

N° d'ordre : 2934

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

par **Marie Cinquin**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Mécanique

**SUIVI PAR ONDES GUIDÉES DE L'ÉTAT DE SANTÉ DE RÉSERVOIRS
COMPOSITES**

Soutenue le : 9 décembre 2004

Après avis de :

M. R. EL GUERJOUMA, Professeur, Université du Maine, Le Mans	Rapporteurs
M. J.L. IZBICKI, Professeur, Université du Havre, Le Havre	

Devant la commission d'examen formée de :

M. J.-C. BATSALE, Professeur, Bordeaux ENSAM	Président
Melle. P. BRASSIER, Ingénieur, EADS-ST, Saint-Médard-en-Jalles	Examineurs
M. M. CASTAINGS, Maître de Conférences, H.D.R., Université Bordeaux I	
M. R. EL GUERJOUMA, Professeur, Université du Maine, Le Mans	
M. B. HOSTEN, Directeur de Recherche C.N.R.S., Université Bordeaux I	
M. J.L. IZBICKI, Professeur, Université du Havre, Le Havre	
M. P. PÉRÈS, Ingénieur, EADS-ST, Saint-Médard-en-Jalles	

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe Ultrasons Matériaux du Laboratoire de Mécanique Physique de l'Université Bordeaux 1, en collaboration avec EADS SPACE transportation.

Je tiens à remercier Monsieur D. Desjardins, Professeur à l'Université Bordeaux 1, pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Je remercie sincèrement Monsieur J.L. Izbicki, Professeur à l'Université du Havre, et Monsieur R. El Guerjouma, Professeur à l'Université du Maine, pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Mes sincères remerciements à Monsieur J.C. Batsale, Professeur à l'ENSAM de Bordeaux, pour avoir présidé le jury de soutenance.

Je remercie très vivement Monsieur B. Hosten, Directeur de recherche au CNRS, pour avoir accepté de diriger ces travaux et Monsieur M. Castaings, Maître de conférences à l'Université Bordeaux 1, pour son encadrement. Mes sincères remerciements à Monsieur P. Pères et Madame P. Brassier, Ingénieurs chez EADS SPACE Transportation, pour leur suivi et leur disponibilité.

Mes remerciements iront aussi à Monsieur J. Fong, du groupe NDT de l'Imperial College à Londres, pour son aide sur l'utilisation du logiciel DISPERSE. Je remercie très sincèrement Monsieur Cavalier d'ACF Composites et Messieurs Durant et Cona du service cryogénie de l'ICMCB, pour leur précieuse aide et leur grande disponibilité.

Je remercie très sincèrement tous les membres du laboratoire qui m'ont soutenue pendant de ces trois années au laboratoire.

Pour finir, je voudrais remercier, sans ordre particulier, tous mes amis du laboratoire pour m'avoir épaulée durant près de quatre années : Jérôme, Matthieu, Manu, Guillaume, Sébastien, Hinde, Raynald, Sylvain, Béatrice, Céline, Katy, Laura, Clément, Anis, Thomas, Mathieu, Christine, Cécile, Guillaume, Pascale, Olivier, Rachel, Marion et Jérémy.

*Je dédie ce travail à mes parents en leur rappelant que :
« Rien ne sert de courir, il faut partir à point ».*

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I. PROPAGATION DES ONDES GUIDÉES : OUTILS NUMÉRIQUES ET EXPÉRIMENTAUX.....	5
I.1. INTRODUCTION	5
I.2. DÉFINITION DES DONNÉES DE L'ÉTUDE.....	5
I.3. PROBLÈME DIRECT.....	7
I.3.1. Méthode des matrices d'impédance de surface	7
I.3.2. Dispositif expérimental et traitement des signaux	10
I.3.3. Validation du problème direct.....	13
I.3.4. Reproductibilité des mesures	15
I.4. PROBLÈME INVERSE : ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE PAR ONDES GUIDÉES.....	17
I.4.1. Sensibilité des ondes guidées aux modules de viscoélasticité	17
I.4.2. Procédures d'optimisation des modules de viscoélasticité	20
I.4.3. Validation du problème inverse.....	21
I.5. CONCLUSION.....	22
CHAPITRE II. CONTRÔLE PAR ONDES GUIDÉES DU TAUX D'HUMIDITÉ DANS DES PLAQUES COMPOSITES.....	25
II.1. INTRODUCTION	25
II.2. PROCÉDÉS DE PRISE EN EAU ET DE SÉCHAGE	26
II.2.1. Évolution de masse sur la plaque n°I.....	27
II.2.2. Évolution de masse sur la plaque n°II.....	28
II.3. SENSIBILITÉ DES ONDES GUIDÉES AU TAUX D'HUMIDITÉ	30
II.3.1. Contrôle du taux d'humidité.....	30
II.3.2. Estimation de la partie imaginaire du module de Coulomb.....	34
II.4. CONCLUSION.....	35
CHAPITRE III. CONTRÔLE PAR ONDES GUIDÉES DE LA MICROFISSURATION DE PLAQUES COMPOSITES SOUMISES À DES ENVIRONNEMENTS BASSES TEMPÉRATURES	37
III.1. INTRODUCTION	37
III.2. PLAQUE CARBONE ÉPOXYDE [0/+60/-60] _{33S}	38
III.2.1. Présentation du matériau composite utilisé.....	38
III.2.2. Protocoles d'endommagement thermique basses températures.....	39
III.2.3. Sensibilité des ondes guidées aux cycles basses températures	40
III.2.3.1. Reproductibilité des mesures	40
III.2.3.2. Variations des modes guidés aux sollicitations basses températures	40
III.2.3.3. Variations des modules élastiques	42

III.2.4.	<i>Étude de la microfissuration par micrographies</i>	43
III.2.5.	<i>Discussion</i>	47
III.3.	PLAQUES CARBONE-ÉPOXYDE [0/+45/90/-45] _{XS}	47
III.3.1.	<i>Présentation des matériaux utilisés</i>	47
III.3.2.	<i>Protocoles d'endommagement thermique basses températures</i>	48
III.3.3.	<i>Sensibilité des ondes guidées aux cycles basses températures</i>	49
III.3.3.1.	Reproductibilité des mesures	49
III.3.3.2.	Variations du mode A ₀ aux sollicitations basses températures.....	49
III.3.3.3.	Variations du module de Coulomb	52
III.3.4.	<i>Étude de la microfissuration par micrographies</i>	53
III.3.4.1.	Micrographies de l'échantillon [0/+45/90/-45] _{6S}	54
III.3.4.2.	Micrographies de l'échantillon [0 ₂ /+45 ₂ /90 ₂ /-45 ₂] _{3S}	56
III.3.4.3.	Micrographies de l'échantillon [0 ₃ /+45 ₃ /90 ₃ /-45 ₃] _{2S}	59
III.3.5.	<i>Discussion</i>	61
III.4.	CONCLUSION.....	62
CHAPITRE IV. CONTRÔLE D'UN RÉSERVOIR		63
IV.1.	INTRODUCTION	63
IV.2.	PRÉSENTATION ET DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU RÉSERVOIR	64
IV.2.1.	<i>Composition et géométrie du réservoir</i>	64
IV.2.2.	<i>Évaluation des propriétés mécaniques du réservoir</i>	65
IV.3.	PROPAGATION D'ONDES GUIDÉES DANS LE RÉSERVOIR	68
IV.3.1.	<i>Effet de la courbure sur les ondes</i>	68
IV.3.2.	<i>Étude expérimentale</i>	70
IV.3.2.1.	Dispositifs de mesures.....	70
IV.3.2.2.	Résultats	72
IV.4.	CONTRÔLE DE SANTÉ DU RÉSERVOIR.....	75
IV.4.1.	<i>Contrôle du taux d'humidité</i>	75
IV.4.2.	<i>Contrôle de l'état de fissuration</i>	76
IV.4.3.	<i>Détection d'un décollement local entre liner et bobinage</i>	78
IV.4.3.1.	Définition du défaut.....	78
IV.4.3.2.	Choix d'un mode guidé	78
IV.4.3.3.	Simulation par éléments finis.....	80
IV.4.3.4.	Mesures sur le réservoir.....	83
IV.5.	CONCLUSION.....	85
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....		87
ANNEXE A : MESURES PAR ONDES GUIDÉES SUR LA PLAQUE [0/+60/-60]_{33S}.....		91
ANNEXE B : ÉTUDE D'ÉTANCHÉITÉ		93
BIBLIOGRAPHIE.....		95

Introduction générale

Introduction générale

Le contrôle de l'état de santé de structures pour les véhicules de rentrée atmosphérique et réutilisables est devenu une priorité pour les industries aérospatiales, compte tenu des hautes performances demandées et des sévères sollicitations de charge et de température subies au cours des vols. Les structures considérées dans le cadre de cette étude sont des réservoirs embarqués, utilisés pour le stockage et le transport de gaz ou de fluides conditionnés à très basses températures. L'humidité et les variations de températures de l'environnement de stockage (climat très humide à Kourou) peuvent causer des changements dramatiques dans la structure et conduire à une évolution des propriétés globales de certains matériaux la constituant. Pour faire en sorte que ces structures restent opérationnelles avec un maximum de fiabilité, il faut donc établir des méthodes de suivi du vieillissement de leurs matériaux constitutifs. Au sol, l'accent est mis sur la réduction des coûts, l'accessibilité à des parties cachées, la recherche de défauts dans les zones critiques [1-10]. En vol, des suivis « santé matière », rapides et couvrant de larges zones de la structure, sont recherchés. La problématique est d'acquérir des informations et de les exploiter de manière directe ou différée pour déterminer la durabilité de la structure confrontée à des environnements sévères [11-20]. L'étude rentre dans le cadre d'un projet proposé par l'ARA (Association pour le développement des technologies pour la maîtrise de la Rentrée Atmosphérique). Cette association créée à l'initiative conjointe du Conseil Régional d'Aquitaine, de l'Université de Bordeaux 1 et d'EADS SPACE Transportation, a pour objectif de valoriser et de développer les compétences de la Région Aquitaine dans le domaine de la rentrée atmosphérique. Le projet est regroupé en deux catégories, des activités de recherche et des expériences embarquées pour les véhicules expérimentaux Expert et PreX. L'objectif de l'étude, définie pour les activités de recherche, est de suivre la santé matière de la structure embarquée avec une technique ultrasonore. Le champ d'investigation se limite au domaine du contrôle et de l'évaluation non destructifs par propagation d'ondes ultrasonores destinées au suivi de l'évolution des propriétés viscoélastiques des matériaux étudiés et à la détection de défauts locaux au sein de la structure. La méthode non destructive utilisée dans toute cette étude est basée sur la propagation d'ondes ultrasonores guidées. La mise au point de ce procédé des études préliminaires théoriques, expérimentales et numériques.

Le premier chapitre décrit le procédé de calcul des équations de dispersion des modes guidés et le principe de mesures utilisé. Le problème direct est défini par les méthodes de calculs et de mesures. Le modèle de prédiction numérique est basé sur la méthode des matrices d'impédance de surface qui permet d'obtenir les équations de dispersion des différents modes. Ces équations sont résolues en utilisant une procédure numérique calculant les solutions modales. Les mesures sont effectuées avec un dispositif de génération-détection d'ondes guidées. La résolution du problème inverse pour l'évaluation des propriétés mécaniques d'un matériau est alors décrite. Les problèmes direct et inverse sont validés pour un matériau composite carbone-époxyde.

Le deuxième chapitre présente l'utilisation des ondes guidées pour le contrôle du taux d'humidité dans des plaques composites carbone-époxyde et permet de vérifier si au moins un paramètre relatif à cette propagation est perturbé par la variation du taux d'humidité dans le matériau. Les changements de masse des plaques et des nombres d'onde complexes des modes générés sont mesurés pendant la variation du taux d'humidité, pour connaître la potentialité de la technique ultrasonore, sans contact et unilatérale, à contrôler le taux d'humidité dans des matériaux composites.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la sensibilité des ondes guidées au degré de microfissuration engendrée par des sollicitations à basses températures appliquées à des matériaux composites carbone-époxyde. Une étude préliminaire, réalisée sur un matériau composite carbone-époxyde dont les propriétés de la résine et des fibres ainsi que la séquence d'empilement entraîne de la microfissuration lors de chocs thermiques, est menée pour tester si au moins une caractéristique d'un mode guidé est sensible à cet endommagement. L'étude suivante, effectuée sur des plaques possédant des potentiels à micro fissurer progressifs, permettra de voir si les ondes guidées suivent l'évolution du taux de microfissures.

Le dernier chapitre propose des méthodes pour tester l'intégrité d'un réservoir composite par ondes ultrasonores guidées. Une étude sur la possibilité de propager ces ondes dans le réservoir est menée pour connaître la potentialité de la méthode ultrasonore au contrôle de santé du réservoir. Une étude numérique sur la sensibilité des modes guidés se propageant dans le réservoir lors de la variation du taux d'humidité et de la microfissuration sera proposée. Enfin une méthode de détection d'un défaut localisé dans le réservoir sera

simulée par éléments finis. Les paramètres spécifiques, relatifs aux différents modes guidés se propageant dans le réservoir, sont choisis pour une détection rapide et ciblée.

Chapitre I

Propagation des ondes guidées :

Outils numériques et expérimentaux

Chapitre I. Propagation des ondes guidées : outils numériques et expérimentaux

I.1. Introduction

Ce chapitre rappelle un procédé de calcul des équations de dispersion en ondes planes pour des milieux viscoélastiques bornés et un principe de mesures ultrasonores. Cette étude permettra de fixer les bases du suivi de santé de structures étudiées dans les chapitres suivants. Par soucis de clarté, une courte partie sera consacrée à la définition des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés et à leur définition dans les différents plans de propagation des ondes guidées. La partie suivante sera consacrée à la définition du problème direct présentant les méthodes de calcul et de mesures utilisées. Le modèle de prédiction numérique est basé sur la méthode des matrices d'impédance de surface [21]. Les équations de dispersion obtenues sont résolues en utilisant une procédure numérique permettant de calculer les solutions modales et de tracer les courbes de dispersion des différents modes guidés [22]. Le dispositif expérimental [22,23] et la procédure de traitement du signal [22,24] de la méthode de mesures d'ondes ultrasonores guidées seront présentés. Le problème direct ainsi défini sera validé sur une plaque de composite carbone-époxyde. La dernière partie traite de la résolution du problème inverse pour l'évaluation non destructive de matériaux par ondes guidées. Il est défini à partir de la méthode de mesures et d'une procédure d'inversion. Pour résoudre ce problème inverse, il faut étudier la sensibilité des modes guidés à la variation des propriétés mécaniques du matériau (modules de viscoélasticité), puis définir une procédure de quantification et d'optimisation des modules de viscoélasticité [22]. L'étude de sensibilité, ainsi que la validation du problème inverse, seront effectuées sur la plaque composite utilisée lors de la validation du problème direct.

I.2. Définition des données de l'étude

Les matériaux utilisés sont des composites à base de fibres de carbone et d'une matrice époxyde. Ces matériaux sont considérés comme orthotropes et viscoélastiques. Soit une plaque repérée dans le système de coordonnées direct $(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3)$ défini selon la figure I.1. La propagation des ondes guidées sera étudiée selon le plan P_{12} formé par les axes \vec{x}_1 et \vec{x}_2 , ou selon le plan P_{13} formé par les axes \vec{x}_1 et \vec{x}_3 .

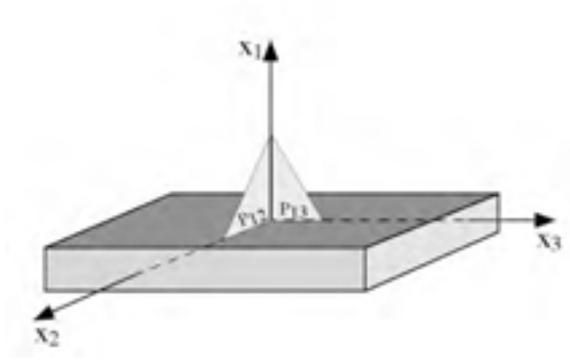


figure I.1. Plaque dans le repère direct $(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3)$ et plans de propagation des ondes guidées.

Le tenseur des rigidités, pour un matériau orthotrope viscoélastique, en notation contractée, est défini dans le repère $(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3)$ par la relation suivante :

$$C_{ij}^* = \begin{bmatrix} C_{11}^* & C_{12}^* & C_{13}^* & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22}^* & C_{23}^* & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33}^* & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44}^* & 0 & 0 \\ & & & & C_{55}^* & 0 \\ & & & & & C_{66}^* \end{bmatrix} \quad (I.1)$$

Les C_{ij}^* représentent les modules de viscoélasticité. Ils sont décrits sous la forme de modules complexes tels que $C_{ij}^* = C_{ij}' + iC_{ij}''$. La partie réelle C_{ij}' est reliée à l'élasticité du matériau et la partie imaginaire C_{ij}'' à sa viscoélasticité.

Le tenseur des rigidités permet de relier les champs de contrainte aux champs de déformation. Notre étude étant basée sur l'hypothèse des petites déformations, la loi de comportement devient linéaire. Elle est alors appelée loi de Hooke et s'écrit en notation contractée :

$$\sigma_i = C_{ij}^* \varepsilon_j \quad (I.2)$$

Tout le document est centré sur des études bidimensionnelles de la propagation des ondes guidées pour des matériaux orthotropes et viscoélastiques, dans l'hypothèse de déformations planes. Les plans de propagation des ondes sont choisis selon les plans de symétrie des matériaux (P_{12} ou P_{13}). Si les ondes se propagent dans le plan P_{12} (ou P_{13}), alors

seuls les modules de viscoélasticité C_{11}^* , C_{22}^* , C_{66}^* et C_{12}^* (ou C_{11}^* , C_{33}^* , C_{55}^* et C_{13}^*) seront pris en compte.

I.3. Problème direct

Les équations de dispersion, pour des plaques constituées de matériaux monocouches, peuvent s'écrire sous la forme des équations de Rayleigh-Lamb [23,25-29]. Les solutions modales sont calculées suivant diverses procédures numériques comme la méthode du Simplex ou celle de Newton-Raphson [22,30]. Dans le document, les structures utilisées sont, pour la plupart, des plaques considérées comme des matériaux monocouches sauf dans le dernier chapitre qui est consacré à l'étude d'un réservoir composé de trois couches bien distinctes. Il est donc nécessaire d'utiliser une méthode de calcul permettant d'obtenir les solutions des équations de dispersion pour des matériaux multicouches. Elle servira tout au long de l'étude. La méthode des matrices d'impédance de surface, pour la simulation de la propagation des ondes planes dans des stratifiés, semble être appropriée à cette étude, de par sa grande stabilité et sa rapidité de calculs [21]. Le problème direct sera validé sur une plaque de composite carbone-époxyde, en comparant les courbes de dispersion calculées et celles qui sont mesurées avec le dispositif expérimental de génération-détection d'ondes ultrasonores guidées [22,24].

I.3.1. Méthode des matrices d'impédance de surface

La méthode des matrices d'impédance de surface est une des évolutions de la méthode des matrices de transfert développée par *Thomson* [31] en 1949 puis reprise en 1953 par *Haskell* [32]. Cette méthode de « Thomson/Haskell » est à la base d'un grand nombre d'autres méthodes relatées, pour la plupart, dans un article de *Lowe* [33] ou récemment développées pour la résolution de cas particuliers : méthode des propagateurs [34], modèle rhéologique sur les multicouches [35]. La méthode des matrices d'impédance de couche, récemment développée par Wang et Rokhlin [36,37], est une étape intermédiaire entre la méthode des matrices de transfert et la méthode des matrices d'impédance de surface.

Les matrices d'impédance de surface, dans les multicouches fluides et/ou solides anisotropes absorbants, relie le champ de vitesse particulière au champ de contrainte à chaque interface. Une matrice d'impédance de surface représente l'impédance, à une interface donnée, du milieu semi infini situé d'un côté ou de l'autre de cette interface. Pour chaque interface, il existe donc deux matrices d'impédance de surface, chacune correspondant à un

côté de l'interface. Cette notion simplifie le calcul des solutions modales car le nombre d'éléments dans les matrices est divisé par quatre en comparaison avec la méthode classique des matrices de transfert [31,32].

Le principe de la méthode est le suivant. Une plaque multicouche est placée entre deux milieux semi infinis. La méthode consiste à calculer les champs de contraintes et de vitesses particulières n'importe où dans le milieu lorsqu'il n'existe aucune onde incidente ou lorsqu'une onde incidente est générée depuis un des deux milieux semi infinis. Dans le cas de l'étude, la réponse modale de la plaque est calculée dans le vide car l'impédance acoustique de l'air étant très faible devant celles des matériaux composites utilisés, le vide est choisi comme milieu semi infini.

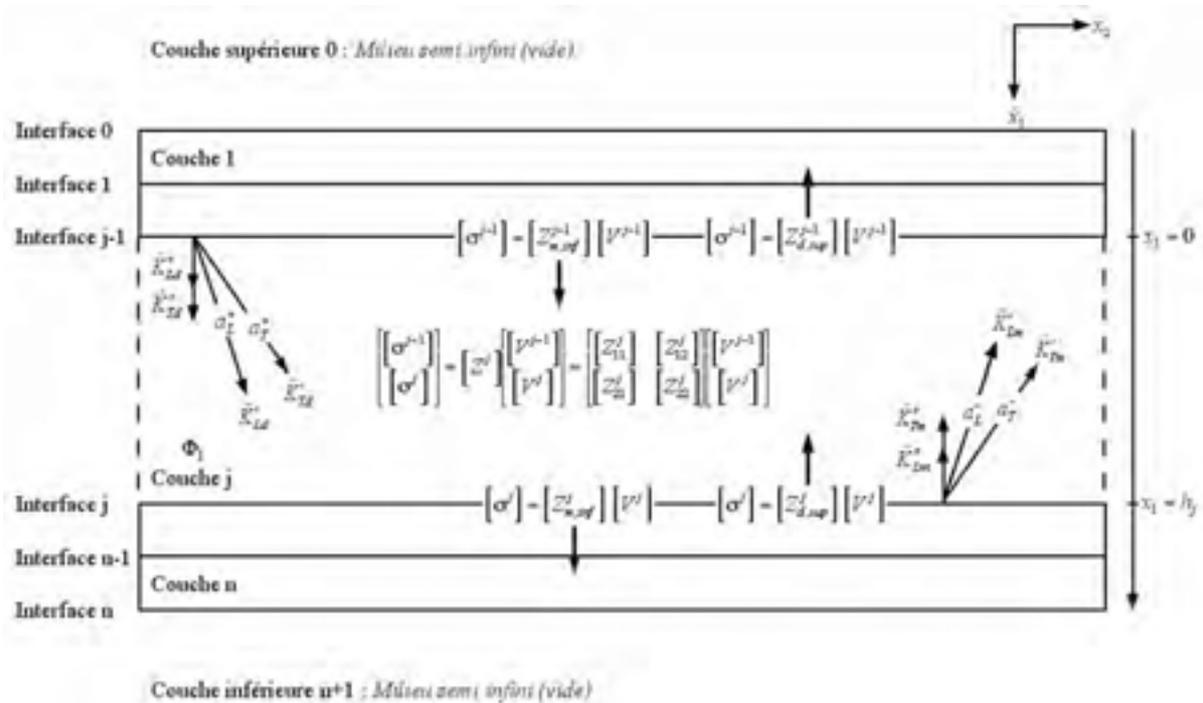


figure I.2. Schéma explicatif de la méthode des matrices d'impédance de surface.

La figure I.2 présente la géométrie du problème dans un plan de propagation P_{12} . Le milieu stratifié est composé de n couches planes, solides, orthotropes et viscoélastiques. Les interfaces sont normales à la direction du vecteur \vec{x}_1 . Dans le plan de propagation P_{12} , les quantités nécessaires, évaluées à l'interface j , sont les deux composantes v_1^j et v_2^j du vecteur vitesse particulière $[V^j]$ et les deux composantes σ_1^j et σ_6^j du champ de contrainte $[\sigma^j]$. Par

définition, une matrice d'impédance de surface $[ZI^j]$ connecte le vecteur contrainte au vecteur vitesse particulière sur chaque interface j :

$$[\sigma^j] = [ZI^j][V^j] \quad (I.3)$$

L'idée générale du calcul est de commencer par l'interface n , où $[ZI_{m,inf}^n]$ est la matrice d'impédance de surface du milieu semi infini inférieur (*inf*) et de calculer la matrice d'impédance de surface suivante en remontant (*m*) jusqu'à la dernière $[ZI_{m,inf}^0]$. Le même calcul peut être effectué dans le sens descendant (*d*) de $[ZI_{d,sup}^0]$ à $[ZI_{d,sup}^n]$, matrices d'impédance de surface du milieu semi infini supérieur (*sup*). Si le milieu n'a pas de symétrie miroir par rapport à l'interface j , les deux matrices $[ZI_{m,inf}^j]$ et $[ZI_{d,sup}^j]$ sont différentes, puisque les impédances des surfaces aux interfaces $j-1$ et j sont différentes. Pour calculer toutes les matrices d'impédance de surface, un lien entre les deux interfaces limitant la même couche doit être utilisé. Ce lien est assuré par des matrices d'impédance de couches, choisies pour leur stabilité numérique [36].

La couche j est limitée par l'interface supérieure $j-1$ et l'interface inférieure j (figure I.2). Les champs de contraintes $[\sigma^{j-1}]$ et $[\sigma^j]$ sont liés aux champs des vitesses particulières $[V^{j-1}]$ et $[V^j]$, respectivement aux interfaces $j-1$ et j , par la matrice d'impédance de couche $[Z^j]$:

$$\begin{bmatrix} [\sigma^{j-1}] \\ [\sigma^j] \end{bmatrix} = [Z^j] \begin{bmatrix} [V^{j-1}] \\ [V^j] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{11}^j] & [Z_{12}^j] \\ [Z_{21}^j] & [Z_{22}^j] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V^{j-1}] \\ [V^j] \end{bmatrix} \quad (I.4)$$

$[Z_{11}^j]$ est la sous-matrice d'impédance de couche à l'interface $j-1$, $[Z_{22}^j]$ la sous-matrice d'impédance de couche à l'interface j . Les deux autres sous-matrices sont couplées aux deux interfaces. Toutes les sous-matrices de la matrice d'impédance de couche ont les mêmes dimensions que les matrices d'impédance de surface.

Les milieux 0 et $n+1$ sont constitués par du vide. Il n'y a pas d'onde descendante dans le milieu formant la couche supérieure 0 et pas d'onde montante dans le milieu formant la couche inférieure $n+1$.

En descendant et en commençant par la matrice d'impédance à l'interface 0, $[ZI_{d,sup}^0]$, l'impédance à la dernière interface du milieu, de tout l'empilement situé au-dessus de cette interface (en regardant les interfaces supérieures), $[ZI_{d,sup}^n]$, est atteinte [21]. D'après la

continuité des contraintes à l'interface n , $\left(\left[ZI_{d,sup}^n \right] - \left[ZI_{m,inf}^n \right] \right) \left[V^n \right] = 0$. Les solutions modales peuvent être déduites de la relation de dispersion à chaque interface j [21] :

$$\left[ZI_{d,sup}^j \right] - \left[ZI_{m,inf}^j \right] = 0 \text{ et } 0 \leq j \leq n \quad (I.5)$$

où les matrices d'impédance de surface $\left[ZI_{m,inf}^j \right]$ et $\left[ZI_{d,sup}^j \right]$ sont calculées en remontant de l'interface n à l'interface j et en descendant de l'interface 0 à l'interface j , respectivement. Pour trouver les solutions modales de modes plus particulièrement localisés dans une couche, il est judicieux de sélectionner une interface appartenant à cette couche, car les vitesses particulières et les contraintes peuvent être nulles ailleurs. Les racines de l'équation (I.5) sont représentées sous la forme de courbes de dispersion qui représentent les nombres d'ondes complexes des modes guidés se propageant dans la structure en fonction de la fréquence.

Les lois de Snell-Descartes imposent à toutes les ondes partielles d'avoir une même composante k^* suivant le vecteur \vec{x}_2 [28,29]. Le vecteur d'onde $\vec{k}^* = k^* \vec{x}_2$, représentatif d'un mode guidé se propageant le long d'une plaque et résultant d'une combinaison de toutes les ondes partielles dans l'ensemble des couches du stratifié, est défini. Alors, l'ensemble des couples (f, k^*) , solutions des équations de dispersion, représente les solutions modales de la plaque. Une procédure de résolution des équations de dispersion a été mise au point pour trouver les solutions modales, c'est-à-dire les nombres d'onde complexes k^* en fonction de la fréquence f [22]. Différentes grandeurs peuvent représenter ces solutions : la vitesse de phase, la vitesse de groupe, la vitesse d'énergie, la partie réelle k' et la partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe k^* et l'angle de coïncidence [22].

I.3.2. Dispositif expérimental et traitement des signaux

Cette partie présente le procédé de mesure des ondes guidées se propageant dans une plaque. En premier lieu, le dispositif expérimental, permettant la génération et la détection des modes, sera décrit. Puis une procédure de traitement des signaux sera présentée dans le but d'atteindre les valeurs expérimentales des courbes de dispersion.

Les campagnes expérimentales sont menées avec le dispositif de génération-détection d'ondes guidées présenté sur la figure I.3. Deux transducteurs capacitifs à couplage par air sont placés du même côté de l'échantillon testé, ce qui permet un accès unilatéral et sans contact. Ces transducteurs ultrasonores sont réalisés au Laboratoire de Mécanique Physique [38]. Ils permettent une mesure directe et reproductible du déplacement normal produit par les

ondes en surface d'une plaque. Ils sont circulaires, de diamètre 45 mm, et de domaine fréquentiel centré sur 200 kHz avec une bande passante de -15 dB de 50 à 400 kHz. Leur large diamètre, plus grand que la longueur d'onde des ondes acoustiques dans l'air (≈ 1 mm), permet d'obtenir une ouverture angulaire très étroite, ce qui favorise la sélection d'un mode particulier de la plaque. De plus, le rendement de ces éléments est proportionnel à la surface de leurs faces actives. Leur grande dimension permet donc d'insuffler assez d'énergie dans les modes guidés et de diminuer fortement le niveau de bruit des signaux mesurés [22,23].



figure 1.3. Dispositif expérimental pour la génération et la détection d'ondes guidées par transducteurs ultrasonores à couplage par air.

Les deux transducteurs sont orientés selon des angles de coïncidence opposés, θ et $-\theta$, définis pour la sélection d'un mode particulier. L'angle d'incidence θ est calculé en utilisant les lois de Snell-Descartes [28,29], selon la relation suivante :

$$\sin \theta = \frac{V_{air}}{V_{ph}} \quad (I.6)$$

où V_{ph} est la vitesse de phase du mode à propager à la fréquence centrale F_0 et V_{air} la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'air. L'émetteur (E) est excité par une salve de 5 cycles, d'enveloppe gaussienne, et de fréquence centrale F_0 . Le récepteur (R) détecte une

partie des radiations du mode émises dans l'air. Il est déplacé le long du chemin de propagation du mode et un signal temporel est acquis pour chacune de ses positions. Le déplacement du récepteur le long du chemin de propagation et par rapport à la position de l'émetteur est compris entre 50 mm et 200 mm.

Un traitement de signal spécifique permet de tracer les valeurs expérimentales de la partie réelle k' et de la partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe en fonction de la fréquence (ou du produit fréquence-épaisseur), pour chacun des modes se propageant le long de la plaque. La partie réelle k' est obtenue par un procédé basé sur l'application d'une double transformée de Fourier sur la totalité des signaux mesurés $\{s(x_2, t)\}$, transformant cet ensemble de mesures en un diagramme $\{S(k', f)\}$, où S est le spectre d'amplitudes complexes dont le module est tracé en fonction de la fréquence f et du nombre d'onde k' [39,40]. Le signal temporel $s(x_2, t)$ représente le déplacement normal U_1 produit en surface de la plaque ($x_1 = \frac{h}{2}$) par l'ensemble des modes se propageant le long de celle-ci :

$$s(x_2, t) = \sum_n U_1^n \left(\frac{h}{2}\right) e^{i(\omega t - k^* x_2)} = e^{i\omega t} \sum_n U_1^n \left(\frac{h}{2}\right) e^{-k'' x_2} e^{-ik' x_2} \quad (I.7)$$

où pour chaque mode, k' et k'' sont les parties réelle et imaginaire du nombre d'onde complexe et U_1^n l'amplitude du mode n suivant le vecteur \vec{x}_1 en $x_1 = \frac{h}{2}$. Le traitement par double transformée de Fourier permet d'estimer le nombre d'onde et l'amplitude d'un ou plusieurs modes générés et détectés par le système. Pour obtenir des mesures de qualité, un unique mode est généré et détecté car, pour les mesures d'atténuation, la coexistence de plusieurs modes gêne considérablement l'estimation de leurs amplitudes et donc de leurs atténuations [22].

Pour les parties imaginaires k'' , un traitement similaire est appliqué à deux ensembles de mesures, $\{s(x_2, t)\}^I$ et $\{s(x_2, t)\}^{II}$, chacun d'eux correspondant à la première et à la seconde moitié des signaux mesurés pour des positions centrées, respectivement, sur x_2^I et x_2^{II} [24]. Par l'application d'une double transformée de Fourier, deux diagrammes fréquence-nombre d'onde, soit respectivement $\{S(k', f)\}^I$ et $\{S(k', f)\}^{II}$, sont obtenus et permettent de

connaître les amplitudes moyennes du (ou des) mode(s) pour la zone de mesures I et pour la zone de mesures II, soit $(A)^I$ et $(A)^{II}$ pour toutes les fréquences considérées. Il est donc possible de calculer la proportion d'amplitude moyenne pour un mode ayant transité de la région I à la région II, dont les centres sont distants de $(x_2^{II} - x_2^I)$. La mesure des amplitudes $(A)^I$ et $(A)^{II}$ permet donc de quantifier l'atténuation, due essentiellement à la viscoélasticité, les atténuations dues au rayonnement dans l'air, à l'ouverture angulaire et la diffraction des ondes, étant négligeables :

$$k'' = \left(\frac{1}{x_2^{II} - x_2^I} \text{Ln} \left| \frac{(A)^{II}}{(A)^I} \right| \right)_f \quad (\text{I.8})$$

En exprimant k'' en $\text{dB} \cdot \text{mm}^{-1}$, l'ensemble des couples (f, k'') permet de tracer la courbe expérimentale d'atténuation du mode.

I.3.3. Validation du problème direct

Les différents points relatifs au problème direct de la propagation des ondes guidées ont été exposés dans les paragraphes précédents. Il faut maintenant valider ce problème. C'est-à-dire comparer les courbes de dispersion obtenues pour un matériau, dont les données d'entrées sont connues (modules de viscoélasticité, épaisseur et densité) aux résultats des mesures par ondes guidées effectuées sur ce même matériau. EADS SPACE Transportation nous a fourni un lot de plaques composites en carbone-époxyde pour le contrôle du taux d'humidité présenté dans le Chapitre II. Chaque couche de composite est faite de tissu 2D, dont les plis sont à base de fibres de carbone et d'une matrice époxyde. L'épaisseur des plaques est de $(5,3 \pm 0,3)$ mm et leur densité de $(1,49 \pm 0,01)$. Leurs modules de viscoélasticité ont été mesurés par une méthode ultrasonore à immersion [41]. Par conséquent, toutes les données d'entrées relatives au problème direct sont connues et sa validation sera présentée pour une plaque du lot, car des résultats similaires ont été obtenus pour les autres plaques. Le tableau I.1 présente les modules de viscoélasticité de cette plaque dans les plans de symétrie P_{12} et P_{13} .

C_{11}^*	C_{22}^*	C_{66}^*	C_{12}^*
$12^{\pm 1} + i0,6^{\pm 0,2}$	$57^{\pm 3} + i3^{\pm 2}$	$3,6^{\pm 0,2} + i0,3^{\pm 0,2}$	$7^{\pm 1} + i0,3^{\pm 0,2}$
C_{11}^*	C_{33}^*	C_{55}^*	C_{13}^*
$12^{\pm 1} + i1,0^{\pm 0,5}$	$58^{\pm 4} + i4^{\pm 3}$	$3,5^{\pm 0,5} + i0,3^{\pm 0,2}$	$8^{\pm 2} + i0,6^{\pm 0,5}$

tableau I.1. Modules de viscoélasticité (GPa) de la plaque composite tissu 2D carbone-époxyde dans les plans P_{12} et P_{13} .

Les modules de viscoélasticité, obtenus dans chaque plan de symétrie, ont des valeurs similaires aux incertitudes près. Le matériau utilisé possède donc une symétrie quadratique et la validation du problème direct sera effectuée pour un seul des deux plans de symétrie, le plan P_{12} .

Dans un premier temps, les courbes de dispersion des différents modes guidés (figure I.4) se propageant au sein de la plaque suivant le plan P_{12} , sont tracées en utilisant les valeurs centrales des modules de viscoélasticité. Ceci permettra de déterminer les paramètres de réglage du dispositif expérimental (fréquence centrale et angle de coïncidence) pour générer, détecter et traiter chaque mode séparément. Les mesures sont réalisées en envoyant un signal d'excitation de 5 cycles, d'enveloppe gaussienne et de fréquence centrale F_0 . Les transducteurs sont orientés suivant un angle de coïncidence θ (tableau I.2).

Mode	F_0 (kHz)	V_{ph} (mm. μ s $^{-1}$)	θ (°)
A_0	100	1,4	14,5
	250	1,45	14
S_0	250	4	3,5
	300	2,3	7
S_1	300	6,5	3

tableau I.2. Fréquence F_0 , vitesse de phase V_{ph} et angle de coïncidence θ pour les 3 modes A_0 , S_0 et S_1 .

La figure I.4 présente les mesures et les calculs des parties réelles et imaginaires des nombres d'onde complexes des trois modes A_0 , S_0 et S_1 guidés dans le plan P_{12} . Les erreurs de mesure des modules de viscoélasticité permettent de calculer les courbes de dispersion avec un intervalle de confiance. En effet, ces courbes sont encadrées par deux limites extrêmes

obtenues respectivement avec l'un et l'autre des deux jeux de valeurs extrêmes des C_{ij}^* . Les mesures des parties réelles des nombres d'ondes complexes des trois modes se situent dans un intervalle d'erreur relativement restreint (figure I.4(a)). Elles sont en corrélation avec les prédictions numériques calculées avec les valeurs centrales des modules de viscoélasticité. Les mesures des parties imaginaires restent dans l'intervalle de confiance, mais ne correspondent pas avec les prédictions numériques calculées avec les C_{ij}^* centraux, car l'erreur sur les C_{ij}'' est beaucoup plus importante que celle des C_{ij}' (figure I.4(b) à (d)). Le problème direct est tout de même validé puisque les mesures sont en accord avec les prédictions numériques aux incertitudes près.

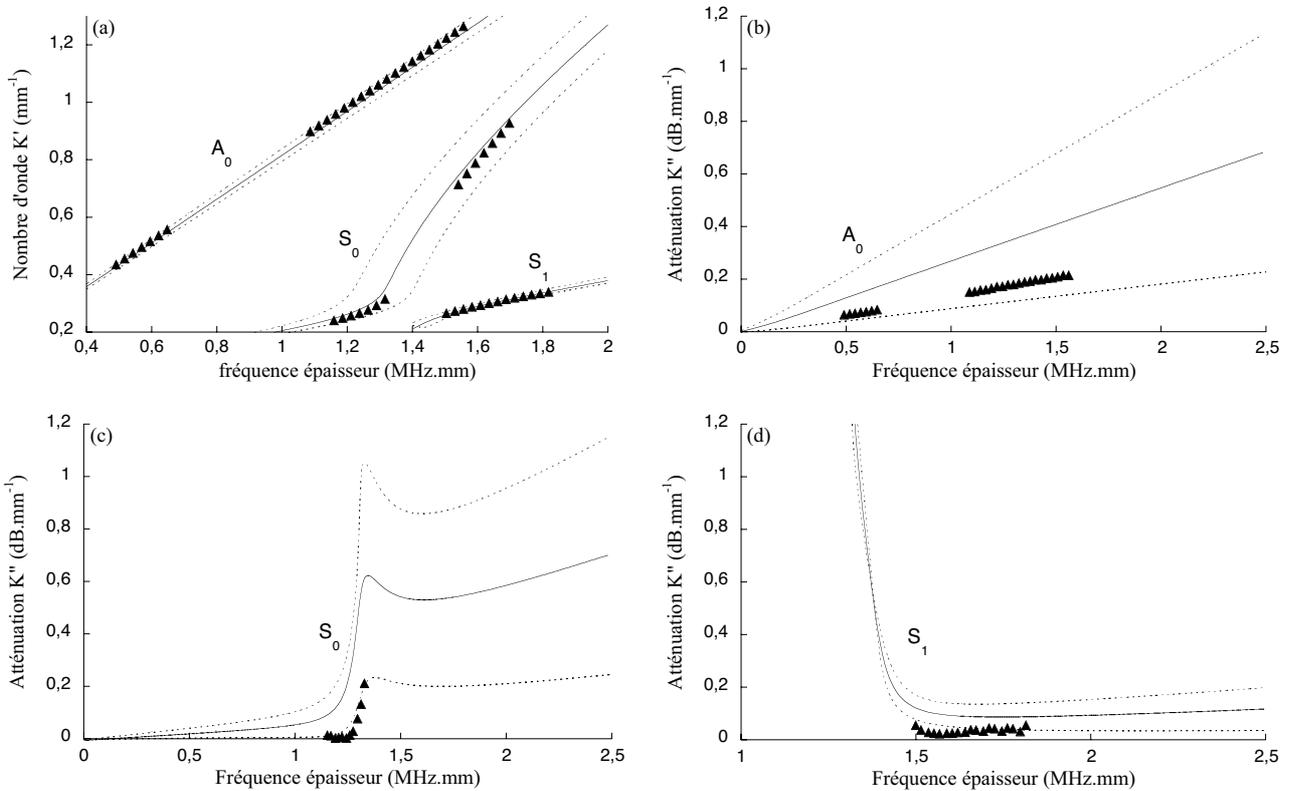


figure I.4. Courbes de dispersion mesurées (\blacktriangle) et calculées avec les C_{ij}^* centraux (—) et avec intervalles d'erreur (---) dans plan P_{12} de la plaque ; (a) parties réelles des nombres d'onde des trois modes A_0 , S_0 et S_1 et parties imaginaires des nombres d'ondes des modes (b) A_0 , (c) S_0 et (d) S_1 .

I.3.4. Reproductibilité des mesures

Une trentaine de campagnes expérimentales est menée sur cette même plaque dans le plan P_{12} . Ces campagnes permettent de quantifier la reproductibilité des mesures des nombres

d'ondes complexes, pour les trois modes guidés A_0 , S_0 et S_1 . Le pourcentage de reproductibilité est défini par la formule suivante :

$$100 \left(\sum_{i=1}^n \frac{X_i^{j+1} - X_i^j}{X_i^j} \right) \quad (I.9)$$

où X_i^j et X_i^{j+1} sont les valeurs expérimentales de k' ou k'' pour un mode donné, pour deux campagnes j et $j+1$, et i est le nombre de points composant le spectre en fréquence ($1 \leq i \leq n$).

Les mesures des parties réelles et imaginaires des nombres d'onde complexes des différents modes générés, effectuées lors de la première campagne sont corrélées avec celles qui sont effectuées lors de la seconde campagne. La totalité des séries de mesures a permis d'estimer une reproductibilité moyenne des mesures des parties réelles et imaginaires des nombres d'ondes complexes de chaque mode. Le pourcentage de reproductibilité entre la première campagne de mesure et une $p^{\text{ième}}$ campagne ($2 \leq p \leq 30$) est calculé en utilisant la relation (I.9) et permet d'effectuer la moyenne du taux de reproductibilité pour les trente campagnes de mesure. La reproductibilité moyenne des mesures des parties réelles k' est de 1% pour le mode A_0 , 3% pour S_0 et 4% pour S_1 . La reproductibilité moyenne des mesures des parties imaginaires k'' des nombres d'ondes complexes est de 6% pour le mode A_0 , 8% pour S_0 et 10% pour S_1 . Les mesures des parties imaginaires k'' ne sont pas aussi reproductibles que celles des parties réelles. Il faudra que les variations du nombre d'onde réel ou de l'atténuation soient supérieures aux seuils de reproductibilité pour pouvoir suivre les éventuelles évolutions des matériaux lors des diverses sollicitations.

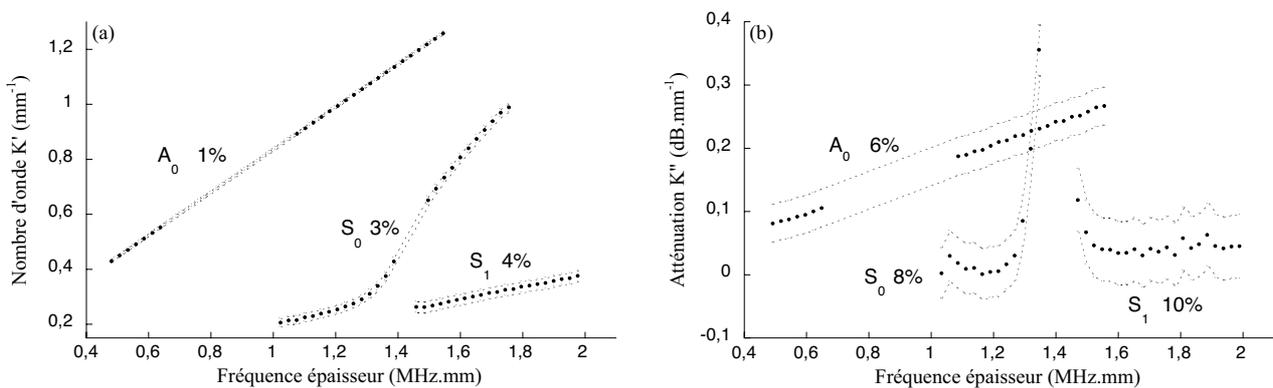


figure I.5. Mesures des trois modes guidés (•) et intervalles de confiance (---) calculé à partir des valeurs de reproductibilité ; parties réelles (a) et imaginaires (b) des nombres d'onde complexes.

La figure I.5 présente un exemple de mesures effectuées sur la plaque considérée et dans le plan P_{12} avec les intervalles de confiances calculés à partir du pourcentage de reproductibilité moyen des différents modes générés et détectés.

I.4. Problème inverse : évaluation non destructive par ondes guidées

Après l'élaboration et la validation du problème direct, il est nécessaire de résoudre le problème inverse pour l'évaluation non destructive par ondes guidées. Ce problème inverse se scinde en trois parties liées les unes aux autres. Tout d'abord, il faut étudier la sensibilité des modes guidés à la variation des propriétés mécaniques du matériau, plus exactement aux modules de viscoélasticité. Ceci permettra ensuite d'élaborer une stratégie d'inversion pour la quantification de ces modules. Enfin, une procédure d'optimisation numérique détermine un ensemble de valeurs des modules de viscoélasticité. La validation de ce problème inverse sera présentée pour la plaque de carbone-époxyde précédemment utilisée.

I.4.1. Sensibilité des ondes guidées aux modules de viscoélasticité

L'objectif est d'identifier la quantité d'information sur les modules de viscoélasticité portée par la variation des modes guidés. Les courbes de dispersion sont tracées pour les 4 modes A_0 , S_0 , A_1 , et S_1 , en faisant varier les valeurs des modules complexes C_{ij}^* de la plaque, plus précisément en augmentant de 25% soit la partie réelle soit la partie imaginaire de l'un de ces modules (tableau I.1) dans un plan de symétrie P_{12} . La comparaison entre les différents graphes permet d'obtenir des indications concernant l'effet de chaque C'_{ij} ou C''_{ij} sur les nombres d'onde complexes.

La figure I.6 présente les variations des parties réelles k' des nombres d'onde complexes lorsque C'_{11} , C'_{22} , C'_{66} et C'_{12} sont successivement modifiés. L'augmentation du C'_{11} entraîne une nette diminution des k' des modes S_0 et S_1 . Lorsque C'_{22} augmente, les k' des trois modes S_0 , A_1 et S_1 diminuent. L'augmentation du C'_{66} entraîne une diminution consécutive des k' du mode A_0 et du mode S_0 , sur sa zone dispersive. Enfin, l'augmentation du C'_{12} entraîne une augmentation des k' des modes S_0 et A_1 .

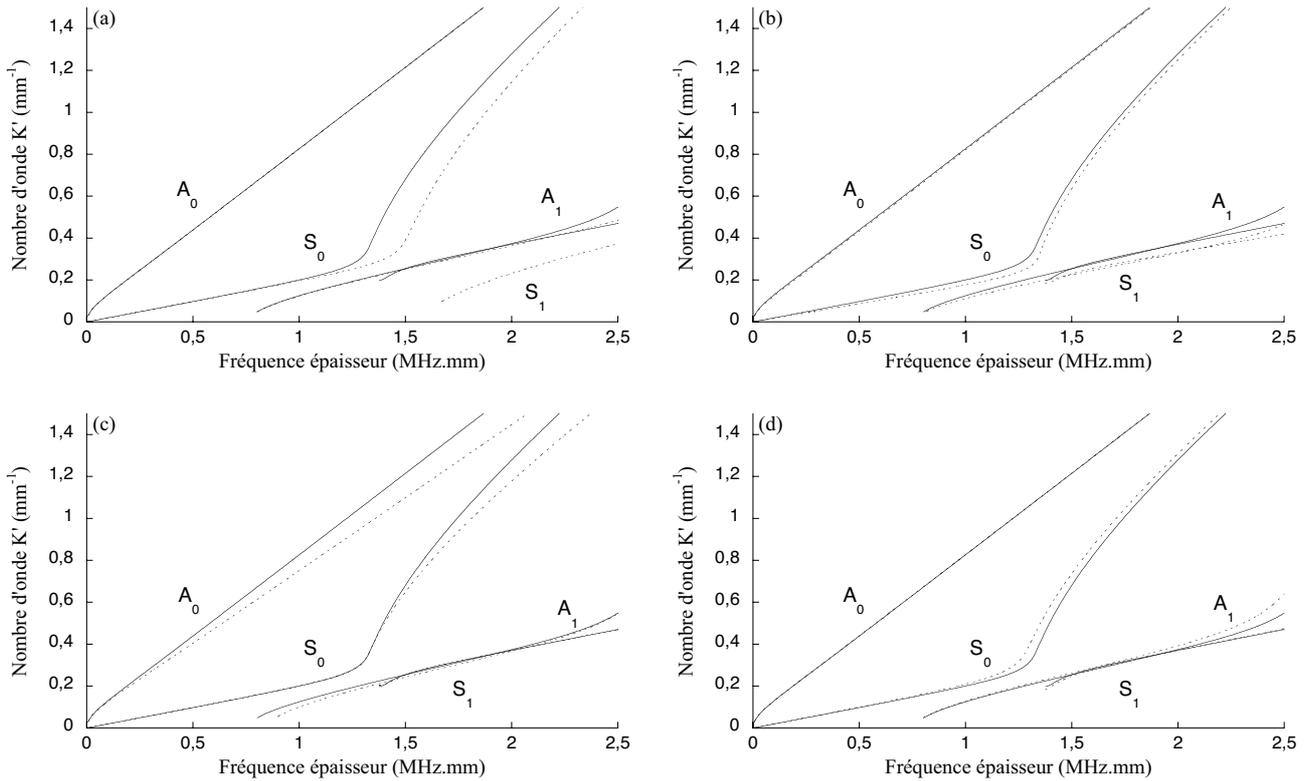


figure I.6. Variation des parties réelles des nombres d'onde complexes des 4 premiers modes guidés, avec 25% d'augmentation de l'un des C'_{ij} ; prédictions numériques avec comme données d'entrée (—) les C'_{ij} présentés dans le tableau I.1 et (---) un C'_{ij} modifié ; (a) $C'_{ij} = C'_{11}$, (b) $C'_{ij} = C'_{22}$, (c) $C'_{ij} = C'_{66}$, (d) $C'_{ij} = C'_{12}$.

Le tableau I.3 résume l'effet de chaque C'_{ij} sur les parties réelles des divers nombres d'onde complexes.

Parties réelles des modules de viscoélasticité	k'_{A_0}	k'_{S_0}	k'_{A_1}	k'_{S_1}
C'_{11}	—	↓	—	↓
C'_{22}	—	↓	↓	↓
C'_{66}	↓	↓	↘	—
C'_{12}	—	↑	↑	—

tableau I.3. Effet de l'augmentation de 25% du C'_{ij} sur la partie réelle k' du nombre d'onde complexe des modes A_0, S_0, A_1, S_1 ; (↑) hausse, (↓) diminution, (↗) faible hausse, (↘) faible diminution et (—) effet négligeable.

La figure I.7 présente les variations des parties imaginaires k'' des nombres d'onde complexes lors que C_{11}'' , C_{22}'' , C_{66}'' et C_{12}'' sont successivement élevés de 25%. Lorsque C_{11}'' augmente, le k'' du mode S_0 augmente de façon significative, par rapport aux très légères augmentations des k'' des modes A_1 et S_1 . L'augmentation du C_{22}'' entraîne une augmentation relative importante des k'' des modes A_1 et S_1 et une petite augmentation du k'' du mode S_0 . Lorsque C_{66}'' augmente, les k'' du mode A_0 et du mode S_0 , sur sa zone dispersive, augmentent de façon conséquente par rapport à la très faible augmentation du k'' du mode S_1 . Enfin, l'augmentation du C_{12}'' entraîne une faible diminution des k'' des modes S_0 et A_1 .

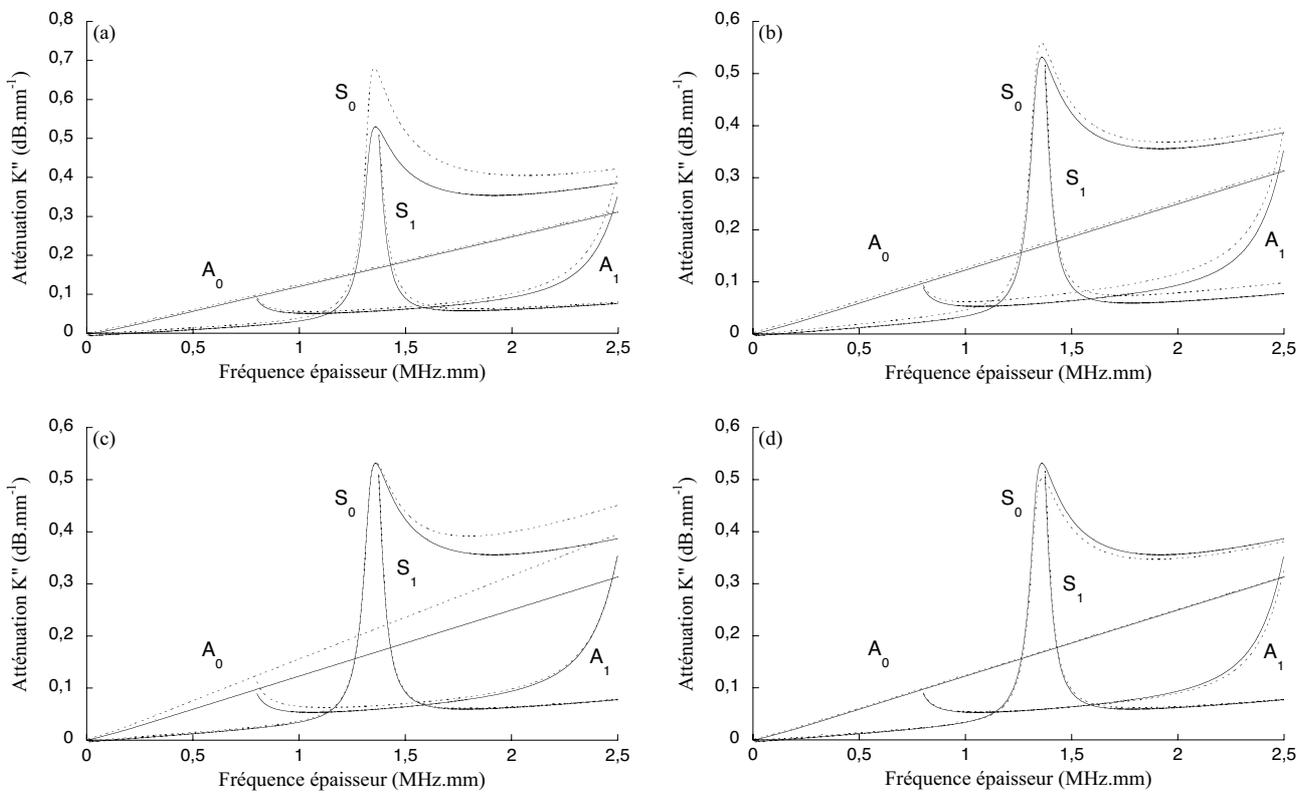


figure I.7. Variation des parties imaginaires des nombres d'onde complexes des 4 premiers modes guidés, avec 25% d'augmentation de l'un des C_{ij}'' ; prédictions numériques avec comme données

d'entrée (—) les C_{ij}'' présentés dans le tableau I.1 et (---) un C_{ij}'' modifié ; (a) $C_{ij}'' = C_{11}''$, (b)

$$C_{ij}'' = C_{22}'', (c) C_{ij}'' = C_{66}'', (d) C_{ij}'' = C_{12}''.$$

Le tableau I.4 résume l'effet de chaque C_{ij}'' sur les parties imaginaires des divers nombres d'onde complexes.

Parties imaginaires des modules de viscoélasticité	k_{A_0}''	k_{S_0}''	k_{A_1}''	k_{S_1}''
C_{11}''	-	↑	↗	↗
C_{22}''	-	↗	↑	↑
C_{66}''	↑	↑	↗	-
C_{12}''	-	↘	↘	-

tableau I.4. Effet de l'augmentation de 25% du C_{ij}'' sur la partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe des modes A_0, S_0, A_1, S_1 ; (↑) hausse, (↓) diminution, (↗) faible hausse, (↘) faible diminution et (-) effet négligeable.

I.4.2. Procédures d'optimisation des modules de viscoélasticité

Suite à l'étude de sensibilité, il est possible de définir une procédure pour approcher les valeurs des modules de viscoélasticité recherchés à partir d'un ensemble des nombres d'onde complexes mesurés. La procédure de quantification des parties réelles C_{ij}' des modules de viscoélasticité à partir de l'ensemble des parties réelles k' des nombres d'onde complexes a été déterminée et relatée dans la référence [22]. La procédure de quantification des parties imaginaires C_{ij}'' des modules de viscoélasticité à partir de l'ensemble des parties imaginaires k'' des nombres d'onde complexes sera donc uniquement présentée.

Le tableau I.4 décrit une procédure de quantification des parties imaginaires des modules de viscoélasticité. La partie imaginaire du nombre d'onde complexe du mode A_0 est uniquement sensible aux variations de la partie imaginaire C_{66}'' du module de viscoélasticité C_{66}^* . Le mode S_0 est principalement sensible aux variations de C_{11}'' et de C_{66}'' . Le mode A_1 est sensible aux variations de C_{22}'' et à celles des autres modules dans de moindres proportions. Le mode S_1 est essentiellement sensible aux variations de C_{22}'' . Seuls les modes S_0 et A_1 sont sensibles aux variations de C_{12}'' et dans de faibles proportions. L'organigramme, présenté en figure I.8, propose une démarche possible qui a pour but d'attribuer, de manière presque univoque, des valeurs approchées aux parties imaginaires des modules de viscoélasticité à partir des parties imaginaires des nombres d'ondes complexes mesurées.

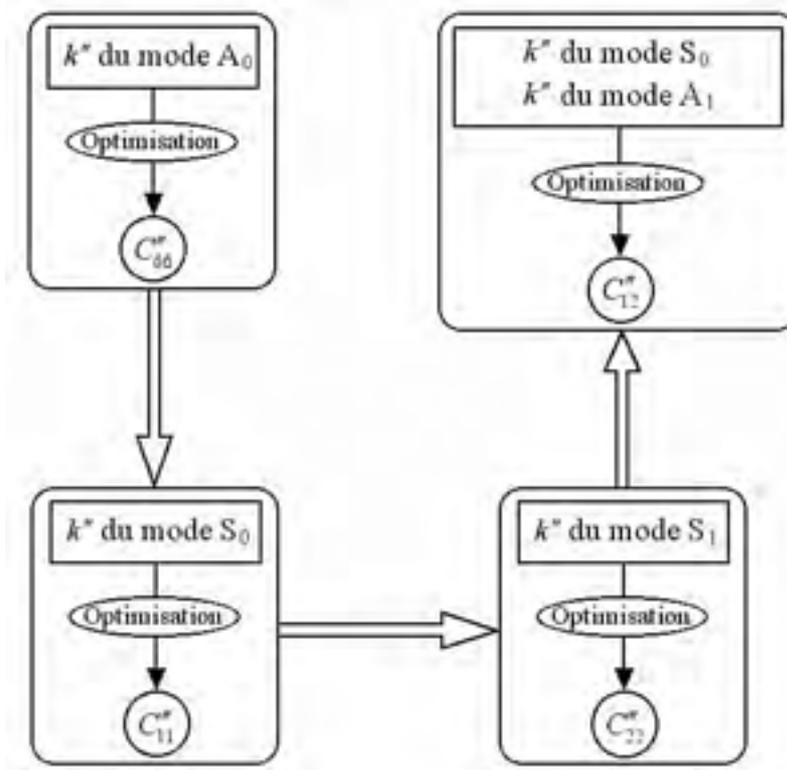


figure I.8. Procédé de quantification des parties imaginaires des modules de viscoélasticité à partir des parties imaginaires des nombres d'onde complexes.

Ces approches permettent de minimiser les risques de trouver un ensemble de valeurs des modules de viscoélasticité incohérents, en gardant des courbes de dispersion calculées en accord avec l'ensemble des nombres d'onde mesurés. À partir de ces valeurs approchées, un algorithme d'optimisation peut être utilisé pour affiner simultanément tous les modules de façon à converger vers des valeurs plus proches des caractéristiques mécaniques du matériau [22].

I.4.3. Validation du problème inverse

Les valeurs centrales des modules de viscoélasticité de la plaque de composite carbone-époxyde utilisée pour valider le problème direct (tableau I.1) sont optimisées dans le plan de symétrie P_{12} , pour corrélérer les courbes de dispersion des différents modes guidés (figure I.9) avec les mesures des nombres d'onde complexes.

C_{11}^*	C_{22}^*	C_{66}^*	C_{12}^*
$12^{\pm 1} + i0,6^{\pm 0,2}$	$60^{\pm 3} + i2,5^{\pm 1}$	$3,5^{\pm 0,2} + i0,15^{\pm 0,01}$	$7^{\pm 0,4} + i0,3^{\pm 0,1}$

tableau I.5. Modules de viscoélasticité (GPa) après optimisation à partir des k' et k'' des ondes guidées.

La figure I.9(a) présente les mesures et les prédictions numériques des parties réelles des nombres d'onde complexes des trois modes guidés A_0 , S_0 et S_1 propagés dans le plan P_{12} . Après optimisation des valeurs initiales des parties réelles des modules de viscoélasticité, de nouvelles valeurs comprises dans les intervalles d'erreurs présentées dans le tableau I.1 sont trouvées. Les courbes de dispersion, recalculées avec ces modules, sont très bien corrélées aux mesures des parties réelles des nombres d'onde complexes des trois modes guidés. Le même procédé est appliqué pour déterminer les valeurs des parties imaginaires des modules de viscoélasticité (figure I.9(b)). Les courbes de dispersion, recalculées avec les valeurs optimisées, sont assez bien corrélées aux mesures des parties imaginaires des nombres d'onde complexes. Le problème inverse permet donc d'optimiser les modules de viscoélasticité des matériaux aux propriétés mécaniques définies par le procédé à immersion.

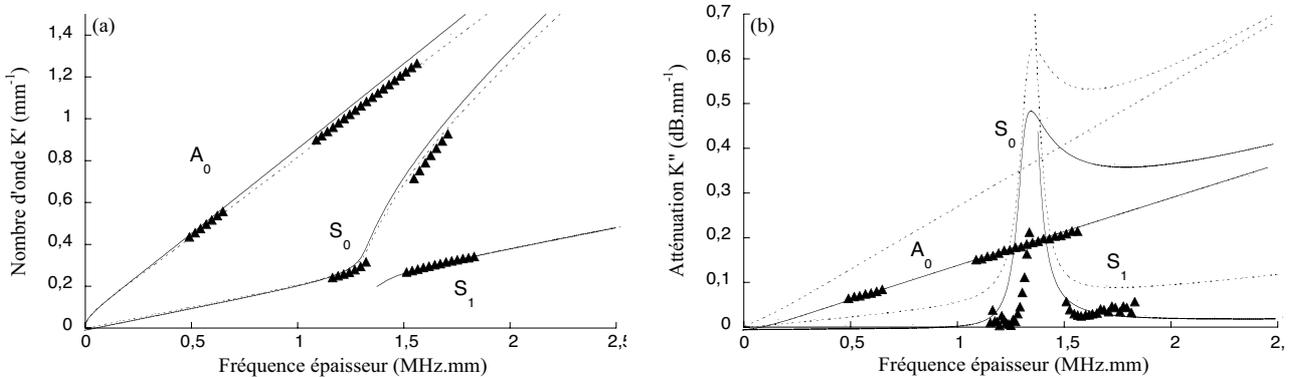


figure I.9. Courbes de dispersion mesurées (\blacktriangle) et calculées avec des C_{ij}^* initiaux (---) et optimisés (—) dans le plan P_{12} de la plaque ; (a) parties réelles et (b) imaginaires des nombres d'onde complexes des modes A_0 , S_0 et S_1 .

I.5. Conclusion

Les problèmes direct et inverse, pour l'évaluation non destructive par ondes ultrasonores guidées, ont été présentés et validés. Les solutions des équations de dispersion sont calculées avec la méthode des matrices d'impédance de surface qui permet d'obtenir des

solutions modales pour des plaques monocouches ou multicouches. La méthode de mesures ultrasonores par ondes guidées, sans contact et unilatérale, sera utilisée pour toutes les structures considérées. Ces procédés permettront de suivre l'état de santé de plaques composites carbone-époxyde, soumises à diverses sollicitations comme des prises ou des pertes d'humidité ou des cycles à basses températures. Ils permettront aussi d'étudier la propagation des ondes guidées dans une structure réelle, un réservoir constitué de filaments composites enroulés autour d'un liner titane, de prédire les effets des sollicitations sur la couche composite et d'élaborer une méthode numérique de détection d'un défaut localisé entre les deux couches (composite/titane).

Chapitre II

**Contrôle par ondes guidées du taux d'humidité dans
des plaques composites**

Chapitre II. Contrôle par ondes guidées du taux d'humidité dans des plaques composites

II.1. Introduction

Cette étude est menée pour connaître les effets à long terme de l'utilisation de matériaux composites dans les industries aérospatiales [42]. Le vieillissement humide est causé par deux sortes d'attaques : (1) une attaque physique, qui apparaît au-dessous de la température de transition vitreuse (T_g) du matériau. Elle peut être réversible ou conduire à la plastification du matériau ; (2) une attaque chimique, qui apparaît au-dessus de la température de transition vitreuse (T_g). Elle est irréversible et provoque une hydrolyse du matériau [43-51]. L'absorption d'eau par les matériaux composites peut provoquer de sévères dégradations variant avec la température et le temps d'expositions [43-45,49,51-54]. L'humidité peut faire gonfler le matériau en remplissant les microcavités du réseau. Ceci génère des microfissures aux interfaces fibres/matrice qui dégradent la raideur du matériau [44-47,52-55]. Par conséquent, mesurer les propriétés mécaniques des matériaux composites peut être une façon d'évaluer leur taux d'humidité [44,45,47-50,53,54]. L'utilisation d'ondes ultrasonores pour contrôler le taux d'humidité dans les matériaux composites n'est pas très répandue. *Nielsen et al.* [56] utilisent une technique de balayage en immersion, pour mesurer les vitesses de phase et de groupe des ondes propagées. Ces données permettent au module élastique dans la direction normale à la plaque d'être déterminé. *Zellouf et Jayet* [57,58] étudient les changements, à la fois sur la vitesse de phase et sur l'atténuation d'ondes de volume, lorsqu'une plaque est soumise à un environnement humide. Ils utilisent des transducteurs piézoélectriques implantés dans l'échantillon (méthode au contact) ou couplés avec de l'eau (technique par immersion). Les paramètres acoustiques mesurés sont alors corrélés avec la viscoélasticité et la microstructure du milieu de propagation, changeant avec le niveau d'humidité. *Ducret et al* [58] ont étudié le comportement élastique lors du vieillissement hygrothermique de composites verre-époxyde en utilisant un procédé d'évaluation des modules d'élasticité par ondes de volume. Les paramètres acoustiques mesurés sont alors corrélés avec l'élasticité anisotrope et la microstructure des milieux de propagation considérés.

Ce chapitre décrit l'utilisation des ondes guidées pour le contrôle du taux d'humidité contenu dans des plaques en composite carbone-époxyde présentées au paragraphe I.3.3. Les modes guidés sont générés et détectés avec des transducteurs ultrasonores à couplage par air,

placés d'un même côté de l'échantillon. La technique est donc sans contact et avec un accès unilatéral, ce qui satisfait les restrictions de CND industriel sur des structures en service. La technique de mesure et le traitement du signal, décrits dans le paragraphe I.3.2, sont utilisés pour quantifier les nombres d'onde complexes des ondes guidées. La méthode des matrices d'impédance de surface (paragraphe I.3.1) est utilisée pour la prédiction numérique des courbes de dispersion des différents modes, représentées sous forme de nombres d'onde réels et d'atténuations. L'étude de la sensibilité des ondes guidées à la variation des modules de viscoélasticité a été effectuée au paragraphe I.4.1. Deux procédés, permettant de faire varier le taux d'humidité du matériau, sont appliqués à chacune des plaques. Le premier consiste à augmenter l'humidité dans le matériau de façon accélérée pour atteindre rapidement la saturation en eau et vérifier si au moins un paramètre relatif à la propagation des ondes guidées est perturbé par l'augmentation de l'humidité dans le matériau. Ce procédé a permis une étude rapide de la sensibilité des modes guidés au taux d'humidité et justifie une étude plus détaillée avec des niveaux d'humidité variables entre l'état initial et la saturation. Le second procédé, relatif aux conditions d'humidité rencontrées durant la mise en service des structures, permet un suivi par ondes guidées pendant les différentes étapes de prise en eau du matériau. Les échantillons sont ensuite séchés pour contrôler la réversibilité du phénomène d'absorption. Durant les différentes étapes de prise et de perte d'humidité, les changements de masse des plaques et des nombres d'ondes complexes des trois modes guidés A_0 , S_0 et S_1 sont mesurés. En comparant ces mesures ultrasonores aux prédictions numériques, le problème inverse est résolu pour évaluer les variations des modules de viscoélasticité des plaques. Les changements dans les valeurs de ces modules sont alors comparés aux changements de masse des échantillons. La potentialité de la technique ultrasonore, sans contact et unilatérale, à contrôler le taux d'humidité dans les matériaux composites, est finalement discutée.

II.2. Procédés de prise en eau et de séchage

Les deux échantillons testés font partie du lot de plaques en composite carbone-époxyde fourni par EADS SPACE Transportation et dont les caractéristiques (épaisseur, densité, modules de viscoélasticité) ont été déterminées en utilisant les procédés décrits dans les paragraphes I.3.3 et I.4.3. La plaque utilisée pour le premier procédé de prise en eau sera dénommée comme étant la plaque n°I et celle utilisée, pour le second procédé, sera dénommée plaque n°II. La prise accélérée en eau, effectuée sur la plaque n°I, est très simple à réaliser. La plaque n°I est plongée dans un récipient d'eau placé dans une étuve à une

température de 98°C pendant quelques jours, pour obtenir un état proche de l'état saturé en eau. La prise en eau, effectuée de façon à atteindre les conditions d'humidité rencontrées durant la mise en service de structures réelles, est beaucoup moins rapide. La plaque n°II est placée en étuve climatique à 65°C et 70% d'humidité, pendant quelques mois, jusqu'à ce qu'elle atteigne un état proche de la saturation. Le taux d'humidité de chaque plaque est contrôlé en suivant l'évolution de la masse, qui tend à se stabiliser lorsque la saturation est proche. Le procédé de séchage est appliqué sur les deux plaques pour voir si le matériau peut retrouver un état proche de son état initial. Les deux plaques composites sont donc placées séparément, dans un four à 65°C, pendant deux à trois mois, jusqu'à ce que leurs masses retrouvent des valeurs proches de leurs valeurs initiales. Pendant le séchage, la température du four reste en dessous de la température de transition vitreuse pour éviter des changements irréversibles dans le matériau.

II.2.1. Évolution de masse sur la plaque n°I

La figure II.1 représente l'évolution de masse de la plaque n°I, en fonction du temps d'exposition pour la prise accélérée en eau et le séchage. Le processus complet de prise accélérée en eau et de séchage a été renouvelé (figure II.1(b)) pour comparer les variations de masse à celles qui sont obtenues dans la première étude (figure II.1(a)).

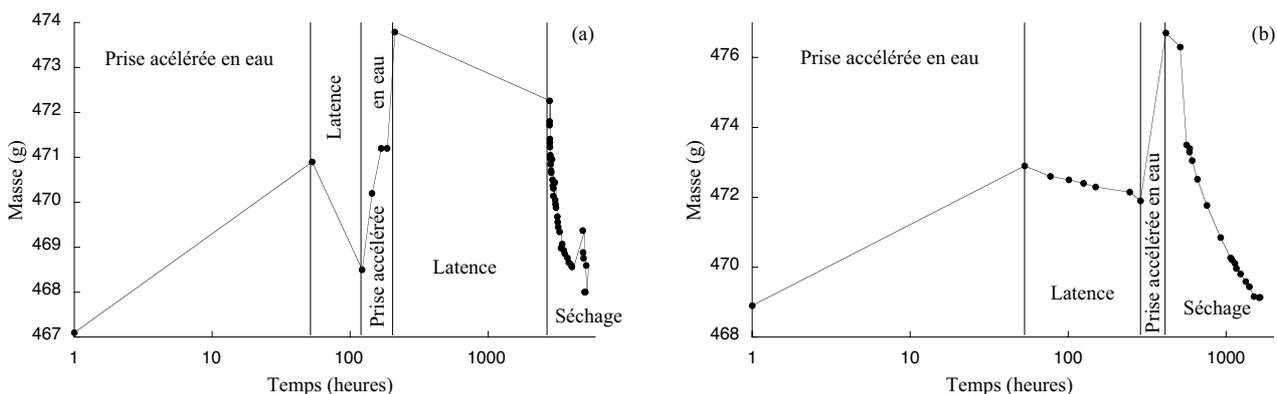


figure II.1. Évolution de la masse de la plaque n°I en fonction du temps d'exposition pour la prise accélérée en eau et le séchage : première (a) et seconde (b) études.

À l'état initial (figure II.1(a)), la masse de la plaque n°I était de 467,1 g. Après la première prise accélérée en eau, qui a duré environ 2 jours, la masse de la plaque a augmenté de 3,8 g. Durant le temps de latence (environ 3 jours), la masse diminue de 2,4 g. Cette perte de masse est due à l'évaporation d'une partie de l'eau contenue dans le matériau placé en environnement ambiant (sans conditionnement spécifique). Lors de la seconde prise accélérée en eau, d'environ 4 jours, la masse augmente de 5,3 g. Après ses deux prises accélérées en eau, la masse de la plaque n°I a augmenté de 6,7 g par rapport à sa masse initiale. Après environ 4 mois à température ambiante et une perte de masse de 1,5 g, la plaque est séchée en étuve pendant 3 mois et demi, où elle perd 3,7 g. Après séchage, la masse de la plaque est de 468,6 g. Elle a augmenté de 1,5 g entre l'état initial et la fin du séchage. La plaque n'a pas retrouvé sa masse initiale mais une masse qui peut être considérée comme assez proche de celle-ci.

Pour la seconde étude (figure II.1(b)), la masse initiale de la plaque n°I était de 468,9 g. Après la première prise accélérée en eau, d'environ 2 jours, la masse de la plaque a augmenté de 4 g. Durant le temps de latence (environ 10 jours), la masse diminue de 1 g. Lors de la seconde prise accélérée en eau, d'environ 5 jours, la masse augmente de 4,8 g. Après ces deux prises accélérées en eau, la masse de la plaque n°I a augmenté de 7,8 g par rapport à sa masse initiale. Le séchage est effectué juste après la fin de la dernière prise accélérée en eau et dure environ 2 mois. La masse de la plaque diminue de 7,6 g et vaut 469,1 g. Cette masse a augmenté de 0,2 g durant tout le processus (prises en eau et séchage). La plaque a donc retrouvé une masse très proche de sa masse initiale.

Des mesures par ondes guidées sont effectuées pendant les étapes de prise en eau ou de séchage pour vérifier si les vitesses de phase ou les atténuations sont sensibles à l'évolution du taux d'humidité dans le matériau. Elles sont commentées au paragraphe II.3. Si une telle sensibilité existe alors la réversibilité (retour à un état proche de l'état initial) et la répétitivité (deux études de prise en eau et de séchage similaires) du phénomène pourront être étudiées.

II.2.2. Évolution de masse sur la plaque n°II

La figure II.2 représente l'évolution de masse de la plaque n°II, en fonction du temps d'exposition pour la prise en eau (proche des conditions de mise en service de structures) et le séchage. Le processus complet de prise en eau et de séchage a été renouvelé (figure II.2 (b))

pour comparer les variations de masse à celles qui sont obtenues dans la première étude (figure II.2(a)).

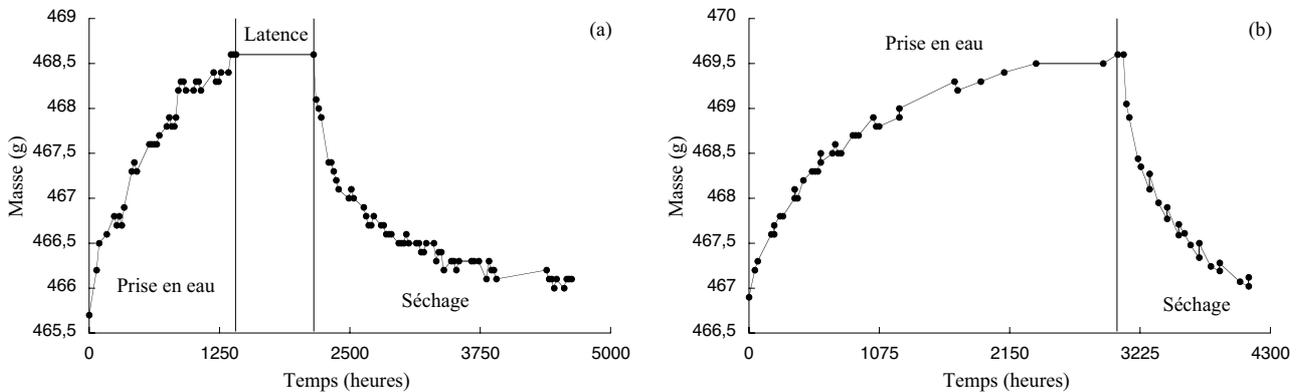


figure II.2. Évolution de la masse de la plaque n°II en fonction du temps d'exposition pour la prise en eau et le séchage : première (a) et seconde (b) études.

À l'état initial (figure II.2(a)), la masse de la plaque n°II était de 465,7 g. L'élévation de masse, pendant le processus de prise en eau (environ 2 mois), est de 2,9 g. Durant le temps de latence (1 mois), la masse ne diminue pas car la plaque a été conditionnée pour ne pas perdre d'humidité avant le séchage. Le séchage dure environ 6 mois et la masse de la plaque diminue de 2,5 g et vaut 466,1 g. À la fin du séchage, la plaque a retrouvée une masse proche de sa masse initiale. Des mesures ultrasonores par ondes guidées sont effectuées aux étapes principales de prise en eau et de séchage pour déterminer la sensibilité des modes au taux d'humidité de la plaque. Elles sont commentées dans le paragraphe II.3.

Pour la seconde étude (figure II.2(b)), la masse initiale de la plaque n°II était de 466,9 g. Après la prise en eau, d'environ 4 mois, la masse de la plaque a augmenté de 2,7 g. Le séchage est effectué juste après la fin de cette prise en eau et dure environ 1 mois et demi. La masse de la plaque diminue de 2,5 g et retrouve une valeur proche de celle de la masse initiale. Les mesures par ondes guidées sont effectuées tout au long du processus de prise en eau et de séchage. Si la sensibilité des modes guidés est constatée alors la réversibilité et la répétitivité du phénomène seront étudiées (paragraphe II.3).

II.3. Sensibilité des ondes guidées au taux d'humidité

Au cours des diverses phases de prise en eau et de séchage, des mesures par ondes ultrasonores guidées ont été effectuées et les nombres d'ondes complexes des différents modes propagés sont mesurés. Les propriétés mécaniques sont de nouveau optimisées en utilisant le schéma du problème inverse présenté au paragraphe I.4, qui consiste à trouver les valeurs optimales des modules de viscoélasticité permettant aux courbes de dispersion de correspondre le mieux possible aux mesures.

II.3.1. Contrôle du taux d'humidité

Les nombres d'onde complexes des trois modes guidés A_0 , S_0 et S_1 sont donc mesurés, sur les deux plaques n°I et n°II, au cours des différentes phases de prise en eau et de séchage. Les résultats montrant l'évolution des nombres d'onde complexes de la plaque n°II, lorsqu'elle est soumise au procédé de prise en eau et de séchage pour la seconde fois, sont présentés à titre d'exemple.

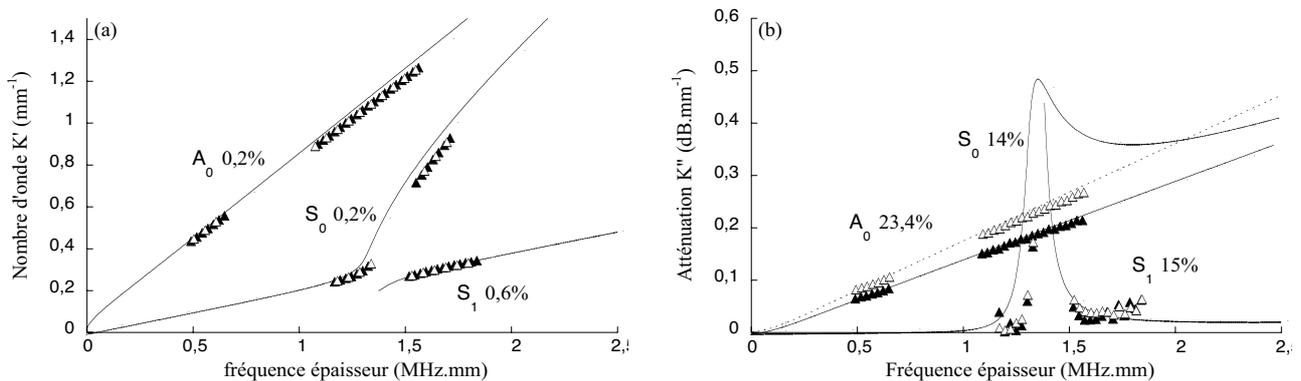


figure II.3. Mesures (triangles) et prédictions numériques (lignes) avant (\blacktriangle ,—) et après (\triangle ,---) la prise en eau de la plaque n°II (seconde étude) ; parties réelles (a) et imaginaires (b) des nombres d'onde complexes.

La figure II.3 présente les parties réelle et imaginaire des nombres d'onde complexes, avant et après la prise en eau, pendant la seconde étude, lorsque la plaque de carbone-époxyde n°II est, respectivement, à l'état initial et à saturation. La variation relative entre ces deux prises de mesures est calculée en utilisant la relation (I.9) où X_i^1 et X_i^2 sont les valeurs expérimentales de k' ou k'' pour un mode donné, avant ($j=1$) et après ($j=2$) prise d'humidité. La figure II.3(a) montre que les changements dans les parties réelles des nombres d'onde

complexes des modes A_0 , S_0 et S_1 sont plus petits que les mesures de reproductibilité (1% pour A_0 , 3% pour S_0 et 4% pour S_1). Par conséquent, k' n'est pas suffisamment sensible à l'évolution du taux d'humidité dans le matériau. La figure II.3(b) montre que les changements dans les parties imaginaires des nombres d'onde complexes des modes S_0 et S_1 sont légèrement plus grands que les mesures de reproductibilité (8% pour S_0 et 10% pour S_1). Cependant, ces changements ne sont pas suffisamment importants pour conclure à une sensibilité significative de l'atténuation de ces deux modes. Seule l'atténuation du mode A_0 est largement sensible au taux d'humidité : son atténuation augmente de 23,4%, ce qui est beaucoup plus important que son taux de reproductibilité (6%). L'absorption d'eau par ces composites carbone-époxyde est donc principalement détectable en mesurant l'atténuation du mode A_0 . Comme il est mentionné dans la référence [57], cette variation d'atténuation est probablement due à la dispersion des ondes sur les microcavités dans le matériau. Effectivement, lors l'eau pénètre dans le matériau, de nouvelles microcavités peuvent se former et celles déjà présentes s'ouvrir davantage. Le matériau étudié est poreux à 1%. Le taux d'humidité maximal que le matériau puisse contenir est donc relativement faible et explique qu'il n'y ai pas d'évolution sur les parties réelles des nombres d'ondes complexes [57,58].

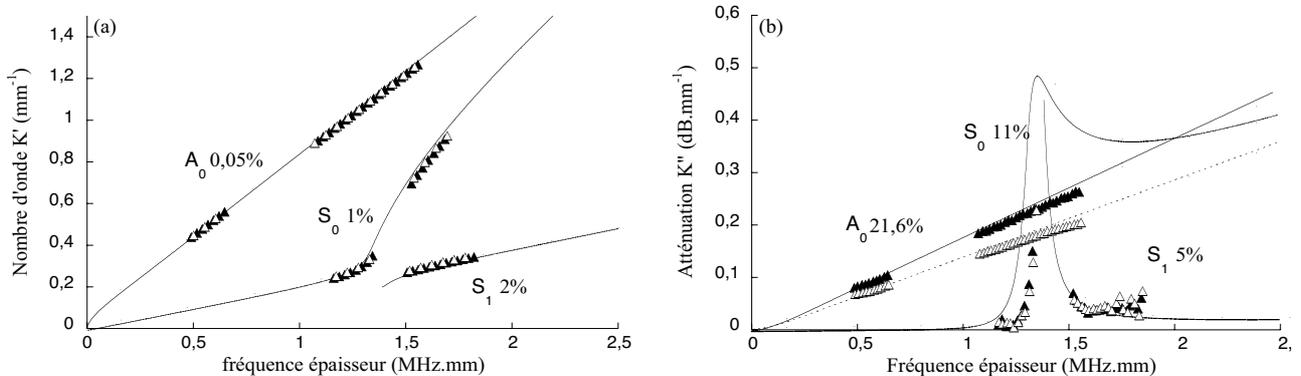


figure II.4. Mesures (triangles) et prédictions numériques (lignes) avant (\blacktriangle , —) et après (\triangle , ---) le séchage de la plaque n°II (seconde étude) ; parties réelles (a) et imaginaires (b) des nombres d'onde complexes.

La figure II.4 présente les parties réelle et imaginaire des nombres d'onde complexes de la plaque n°II, avant et après le séchage, pendant la seconde étude. La variation relative entre ces deux prises de mesures est toujours calculée en utilisant la relation (I.9). Les parties réelles des nombres d'onde complexes de tous les modes générés, et les atténuations des deux modes S_0 et S_1 ne montrent aucun changement significatif dû au séchage. Toutefois,

l'atténuation du mode A_0 décroît de 21,6% pendant le séchage (figure II.4(b)). Le matériau retourne à son état initial, ce qui confirme la réversibilité du phénomène. Cela permet de supposer que la température imposée, lors de la prise en eau ou du séchage, a tendance à ouvrir les microcavités du matériau, permettant à l'eau de pénétrer ou de sortir de celui-ci. Le matériau ne subit donc pas de changements irréversibles (plastification, hydrolyse) au cours de la prise en eau ou du séchage.

Le tableau II.1 présente l'effet du taux d'humidité sur la masse et sur la partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe du mode A_0 , pour les deux plaques n°I et n°II, et au cours des différentes phases de prise en eau et de séchage. Seules les évolutions du mode A_0 sont représentées car, comme il a été montré précédemment et constaté aux cours des nombreuses prises de mesures, les deux autres modes S_0 et S_1 ne sont pas sensibles à la variation du taux d'humidité dans les plaques étudiées. La variation relative entre deux prises de mesures est toujours calculée en utilisant la relation (I.9). Les variations de masse sont environ deux fois plus importantes lors de la prise en eau et du séchage de la plaque n°I que lors de ceux de la plaque n°II. Les évolutions du k'' du mode A_0 suivent cette tendance puisqu'elles sont de l'ordre de 40% dans la plaque n°I et de 20% dans la plaque n°II. Il est bien confirmé, aux vues des différents résultats présentés dans le tableau II.1, que l'atténuation k'' du mode guidé A_0 permet de suivre l'évolution du taux d'humidité dans les plaques composites carbone-époxyde, que le phénomène est reproductible et que le séchage permet un retour à un état proche de l'état initial du matériau.

		Évolution de masse	Évolution de k''
Plaque n°I	Prise en eau (1 ^e étude)	+ 6,7 g	+ 36,3%
	Séchage (1 ^e étude)	- 5,2 g	- 47,5%
	Prise en eau (2 ^e étude)	+ 7,8 g	+ 43,3%
	Séchage (2 ^e étude)	- 7,6 g	- 32%
Plaque n°II	Prise en eau (1 ^e étude)	+ 2,9 g	+ 24,5%
	Séchage (1 ^e étude)	- 2,5 g	- 14,6%
	Prise en eau (2 ^e étude)	+ 2,7 g	+ 23,4%
	Séchage (2 ^e étude)	- 2,5 g	- 21,6%

tableau II.1. Évolution de masse et effet du taux d'humidité sur la partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe du mode A_0 des deux plaques n°I et n°II.

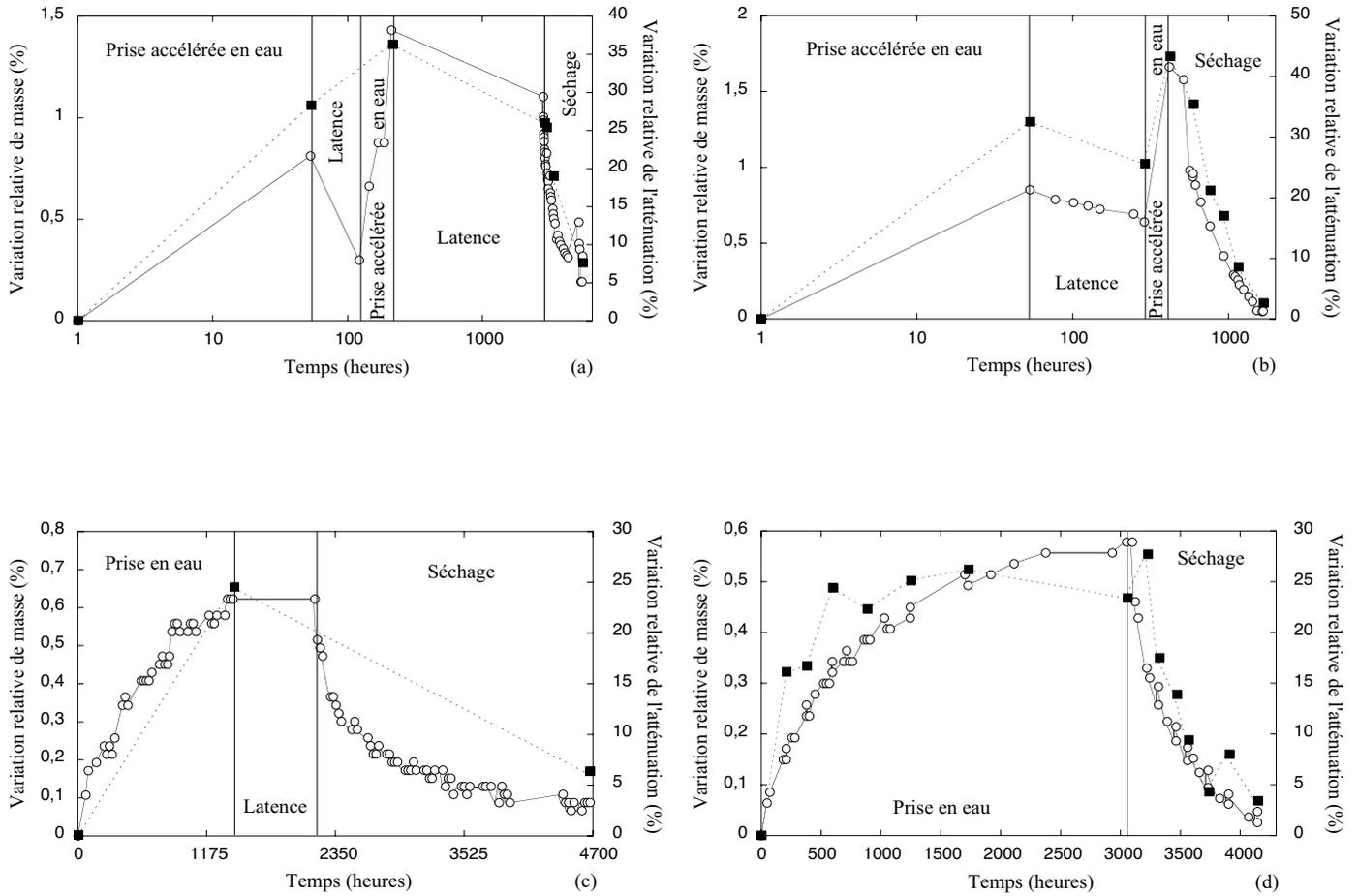


figure II.5. Variation relative de l'atténuation (■) du mode A_0 comparée à la variation relative de masse (○) de la plaque n°I pendant la première (a) et la seconde (b) études et de la plaque n°II pendant la première (c) et la seconde (d) études.

Puisque la masse des plaques varie lors des différentes étapes d'humidification et de séchage, il est intéressant de comparer ces variations aux changements de l'atténuation du mode A_0 . Il est à noter que les données ultrasonores (figure II.5) correspondent au changement relatif (par rapport à l'état initial) de l'atténuation du mode A_0 moyennée sur le spectre en fréquence d'excitation. Les campagnes de vieillissement ont été réalisées deux fois sur chacune des deux plaques pour vérifier la répétitivité des résultats (première et seconde étude). Dans la première étude sur les plaques n°I et II, les mesures ultrasonores ont pour la plupart été à l'état initial, après prise en eau et après séchage. La partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe du mode A_0 a tendance à suivre la variation relative de masse (figure II.5(a) et (c)). Dans la seconde étude, les mesures par ondes guidées sont effectuées tout au long de la prise en eau et du séchage. La tendance du k'' du mode A_0 à suivre

l'évolution de la masse due au taux d'humidité dans le matériau est largement confirmée (figure II.5(b) et (d)).

En regard de ces résultats, l'atténuation du mode A_0 est une bonne jauge du taux d'humidité dans les plaques de composite carbone-époxyde testées. Des changements très similaires dans l'évolution de la masse de la plaque et de l'atténuation du mode A_0 ont été obtenus. La mesure ultrasonore, par transducteurs à couplage par air, de l'atténuation du mode A_0 est donc une méthode très prometteuse pour le contrôle du taux d'humidité dans les structures en carbone-époxyde, puisqu'elle peut être effectuée en accès unilatéral et sans contact.

II.3.2. Estimation de la partie imaginaire du module de Coulomb

L'étude de la sensibilité des ondes guidées aux modules de viscoélasticité, effectuée au paragraphe I.4.1, montre que l'atténuation du mode A_0 est essentiellement sensible au module C''_{66} . Comme seule l'atténuation du mode A_0 a significativement varié lors des différentes étapes de la prise en eau et du séchage, seul le module C''_{66} est sensible au niveau d'humidité dans le matériau. Le module C^*_{66} représente le module de Coulomb dans le plan de symétrie P_{12} et C''_{66} est sa partie imaginaire. En utilisant le problème inverse (paragraphe I.4), la valeur du C''_{66} est alors optimisée de telle sorte que l'atténuation calculée de A_0 corresponde au mieux aux mesures, pour différents niveaux d'humidité. Le tableau II.2 présente la variation de l'atténuation du mode A_0 associée à la variation de la partie imaginaire C''_{66} du module de Coulomb pour les deux plaques et pour les deux études.

		Évolution de k''	Évolution de C''_{66}
Plaque n°I	Prise en eau (1 ^e étude)	+ 36,3%	+ 27%
	Séchage (1 ^e étude)	- 47,5%	- 37%
	Prise en eau (2 ^e étude)	+ 43,3%	+ 40%
	Séchage (2 ^e étude)	- 32%	- 28%
Plaque n°II	Prise en eau (1 ^e étude)	+ 24,5%	+ 20%
	Séchage (1 ^e étude)	- 14,6%	- 11%
	Prise en eau (2 ^e étude)	+ 23,4%	+ 26%
	Séchage (2 ^e étude)	- 21,6%	- 21%

tableau II.2. Variations relatives de la partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe du mode A_0 et de la partie imaginaire C''_{66} du module de Coulomb des deux plaques n°I et n°II.

II.4. Conclusion

La sensibilité des ondes guidées au taux d'humidité dans des plaques composites carbone-époxyde a été étudiée. Des mesures expérimentales des nombres d'onde complexes ont été effectuées pour les trois modes A_0 , S_0 et S_1 . La technique utilise des transducteurs capacitifs à couplage par air, qui permettent un accès unilatéral et sans contact avec les échantillons testés. Il a été démontré que l'atténuation du mode A_0 est une bonne jauge du taux d'humidité dans ce type de matériaux : ses changements, durant les procédés de prise en eau et de séchage, suivent très bien ceux de la masse des plaques. L'atténuation du mode A_0 étant corrélée à la partie imaginaire du module de Coulomb dans le plan de propagation, une procédure numérique a servi à quantifier ce paramètre. L'absorption d'humidité par les plaques testées a amené à une augmentation de la partie imaginaire du module de Coulomb et *vice versa*. Le matériau utilisé étant très peu poreux (1%), il reprend très peu d'humidité et permet de conclure sur la très grande sensibilité de l'atténuation du mode A_0 à de faibles taux d'humidité. Cette méthode de suivi de l'évolution du taux d'humidité sera donc applicable à un grand nombre de matériaux, beaucoup plus poreux (composite verre/époxyde). Les résultats de ce chapitre ont été publiés dans un journal international [60] et présentés lors de deux conférences une avec Comité de lecture [61] et l'autre sans acte [62].

Chapitre III

**Contrôle par ondes guidées de la microfissuration de
plaques composites soumises à des environnements
basses températures**

Chapitre III. Contrôle par ondes guidées de la microfissuration de plaques composites soumises à des environnements basses températures

III.1. Introduction

Les réservoirs embarqués sont utilisés pour le stockage de gaz ou de fluides conditionnés à très basses températures. Le conditionnement de ces fluides peut causer des changements irrémédiables dans la structure et conduire à une évolution des propriétés globales de certains matériaux composites la constituant. *J.F. Timmerman et al.* [63] ont étudié les effets de cycles basses températures, dits cryogéniques, sur des matériaux composites à fibres de carbone et matrice époxyde. *Herakovick et al.* [64] examinent, avec des procédés mécaniques destructifs, des endommagements dans des composites soumis simultanément à de hautes températures et à des cycles en fatigue mécanique. *Seale et al.* [65-68] ont étudié, avec un procédé de caractérisation par ondes de Lamb, les effets de la microfissuration produite par fatigues thermique et mécanique sur la raideur des composites. Un grand nombre de ces cycles entraîne une forte dégradation du matériau composite. La fissuration de la matrice, induisant une modification des modules élastiques, peut être détectée par variation de la vitesse de phase de certains modes de Lamb [65-70]. En utilisant des procédés de contrôle et d'évaluation par immersion, des études ont été réalisées sur la détermination par ondes de Lamb de l'évolution des propriétés élastiques des matériaux lors de leur microfissuration. Pour des mesures à travers l'épaisseur de plaques, l'atténuation est sensible à la fissuration, alors que la vitesse ne l'est pas. Pour la propagation des ondes de Lamb dans le plan de la plaque, à la fois la vitesse des ondes et l'atténuation sont sensibles à la fissuration [71-72]. La variation des modules d'élasticité, lors de l'apparition et de l'évolution de la microfissuration, peut être formulée analytiquement en utilisant les théories de l'endommagement [73-77]. La géométrie et la densité des fissures sont corrélées avec les variations de certains modules d'élasticité.

L'objectif de cette étude est de montrer la sensibilité des ondes guidées au degré de microfissuration engendrée par des cycles à basses températures dans des matériaux composites carbone-époxyde. L'orientation des plis des matériaux considérés est appropriée pour obtenir une forte microfissuration sans délaminage lors de chocs thermiques.

Effectivement, un matériau d'empilement unidirectionnel ne fissurera pas tandis qu'un matériau d'empilement $[0/90]$ fissurera tellement qu'il y aura délaminage entre les différents plis. De plus, pour que ces matériaux fissurent, ils doivent être élaborés avec des fibres haut modules et des résines à faibles coefficients de dilatation thermique. Une étude préliminaire, réalisée sur une plaque d'empilement $[0/+60/-60]_{33s}$, possédant un fort potentiel à la microfissuration lors de chocs thermiques, est menée pour tester si au moins une caractéristique d'un mode guidé est sensible à cet endommagement. La seconde étude est effectuée sur des plaques d'empilements $[0/+45/90/-45]_{6s}$, $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ et $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$, possédant des potentiels à micro fissurer progressifs, de manière à voir si les ondes guidées permettent de suivre l'évolution du taux de microfissures. Cette étude a été renouvelée sur des plaques d'empilements identiques pour évaluer la répétitivité des phénomènes observés. Plusieurs séries de conditionnements en température sont appliquées aux différentes plaques. Les plaques sont d'abord placées dans une enceinte dont la température varie entre -50°C et -150°C . Pour atteindre des températures inférieures à -150°C , les plaques sont ensuite trempées dans un bain d'azote (-196°C). Ces trempes provoquent des chocs thermiques et non des mises progressives à température. Après chaque sollicitation à basses températures, les parties réelles des nombres d'onde complexes des modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 , générés dans la plaque de l'étude préliminaire, sont mesurées. De même, des mesures des nombres d'onde complexes des modes A_0 et S_0 sont effectuées pour les autres plaques. En comparant ces mesures ultrasonores aux prédictions numériques, le problème inverse est résolu pour déduire les parties réelles et imaginaires des modules de viscoélasticité des plaques. Systématiquement après chaque choc thermique, les mesures ultrasonores sont comparées à des micrographies relevant l'état interne du matériau, pour corrélérer les éventuelles variations des différents modes générés au taux de microfissuration des matériaux.

III.2. Plaque carbone époxyde $[0/+60/-60]_{33s}$

III.2.1. Présentation du matériau composite utilisé

L'étude préliminaire est effectuée sur une plaque de composite fournie par EADS SPACE Transportation. Les couches de composite, faites de tissu UD dont les plis de 0,25 mm sont à base de fibres de carbone et d'une matrice époxyde, sont empilées suivant le schéma $[0/+60/-60]_{33s}$. L'épaisseur de la plaque est $(16,4 \pm 0,5)$ mm et sa densité vaut

(1,53±0,01). Les valeurs optimisées des modules d'élasticité du matériau sont obtenues en utilisant le problème inverse (paragraphe I.4) résolu à partir de mesures par ondes guidées présentée en annexe A. Les modules d'élasticité, obtenus dans les plans P₁₂ et P₁₃, ont des valeurs similaires. Le matériau est à symétrie quadratique. L'étude sera réalisée dans le plan de symétrie P₁₂ avec les valeurs des modules d'élasticité présentées dans le tableau III.1. La plaque étant très épaisse, les ondes sont très fortement et très rapidement atténuées. Le traitement des signaux pour obtenir les parties imaginaires des nombres d'onde complexes n'a donc pas pu être effectué. Par conséquent, les valeurs des parties imaginaires des modules de viscoélasticité n'ont pas pu être obtenues.

C'_{11}	C'_{22}	C'_{66}	C'_{12}
10,9 ^{±0,2}	164 ^{±5}	3,1 ^{±0,1}	10,8 ^{±0,5}

tableau III.1. Modules d'élasticité (GPa) de la plaque [0/+60/-60]_{33s} dans le plan P₁₂ avant les cycles basses températures.

III.2.2. Protocoles d'endommagement thermique basses températures

La plaque est sollicitée suivant différents cycles à basses températures pour faire évoluer le taux de microfissures dans le matériau. Pour la première sollicitation, cette plaque est placée dans une enceinte à la température de -100°C, en environnement air, pendant environ 1 heure 30 min. Elle est ensuite trempée à deux reprises dans de l'azote liquide pour atteindre une température de -196°C, pendant environ 5 min. Le temps de refroidissement de l'échantillon, dans un environnement spécifique, est donné par la relation suivante :

$$\tau = \frac{e\rho C}{2h_T} \quad (\text{III.1})$$

où e est l'épaisseur de l'échantillon, ρ sa masse volumique, C sa capacité thermique massique et h_T le coefficient d'échange thermique entre le matériau et l'environnement. La capacité thermique massique des matériaux composites carbone-époxyde est de l'ordre de 2000 J.kg⁻¹.°K⁻¹. Le coefficient d'échange thermique entre le composite et l'air est égal à 10 J.s⁻¹.m⁻².°K⁻¹ et celui entre le composite et l'azote liquide est compris entre 1000 et 10000 J.s⁻¹.m⁻².°K⁻¹. D'après la relation (III.1), le temps de refroidissement de la plaque dans l'air est de 41 min et celui de la plaque dans l'azote liquide varie entre 3 et 30 secondes.

Des mesures par ondes guidées sont effectuées à l'état initial et après chaque cycle basse température décrit dans le tableau III.2.

<i>État</i>	<i>Description</i>
E1	état initial
E2	enceinte à -100°C
E3	1 ^e trempe en azote liquide
E4	2 ^e trempe en azote liquide

tableau III.2. Nomination des différents cycles à basses températures.

III.2.3. Sensibilité des ondes guidées aux cycles basses températures

Après chacune des sollicitations à basses températures, des mesures par ondes guidées sont effectuées pour atteindre les parties réelles des nombres d'onde complexes des différents modes propagés. Les modules d'élasticité sont de nouveau optimisés en utilisant le schéma du problème inverse présenté au paragraphe I.4.

III.2.3.1. Reproductibilité des mesures

Deux campagnes expérimentales sont menées pour chaque contrôle par ondes guidées avant et après les différentes sollicitations. La totalité de ces campagnes permet de quantifier la reproductibilité des mesures, pour les parties réelles des nombres d'onde complexes (les mesures des parties imaginaires ne donnant pas de résultats cohérents). Le pourcentage de reproductibilité est défini par la formule (I.9). La reproductibilité des parties réelles k' est, en moyenne, de l'ordre de 0,5% pour le mode A_0 et de 1% pour les modes S_0 , A_1 et S_1 .

III.2.3.2. Variations des modes guidés aux sollicitations basses températures

Les parties réelles des nombres d'onde complexes des quatre modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 sont mesurées à l'état initial de la plaque et après chacune de ses sollicitations à basses températures.

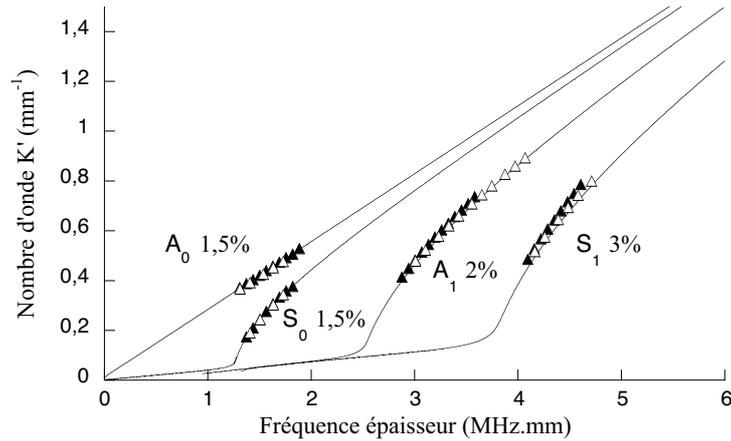


figure III.1. Mesures (triangles) et prédictions numériques (lignes) des parties réelles des nombres d'onde complexes des modes A_0 , S_0 , A_1 , et S_1 , à l'état E1 (\blacktriangle , —) et à l'état E2 (\triangle , ---).

Après la sollicitation à -100°C (E2), une légère diminution des parties réelles des nombres d'onde complexes est constatée (figure III.1). Cette évolution reste très proche du domaine de reproductibilité de chacun des modes. Les résultats obtenus sur cette plaque à l'état E2 ne permettent pas de conclure sur le suivi par ondes guidées d'une éventuelle dégradation du matériau composite. Les trempes en azote liquide permettront peut-être d'obtenir des variations sortant du domaine de reproductibilité.

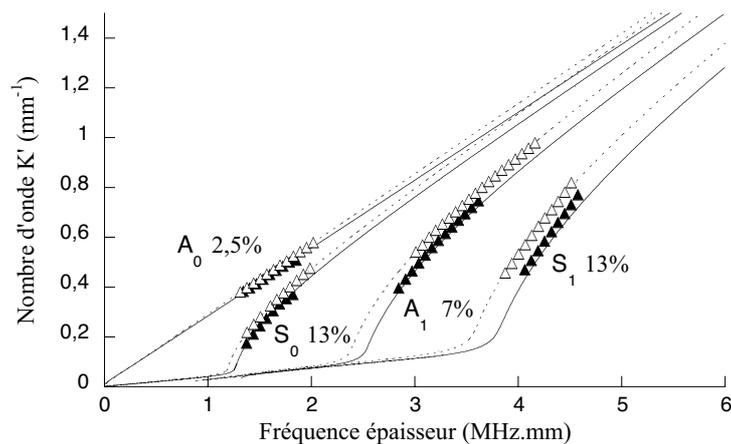


figure III.2. Mesures (triangles) et prédictions numériques (lignes) des parties réelles des nombres d'onde complexes des modes A_0 , S_0 , A_1 , et S_1 , à l'état E1 (\blacktriangle , —) et à l'état E3 (\triangle , ---).

Après la première trempe en azote liquide (E3), les parties réelles des nombres d'onde complexes augmentent significativement (figure III.2). Cette évolution sort largement du domaine de reproductibilité de chacun des modes. Les résultats obtenus montrent que les quatre modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 sont sensibles aux évolutions du matériau engendrées par la trempe en azote liquide.

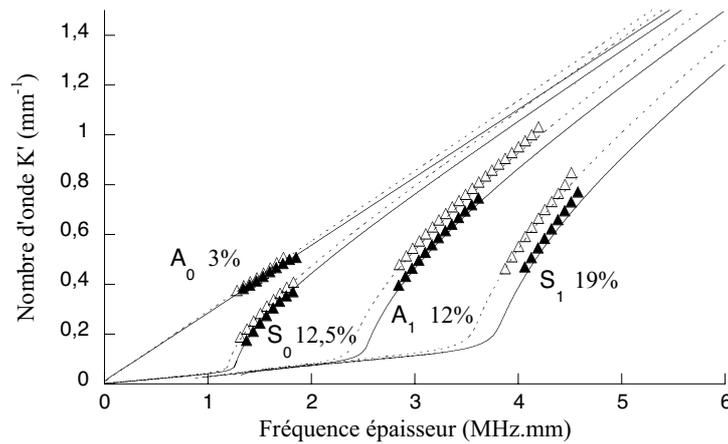


figure III.3. Mesures (triangles) et prédictions numériques (lignes) des parties réelles des nombres d'onde complexes des modes A_0 , S_0 , A_1 , et S_1 , à l'état E1 (\blacktriangle ,—) et à l'état E4 (\triangle ,---).

Après la seconde trempe en azote liquide (E4), les variations des parties réelles des nombres d'onde complexes des modes A_0 et S_0 restent dans les mêmes proportions que lors de la sollicitation précédente (figure III.3). En revanche, les parties réelles des nombres d'onde complexes des modes A_1 et S_1 augmentent par rapport à la première trempe. Ces résultats confirment la sensibilité des modes guidés à une éventuelle dégradation du matériau soumis à des sollicitations brutales à basses températures.

III.2.3.3. Variations des modules élastiques

L'étude de la sensibilité des ondes guidées aux modules d'élasticité montre que les parties réelles k' des nombres d'onde complexes des modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 sont corrélées aux modules d'élasticité C'_{11} , C'_{22} , C'_{66} , C'_{12} (paragraphe I.4.1). Les valeurs des modules d'élasticité du matériau sont optimisées après la dernière trempe en azote liquide en utilisant le problème inverse (paragraphe I.4) résolu à partir de mesures par ondes guidées présentée en annexe A. Le tableau III.3 présente les variations des nombres d'onde k' des modes A_0 , S_0 ,

A_1 et S_1 et des modules d'élasticité C'_{ij} à l'état E4. La relation déterminant la variation relative des modules d'élasticité C'_{ij} à l'état E4, est donnée par :

$$\left(1 - \frac{C'_{ij}{}^{E4}}{C'_{ij}{}^{E1}}\right) \times 100 \quad (\text{III.2})$$

Les valeurs des quatre modules diminuent au-delà des limites des intervalles d'erreurs (tableau III.1 et tableau A.1) et dans des proportions relativement proches, entre 9,5 et 13,5%. Les augmentations des k' des modes guidés sont très différentes puisqu'ils varient de 3 à 19%. Les trempes en azote liquide affectent l'intégrité de la plaque composite $[0/+60/-60]_{33s}$ puisque l'ensemble des modules d'élasticité du matériau diminue de façon significative.

Évolutions des k'		Évolutions des C'_{ij}	
A_0	+ 3%	C'_{11}	- 12%
S_0	+ 12,5%	C'_{22}	- 13,5%
A_1	+ 12%	C'_{66}	- 9,5%
S_1	+ 19%	C'_{12}	- 13%

tableau III.3. Variations relatives des nombres d'onde k' des modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 et des modules d'élasticité C'_{ij} de la plaque $[0/+60/-60]_{33s}$ à l'état E4.

III.2.4. Étude de la microfissuration par micrographies

Une étude micrographique a été menée parallèlement avec le contrôle par ondes guidées pour corréliser les résultats ultrasonores avec l'évolution d'une éventuelle microfissuration du matériau. Un échantillon a été prélevé sur la plaque $[0/+60/-60]_{33s}$, à l'état initial, et a subi des sollicitations identiques à celle-ci, mise à -100°C et deux trempes en azote liquide. La figure III.4 présente les dimensions de cette éprouvette ainsi que les zones d'inspection par micrographie montrant les exemples les plus significatifs des évolutions du matériau. Les faces inspectées ont été polies pour une meilleure visibilité des différentes couches du composite et des fissures. Les micrographies sont réalisées par EADS SPACE Transportation avec un microscope optique Polyvar2 MET REICHERT, dont la capacité de grossissement varie entre $\times 5$ et $\times 1000$.

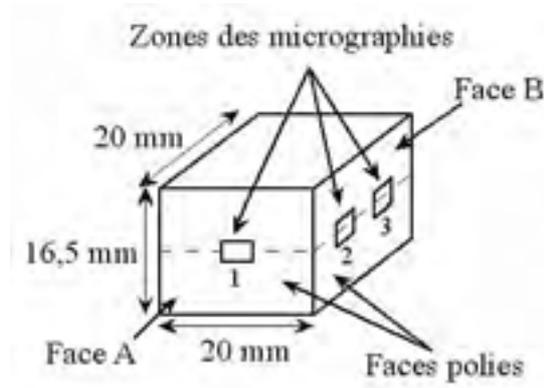


figure III.4. Schéma de l'éprouvette $[0/+60/-60]_{33s}$ utilisée pour les micrographies avec les différentes zones d'observation.

À l'état initial (E1), des fissures de taille conséquente, situées au niveau du pli central sur les deux faces A et B sont observées (figure III.5 et figure III.7). Après la sollicitation à -100°C (E2), quelques nouvelles fissures apparaissent (figure III.5 à figure III.7). Cette évolution de la microfissuration ne semble pas suffisamment importante pour que les variations des k' des quatre modes générés sortent significativement du domaine de reproductibilité (figure III.8(E2)). Après la première trempe en azote liquide (E3), quelques fissures apparaissent et d'autres, déjà présentes, s'ouvrent davantage (figure III.5 et figure III.7). Cette évolution de la microfissuration est suffisamment importante pour que les k' des modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 varient de façon significative et sortent largement du domaine de reproductibilité (figure III.8(E3)). Après la seconde trempe en azote liquide (E4), il y a apparition de nouvelles fissures (figure III.5(E4)) et ouverture de certaines anciennes (figure III.7(E4)). Seuls les modes A_1 et S_1 varient de façon conséquente par rapport à la variation à l'état précédent (figure III.8(E4)). À ce stade, le degré de microfissuration du matériau est tel, que ses propriétés mécaniques sont dégradées (diminution des modules d'élasticité).

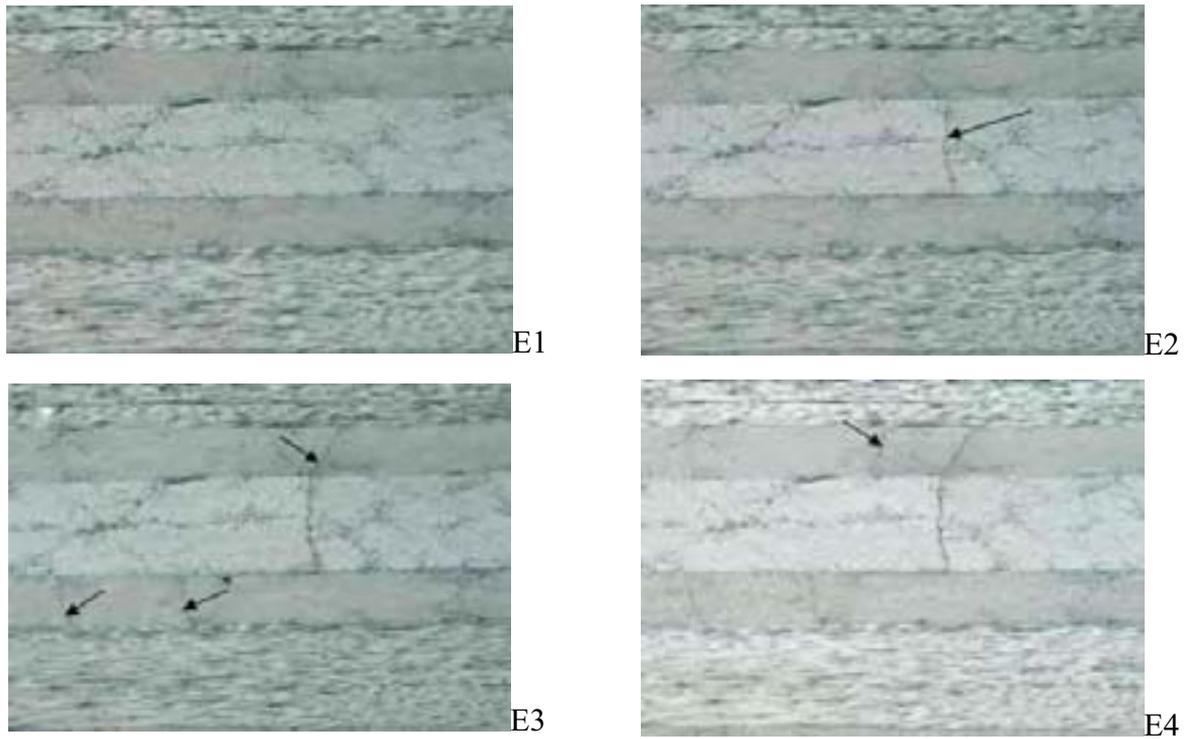


figure III.5. Micrographies de l'échantillon $[0/+60/-60]_{33s}$ pour chaque état de sollicitation, effectuées sur la face A (zone 1) et à l'échelle $350 \mu\text{m}$ pour 1 cm .

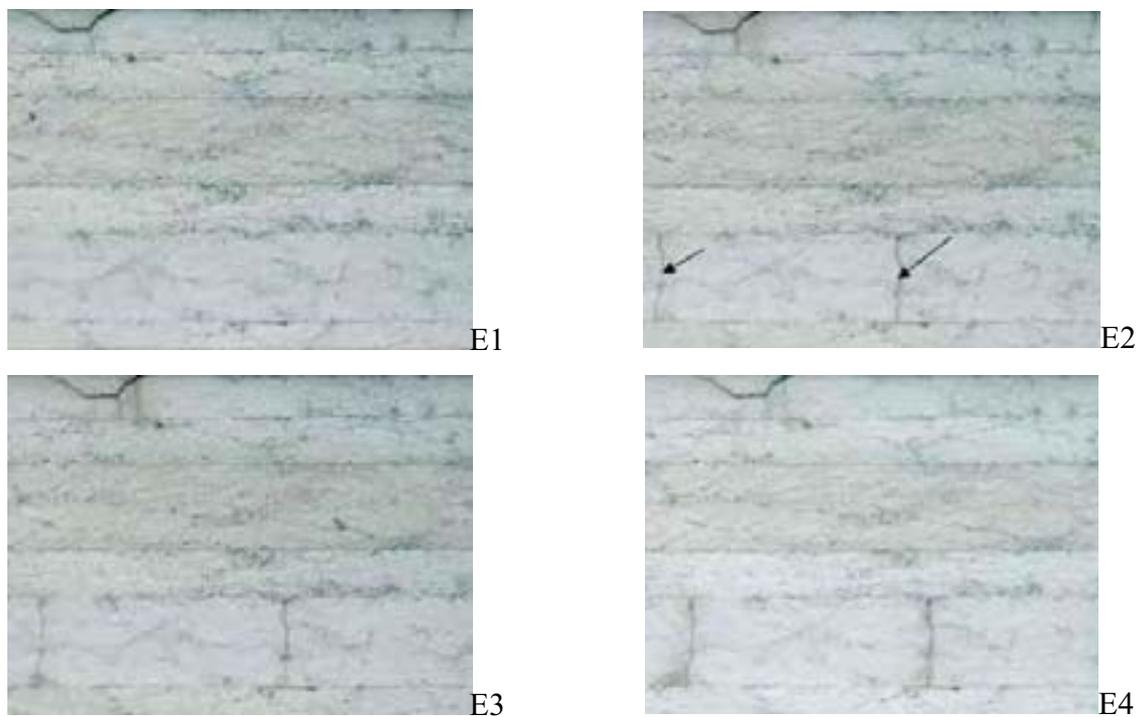


figure III.6. Micrographies de l'échantillon $[0/+60/-60]_{33s}$ pour chaque état de sollicitation, effectuées sur la face B (zone 2) et à l'échelle $450 \mu\text{m}$ pour 1 cm .

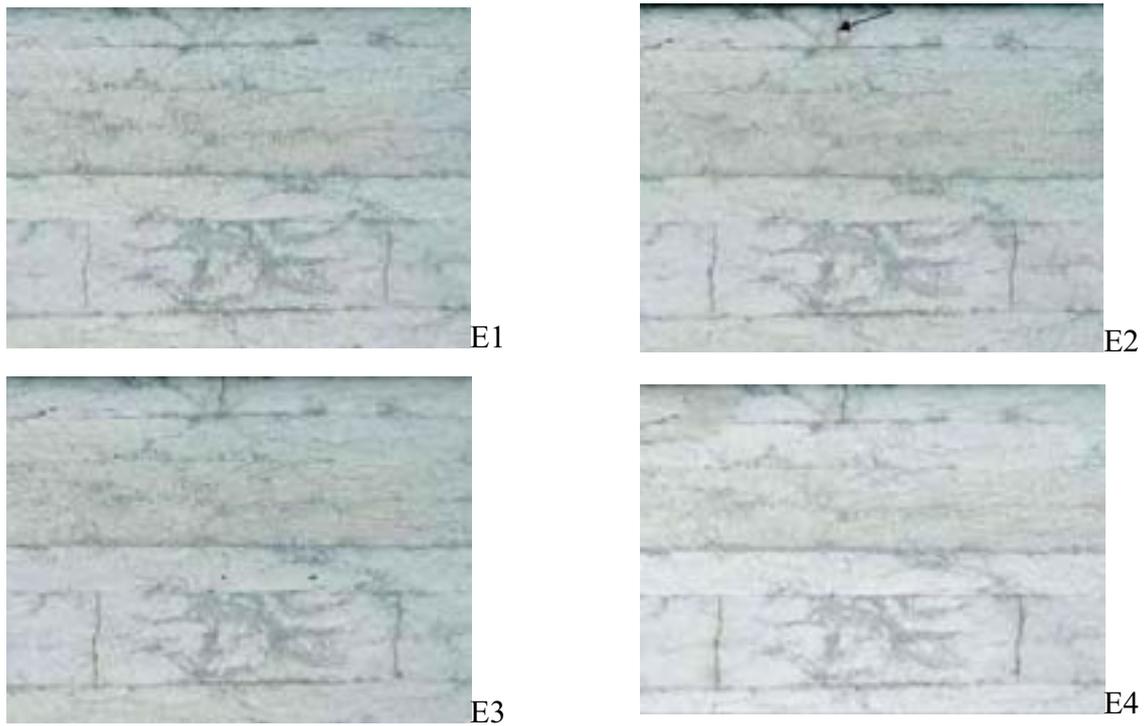


figure III.7. Micrographies de l'échantillon $[0/+60/-60]_{33s}$ pour chaque état de sollicitation, effectuées sur la face B (zone 3) et à l'échelle $450 \mu\text{m}$ pour 1 cm.

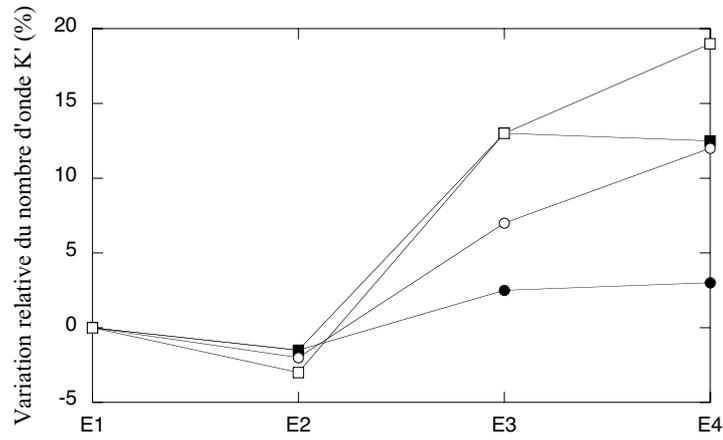


figure III.8. Variation relative des parties réelles des nombres d'onde complexes des modes A_0 (●, —), S_0 (■, —), A_1 (○, —), et S_1 (□, —) pour chaque état de sollicitation.

III.2.5. Discussion

La sensibilité des ondes guidées à la microfissuration provoquée par des cycles à basses températures a été étudiée sur une plaque composite carbone-époxyde $[0/+60/-60]_{33s}$. Des mesures expérimentales des parties réelles k' des nombres d'ondes complexes des modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 ont été effectuées pour chaque état de sollicitation du matériau. Il a été montré que les k' de chaque mode généré permettent de jauger les changements dans le matériau lors des cycles à basses températures. Une étude numérique a permis de quantifier les modules d'élasticité C'_{11} , C'_{22} , C'_{66} et C'_{12} par rapport aux nombres d'onde k' des quatre modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 . Les micrographies effectuées sur un échantillon de la plaque ont montré que les cycles à basses températures entraînent la microfissuration du matériau. Les k' des modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 sont donc sensibles au taux de microfissuration de la plaque testée.

III.3. Plaques carbone-époxyde $[0/+45/90/-45]_{xs}$

III.3.1. Présentation des matériaux utilisés

Cette étude est réalisée sur des plaques composites fournies par EADS SPACE Transportation. Ces plaques sont constituées de fibres de carbone et d'une matrice époxyde. Elles ont des séquences d'empilements différents et chaque pli a une épaisseur de 0,1 mm. Deux plaques, numérotées 1-1 et 1-2, ont une séquence d'empilement de la forme $[0/+45/90/-45]_{6s}$, deux plaques, numérotées 2-1 et 2-2, une séquence d'empilement $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ et deux plaques, numérotées 3-1 et 3-2, une séquence d'empilement $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$. Avec ces différences dans les séquences d'empilement, les matériaux doivent à priori réagir différemment aux cycles basses températures ; les plaques ne sont donc pas supposées atteindre le même taux de microfissures lorsqu'elles subissent le même type de cycle thermique. La capacité du matériau à la microfissuration est d'autant plus forte que le nombre consécutif de plis de même orientation augmente [78,79]. Ces plaques sont donc utilisées dans l'optique de corrélérer l'évolution de la microfissuration (augmentation du nombre de fissures, propagation et ouverture des fissures), estimée par micrographie, avec des mesures ultrasonores. Elles ont toutes la même épaisseur ($5,1 \pm 0,3$) mm ainsi que la même densité ($1,58 \pm 0,01$). Les valeurs optimisées des modules de viscoélasticité des plaques pour les trois types d'empilements sont obtenues en utilisant le problème inverse présenté dans le paragraphe I.4. Les modules de viscoélasticité, obtenus dans les plans P_{12} et P_{13} , ont des valeurs similaires. Les matériaux sont à symétrie quadratique. L'étude sera réalisée dans le

plan de symétrie P_{12} avec les valeurs des modules de viscoélasticité présentées dans le tableau III.4.

	C_{11}^*	C_{22}^*	C_{66}^*	C_{12}^*
$[0/+45/90/-45]_{6s}$	$9,8^{\pm 0,5} + i0,18^{\pm 0,04}$	$110^{\pm 6} + i3,0^{\pm 0,6}$	$2,7^{\pm 0,1} + i0,07^{\pm 0,01}$	$5,8^{\pm 0,3} + i0,10^{\pm 0,02}$
$[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$	$9,5^{\pm 0,5} + i0,18^{\pm 0,04}$	$110^{\pm 6} + i3,0^{\pm 0,6}$	$2,7^{\pm 0,1} + i0,07^{\pm 0,01}$	$4,5^{\pm 0,2} + i0,10^{\pm 0,02}$
$[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$	$9,8^{\pm 0,5} + i0,20^{\pm 0,04}$	$107^{\pm 5} + i3,0^{\pm 0,6}$	$2,6^{\pm 0,1} + i0,07^{\pm 0,01}$	$4,4^{\pm 0,2} + i0,10^{\pm 0,02}$

tableau III.4. Modules de viscoélasticité (GPa) des plaques suivant chaque type d'empilements dans le plan P_{12} avant tout cycle thermique.

III.3.2. Protocoles d'endommagement thermique basses températures

Les plaques ont subi différents cycles thermiques. En premier lieu, les trois plaques sont successivement placées dans une enceinte aux températures de -50°C , -100°C et -150°C , pendant environ 1 heure, temps de refroidissement donné par la relation (III.1). Elles sont ensuite trempées à trois reprises dans de l'azote liquide pour atteindre une température de -196°C , pendant environ 5 min, temps calculé d'après la relation (III.1). Des mesures par ondes guidées sont effectuées pour chaque plaque à l'état initial et après chaque cycle basse température. Le tableau III.5 nomme les différents cycles à basses températures appliqués aux plaques.

<i>État</i>	<i>Description</i>
E1	état initial
E2	enceinte à -50°C
E3	enceinte à -100°C
E4	enceinte à -150°C
E5	1 ^e trempe totale en azote liquide
E6	2 ^e trempe totale en azote liquide
E7	3 ^e trempe totale en azote liquide

tableau III.5. Nomination des différents cycles à basses températures.

III.3.3. Sensibilité des ondes guidées aux cycles basses températures

III.3.3.1. Reproductibilité des mesures

Deux campagnes expérimentales sont menées pour chaque contrôle par ondes guidées avant et après les différentes sollicitations de chaque plaque. Les plaques ont des empilements différents, mais leurs propriétés mécaniques ont des valeurs très proches (modules de viscoélasticité, épaisseur et densité). Par conséquent, nous avons choisi de présenter la reproductibilité moyenne des mesures ultrasonores effectuées sur les six plaques. Le pourcentage de reproductibilité est défini par la formule (I.9). Des mesures par ondes guidées des seuls modes A_0 et S_0 ont été effectuées car l'épaisseur des plaques étant d'environ 5 mm et les transducteurs à couplage par air ayant une bande passante de -15dB de 50 à 400 kHz, il n'est pas possible de générer les modes se propageant à plus haute fréquence. La fluctuation des mesures du mode S_0 , au cours des campagnes, n'a pas permis d'obtenir des résultats convenables sur sa reproductibilité. Effectivement, le déplacement normal de ce mode sur sa zone non dispersive (jusqu'à environ 250 kHz) est très faible lorsqu'il est généré avec ce type de transducteur. Seule la reproductibilité des mesures du mode A_0 a pu être quantifiée. La reproductibilité des mesures de la partie réelle k' du nombre d'onde complexe du mode A_0 est, en moyenne, de l'ordre de 0,3%. Celle des mesures de sa partie imaginaire k'' est, en moyenne, de l'ordre de 3%. Par conséquent, l'étude portera uniquement sur ce mode A_0 .

III.3.3.2. Variations du mode A_0 aux sollicitations basses températures

Pour suivre les éventuelles variations des parties réelle k' et imaginaire k'' du nombre d'onde complexe du mode A_0 , des mesures sont effectuées sur les plaques n°1-1, n°2-1 et n°3-1, à l'état initial et après chaque cycle basse température (figure III.9).

La figure III.9(a) montre l'évolution de la partie réelle k' du nombre d'onde complexe du mode A_0 pour chacun des états de sollicitation des trois plaques. La variation du k' du mode A_0 de la plaque n°1-1 reste assez proche du domaine de reproductibilité (0,3%) jusqu'à la première trempe en azote liquide (E5) où elle atteint 2%. Cette variation reste constante après les deux autres trempes (E6 et E7). La variation du k' du mode A_0 de la plaque n°2-1 sort du domaine de reproductibilité dès la sollicitation à -100°C (E3) et atteint quasiment 4% au cours du cycle complet de sollicitations (E3 à E7). Le k' du mode A_0 de la plaque n°3-1 augmente significativement de 2 à 7% entre la sollicitation à -50°C (E2) et la première

trempe en azote (E5). Sa variation reste constante pour les trois trempes en azote liquide (E5 à E7). Cette analyse permet de conclure sur la possibilité de suivre l'évolution de ces matériaux lors de cycles basses températures, avec les mesures de la partie réelle k' du mode A_0 . Le taux de variation du k' est d'autant plus important à une sollicitation basse température que le nombre consécutif de plis de même orientation dans le matériau augmente. La plaque n°1-1 a un pli consécutif de même orientation, le k' augmente de 2% à partir la première trempe en azote liquide (E5). La plaque n°2-1 a deux plis consécutifs de même orientation, le k' varie de 2% à partir la sollicitation à -100°C (E3) et augmente jusqu'à 4%. La plaque n°3-1 a trois plis consécutifs de même orientation, le k' varie de 2% à partir la sollicitation à -50°C (E2) et augmente jusqu'à 7%.

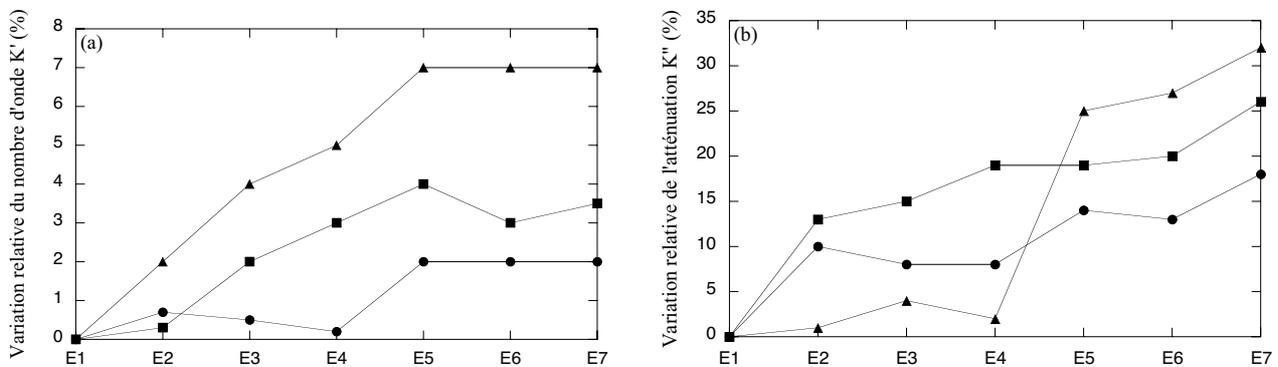


figure III.9. Variations des mesures des parties réelle (a) et imaginaire (b) du nombre d'onde complexe du mode A_0 avant et après chaque cycle basse température pour les trois types d'empilements ; plaque n°1-1 (●,—), plaque n°2-1 (■,—), plaque n°3-1 (▲,—).

La figure III.9(b) montre l'évolution de la partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe du mode A_0 pour chacun des états de sollicitation des trois plaques. Le k'' du mode A_0 de la plaque n°1-1 augmente de 10 à 18% entre la sollicitation à -50°C (E2) et la troisième trempe en azote liquide (E7), donc dans des proportions supérieures au seuil de reproductibilité de 3%. Le k'' du mode A_0 de la plaque n°2-1 augmente de 13 à 26% entre ces mêmes états de sollicitations (E2 à E7). La variation du k'' du mode A_0 de la plaque n°3-1 reste proche du domaine de reproductibilité jusqu'à la première trempe en azote liquide et augmente de 25 à 32% lors des trois trempes (E5 à E7). Il semble donc possible de suivre l'évolution de ces matériaux lors de sollicitations basses températures avec les mesures de la partie imaginaire k'' du mode A_0 . Le taux de variation du k'' du mode A_0 est aussi fonction du nombre consécutif de plis de même orientation. Plus le nombre de plis consécutifs est

important, plus la variation du k'' est grande dès les premiers états de sollicitation, sauf pour la plaque n°3-1 où cette conclusion n'est vérifiée qu'à partir de la première trempe en azote liquide (E5).

Les parties réelle k' et imaginaire k'' du nombre d'onde complexe du mode A_0 sont mesurées, pour les plaques n°1-2, n°2-2 et n°3-2, à l'état initial et après chaque cycle basse température (figure III.10). Cette étude est menée pour contrôler la répétitivité des résultats obtenus précédemment pour le jeu de plaques.

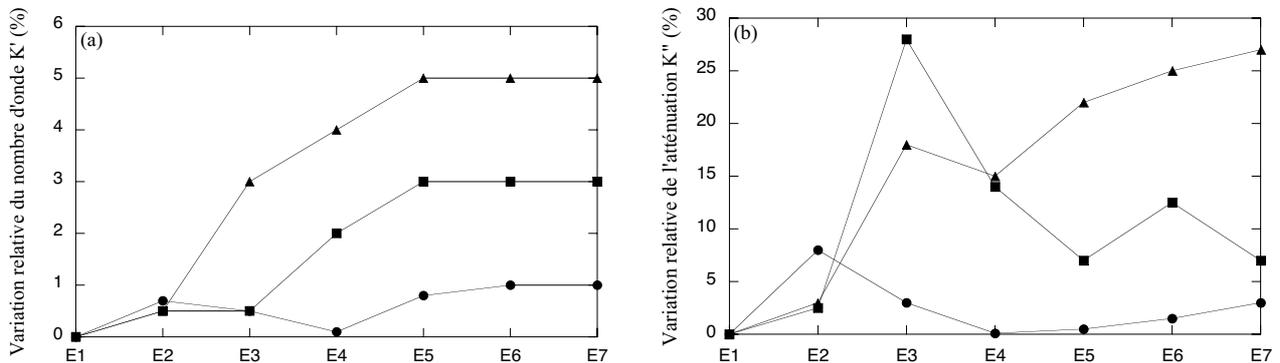


figure III.10. Variations des mesures des parties réelle (a) et imaginaire (b) du nombre d'onde complexe du mode A_0 avant et après chaque cycle basse température pour les trois types d'empilements ; plaque n°1-2 (●,—), plaque n°2-2 (■,—), plaque n°3-2 (▲,—).

La figure III.10(a) montre, comme lors de l'étude des plaques n°1-1, n°2-1 et n°3-1, que l'évolution des plaques n°1-2, n°2-2 et n°3-2 lors de sollicitations basses températures peut être suivi avec les mesures de la partie réelle k' du mode A_0 . Le taux de variation du k' du mode A_0 augmente en fonction du nombre de plis consécutifs de même orientation des matériaux considérés. Le k' du mode A_0 de la plaque n°1-2 (un pli consécutif) varie d'environ 1% à partir de la première trempe en azote liquide (E5). Celui mesuré sur plaque n°2-2 (deux plis consécutifs) varie de 2% à partir de la sollicitation à -150°C (E4) et augmente jusqu'à 3%. Le k' du mode A_0 de la plaque n°3-2 (trois plis consécutifs) varie de 3% à partir de la sollicitation à -100°C (E3) et augmente jusqu'à 5%. Les proportions dans lesquelles le k' du mode A_0 mesuré sur ces trois plaques varient, sont légèrement inférieures aux variations des mesures des k' du mode A_0 effectuées sur les trois plaques étudiées précédemment (figure III.9(a)). Les tendances des évolutions du k' du mode A_0 sont identiques pour les deux jeux de plaques soumises aux mêmes sollicitations.

La figure III.10(b) présente l'évolution de la partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe du mode A_0 lors des sollicitations basses températures des plaques n°1-2, n°2-2 et n°3-2. Les variations du k'' du mode A_0 mesuré sur ces trois plaques ne suivent pas la tendance des variations du k'' du mode A_0 mesuré sur les trois plaques étudiées précédemment (figure III.9(b)).

La répétitivité de la méthode est uniquement vérifiée pour le suivi de l'évolution des mesures de la partie réelle k' du nombre d'onde complexe du mode A_0 , lors de sollicitations basses températures.

III.3.3.3. Variations du module de Coulomb

L'étude de sensibilité des ondes guidées aux modules de viscoélasticité, effectuée au paragraphe I.4.1, montre que la partie réelle k' du nombre d'onde complexe du mode A_0 est sensible à la partie réelle C'_{66} du module de Coulomb (module de viscoélasticité C^*_{66}) et que la partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe de ce mode est sensible à la partie imaginaire C''_{66} de ce module. En considérant les résultats établis dans le paragraphe précédent, seule la partie réelle du module de Coulomb est optimisée pour les différents états de sollicitation des six plaques étudiées (E1 à E7), en utilisant le problème inverse présenté au paragraphe I.4.

La comparaison entre la variation relative du k' du mode A_0 et celle du C'_{66} (figure III.11) aux différents états de sollicitations basses températures, pour les plaques étudiées, sont présentées. Les relations déterminant la variation relative de la partie réelle C'_{66} à chaque état, sont données par la formule suivante :

$$\left(1 - \frac{C'^{El}_{66}}{C'^{E1}_{66}}\right) \times 100 \quad (\text{III.3})$$

où $1 \leq l \leq 7$. Lorsque le k' du mode A_0 augmente le C'_{66} diminue proportionnellement.

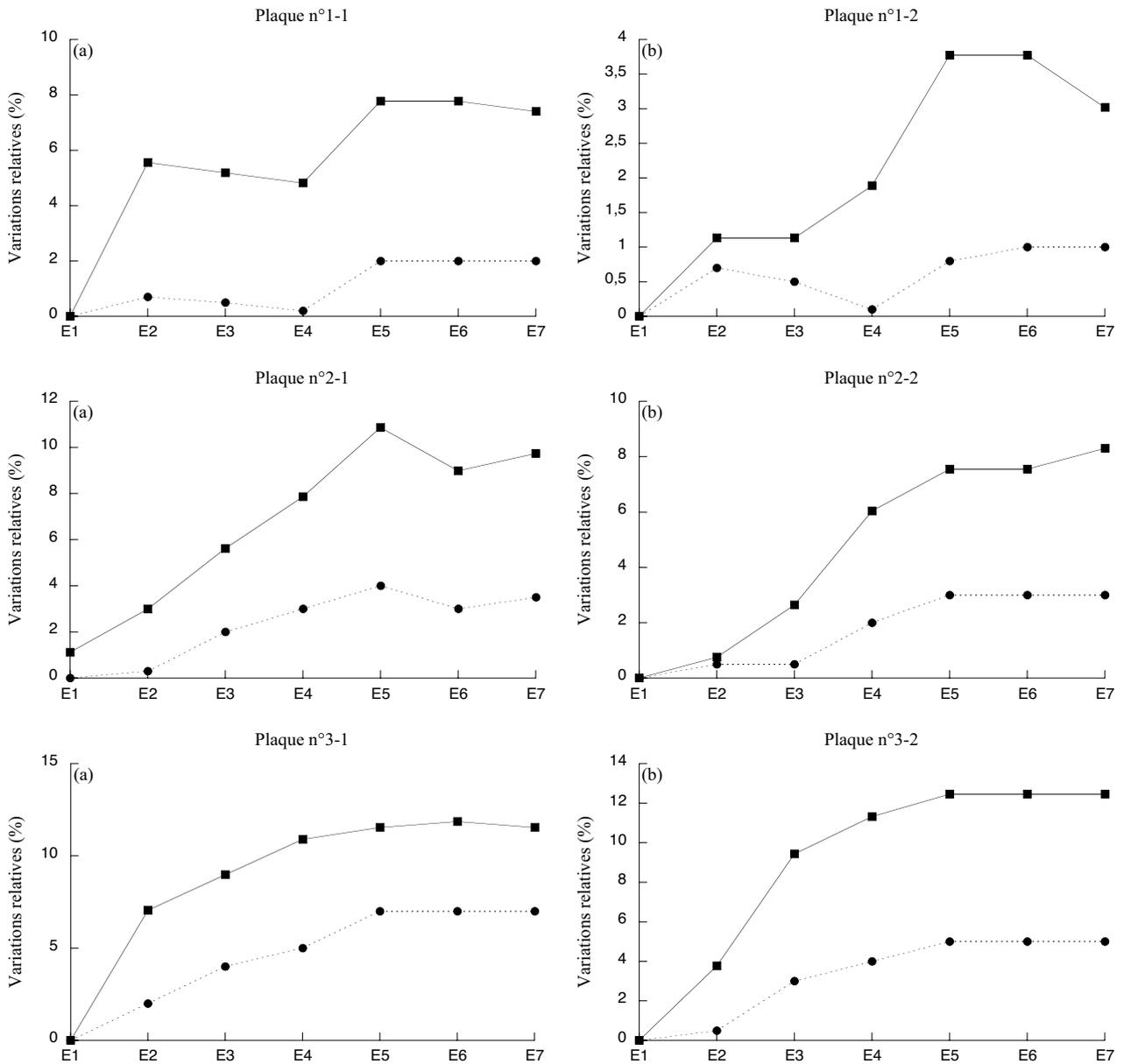


figure III.11. Variations des mesures du nombre d'onde k' du mode A_0 (●,---) et de la partie réelle C'_{66} du module de Coulomb (■,—) avant et après chaque cycle basse température pour les six plaques ; premier (a) et second (b) jeux de plaques.

III.3.4. Étude de la microfissuration par micrographies

L'étude micrographique est menée parallèlement avec le contrôle par ondes guidées pour corréliser les résultats ultrasonores avec l'évolution d'une éventuelle microfissuration des

matériaux étudiés. Un échantillon a été prélevé sur chacune des trois plaques n°1-1, n°2-1 et n°3-1 lorsqu'elles étaient dans leur état initial. Ces 3 échantillons ont subi les cycles à basses températures en même temps que les plaques dont ils sont issus. Le microscope utilisé est le même que celui qui a été présenté dans le paragraphe III.2.4. Les micrographies, fournies par EADS SPACE Transportation, permettront une étude simplement qualitative.

III.3.4.1. Micrographies de l'échantillon $[0/+45/90/-45]_{6s}$

La figure III.12 présente les dimensions de l'éprouvette prélevée sur la plaque n°1-1, ainsi que les zones d'inspection pour les micrographies. Ces zones sont représentatives de l'état général du matériau pour les différents états de sollicitations basses températures.

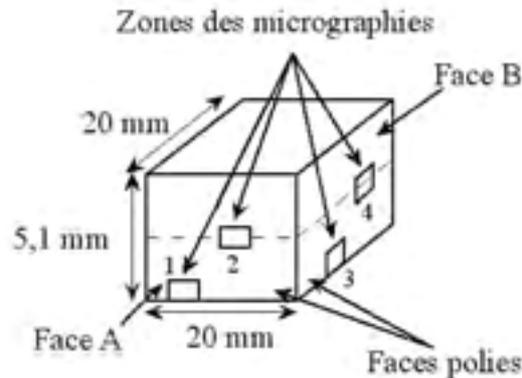


figure III.12. Schéma de l'éprouvette $[0/+45/90/-45]_{6s}$ utilisée pour les micrographies avec les différentes zones d'observation.

À l'état initial (E1), l'échantillon est sain mis à part quelques défauts de surface liés à la coupe du matériau. Les différents plis sont bien distincts puisque leurs orientations successives sont différentes. Les trois premières micrographies de la zone 1 de l'échantillon $[0/+45/90/-45]_{6s}$ effectuées pour les états E1, E2 et E3 sont quasiment identiques. Cela indique qu'il n'y a pas d'évolution de l'état de l'échantillon après les sollicitations à -50°C (E2) et à -100°C (E3) (figure III.13). La variation du k' du mode A_0 , propagé le long de la plaque n°1-1, suit la tendance de l'échantillon à ne pas micro fissurer, puisqu'elle reste dans le domaine de reproductibilité (figure III.9(a)).



figure III.13. Micrographies de la zone 1 de l'échantillon $[0/+45/90/-45]_{6s}$ aux états E1, E2 ou E3, à l'échelle $300 \mu\text{m}$ pour 1 cm .

Après la sollicitation à -150°C (E4), de fines microfissures apparaissent (figure III.14). Les variations du k' restent dans les mêmes proportions qu'aux états précédents (figure III.9(a)), la microfissuration n'est pas suffisante pour engendrer des changements sur les propriétés mécaniques du matériau.

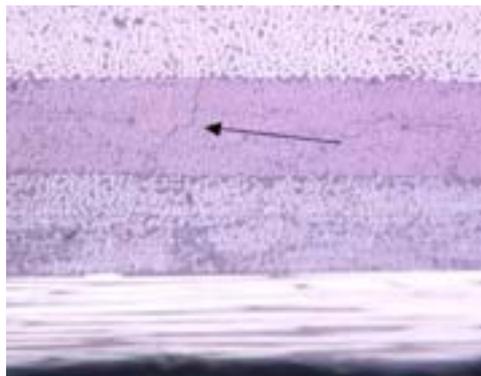


figure III.14. Micrographies de la zone 3 de l'échantillon $[0/+45/90/-45]_{6s}$ à l'état E4, à l'échelle $100 \mu\text{m}$ pour 1 cm .

L'endommagement reste faible après la première trempe en azote liquide (E5). Quelques fissures sur le pli central apparaissent sur les faces A (figure III.15) et B (figure III.16). Il n'y a pas de forte évolution de l'échantillon après la deuxième (E6) et la troisième (E7) trempes en azote (figure III.15 et figure III.16). Les cycles successifs dans l'azote n'ont pas d'effet sur la microfissuration. Les variations du k' augmentent après la première trempe en azote liquide et restent stables pour les deux autres trempes (figure III.9(a)). Il semblerait que le nombre d'onde du mode A_0 soit sensible à l'évolution de la microfissuration du matériau $[0/+45/90/-45]_{6s}$.



figure III.15. Micrographies de la zone 2 de l'échantillon $[0/+45/90/-45]_{6s}$ aux états E5, E6 et E7, à l'échelle $300\ \mu\text{m}$ pour $1\ \text{cm}$.



figure III.16. Micrographies de la zone 4 de l'échantillon $[0/+45/90/-45]_{6s}$ aux états E5, E6 et E7, à l'échelle $300\ \mu\text{m}$ pour $1\ \text{cm}$.

III.3.4.2. Micrographies de l'échantillon $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$

La figure III.17 présente les dimensions de l'éprouvette prélevée sur la plaque n°2-1, ainsi que les zones d'inspection pour les micrographies. Ces zones sont représentatives de l'état général du matériau pour les différents états de sollicitations basses températures.

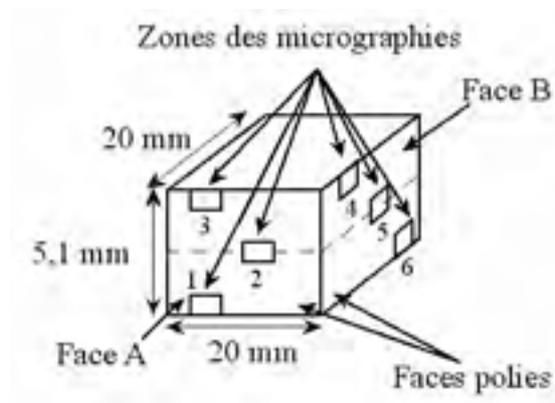


figure III.17. Schéma de l'éprouvette $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ utilisée pour les micrographies avec les différentes zones d'observation.

À l'état initial (E1), quelques microfissures de très petite taille, liées à la fabrication, sont présentes au cœur et en surface de l'échantillon. La figure III.18 montre, à titre d'exemple, ces microfissures sur la face A, mais des microfissures sont aussi présentes sur la face B.



figure III.18. Micrographies de l'échantillon $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ à l'état E1, effectuées sur la face A (zones 2 et 3) et aux échelles respectives, $100 \mu\text{m}$ pour 1 cm et $300 \mu\text{m}$ pour 1 cm.

Il n'y a pas d'évolution de l'échantillon après la sollicitation à -50°C (E2). La variation du k' du mode A_0 , propagé le long de la plaque n°2-1, reste dans le domaine de reproductibilité (figure III.9(a)). Seul le k' du mode A_0 suit la tendance du matériau à ne pas micro fissurer. Quelques microfissures apparaissent au cœur et en surface de l'échantillon à partir de -100°C (E3). La figure III.19 montre un exemple de l'apparition d'une fissure en surface de l'échantillon sur la face A après la sollicitation à -100°C . Sur la figure III.20, deux fissures apparaissent sur la face B dans des plis de la zone 4 qui se situent près de la surface. Sur la figure III.21, quatre fissures apparaissent sur la zone 5 de la face B au cœur de l'échantillon. La majeure partie de ces fissures se situent dans deux plis de même orientation. La variation du k' augmente nettement (figure III.9(a)).

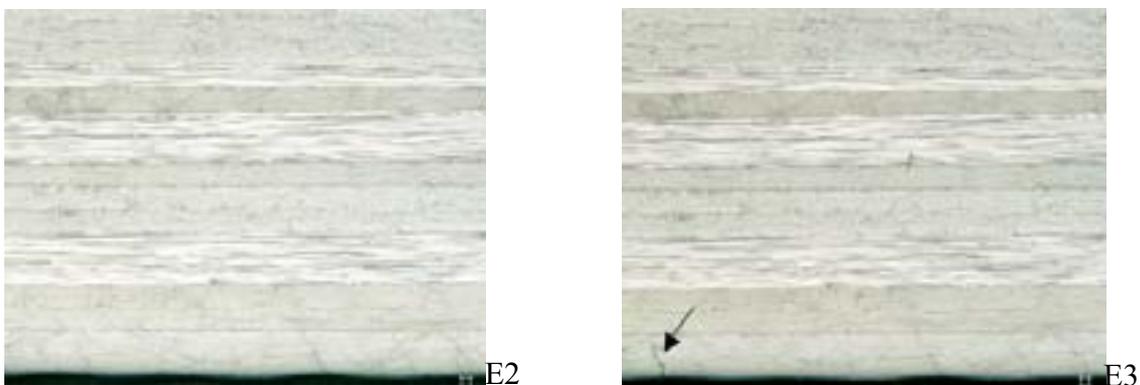


figure III.19. Micrographies de la zone 1 de l'échantillon $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ aux états E2 et E3, à l'échelle $300 \mu\text{m}$ pour 1 cm.

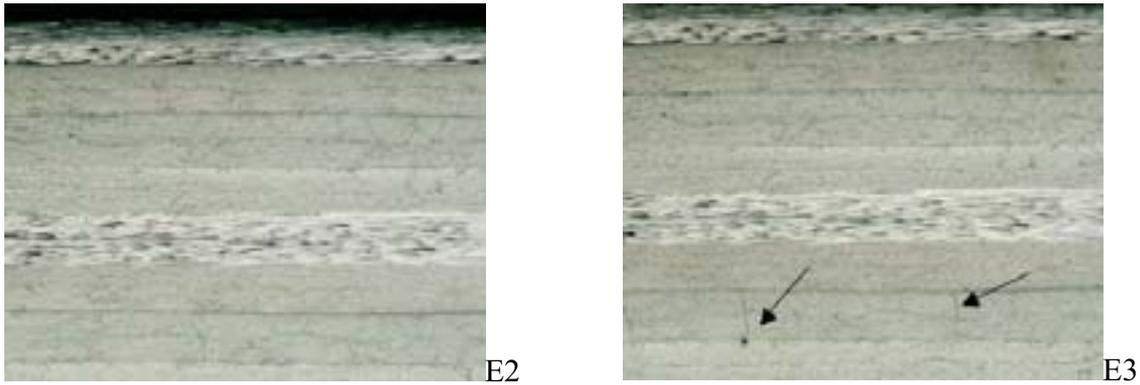


figure III.20. Micrographies de la zone 4 de l'échantillon $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ aux états E2 et E3, à l'échelle $300\ \mu\text{m}$ pour $1\ \text{cm}$.

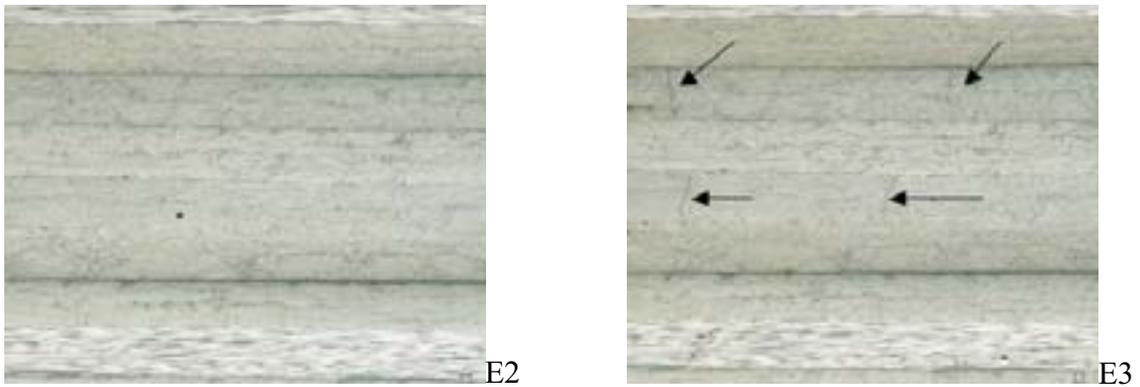


figure III.21. Micrographies de la zone 5 de l'échantillon $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ aux états E2 et E3, à l'échelle $300\ \mu\text{m}$ pour $1\ \text{cm}$.

La figure III.22 montre un exemple significatif de l'évolution de la microfissuration sur la zone 6 (face B) près de la surface de l'échantillon entre la sollicitation à -150°C (E4) et la troisième trempe en azote liquide (E7). Après la première trempe en azote liquide (E5), les fissures déjà présentes après la sollicitation à -150°C (E4) se propagent d'un pli à l'autre. Il n'y a pas d'évolution des microfissures après la deuxième trempe (E6), une légère évolution est constatée après la troisième trempe (E7). Quelques fissures subissent une légère ouverture et une propagation suivant des plis d'orientation différente. La variation du k' du mode A_0 augmente jusqu'à la première trempe en azote (E5) et reste constante après les deux autres trempes (E6 et E7) (figure III.9(a)).

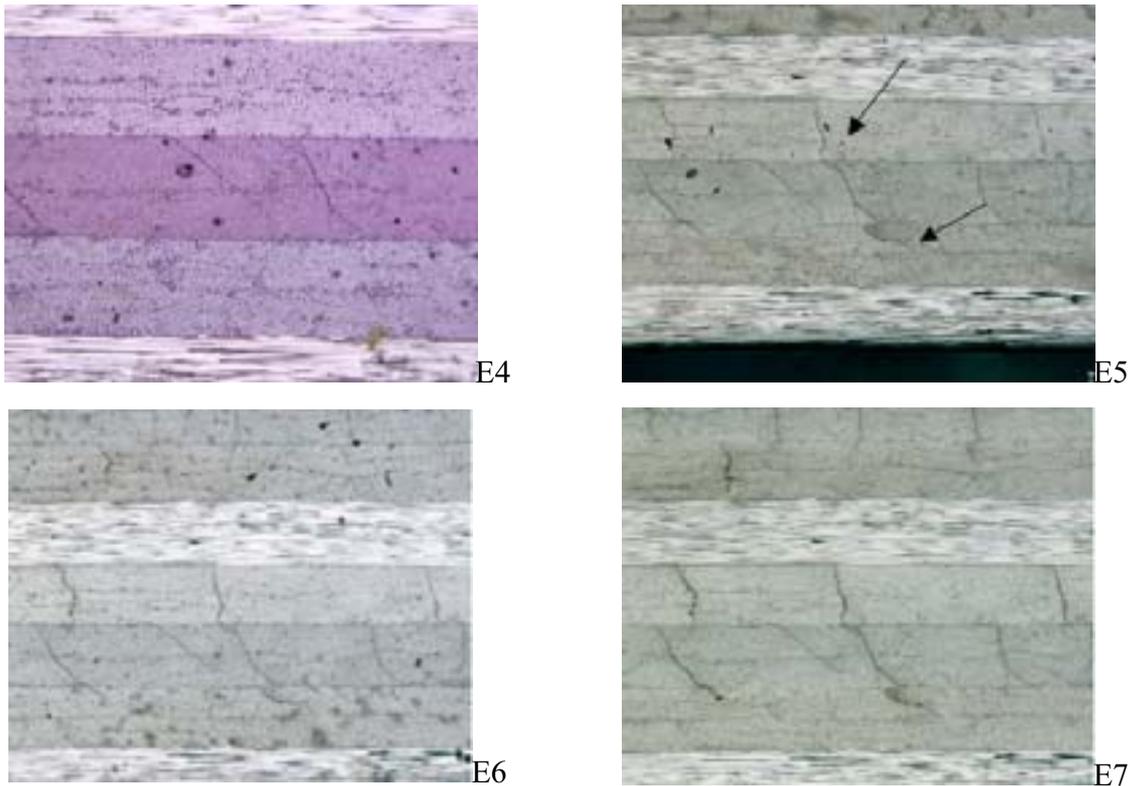


figure III.22. Micrographies de l'échantillon $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ aux états E4 à E7, selon la direction 90° (zone 6) et aux échelles $150 \mu\text{m}$ pour 1 cm (E4) et $250 \mu\text{m}$ pour 1 cm (E5 à E7).

Le k' du mode A_0 permet de suivre l'évolution de la microfissuration dans le matériau $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$, sauf après la première trempe en azote liquide (E5) où la variation du k' devrait être constante (figure III.9(a)). La variation du k'' ne permet pas de conclure sur le suivi de la microfissuration du matériau (figure III.9(b)). Remarquons que les proportions de variations du k' du mode A_0 augmentent suivant le nombre de plis consécutifs de même orientation (un pli consécutif pour la plaque n°1-1 et deux pour la n°2-1). Les fissures apparaissent, la plupart du temps, dans un seul pli de l'échantillon $[0/+45/90/-45]_{6s}$ et dans deux plis consécutifs de même orientation pour l'échantillon $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$.

III.3.4.3. Micrographies de l'échantillon $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$

La figure III.23 présente les dimensions de l'éprouvette prélevée sur la plaque n°3-1, ainsi que les zones d'inspection pour les micrographies. Ces zones sont représentatives de l'état général du matériau pour les différents états de sollicitations basses températures. Seules les micrographies prises sur la zone 3 seront montrées car elles offrent un exemple relativement parlant de l'évolution de la microfissuration du matériau tout au long des différentes sollicitations (figure III.24).

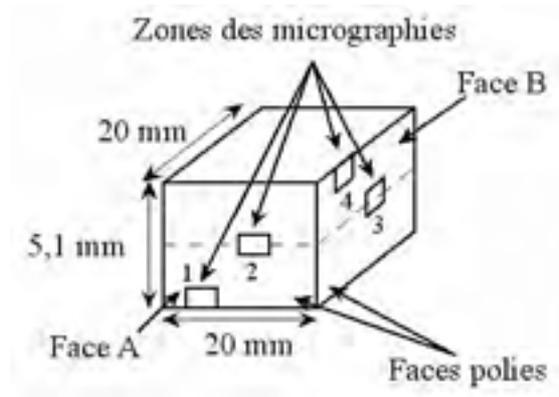


figure III.23. Schéma de l'éprouvette $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$, utilisée pour les micrographies avec les différentes zones d'observation.

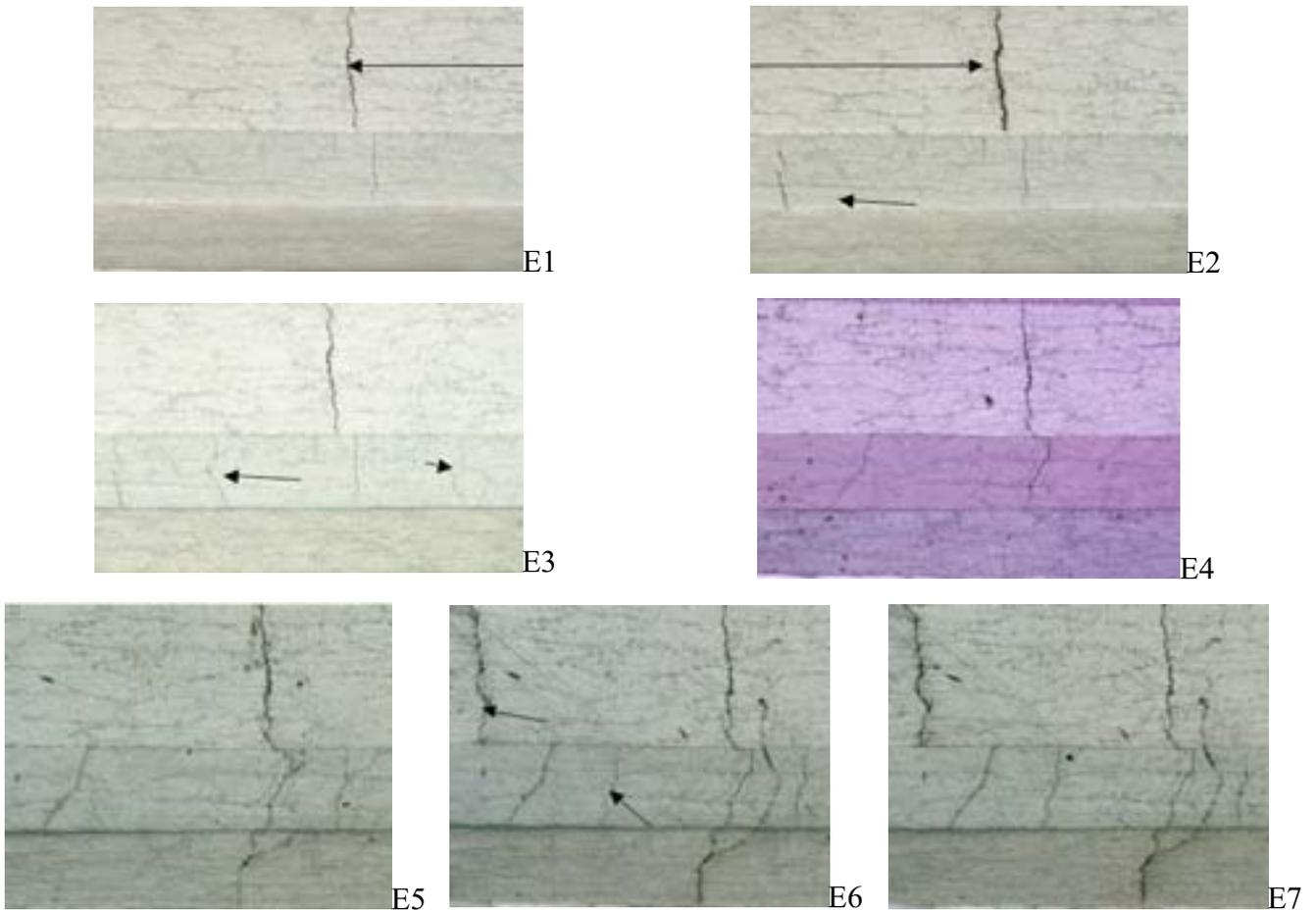


figure III.24. . Micrographies de la zone 3 de l'échantillon $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$ aux états E5 à E7, à l'échelle $300 \mu\text{m}$ pour 1 cm.

À l'état initial (E1), l'échantillon présente de grosses fissures au niveau du pli central sur les faces A et B. Ces fissures s'étendent sur trois plis consécutifs de même orientation. Quelques défauts de surface sont également présents. Tout au long des différentes sollicitations à basses températures (E2, E3 et E4), l'apparition de nouvelles microfissures est constatée. Les fissures, déjà présentes à l'état initial (E1), s'ouvrent et se propagent. Lors de la sollicitation à -150°C (E4), il y a très peu d'évolution sauf au centre de la plaque où de nouvelles fissures, assez importantes, apparaissent jusqu'après la deuxième trempe en azote liquide (E6). Certaines fissures déjà présentes s'élargissent après la troisième trempe (E7).

La variation du k' du mode A_0 , propagé le long de la plaque n°3-1, suit l'évolution de la microfissuration jusqu'après la première trempe en azote liquide (E5), puis elle reste constante (figure III.9(a)). Les fissures apparaissent dans trois plis consécutifs de même orientation de l'échantillon $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$. La microfissuration de ce matériau est plus importante pour le matériau $[0/+45/90/-45]_{6s}$, que pour le matériau $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$. L'évolution de la microfissuration suivant le nombre de plis consécutifs de même orientation est confirmée par les proportions dans lesquelles varient le k' du mode A_0 suivant le type de plaque étudiée.

III.3.5. Discussion

Cette étude a montré la sensibilité du mode guidé A_0 à l'évolution de la microfissuration de matériaux composites carbone-époxyde lors de sollicitations basses températures. Il a été montré que la partie réelle k' du nombre d'onde complexe du mode A_0 augmentait suivant la baisse des températures de sollicitation (-50°C à -196°C). Les variations de la partie imaginaire k'' du nombre d'onde complexe de ce mode ont tendance à augmenter, mais les résultats ne sont cohérents qu'à partir de la première trempe en azote liquide. L'augmentation du k' du mode A_0 est plus importante pour l'empilement $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$, que pour l'empilement $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ et que pour l'empilement $[0/+45/90/-45]_{6s}$. Une étude numérique a permis de quantifier la partie réelle C'_{66} du module de Coulomb suivant l'évolution du k' du mode A_0 . La répétitivité de la méthode de suivi du k' de ce mode lors de cycles basses températures a été vérifiée sur trois nouvelles plaques n°1-2, n°2-2 et n°3-2, de même empilement que les trois plaques précédentes n°1-1, n°2-1 et n°3-1. En revanche, la répétitivité du phénomène n'est pas vérifiée pour les variations de son k'' . Une étude qualitative de la microfissuration des trois types de matériaux a été menée en effectuant des micrographies sur des échantillons issus des trois plaques n°1-1, n°2-1 et n°3-1. Ces

micrographies ont montré que les sollicitations basses températures augmentaient la microfissuration dans les matériaux testés. L'évolution des microfissures est plus importante selon le type d'empilement, puisque les fissures n'apparaissent que sur un pli pour le matériau $[0/+45/90/-45]_{6s}$, tandis qu'elles apparaissent sur deux plis consécutifs pour de matériau $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ et sur trois plis consécutifs pour le matériau $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$. Par conséquent, la partie réelle k' du nombre d'onde complexe du mode A_0 est un bon indicateur de l'évolution de la microfissuration de ces matériaux. Sa partie imaginaire k'' ne suit pas forcément bien cette évolution, car ses variations, au cours des différentes sollicitations, ne sont pas reproductibles.

III.4. Conclusion

La sensibilité des ondes guidées à la microfissuration obtenue par des sollicitations basses températures sur des matériaux composites carbone-époxyde, a été montrée. L'étude préliminaire a montré que les parties réelles des nombres d'onde complexes des quatre modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 permettaient de suivre l'évolution de la microfissuration dans une plaque d'empilement $[0/+60/-60]_{33s}$. L'étude sur des plaques d'empilements $[0/+45/90/-45]_{6s}$, $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ et $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$ a montré que la partie réelle du nombre d'onde complexe du mode A_0 était sensible à l'évolution de la microfissuration suivant les différentes sollicitations basses températures et suivant le nombre de plis consécutifs de même orientation. L'étude de la microfissuration par micrographie était seulement qualitative. Un moyen permettant de quantifier l'évolution de la microfissuration des matériaux pour relier les variations des nombres d'ondes complexes des modes guidés mesurés au taux de microfissures dans les matériaux sollicités a été mis au point par EADS SPACE Transportation. Des résultats préliminaires sont présentés en annexe B.

Chapitre IV

Contrôle d'un réservoir

Chapitre IV. Contrôle d'un réservoir

IV.1. Introduction

Le réservoir, utilisé pour cette étude, a été fourni par EADS SPACE Transportation. Il sert de démonstrateur de technologies « health monitoring ». Dans la réalité, il est utilisé pour le transport de gaz ou de fluides conditionnés à très basses températures, comme l'hélium, l'hydrogène et l'azote liquide, servant à alimenter les tuyères utilisées pour le repositionnement d'engins spatiaux. Il peut être stocké dans des environnements humides et de températures très variables. Ces conditions de stockage peuvent altérer son intégrité. Le suivi de santé de ce type de structures est nécessaire car il faut connaître son degré d'endommagement avant de procéder à leurs mises en service. Les techniques ultrasonores sont adaptées pour ces contrôles d'intégrité puisqu'elles sont non destructives [80-83].

Ce chapitre propose des méthodes ultrasonores pour tester l'intégrité du réservoir. Dans un premier temps, la possibilité de propager des ondes guidées dans ce réservoir est étudiée. Sa composition et ses dimensions sont exposées. Ces propriétés mécaniques sont évaluées en utilisant la procédure de quantification et d'optimisation du paragraphe I.4.2. Elles sont destinées à servir de données d'entrée pour simuler la propagation d'ondes guidées dans le réservoir. Une étude est effectuée pour évaluer l'effet de la courbure et voir s'il est possible de ne pas la prendre en compte dans le modèle [85-87]. Deux dispositifs expérimentaux, l'un utilisé pour propager les ondes guidées suivant la direction longitudinale du réservoir et l'autre suivant la direction circonférentielle, sont présentés. Dans un second temps, des simulations pour évaluer le potentiel des ondes guidées à contrôler l'état de santé du réservoir sont proposées. La sensibilité des modes guidés à la variation de certaines propriétés mécaniques sensibles à la variation du taux d'humidité et de la microfissuration dans le réservoir, est étudiée. Puis une méthode de détection d'un défaut localisé dans le réservoir, est présentée [1,4,89-94], avec l'étude sur le choix d'un mode guidé susceptible de permettre la détection du défaut [95-98] et une simulation par éléments finis.

IV.2. Présentation et détermination des propriétés mécaniques du réservoir

IV.2.1. Composition et géométrie du réservoir

Le réservoir, fourni par EADS SPACE Transportation, est un réservoir dit cryogénique. Il est utilisé pour le transport de gaz et de fluides à très basse température. Il est constitué d'un liner en titane sur lequel est bobiné un composite à fibre de carbone et matrice époxyde, selon l'empilement $[90_2/15,7/90_3/15,7/90_2]$. Une fine couche de colle REDUX 312-5 permet la jonction entre le liner et le composite. La figure IV.1 montre ce réservoir pendant et après sa fabrication.

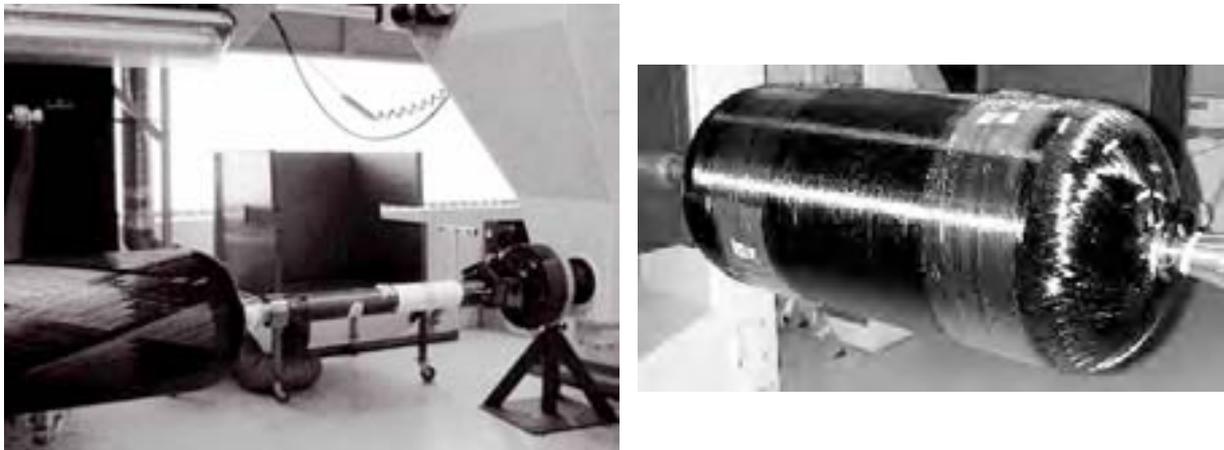


figure IV.1. Réservoir en fabrication et réservoir fini.

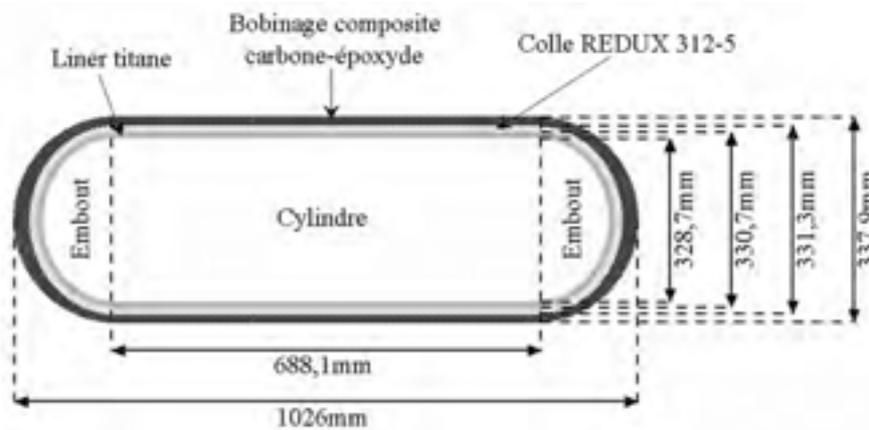


figure IV.2. Dimensions et composition du réservoir.

Les épaisseurs des différentes couches du réservoir ne varient pas le long de sa partie cylindrique : 1 mm pour le liner titane, 0,3 mm pour la couche de colle et 3,3 mm pour le composite. Sur les embouts, l'épaisseur du composite augmente et peut atteindre 10 mm . La figure IV.2 présente un schéma simplifié du réservoir avec ses différentes dimensions.

La propagation des ondes guidées sera étudiée suivant deux directions principales sur la partie cylindrique du réservoir : la direction longitudinale, dénommée plan P_{12} par mesure de simplification (figure IV.3(a)) et la direction circonférentielle, dénommée plan P_{13} (figure IV.3(b)).

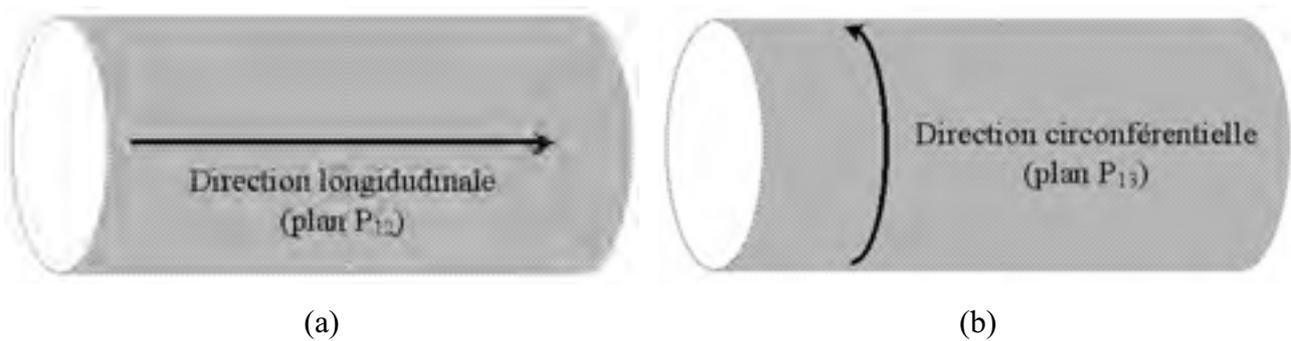


figure IV.3. Dénomination des directions de propagation des ondes guidées dans la partie cylindrique du réservoir : directions longitudinale (a) et circonférentielle (b).

IV.2.2. Évaluation des propriétés mécaniques du réservoir

Tout au long de l'étude, le réservoir sera considéré comme une structure tricouche, composée du bobinage composite carbone-époxyde, de la couche de colle REDUX 312-5 et du liner titane. Le titane est un matériau isotrope élastique dont les propriétés mécaniques sont connues. La colle REDUX 312-5 est un matériau isotrope viscoélastique dont les propriétés mécaniques ont été données par EADS SPACE Transportation. Le tableau IV.1 présente les modules d'élasticité ou de viscoélasticité et les densités de ces deux matériaux, ainsi que leurs épaisseurs dans la partie cylindrique du réservoir.

	$C_{11}^* = C_{22}^* = C_{33}^*$	$C_{66}^* = C_{55}^* = C_{44}^*$	$C_{12}^* = C_{13}^* = C_{23}^*$	e	ρ
Titane	167	44	79	1	4,5
Colle REDUX 312-5	6+i0,6	1,5+i0,15	3+i0,3	0,3	1,2

tableau IV.1. Modules de viscoélasticité (GPa), épaisseurs (mm) et densités du titane et de la colle REDUX 312-5.

Les propriétés mécaniques de la couche de composite carbone-époxyde d'empilement [90₂/15,7/90₃/15,7/90₂] du réservoir ne sont pas connues. Or, les modules de viscoélasticité et la densité de ce même composite, mais d'empilement unidirectionnel (UD), ont été déterminés à partir de mesures effectuées par une méthode ultrasonore à immersion [41] sur une plaque fournie par EADS SPACE Transportation. Nous pouvons donc considérer que les modules de viscoélasticité d'un pli sont connus et que la densité de la couche composite du réservoir est la même que celle mesurée sur la plaque UD, soit (1,51±0,01). Le tableau IV.2 présente les valeurs des neuf modules de viscoélasticité d'un pli supposé être un matériau orthotrope lors de sa caractérisation. En fait, les valeurs mesurées des C_{ij}^* permettent de vérifier que ce matériau UD possède la symétrie hexagonale isotrope transverse.

C_{11}^*	C_{22}^*	C_{66}^*	C_{12}^*		
$13,1^{\pm 0,1} + i0,8^{\pm 0,5}$	$13,3^{\pm 0,2} + i0,8^{\pm 0,5}$	$2,9^{\pm 0,2} + i0,2^{\pm 0,1}$	$7^{\pm 0,1} + i0,4^{\pm 0,2}$		
	C_{33}^*	C_{55}^*	C_{13}^*	C_{44}^*	C_{23}^*
	$184^{\pm 13} + i9^{\pm 1}$	$5,5^{\pm 0,1} + i0,3^{\pm 0,1}$	$7^{\pm 1} + i0,4^{\pm 0,2}$	$5,7^{\pm 0,6} + i0,3^{\pm 0,1}$	$9^{\pm 4} + i0,5^{\pm 0,2}$

tableau IV.2. Modules de viscoélasticité (GPa) d'un pli UD.

Les courbes de dispersion de l'empilement composite [90₂/15,7/90₃/15,7/90₂] du réservoir sont calculées dans les plans P₁₂ et P₁₃, avec la méthode des matrices d'impédance de surface, présentée au paragraphe I.3.1. L'utilisation de cette méthode est bien appropriée puisque la structure considérée est formée de 9 plis. Les plis à 90° ont une épaisseur de 0,3 mm et ceux qui sont à 15,7° de 0,6 mm. Pour diminuer les temps de calculs, l'empilement est modélisé par un pli UD de 0,6 mm à 90°, un de 0,6 mm à 15° et un de 0,45 mm à 90°, en considérant la symétrie de l'empilement (figure IV.4).

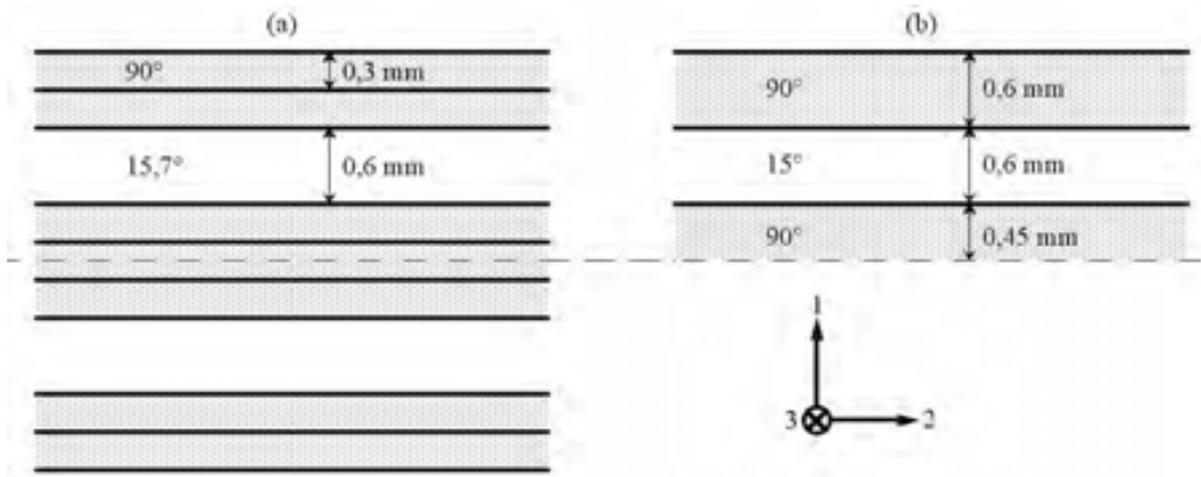


figure IV.4. Géométrie de l'empilement $[90_2/15,7/90_3/15,7/90_2]$: empilement réel (a) et modélisé (b).

Pour des fréquences inférieures à 300 kHz, le bobinage composite du réservoir est considéré comme un milieu homogène. Les modules de viscoélasticité équivalents de ce milieu peuvent donc être obtenus à partir des courbes de dispersion calculées en modélisant les différents plis du composite et en utilisant la procédure de quantification et d'optimisation décrite dans le paragraphe I.4.2. Le tableau IV.3 présente les valeurs des modules de viscoélasticité équivalents du bobinage composite du réservoir dans les plans P_{12} et P_{13} .

C_{11}^*	C_{22}^*	C_{66}^*	C_{12}^*
$11,0^{\pm 0,5} + i0,6^{\pm 0,2}$	$34^{\pm 2} + i2,0^{\pm 0,5}$	$2,5^{\pm 0,1} + i0,15^{\pm 0,04}$	$2,0^{\pm 0,1} + i0,12^{\pm 0,03}$
	C_{33}^*	C_{55}^*	C_{13}^*
	$104^{\pm 5} + i15^{\pm 1}$	$5,0^{\pm 0,3} + i0,20^{\pm 0,05}$	$6,0^{\pm 0,3} + i0,3^{\pm 0,1}$

tableau IV.3. Modules de viscoélasticité équivalents (GPa) du bobinage composite $[90_2/15,7/90_3/15,7/90_2]$ du réservoir dans les plans P_{12} et P_{13} .

La figure IV.5 présente la corrélation entre les parties réelles et imaginaires des nombres d'onde complexes des trois mode guidés M_1 , M_2 et M_3 calculées dans le plan P_{13} avec les modules de viscoélasticité du composite UD selon l'empilement du bobinage composite du réservoir et avec les modules équivalents. Étant donnée la non uniformité du composite, les modes guidés ne sont plus symétriques ou antisymétriques mais couplés. C'est pourquoi leur dénomination a changé, M_i ($1 \leq i \leq n$).

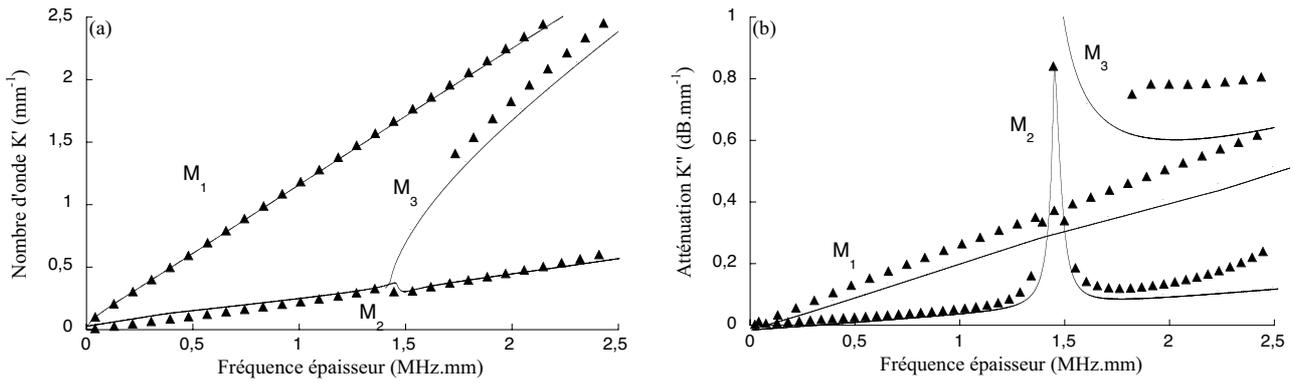


figure IV.5. Prédiction numérique calculées suivant l'empilement (\blacktriangle) et suivant le milieu homogène équivalent (—) du bobinage composite dans le plan P_{13} ; parties réelles (a) et imaginaires (b) des nombres d'onde complexes des trois modes guidés M_1 , M_2 et M_3 .

IV.3. Propagation d'ondes guidées dans le réservoir

IV.3.1. Effet de la courbure sur les ondes

La méthode des matrices d'impédance de surface, décrite dans le paragraphe I.3.1, permet de calculer les courbes de dispersion des modes guidés se propageant uniquement dans des structures planes. Or le réservoir étudié est une structure de type cylindrique. Il est donc intéressant de comparer les ondes guidées se propageant au sein d'une structure dont le rayon de courbure est égal à celui du réservoir (168,95 mm) à celles se propageant dans une structure plane de mêmes propriétés. Les courbes de dispersion calculées avec le procédé numérique du paragraphe I.3 sont comparées à celles qui sont calculées avec un logiciel commercial, Disperse, qui prend en compte la courbure du milieu [88].

Il a été vérifié par *Wilcox et al* [86] que si le rapport du rayon de courbure d'une structure métallique sur son épaisseur était supérieur ou égal à 8, alors les ondes guidées se propageant dans celle-ci se comportent de la même manière que si la structure était plane. Or pour le réservoir, le rapport du rayon de courbure sur l'épaisseur est égal à environ 37, ce qui est largement supérieur à 8. Donc l'effet de la courbure du réservoir sur les ondes guidées est sensé être négligeable.

Cette hypothèse sera vérifiée en comparant les courbes de dispersion obtenues pour une structure d'empilement [Titane/Colle/Composite] avec une courbure de 168,95 mm de rayon et la même structure sans courbure. Pour les calculs sur des milieux courbes, le logiciel Disperse impose certaines simplifications, c'est-à-dire de ne pas prendre en compte la

viscoélasticité dans la colle et dans le composite et l'anisotropie du composite. Les valeurs utilisées pour ces simulations sont présentées dans le tableau IV.4.

	C_{11}^*	C_{66}^*	e	ρ
Titane	167	44	1	4,5
Colle	6	1,5	0,3	1,2
Composite isotrope	24	2,3	3,3	1,5

tableau IV.4. Modules d'élasticité (GPa), épaisseurs (mm) et densités de l'empilement [Titane/Colle/Composite] élastique et isotrope.

La figure IV.6 représente la comparaison des nombres d'onde des modes guidés se propageant au sein des deux structures et calculés avec les deux méthodes. Malgré les hypothèses d'élasticité et d'isotropie du matériau, la similitude entre les deux jeux de courbes permet de conclure que la courbure du réservoir a un effet négligeable sur les ondes guidées. Il est donc possible d'utiliser la méthode des matrices d'impédance de surface (paragraphe I.3.1) et, par conséquent, de prendre en compte l'anisotropie et la viscoélasticité des matériaux constituant le réservoir.

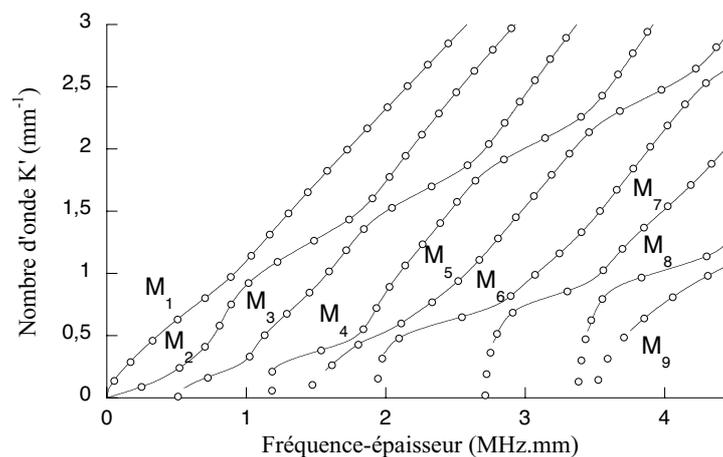


figure IV.6. Courbes de dispersion des nombres d'onde des modes guidés se propageant dans la structure (tableau IV.4) ; méthode des matrices d'impédance de surface (Logiciel Propag) (—), méthode des matrices globales (logiciel Disperse) (○).

IV.3.2. Étude expérimentale

IV.3.2.1. Dispositifs de mesures

Cette partie présente les procédés de mesures d'ondes guidées se propageant suivant les directions longitudinale (plan P_{12}) et circonférentielle (plan P_{13}) du réservoir.

Suivant la direction longitudinale, les mesures des modes guidés sont effectuées avec le dispositif de génération-détection présenté au paragraphe I.3.2. Un système de rotation permettant de faire tourner le réservoir autour de son axe central a été mis au point pour inspecter plusieurs zones suivant cette direction (figure IV.7).

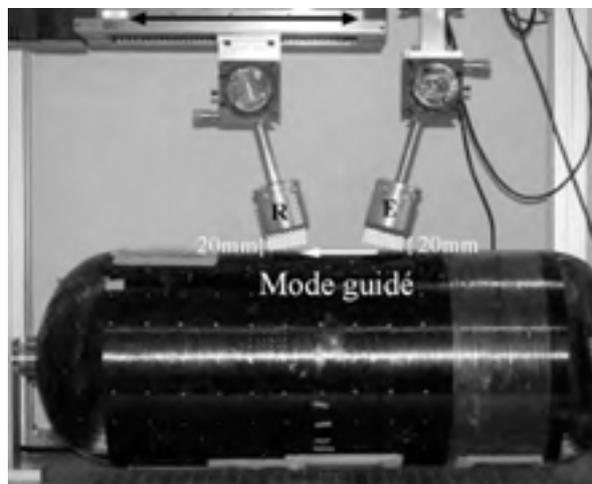


figure IV.7. Dispositif expérimental utilisant les transducteurs à couplage par air pour la génération-détection des modes guidés dans le plan P_{12} du réservoir.

Suivant la direction circonférentielle, les mesures sont effectuées avec le dispositif de génération-détection d'ondes guidées présenté sur la figure IV.8. Deux transducteurs, un capacitif à couplage par air et un piézoélectrique au contact, sont placés de façon à inspecter le réservoir dans le plan P_{13} . Le transducteur piézoélectrique au contact est utilisé comme émetteur (E). Il est couplé à la structure avec un coin en Agar Agar (gélatine utilisée dans le domaine alimentaire). La vitesse des ondes se propageant dans ce couplant est proche de celle de l'eau ($1,6 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$). La géométrie de ce coin permet d'isoler un unique mode. Le transducteur capacitif à couplage par air est utilisé comme récepteur (R).

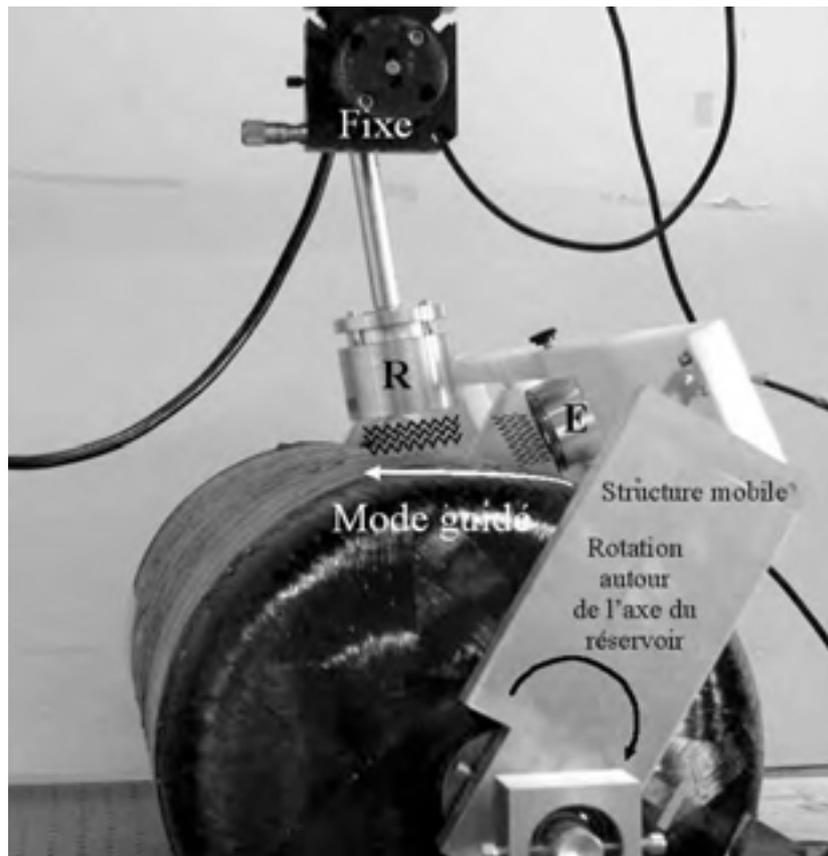


figure IV.8. Dispositif expérimental utilisant un transducteur à couplage par air comme récepteur et un transducteur piézoélectrique au contact couplé avec un coin en Agar Agar pour la génération des modes guidés dans le plan P_{13} du réservoir.

Les deux transducteurs sont orientés selon des angles de coïncidence variant avec le milieu de couplage, θ_{air} (figure IV.9(a)) et θ_{agar} (figure IV.9(b)), définis pour la sélection d'un mode particulier. Ces angles sont ajustés en fonction de la vitesse de phase du mode à générer (connue en calculant les courbes de dispersions) et la vitesse dans le milieu de couplage. L'émetteur (E) est excité par une salve de 5 cycles, d'enveloppe gaussienne, et de fréquence centrale F_0 . Le récepteur (R) détecte une partie des radiations du mode émises dans l'air. L'émetteur est déplacé le long du chemin de propagation du mode et un signal temporel est acquis pour chacune de ses positions. La longueur de déplacement est d'environ 300 mm et le pas de rotation est de 1° , soit un déplacement du transducteur au contact avec un pas de 3 mm.

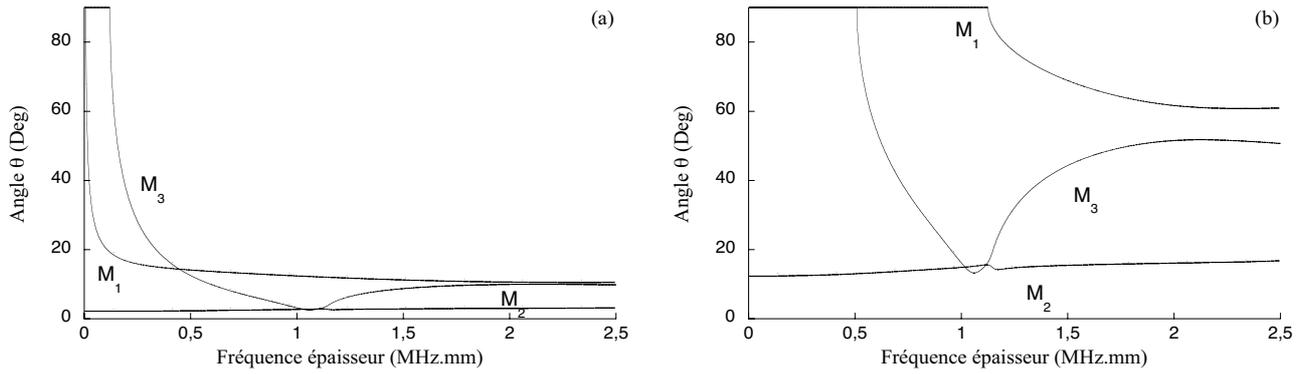


figure IV.9. Prédiction numérique (—) des angles de coïncidences dans le plan P_{13} du réservoir ; dans l'air (a) et dans l'Agar Agar (b).

IV.3.2.2. Résultats

Les courbes de dispersion des différents modes guidés (figure IV.10) se propageant au sein du réservoir, dans le plan P_{12} , sont calculées avec la méthode des matrices d'impédance de surface. Les données d'entrées sont les valeurs des modules d'élasticité ou de viscoélasticité, les épaisseurs et les densités de chacune des trois couches composite, colle et titane (tableau IV.1 et tableau IV.3). Ceci permettra de déterminer les paramètres appliqués au dispositif expérimental (fréquence centrale et angle de coïncidence) pour générer, détecter et traiter chaque mode séparément selon le procédé présenté sur la figure IV.7 (tableau IV.5).

Mode	F_0 (kHz)	θ_{air} (°)
M_1	100	18
	200	15
M_2	200	4
M_3	300	10

tableau IV.5. Fréquence F_0 et angle de coïncidence θ_{air} pour les trois modes guidés M_1 , M_2 et M_3 mesurés dans le plan P_{12} du réservoir.

La figure IV.10(a) présente les mesures et les calculs des parties réelles des nombres d'onde complexes des trois modes guidés M_1 , M_2 et M_3 , dans le plan P_{12} du réservoir. Étant donnée la non uniformité du réservoir, les modes guidés ne sont plus symétriques ou antisymétriques mais couplés. C'est pourquoi leur dénomination a changé, M_i ($1 \leq i \leq n$). La corrélation entre les valeurs prédites et les données expérimentales est excellente. La figure

IV.10(b) présente les mesures des parties imaginaires des nombres d'onde complexes de ces mêmes modes. La corrélation entre les valeurs prédites et les données expérimentales est moins bonne, car le rapport signal sur bruit n'est pas assez élevé pour mesurer avec précision l'amplitude des modes.

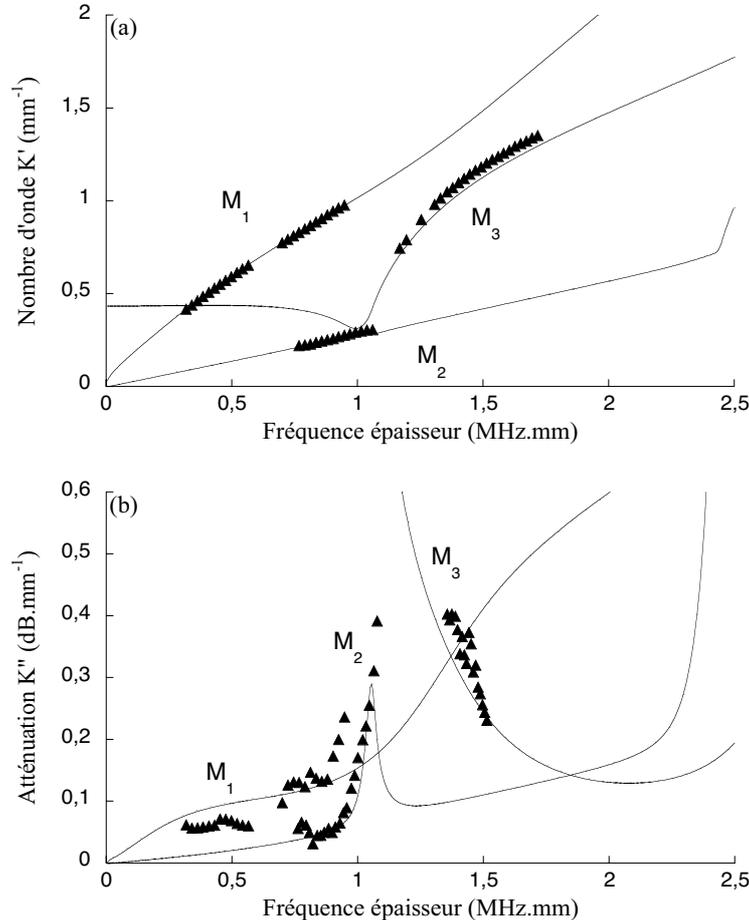


figure IV.10. Mesures (\blacktriangle) et prédictions numériques (—) dans le plan P_{12} du réservoir ; parties réelles (a) et imaginaires (b) des nombres d'onde complexes des trois modes guidés M_1 , M_2 et M_3 .

Cinq campagnes expérimentales, menées suivant la direction longitudinale et sur différentes zones du réservoir, ont permis d'estimer la reproductibilité des mesures. Le pourcentage de reproductibilité est défini par la formule (I.9). La reproductibilité des parties réelles k' est, en moyenne, de l'ordre de 1% pour le mode M_1 , 2% pour M_2 et 6% pour M_3 , ce qui montre l'homogénéité du matériau. La reproductibilité moyenne des mesures des parties imaginaires k'' des nombres d'ondes complexes est 13% pour le mode M_1 , 12% pour M_2 et 20% pour M_3 .

De la même façon que précédemment, des calculs et des mesures sont effectués dans le plan P_{13} du réservoir. Le tableau IV.6 donne les valeurs des angles de coïncidence dans l'air

(figure IV.9(a)) et dans l'Agar Agar (figure IV.9(b)) en fonction de la fréquence centrale F_0 des trois modes guidés M_1 , M_2 et M_3 que l'on veut générer. L'angle de coïncidence du mode M_1 dans l'Agar Agar est égal à 90° . Il n'est donc pas possible de générer ce mode avec un tel angle, mais en plaçant le transducteur directement au contact et tangentielllement à la courbure du réservoir.

Mode	F_0 (kHz)	θ_{air} ($^\circ$)	θ_{agar} ($^\circ$)
M_1	200	13	–
M_2	300	3,5	16
M_3	250	4,5	24
	300	8	42

tableau IV.6. Fréquence F_0 et angles de coïncidence θ_{air} et θ_{agar} pour les trois modes guidés M_1 , M_2 et M_3 mesurés dans le plan P_{13} du réservoir.

La figure IV.11 présente les mesures et les calculs des parties réelles des nombres d'onde complexes des trois modes guidés M_1 , M_2 et M_3 , dans le plan P_{13} du réservoir. La corrélation entre les valeurs prédites et les données expérimentales est bonne. Les mesures des parties imaginaires des nombres d'onde complexes de ces modes n'ont pas pu être obtenues. Cela vient des fluctuations du couplage entre le réservoir et le système de génération (transducteur au contact + coin Agar Agar) lors de son déplacement.

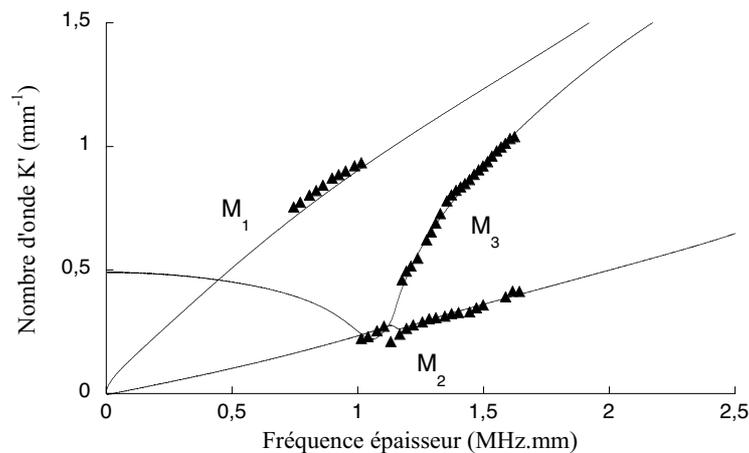


figure IV.11. Mesures des parties réelles des nombres d'onde complexes (\blacktriangle) et prédictions numériques (—) des trois modes guidés M_1 , M_2 et M_3 dans le plan P_{13} du réservoir.

Trois campagnes expérimentales, menées suivant la direction circonférentielle et sur différentes zones du réservoir, ont permis d'estimer la reproductibilité des mesures des parties réelles des nombres d'onde complexes des modes M_1 , M_2 et M_3 . Le pourcentage de reproductibilité est défini par la formule (I.9). La reproductibilité des parties réelles k' est, en moyenne, de l'ordre 15,5% pour le mode M_1 , 4,5% pour M_2 et 9% pour M_3 . La mauvaise reproductibilité des mesures est due essentiellement au problème de couplage du transducteur au contact avec le réservoir.

IV.4. Contrôle de santé du réservoir

IV.4.1. Contrôle du taux d'humidité

L'étude présentée dans le Chapitre II a montré que l'atténuation du mode guidé A_0 se propageant dans le plan P_{12} de plaques composites carbone-époxyde, est sensible aux variations de leur taux d'humidité. L'étude de sensibilité des ondes guidées aux modules de viscoélasticité présentée au paragraphe I.4.1, a montré que l'atténuation du mode A_0 est corrélée à la partie imaginaire C''_{66} du module de Coulomb dans le plan P_{12} . La partie imaginaire C''_{66} du module de Coulomb augmente d'environ 40% lorsque les plaques atteignent un niveau d'humidité proche de l'état de saturation (tableau II.2).

Les parties imaginaires k'' des nombres d'onde complexes (reliée à l'atténuation) des modes guidés M_1 , M_2 et M_3 calculées dans le plan P_{12} du réservoir sont comparées à celles qui sont calculées avec une augmentation de 40% de la partie imaginaire C''_{66} du module de Coulomb de la couche de composite (figure IV.12(a)). Seule l'atténuation du mode M_1 (+ 31%) est largement affectée par cette augmentation du C''_{66} .

De la même façon, les parties imaginaires k'' des nombres d'onde complexes des modes guidés M_1 , M_2 et M_3 calculées dans le plan P_{13} du réservoir sont comparées à celles qui sont calculées avec une augmentation de 40% de la partie imaginaire C''_{55} du module de Coulomb de la couche de composite (figure IV.12(b)). Les atténuations des modes M_1 (+ 30%) et M_3 (+ 12%) sont affectées par cette augmentation du C''_{55} .

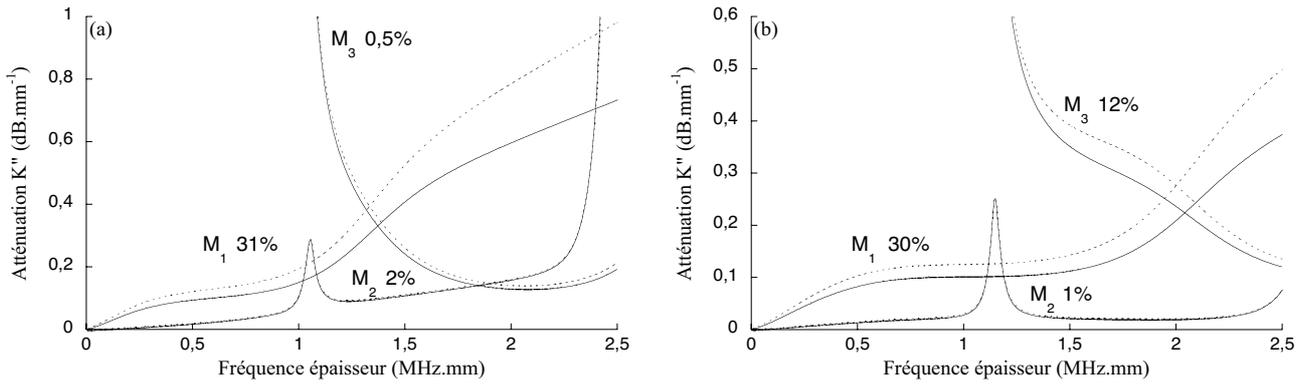


figure IV.12. Variation des k'' des trois modes guidés se propageant dans le réservoir, avec 40% d'augmentation du C''_{kk} ; prédictions numériques avec comme données d'entrée (—) les C''_{ij} présentés dans le tableau IV.3 et (---) le C''_{kk} modifié; (a) $C''_{kk} = C''_{66}$ dans le plan P_{12} et (b) $C''_{kk} = C''_{55}$ dans le plan P_{13} .

Lorsque le C''_{kk} du bobinage composite du réservoir varie, seules les atténuations de certains modes guidés se propageant dans le réservoir vont changer. Or, comme ces atténuations ne sont pas mesurées précisément et de manière fiable, l'utilisation des ondes guidées pour contrôler le taux d'humidité du réservoir ne peut pas être pour l'instant proposée.

IV.4.2. Contrôle de l'état de fissuration

L'étude présentée au paragraphe III.2 a montré que les parties réelles des modes guidés A_0 , S_0 , A_1 et S_1 se propageant dans le plan P_{12} , sont sensibles à l'évolution de la microfissuration d'une plaque carbone-époxyde soumise à des cycles basses températures. Les parties réelles de ces modes sont corrélées aux parties réelles C'_{11} , C'_{22} , C'_{66} et C'_{12} des modules de viscoélasticité dans le plan P_{12} . On considère que les modules C'_{11} , C'_{22} , C'_{66} et C'_{12} diminuent respectivement de 12%, 13,5%, 9,5% et 13%, comme lorsque la plaque $[0/+60/-60]_{33s}$ a subi deux trempes en azote liquide (tableau III.3).

Les parties réelles k' des nombres d'onde complexes des modes guidés M_1 , M_2 et M_3 calculées dans le plan P_{12} du réservoir sont comparées à celles qui sont calculées avec les variations des C'_{ij} décrites précédemment (figure IV.13(a)). Le k' du mode M_1 a une augmentation de 5% supérieure à sa reproductibilité (1%). Le k' du mode M_2 augmente de 14% comparé à sa reproductibilité (2%). Seul le k' du mode M_3 n'augmente pas en-dehors de

sa reproductibilité (6%). Le suivi de la microfissuration du bobinage composite lors de chocs thermiques basse température semble être possible puisque les k' des modes M_1 et M_2 dans le plan P_{12} varient au-dessus de leur domaine de reproductibilité.

De la même façon, les parties réelles k' des nombres d'onde complexes des modes guidés M_1 , M_2 et M_3 calculées dans le plan P_{13} du réservoir sont comparées à celles qui sont calculées avec les variations des C'_{ij} décrites précédemment (figure IV.13(a)). Les k' des trois modes M_1 , M_2 et M_3 n'augmentent pas dans des proportions suffisantes pour sortir du domaine de reproductibilité (paragraphe IV.3.2.2). par conséquent, il ne sera pas possible de suivre la microfissuration du bobinage composite du réservoir dans le plan P_{13} .

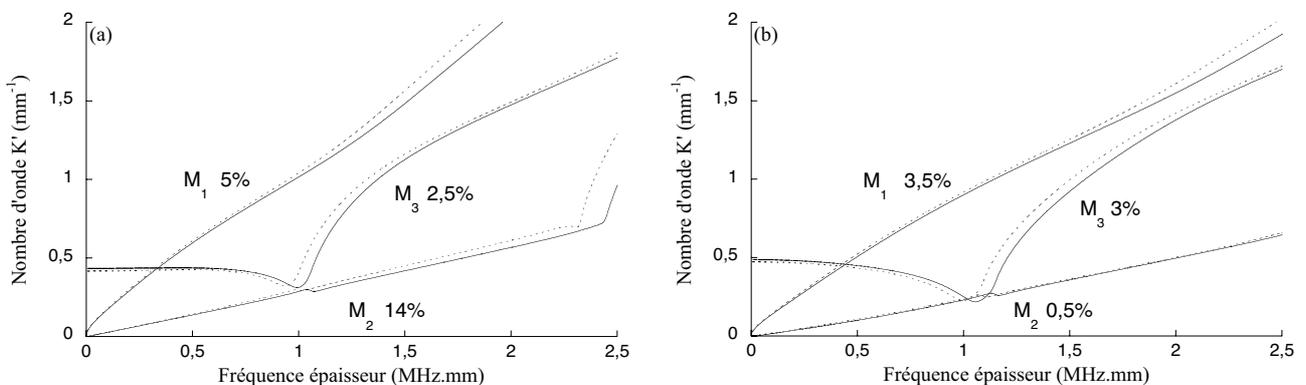


figure IV.13. Variation des k' des trois modes guidés se propageant dans le réservoir, avec 12%, 13,5%, 9,5% et 13% de diminutions respectives pour C'_{ii} , C'_{jj} , C'_{kk} et C'_{ij} ($i=1, j=2$ ou $3, k=5$ ou 6) ; prédictions numériques avec comme données d'entrée (—) les C'_{ij} présentés dans le tableau IV.3 et (---) les C'_{ij} modifiés ; (a) plan P_{12} et (b) plan P_{13} .

Lorsque les C'_{ij} du bobinage composite du réservoir varient, les parties réelles des nombres d'ondes complexes de certains modes guidés se propageant dans le réservoir vont changer. Comme ces k' sont mesurées de manière fiable, l'utilisation des ondes guidées pour contrôler la microfissuration du bobinage du réservoir peut être proposée. Il faudra s'assurer que les diverses inhomogénéités du réservoir (variation de l'épaisseur de colle ou du bobinage) ne font pas varier davantage les k' que ne le fait la fissuration.

IV.4.3. Détection d'un décollement local entre liner et bobinage

IV.4.3.1. Définition du défaut

Le réservoir contient un défaut local de type décollement. Il est situé entre le liner titane et le bobinage composite. Pour créer ce défaut, deux lames de téflon (propriétés mécaniques présentées dans le tableau IV.7) juxtaposées sont insérées au niveau de la couche de colle. Cet insert crée une lame d'air qui simule un décollement. Ses dimensions sont 20 mm × 20 mm × 0,3 mm. La figure IV.14 présente la géométrie et la localisation de l'insert pour une représentation à deux dimensions.

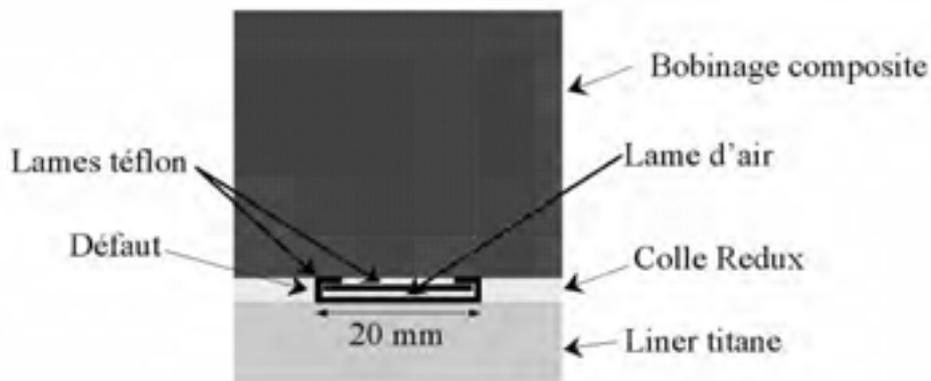


figure IV.14. Schéma de la géométrie de l'insert de téflon représentant un décollement local entre le liner titane et le bobinage composite du réservoir.

	$C_{11}^* = C_{22}^* = C_{33}^*$	$C_{66}^* = C_{55}^* = C_{44}^*$	$C_{12}^* = C_{13}^* = C_{23}^*$	ρ
Téflon	3,7+i0,2	0,275+i0,01	3,15+i0,15	2,2

tableau IV.7. Modules de viscoélasticité (GPa) et densité du téflon.

IV.4.3.2. Choix d'un mode guidé

La première étude consiste à choisir un mode particulier qui permettra la meilleure détection possible du défaut. Les vitesses d'énergie des modes M_1 , M_2 et M_3 sont calculées avec le procédé numérique présenté au paragraphe I.3 (figure IV.15). Il convient de choisir des domaines fréquentiels où la vitesse d'énergie reste constante, donc où les modes guidés ne sont pas dispersifs. La dispersion d'un mode entraîne une distorsion du signal temporel et une

perte d'amplitude, ce qui ne facilite pas la détection d'un défaut local. La figure IV.10(a) donne les domaines fréquentiels où ces trois modes ont pu être générés. Le mode M_1 est généré entre les produits fréquence-épaisseur 0,3 et 1 MHz.mm, zone où il n'est pas dispersif (vitesse d'énergie constante sur la figure IV.15). Le mode M_2 est généré entre 0,75 et 1,1 MHz.mm. Il est dispersif sur cette zone et ne sera donc pas utilisé (figure IV.15). Entre 1,1 et 1,75 MHz.mm, le mode M_3 est aussi dispersif (figure IV.15).

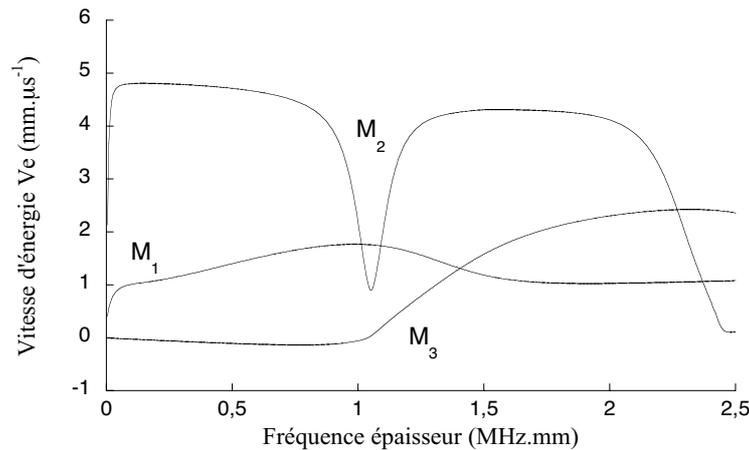


figure IV.15. Courbes de dispersion en vitesse d'énergie des modes guidés se propageant dans le plan P_{12} du réservoir.

Les flux d'énergie normal P_n et dans la plaque P_t du mode M_1 sont calculés pour deux fréquences du domaine de génération, 100 et 200 kHz (figure IV.16) [22]. Pour que le mode soit sensible au défaut, il faut que le flux d'énergie dans la plaque soit non nul dans la zone où se trouve ce défaut, ici dans la couche de colle. Sur la figure IV.16, P_t est non nul dans toutes les couches du réservoir aussi bien à 100 qu'à 200 kHz. Les études présentées aux paragraphes IV.4.1 et IV.4.2 montrent que les variations du mode M_1 lors de diverses sollicitations ne sont réellement effectives qu'à partir du produit fréquence-épaisseur 1 MHz.mm (figure IV.12(a) et figure IV.13(a)). Par conséquent, pour s'affranchir des effets des sollicitations, la détection de l'insert de téflon sera effectuée avec le mode M_1 à la fréquence de 100 kHz dans le plan P_{12} .

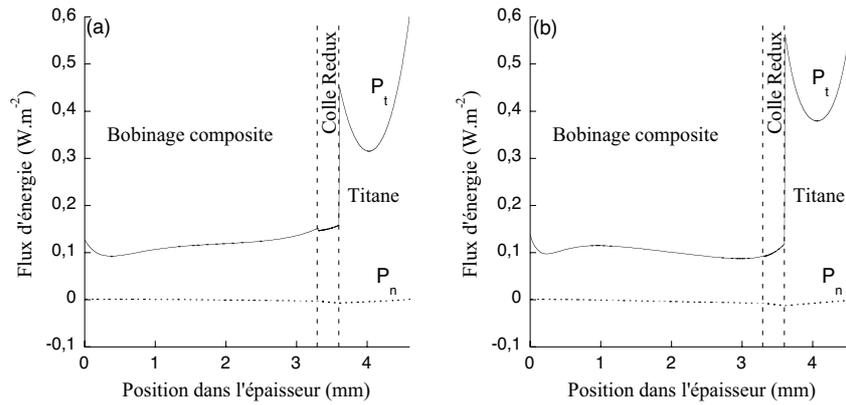


figure IV.16. Flux d'énergie du mode M_1 à 100kHz (a) et à 200 kHz (b).

IV.4.3.3. Simulation par éléments finis

Une étude par éléments finis de la propagation du mode guidé M_1 dans le plan P_{12} à la fréquence de 100 kHz est réalisée pour vérifier qu'il est possible de détecter le défaut inséré entre le liner titane et le bobinage composite du réservoir. Un logiciel commercial, Femlab, est utilisé pour son efficacité à prendre en compte le caractère viscoélastique des matériaux. Les calculs sont effectués dans le domaine fréquentiel [24].

Le paragraphe IV.3 a permis de montrer l'effet négligeable de la courbure du réservoir sur les ondes guidées. Pour minimiser les temps de calculs du code d'éléments finis, la structure est donc modélisée par une plaque constituée des trois couches, liner titane, colle REDUX 312-5 et bobinage composite (tableau IV.1 et tableau IV.3), dont les dimensions sont présentées sur la figure IV.17.

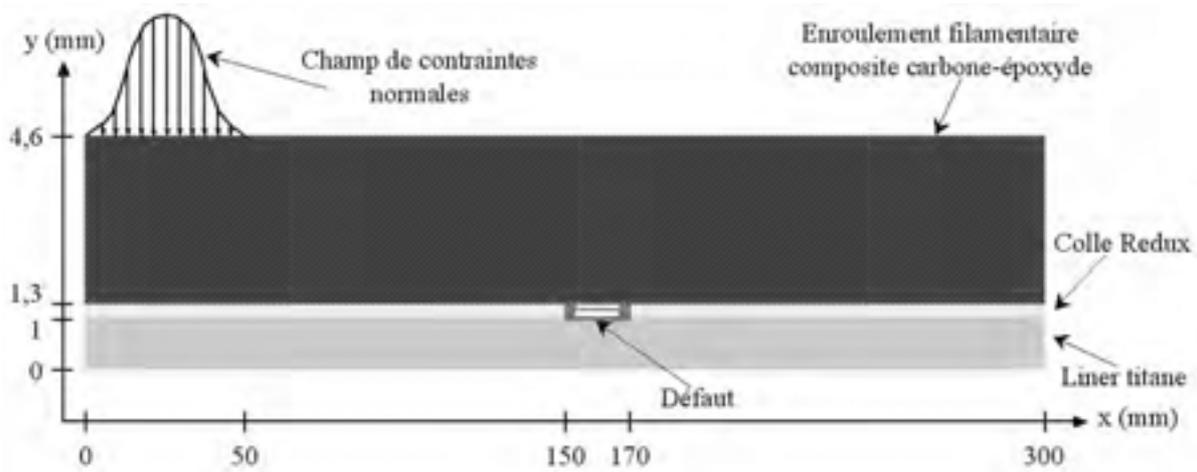


figure IV.17. Modélisation dans le code d'éléments finis de la structure plane assimilée au réservoir et contenant le défaut.

La figure IV.18 montre les éléments du maillage de la structure sans défaut. Le maillage automatique est un avantage majeur du logiciel Femlab. Le choix de la taille des éléments, dans le plan de propagation de la plaque (cas 2D), est fait de sorte que la plus petite longueur d'onde soit échantillonnée par au moins 5 éléments. Plusieurs tailles de maillages peuvent être utilisées pour définir différentes régions d'une structure complexe. Aussi, si de petits détails existent dans une région donnée de la structure, le maillage peut être raffiné localement [24].

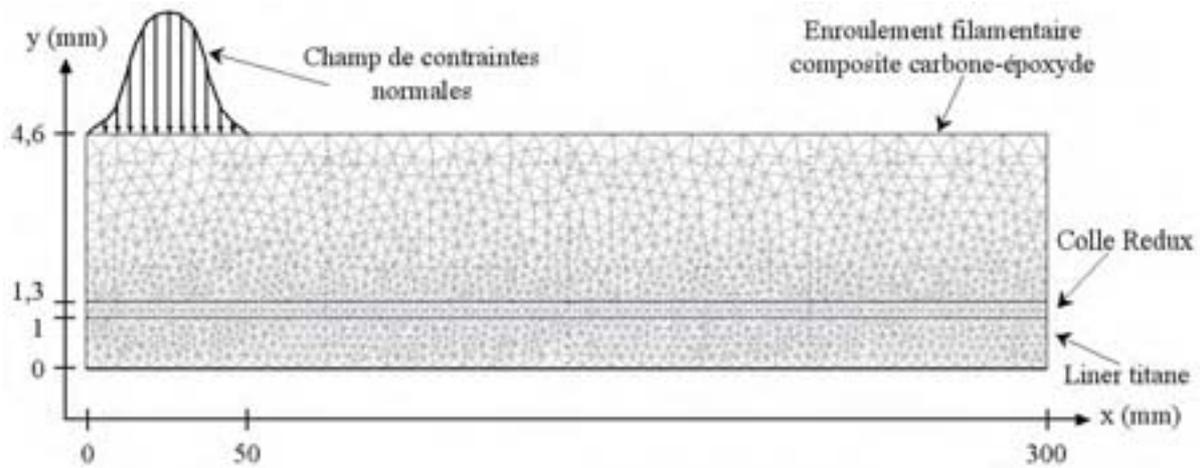


figure IV.18. Maillage automatique Femlab de la structure plane assimilée au réservoir.

L'excitation de la structure est produite par une distribution gaussienne de contraintes normales appliquées sur sa partie supérieure (figure IV.17). Cette excitation simule la pression qui serait produite en surface par un transducteur ultrasonore. La fonction qui définit cette excitation est donnée par la relation :

$$f_{excitation} = F_y = A e^{-ik'x} e^{-\frac{20}{L_{Trans}^2} \left(x - \frac{L_{Trans}}{2}\right)^2} \quad (IV.1)$$

où k' est le nombre d'onde du mode M_1 à la fréquence 100kHz, L_{Trans} la longueur de la zone d'excitation du transducteur et x sa position. Cette excitation permet de générer un mode particulier à une fréquence particulière. Ici le mode M_1 à 100 kHz.

Les calculs par éléments finis permettent d'obtenir les déplacements $u(x, y, f)$ produits par le mode M_1 , en tout point (x, y) de la structure et à la fréquence f (ici $f = 100$ kHz). On s'intéresse en particulier au déplacement vertical (u_y) produit en surface de la plaque ($y = 4,6$ mm) et pour plusieurs positions x , car c'est précisément cette donnée qui peut

éventuellement être mesurée lors d'expériences avec un capteur à couplage par air. Dans le cas présent, x varie de 100 à 140 mm, et les déplacements sont relevés tous les 0,5 mm. Un traitement par transformée de Fourier est appliqué à ce champ de déplacement et l'amplitude normalisée du déplacement en fonction du nombre d'onde k' est calculée (figure IV.19).

La figure IV.19(a) représente l'amplitude du déplacement en fonction des nombres d'onde à la fréquence de 100kHz. Pour la structure ne contenant pas de défaut, le pic obtenu pour $k' = +100 \text{ m}^{-1}$, indique la présence du mode M_1 progressif vers les x positifs. Aucun autre mode ne se propage dans la structure et aucune réflexion du mode M_1 sur les bords de plaque est constatée.

De la même manière, la figure IV.19(b) représente l'amplitude du déplacement calculée sur la même zone de propagation pour la structure contenant le défaut. Le mode M_1 progressif est toujours présent et un mode M_1 rétrograde ($k' = -100 \text{ m}^{-1}$) apparaît avec une amplitude plus faible. Le mode M_1 se réfléchit sur le défaut et aucun autre mode n'apparaît.

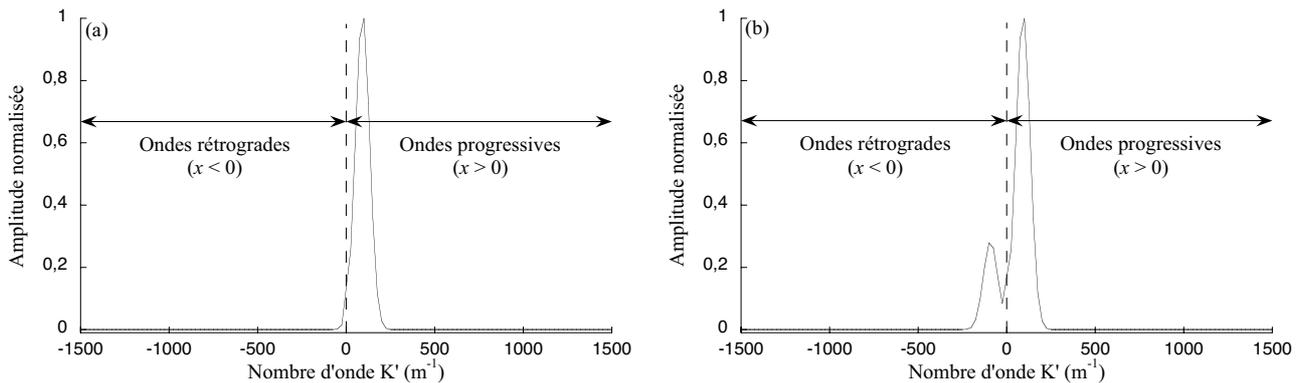


figure IV.19. Amplitude normalisée en fonction des nombres d'onde à la fréquence de 100kHz : (a) modèle réservoir sans défaut et (b) avec défaut.

Comme le composite est un matériau viscoélastique, le coefficient de réflexion dépend de la distance au défaut pour laquelle sont déterminées les amplitudes des modes M_1 incident et réfléchi. On choisit de calculer l'amplitude du mode M_1 incident à la position fixe de 160 mm (position centrale du défaut) en l'absence du défaut. Ensuite les amplitudes des modes M_1 réfléchi et transmis par le défaut sont calculées pour une distance au défaut variant de 35 à 105 mm. Les coefficients de réflexion et de transmission sont alors tracés à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} R = \frac{A_R(x)}{A(160\text{mm})} \\ T = \frac{A_T(x)}{A(160\text{mm})} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

La figure IV.20 montre la forte décroissance de ces coefficients lorsque la distance au défaut augmente. L'allure de ces courbes suit la loi $e^{-k''_{M_1}x}$ où k''_{M_1} est l'atténuation du mode M_1 à 100 kHz. Dans un contexte expérimental, il est clair que plus les mesures sont faites à proximité du défaut, meilleur en sera sa détection.

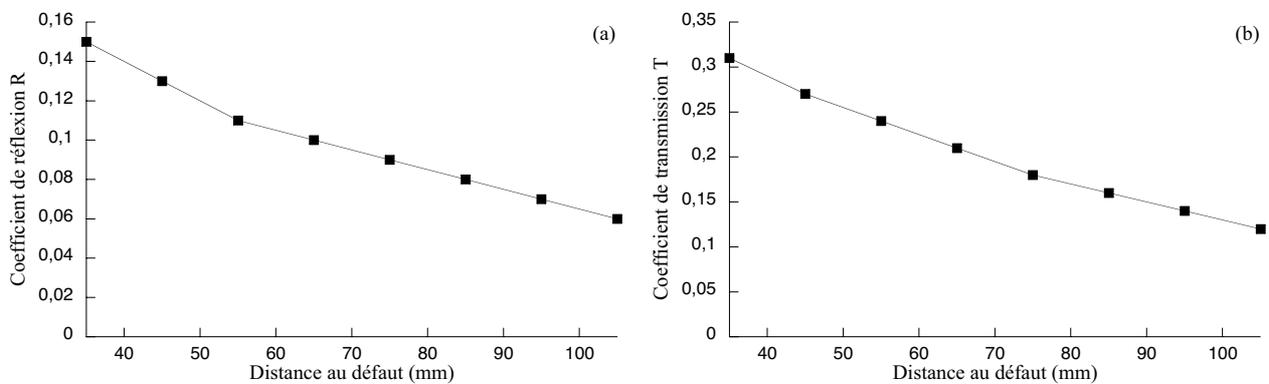


figure IV.20. Coefficients de réflexion (a) et de transmission (b) du mode M_1 se propageant à 100 kHz en fonction de la distance au défaut.

IV.4.3.4. Mesures sur le réservoir

Une campagne de mesures est réalisée pour savoir s'il est possible de détecter le décollement entre le liner titane et le bobinage composite du réservoir, en générant le mode M_1 à 100 kHz. Le coefficient de transmission est obtenu en divisant l'amplitude A_T du signal mesuré après le défaut (figure IV.21 position 2) par l'amplitude A_I du signal mesuré avant le défaut (figure IV.21 position 1). Pour mesurer A_T , le capteur est placé 40 mm après le défaut, comme lors des prédictions (paragraphe IV.4.3.3). En revanche, pour mesurer A_I , le capteur est situé 40 mm avant le défaut, contrairement aux prédictions pour lesquelles cette amplitude est calculée au niveau même du défaut (simulations sans défaut). Par conséquent, afin de pouvoir comparer les coefficients de transmission mesurés et prédits, une correction doit être apportée, par exemple en multipliant l'amplitude A_I calculée par le terme $e^{+k''_{M_1}\Delta x}$ où $k''_{M_1} = 0,013 \text{ mm}^{-1}$ et $\Delta x = 40 \text{ mm}$. Les mesures sont effectuées pour différentes génératrices du

réservoir (en faisant tourner celui-ci autour de son axe) de manière à effectuer une inspection de zones saines ainsi que de la zone avec défaut.

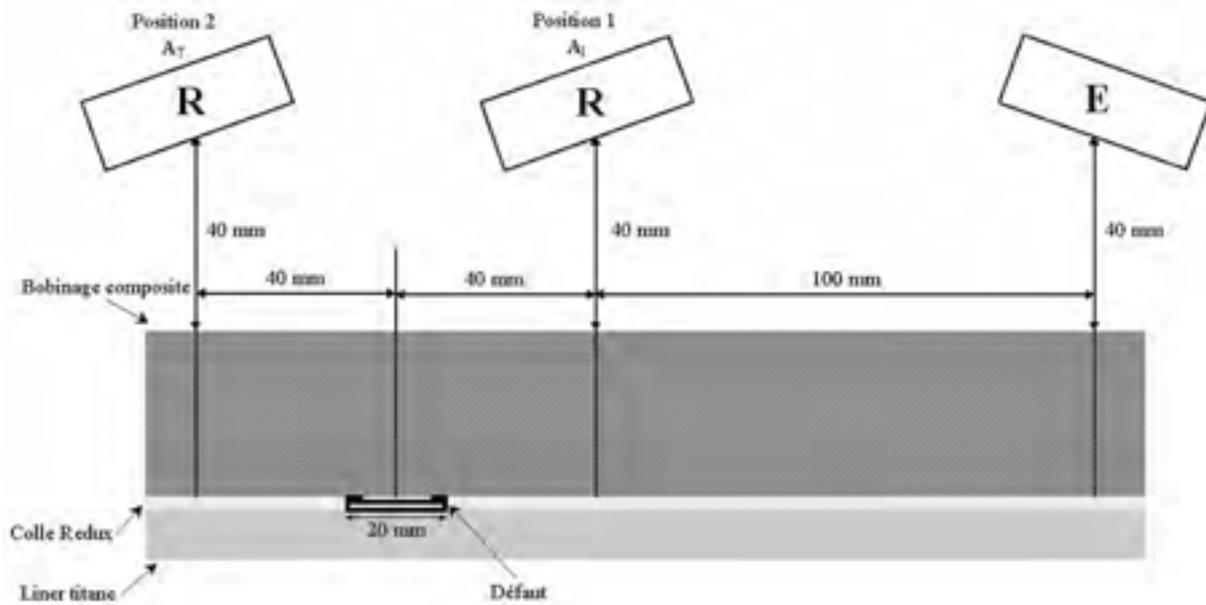


figure IV.21. Schéma du dispositif expérimental pour l'acquisition du signal du mode M_1 incident (position 1) et transmis (position 2) à 100 kHz dans le plan P_{12} du réservoir.

La figure IV.22 présente l'évolution des coefficients de transmission calculé T_{num} et mesuré T_{exp} pour une propagation du mode M_1 à 100 kHz le long de génératrices saines ou pas. Dans le cas des mesures, le coefficient T_{exp} est à peu près constant pour des positions latérales de -100 mm à -40 mm et de 40 mm à 100 mm, qui correspondent à une propagation le long de zones saines. Par contre, entre les positions latérales de -40 mm à 40 mm, le coefficient T_{exp} varie fortement : il chute en -40 et 40 mm (génératrices pour lesquelles le faisceau ultrasonore commence à ou termine de se superposer aux bords du défaut), et augmente en 0 mm (génératrice pour laquelle le faisceau ultrasonore passe par le centre du défaut). Cette allure un peu « chahutée » du coefficient T_{exp} est due à des phénomènes d'interactions d'ondes qui font des aller-retour dans la longueur du défaut (sens de propagation). Ces interactions sont plus ou moins constructives (destructives) suivant la position du faisceau ultrasonore dans la largeur du défaut (position latérale). Dans le cas des prédictions, le coefficient T_{num} est constant pour une propagation le long de zones saines (supposée de -100 à -10 mm et de 10 à 100 mm), et il chute à une autre valeur constante lorsque le défaut est traversé (étendue de -10 à 10 mm). Sa valeur constante en l'absence de défaut est due à l'absence de bruit, contrairement aux expériences. Sa valeur constante en

présence du défaut provient de la modélisation bidimensionnelle : le défaut est supposé infiniment large. Malgré tout, les valeurs de T_{exp} obtenues sur les zones saines correspondent bien à celles de T_{num} . Cela signifie que les valeurs des propriétés viscoélastiques des matériaux constituant le réservoir sont bien conformes à la réalité. De plus, la valeur de T_{num} calculée avec défaut (0,31) est du même ordre de grandeur que la valeur mesurée (0,3) sur les bords du défaut. Par contre, le gain d'amplitude de T_{exp} , mesuré au centre défaut (0,58), n'est pas prédit par le modèle bidimensionnel. Ce gain étant probablement provoqué par la largeur finie du défaut réel, il semblerait nécessaire d'effectuer des simulations en 3D pour prendre en compte convenablement cette géométrie. Le point positif de ce paragraphe est qu'il est donc possible de détecter le défaut placé dans le réservoir, en mode transmission (émetteur et récepteur placés de part et d'autre du défaut) et sans contact avec la structure. Par contre, la détection du défaut en mode réflexion (émetteur et récepteur placés d'un même côté du défaut) n'a pas été possible car le signal du mode M_1 réfléchi était noyé dans le bruit.

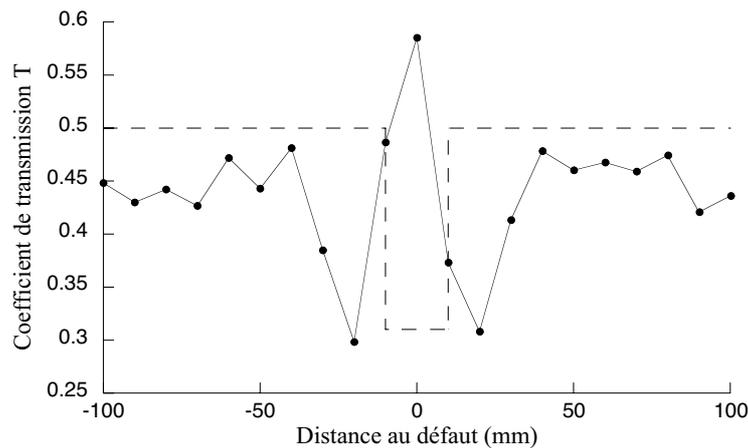


figure IV.22. Coefficient de transmission du mode M_1 à 100 kHz mesuré (—) et calculé (----) dans le plan P_{12} du réservoir.

IV.5. Conclusion

La possibilité d'obtenir des mesures par ondes guidées dans le réservoir a été validée. Les mesures des parties réelles des nombres d'onde complexes des modes guidés M_1 , M_2 et M_3 générés dans les plans P_{12} et P_{13} , sont corrélées avec leurs courbes de dispersion calculées par la méthode des matrices d'impédance de surface. Seules les parties imaginaires de ces modes générés dans le plan P_{12} , montrent une relative corrélation avec les prédictions numériques. Pour obtenir des résultats sur l'atténuation dans le plan P_{13} , le système de

génération au contact (transducteur piézoélectrique + coin Agar Agar) présenté sur la figure IV.8, devra rester fixe sur le réservoir pour s'affranchir des problème de couplage.

Des simulations par ondes guidées pour étudier la santé du réservoir soumis à des variations du taux d'humidité et de la microfissuration, ont été présentées. Par rapport à la reproductibilité des mesures, seule l'atténuation du modes M_1 généré dans le plan P_{12} , semble permettre le suivi des variations de la partie imaginaire du module de Coulomb reliées aux variations du taux d'humidité dans le bobinage composite du réservoir. Les variations des parties réelles des nombres d'onde complexes des modes M_1 et M_2 générés dans le plan P_{12} , sortent du domaine de reproductibilité et permettront peut-être de suivre les évolutions des parties réelles des modules de viscoélasticité pour des chocs thermiques basse température.

L'étude par éléments finis du décollement entre le liner titane et le bobinage composite a montré que le mode M_1 à la fréquence de 100 kHz était sensible à ce défaut. Ces résultats ont été comparés aux mesures obtenues en mode transmission pour la détection du défaut. Il faudra effectuer des simulations avec diverses propriétés de défaut (défaut en téflon sans lame d'air, trou dans la couche de colle, etc....) en 3D pour obtenir la validation entre mesures et calculs.

Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

L'objectif de ce travail était de fournir des méthodes de suivi par ondes guidées de l'état de santé d'un réservoir composite, utilisé pour le transport de gaz ou de fluides conditionnés à très basses températures, dans des environnements humides et de températures très variables.

Les problèmes direct et inverse, pour l'évaluation non destructive par ondes ultrasonores guidées, ont été présentés et validés. La méthode de mesures ultrasonores par ondes guidées, sans contact et unilatérale, correspond bien aux critères de contrôle imposés par les industries. Les procédés, décrits dans les problèmes direct et inverse, ont été utilisés, pour le suivi de santé de structures composites, soumises à diverses sollicitations comme le vieillissement humide ou les cycles à basses températures.

La sensibilité des ondes guidées au taux d'humidité dans des plaques composites carbone-époxyde a été étudiée. Des mesures expérimentales des nombres d'onde complexes ont été effectuées pour les trois modes A_0 , S_0 et S_1 . Il a été démontré que l'atténuation du mode A_0 est une bonne jauge du taux d'humidité dans ce type de matériaux : ses changements, durant les procédés de prise en eau et de séchage, suivent très bien ceux de la masse des plaques. L'atténuation du mode A_0 étant corrélée à la partie imaginaire du module de Coulomb dans le plan de propagation, une procédure numérique a servi à quantifier ce paramètre. L'absorption d'humidité par les plaques testées a amené à une augmentation de la partie imaginaire du module de Coulomb et *vice versa*. Cette étude a servi à simuler le suivi par ondes guidées du taux d'humidité dans le bobinage composite du réservoir.

La sensibilité des ondes guidées à la microfissuration obtenue par des sollicitations basses températures sur des matériaux composites carbone-époxyde, a été montrée. L'étude préliminaire a montré que les parties réelles des nombres d'onde complexes des quatre modes A_0 , S_0 , A_1 et S_1 permettaient de suivre l'évolution de la microfissuration dans une plaque d'empilement $[0/+60/-60]_{33s}$. L'étude sur des plaques d'empilements $[0/+45/90/-45]_{6s}$, $[0_2/+45_2/90_2/-45_2]_{3s}$ et $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$ a montré que la partie réelle du nombre d'onde complexe du mode A_0 était principalement sensible à l'évolution de la microfissuration et que le taux de microfissures variait suivant le nombre de plis consécutifs de même orientation.

Cette étude a servi à simuler le suivi par ondes guidées de la microfissuration du bobinage composite du réservoir.

La possibilité d'obtenir des mesures des nombres d'onde complexes de certains modes guidés se propageant dans le réservoir a été démontrée. Les mesures des parties réelles des nombres d'onde complexes des modes guidés M_1 , M_2 et M_3 sont corrélées avec leurs courbes de dispersion calculées par la méthode des matrices d'impédance de surface. Ces mesures sont susceptibles de permettre le suivi de la microfissuration du bobinage composite du réservoir. Les mesures des parties imaginaires des nombres d'onde complexes sont moins précises, mais permettront peut-être de suivre le taux d'humidité du bobinage composite.

Des simulations sur les ondes guidées pour le contrôle de santé du réservoir soumis à des variations du taux d'humidité et de la microfissuration, et pour la détection d'un décollement localisé entre le liner titane et le bobinage composite, ont été présentées. Dans le plan P_{12} , l'atténuation du mode M_1 est sensible à la variation de la partie imaginaire du module de Coulomb reliée à l'évolution du taux d'humidité dans le bobinage composite du réservoir. Les parties réelles des nombres d'onde complexes des modes M_1 et M_2 du plan P_{12} sont sensibles aux variations des parties réelles des modules de viscoélasticité reliées à la microfissuration du bobinage. L'étude par éléments finis du décollement entre le liner titane et le bobinage composite a montré que le mode M_1 à la fréquence de 100 kHz est sensible au défaut. À cause de la non uniformité du bobinage, sa détection n'a pas été possible avec les dispositifs expérimentaux utilisés dans cette étude.

Les études expérimentales relatives au suivi de l'état de santé du réservoir composite n'ont pas pu être réalisées. Il faudra soumettre cette structure à un environnement humide et à des variations de températures pour faire corroborer les méthodes sur les suivis des taux d'humidité et de microfissuration établies à des résultats expérimentaux. L'étude de la détection du décollement localisé entre le liner titane et le bobinage composite du réservoir devra être approfondie. Les résultats expérimentaux montrent qu'il est possible de détecter ce type de défaut en mode transmission et de suivre son effet en 3D. Il sera donc intéressant d'élaborer une méthode de détection de défauts localisés dans des structures complexes, en étudiant la propagation des ondes guidées sur des plaques contenant des défauts calibrés et en simulant en trois dimension la réflexion et la transmission des ondes sur les défauts.

Cette étude permettra d'élaborer des logiciels incluant des tests de contrôlabilité des structures réelles, améliorant les propriétés mécaniques des matériaux les constituant, pour éviter et retarder au maximum les altérations globales et locales de ces structures lors de leur mise en service. Il faudra étudier la possibilité de suivre la santé de matériaux constitutifs de structures opérationnelles et de grandes tailles par intégration de capteurs en réseaux ou non suivant l'atténuation des ondes dans les composites constitutifs.

Annexes

Annexe A : Mesures par ondes guidées sur la plaque $[0/+60/-60]_{33s}$

Pour prétendre à une bonne optimisation des modules d'élasticité de la plaque $[0/+60/-60]_{33s}$, la génération de plusieurs modes sur une large plage fréquentielle est nécessaire. Le dispositif expérimental utilisant comme émetteur un transducteur piézoélectrique au contact et comme récepteur un transducteur à couplage par air auquel est adjoint un réflecteur parabolique, permet la génération et la détection de plusieurs modes [22]. La figure A.1 présente les mesures des parties réelles des nombres d'onde complexes obtenues avec ce dispositif. Le problème inverse présenté dans le paragraphe I.4 est résolu à partir de ces mesures et les modules d'élasticité du matériau sont optimisés pour l'état initial E1 (figure A.1(a) et tableau III.1) et après la dernière trempe en azote liquide E4 (figure A.1(a) et tableau A.1).

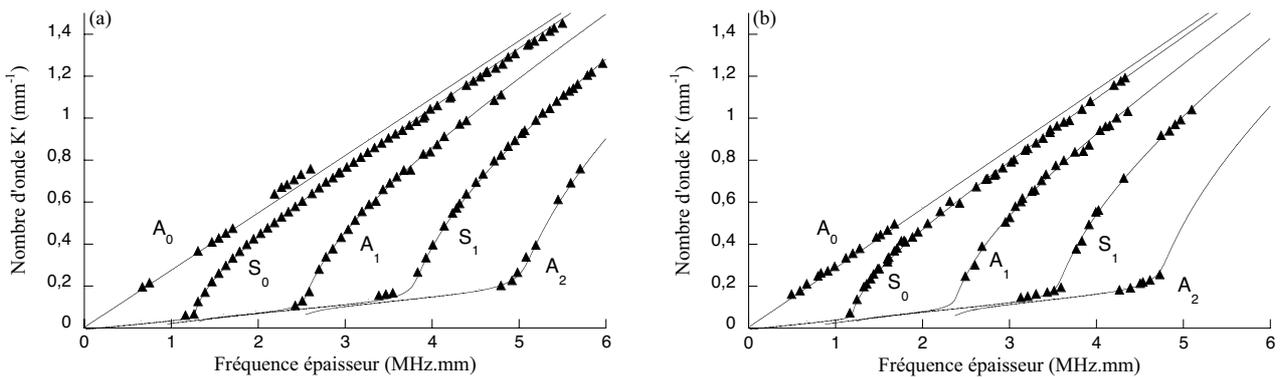


figure A.1. Mesures (triangles) et prédictions numériques (lignes) des parties réelles des nombres d'onde complexes des modes A_0 , S_0 , A_1 , S_1 et A_2 à l'état E1 (a) et à l'état E4 (b).

C'_{11}	C'_{22}	C'_{66}	C'_{12}
$9,6^{\pm 0,2}$	$142^{\pm 5}$	$2,8^{\pm 0,1}$	$9,4^{\pm 0,5}$

tableau A.1. Modules d'élasticité (GPa) de la plaque $[0/+60/-60]_{33s}$ dans le plan P_{12} à l'état E4.

Annexe B : Étude d'étanchéité

Une étude de l'étanchéité a été réalisée par EADS SPACE Transportation sur la plaque n°3-2 d'empilement $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$. L'intérêt est d'obtenir des valeurs permettant de quantifier l'évolution de la microfissuration dans les matériaux. Un échantillon de 130 mm de côté est prélevé sur la plaque à l'état initial (E1), un autre après la sollicitation à -150°C et un, après la dernière trempe en azote liquide (E7). Les essais sont réalisés selon le schéma de la figure A.1. L'échantillon est placé dans l'enceinte de mise en pression raccordée à une bouteille d'hélium et à un système de détection du taux de fuite du matériau testé. La pression d'essai est de 1 bar relatif à température ambiante.

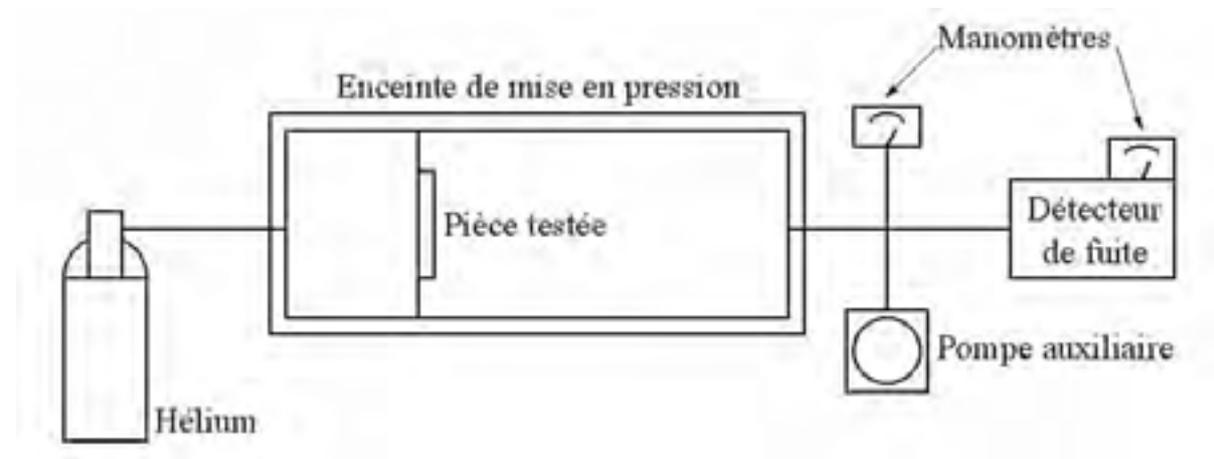


figure B.1. Schéma du montage.

Après dix minutes de mise en pression à l'hélium 1 bar, le taux de fuite est stable pour une concentration d'hélium de 50%. Le tableau A.1 présente les taux de fuite obtenus sur les trois échantillons de la laque n°3-2 suivant différents états de sollicitations. Les échantillons ont un taux de fuite conforme à la microfissuration du matériau. La valeur de référence du taux de fuite pour que le matériau soit considéré comme sain est de $3,4 \cdot 10^{-7} \text{ mbar.l.s}^{-1}$. Le matériau a donc dès l'état initial un taux de microfissures le rendant poreux et non conforme aux contraintes de sécurité demandées dans l'industrie aérospatiale.

État	Taux de fuite ($mbar.l.s^{-1}$)
E1	0,3
E4	0,9
E5	1,1

tableau B.1. Taux de fuite du matériau $[0_3/+45_3/90_3/-45_3]_{2s}$ suivant différents états de sollicitations.

Les variations des parties réelle et imaginaire du nombre d'onde complexe du mode A_0 sont comparées à la variation relative du taux de fuite pour différents états de sollicitations basses températures de la plaque n°3-2 (figure A.2). Les résultats obtenus sur le taux de fuite sont corrélés aussi bien avec la partie réelle qu'avec la partie imaginaire du nombre d'onde complexe du mode A_0 . L'étude de l'étanchéité est un moyen de quantifier la microfissuration dans les matériaux. Il faut quand même émettre quelques réserves quant à l'utilisation de ce procédé car le taux de fuite est obtenue par passage de l'hélium pour une fissuration continue dans chaque couche de l'épaisseur du matériau et non lorsque la fissuration est discontinue. Ce procédé pourrait donner des résultats incohérents avec les mesures par ondes guidées qui suivent l'évolution générale de la microfissuration.

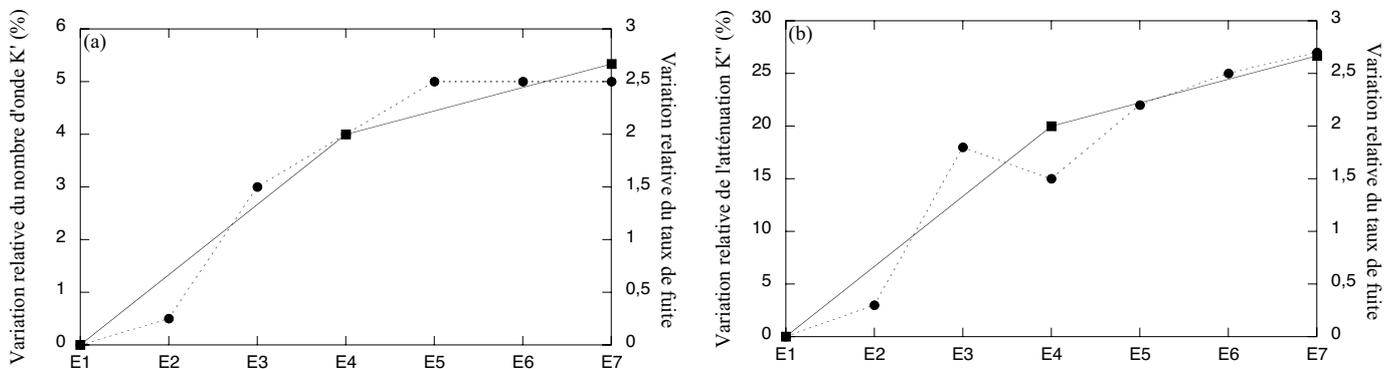


figure B.2. Variations des mesures du nombre d'onde complexe du mode A_0 (●, ---) et du taux de fuite (■, —) avant et après les cycles basses températures pour la plaque n°3-1 ; parties réelles (a) et imaginaires (b).

Bibliographie

1. Diaz-Valdes S.H., Soutis C. Real-time nondestructive evaluation of fiber composite laminates using low-frequency Lamb waves. *Journal of Acoustic Society of America*, 2002, vol. 111, issue 5, p. 2026-2033.
2. El-Guerjouna R., Baboux J.C., Ducret D., Godin N., Guy P., Huguet S., Jayet Y., Monnier T. Nondestructive evaluation of damage and failure of fibre reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission. *Advanced Engineering Materials*, 2001, vol. 3, issue 8, p. 601-608.
3. Hailu B., Hayward G., Gachagan A., McNab A., Farlow R. Comparison of different piezoelectric materials for the design of embedded transducers for structural health monitoring applications. *IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium (Cat. No.00CH37121)*, 2002, vol. 2, p. 1009-1012.
4. Lemistre M., Balageas D. Structural health monitoring system based on diffracted Lamb wave analysis by multiresolution processing. *Smart Materials and Structures*, 2001, vol. 10, issue 3, p. 504-511.
5. Lin X., Yuan F.G. Diagnostic Lamb waves in an integrated piezoelectric sensor/actuator plate: analytical and experimental studies. *Smart Materials and Structures*, 2001, vol. 10, issue 5, p. 907-913.
6. Monnier T., Jayet Y., Guy P., Baboux J.C. The piezoelectric implant method: implementation and practical applications. *Smart Materials and Structures*, 2000, vol. 9, issue 3, p. 267-272.
7. Moulin E., Assaad J., Delebarre C., Osmont D. Modeling of Lamb waves generated by integrated transducers in composite plates using a coupled finite element-normal modes expansion method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, vol. 107, issue 1, p. 87-94.
8. Osmont D., Dupont M., Gouyon R., Lemistre M., Balageas D. Damage and damaging impact monitoring by PZT sensors-based HUMS. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2000, vol. 3986, p. 85-92.
9. Paget C.A., Levin K., Delebarre C. Behavior of an embedded piezoceramic transducer for Lamb wave generation in mechanical loading. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2000, vol. 3985, p. 510-520.

10. Veidt M., Liu T., Kitipornachi S. Experimental investigation of the acousto-ultrasonic transfer characteristics of adhesively bonded piezoceramic transducers [for US NDE]. *Smart Materials and Structures*, 2000, vol. 9, issue 1, p. 19-23.
11. Aoyama H., Tanaka K., Watanabe H. Health-monitoring technologies for alumina-fiber-reinforced plastics. *Composite Structures*, 2001, vol.52, issue 3-4, p. 523-531.
12. Belarbi A., Watkins S.E., Chandrashekhara K. Smart fiber-reinforced polymer rods featuring improved ductility and health monitoring capabilities. *Smart Materials and Structures*, 2001, vol. 10, issue 3, p. 427-431.
13. Burgueño R., Karbhari V.M., Seible F. Experimental dynamic characterization of an FRP composite bridge superstructure assembly. *Composite Structures*, 2001, vol. 54, issue 4, p. 427-444.
14. Chung D.D.L. Structural health monitoring by electrical resistance measurement. *Smart Materials and Structures*, 2001, vol. 10, issue 4, p. 624-636.
15. Garg D.P., Zikry M.A., Anderson G.L. Current and potential future research activities in adaptive structures: an ARO perspective. *Smart Materials and Structures*, 2001, vol. 10, issue 4, p. 610-623.
16. Giurgiutiu V., Jichi F., Berman J.B. Theoretical and experimental investigation of magnetostrictive composite beam. *Smart Materials and Structures*, 2001, vol. 10, issue 5, p. 934-945.
17. Hunt S.R., Hebden I.G. Validation of the Eurofighter Typhoon structural health and usage monitoring system. *Smart Materials and Structures*, 2001, vol. 10, issue 3, p. 497-503.
18. Nyongesa H.O., Otieno A.W., Rosin P.L. Neural fuzzy analysis of delaminated composites from shearography imaging. *Composite Structures*, 2001, vol. 54, issue 3-4, p. 313-318.
19. Pohl J., Herold S., Mook G. Damage detection in smart CFRP composites using impedance spectroscopy. *Smart Materials and Structures*, 2001, vol. 10, issue 4, p. 834-842.
20. Yuan L.B., Jin W., Zhou L.M. The temperature characteristic of fiber-optic pre-embedded concrete bar sensor. *Sensors and Actuators A (Physical)*, 2001, vol. A93, issue 3, p. 206-213.
21. Hosten B., Castaings M. Surface impedance matrices to model the propagation in multilayered media. *Ultrasonics*, 2003, vol. 41, p. 501-507.
22. Castaings M. Contrôle et évaluation non destructifs de matériaux par ondes ultrasonores guidées. Habilitation à Diriger des Recherches : Bordeaux 1 : 2002, 92p., n°230.

23. Le Clézio E. Diffraction des ondes de Lamb par des fissures verticales. Th : Mécanique : Bordeaux 1 : 2001, 143 p., n°2472.
24. Castaings M., Predoi M., Bacon C., Hosten B. Finite element predictions for the dynamic response of thermo-viscoelastic material structures. J. Acoust. Soc. Am., 2004, vol. 115, issue 3, p. 1125-1133.
25. Lord Rayleigh. On the free vibrations of an infinite plate of homogeneous isotropic matter. Proc. Roy.Soc., 1889, p. 224-234.
26. Lamb H. On waves in an elastic plate. Proceedings of the Royal Society of London, 1917, vol. A 93, p. 114-128.
27. Lamb H. On the flexure of an elastic plate. Proceedings of the London Mathematical Society, 1889, vol. 21, p. 70-90.
28. Dieulesaint E., Royer D. Ondes élastiques dans les solides. Masson et Cie. 1974.
29. Auld B.A. Acoustic fields and waves in solids. Robert E Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1990.
30. Press W.H., Teukolsky S.A., Flannery B.P. Numerical recipes in C – The art of scientific computing. Cambridge Univ., Press 2nd ed., 1997.
31. Thomson W.T. Transmission of elastic waves through a stratified medium. J. Appl. Phys., 1950, vol. 21, p.89-93.
32. Haskell N.A. The dispersion of surface waves on multilayered media. Bull Seismol Soc. Am., 1953, vol. 43, p.17-34.
33. Lowe M.J.S. Matrix techniques for modeling ultrasonics waves in multilayered media. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1995, vol. 42, issue 4, p.525-542.
34. Poncelet O., Baron C., Shuvalov A., Deschamps M. Propagation d'ondes élastiques en milieux hétérogènes transverses : application aux ondes guidées dans une plaque. Colloque bi-annuel du GDR-2501 CNRS « *Étude de la propagation ultrasonore en milieux inhomogènes en vue du contrôle non destructif* », Aussois, 8-12 décembre 2003.
35. Vlasie Belloncle V. Modélisation mécanique et caractérisation ultrasonore de structures collées. Th : Mécanique : Paris 6 : 2003, 206 p.
36. Wang L., Rokhlin S.I. Recursive impedance matrix method for wave propagation in stratified media. Bull Seismol Soc. Am.,2002, vol. 92, p. 1129-1135.
37. Wang L., Rokhlin S.I. Stable reformulation of transfer matrix method for wave propagation in layered anisotropic media. Ultrasonics, 2001, vol. 39, p. 413-424.

38. Hosten B., Biateau C., Castaings M., Rozière D. Étude et caractérisation de transducteurs à couplage par air pour l'évaluation et le contrôle non destructifs des matériaux. *Instrumentation Mesure Métrologie*, 2001, vol. 1, issue 1-2, p. 169-189.
39. Hosten B., Castaings M., Trétout H., Voillaume H. Identification of composite materials elastic moduli from Lamb wave velocities measured with single-sided, contact-less, ultrasonic method. *Review of Progress in QNDE*, Ed. Thompson D.O. and Chimenti D.E., AIP Conf Proc., New York, 2001, vol. 20(B), p. 1023-1030.
40. Alleyne D.N., Cawley P. A two-dimensionnal Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *J. Acoust. Soc Am.*, 1991, vol. 89, issue 3, p. 1159-1168.
41. Castaings M., Hosten B., Kundu T. Inversion of ultrasonic, plane-wave transmission data in composite plates to infer viscoelastic material properties. *NDT&E International*, 2000, vol. 33, p. 377-392.
42. Schieffer A., Maire J.F., Lévêque D. A coupled analysis of mechanical behaviour and aging for polymer-matrix composites. *Composites Science and Technology*, 2002, vol. 62, issue 4, p. 543-549.
43. Bunsell A.R. L'absorption d'eau par les matériaux composites à matrice organique. *Introduction aux matériaux composites – Matrices organiques*, éditeurs Daviaud R. et Filliatre C., Édition du CNRS, Institut des matériaux composites, 1983, p. 375-390.
44. Alvares de Aragao E.E. Étude de l'endommagement par eau des composites, par des essais de choc en flexion. –125. Th. : Génie mécanique, Université de Bordeaux 1, 1986, n°395.
45. Mohd-Ishak Z.A., Ishiaku U.S., Karger-Kocsis J. Hygrothermal aging and fracture behavior of short-glass-fiber-reinforced rubber-toughened poly(butylene terephthalate) composites. *Composites Science and Technology*, 2000, vol. 60, issue 6, p. 803-815.
46. Morgan R.J., O'neal J.E., Fanter D.L. The effect of moisture on the physical and mechanical integrity of epoxies. *Journal of Material Sciences*, 1980, vol. 15, p. 751-764.
47. Chiou P., Bradley W.L. Effects of seawater absorption on fatigue crack development in carbon/epoxy EDT specimens. *Composites Science and Technology*, 1995, vol. 26, issue 12, p. 869-876.
48. Scida D., Abourab Z., Benzeggagh M.L. The effect of ageing on the damage events in woven-fibre composite materials under different loading conditions. *Composites Science and Technology*, 2002, vol. 62, issue 4, p. 551-557.

49. Seng L.K., Earn T.T., Shim V.P.W. Hygrothermal analysis of woven-fabric composite plates. *Composites Part B: Engineering*, 1997, vol. 28, issues 5-6, p. 573-581.
50. Weitsman Y., Reifsnider K.L. Moisture in composites : Sorption and damage. *Fatigue of Composite Materials*, 1999, vol. 9, issue 9, p. 385-429.
51. Willett J.L., Doane W.M. Effect of moisture content on tensile properties of starch/poly(hydroxyester ether) composite materials. *Polymer Testing*, 2002, vol. 43, issue 16, p. 4413-4420.
52. Theocaris P.S., Papanicolaou G.C., Kontou E.A. Interrelation between moisture absorption, mechanical behaviour and extend of the boundary interface in particulate composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 1983, vol. 28, p. 3145.
53. Colombini D., Martinez-Vega J.J., Merle G. Dynamic mechanical investigations of the effects of water sorption and physical aging on an epoxy resin system. *Polymer*, 2002, vol. 43, issue 16, p. 4479-4485.
54. Mohd-Ishak Z.A., Tengku Mansor T.S.A., Yow B.N., Ishiaku U.S., Karger-Kocsis J. Short glass fibre reinforced poly(butylene terephthalate). 2. Effect of hygrothermal aging on mechanical properties. *Plastics, Rubber and Composites*, 2000, vol. 39, issue 6, p. 271-277.
55. Soderholm K.J., Calvert P.D. Effects of water on glass-filled methacrylate resins. *Journal of Materials Science*, 1983, vol. 18, p. 2957.
56. Nielsen S.A., Toftegaard H. Ultrasonic measurement of elastic constants in fiber-reinforced polymer composites under influence of absorbed moisture. *Ultrasonics*, 2000, vol. 38, issue 1-8, p. 242-246.
57. Zellouf D., Saint-Pierre N., Jayet Y., Tatibouet J. Piezoelectric implant: Monitoring the water degradation in polymer based composites. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1996, vol. 2779, p. 158-163.
58. Jayet Y., Gaertner R., Guy P., Vassoille R., Zellouf D. Application of ultrasonic spectroscopy for hydrolytic damage detection in crfc : Correlation with mechanical tests and microscopic observations. *Journal of Composite Materials*, 2000, vol. 34, issue 16, p. 1356-1368.
59. Ducret D., El Guerjouma R., Jayet Y., Baboux J.C. Anisotropic damage evaluation in polymer fiber composites under hygrothermal aging by means of ultrasonic techniques. *Review Of Progress in Quantitative NonDestructive Evaluation*, 2000, Vol. 509, issue 1, p. 1199-1206.

60. Cinquin M., Castaings M., Hosten B., Brassier P., Pérès P. Monitoring of the Moisture Content in Carbon-epoxy Plates using Lamb Waves. *NDT & E international*, 2005, vol. 38, issue 1, p. 37-44.
61. Cinquin M., Castaings M., Hosten B., Brassier P., Pérès P. The Use of Lamb Waves to Monitor the Moisture Content in Composite Materials. *Proceeding of the World Congress on Ultrasonics*, Paris, 2003, p. 415-418.
62. Cinquin M., Castaings M., Hosten B., Brassier P., Pérès P. The Use of Lamb Waves for Moisture Content Monitoring in Composite Materials. *Second Anglo-French Physical Acoustics Conference*, Wissant, 2002.
63. Timmerman J. F., Tillman M. S., Hayes B. S., Seferis J. C. Matrix and fiber influences on the cryogenic microcracking of carbon fiber/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, vol. 33, issue 3, p. 323-329.
64. Herakovich C.T., Hyer M.W. Damage-induced property changes in composites subjected to cyclic thermal loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 1986, vol. 25, issue 5/6, p. 779-791.
65. Seale M. D., Smith B.T., Prosser W.H. Lamb wave assessment of fatigue and thermal damage in composites. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, vol. 103, issue 5, p. 2416-2424.
66. Seale M. D., Madaras E. I. Ultrasonic measurements of stiffness in thermal-mechanically fatigued IM7/5260 composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1999, vol. 8, issue 4, p. 429-436.
67. Seale M. D., Madaras E. I. Lamb wave characterization of the effects of long-term thermal-mechanical aging on composite stiffness. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, vol. 106, issue 3, p. 1346-1352.
68. Seale M. D., Madaras E. I. Nondestructive evaluation of the effects of thermal-mechanical aging on IM7/K3B stiffness. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2000, vol. 13, p. 75-90.
69. K. Park, Y. Cho, J. L. Rose, A Lamb Waves Study on thermal damage in a degraded plate. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 22, pp. 1379-1386, 2003.
70. Toyama N., Noda J., Okabe T. Quantitative damage detection in cross-ply lamites using Lamb wave method. *Composites Science and Technology*, 2003, vol. 63, p. 1473-1479.
71. Dayal V., Kinra V. K. Ultrasonic NDE of Composites for Transverse Cracking. *Proceeding of the SEM Fall Conference on Experimental Mechanics*, (A88-1387603-24), Society for Experimental Mechanics, Inc., Bethel, CT, 1986, p.17-22.

72. Dayal V., Iyer V., Kinra V. K. Ultrasonic Evaluation of Microcracks in Composites. Proceeding of the Seventh International Conference on Fracture (ICF7), New York, Society for Experimental Mechanics, Inc., Bethel, CT, 1989, p. 3291-3300.
73. El Bouazzaoui R. Caractérisation de l'endommagement anisotrope par métrologie ultrasonore. Application à un matériau composite industriel : le 2D Carbone-SiC. Th : Mécanique : Bordeaux 1 : 1994, 153 p., n°1085.
74. Barret C. Endommagement induit par des fissures ellipsoïdales d'orientation multiples dans des matériaux composites à matrice céramique. Th : Mécanique : Bordeaux 1 : 1999, 92 p., n°2145 bis.
75. Barret C., Baste S. Induced damage by ellipsoidal cracks in an anisotropic medium. International Journal of Solids and Structures, 1999, vol.36, p. 3709-3729.
76. Baste S., El Bouazzaoui R. An experimental investigation of stiffness reduction and cracks geometry in unidirectional brittle matrix composite. Journal of Composite Materials, 1996, vol. 30, issue 3, p. 282-308.
77. Baste S., Aristégui C. Induced anisotropy and crack systems orientations of a ceramic matrix composite under off-principal axis loading. Mechanics of Materials, 1998, vol. 29, p. 19-41.
78. Sih G.C., Chen E.P. Cracks in composite materials. A compilation of stress solutions for composite systems with cracks. Mechanics of Fracture volume 6, edited by Georges C. Sih, Martinus Nijhoff publishers, 1981.
79. Guillaumat L., Lamon J. Multi-fissuration de composites SiC/SiC. Microstructure, comportements thermomécaniques et modélisation des composites céramique-céramique à fibres. Revue des Composites et des matériaux Avancées, éditée par J.L. Chermant et G. Fantozzi, HERMES, 1993, vol.3, p. 159-171.
80. Lin M., Kumar A., Qing X., Beard J.S., Russell S.S., Walker L.J. Monitoring the integrity of filament wound structures using built-in sensor networks. Proceedings of SPIE on Smart Structures and Material Systems, mars 2003.
81. Zellouf D., Goyette J., Massicotte D., Bose T.K. Ultrasonic inspection of composite hydrogen reservoir using frequency diversity techniques. Ultrasonics, 2001, vol. 39, p. 203-209.
82. Sakharov V.E., Kuznetsov S.A., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G. Liquid level sensor using ultrasonic Lamb waves. Ultrasonics, 2003, vol. 41, p. 319-322.

83. Murayama R., Makiyama S., Kodama M., Taniguchi Y. Development of an ultrasonic inspection robot using an electromagnetic acoustic transducer for a Lamb wave and an SH-plate wave. *Ultrasonics*, 2004, vol. 42, p. 825-829.
84. Harris G.J. Rayleigh wave propagation in curved waveguide. *Wave Motion*, 2002, vol. 36, p. 425-441.
85. Towfighi S., Kundu T., Ehsani M. Elastic wave propagation in circumferential direction in anisotropic cylindrical curved plates. *Journal of Applied Mechanics*, 2002, vol. 69, p. 283-291.
86. Wilcox P., Castaings M., Monkhouse R., Cawley P., Lowe M. An example of the use of interdigital PVDF transducers to generate and receive a high order Lamb wave mode in a pipe. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 1997, vol. 16, p. 919-926.
87. Poncelet O., Gérard A., Deschamps M., Guran A., Belinskiy B., Dauer J., Überall H. Acoustic excitation of Scholte-Stoneley and Lamb waves on a reinforced cylindrical shell. *Journal of Computational Acoustics*, 2001, vol. 9, issue 4, p. 1485-1497.
88. Pavlakovic B., Lowe M. User's Manual Disperse, a system for generating dispersion curves, Version 2.0.16B. Copyright B. Pavlakovic and M. Lowe, July 2003, 209 p.
89. Osmont D., Dupont M. Damage and damaging impact monitoring by PZT sensors-based HUMS. *Smart Structures and Materials*, 2000, vol. 3986, p. 85-92.
90. Alleyne N.D., Cawley P. The interaction of Lamb waves with defects. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and frequency control*, 1992, vol. 39, issue 3, p. 381-397.
91. Guo N., Cawley P. The interaction of Lamb waves with delaminations in composite laminates. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, vol. 94, issue 4, p. 2240-2246.
92. Guo N., Cawley P. Lamb wave reflection for quick nondestructive evaluation of large composite laminates. *Materials Evaluation.*, 1994, p. 404-411.
93. Lowe M. Characteristics of the reflection of lamb waves from defects in plates and pipes. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 1998, vol. 17.
94. Lowe M., Alleyne D., Cawley P. Mode conversion of guided waves by defects in pipes. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 1997, vol. 16, p. 1261-1268.
95. Kundu T., Potel C., De Belleval J.F. Importance of the near Lamb mode imaging of multilayered composite plates. *Ultrasonics*, 2001, vol. 39, p. 283-290.

96. Lenoir O., Izbicki J.L., Rousseau M., Coulouvat F. Subwavelength ultrasonic measurement of a very thin fluid layer thickness in a trilayer. *Ultrasonics*, 1997, vol. 35, p. 509-515.
97. Coulouvat F., Rousseau M., Lenoir O., Izbicki J.L. Lamb-type waves in a symmetric solid-fluid-solid trilayer. *Acta Acustica*, 1998, vol. 84, p. 12-20.
98. Maslov K., Kundu T. Selection of Lamb modes for detecting internal defects in composite laminates. *Ultrasonics*, 1997, vol. 35, p. 141-150.

Suivi par ondes guidées de l'état de santé de réservoirs composites

Le contrôle de santé de structures comme les réservoirs cryogéniques embarqués dans les véhicules à rentrée atmosphérique est une nécessité pour les industries de l'aérospatiale. Ces structures, généralement composées d'un liner métallique et d'un bobinage composite à base de carbone, doivent garder de bonnes performances durant leur vie malgré les sévères sollicitations de charge, d'humidité et de températures qu'elles subissent au cours des vols. L'objectif de cette étude est de mettre au point une méthode ultrasonore de contrôle non destructif pour suivre l'état de santé de réservoirs. La démarche s'attache à respecter les contraintes industrielles qui imposent un accès unilatéral, une absence de contact et des procédures rapides de contrôle. Dans cette optique, des ondes guidées ont été générées et détectées à l'aide de capteurs ultrasonores à couplage par air disposés d'un même côté.

Dans un premier temps, la sensibilité de ces ondes au taux d'humidité et à la microfissuration engendrée par des chocs thermiques, a été étudiée pour des plaques composites à fibre de carbone et matrice époxyde. Ensuite, il a été montré que des ondes guidées pouvaient expérimentalement être générées et détectées dans les parois d'un réservoir EADS. La bonne connaissance des propriétés viscoélastiques des matériaux constitutifs permet de modéliser avec précision la propagation des ondes guidées dans cette structure complexe. Ces modélisations ont servi alors à évaluer la sensibilité des ondes aux éventuels endommagements de la partie composite du réservoir. De plus, des simulations par éléments finis ont été faites pour évaluer la possibilité de détecter un décollement entre le liner et la partie composite du réservoir.

Mots clés

Ondes guidées, réservoir composite, santé matière, humidité, fissuration.

Guided waves health monitoring of composite tanks.

Structural health monitoring is of great importance for aerospace industries, in particular for cryogenic tanks boarded in atmospheric re-entering vehicles. These structures, usually made of a metallic liner plus a composite filament winding, must keep good performances in spite of high levels of humidity or severe thermo-mechanical solicitations they sustain during their service. The aim of this study is to set-up a non-destructive ultrasonic method to follow the health of such tanks. To satisfy industrial constraints, i.e. single-access, contact-less and fast processing, this study is based on the generation and detection of guided waves using ultrasonic air-coupled transducers, placed at one side of tested specimen.

First, the sensitivity of guided waves to the moisture content and to micro-cracking produced by low temperature cycles, is investigated for carbon-epoxy plates. Then, guided waves have been successfully generated and detected in a tank supplied by EADS. The good knowledge of the viscoelastic properties of each constitutive element of the tank allows the propagation of guided modes in this complex structure to be correctly simulated. These simulations are used to evaluate the sensitivity of guided modes to possible damages of the composite filament winding. Moreover, finite element simulations have been run to define the possibility of detecting local disbands between the liner and the composite.

Key words

Guided waves, composite tank, material health, moisture, micro-cracking.