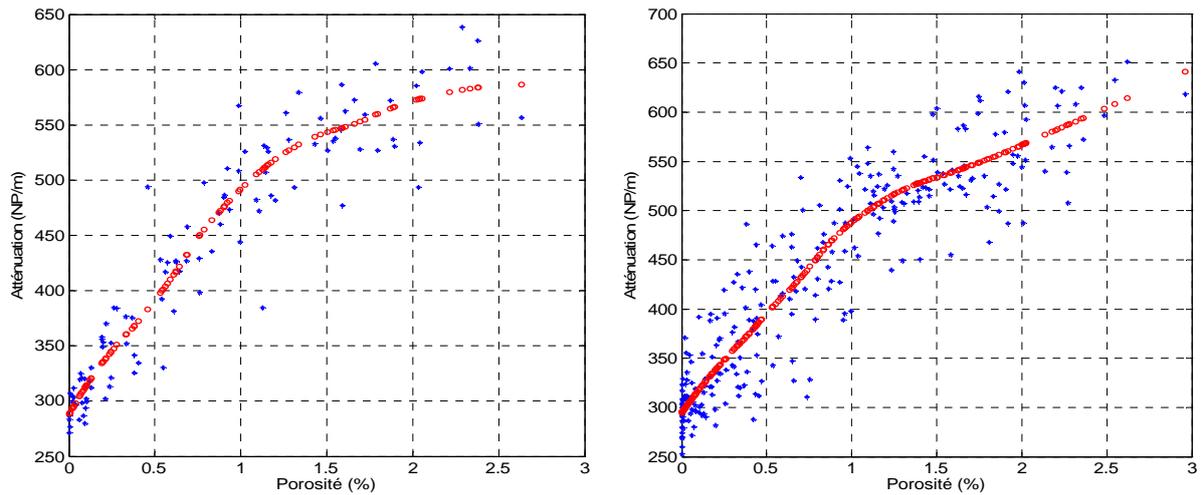
**Figure 5 - 41 : Relation entre porosité et atténuation : (à gauche) Côté du carré de 15.3 mm
(à droite) Côté du carré de 13.6 mm**



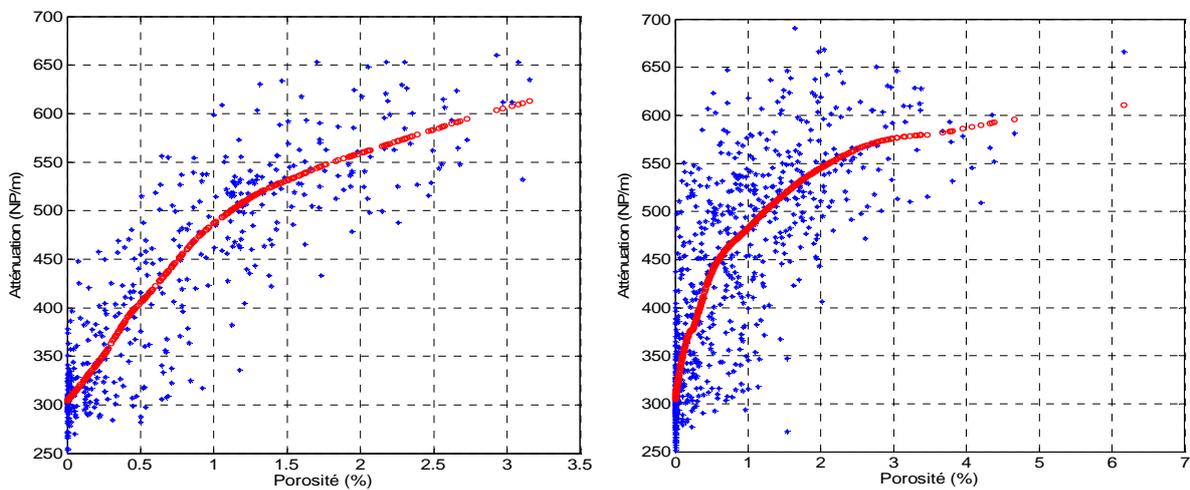
**Figure 5 - 42 : Relation entre porosité et atténuation : (à gauche) Côté du carré de 11.9 mm
(à droite) Côté du carré de 10.2 mm**



**Figure 5 - 43 : Relation entre porosité et atténuation : (à gauche) Côté du carré de 8.5 mm
(à droite) Côté du carré de 6.8 mm**



**Figure 5 - 44 : Relation entre porosité et atténuation : (à gauche) Côté du carré de 5.1 mm
(à droite) Côté du carré de 3.4 mm**



**Figure 5 - 45 : Relation entre porosité et atténuation : (à gauche) Côté du carré de 2.72 mm
(à droite) Côté du carré de 2.04 mm**

Toutes les courbes partent d'une atténuation légèrement plus faible (<300 Np/m) que dans le paragraphe précédent (350 Np/m) mais la progression est globalement similaire à celle obtenue au 5.4.

Pour pouvoir comparer ces résultats avec ceux obtenus lorsque l'atténuation est calculée à 8 MHz les courbes lissées calculées pour les carrés de 2.72 mm² et 2.04 mm² n'ont pas été conservées même si dans ces deux cas les résultats obtenus semblent acceptables. Comme précédemment une courbe moyenne porosité-atténuation globale des courbes lissées précédentes est calculée et présentée Figure 5 - 46. L'écart type est toujours d'environ 6 Np/m.

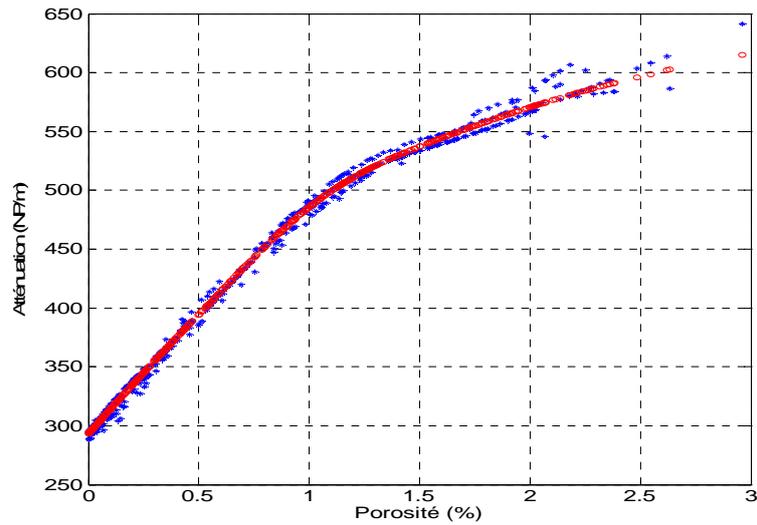


Figure 5 - 46 : Courbe lissée obtenue à partir de l'ensemble des courbes précédentes retenues

De la même manière que dans l'étude fréquentielle de l'atténuation, la loi qui décrit la relation porosité-atténuation peut être déduite.

$$p = 4.183e^{-\left(\frac{\alpha-732.3}{187.4}\right)^2} + 0.3949e^{-\left(\frac{\alpha-427.3}{87.52}\right)^2} \quad (5.6)$$

Comme précédemment on calcule la valeur vraie de la porosité à partir des données tomographiques et la valeur donnée par la formule (5.6) en prenant pour α la valeur moyenne de l'atténuation mesurée. Ce calcul est répété pour l'ensemble des tailles de carrés d'analyse de la plaque RTM1012. Les résultats comparatifs sont présentés pour les carrés d'analyse de $K=25$, 10 et 6 fois 0.34 mm. On constate ici encore que si la correspondance est bonne à « $K=25$ » elle atteint sa limite de similitude à « $K=10$ » et devient difficile à interpréter à « $K=6$ ».

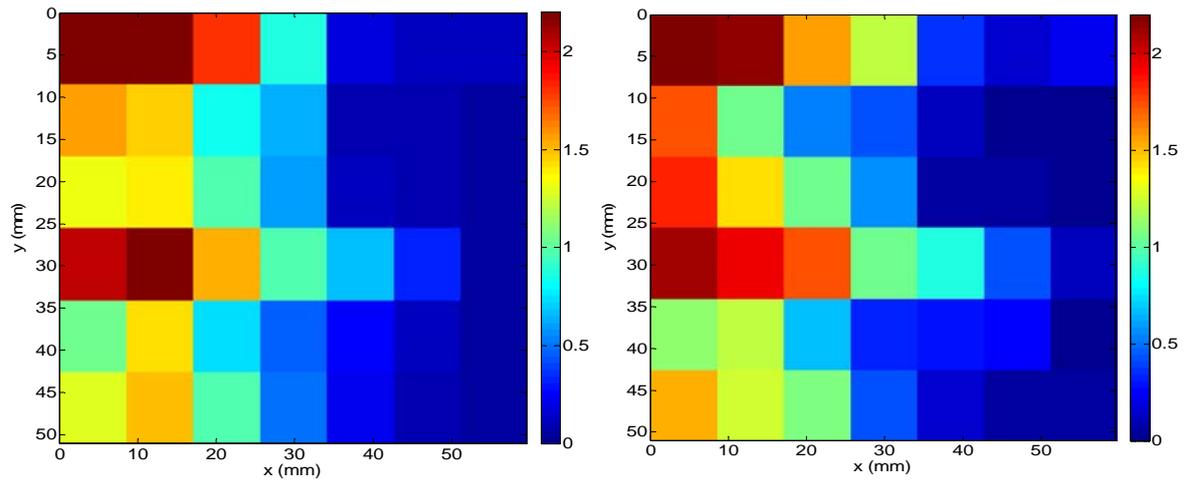


Figure 5 - 47 : Comparaison des cartographies « Formule établie » « tomographie » pour des carrés de 25x0.34mm de côté

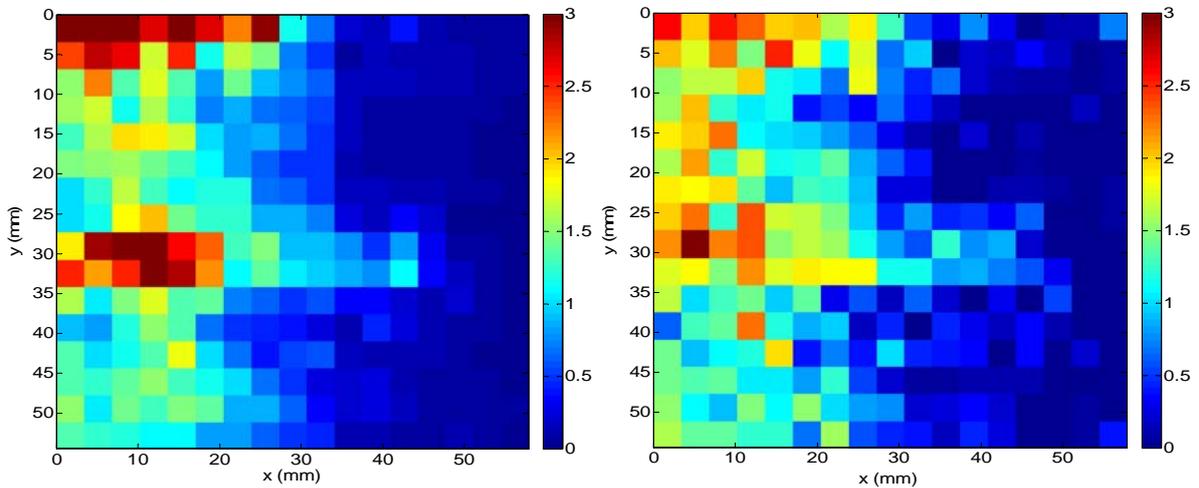


Figure 5 - 48 : Comparaison des cartographies « Formule établie » « tomographie » pour des carrés de 10x0.34mm de côté

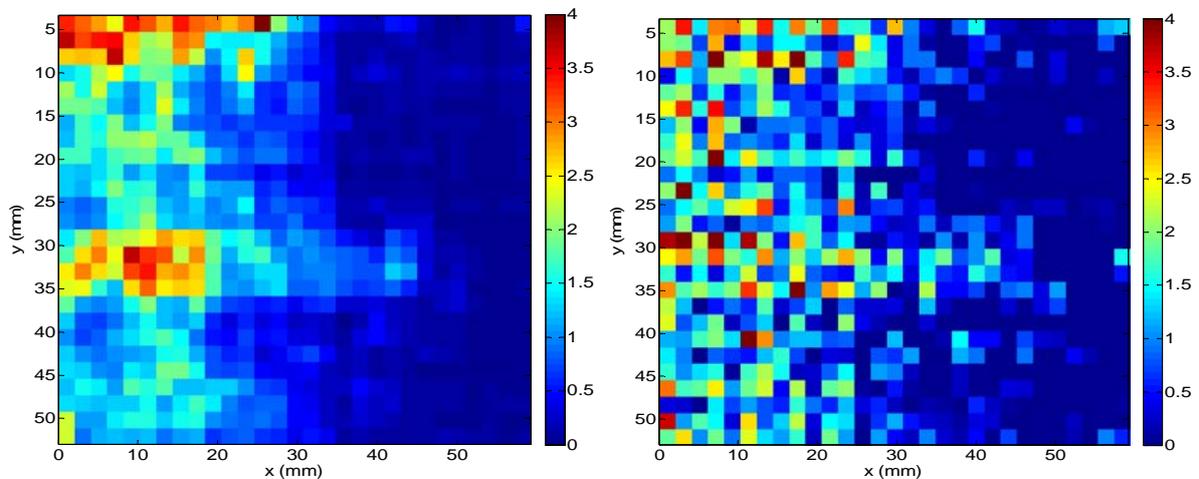


Figure 5 - 49 : Comparaison des cartographies « Formule établie » « tomographie » pour des carrés de 6x0.34mm de côté

Comme précédemment l'écart type est déduit du calcul des différences entre les valeurs vraies de la porosité issues des données tomographiques et les valeurs données par la formule en prenant pour α les valeurs moyennes de l'atténuation mesurée. Les résultats sont donnés dans le Tableau 5 - 4. On constate toujours que les écarts-type augmentent quand la taille du carré diminue mais que les valeurs de l'écart type sont tous . que dans l'étude précédente.

Coefficient multiplicatif	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45
Ecart-type (%)	0.66	0.44	0.357	0.322	0.257	0.22	0.166	0.125	0.126	0.125

Tableau 5 - 4: Ecart-type de porosité en % en fonction de la taille du carré

La Figure 5 - 50 permet d'analyser simultanément les deux courbes lissées des Figure 5 - 36 et Figure 5 - 46.

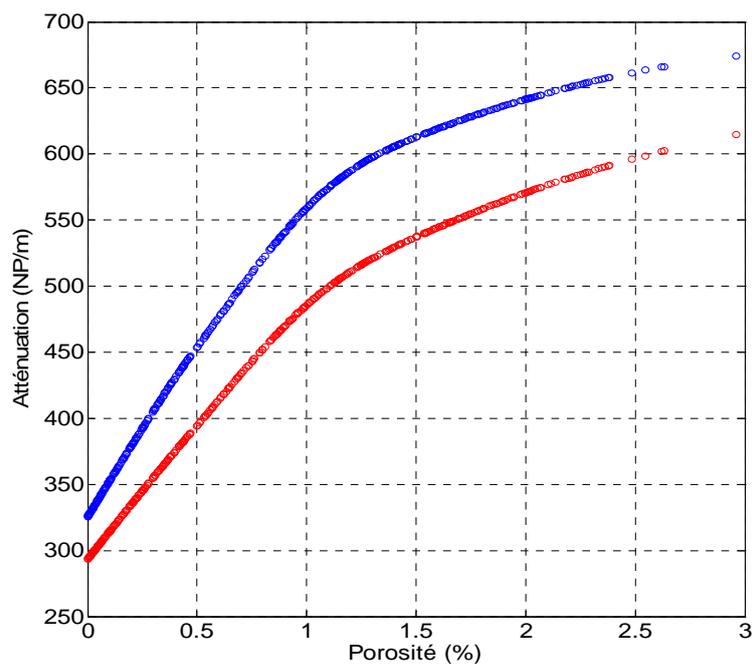


Figure 5 - 50 : Courbe lissée issus de la méthode fréquentielle à 8 MHz en bleu et de la méthode de l'amplitude en rouge

On constate que la courbe bleue, qui peut être considérée comme la courbe exacte puisque qu'aucune approximation n'est faite lors de son obtention, et la courbe rouge présentent des allures similaires. Si la courbe rouge ne donne pas ponctuellement une correspondance exacte entre le taux de porosité et l'atténuation, globalement elle permet d'établir une correspondance dont l'interprétation physique est proche de la réalité.

5.6 Conclusion

La détermination des équations $p(\alpha)$ reliant la porosité mesurée par la tomographie à rayons X et l'atténuation ultrasonore a été réalisée. Cette atténuation a été mesurée à l'aide de transducteurs mono élément plans ou focalisant. Deux études ont été effectuées.

La première a permis la mesure de l'atténuation ultrasonore sur des échantillons élaborés à partir des mêmes constituants mais avec un nombre de plis différents. Les résultats ont été obtenus tant pour la porosité que pour l'atténuation par des mesures de valeurs moyennes sur des échantillons d'environ 30x15 mm². Une loi corrélant la porosité, la fréquence et l'atténuation est établie. L'influence du nombre de plis n'est a priori pas notable.

La seconde étude concerne un échantillon dit RTM1012 de référence de 62.9x54.8 mm². Sa tomographie à rayons X est quantitativement analysée. La distribution des pores est complètement définie. Une étude complète sur la méthode retenue pour seuiller les images tomographiques est réalisée. Les résultats de deux méthodes d'analyse ultrasonore, l'une fréquentielle quasiment exacte et l'autre plus simplifiée, sont confrontés aux données tomographiques. Une loi de corrélation porosité-atténuation est obtenue dans chacun des cas.

Une étude sur la taille du carré d'analyse en deçà duquel les lois de comportement porosité – atténuation ne semblent plus valables a été menée. Il semble que la méthode donne des résultats corrects pour des surfaces d'inspection d'au moins 12 mm² dans les deux cas. La méthode fréquentielle nécessite un temps de calcul beaucoup plus grand que la méthode simplifiée (5h contre 15 minutes). Pourtant, les déductions obtenues dans les deux cas sont très proches. Pour des plaques de grande dimension, la méthode simplifiée devient de ce fait une bonne alternative.

Chapitre 6 : Imagerie 3D des défauts

Dans les chapitres précédents, les données dans les 3 dimensions issues de la tomographie à rayons X ont été utilisées pour quantifier la porosité due aux défauts contenus dans une plaque composite. Ces informations ont permis de relier les valeurs du taux de porosité à celles de l'atténuation par le biais de cartographies acoustiques. La cartographie acoustique donne une information du type de celle d'une radiographie à rayons X. La localisation exacte dans le volume et la détermination des tailles et des formes des défauts que la tomographie à rayons X fournit restent inexploités. Si une tomographie ultrasonore était mise au point, une représentation 3D pourrait acoustiquement donner ces informations comme le permet la tomographie à rayons X (Tomo X). Ce chapitre présente les premières contributions à la réalisation de cette imagerie 3D des défauts.

Dans les domaines de la biologie et du médical ou des géo-matériaux il existe un certain nombre de publications sur la Tomographie US. Dans le domaine qui nous concerne la bibliographie est plus pauvre. Il faut citer une méthode de tomographie ultrasonore, calquée sur la Tomo X proposée dans les années 1985 [55 56] et qui consiste à envoyer un faisceau d'ultrasons sur la pièce à étudier et à récupérer les échos diffusés dans toutes les directions. La reconstitution de l'objet (ou seulement certaines propriétés) est réalisée en utilisant la transformée de Radon.

Dans tous les cas les méthodes mises au point sont souvent des méthodes complexes destinées à un usage en laboratoire. Comme depuis le début de ce travail, l'utilisation in situ souhaitée guide les choix qui sont fait et induisent des contraintes. L'approche présentée dans ce chapitre se limite à l'imagerie 3D de l'intérieur de plaques et repose sur une méthode simple et appropriée, dérivée de l'inspection pulse-echo. Au stade de développement de la méthode proposée, l'efficacité est encore imparfaite mais les perspectives d'amélioration existent.

5.7 Principe

La réflexion d'une impulsion sur une plaque composite fournit, successivement, l'écho de surface, les réflexions intermédiaires et l'écho de fond. Le premier et le dernier sont très importants et sont utilisés pour calculer la vitesse de l'onde longitudinale et son atténuation (comme présenté dans les chapitres précédents). Les échos intermédiaires renseignent sur la

structure interne de la plaque (réflexions aux interfaces fibre-résine ou sur les ruptures de matière). Ils n'ont pas encore été exploités, les signaux recueillis étant complexes et mélangés. La nature oscillatoire du signal incident en est une des causes. L'autre cause est la proximité des réflexions intermédiaires qui rend difficile la distinction des réflexions engendrées par les plis et par les vides dans le matériau composite. Les échos temporels mesurés sont, en l'état, indéchiffrables et la localisation des défauts est alors problématique.

On propose de résoudre ce problème en remplaçant chaque signal réfléchi à l'intérieur de la plaque par une impulsion aussi brève que possible qui est la réponse en réflexion à une impulsion incidente. Dans ces conditions, le signal doit devenir plus lisible et on doit pouvoir attribuer une impulsion à une réflexion. La méthode est appelée calcul de la réponse impulsionnelle de la plaque.

5.8 Mise en œuvre

On aborde le problème en utilisant un signal artificiel que l'on crée de toute pièce. Cette expérience numérique doit permettre de valider la méthode et de la rendre plus explicite. Le signal de référence est un signal échantillonné à 100 MHz produit par un transducteur 10 MHz focalisant à 2" et de diamètre 0.5" (comme ceux des chapitres précédents).

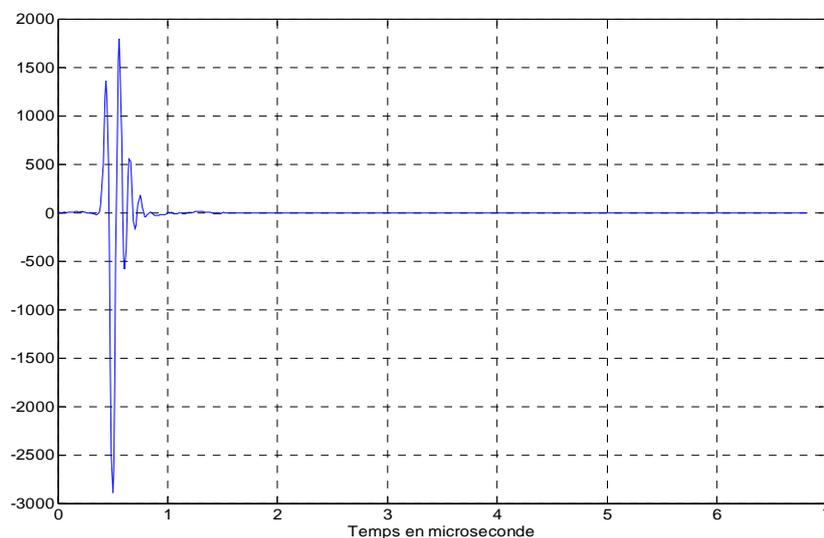


Figure 6 - 1 : Signal incident $s_i(t)$ délivré par le transducteur, au niveau de la plaque

On utilise un signal réel $s_i(t)$ comme signal incident sur une plaque composite. Le signal réfléchi est noté $s_r(t)$. La réponse impulsionnelle inconnue de la plaque est notée $h(t)$. Par définition de la convolution, elle est telle que :

$$s_r(t) = s_i(t) \otimes h(t) \quad (6.1)$$

Dans l'espace fréquentiel :

$$S_r(\omega) = S_i(\omega) * H(\omega) \quad (6.2)$$

On obtient par conséquent la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle :

$$H(\omega) = \frac{S_r(\omega)}{S_i(\omega)} \quad (6.3)$$

Le signal $h(t)$ est obtenu par transformée inverse.

Le signal réfléchi est construit à partir du signal incident donné Figure 6 - 1. Il comprend l'écho de surface, inversé par rapport au signal incident et 9 échos dont les amplitudes et la position dans le temps a été arbitrairement choisie (Figure 6 - 2). Le premier écho interne est peu visible car il est mélangé volontairement à l'écho de surface. Les neuf échos possèdent la même polarité car ils sont supposés issus de réflexions sur des bulles d'impédance nulle. Ce sont les signaux que nous voulons mettre en évidence.

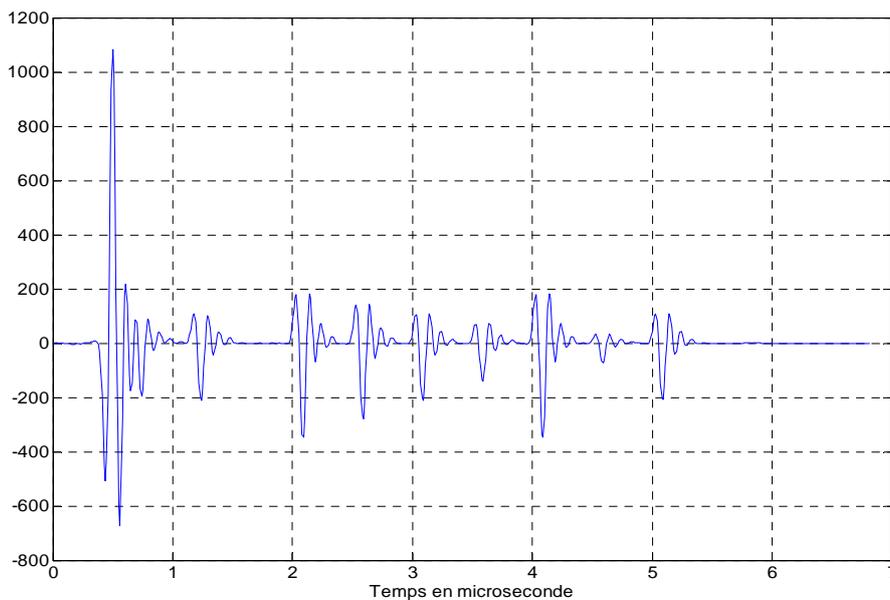


Figure 6 - 2 : Signal réfléchi $s_r(t)$

On donne sur la Figure 6 - 3 la fonction $H(j\omega)$ rapport des transformées $S_r(j\omega)$ et $S_i(j\omega)$. La fonction n'est calculée que dans le domaine fréquentiel imposé par le signal $s_i(t)$, donc par le transducteur.

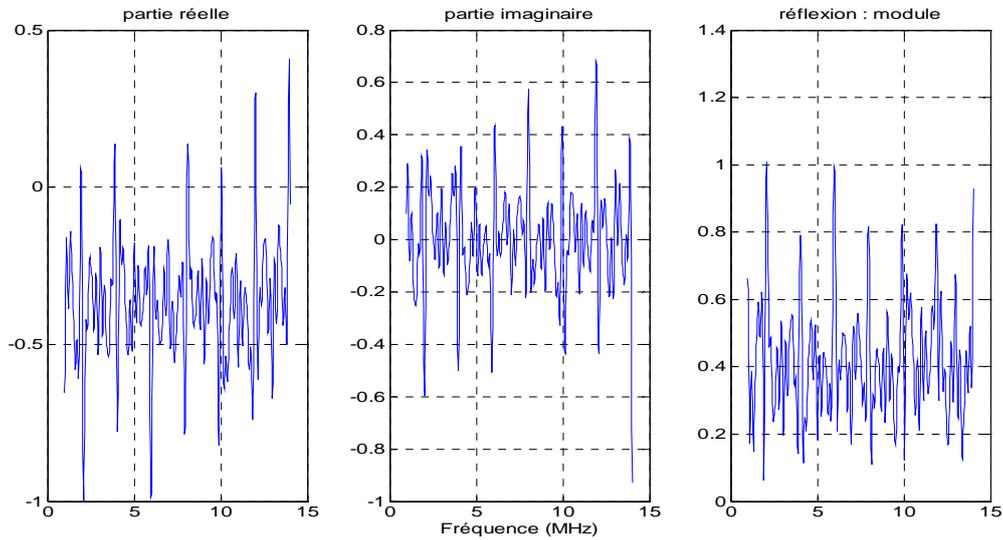


Figure 6 - 3 : Fonction H – Partie réelle (à gauche) – Partie imaginaire (au centre) – Module (à droite)

L'inversion de cette fonction H donne des signaux contenant une succession d'impulsions de durée non nulle et une impulsion négative en $t=0$ d'amplitude absolue très supérieure aux autres.

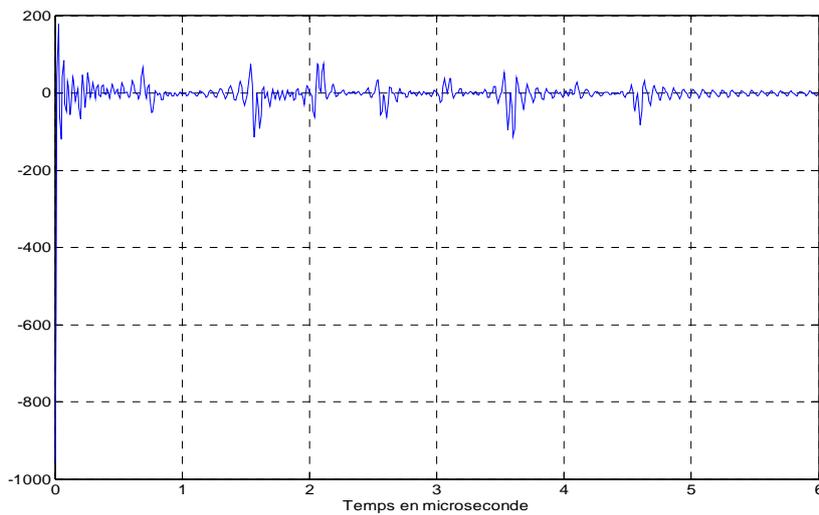


Figure 6 - 4 : Réponse impulsionnelle brute

On élimine cette impulsion (caractéristique de l'écho de surface) en retranchant leur moyenne aux parties réelle et imaginaire. La fonction H possède alors une moyenne nulle dans le domaine de fréquence imposé par le transducteur. Le signal inversé ne peut plus posséder un

écho de surface impulsionnel puisqu'il n'y a pas d'échelon fréquentiel (ce qui est le cas si la valeur moyenne est non nulle). Pour l'étude des composites, ceci est une avancée puisqu'il est possible de connaître un signal émis sous sa surface (sous certaines limites précisées par la suite). Cette méthode supprime donc la zone morte ou des échos significatifs des défauts disparaissent dans l'étalement du signal incident réfléchi.

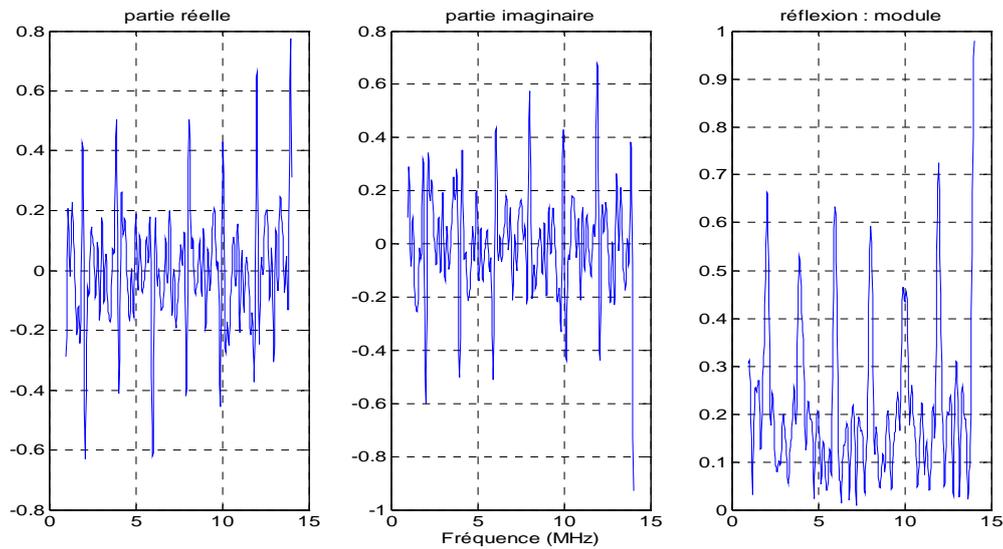


Figure 6 - 5 : fonction H à moyenne nulle

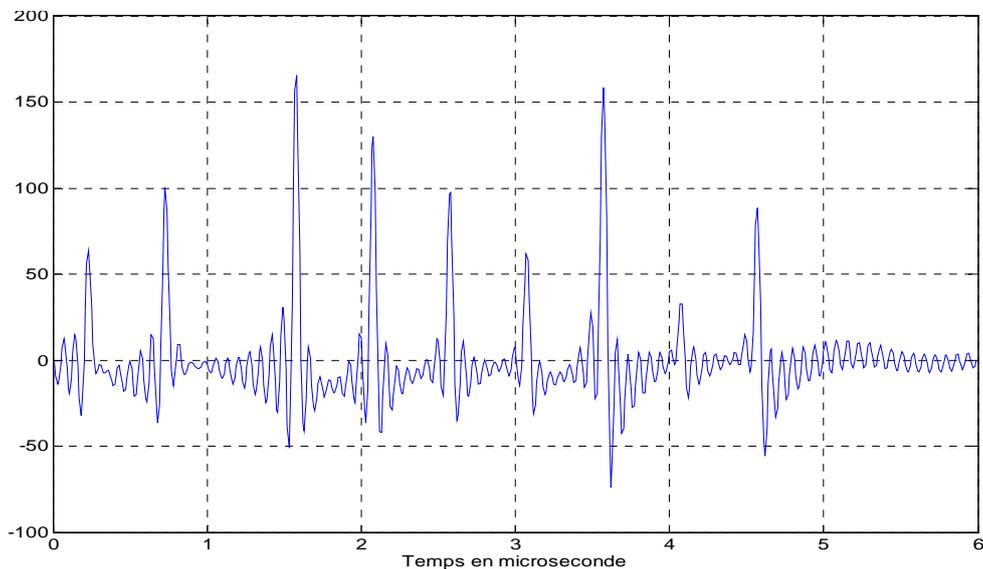


Figure 6 - 6 : Réponse impulsionnelle si H a une moyenne nulle

Dans les nouvelles représentations temporelles l'instant $t=0$ est celui de l'impulsion disparue (écho de surface). Une dernière transformation reste à faire si on veut éviter les nombreuses oscillations du signal temporel après inversion (Figure 6 - 6), pour cela, il faut faire disparaître les transitions rapides au début et à la fin de la FFT. Ceci est réalisé Figure 6 - 7 et Figure 6 -

8 en multipliant H par une fenêtre de Hanning prenant la valeur zéro aux fréquences minimum et maximum du domaine fréquentiel d'étude.

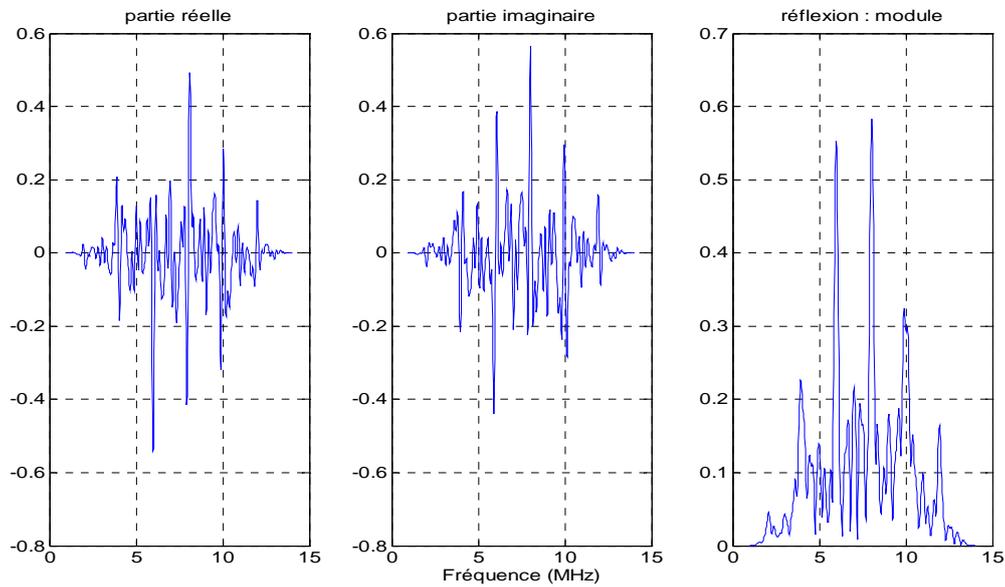


Figure 6 - 7 : Fonction H filtrée

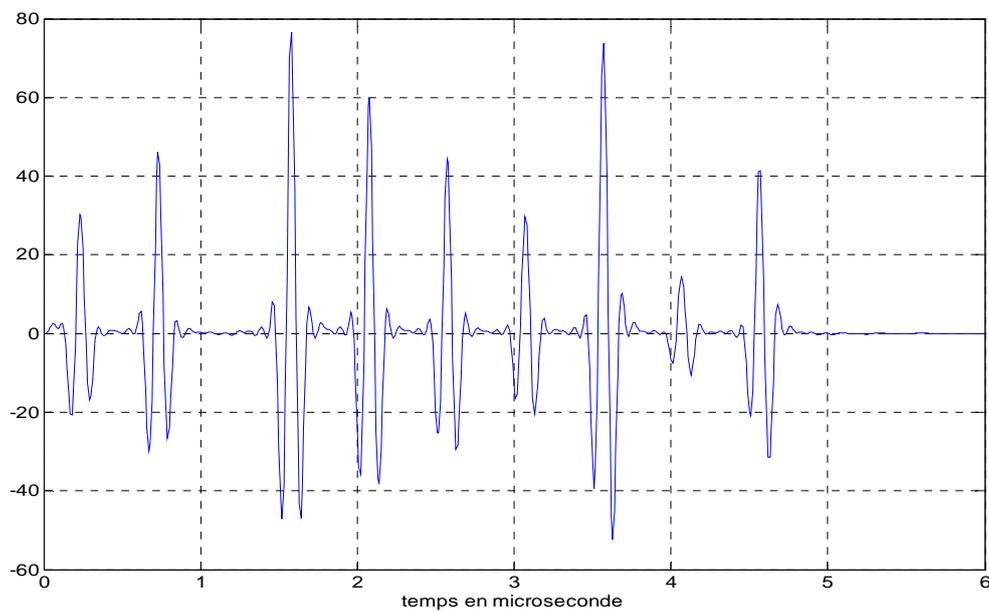


Figure 6 - 8 : Réponse impulsionnelle après fenêtrage

Puisque les différents échos caractérisant les défauts ont tous été choisis négatifs, les impulsions de la réponse impulsionnelle doivent toutes être positives. Afin de bien faire apparaître la contribution de chacun des défauts le signal obtenu est seuillé. Pour un seuil de +5 on obtient la réponse impulsionnelle de la Figure 6 - 9.

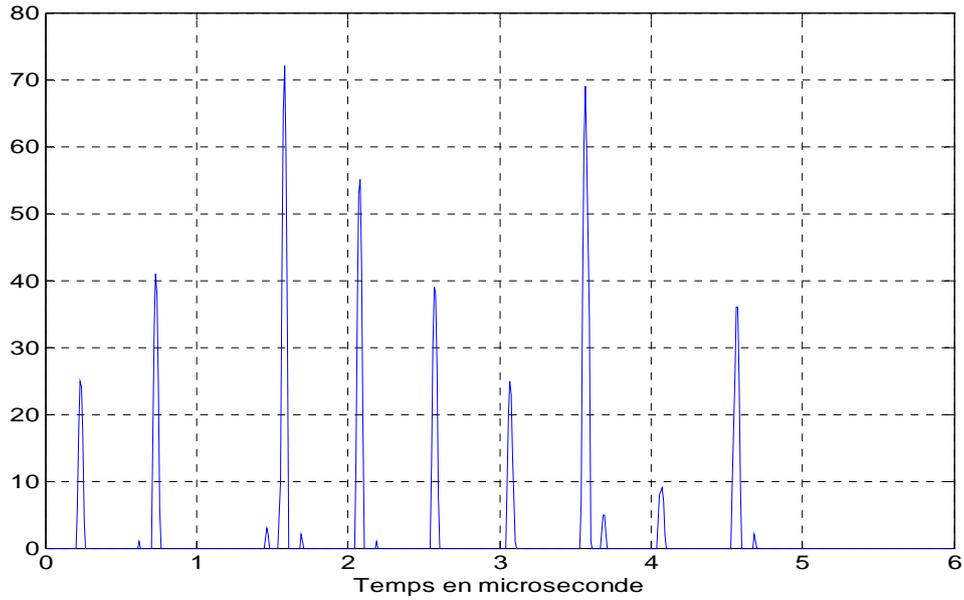


Figure 6 - 9 : Réponse impulsionnelle seuillée

La comparaison avec la Figure 6 - 2 est intéressante et montre que les intervalles de temps entre les échos sont bien conservés (Figure 6 - 10) et que les amplitudes des impulsions sont proportionnelles aux pics des signaux (Figure 6 - 11).

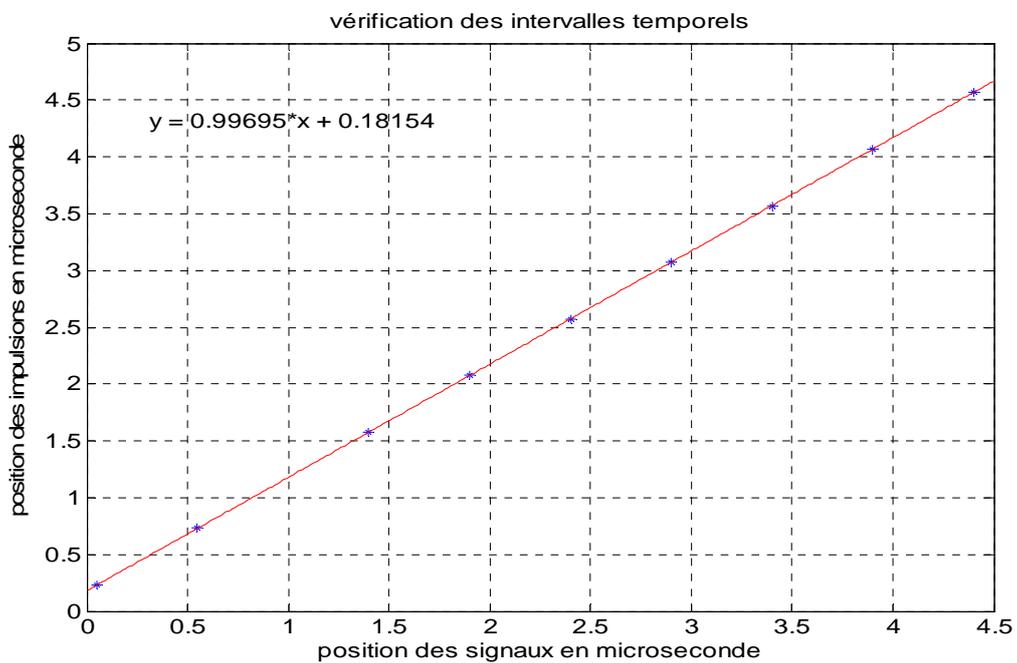


Figure 6 - 10 : Conservation des intervalles temporels

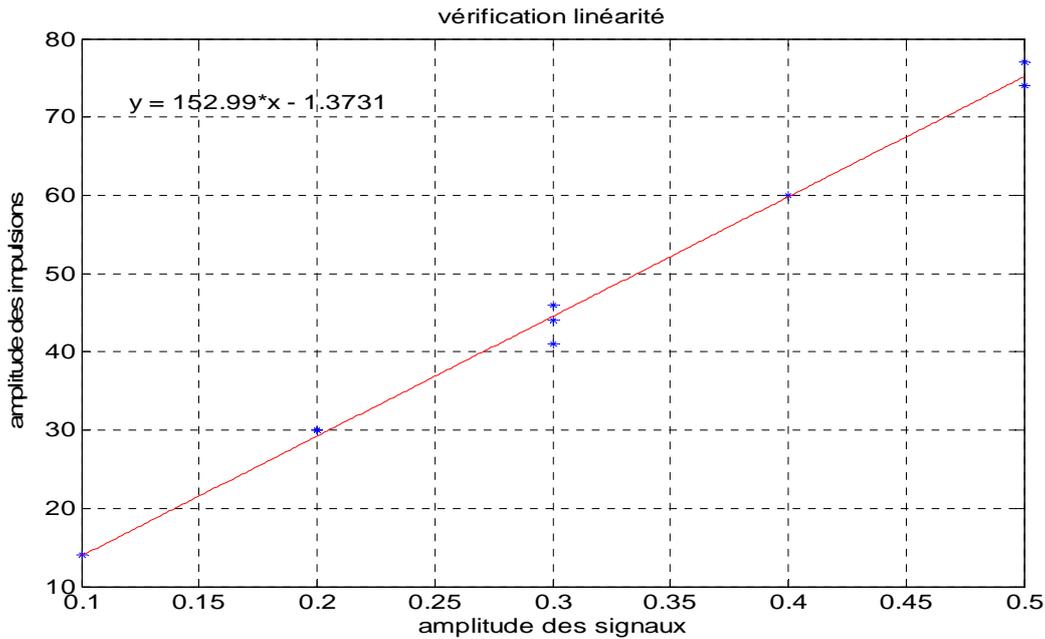


Figure 6 - 11 : Linéarité des impulsions

Toutefois quelques questions peuvent être posées : quelle impulsion négative correspond à un signal positif, quelle est l'influence des parties négatives des réponses (Figure 6 - 8), comment influe la bande passante du transducteur, quelle est l'écart temporel minimum entre deux impulsions, combien de points doivent posséder les FFT (directe et inverse)?

5.9 Validation de la méthode

On peut répondre à certaines de ces questions afin d'optimiser les calculs et mieux contrôler l'influence de certains paramètres sur les impulsions produites.

On considère un signal reconstitué, toujours à partir du signal fourni, qui comprend le signal réfléchi en surface et deux signaux réfléchis séparés d'un intervalle de temps ajustable, dans ce cas de 1 μ s. L'amplitude du second écho est deux fois plus grande que celle du premier. La largeur de l'impulsion incidente est d'environ 0.5 μ s.

Dans le calcul des impulsions, plusieurs paramètres doivent être pris en compte tels que la largeur de bande passante, les nombres de points des transformée de Fourier directe et inverse. On peut examiner la durée des impulsions obtenues lorsque la bande passante varie. Pour cela on limite le spectre du signal avant la transformée inverse. Cette bande passante influe sur les hauteurs et les largeurs des impulsions comme indiqué sur la Figure 6 - 12. On constate que, pour notre équipement, la largeur minimale d'une impulsion est de 55 ns,

mesurée à mi-hauteur (Figure 6 - 12). Bien que la largeur de l'écho de départ soit assez imprécise, on constate que la largeur minimale de l'impulsion lui est à peu près 10 fois inférieure.

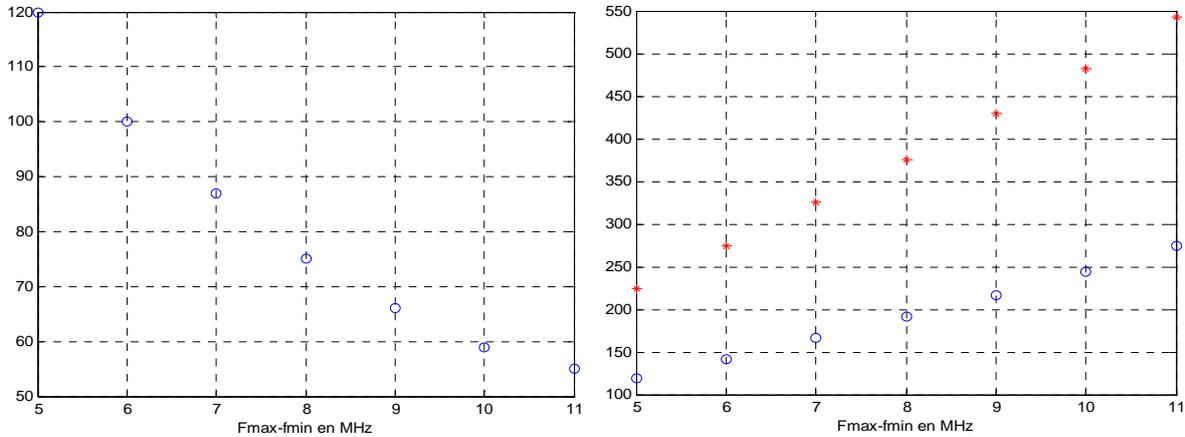


Figure 6 - 12 : Largeur de l'impulsion en fonction de bande passante (à gauche) et Amplitudes des impulsions en fonction de bande passante (à droite)

Les amplitudes croissent lorsque la bande passante augmente et on vérifie que le rapport des amplitudes reste toujours très proche de 2 (Figure 6 - 12).

Une étude de l'influence des nombres de points des transformées de Fourier directe et inverse est aussi réalisée. Dans ce cas, on fixe la bande passante entre 1 MHz et 12 MHz. Les deux impulsions sont toujours séparées de 1 μ s. On montre que la largeur des impulsions est inchangée (55 ns) et que la hauteur diminue quand le nombre de points augmente. La stabilisation est obtenue lorsque le nombre de points atteint 2^{15} ce qui entraîne un temps d'exécution plus important. L'impulsion contient alors 17 points (durée totale de 170 ns).

Il est essentiel que la méthode permette de bien séparer les échos. Pour déterminer la limite de séparation des impulsions, on simule deux impulsions identiques et on modifie leur décalage δt . On relève l'amplitude des deux impulsions notées A et B. Elle vaut 155 lorsque le décalage est important (1 μ s) et reste à cette valeur jusqu'à $\delta t=100$ ns. Lorsque le décalage continue de diminuer, les amplitudes diminuent jusqu'à $\delta t=60$ ns. La séparation est alors mauvaise et si δt devient inférieur à 60 ns, les impulsions finissent par être confondues (et l'amplitude finit par doubler). On peut donc estimer que la séparation des deux impulsions est correcte si δt dépasse 100 ns, c'est-à-dire 2 fois la largeur des impulsions.

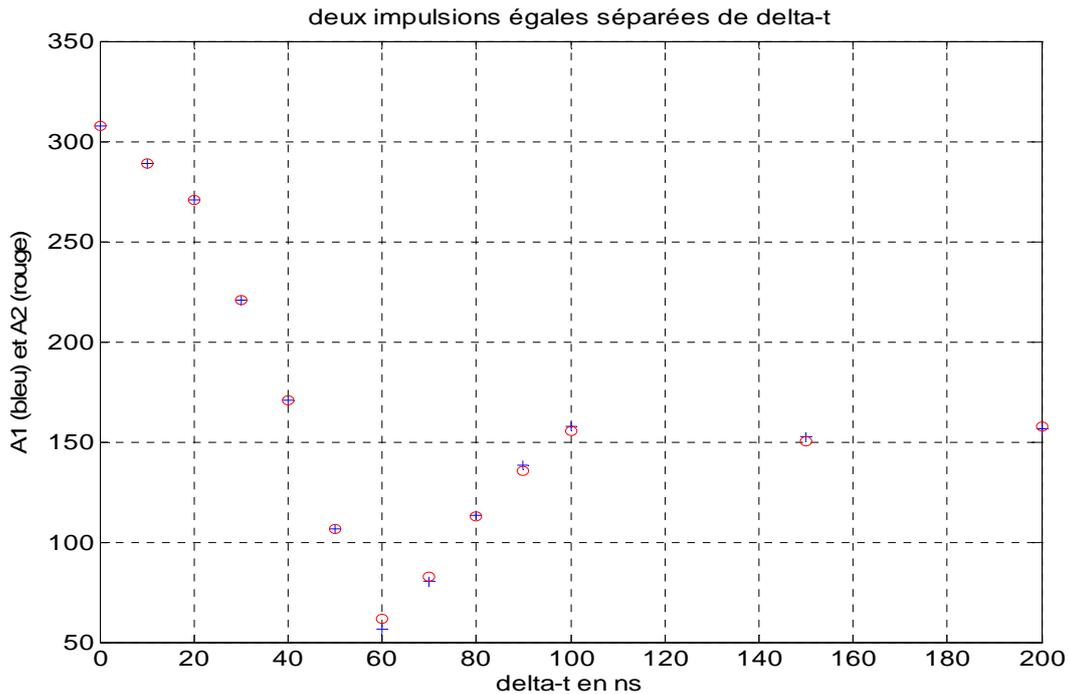


Figure 6 - 13 : Séparation de deux impulsions – Impulsions séparées si $\delta t > 100$ ns – confondues si $\delta t < 50$ ns

5.10 Résultats de la plaque pré imprégnée B01

Après avoir testé la méthode par simulation, on l'applique tout d'abord à une plaque composite pré imprégnée (plaque B01). Cette plaque est constituée de 8 plis bien structurés. Elle a une épaisseur de 2.3 mm et a un très faible taux de porosité. L'atténuation n'est donc pas importante et n'est pas due à des bulles. Ces conditions permettent d'appliquer et de vérifier les performances de la méthode de la réponse impulsionnelle.

La caractérisation des microstructures est très importante car les propriétés mécaniques des composites dépendent forcément de leurs microstructures [57]. Actuellement, il existe des méthodes non destructives permettant de voir les orientations des plis dans le matériau composite comme la microscopie acoustique à haute fréquence [58 59]. Elle consiste à collecter dans les B-Scan les portions de signaux situés dans un même plan et compris dans une fenêtre étroite. La méthode a été appliquée avec des transducteurs focalisant à 50 MHz, donc les visualisations ne font intervenir que de petits échantillons de composite de très faibles épaisseurs.

Le but est donc ici d'appliquer la méthode développée afin de visualiser la structure interne de la plaque B01 à des fréquences nettement inférieures. Les signaux étant assez oscillatoires, la méthode de la réponse impulsionnelle s'impose.

Pour ce travail, on utilise le transducteur 10 MHz de distance focale 1", placé à la distance 25 mm, qui donne la tache focale la plus petite. Les enregistrements sont effectués avec le banc de mesure déjà présenté pour l'obtention des cartographies. L'exploration est réalisée sur une surface de 30x30 mm² avec un pas de déplacement est de 0.2 mm. Les signaux sont échantillonnés à 100 MHz et comportent de 500 à 700 points.

Les données sont tout d'abord enregistrées dans des fichiers au format « .csc ». Ce fichier contient tous les A-scan, les images B-scan, C-scan et toutes les informations de l'expérimentation. Les A-scan sont ensuite exploitées sous forme de B-scan (images au format « .tif »). Chaque B-scan contient plusieurs signaux correspondant à un balayage selon un axe.

La représentation d'un signal A-Scan (Figure 6 - 14, rouge) montre l'existence d'un fort écho de surface, de nombreuses réflexions internes et un écho de fond. La localisation précise des réflexions internes entre fibre et résine ou bien sur des bulles n'est pas possible car les signaux sont trop oscillants. Aucune information ne peut être obtenue juste au-dessous de la surface du composite car l'écho réfléchi par la surface est trop intense et temporellement trop étendu. Les B-Scan associés sont très peu explicites tant les échos aux interfaces sont proéminents et les échos intermédiaires bruités (Figure 6 - 15(a)).

La Figure 6 - 14 montre un signal brut avec sa réponse impulsionnelle non seuillée. On constate que les réflexions internes deviennent bien séparées et que leurs positions sont bien conservées. Les réflexions internes sur les plis sont représentées sous forme des pics plus ponctuels et significatifs.

Ces signaux sont ensuite traités sous Matlab afin de trouver la réponse impulsionnelle de chaque A-scan.

Chaque signal est alors remplacé par sa réponse impulsionnelle correspondante (Figure 6 - 14, bleue). Dans le cas présent, compte tenu de la largeur de bande du transducteur émetteur-récepteur, la largeur de chaque impulsion ne peut être inférieure à 50 ns et la localisation d'une réflexion est bonne. La collecte des réponses impulsionnelles donne un nouveau B-Scan intéressant montrant la présence de réflexions internes entre les deux faces, sans présence de zone morte sous la surface (Figure 6 - 15 (b)).

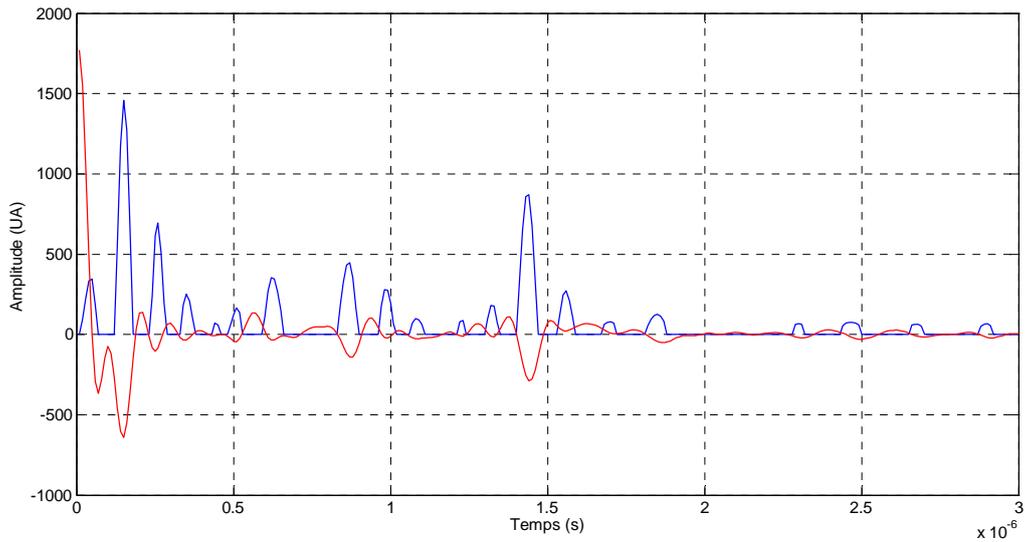


Figure 6 - 14 : Signal brut sur la plaque B01 (rouge) et sa réponse impulsionnelle (bleu)

Chaque pli contient un tissu de fibres de carbone, avec des fibres dans deux directions perpendiculaires. A certains endroits, à l'intérieur d'un pli, le faisceau rencontre une fibre, à d'autres endroits, c'est deux fibres. Il y a donc, dans un pli, une ou deux réflexions internes du type fibre/résine. Ces deux réflexions peuvent être très proches l'une de l'autre. La plaque comportant 8 plis, on doit observer au total un nombre de réflexions compris entre 8 et 16. Pour ces raisons, on trouve un nombre de pics toujours inférieur à 16.

La Figure 6 - 15 montre un B-scan brut et un B-scan traité par cette méthode.

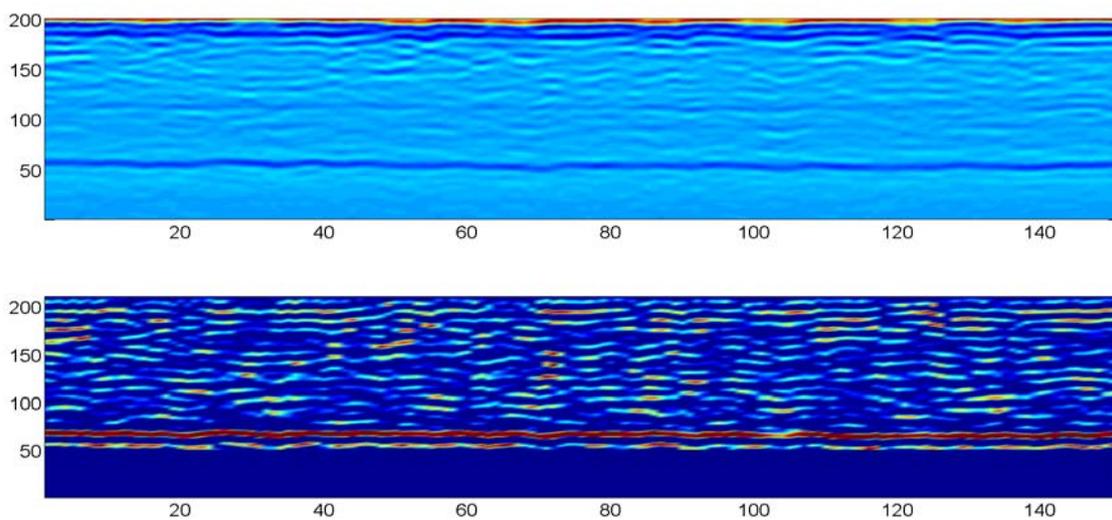


Figure 6 - 15 : (a) B-scan brut de la plaque B01 (en haut) et (b) B-scan traité (en bas)

Si le B-Scan brut ne fournit pas des informations directement exploitables, après calcul de la réponse impulsionnelle pour chaque signal et son seuillage, l'image devient plus interprétable.

Sur la Figure 6 - 15(b), l'écho de surface a disparu. Les impulsions peuvent être attribuées à deux types de réflexions : la réflexion est forte sur une bulle et la réflexion est faible à l'interface fibres-résine (les réflexions résine-fibres sont éliminées par le calcul). Mais, dans le cas de cette plaque B01, de très faible porosité, les bulles sont absentes, les réflexions fibres/résine sont donc majoritaires. Sur fond bleu foncé (absence de signal) se dessinent les lignes de fibres. La position des échos de fond est bien plus nette que sur le B-scan brut. Ce résultat montre que la plaque B01 possède une structure interne assez périodique. Les couches sont assez bien alignées car les plis ne sont pas déformés lors de la fabrication (il n'y a pas d'injection comme pour les plaques RTM).

La collecte de l'ensemble des nouveaux B-Scan sur tout l'échantillon testé est réalisée avec le logiciel spécifique IMAGEJ afin de construire un modèle 3D (X, Y, Z et niveau de gris).

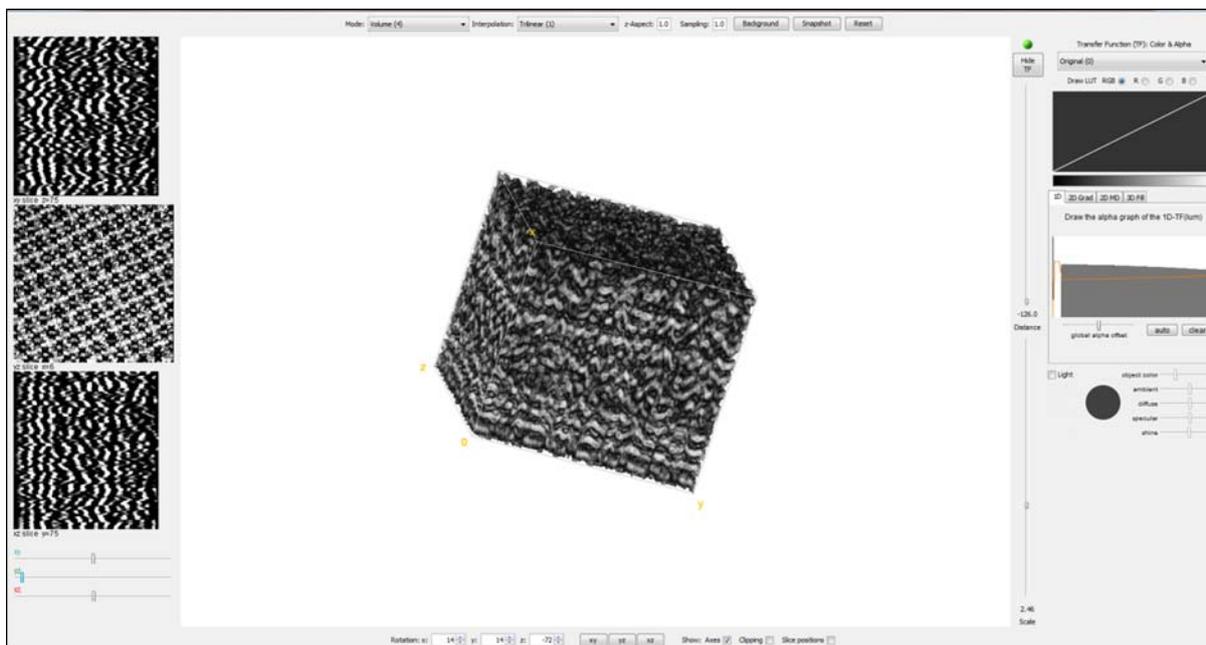


Figure 6 - 16 : Modèle 3D de la plaque pré imprégnée B01 (copie d'écran du logiciel de traitement)

Il est alors possible de visualiser toutes les couches de l'échantillon selon le plan Oyz, c'est-à-dire selon l'épaisseur de la plaque. Cette plaque est constituée de 8 plis empilés et orientés à 0, 45, -45, 90, 90, -45, 45, 0 degré [60]. L'épaisseur de la plaque, soit 2.3 mm, est divisée en 50 coupes ce qui donne environ 6 coupes par pli. Chacune a une épaisseur de l'ordre de 50µm. La Figure 6 - 17 montre les 4 premiers plis correspondant aux coupes numéro 2, 10, 16, 20 situés dans les 4 premiers plis. On peut distinguer l'orientation des plis internes.

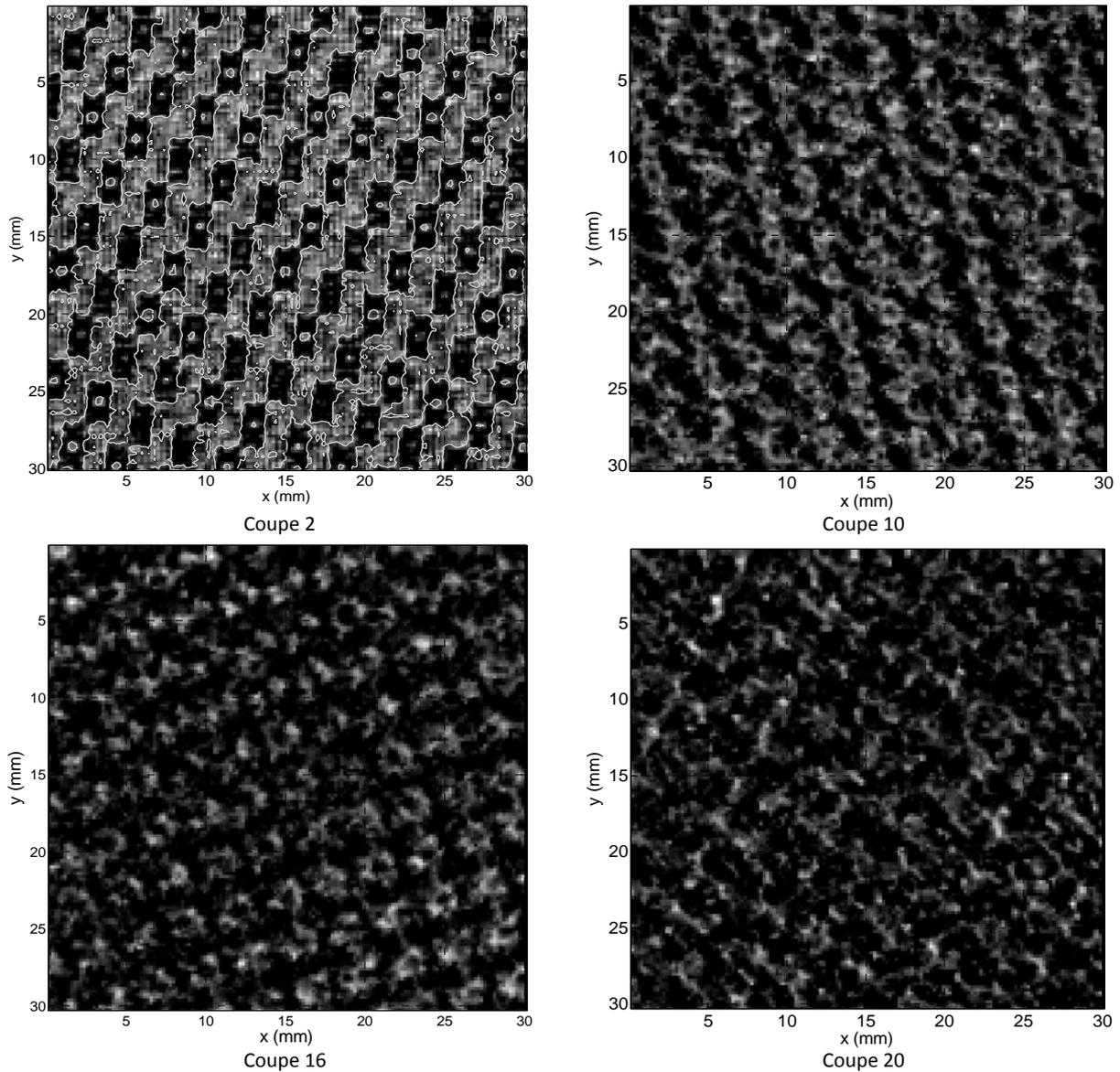


Figure 6 - 17 : Orientation des 4 premiers plis

Les images issues de la première moitié de l'épaisseur sont assez nettes et les informations sur l'orientation des plis lisible. Pour aider la visualisation de la coupe 2, la plus nette, on a reporté sur la Figure 6 - 17 (coupe 2) le squelette de la cartographie de l'écho de surface. Les mêmes motifs sont moins visibles sur la Figure 6 - 17 coupe 10, coupe 16, coupe 20. Ensuite, la deuxième moitié de la plaque est visualisée. Les coupes 28, 34, 40, 49 qui sont présentés Figure 6 - 18 correspondent aux 4 derniers plis. On peut établir une correspondance entre les coupes 10 et 40, entre 16 et 34, entre 20 et 28. Par contre la comparaison entre les coupes 2 et 49 n'est pas possible car l'état de la surface arrière n'est pas bon (causé par le drapage, lors de la fabrication).

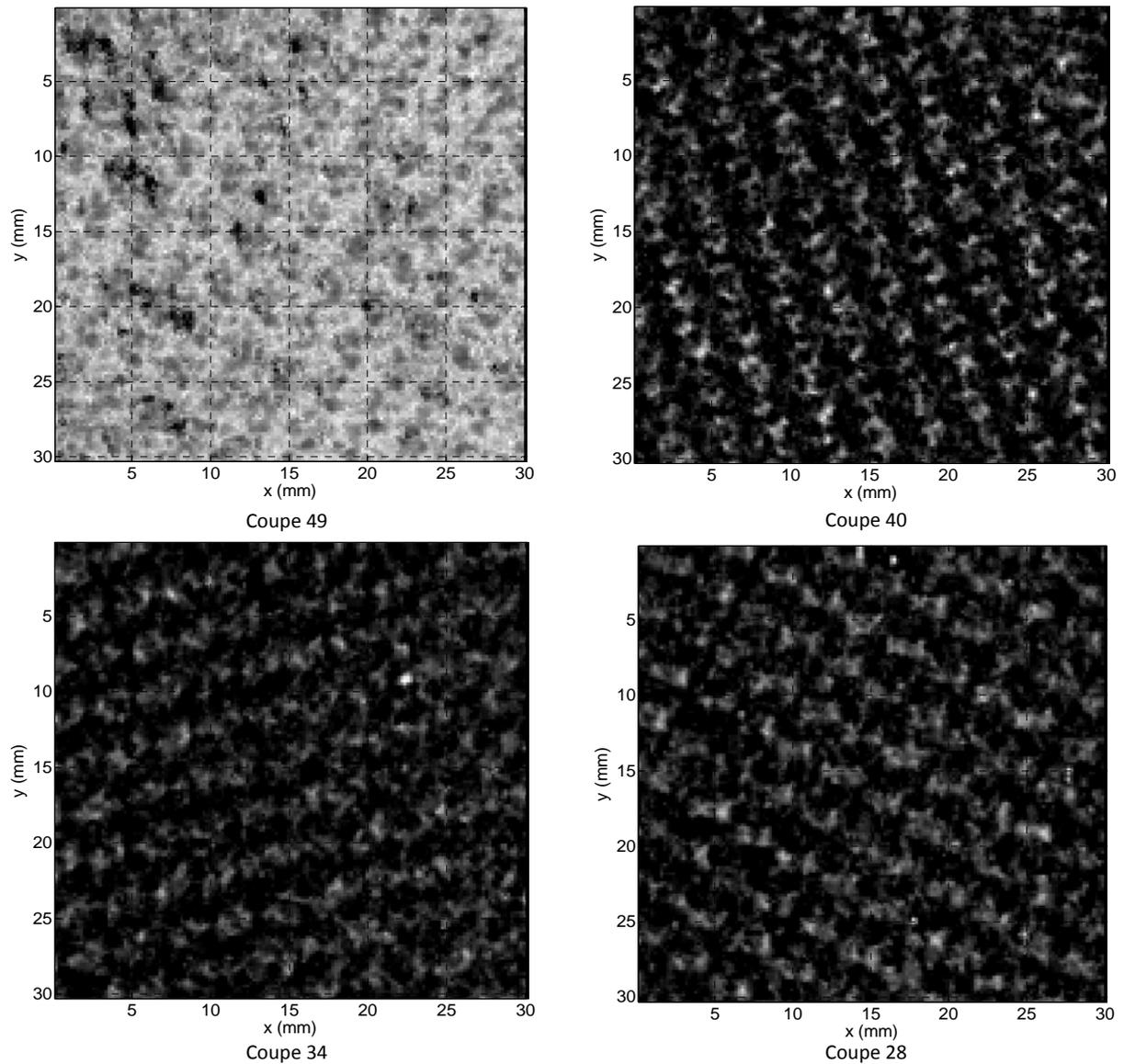


Figure 6 - 18 : Orientation de 4 derniers plis

Bien que les ondes soient de plus en plus atténuées lorsqu'elles se propagent vers le fond de la plaque, l'orientation des plis reste visible.

5.11 Résultats de la plaque RTM1012

La méthode de la réponse impulsionnelle donne de bons résultats sur la plaque pré imprégnée. La méthode est ensuite appliquée à l'analyse de la plaque RTM1012 et les résultats sont comparés à ceux issus de la tomographie à rayons X. La Figure 6 - 19 montre un signal réfléchi par la plaque RTM1012 et sa réponse impulsionnelle. Cette figure permet de constater que les réflexions internes contenues dans les signaux intermédiaires deviennent bien distinctes et séparées.

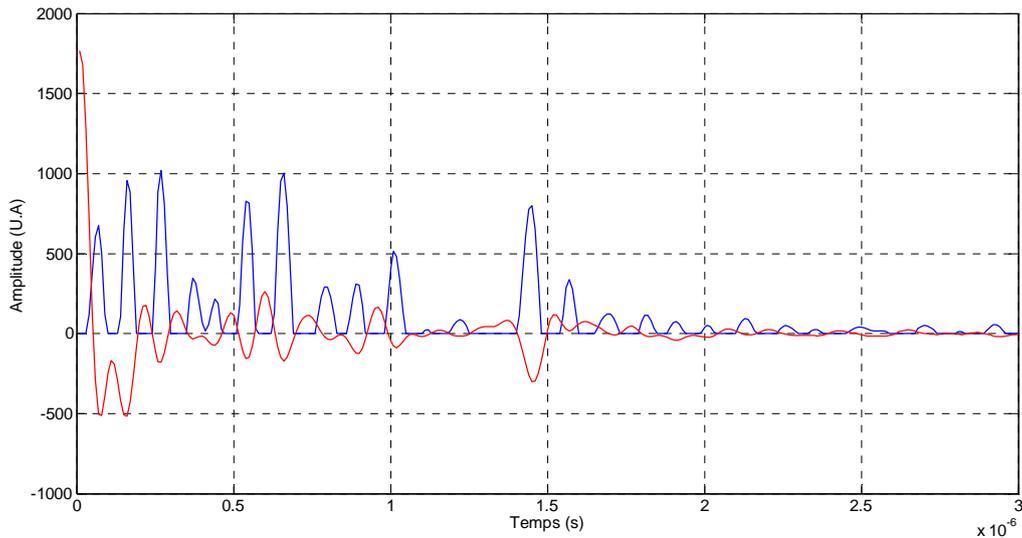


Figure 6 - 19 : Signal brut de la plaque RTM (rouge) et sa réponse impulsionnelle (bleu)

Les B-scan issus des signaux bruts et traités sont présentés Figure 6 - 20. Comme dans le cas de la plaque B01, les informations sont plus intéressantes dans le B-Scan traité qui permet de visualiser des défauts contenus dans la plaque. Néanmoins la forte inhomogénéité de la plaque RTM1012 et l'atténuation qui en résulte ne permettent pas d'accéder de façon correcte aux informations dans la seconde moitié de la plaque. Au fond les B-Scan sont plus difficiles à exploiter que dans le cas de la plaque pré imprégnée.

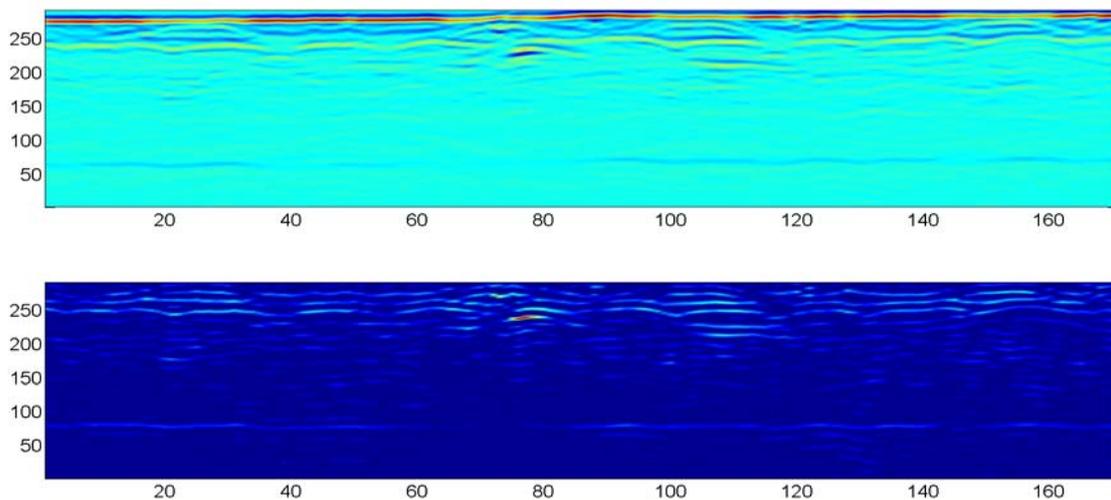


Figure 6 - 20 : (a) B-scan brut de la plaque RTM (en haut) et (b) B-scan traité (en bas)

Chaque B-scan correspond à un balayage. Comme pour la plaque B01, chaque B-scan nous renseigne sur la structure interne (réflexions fibres/résine) mais aussi précise les réflexions sur des vides. En augmentant le niveau du seuil de la réponse impulsionnelle, on récupère uniquement les informations sur les porosités (avec un certain risque d'erreur). Le problème

rencontré est le même que celui du seuillage en tomographie X. L'ensemble de ces nouveaux B-scan permet de construire un modèle 3D présenté (illustré) Figure 6 - 21.

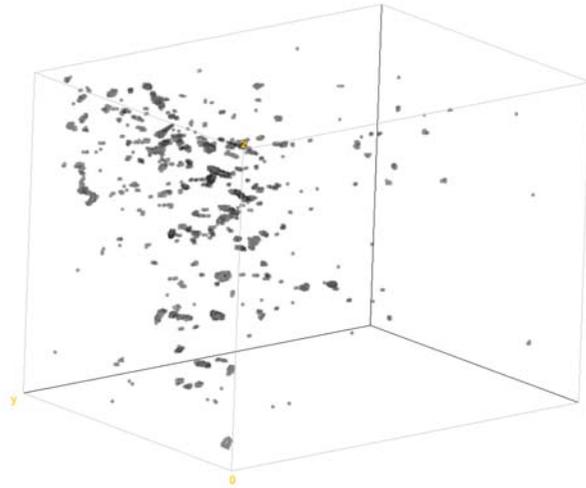


Figure 6 - 21 : Modèle 4D de la tomographie ultrasonore

Dans cette représentation X, Y, Z, l'axe Z a été dilaté afin de mieux distinguer la structure interne de l'échantillon. Les défauts sont en gris. Les coordonnées précises de chaque défaut sont connues. Le résultat obtenu est du le même type que celui de la tomographie à rayons X. La tomographie ultrasonore obtenue reste encore imparfaite et ne donne pas encore des résultats exploitables.

Dans la tomographie à rayons X, chaque rayon traverse la plaque d'autant plus facilement qu'il y a des défauts. C'est le contraire pour le faisceau ultrasonore. Plus il y a de défauts, plus le faisceau ultrasonore s'atténue. De plus sur un axe dans la direction de l'épaisseur, il est possible qu'il existe plusieurs défauts alignés : dans ce cas le défaut de plus forte dimension masque les autres et il n'en est alors comptabilisé qu'un seul. Des améliorations clairement identifiées sont à envisager.

On peut toutefois comparer les radios résultant de ces deux tomographies (Figure 6 - 22). Sans être semblables les deux images contiennent des points de similitudes intéressants et encourageants.

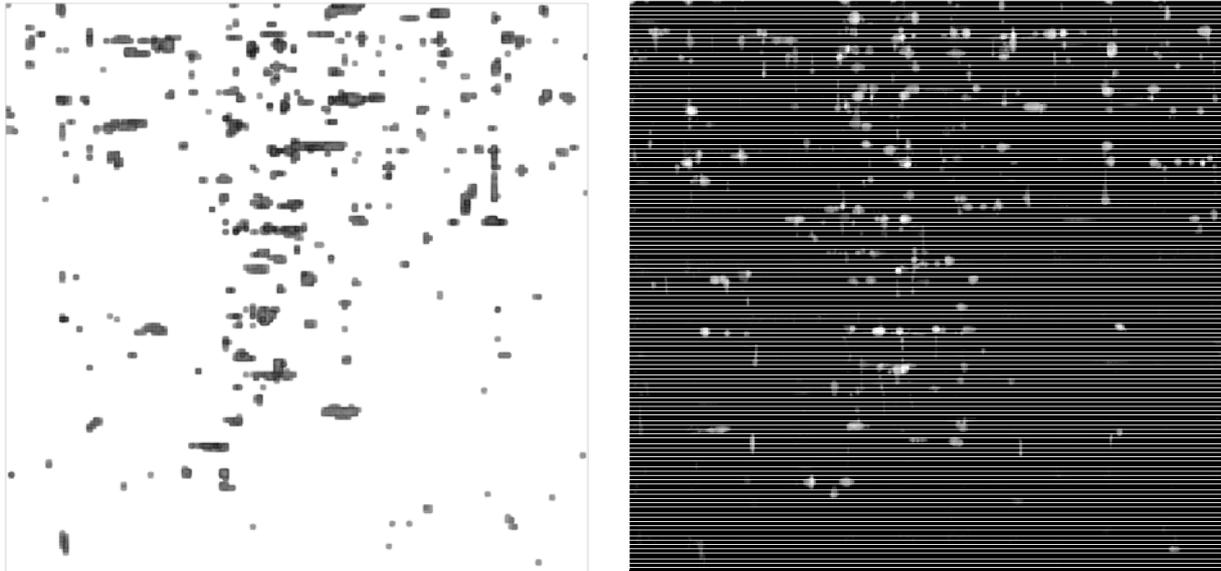
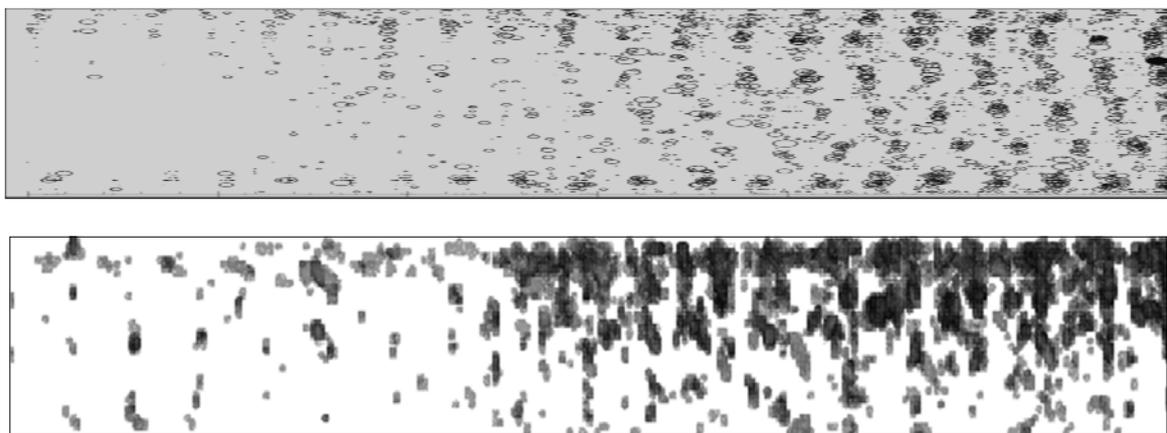


Figure 6 - 22 : Radio ultrasonore (à gauche) et Radio tomographique (à droite)

Si on compare (Figure 6 - 23) la radiographie obtenue dans le chapitre 5 à la Figure 5 - 27(b) qui est le résultat de l'analyse quantitative de la tomographie à rayons X avec une radiographie dans le plan (X, Z) issue de la tomographie ultrasonore, on constate que les résultats ne sont pas identiques mais que les distributions globales des porosités présentent certaines similitudes intéressantes qui ne sont pas contradictoires. Il est évident que comme pour les résultats des chapitres 4 et 5 sur les cartographies, un travail plus poussé sur les conditions de seuillage des deux tomographies doit être réalisé pour permettre une comparaison raisonnable.



**Figure 6 - 23 : (en haut) Radiographies de la Figure 5 - 27(b)
(en bas) radiographie US vues sur la face du plan (X, Z)**

5.12 Conclusion

Dans le domaine du contrôle des composites, la tomographie à rayons X est très performante. Elle donne des informations très précises. Il subsiste néanmoins des inconvénients qui limitent ses applications tels que le prix élevé de l'équipement ou les dimensions réduites de la surface examinée. Une imagerie 3D ultrasonore moins performante mais plus facile à mettre en œuvre et plus simple à implanter dans un contexte industriel est une bonne alternative. Ce chapitre ne revendique pas un tel résultat mais apporte une contribution nouvelle dans cette voie.

La méthode de la réponse ultrasonore impulsionnelle présentée ouvre des perspectives intéressantes quant à l'exploitation de l'ensemble des échos intermédiaires et des représentations de type B-Scan. En effet ce traitement des signaux remplace les signaux A-Scan par des impulsions de façon à faire apparaître plus distinctement les contributions des plis ou de la porosité.

Des représentations 3D comparables à celle de la tomographie à rayons X ont été obtenues pour deux types d'échantillons de matériaux composites. La succession des plis et leurs orientations ont été visualisées pour une plaque de pré-imprégné. La porosité a été localisée, avec une qualité moindre, pour une plaque de RTM.

Cette moindre qualité s'explique en partie par la complexité du matériau. La structure interne est plus aléatoire dans les matériaux RTM à cause de la déformation des plis lors de l'injection. Il est de fait plus difficile de distinguer des réflexions engendrées par les plis et par les pores dans la plaque surtout si elles sont masquées par un premier défaut. Dans les conditions expérimentales mises en œuvre l'atténuation limite l'efficacité en profondeur. Des améliorations s'imposent tant dans le dispositif et le protocole expérimental que dans le traitement des signaux. Ce travail est en cours de réflexion.

Conclusion et perspectives

Ce travail fait partie des nombreuses études sur les matériaux composites utilisés pour l'aéronautique. Il est à la fois une étude industrielle et une recherche de laboratoire. Ce travail de thèse avait plusieurs objectifs:

- relier la porosité et l'atténuation ultrasonore d'une plaque composite de type RTM.
- amorcer une étude de tomographie ultrasonore comparée à la tomographie X.
- montrer que les ultrasons peuvent aider à la mise au point d'une technique d'injection.
- faire le lien avec des travaux antérieurs (S. Arnaud [2]) et apporter des informations plus précises sur la porosité des plaques.

Cette étude a été réalisée en collaboration avec d'autres chercheurs du LOMC qui ont réalisé les plaques. Nous avons aussi bénéficié de l'apport technologique de Safran Composites en matière de tomographie X.

Pour établir la relation entre porosité et atténuation ultrasonore des plaques composites on a utilisé des transducteurs plans et focalisant et utilisé la méthode de réflexion (pulse-écho). Le banc MISTRAS a été utilisé avec divers transducteurs mono-élément. L'étude de ces transducteurs (chapitre 2) a permis de les classer selon les besoins d'utilisation. Les transducteurs utilisés ont tous une fréquence centrale de 10 MHz. Le transducteur focalisant à 2" et de diamètre 0.5" a été très utilisé pour réaliser des cartographies de surface et de fond. La précision mécanique du dispositif permet de faire des cartographies d'une bonne précision. Le transducteur focalisant à 2" et de diamètre 0.25" a montré des propriétés surprenantes. Il se comporte comme (et même mieux) un transducteur plan et permet une mesure de l'atténuation sur une surface de l'ordre de 1.5 mm^2 . Ce qui a permis, ensuite, l'étude comparative de l'atténuation et de la porosité.

La mesure de l'atténuation par la méthode pulse-écho est bien connue et donne des résultats intéressants. Cependant, l'exploitation des mesures demande un temps trop important pour être répété de milliers de fois lors du balayage d'une plaque ($450 \times 300 \text{ mm}^2$). Afin de gagner en temps, nous avons utilisé un calcul simplifié de l'atténuation à comparer avec la porosité. L'atténuation simplifiée, possédant la même équation de dimensions que

l'atténuation, a été testée et comparée un grand nombre de fois, à la valeur de l'atténuation mesurée à 8 MHz. Sa valeur est évidemment différente mais la correspondance biunivoque avec la porosité est tout aussi valable que celle obtenue avec l'atténuation mesurée à une fréquence donnée.

On a cherché à établir un pont entre nos mesures, réalisées avec des mono-éléments, et celles réalisées par la technique par multiéléments. Sans ôter aux multiéléments leurs qualités, nous avons pu constater que notre méthode apporte plus de précision sur la porosité des plaques (tout en demandant plus de temps).

Une application parmi d'autres, concernant le suivi en continu du taux de porosité dans le sens de l'injection de la résine lors de l'élaboration d'une plaque, illustre dans ce travail l'apport des ultrasons à la mise au point d'une technique d'injection.

La correspondance entre porosité et atténuation a été établie dans le cas de l'atténuation fréquentielle (à 8 MHz) et de l'atténuation simplifiée. Les correspondances, établies sur des surfaces très différentes, montrent que la notion de porosité est indissociable de la surface de mesure et que notre méthode conduit à une valeur de porosité correcte pour une surface élémentaire d'au moins 70 mm².

Les signaux réfléchis donnés par la méthode pulse-écho montrent la présence de réflexions internes. Leur origine est diverse: réflexions entre plis, bulles enfermées dans la résine, délaminations, Pour localiser ces réflecteurs internes, nous avons utilisé la tomographie à rayons X, technologie servant de référence actuellement. Les données obtenues à l'aide du tomographe Safran ont été utilisées et ont permis non seulement de donner des images 3D d'un composite, mais aussi de fournir la taille des bulles logées dans la résine et les localiser de façon satisfaisante. Ainsi, on a pu montrer que la méthode d'injection utilisée bloque la moitié des bulles entre les mèches de carbone.

Enfin, nous avons tenté de réaliser une méthode apparentée à la tomographie ultrasonore spécifique, appliquée à des plaques. On a montré, au chapitre 6, que la comparaison entre les rayons X et les ultrasons est grande et que leurs processus d'interaction avec la matière sont très différents. Ceci n'empêche pas de tenter une comparaison. Nous mettons plus de chances de notre côté en remplaçant les signaux réels par leur réponse impulsionnelle, c'est à dire la réflexion que donnerait un signal impulsionnel $\delta(t)$ à la place du signal incident. La réponse

impulsionnelle de la plaque permet de détailler les réflexions internes. Les réflexions sur les défauts sont bien mis en évidence si le transducteur est focalisant avec une résolution latérale faible (transducteur de focale 1" et de diamètre 0.5").

L'ensemble des résultats a permis d'établir un modèle 3D d'une plaque composite appelé tomographie ultrasonore. Ce modèle est comparable à la tomographie à rayons X. A cause de la complexité du matériau composite, il existe encore des différences importantes entre les deux modèles.

Ces études donnent des résultats encourageants et leur amélioration constitue une perspective intéressante.

Evidemment les résultats obtenus en tomographie ultrasonore seront meilleurs si les signaux ultrasonores sont plus proches d'une impulsion.

Utiliser des fréquences plus importantes est aussi une perspective intéressante. Au prix d'un changement de matériel d'émission, il serait alors possible de mieux séparer les réflexions et donc, de mieux connaître la structure interne d'un matériau. L'obstacle est l'atténuation des composites, mais il est toujours possible d'augmenter la puissance d'émission.

Dans le domaine théorique on peut envisager des études portant sur la propagation dans des milieux composites modélisés. L'étude des matériaux aux propriétés aléatoires est une piste possible. De plus l'introduction des ondes transverses, que nous avons négligées totalement, devrait améliorer les représentations.

Bibliographie

- [1] C. A. HOWE, R. J. PATON, A. A. GOODWIN : A comparison between voids in RTM and prepreg carbon/epoxy laminates. *11th International Conference on Composite Materials*, 1997.
- [2] S. ARNAUD : Contribution à la compréhension de la formation de défauts d'élaboration par RTM d'un composite stratifié Carbone/Epoxy – Influences sur le comportement hygrothermique et abattement des propriétés thermomécaniques. *Thèse de doctorat*. Université Caen, 2013.
- [3] P. J. SHULL : Nondestructive Evaluation : Theory, Techniques and Applications. Ed. Marcel Dekker, New York, 2002.
- [4] C. GARNIER, M-L PASTOR, F.EYMA, and B. LORRAIN : The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using Non Destructive Testing. *Composite Structures*, 93 : 1328-1336, 2011.
- [5] D. W. SCHINDEL : Air-coupled ultrasonic measurements of adhesively bonded multi-layer structure. *Ultrasonics*, 37 : 185-200, 1998.
- [6] S. P. KELLY, R. FARLOW and G. HAYWARD : Application of through air ultrasound for rapid NDE scanning in the aerospace industry. *IEEE UFFC*, 43 (3) : 581, 1996.
- [7] OLYMPUS : Phased array : basic theory for industrial applications. NDT Field Guides, Olympus NDT, 2010.
- [8] D. ROYER et E. DIEULESAINT : Ondes élastiques dans les solides. Ed. Masson, Paris, 1996.
- [9] P. HE, J. ZHENG : Acoustic dispersion and attenuation measurement using both transmitted and reflected pulses. *Ultrasonics*, 39 : 27-32, 2001.
- [10] A. EL MOUHTADI : Caractérisation ultrasonore de plaques viscoélastiques homogènes et composites. *Thèse de doctorat*, Université Le Havre, 2011.
- [11] W. CHEN et J. WU : Reflectometry using longitudinal, shear and rayleigh waves. *Ultrasonics*, 38 : 909-913, 2000.

- [12] M. O'DONNELL, E. T. JAYNES et J. G. MILLER : Kramers-Kronig relationship between ultrasonic attenuation and phase velocity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 69 (3): 696-701, 1981.
- [13] T. L. SZABO : Causal theories data for acoustic attenuation obeying a frequency power law. *J. Acoust. Soc. Am.*, 97 (1): 14-24, 1995.
- [14] T. L. SZABO : A model for longitudinal and shear wave propagation in viscoelastic media. *J. Acoust. Soc. Am.*, 107 (5): 2437-2446, 2000.
- [15] P. HE : Measurement of acoustic dispersion using both transmitted and reflected pulses. *J. Acoust. Soc. Am.*, 107 (2): 801-807, 2000.
- [16] H. J. MCSKIMIN et P. JR. ANDREATCH : A water immersion technique for measuring attenuation and phase velocity of longitudinal wave in plastics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 49 (3) Part2 : 713-722, 1971.
- [17] M. DANIEL, S. C. WOOH et I. KOMSKY : Quantitative porosity characterization of composite materials by mean of ultrasonic attenuation measurements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 11 (1), 1992.
- [18] P. HE : Determination of ultrasonic parameters based on attenuation and dispersion measurements. *Ultrasonics Imaging*, 20 : 275-287, 1998.
- [19] P. HE : Simulation of ultrasound pulse propagation in lossy media obeying a frequency power law. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Contr.*, 45 (1) : 114-125, 1998.
- [20] J.M. CONOIR : La diffusion acoustique. N. Gespa, CEDOCAR Paris, 1987.
- [21] A. KHALED, P. MARECHAL, O. LENOIR, M. E.-C. EL-KETTANI, D. CHENOUNI : Study of the resonances of periodic plane media immersed in water: Theory and experiment. *Ultrasonics*, 53 (3) : 642-647, 2013.
- [22] J. A. ARCHER-HALL, A. I. BASHER : A single integral computer method for axisymmetric transducers with various boundary conditions. *Nondestructive testing International*, 13 (3) : 95-101, 1980.
- [23] J. M. CANNATA, T. A. RITTER, W. H. CHEN, K. K. SHUNG : Design of focused single element (50-100 MHz) transducers using lithium niobate. *IEEE Proceedings of the Ultrasonics Symposium*, 2000.
- [24] A. O. JR. WILLIAMS : Acoustic intensity distribution from a piston source. *J. Acoust. Soc. Am.*, 17 (3) : 219-227, 1945.
- [25] B. G. LUCAS and T. G. MUNIVERSITÉR : The field of a focusing source. *J. Acoust. Soc. Am.*, 72 (4) : 1289-1296, 1982.
- [26] L. AZAR, Y. SHI and S.WOOH : Beam focusing behavior of linear phased arrays. *NDT&E International*, 33 : 189-198, 2000.

- [27] S. WOOH and Y. SHI : Optimum beam steering of linear phased arrays. *Wave Motion*, 29 : 245-265, 1999.
- [28] N. T. DUONG, J. DUCLOS, P. MARECHAL et P. PAREIGE : Cartographie ultrasonore d'une plaque de composite RTM : Estimation de l'atténuation locale. *12^e Congrès Français d'Acoustique*, Poitiers, France, 2014.
- [29] O. A. JR. WILLIAMS : The piston source at high frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.*, 23 (1) : 1-6, 1951.
- [30] P. H. ROGERS and A. L. VAN BUREN : An exact expression for the Lommel diffraction correction integral. *J. Acoust. Soc. Am.*, 55 (4) : 724-728, 1974.
- [31] E. RUIZ, V. ACHIM, S. SOUKANE, F. TROCHU, J. BREARD : Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfers molding composites. *Composites Sciences and Technology*, 66 : 475-486, 2006.
- [32] L.BERREUR, B. DE MAILLARD et S. NOSPERGER: L'industrie française des matériaux composites, Nodal Consultants, 2002.
- [33] Document HEXCEL : Prepreg Technology.
- [34] A. LEBEL-LAVACRY : Modélisation et simulation de la saturation en milieu fibreux à double échelles de pores pour la mise en œuvre des matériaux composites par procédé RTM. *Thèse de doctorat*, Université Le Havre, 2012.
- [35] S. HENRI : *Hydrogéologie. 2*, Paris : Ecole Nationale Supérieure du pétrole, 1955.
- [36] Y. LEDRU : Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques. *Thèse de doctorat*, Université Toulouse, 2009.
- [37] S. GUEROULT : Analyse expérimentale de la saturation des milieux fibreux à double échelle de pores: Application à la mise en œuvre des matériaux composites par procédé RTM. *Thèse de doctorat*, Université Le Havre, 2012.
- [38] D. LECOINTE : Caractérisation et simulation des processus de transferts lors d'injection de résine pour le procédé RTM. *Thèse de doctorat*, Université Nantes, 1999.
- [39] V. ROHATGI, N. PATEL, L. J. LEE : Experimental investigation of flow induced microvoids during impregnation of Unidirectional stitched fiberglass mat. *Polymer Composites*, 17 (2) : 161-170, 1996.

- [40] E. EREN, S. KURAMA, and I. SOLODOV : Characterization of porosity and defect imaging in ceramics tile using ultrasonic inspections. *Ceramics International*, 38 : 2145-2151, 2012.
- [41] W. HARIZI : Caractérisation de l'endommagement des composites à matrice polymère par une approche multi technique non destructive. *Thèse de doctorat*. Ecole des Mines de Douai, 2012.
- [42] N. T. DUONG, J. DUCLOS, L. BIZET, and P. PAREIGE : Relation between the ultrasonic attenuation and the porosity of a RTM composite plate. *International Congress on Ultrasonics*, Metz., 10-14 may 2015. Texte publié dans : *Physics Procedia*, 70 : 554-557, 2015.
- [43] J. S. LECLERC and E. RUIZ : Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding. *Composites Part A*, 39 : 1859-1868, 2008.
- [44] J. E. LITTLE, X. YUAN and M. I JONES : Characterization of voids in fiber reinforced composite materials. *NDT&E International*, 46 : 122-127, 2012.
- [45] Y. NIKISHKOV, L. AIROLDI, A. MAKEEV : Measurement of void in composites by X-ray Computed Tomography. *Composites Science and Technology*, 89 : 89-97, 2013.
- [46] J. KASTNER, B. PLANK, D. SALABERGER and J. SELELJA : Defect and porosity determination of fiber reinforced polymers by X-ray computed tomography. *2nd International Symposium on NDT in aerospace*, 2010.
- [47] D. K .HSU and S. M. NAIR : Evaluation of porosity in graphite-epoxy composite by frequency dependence of ultrasonic attenuation. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 6 : 1185-1193, 1987.
- [48] H. JEONG, D. K. HSU : Experimental analysis of porosity-induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites. *Ultrasonics*, 33 (3) :195-203, 1995.
- [49] M. DANIEL, S. C. WOOH and I. KOMSKY : Quantitative porosity characterization of composite material by mean of ultrasonic attenuation. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 11 N°1: 1-8, 1992.

- [50] N. OTSU : Threshold selection method from gray level histograms. *IEEE Trans. Syst., Man. Cyber.*, 9 : 62-66, 1979.
- [51] F. A. REED, T. J. BATZINGER and R. W. REED : Porosity measurement in composites using ultrasonic attenuation methods. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 12 : 1265-1272, 1993.
- [52] L. LIN, M. LUO, H. T. TIAN, X. M. LI and G. P. GUO : Experimental investigation on porosity of carbon fiber reinforced composite using ultrasonic attenuation coefficient. *17th World Conference on Nondestructive Testing*, 2008.
- [53] H. JEONG, D. K. HSU : Quantitative estimation of material properties of porous ceramics by means of composite micromechanics and ultrasonic velocity. *NDT&E International*, 29 (2) : 95-101, 1996.
- [54] K. B. KIM, D. K. HSU, D. J. BARNARD : Estimation of porosity content of composite materials by applying discrete wavelet transform to ultrasonic backscattered signal. *NDT&E International*, 56 : 10-16, 2013.
- [55] P. RECOTILLET : Tomographie ultrasonore en réflexion : Application au contrôle non destructif des matériaux. *Thèse de doctorat*. Université Aix Marseille 2, 1992.
- [56] J. P. LEFEBVRE : La tomographie d'impédance acoustique. *Traitement du signal*. 2(2) : 103-110, 1987.
- [57] D. GREEN, F. J. GUILD : Quantitative microstructural analysis of a continuous fiber composite. *Composites*, 22 (3) : 239-242, 1991.
- [58] S. LIU, E. GUO, V. M. LEVIN, F. LIU, Y. S. PETRONYUK, Q. ZHANG : Application of pulse acoustic microscopy technique for 3D imaging bulk microstructure of carbon fiber composite. *Ultrasonics*, 44 : 1037-1044, 2006.
- [59] F. AYMERICH, S. MEILI : Ultrasonic evaluation of matrix damage in impacted composite laminates. *Composites, Part B* 31 : 1-6, 2000.
- [60] Y. GELEBART : Evaluation non destructive par ultrasons du vieillissement thermique d'une structure composite. *Thèse de doctorat*. Université. Le Havre, 2007.

