

**UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE**  
**Faculté des sciences appliquées**  
**Département de génie mécanique**

**ÉTUDE DE L'ENDOMMAGEMENT DES MATÉRIAUX COMPOSITES  
SOLLICITÉS THERMIQUEMENT VIA L'ACOUSTO-ULTRASONIQUE**

**Mémoire de maîtrise es sciences appliquées**  
**Spécialité : génie mécanique**

**Ibrahima Sow**

**Sherbrooke (Québec), CANADA**

**août 1996**

## SOMMAIRE

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés à cause de leurs propriétés mécaniques spécifiques très élevées comparativement à celles des métaux. Cependant la difficulté de pouvoir prédire la durée de vie des composites freine leurs applications dans les technologies de pointe comme l'aérospatial ou l'aéronautique.

Parmi les méthodes de contrôle non-destructif (CND) connues, l'Acousto-Ultrasonique (AU) a montré un certain potentiel à détecter la présence d'endommagements et à suivre l'état de santé du matériau composite en évaluant ses propriétés mécaniques. Le but de ce travail est donc, dans un premier temps, de corréliser les propriétés mécaniques aux mesures AU pour valider l'AU comme technique d'évaluation non-destructive fiable et susceptible d'interroger les propriétés élastiques des composites et dans un deuxième temps d'utiliser cette approche pour identifier et caractériser l'effet d'une dégradation thermique sur les propriétés mécaniques de plaques composites avec fibres de carbone et matrice époxyde.

Du point de vue expérimental, il s'agit d'analyser les signaux AU émis par les plaques composites vierges et endommagées par un traitement numérique pour en déduire les paramètres temporels (RMS, Énergie, ...) et pour évaluer les modules  $E_1$  et  $E_2$ , les rigidités longitudinale et transversale du composite. Par la suite, les résultats des éprouvettes de traction découpées de ces mêmes plaques sont comparés aux résultats de l'analyse AU. L'examen micrographique complémentaire effectué sur les plaques en fin de test vient apporter des précisions sur les causes de la dégradation des propriétés mesurées.

Les résultats de l'étude montrent que l'AU est une technique fiable pour évaluer les propriétés mécaniques des composites. De plus, il est démontré que l'AU est un outil viable pour détecter et quantifier la variation de l'état structural du matériau dégradé thermiquement et ce, en déterminant les propriétés élastiques de façon non-destructive avec accès à une seule face.

## REMERCIEMENTS

*" Nous n'avons de savoir que ce que Tu nous as appris!*

*C'est Toi Le Savant et c'est Toi Le Sage. "*

Ô Toi L'Unique, vers Toi s'élève ma reconnaissance pour tous les bienfaits que Tu m'as accordés. Loué sois-Tu pour Ta Miséricorde. Ô Seigneur, acceptes mes bonnes oeuvres et pardonne moi.

J'aimerais remercier très chaleureusement mon directeur de recherche, Monsieur Clermont Roy. Sa disponibilité à tout moment, son attention, son aide, son soutien moral et ses encouragements m'ont été d'un grand secours tout au long de ce travail de recherche. Mes remerciements vont aussi à son épouse, Madame Zita pour la chaleur avec laquelle elle entoure constamment mon épouse et moi-même.

Je remercie également mon codirecteur de recherche, Monsieur Ahmed Maslouhi pour son aide, ses conseils et le support financier dont il m'a fait bénéficié.

J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur Magella Tremblay pour les précieux conseils qu'il ne cesse de me prodiguer ainsi que Madame Sylvie Béland pour son aide et l'Institut de Recherche Aérospatiale à Ottawa pour la fabrication des plaques de cette étude.

À mes frères et soeurs de l'AMUS, particulièrement Monsieur Nabil Bouzoubâa et Monsieur Mounir El Mokhtari, je dis un grand merci. Que le Tout Puissant agrée leurs oeuvres!

Je ne saurais finir sans remercier tous les membres de ma famille à qui je dois tant. Que Dieu vous récompense car Lui seul sait tout ce que vous avez fait pour moi. J'aimerais remercier tout particulièrement ma mère Madame Dieneba Sissoko, mon père Monsieur Abdoulaye Sow et mon épouse Madame Monique Best: jamais je ne pourrais remercier assez Dieu de vous avoir comme parents et comme épouse. Que Dieu vous aide dans toutes vos entreprises et vous accorde une place de choix dans les jardins du Paradis.

# TABLE DES MATIÈRES

Sommaire	i
Remerciements	ii
Table des matières	iii
Listes des figures	v
Listes des photos	vii
Listes des tableaux	viii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : LA REVUE DE LITTÉRATURE	3
Introduction	3
1.1 - Méthodes de contrôle non-destructif	3
1.1.1 - Réflexion	3
1.1.2 - Méthode de transmission	4
1.1.3 - Méthode goniométrique	5
1.1.4 - Test de résonance	6
1.1.5 - Acousto-ultrasonique	7
1.2 - Aspects théoriques	7
1.2.1 - Rappel sur les ondes	8
1.2.2 - Propagation des ondes et détermination des constantes élastiques	8
CHAPITRE 2 : L'ACOUSTO-ULTRASONIQUE	15
Introduction	15
2.1 - Les signaux AU	15
2.1.1 - Principe et définition	15
2.1.2 - Capteurs et liquide couplant	16
2.1.3 - Le signal AU	17
2.2 - Bilan sur l'AU	18
2.2.1 - Techniques du facteur d'onde de contrainte	18
2.2.2 - Nouvelles tendances	19



<b>CHAPITRE 3 : LA CARACTÉRISATION DE L'ENDOMMAGEMENT VIA L'ACOUSTO-ULTRASONIQUE</b>	<b>21</b>
Introduction	21
3.1 - Matériaux de l'étude	21
3.2 - Équipements et procédures pour l'acquisition des signaux AU	23
3.3 - Traitement des signaux AU	28
3.4 - Détermination des propriétés élastiques par les vitesses de propagation	34
<b>CHAPITRE 4 : LA CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES PLAQUES</b>	<b>46</b>
Introduction	46
4.1 - Les éprouvettes	46
4.2 - Équipements et procédures	49
4.3 - Résultats des essais mécaniques	51
<b>CHAPITRE 5 : ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>61</b>
Introduction	61
5.1 - Corrélation des mesures AU aux propriétés mécaniques	61
5.2 - Analyse microscopique	68
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>78</b>

## LISTE DES FIGURES

1.1	Illustration d'un système de mesure par réflexion	4
1.2	Appareillage pour la technique de transmission	5
1.3	Schéma d'ensemble d'un banc par immersion pour la méthode goniométrique	6
1.4	Instrumentation pour le test de résonance	6
1.5	Montage pour la méthode de l'acousto-ultrasonique	7
1.6	Ondes longitudinales (a) et ondes transversales (b)	8
1.7	Système d'axes utilisé	10
1.8	Variation théorique des vitesses en fonction de la direction des fibres	14
2.1	Configurations des capteurs	17
2.2	Ondes longitudinales de 1 <sup>er</sup> , 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> ordre	17
3.1	Technique de mesure par l'acousto-ultrasonique	25
3.2	Le signal d'entrée	26
3.3	Mesure des paramètres de rigidité ( $C_{11}$ , $C_{22}$ , $C_{12}$ ) sur la plaque	27
3.4	Signal type avant et après l'exposition pour la direction 45°	28
3.5	Spectre de fréquence type avant et après l'exposition pour la direction 45°	29
3.6	RMS, XMAX et ENGY pour plaques vierge (A0) et dégradées (A3 et A4) à 0°	31
3.7	RMS, XMAX et ENGY pour plaques vierge (A0) et dégradées (A3 et A4) à 45°	32
3.8	RMS, XMAX et ENGY pour plaques vierge (A0) et dégradées (A3 et A4) à 90°	33
3.9	Mesure du premier pic selon Kautz [36]	35
3.10	Exemple de calcul des vitesses de propagation à 0°, 45° et 90°	36
3.11	Vitesse de propagation des plaques composites selon la direction 0°	38
3.12	Vitesse de propagation des plaques composites selon la direction 45°	39
3.13	Vitesse de propagation des plaques composites selon la direction 90°	40
3.14	Comparaison des vitesses de propagation théoriques et selon l'AU	41
3.15	Module d'élasticité des plaques composites dans la direction parallèle aux fibres	43
3.16	Module d'élasticité des plaques composites dans la direction perpendiculaire aux fibres	44
4.1	Exemple de découpe de deux éprouvettes	47
4.2	Courbe contrainte déformation, éprouvettes 24 plis vierge (a) dégradée à 260°C (b), sens parallèle aux fibres	54
4.3	Courbe contrainte déformation, éprouvettes 24 plis vierge (a) dégradée à 260°C (b), sens perpendiculaire aux fibres	55
4.4	Modules d'élasticité $E_1$ obtenus par essais mécaniques	57
4.5	Modules d'élasticité $E_2$ obtenus par essais mécaniques	58
5.1	Comparaison des vitesses selon l'AU, les tests mécaniques et Tsai, plaque vierge A0	62

5.2	Comparaison des vitesses selon l'AU, les tests mécaniques et Tsai, plaque vierge A1	63
5.3	Comparaison des vitesses selon l'AU, les tests mécaniques et Tsai, plaque vierge A2	63
5.4	Comparaison des modules d'élasticité $E_1$ pour les plaques testées	65
5.5	Comparaison des modules d'élasticité $E_2$ pour les plaques testées	66
5.6	Découpe des échantillons pour l'examen micrographique	69

## LISTE DES PHOTOS

3.1	Vue d'ensemble du montage expérimental pour l'AU	23
3.2	Le Data 6000A, le générateur d'ondes et le filtre amplificateur	24
3.3	Les transducteurs, la plaque composite et le liquide couplant	24
4.1	L'éprouvette de traction vue de face	48
4.2	L'éprouvette de traction vue de côté	48
4.3	Vue d'ensemble du montage expérimental pour les essais mécaniques	49
4.4	L'éprouvette et l'extensomètre dans les mâchoires de la machine	50
4.5	Éprouvette dans le sens longitudinal après le test de traction	51
4.6	Éprouvette dans le sens longitudinal après le test de traction	52
4.7	Éprouvette dans le sens transversal après le test de traction	53
5.1	Micro-fissurations dans la matrice	70
5.2	Propagation d'une fissure dans l'interface fibre-matrice	71
5.3	Propagation de l'endommagement entre les couches	71
5.4	Déchaussement autour d'une fibre, vue de face	72
5.5	Déchaussement autour d'une fibre, vue inclinée	72
5.6	Décollement de la résine autour d'une fibre	73
5.7	Pont de résine entre deux plis	74
5.8	Délaminage entre les couches	74
5.9	Délaminage	75

## LISTE DES TABLEAUX

1.1	Relations entre les vitesses et la matrice de rigidité [22,23]	11
1.2	Quelques propriétés du carbone/époxyde AS4/3502	13
3.1	Propriétés des fibres, de la résine et du composite de l'étude	21
3.2	Liste des différentes plaques et leurs caractéristiques	22
3.3	Liste des paramètres extraits des signaux AU	30
3.4	Paramètre DÉLAI pour la plaque vierge de 24 plis	35
3.5	Tableau des vitesses moyennes de propagation en km/s par AU	37
3.6	Éléments de la matrice de rigidité en GPa par AU pour les plaques vierges	42
3.7	Modules d'élasticité $E_1$ , $E_2$ et $G_{12}$ en GPa pour les plaques composites testées	42
4.1	Modules d'élasticité $E_1$ et $E_2$ en GPa obtenus par test mécanique	56
4.2	Éléments de la matrice de rigidité en GPa pour les plaques testées mécaniquement	59
4.3	Vitesses de propagation équivalentes en km/s	59
5.1	Comparaison des vitesses AU aux vitesses dérivées des modules $E_1$ et $E_2$	62

## INTRODUCTION

Depuis les âges les plus reculés, l'homme tente de perfectionner son environnement immédiat afin de se faciliter la vie de tous les jours. Les exemples marquants qui viennent à l'esprit sont la lumière, la télévision, l'automobile et l'avion. Ce progrès de la science et de la technologie ne s'est pas arrêté pour autant. De nouveaux matériaux sont maintenant utilisés ainsi que de nouvelles techniques et, c'est dans ce cadre précis qu'entre en jeu les matériaux composites. Nombreux sont les laboratoires à travers le monde tel celui de l'université de Washington à Seattle et de beaucoup d'autres universités, où l'étude de ces matériaux prédomine.

Évidemment, ce n'est pas sans raison que des millions de dollars sont investis chaque année dans l'étude des composites. En effet, comme l'indique leur nom, "les matériaux composites" évoquent des matériaux différents des matériaux homogènes habituels. C'est un assemblage constitué de deux ou plusieurs éléments qui permet d'obtenir certaines propriétés sachant que, pris tout seul, les éléments de base ne peuvent y aboutir. Plus couramment, un matériau composite désigne des arrangements de fibres noyées dans une matrice. Le résultat est donc un matériau fortement hétérogène et anisotrope qui promet d'être aussi efficace, sinon plus, que toute autre structure connue et qui promet aussi d'étendre la zone de performance de la température à des régions inatteignables avant.

Même si le concept d'utilisation de plusieurs matériaux combinés en un seul est vieux ( torchis: mélange de terre et de paille; béton armé), le secteur industriel dans lequel les applications ne cessent d'augmenter est celui de l'aéronautique et de l'aérospatiale. Là où des propriétés spécifiques sont requises, les composites sont à même de remplir leurs rôles de bien meilleure façon que les autres matériaux. La question qui se pose alors est la suivante: les composites peuvent-ils vraiment satisfaire les exigences d'un domaine de pointe comme l'aéronautique et l'aérospatiale?

En fait c'est la difficulté de pouvoir prédire la durée de vie des composites carbone/époxyde qui freine leurs applications dans des technologies de pointe. Ainsi, il est impératif, pour promouvoir une plus grande utilisation de ces matériaux, d'aller aussi loin que possible dans l'analyse de l'effet des défauts générés en cours de fabrication ou en service. Pour ce faire, il faut dans un premier temps caractériser l'endommagement soumis à des sollicitations mécaniques,

thermiques et environnementales. Hélas, dès cette étape, les problèmes se multiplient et le besoin de méthodes de contrôle non-destructif (CND) des défauts engendrés dans les structures composites est pressant car l'utilisation optimale de ces matériaux ne se fera qu'avec le développement de telles méthodes. La plupart du temps, les méthodes d'évaluation sont capables de détecter des défauts qui sont plus ou moins néfastes à la structure selon leur taille, leur emplacement et leur proximité. Cependant, c'est souvent un effet combiné des défauts qui affecte le composite. Il serait donc intéressant de pouvoir diagnostiquer le composite.

Pour ce faire, une possibilité serait d'évaluer cet état par les propriétés intrinsèques du matériau et leurs effets respectifs sur les propriétés physiques plutôt que d'essayer de détecter les défauts.

De nombreuses recherches dans le domaine du contrôle non-destructif semble indiquer que l'AU peut caractériser avec succès l'état structural des matériaux composites. Cependant, comme il a été dit plus haut, la plupart des techniques d'analyse utilisées ne cherchent pas l'effet de l'endommagement mais plutôt à détecter les défauts dans le matériau. Ainsi, l'objectif principal de ce travail sera de vérifier que l'AU peut évaluer l'endommagement dû à une dégradation thermique d'un composite graphite/époxyde. Pour ce faire, après avoir validé l'AU comme méthode fiable de caractérisation, l'effet de la dégradation sera examinée sur les propriétés mécaniques en évaluant les vitesses de propagation des signaux AU pour un unidirectionnel vierge puis pour un unidirectionnel dégradé.

Au chapitre 1, une revue de littérature sera présentée pour justifier le choix de l'AU comme technique de CND. Par ailleurs, la théorie permettant de faire la corrélation entre les propriétés mécaniques et les mesures AU sera abordée. Le chapitre 2 présente la technique de l'acousto-ultrasonique en profondeur; les principes de la technique y sont exposés ainsi que les facteurs qui l'influencent. De plus, les travaux qui ont utilisé l'AU sont cités afin d'en dégager les avantages et les limites. Le chapitre suivant traite de l'identification de l'endommagement par la technique de l'acousto-ultrasonique. Les procédures expérimentales y sont décrites et les résultats de la technique sont présentés. Au chapitre 4, les résultats des essais mécaniques de traction sur les plaques composites de cette étude sont présentés pour être comparés, analysés et corrélés aux résultats des mesures AU qui sont présentés au chapitre 5. Enfin, les principales conclusions et recommandations de ce travail seront exposées.

# CHAPITRE 1

## LA REVUE DE LA LITTÉRATURE

### Introduction

Ce premier chapitre présente les résultats de la recherche bibliographique qui ont conduit au choix de la technique de l'acousto-ultrasonique comme méthode de contrôle non-destructif pour ce travail de recherche. Il présente aussi la théorie derrière les principes et équations qui seront utilisés pour évaluer l'effet de la dégradation thermique sur les propriétés mécaniques du matériau.

### 1.1-Méthodes de contrôle non-destructif

Les méthodes de CND par les ultrasons sont nombreuses; cette section abordera les plus marquantes [1,2,3,4].

Comme l'implique leur nom, les méthodes ultrasonores utilisent des ondes acoustiques de très hautes fréquences. Elles sont largement utilisées en recherche et dans le domaine de l'industrie à cause de leur flexibilité et de leur efficacité. Elles sont capables de détecter et de quantifier les défauts internes d'un matériau ainsi que de mesurer ses propriétés élastiques.

Les plus populaires des techniques ultrasonores sont: la réflexion (pulse-écho), la transmission, la méthode goniométrique et le test de résonance.

L'acousto-ultrasonique, une autre technique assez récente sera aussi abordée.

#### 1.1.1-Réflexion

Comme l'indique le nom, il s'agit de récupérer, à partir du même transducteur, les signaux de retour (échos) obtenus par réflexion des défauts. La figure 1.1 présente une illustration du type de montage utilisée.

De ce fait, il est possible de déterminer pour un matériau composite fibreux l'emplacement, la taille et la profondeur de défauts structuraux et d'endommagement en service par comparaison à des standards. Le délaminage, les inclusions, les vides et les fissures sont détectables par cette technique.



Un exemple de l'emploi de cette méthode se retrouve dans les travaux de Kawashima, Watanabe, Fujii et Gomi [5] qui ont pu déterminer les constantes élastiques pour des composites Aluminium/Aluminium en calculant les vitesses de propagation des ondes. Suivant une même approche, Shinohara et Seo [6] ont aussi déterminé les constantes élastiques pour un composite plomb/étain eutectique.

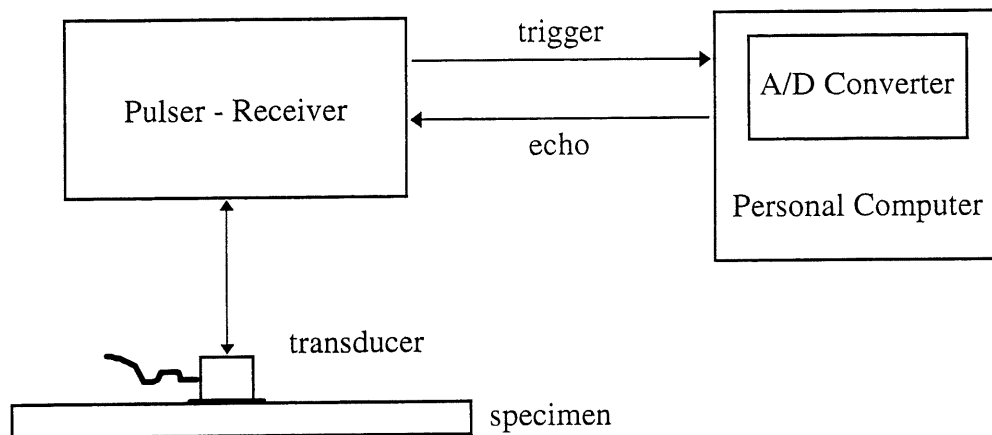


Figure 1.1 - Illustration d'un système de mesure par réflexion [5]

### 1.1.2-Méthode de transmission

Les mesures d'amplitude du signal sont faites à partir de deux transducteurs placés de part et d'autre de l'échantillon, lorsque l'onde voyage à travers la partie à évaluer. Puisque l'atténuation est assez grande à cause notamment de l'absorption de l'onde par la matrice, il peut arriver que l'onde de retour soit supprimée dans le cas de la méthode de réflexion; ce problème est résolu par la méthode de transmission car l'onde ne traverse qu'une seule fois l'échantillon. La figure 1.2 montre un montage de ce type de méthode. Les exemples d'application de cette méthode à la mesure de vitesses des ondes de propagation dans le matériau et à l'évaluation des propriétés mécaniques sont nombreuses et variés [7,8,9]. Cette technique a donc déjà été utilisée pour évaluer l'effet des vides sur la résistance et la durabilité des composites en mesurant l'atténuation. Pour finir, il faut rappeler que dans la plupart des travaux de recherche qui utilise

la technique de transmission, une attention particulière est faite pour diminuer l'atténuation en utilisant des fréquences plus basses.

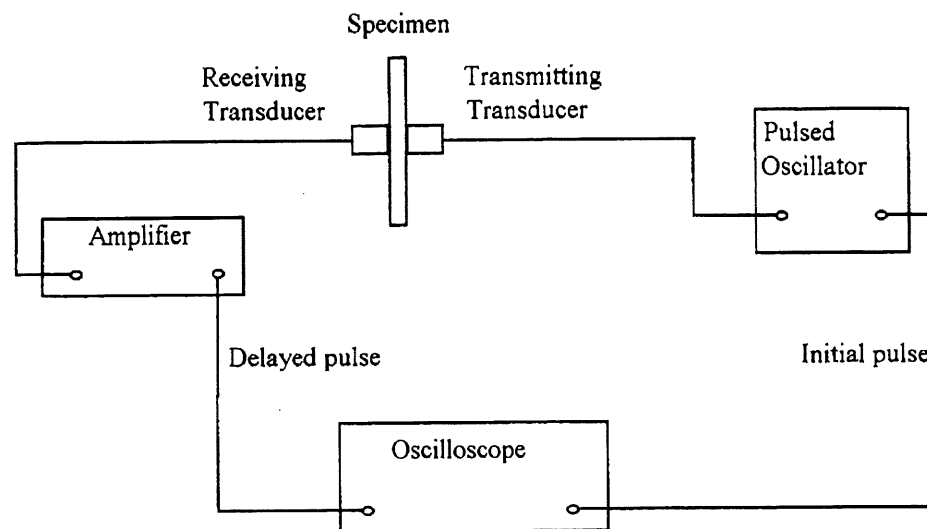


Figure 1.2 - Appareillage pour la technique de transmission [7]

### 1.1.3 - Méthode goniométrique

La figure 1.3, montre un schéma d'ensemble d'un banc par immersion utilisant la méthode goniométrique. Le principe s'apparente à celui de la méthode de transmission. L'éprouvette imperméabilisée, est plongée dans une cuve contenant un certain liquide coupleur et peut être orientée suivant différents angles par rapport au faisceau acoustique émis. La température de l'eau doit être maintenue constante, ce qui est très important pour la précision des résultats. En effet, Keyvani [10] montre dans ses travaux que la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans l'eau s'écrit comme une fonction linéaire de la température. Il est donc ensuite assez facile d'effectuer des calculs d'optimisation puis d'évaluer les différentes constantes d'élasticité du matériau par les formules développées comme en démontrent les références [11,12,13].

Cependant, il reste qu'un inconvénient majeur de cette méthode réside dans la difficulté que l'on rencontre pour effectuer des mesures dans le plan d'épaisseur des éprouvettes, lorsque l'épaisseur de l'éprouvette est faible. D'autre part, il faut savoir que certains matériaux absorbent rapidement de l'eau et que pour en tenir compte l'éprouvette testée est imperméabilisée; il va s'en dire que les résultats s'en trouvent biaisés.

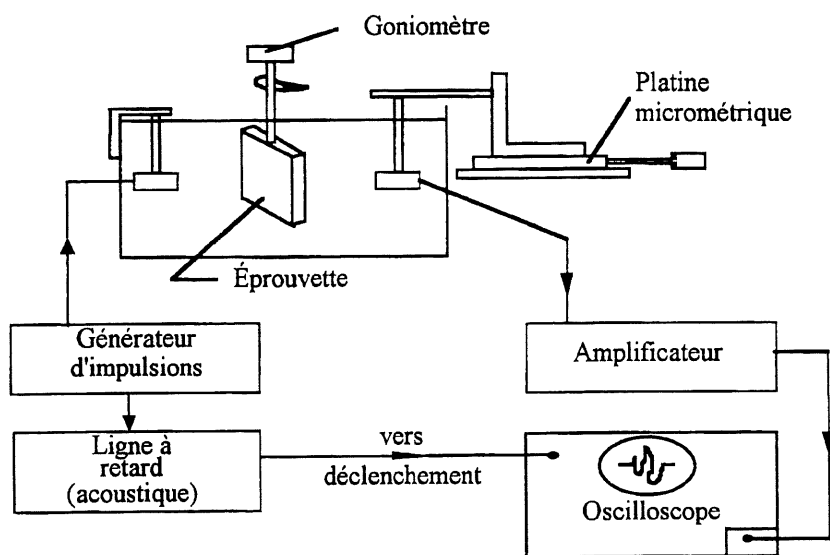


Figure 1.3 - Schéma d'ensemble d'un banc par immersion pour la méthode goniométrique

#### 1.1.4 - Test de résonance

Dans cette technique, un transducteur est utilisé pour induire un mode de vibration dans l'élément à analyser, pendant qu'un autre transducteur, souvent optique est utilisé pour balayer la surface, tel qu'illustré à la figure 1.4. A partir des dimensions, de la densité et de la fréquence de résonance de l'échantillon [14] les constantes élastiques peuvent être évaluées.

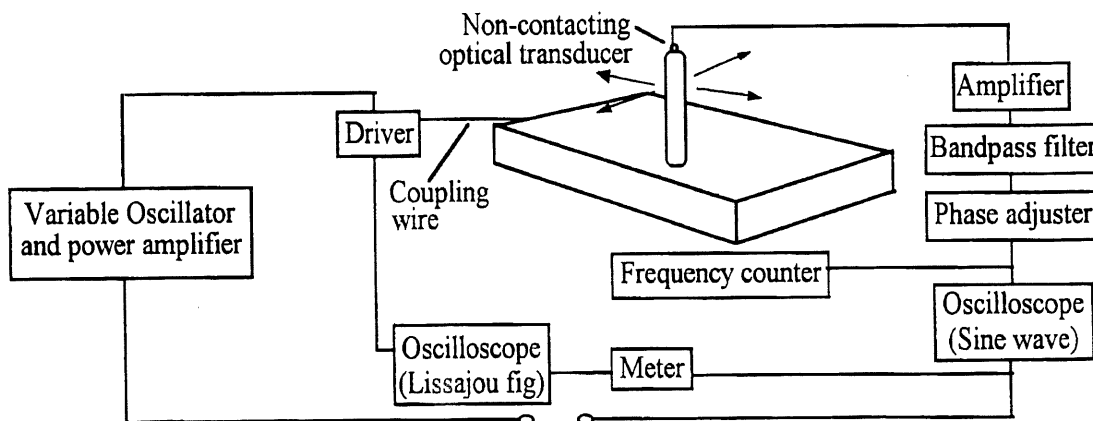


Figure 1.4 - Instrumentation pour le test de résonance [14]

### 1.1.5 - Acousto-ultrasonique

Cette méthode plutôt récente, utilise des impulsions ultrasoniques répétitives qui sont transmises dans le matériau par un transducteur. Un autre transducteur reçoit le signal de retour à une certaine distance. Comme l'indique son nom c'est une technique intimement liée à l'émission acoustique puisque l'acousto-ultrasonique est équivalente à faire de la simulation de l'émission acoustique avec des sources ultrasonores. C'est une méthode de plus en plus utilisée car dans bien des cas elle complète les autres méthodes non destructives en ce qui a trait à la caractérisation par acousto-ultrasonique.

Ainsi, par cette technique, des informations sur l'état de santé de l'échantillon analysé peuvent être déterminées à partir des mesures de vitesse d'onde, de facteur d'onde de contrainte SWF (Stress Wave Factor) [15,16,17,18].

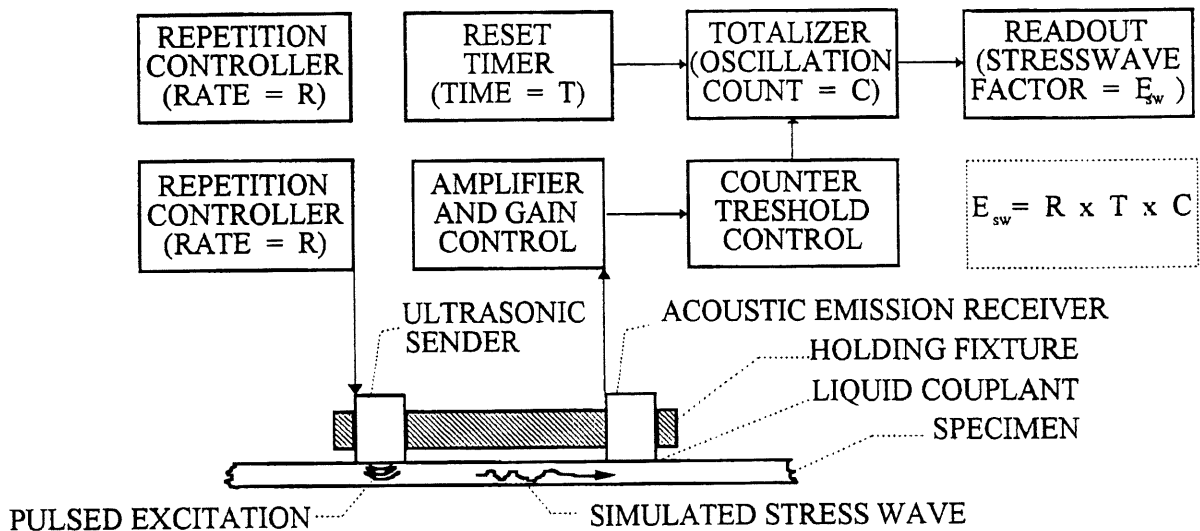


Figure 1.5 - Montage pour la méthode de l'acousto-ultrasonique [16]

### 1.2 - Aspects théoriques

Puisque toutes les méthodes brièvement illustrées ci-haut reposent sur la propagation des ondes dans le matériau, il est approprié de rappeler certaines notions de base pour justifier le calcul des vitesses ce qui est nécessaire pour déterminer les constantes élastiques d'un matériau.

### 1.2.1 - Rappel sur les ondes

Il existe deux types d'ondes fondamentales: les ondes longitudinales et les ondes transversales. Ces ondes vont différer suivant leur direction de propagation et leur polarisation. L'onde longitudinale est alors celle qui est caractérisée par une polarisation dans la direction de propagation et l'onde transversale ou onde de cisaillement est celle dont la polarisation est perpendiculaire à la direction de propagation [19,20]. Ces deux types d'ondes sont montrés à la figure 1.6.

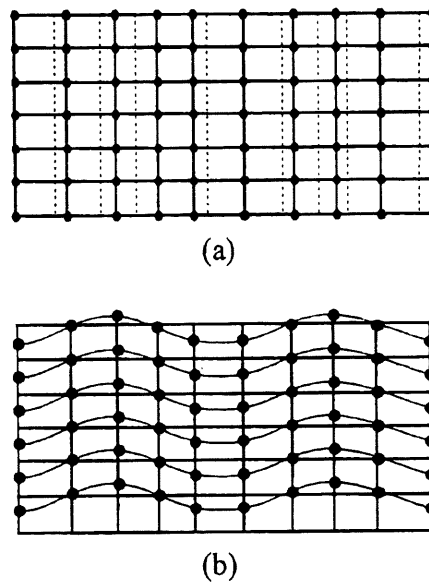


Figure 1.6- Ondes longitudinales (a) et ondes transversales (b) [19]

### 1.2.2 - Propagation des ondes et détermination des constantes élastiques

Cette partie qui traite des propriétés fondamentales de la propagation des ondes provient des travaux de Bucur [9], Vinh [13], Dieulesaint et Royer [20], Chevalier [21], Ross et collaborateur [22], Curutcharry [23], pour ne citer que ces derniers.

La loi d'élasticité d'un matériau constitue le point de départ:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (1)$$

$$\epsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (2)$$

avec  $U_i$  étant les composantes de déplacement,  $\sigma_{ij}$  les composantes du tenseur de contrainte,  $\epsilon_{kl}$  les déformations et  $C_{ijkl}$  la matrice de rigidité.

L'équation du mouvement qui résulte de la loi fondamentale de la dynamique s'écrit en fonction de  $\rho$  la densité comme suit:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} \quad (3)$$

En combinant ces trois premières équations, le résultat final est le suivant:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \frac{\partial U_k}{\partial l} \quad (4)$$

et en substituant (4) dans (3) il est possible d'écrire:

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial x_l \partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} \quad (5)$$

qui représente un système de trois équations différentielles du second ordre généralisé.

Une forme de solution de cette équation, une onde plane progressive avec une pulsation  $w$ , une vitesse de phase  $v$  et un cosinus directeur de la direction de propagation  $p_i$  s'écrit:

$$U_k = A_k e^{j\omega(t - \frac{p_i x_i}{v})} \quad (6)$$

Pour simplifier la suite des calculs, une nouvelle donnée est introduite, à savoir  $\Gamma_{ik}$  appelée tenseur de Christoffel:

$$\Gamma_{ik} = C_{ijkl} p_l p_j \quad (7)$$

Ainsi, poursuivant le développement des équations, il vient donc que:

$$\Gamma_{ik} - \rho v^2 \delta_{ik} = 0 \quad (8)$$

où  $\delta_{ik}$  est suivant la notation de Kronecker [20]. Trouver une solution consiste alors à rendre nul le déterminant qui s'écrit comme indiqué à l'équation (9).

$$\begin{vmatrix} (\Gamma_{11} - \rho v^2) & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{12} & (\Gamma_{22} - \rho v^2) & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & (\Gamma_{33} - \rho v^2) \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

La résolution de l'équation (9) permet d'évaluer la matrice de rigidité du matériau en calculant les vitesses d'onde avec une valeur connue de sa masse spécifique [9,13,20,21,22,23]. Pour réaliser ce calcul, il suffit de considérer les divers cas de direction de propagation comme l'explique Vinh [13], Ross et collaborateurs [22] ainsi que Curutcharry [23], en partant du cas simple d'une onde longitudinale. À chaque vitesse correspond un vecteur propre définissant la direction du déplacement de l'onde ou polarisation de l'onde. Le modèle théorique décrit ci-haut a été structuré dans un programme numérique qui permet le calcul des composantes de la vitesse en fonction de l'orientation des fibres. Le tableau 1.1 donne les divers cas de solution des vitesses suivant chaque mode de propagation possible pour un matériau orthotrope et selon le système d'axes de référence de la figure 1.7.

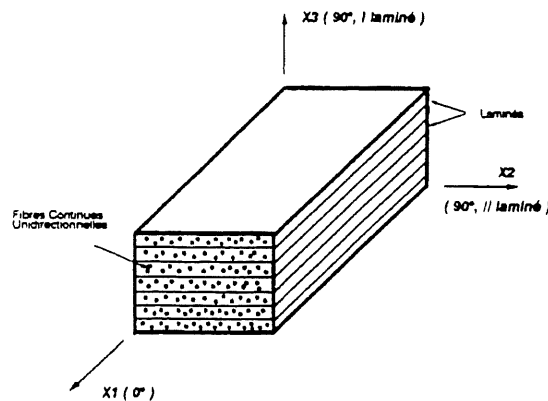


Figure 7 - Système d'axes utilisé

Cos. direct	Dir. de la particule	Type d'onde	Relation Vitesse-Rigidité
$p_1=0$	$x_1$	Long.	$\rho v^2=C_{11}$
$p_2=0$	$x_2$	Trans.	$\rho v^2=C_{66}$
$p_3=0$	$x_3$	Trans.	$\rho v^2=C_{55}$
$p_1=0$	$x_1$	Trans.	$\rho v^2=C_{66}$
$p_2=1$	$x_2$	Long.	$\rho v^2=C_{22}$
$p_3=0$	$x_3$	Trans.	$\rho v^2=C_{44}$
$p_1=0$	$x_1$	Trans.	$\rho v^2=C_{55}$
$p_2=0$	$x_2$	Trans.	$\rho v^2=C_{44}$
$p_3=1$	$x_3$	Long.	$\rho v^2=C_{33}$
$p_1=0$	$x_1$	Trans.	$\rho v^2=p_2^2 C_{66}+p_3^2 C_{55}$
$p_2 \neq 0$	plan	Q-long	$(p_2^2 C_{22}+p_3^2 C_{44}-\rho v^2)*(p_2^2 C_{44}+$
$p_3 \neq 0$	$x_2-x_3$	QTrans	$p_3^2 C_{33}-\rho v^2)=p_2^2 p_3^2 (C_{13}+C_{44})^2$
$p_2=0$	$x_2$	Trans.	$\rho v^2=p_1^2 C_{66}+p_3^2 C_{44}$
$p_1 \neq 0$	plan	Q-long	$(p_1^2 C_{11}+p_3^2 C_{55}-\rho v^2)*(p_1^2 C_{55}+$
$p_3 \neq 0$	$x_1-x_3$	QTrans	$p_3^2 C_{33}-\rho v^2)=p_1^2 p_3^2 (C_{13}+C_{55})^2$
$p_3=0$	$x_3$	Trans.	$\rho v^2=p_1^2 C_{55}+p_2^2 C_{44}$
$p_1 \neq 0$	plan	Q-long	$(p_1^2 C_{11}+p_2^2 C_{66}-\rho v^2)*(p_1^2 C_{66}+$
$p_2 \neq 0$	$x_1-x_2$	QTrans	$p_2^2 C_{22}-\rho v^2)=p_1^2 p_2^2 (C_{12}+C_{66})^2$

Tableau 1.1 - Relations entre les vitesses et la matrice de rigidité [22,23]



Une fois que tous les éléments de la matrice C sont connus, il ne reste plus qu'à trouver les constantes élastiques en calculant l'inverse de C c'est à dire la matrice de compliance S montrée à l'équation (10).

$$[S] = [C]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{33}}{E_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Les modules d'élasticité du matériau sont notés  $E_{ij}$  et les modules de cisaillement  $G_{ij}$ .  $\rho$  est la densité du matériau et  $\nu$  le coefficient de poisson.

Pour une plaque mince, l'épaisseur dans la direction normale au plan formé par la plaque est négligeable; le matériau composite est considéré bi-dimensionnel (les déformations dans l'épaisseur sont négligeables) et la matrice de rigidité s'écrit:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho V_{11}^2 & A & 0 \\ A & \rho V_{22}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \rho V_{66}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu}{E_1} & 0 \\ \frac{-\nu}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}^{-1} \quad (11)$$

$$\text{avec } A = \sqrt{(C_{11} + C_{66} - 2\rho V_{12}^2)(C_{22} + C_{66} - 2\rho V_{12}^2)} - C_{66}$$

Il faut juste rappeler que  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  et  $C_{22}$  sont calculés à l'aide d'un capteur d'ondes longitudinales et pour  $C_{66}$  un capteur d'ondes de cisaillement.

Ainsi cette relation montre que la mesure expérimentale des vitesses de propagation des ondes permettra de calculer les constantes élastiques du matériau et enfin, l'étude de leur variation en fonction de l'exposition du matériau à un gradient de température. Pour valider le programme, le cas inverse a été considéré pour un composite unidirectionnel carbone/époxyde AS4/3502 dont les propriétés sont définies dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 - Quelques propriétés du carbone/époxyde AS4/3502

Propriétés	Composite
Densité, $\rho$	1.586 g/cm <sup>3</sup>
$C_{11}$	128.2 GPa
$C_{22} = C_{33}$	14.95 GPa
$C_{44}$	3.81 GPa
$C_{55} = C_{66}$	6.73 GPa
$C_{12} = C_{13}$	6.9 GPa
$C_{23} = C_{22} - 2C_{44}$	7.33 GPa

L'application du modèle théorique dans le cas des modes de propagation longitudinale et transversale, donne la variation des vitesses de phase en fonction de la direction des fibres comme illustré à la figure 1.8. Ce résultat montre bien que les ondes longitudinales se propagent plus rapidement que celles transversales. La vitesse des ondes est bel et bien favorisée par la direction des fibres où la valeur est d'environ 8991 m/s. Ces valeurs de vitesse seront prises comme référence afin de vérifier les mesures expérimentales des vitesses par la technique de l'AU.

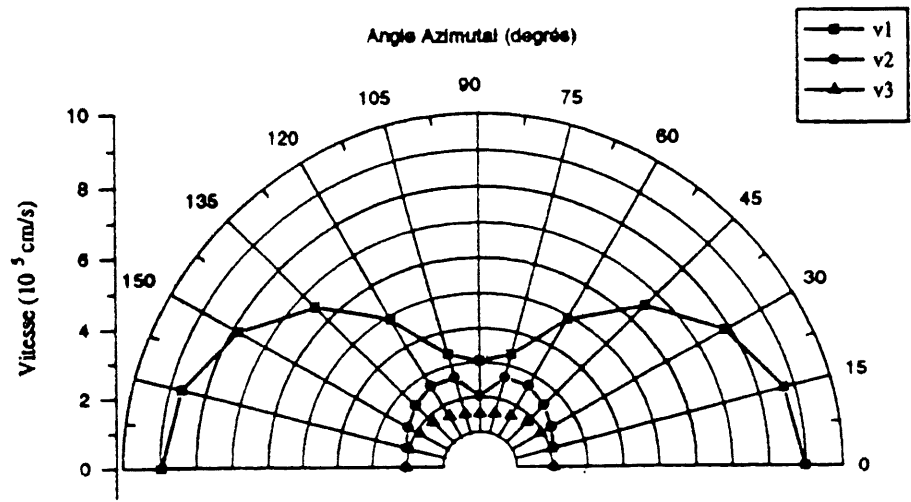


Figure 1.8 - Variation théorique des vitesses en fonction de la direction des fibres

## CHAPITRE 2

# L'ACOUSTO-ULTRASONIQUE

### **Introduction**

L'acousto-ultrasonique est la méthode que l'on se propose d'utiliser puisqu'elle répond bien aux exigences posées dans la problématique, à savoir trouver une méthode nondestructive qui ne se contentera pas de trouver les défauts mais qui s'attardera sur l'effet de ces défauts sur la variation des propriétés mécaniques. Introduite en 1982 par A. Vary, cette technique est basée sur la combinaison de deux techniques, l'émission acoustique et les ultrasons. Elle se compare bien aux principales méthodes de CND et dans certains cas, de plus en plus nombreux d'ailleurs, elle les supplante [2]. Dans cette partie, l'acousto-ultrasonique sera discutée un peu plus en détail.

### **2.1 - Les signaux AU**

Cette section présente les aspects principaux des signaux AU. L'objectif visé ici est de bien comprendre les phénomènes physiques derrière la propagation des signaux AU afin de faciliter leur analyse et leur interprétation.

#### **2.1.1 - Principe et définition**

Aussi appelé la méthode du facteur d'onde de contrainte, l'acousto-ultrasonique utilise la propagation des ondes pour déceler et quantifier l'état d'endommagement du matériau. Comme il a été mentionné plus haut, c'est la combinaison de deux techniques, à savoir l'émission acoustique et les ultrasons.

Le terme émission acoustique désigne l'onde élastique libérée de façon spontanée à l'intérieur d'un matériau par le dégagement brutal d'énergie due à des modifications locales du milieu (micro-fissuration, glissement aux joints de grains, mouvement des dislocations...). L'événement d'émission acoustique génère alors une onde mécanique dans le matériau. Cette onde est détectée à la surface par un capteur qui la transforme en un signal d'émission acoustique. Ce phénomène est donc repris dans la technique de l'acousto-ultrasonique: un capteur ultrasonique transforme une série d'impulsions électriques en ondes mécaniques

ultrasonores qui sont injectées dans la structure. En se déplaçant de l'émetteur au récepteur ces ondes interagissent avec la structure et le signal acousto-ultrasonique contient à la sortie de riches informations sur toutes les caractéristiques de la structure.

Ainsi, l'AU diffère des méthodes ultrasoniques usuelles surtout dans la nature du signal de réponse. Cette réponse est en fait une superposition de plusieurs ondes résultant de l'interaction du signal original avec la microstructure du matériau.

Les porosités, le délaminage, la décohésion à l'interface fibre-matrice et la richesse de la matrice sont quelques uns des facteurs qui déterminent les propriétés mécaniques et la réponse dynamique d'un matériau fibreux. Ces facteurs, pris séparément ou ensemble, influencent la propagation des ondes et corréle par la même occasion la variation des propriétés mécaniques.

### 2.1.2 - Capteurs et liquide couplant

En général, les capteurs sont placés sur la même face du matériau à tester. Cependant, et c'est un des points qui fait la versatilité de cette méthode, il est possible d'avoir trois autres configurations comme l'indique la figure 2.1. Ainsi, lorsque la distance entre les capteurs est nulle, la configuration est celle de la méthode de réflexion ou celle de transmission.

Il faut ajouter que le capteur et l'émetteur doivent avoir une largeur de bande suffisante pour exciter toutes les fréquences nécessaires pour interroger le matériau. Selon Vary, un capteur de 1 MHz de largeur de bande serait adéquat pour caractériser un composite.

Les capteurs utilisés sont fixés de façon normale à la plaque à l'aide d'un mince film d'un liquide coupleur, la graisse de silicone, en appliquant une pression suffisante pour éliminer les problèmes de réverbération dans le couplant et de rugosités de surface [1].

Le liquide couplant joue un rôle primordial car il a un effet significatif sur l'amplitude du signal détecté. Hashemi [8] montre non seulement l'effet sur l'amplitude du signal de la pression appliquée sur les transducteurs selon le type de couplant utilisé mais aussi l'effet sur l'amplitude du signal de l'épaisseur de couplant pour deux types de couplant. Dans les deux cas, la fréquence utilisé est de 800 kHz et les résultats indiquent que l'optimum est obtenu pour une pression de 2 kPa et une épaisseur de moins de 2 mm pour le liquide couplant. De plus, l'amplitude du signal reçu augmente généralement avec une augmentation de la pression à l'interface transducteur/spécimen ou avec une diminution de l'épaisseur du couplant. Tout ceci

est certainement du au fait que l'uniformité du couplant est accentué et que l'air qui est emprisonné dans le couplant s'échappe lorsque la pression est appliquée.

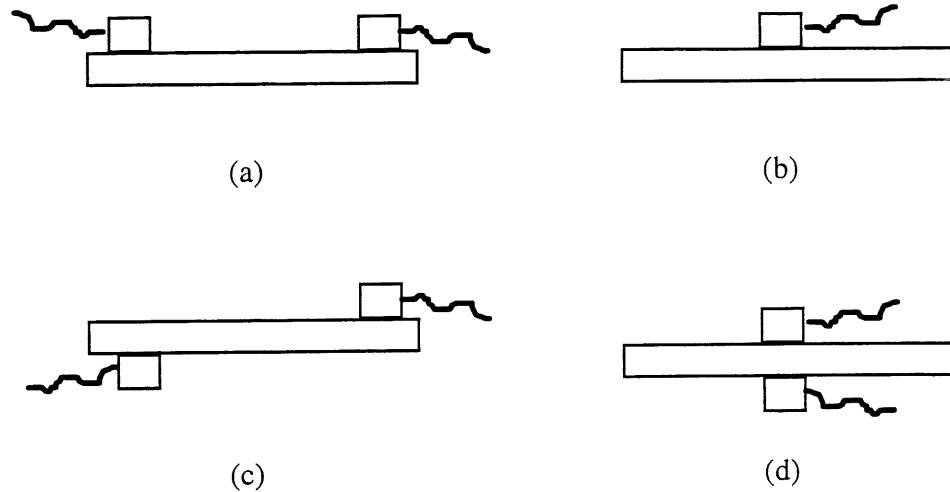


Figure 2.1 - Configurations des capteurs

### 2.1.3 - Le signal AU

Il est intéressant d'aborder cette section pour vérifier dans quelle mesure la réponse AU est représentative du signal original. Le signal AU original est un ensemble de sources ponctuelles distinctes regroupées autour d'un point ou dispersées dans la structure, selon le cas. En supposant que l'émission se fait à partir d'un point, il est possible de suivre la trace du signal jusqu'au récepteur. Comme le montre la figure 2.2, plusieurs ondes arrivent vers le récepteur, certaines plus vite que d'autres. C'est ainsi que la réponse AU consiste en une superposition de plusieurs ondes. Par ailleurs, ces ondes seront atténuées au cours de leur propagation dans la structure mais en se basant sur la figure 2.2, il est impossible d'évaluer le phénomène.

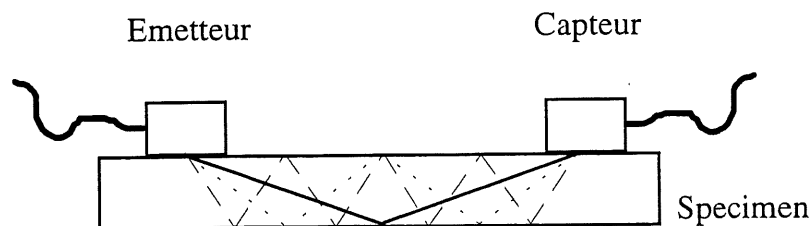


Figure 2.2 - Ondes longitudinales de 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> ordre

Il faut rappeler ici que les angles de réflexion, les vitesses et l'atténuation des ondes sont intimement liées aux modules élastiques du matériau. Ainsi, l'onde finale reçue contiendra des informations particulières de la structure interrogée.

## **2.2 - Bilan sur l'AU**

L'acousto-ultrasonique a en fait été utilisé dès 1977 par Vary pour caractériser un composite carbone/époxyde [24]. C'est à ce moment-là qu'il a défini la notion de facteur d'onde de contraintes SWF (Stress Wave Factor). Dans cette partie, un bilan des travaux sur l'acousto-ultrasonique sera effectué en passant du SWF à tous les autres types de paramètres.

### **2.2.1 - Techniques du facteur d'onde de contrainte**

Vary a utilisé le SWF dès 1977 pour faire une corrélation entre ce paramètre et plusieurs autres qui caractérisent le matériau, à savoir la résistance du matériau et l'orientation des fibres entre autre. À l'aide de ce même facteur, l'emplacement de la rupture a aussi pu être prédit. Au début, cette technique nouvelle était connue sous le nom d'acoustique-ultrasonique. En 1981, Vary [16] utilise le terme acousto-ultrasonique et définit le SWF comme:

$$SWF = R.T.C$$

où R est le taux de répétition des impulsions d'entrée (repetition Rate), T est le temps de détente ou d'atténuation (reset Time) et C, le nombre d'oscillations du signal de sortie au dessus d'un seuil pré-choisi (ringdown Count).

Le facteur d'onde de contrainte est en fait une mesure de l'énergie dans le signal acousto-ultrasonique. D'autres définitions du facteur d'onde de contrainte ont été exposées par Vary comme l'amplitude crête de l'enveloppe énergétique du signal.

En 1983, l'effet de certains paramètres d'un CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) sur la vitesse de propagation et la quantité d'énergie transmise par les signaux AU pour différentes fréquences est étudié [25]. À partir de ces travaux, il a été démontré que la présence de défauts dans le composite se traduit par une atténuation de certaines fréquences du signal. Cependant, pour ces travaux de Ono et De Spain, le défaut était la porosité et leur analyse ne s'applique pas tout à fait au cas d'une dégradation thermique. D'autres résultats importants sont tout de même ressortis de cette étude en confirmation de ce que Vary stipulait comme le fait qu'un signal

acousto-ultrasonique était le résultat d'une superposition d'une multitude de formes d'ondes, superposition riche en information mais complexe à analyser.

En 1984, c'est au tour de Govada, Henneke et Talreja d'utiliser l'AU pour analyser les endommagements par fatigue des composites [26]. Les paramètres choisis tel que les moments du spectre de fréquence ont démontré une bonne corrélation avec le comportement contrainte déformation des spécimens.

Les applications de l'acousto-ultrasonique pour faire du contrôle non-destructif sont alors de plus en plus nombreuses et variées. Kautz [27] se sert de la technique de l'AU pour vérifier la résistance la résistance d'un FWC (Filament Wound Composite). Puis Phani et Bose [28] se servent de l'AU et démontrent que le facteur d'onde de contrainte est un bon indicateur de la diminution de résistance dû à un vieillissement hydrothermique alors que Lorenzo et Hahn [29] montre que les paramètres tels que l'amplitude crête et l'énergie du signal sont plus sensibles à l'accumulation de l'endommagement que le SWF. En 1987, Moon, Jerina et Hahn [17] étudient la propagation des ondes acousto-ultrasoniques dans les composites et trouvent que les ondes sont des ondes de Lamb et que leur vitesse de propagation change selon la direction des fibres. Un peu plus tard, la même équipe observe que l'amplitude crête ne révèle pas toute l'information contenue dans le signal sur l'endommagement. Ils préfèrent donc à ce paramètre l'énergie du signal qui donne plus d'informations [30].

Ainsi, à l'aide du facteur d'onde de contrainte, plusieurs études ont pu être réalisées. Il faut cependant noter que la définition du SWF n'est pas toujours la même d'une étude à l'autre. En effet, chaque recherche choisit le paramètre qui décrit le mieux le phénomène a observé. C'est ainsi que plusieurs autres paramètres ont été utilisés comme l'énergie, la RMS, l'amplitude crête et les vitesses de propagation des ondes acousto-ultrasoniques.

### 2.2.2- Nouvelles tendances

Comme il a été mentionné plus haut les signaux acousto-ultrasoniques sont très riches en information mais sont aussi très complexes à analyser. De par ce fait il devient évident que le seul facteur d'onde de contrainte ne peut suffire à interpréter les signaux sans négliger une bonne partie du signal. Pour palier à ce problème, des logiciels informatiques couplés à un matériel plus sophistiqué sont utilisés afin d'exploiter le plus possible l'information du signal.



En se servant de l'expertise déjà appliquée à l'analyse des signaux d'émission acoustique, les techniques de reconnaissance de formes sont utilisées avec l'acousto-ultrasonique. En 1988, Kiernan et Duke [31] digitalisent les signaux acousto-ultrasonique à l'aide d'un support informatique et se permettent de faire un traitement du signal. Plusieurs paramètres sont alors extraits du signal dans le domaine fréquentiel et temporel.

Vary revient à la charge avec des articles synthèses [1,32] dans lesquels il traite de la technique de l'acousto-ultrasonique de façon à la redéfinir mais aussi à expliquer les potentialités et limitations de la méthode. Il insiste sur le traitement de l'information par divers moyens comme la reconnaissance de forme.

Les années qui suivent sont représentatives de la nouvelle tendance et nombreuses sont les publications sur l'acousto-ultrasonique qui se servent du traitement du signal pour analyser l'information et permettre de corréler des paramètres issus du signal digitalisé aux propriétés mécaniques. Ceci amène Fecko, Steiner et Gillepsie [33] en 1994, à étudier une nouvelle manière de visualisation des signaux AU alors que Chien et collaborateurs [34] mesurent le TOF (Time Of Flight) des ondes AU qu'ils relient aux propriétés mécaniques.

De cette recherche bibliographique, il est démontré que l'acousto-ultrasonique est une technique puissante pour évaluer l'état de santé du matériau moyennant certaines précautions. C'est une technique qui s'adapte bien au contrôle de la plupart des structures puisqu'elle nécessite l'accès à une seule face du matériau à tester. Par ailleurs, en combinant l'acousto-ultrasonique aux techniques de traitement numérique des signaux, il est possible d'analyser les données à l'aide d'appareils sophistiqués. Ainsi, il reste à utiliser cette technique non pour corréler uniquement les propriétés mécaniques mais surtout d'étudier l'endommagement dans le composite du à une sollicitation thermique

# CHAPITRE 3

## LA CARACTÉRISATION DE L'ENDOMMAGEMENT VIA L'ACOUSTO-ULTRASONIQUE

### Introduction

L'objectif principal de cette étude est l'identification de l'endommagement d'un composite sollicité thermiquement par l'acousto-ultrasonique. Ce chapitre constitue donc une partie essentielle de ce travail. Dans un premier temps la procédure expérimentale employée pour la méthode de l'AU est décrite; dans un deuxième temps, les analyses et le traitement des données numériques seront abordés non seulement pour valider l'AU comme méthode de caractérisation mais aussi comme méthode capable de montrer l'effet d'un endommagement thermique.

### 3.1 - Matériaux de l'étude

Les échantillons de référence de cette étude sont des plaques unidirectionnelles vierges en graphite-époxyde AS4/3501-6, fabriquées selon les normes industrielles au laboratoire de l'I.R.A (Institut de Recherche Aéronautique) à Ottawa. De même les éprouvettes dégradées proviennent de plaques unidirectionnelles du même matériau ayant subi une sollicitation thermique à différentes températures. L'exposition thermique a été effectuée à température constante dans un four "Thermodyne Type 6000 programmable furnace". Une fois que la température désirée est atteinte sur la surface du matériau il faut garder ce dernier dans le four pendant 4 minutes pour permettre au pli du centre d'être à la même température. Les caractéristiques mécaniques pour les fibres, la résine et le composite sont données au tableau 3.1.

Tableau 3.1 - Propriétés des fibres, de la résine et du composite de l'étude

Propriétés	Fibres AS4	Époxyde 3501-6	Composite
Densité, $\rho$	1.8 g/cm <sup>3</sup>	1.27 g/cm <sup>3</sup>	1.6 g/cm <sup>3</sup>
Coeff. de Poisson, $\nu$	---	0.35	0.3
Module en tension, $E_t$	235 GPa	4.3 GPa	148 GPa
Module en flexion, $E_f$	---	---	128 GPa

Le tableau 3.2 donne un aperçu des éprouvettes fabriquées et de leur désignation.

Tableau 3.2 - Liste des différentes plaques et leurs caractéristiques

Types de plaques	Nombres de plis	Dimensions (mm)	Désignation
Vierge	12	304.8 x 304.8 x 1.6	A1
	12	304.8 x 304.8 x 1.6	A2
	24	152.4 x 152.4 x 3.1	A0
Dégradée 244°C	12	152.4 x 152.4 x 1.6	A6
Dégradée 244°C	24	152.4 x 152.4 x 3.2	A3
Dégradée 260°C	12	152.4 x 152.4 x 1.6	A7
Dégradée 260°C	24	152.4 x 152.4 x 3.2	A4

Il faut noter que toutes les plaques ont été systématiquement soumises au contrôle ultrasonore (C-Scan) pour assurer l'absence de défauts de fabrication décelables dans le composite. Notons aussi que pour une plaque donnée son épaisseur peut varier sensiblement dont l'effet n'a pu être évalué.

Pour une meilleure cohérence des résultats AU, l'épaisseur des plaques a été choisie de sorte que:

- 1- la longueur d'onde supérieure à celle-ci lorsque l'on recherche l'effet des défauts dans le composite sur les rigidités ou sur les variations du module d'élasticité des plaques[15]. Ainsi,

$$\frac{\lambda}{d} > 1, \text{ avec } \lambda \text{ la longueur d'onde et } d \text{ l'épaisseur de la plaque.}$$

- 2 - la longueur d'onde ne soit pas du même ordre de grandeur que le diamètre de la fibre pour minimiser les problèmes d'interactions entre l'onde et la fibre [16]. Ainsi,

$$\frac{\lambda}{d'} > 1, \text{ avec } \lambda \text{ la longueur d'onde et } d' \text{ le diamètre de la fibre}$$

En conséquence, l'épaisseur des éprouvettes étudiées correspondaient à des plaques de 24 et de 12 plis.

### 3.2 - Équipements et procédures pour l'acquisition des signaux AU

Le montage expérimental dans son ensemble est montré à la photo 3.1. Ce montage comprend les composantes suivantes:

- un générateur d'impulsions, Data 2020 de Data Précision,
- un transducteur large bande AET FC-500 utilisé comme émetteur,
- un capteur d'émission acoustique, Bruel & Kjaer type 8312, de 0.1-1 MHz de fréquence,
- un filtre amplificateur à large bande , Bruel & Kjaer type 2638,
- un système d'acquisition et de traitement de signal DATA 6000A de Data Précision,
- un module de transfert de fichier Analogic model 681 de Data Précision.

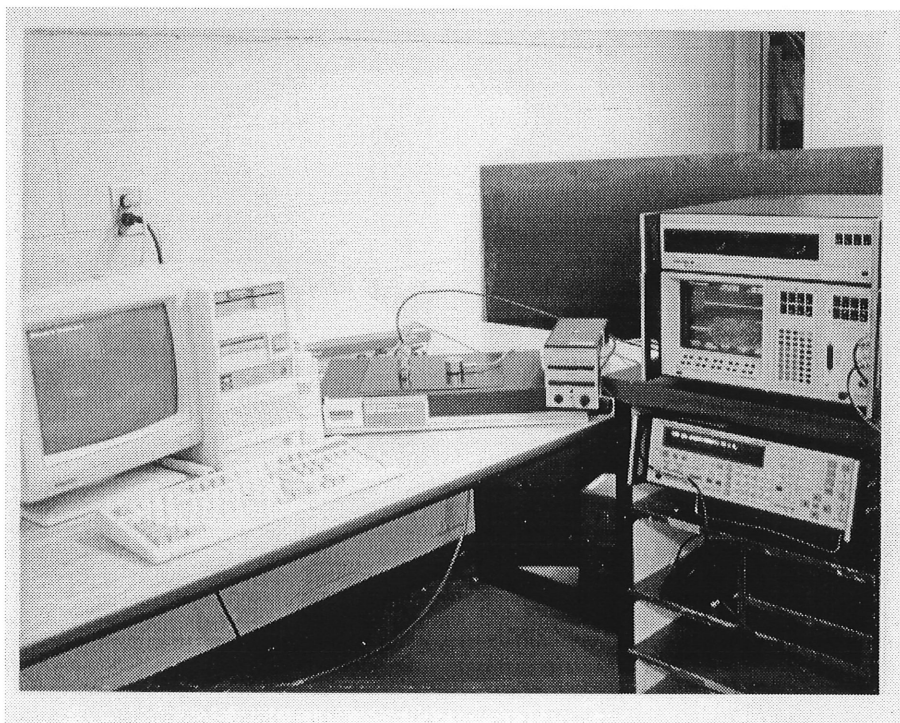


Photo 3.1 - Vue d'ensemble du montage expérimental pour l'AU

Dans la photo 3.2, une vue agrandie, il est possible de distinguer le Data 6000A de Data Precision et au dessus de ce dernier, le module de transfert de fichiers pour stocker sous forme numérique les données. Sur cette même photo, en dessous du Data 6000A, se trouve le générateur de signaux model 2020 et à gauche le filtre amplificateur à large bande. La photo 3.3 nous révèle les transducteurs, la plaque composite et le type de liquide couplant utilisé.

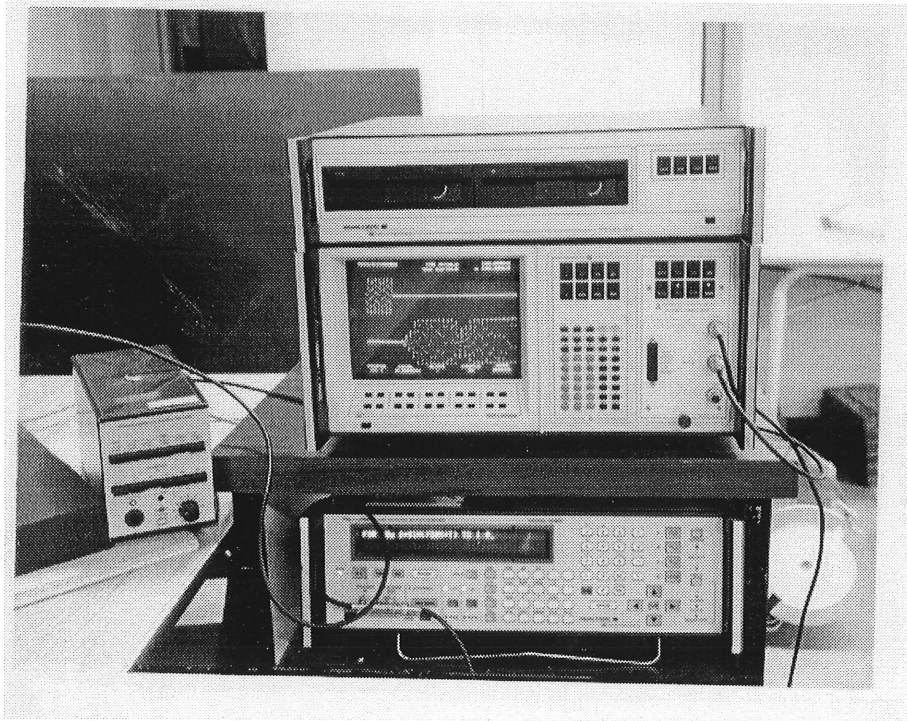


Photo 3.2 - Le Data 6000A, le générateur d'ondes et le filtre amplificateur

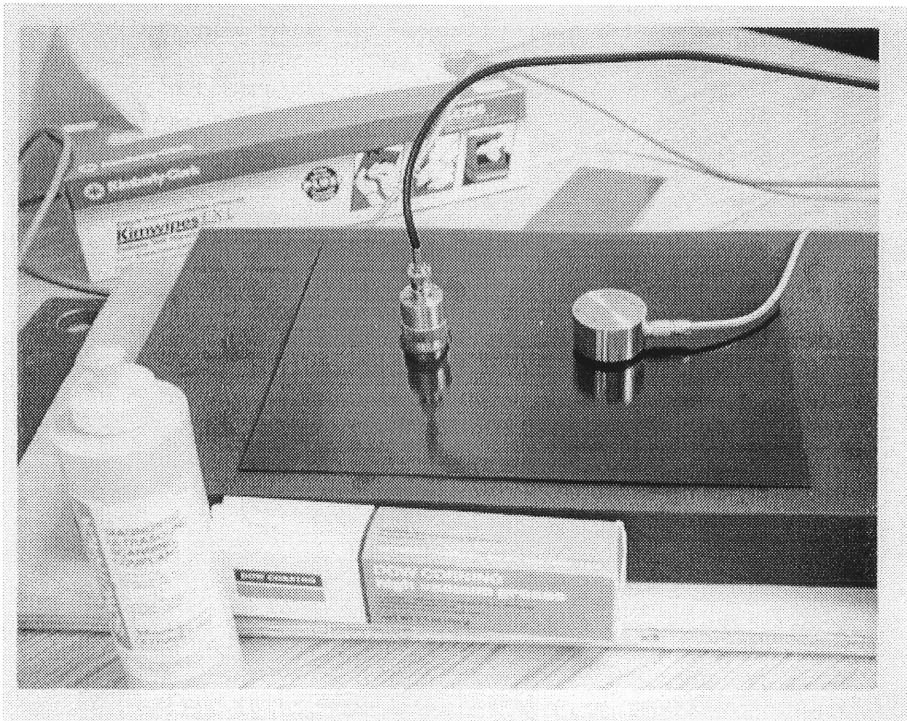


Photo 3.3 - Les transducteurs, la plaque composite et le liquide couplant

La chaîne d'appareillage illustrée à la figure 3.1 a été utilisée pour l'obtention des données AU.

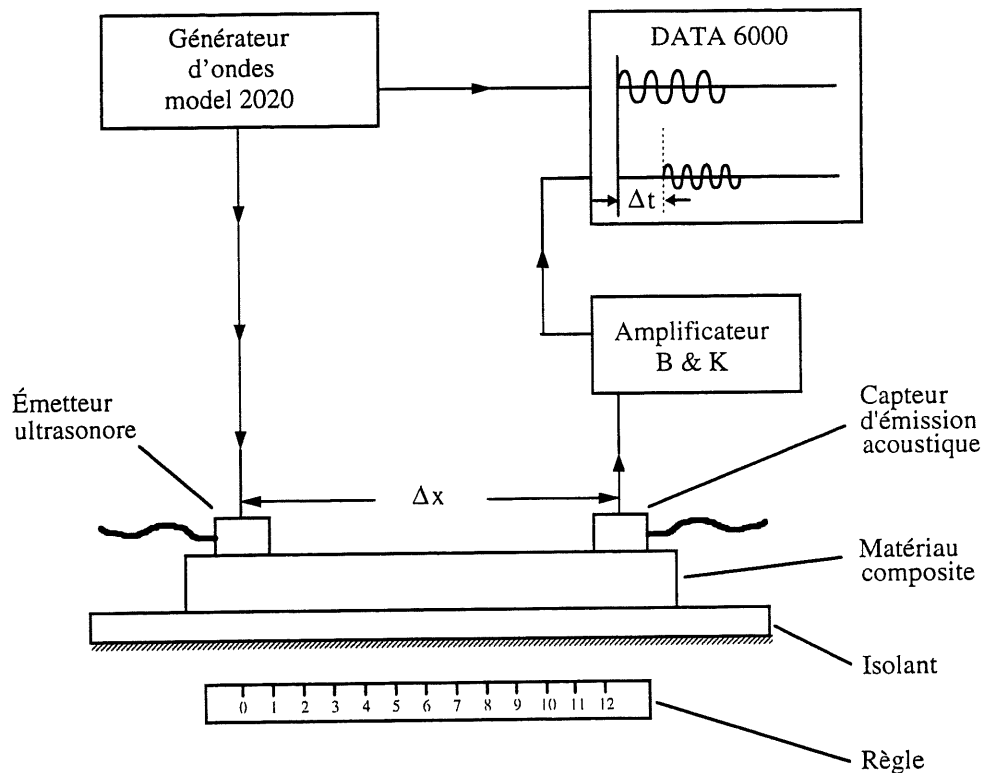


Figure 3.1 - Technique de mesure par l'acousto-ultrasonique

Le signal d'entrée est un train d'ondes sinusoïdales de 2 volts d'amplitude et de 10  $\mu$ s de durée (figure 3.2). Deux sorties sont issues du générateur, une pour exciter le transducteur et l'autre directement envoyée au Data 6000 pour déclencher l'acquisition. Le transducteur a une réponse uniforme au delà de 500 kHz; pour le récepteur le gain maximal se situe à 750 kHz. Le filtre amplificateur est ajusté à 23 dB pour les acquisitions dans le sens des fibres et à 43 dB pour les acquisitions à 45° et 90° par rapport aux fibres. La bande passante du filtre amplificateur est de 100 kHz à 2 MHz. Enfin, la période d'échantillonnage est réglé à 100 ns sur le Data 6000 et le signal numérisé est composé de 1024 points pour une durée totale de 102.4  $\mu$ s.

Étant donné que l'objectif de cette étude est de comparer la réponse acousto-ultrasonique des plaques composites unidirectionnelles vierges aux unidirectionnelles dégradées, il est important

que les conditions de mesures AU demeurent constantes d'une plaque à l'autre. Une calibration assurant des conditions optimales a été effectuée de façon à ne pas introduire de modifications dans les signaux dues à l'appareillage.

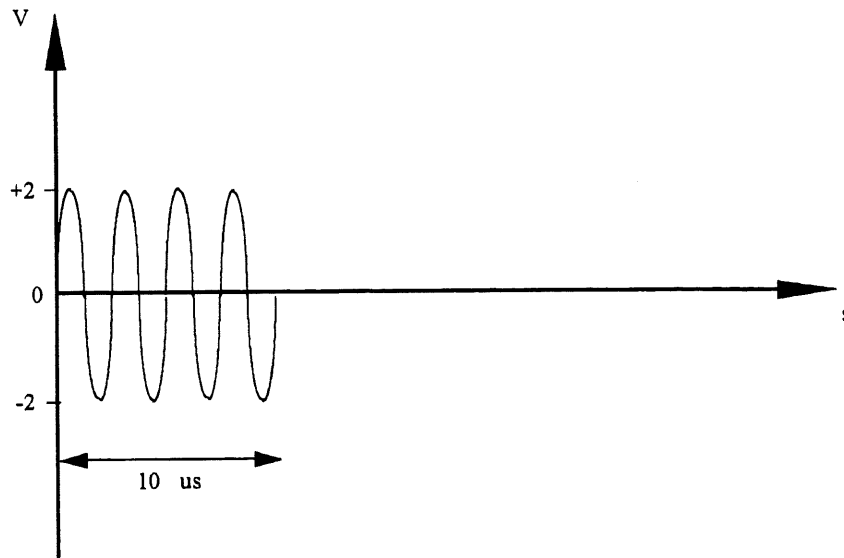


Figure 3.2 - Le signal d'entrée

Après cette étape préliminaire, la surface de l'éprouvette est préparée en traçant à l'aide d'un crayon feutre la direction appropriée ainsi que les différentes positions que prendront les capteurs. Par la suite, l'éprouvette est installée sur une table isolante et une procédure type sera appliquée systématiquement à toutes les éprouvettes:

- appliquer une quantité suffisante de graisse sur les transducteurs et les placer à leur position respective;
- envoyer le train d'ondes suivant la formule décrite à l'équation (12);

$$\text{FOR } 10 \mu\text{s } 2 * \text{SIN}(750\text{K} * \text{T}) \text{ TO } 1 \text{ } 0 \quad (12)$$

- exécuter le programme d'acquisition des données;

```
10 BUF.A2 = COPY(BUF.A2,10,0,0)
20 TRMAX = TRND(MAX(BUF.A2),512,0,0)
30 TRPKPK = TRND(PKPK(BUF.A2),512,0,0)
40 TRENGY = TRND(ENGY(BUF.A2),512,0,0)
50 TRRMS = TRND(RMS(BUF.A2),512,0,0)
60 TRXMAX = TRND(XMAX(BUF.A2),512,0,0)
70 MAGCA2 = FFT(BUF.A2,0,1,0,4)
```

- numériser les signaux et sauvegarder toutes ces informations sur disquettes;
- ôter et nettoyer les transducteurs ainsi que l'éprouvette;
- recommencer la même procédure pour une autre position des transducteurs et ainsi de suite en évitant les bords de la plaque.

Après avoir appliqué ce cheminement quatre fois pour mesurer  $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{12}$  (figure 3.3), il est temps de passer aux traitements des signaux obtenus.

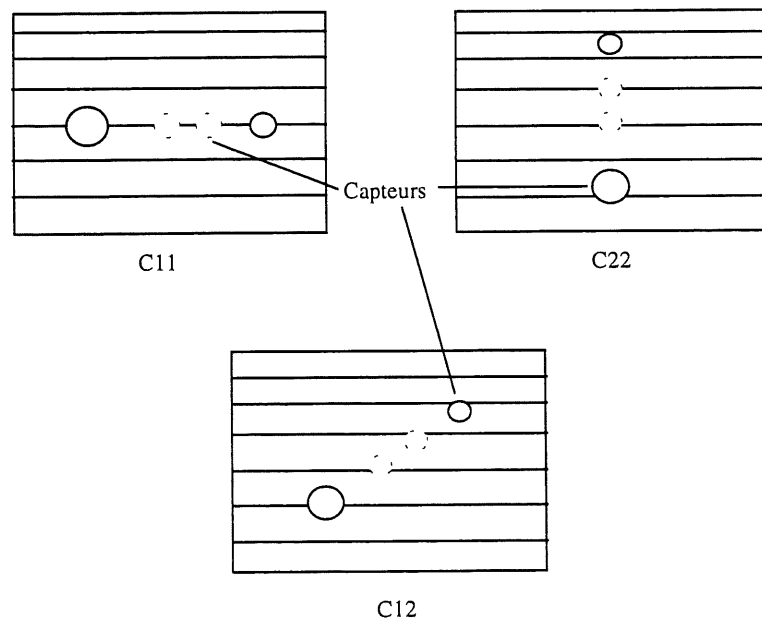
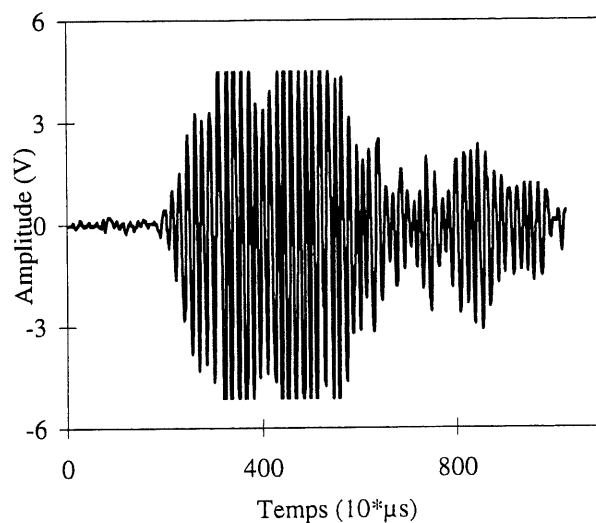


Figure 3.3 - Mesure des paramètres de rigidité ( $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{12}$ ) sur la plaque

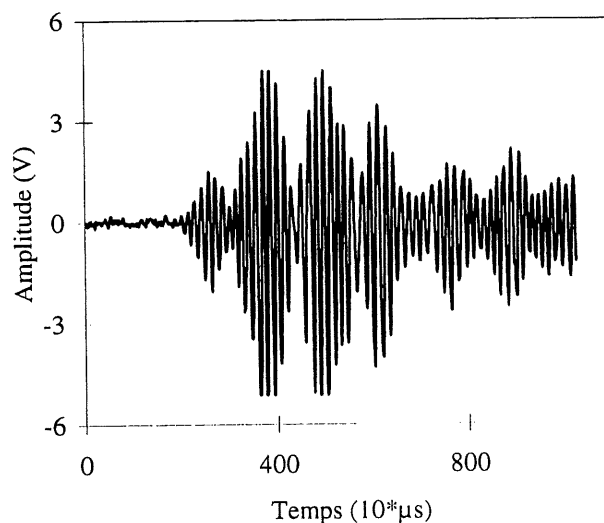


### 3.3 - Traitement des signaux AU

La figure 3.4 compare la forme typique d'un signal AU pour le composite graphite/époxyde avant et après l'exposition thermique représenté dans le domaine temporel. Il apparaît que le contenu du signal est réduit suite à l'exposition thermique du composite.



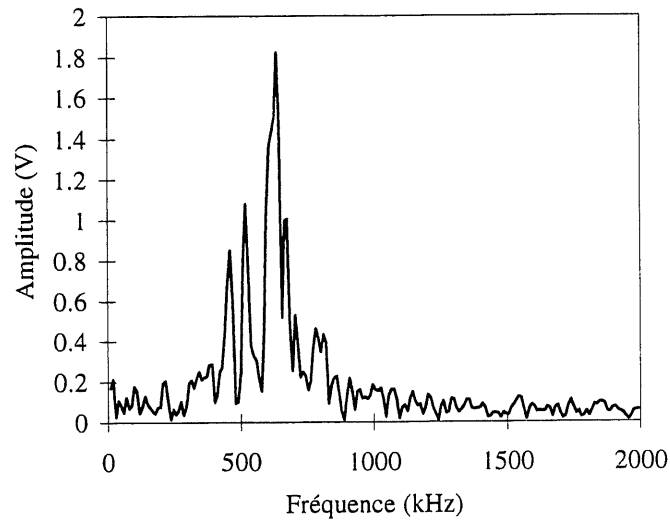
Plaque 24 plis vierge



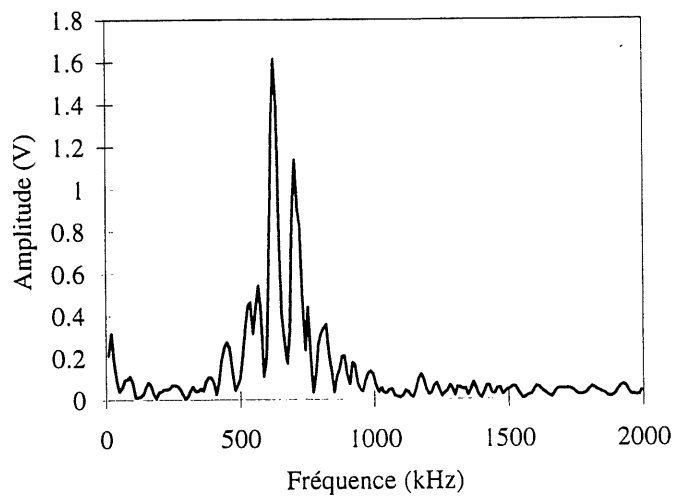
Plaque 24 plis dégradée à 244°C

Figure 3.4 - Signal type avant et après l'exposition pour la direction 45°

Le spectre en fréquence des signaux (figure 3.5) révèle que la plupart des pics se situent autour de 750 kHz. Ceci n'est pas surprenant puisque la fréquence d'excitation choisie est de la même valeur. Toutefois, il est à noter que le plus important pic est à 800 kHz et ce décalage est probablement dû aux différents appareils de la chaîne d'acquisition et au matériau lui-même. Enfin, à partir de la figure 3.5, on remarque que pour la plaque exposée à 244°C, l'amplitude spectrale est atténuée par rapport à celle de la plaque vierge.



Plaque 24 plis vierge



Plaque 24 plis dégradée à 244°C

Figure 3.5 - Spectre de fréquence type avant et après l'exposition pour la direction 45°

La plupart des travaux portant sur l'AU se servent d'un seul paramètre à savoir le facteur d'onde de contrainte (SWF) même si pour déterminer ce paramètre on fait appel au traitement de signal. Dans cette étude, plusieurs paramètres seront extraits du signal comme indiqué dans les travaux de Moon, Jerina et Hahn [30] et de Béland et collaborateurs [35]. Le tableau 3.3 donne la liste des paramètres issus du signal.

La vitesse de propagation de l'onde est le paramètre le plus important de cette étude car elle permet d'évaluer les propriétés mécaniques du composite graphite/époxyde. Pour l'obtenir il faut évaluer le délai temporel ( $\Delta t$  ou DÉLAI) dû à l'interaction du signal original avec le matériau en déterminant l'abscisse du premier pic significatif [36].

À partir du délai et de la distance de séparation des capteurs, la vitesse est évaluée.

Tableau 3.3 - Liste des paramètres extraits des signaux AU

Paramètre	Description
MAX	Amplitude maximum du signal dans le domaine temporel
XMAX	Temps correspondant à l'amplitude maximum
PKPK	Amplitude crête-à-crête du signal dans le domaine temporel
ENGY	Énergie du signal dans le domaine temporel
RMS	Amplitude RMS du signal dans le domaine temporel
DELAI	Temps correspondant au premier pic significatif

En suivant cette méthodologie, il sera possible de comparer les données recueillies pour les éprouvettes vierges et dégradées afin d'évaluer l'effet de la dégradation thermique.

À partir de la base de données constituée, il est possible de faire une analyse temporelle des signaux AU obtenus de chaque plaque. Ainsi, des courbes indiquant la transmissibilité du signal (RMS, ENGY, PKPK, MAX) et des courbes représentant le temps de propagation (DELAI, XMAX) peuvent être tracées. Pour évaluer l'effet de la dégradation sur les résultats, un exemple est donné pour les plaques A0, A3 et A4 pour les paramètres RMS, ENGY et XMAX aux figures 3.6, 3.7 et 3.8 suivantes.

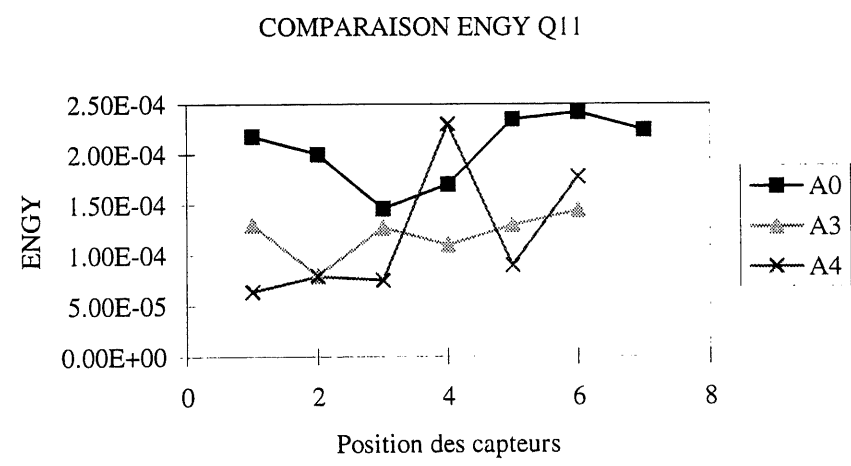
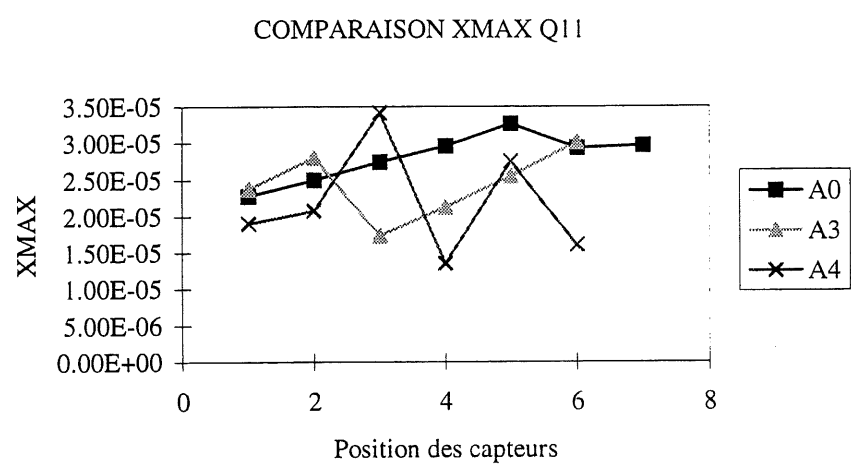
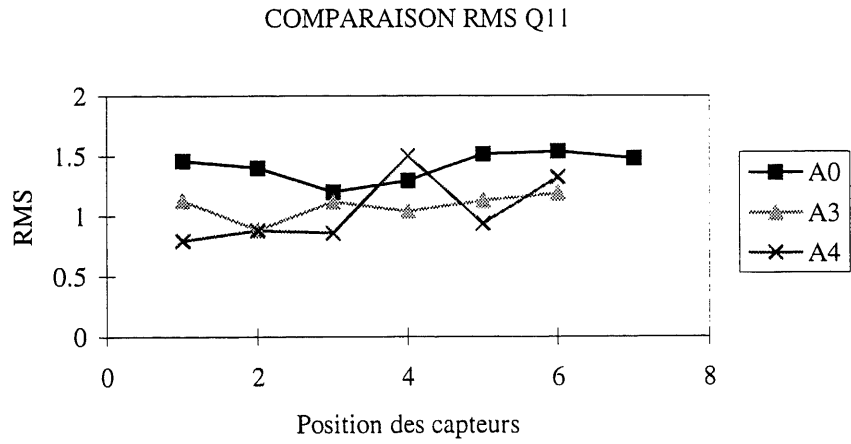


Figure 3.6 - RMS, XMAX et ENGY pour plaques vierge (A0) et dégradées (A3 et A4) à 0°

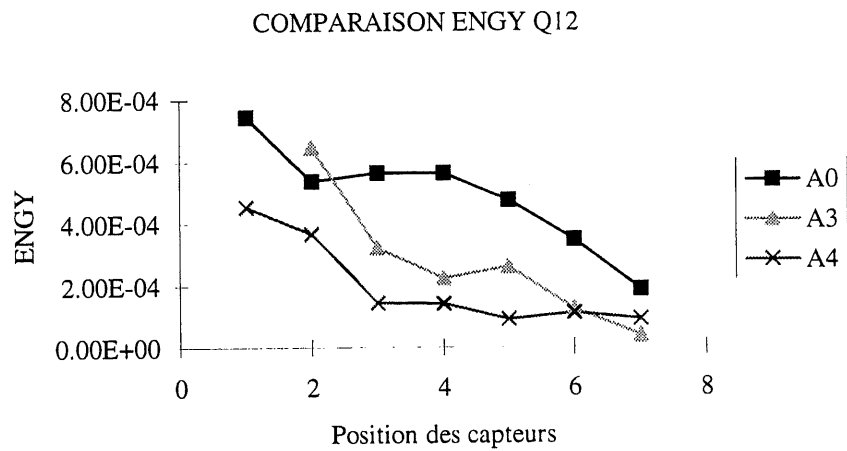
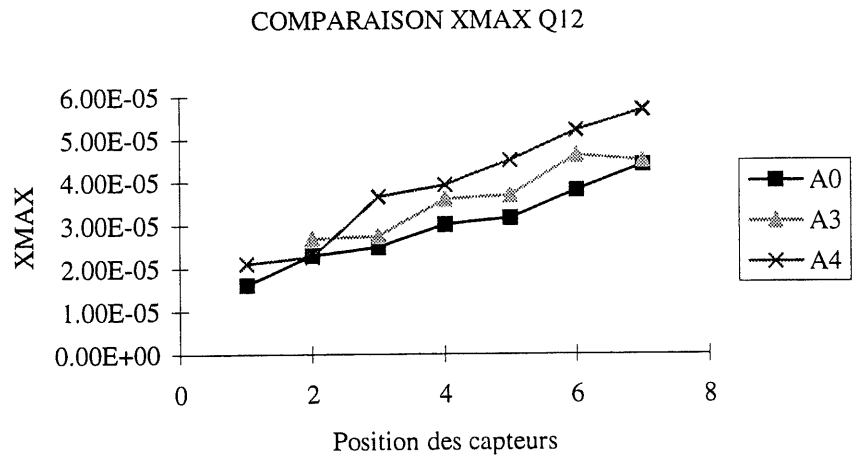
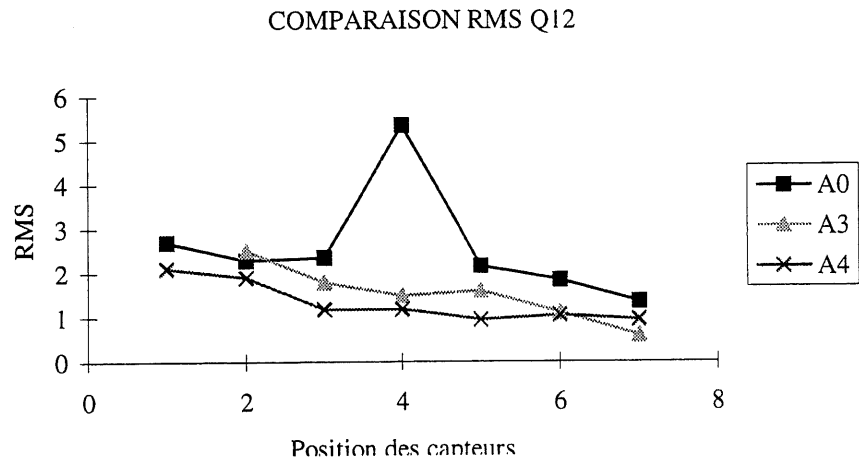


Figure 3.7 - RMS, XMAX et ENGY pour plaques vierge (A0) et dégradées (A3 et A4) à 45°

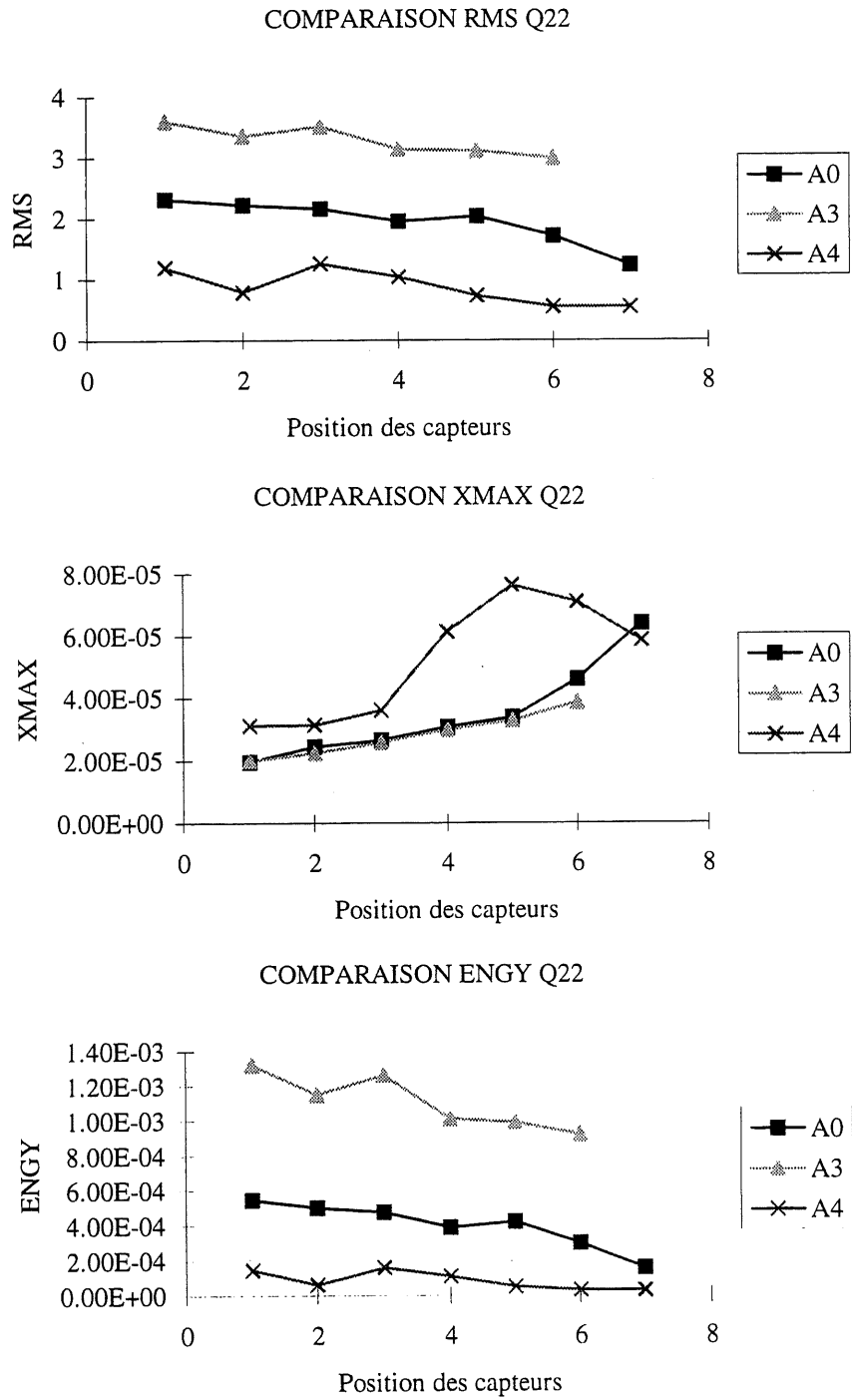


Figure 3.8 - RMS, XMAX et ENGY pour plaques vierge (A0) et dégradées (A3 et A4) à 90°

La variation des différents paramètres utilisés dans ce travail permet de faire une analyse plus raffinée sur les signaux et donc d'évaluer la dégradation thermique du matériau. Ainsi, en se servant des figures 3.6, 3.7 et 3.8 on remarque que les trois paramètres RMS, ENGY et XMAX varient avec l'exposition thermique. Selon la direction parallèle aux fibres, le paramètre RMS et le paramètre ENGY décroissent avec l'exposition thermique alors que le paramètre XMAX ne montre pas une tendance à la baisse significative. À 45° par rapport aux fibres, il est clair que l'exposition thermique affecte les paramètres car les paramètres ENGY et RMS décroissent alors que le paramètre XMAX augmente avec l'exposition thermique. À 90° par rapport aux fibres, mis à part les résultats de la plaque vierge, les mêmes conclusions peuvent être tirées.

Bien entendu, le résultat auquel on s'attendait s'apparente à celui obtenu à 45°. En effet, les paramètres ENGY et RMS doivent décroître pour signifier une atténuation plus grande selon que la dégradation augmente. De l'autre côté le paramètre XMAX doit augmenter pour montrer un plus grand retard de l'onde lorsque la dégradation est plus importante.

Ceci semble indiquer que les paramètres ENGY, RMS et XMAX sont de bons indicateurs de la dégradation thermique que le matériau a subi en autant que ces paramètres sont obtenus pour des directions autres que dans le sens des fibres.

### **3.4 - Détermination des propriétés par les vitesses de propagation**

À partir des mesures sur les signaux, il a été possible de calculer la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau. L'évaluation du paramètre DÉLAI se fait à l'aide du programme de calcul Origin, capable de lire la valeur de l'abscisse du premier pic significatif sur le signal numérisé. Cependant, la position du premier pic significatif sur le spectre n'est pas facile à déterminer. Dans le cas où l'atténuation est augmentée soit par l'éloignement des capteurs ou par le changement de direction la lecture devient plus compliquée et peut engendrer une lecture erronée.

Tout d'abord il faut s'assurer que le pic sélectionné est bien celui qui est associé au module d'élasticité ou si ce pic est relié à du bruit. Dans certains travaux de recherche comme Kautz [36] il est donné une indication sur le premier pic réel (pulse 1 sur la figure 3.9). Une fois le pic identifié, il reste à trouver la valeur du paramètre DÉLAI qui serait alors 12  $\mu$ s. Ainsi, pour le signal montré à la figure 3.9, le paramètre DÉLAI peut être évalué.

La même procédure a été utilisée dans cette étude et pour la plaque vierge de 24 plis un exemple des valeurs obtenues pour une série de mesure sont affichées au tableau 3.4.

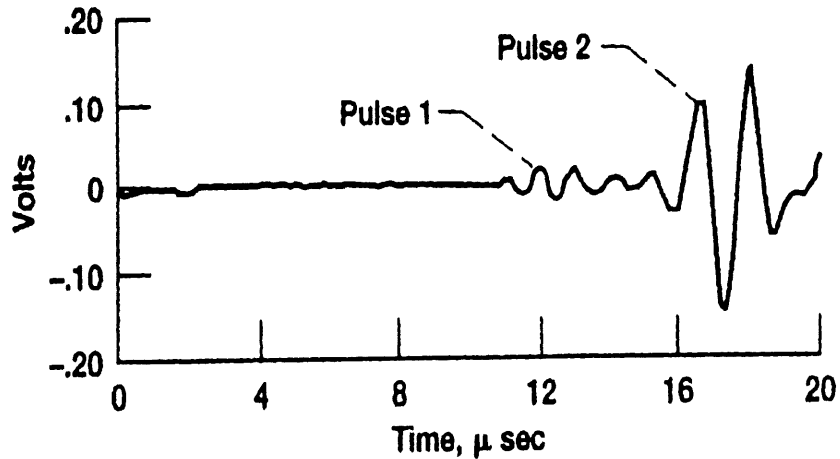


Fig. 3 Waveforms collected on a typical composite tensile specimen employing two 1.0-MHz transducers.

Figure 3.9 - Mesure du premier pic selon Kautz [36]

Tableau 3.4 - Paramètre DÉLAI pour la plaque vierge de 24 plis

Distance entre capteurs (mm)	DÉLAI direction 0° (μs)	DÉLAI direction 45° (μs)	DÉLAI direction 90° (μs)
38.2	6.4	10.0	15.1
43.2	6.7	11.6	16.9
48.2	7.2	12.9	19.0
53.2	8.1	18.9	23.4
58.2	8.6	19.9	25.1
63.2	9.4	21.6	28.4
68.2	9.4	23	32.7



Ainsi, le paramètre DÉLAI a permis d'évaluer dans les trois directions désirées les vitesses de propagation illustrées à la figure 3.10.

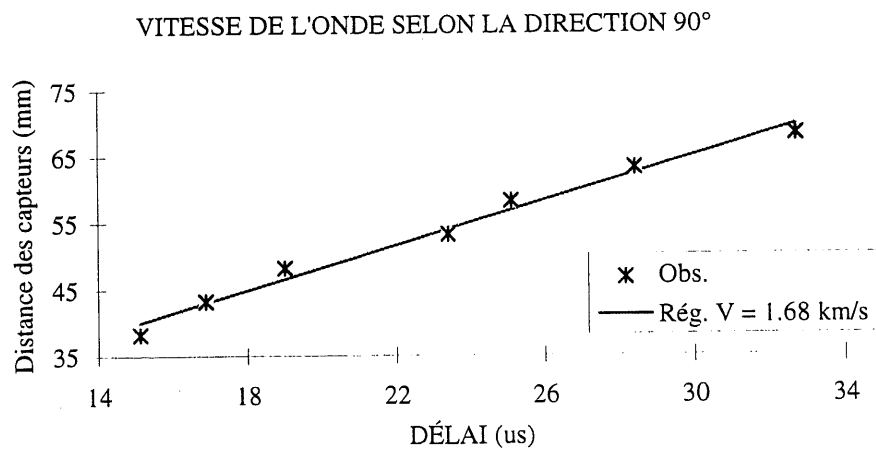
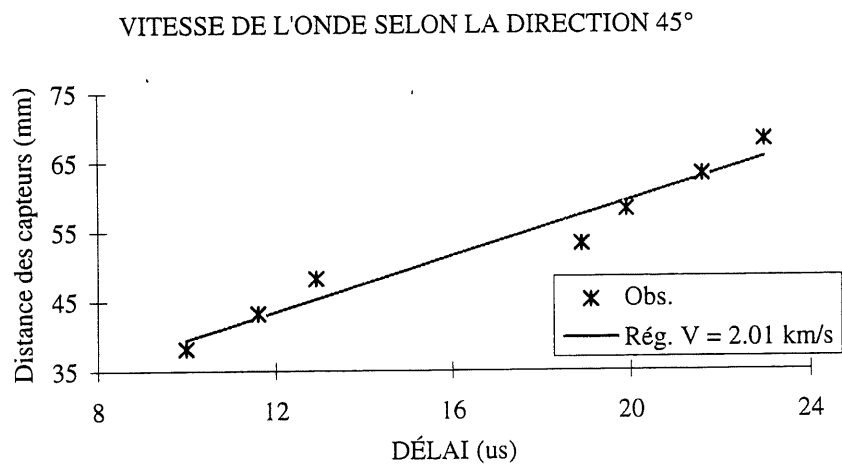
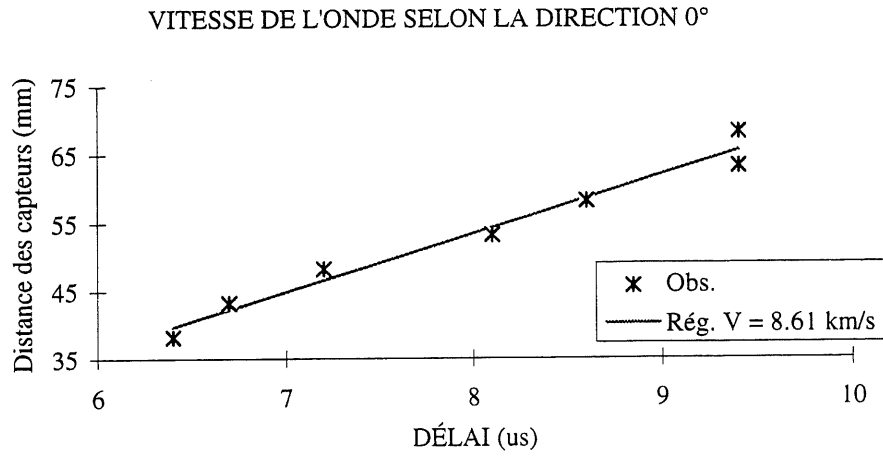


Figure 3.10 - Exemple de calcul des vitesses de propagation à 0°, 45° et 90°

Cette méthodologie est appliquée plusieurs fois pour la même plaque afin de calculer une vitesse moyenne de propagation de l'onde dans le matériau. Bien entendu, cette vitesse reflète les nombreux problèmes qui peuvent exister au sein du matériau. Le tableau 3.5 résume les vitesses moyennes de propagation de l'onde dans le composite.

Tableau 3.5 - Tableau des vitesses moyennes de propagation en km/s par AU

Plaques	Vitesse à 0°, $V_{11}$	Vitesse à 45°, $V_{12}$	Vitesse à 90°, $V_{22}$
A0, 24 plis, vierge	9.15	2.04	2.00
A1, 12 plis, vierge	8.62	2.20	2.43
A2, 12 plis, vierge	8.87	2.16	2.35
A3, 24 plis, d. 244°C	10.29	2.31	1.81
A4, 24 plis, d. 260°C	10.08	2.30	1.40
A6, 12 plis, d. 244°C	8.92	2.30	2.31
A7, 12 plis, d. 260°C	8.87	2.28	2.09

Afin de permettre une meilleure visualisation des résultats, les figures 3.11, 3.12 et 3.13 présentent les vitesses de propagation suivant les directions 0°, 45° et 90°. D'emblée on remarque que les données se divisent en deux catégories, à savoir les vitesses des plaques de 24 plis d'une part et de l'autre les données des vitesses des plaques de 12 plis. Les ordres de grandeur des vitesses ainsi obtenues se comparent bien aux vitesses fournies dans la littérature. Tsaï donne comme module de rigidité pour un composite AS4/3501-6 les valeurs suivantes en GPa:

$$C_{11} = 138.8,$$

$$C_{12} = 2.704,$$

$$C_{22} = 9.013,$$

$$C_{66} = 7.100.$$

Ceci permet donc de trouver des vitesses théoriques en km/s toujours selon l'équation (11):

$$V_{11} = 9.32,$$

$$V_{12} = 2.19,$$

$$V_{22} = 2.37.$$

### VITESSES DE PROPAGATION SELON LA DIRECTION 0°

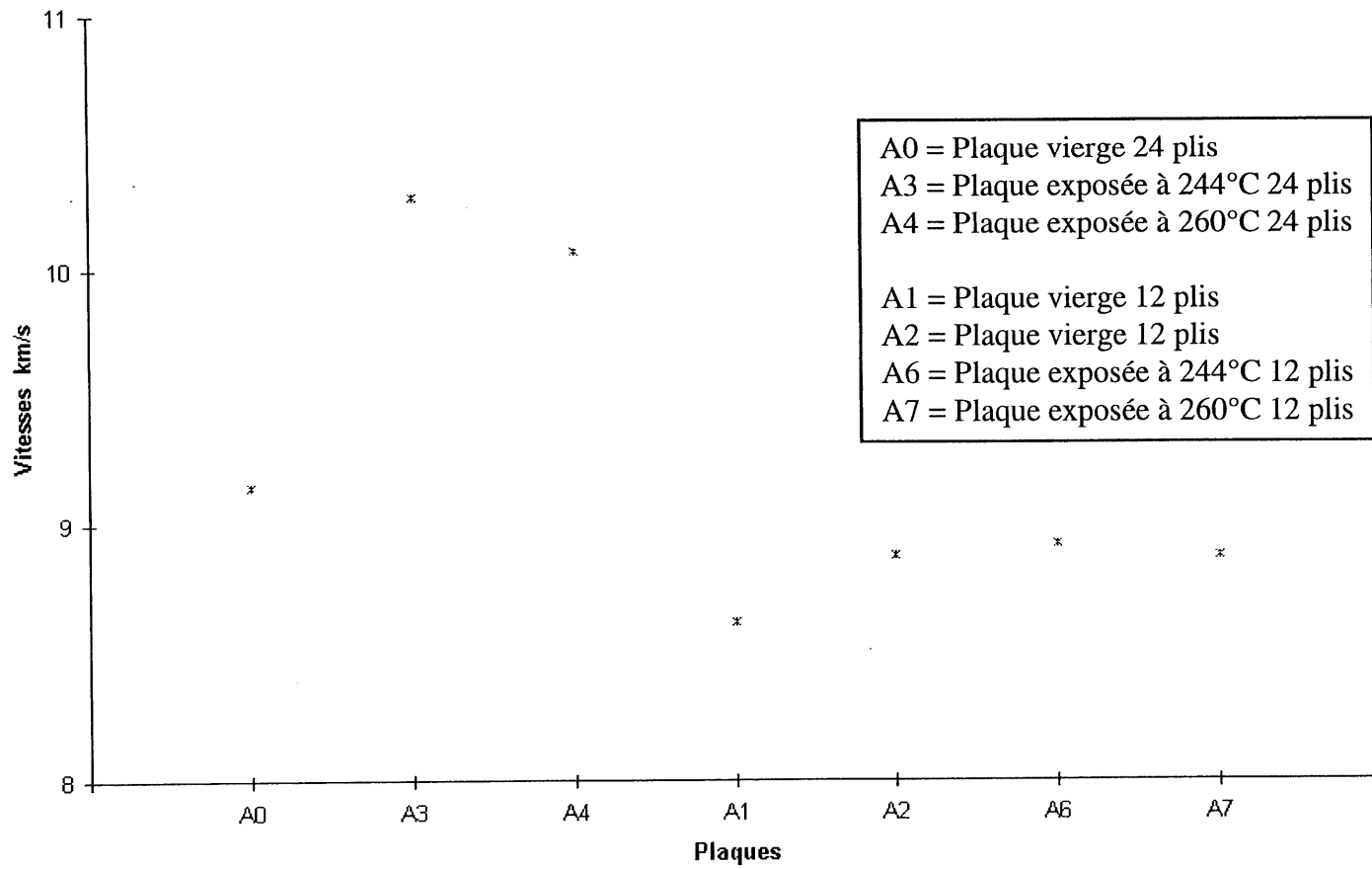


Figure 3.11 - Vitesses de propagation des plaques composites selon la direction 0°

### VITESSES DE PROPAGATION SELON LA DIRECTION 45°

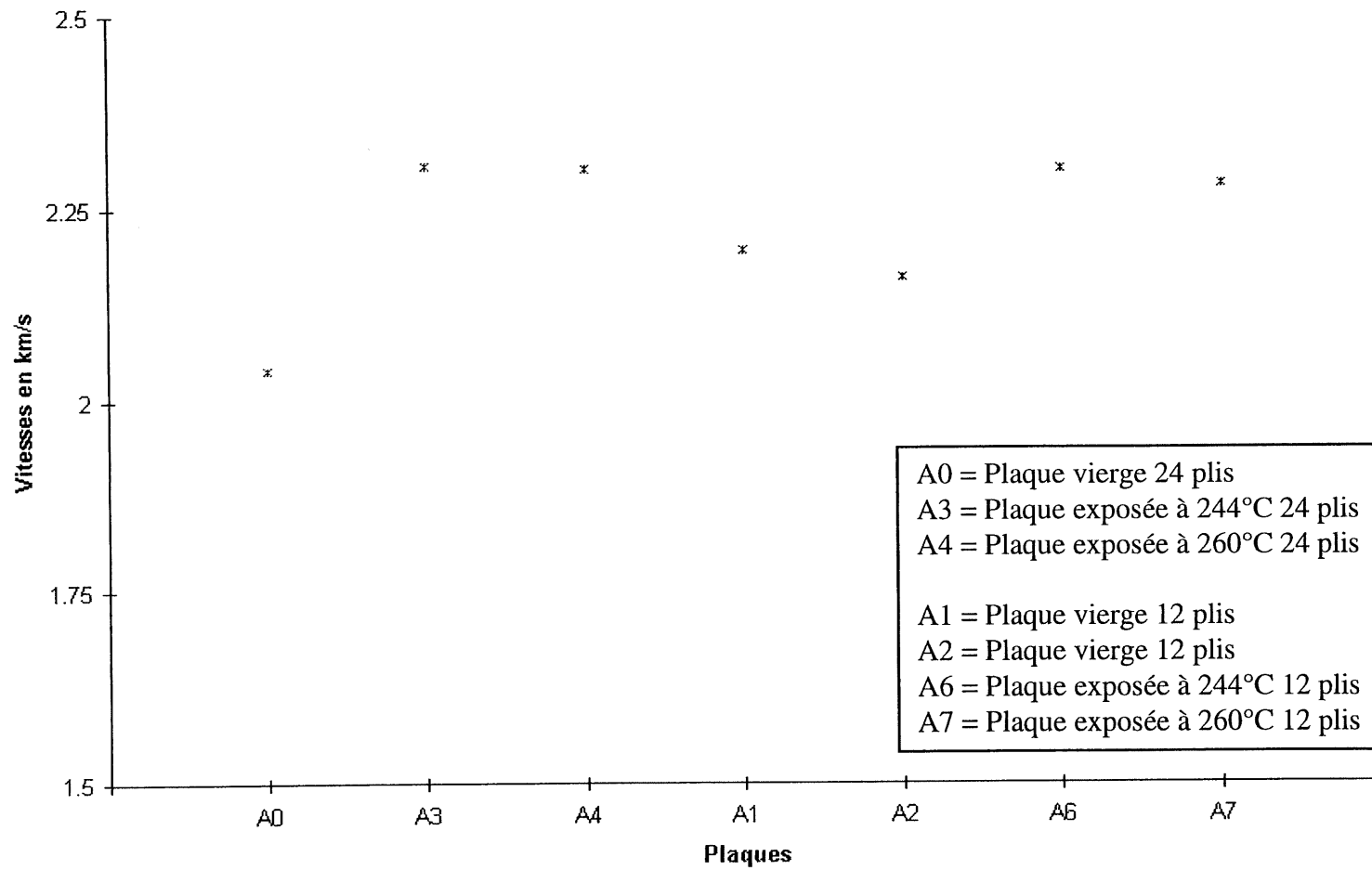


Figure 3.12 - Vitesses de propagation des plaques composites selon la direction 45°

### VITESSES DE PROPAGATION SELON LA DIRECTION 90°

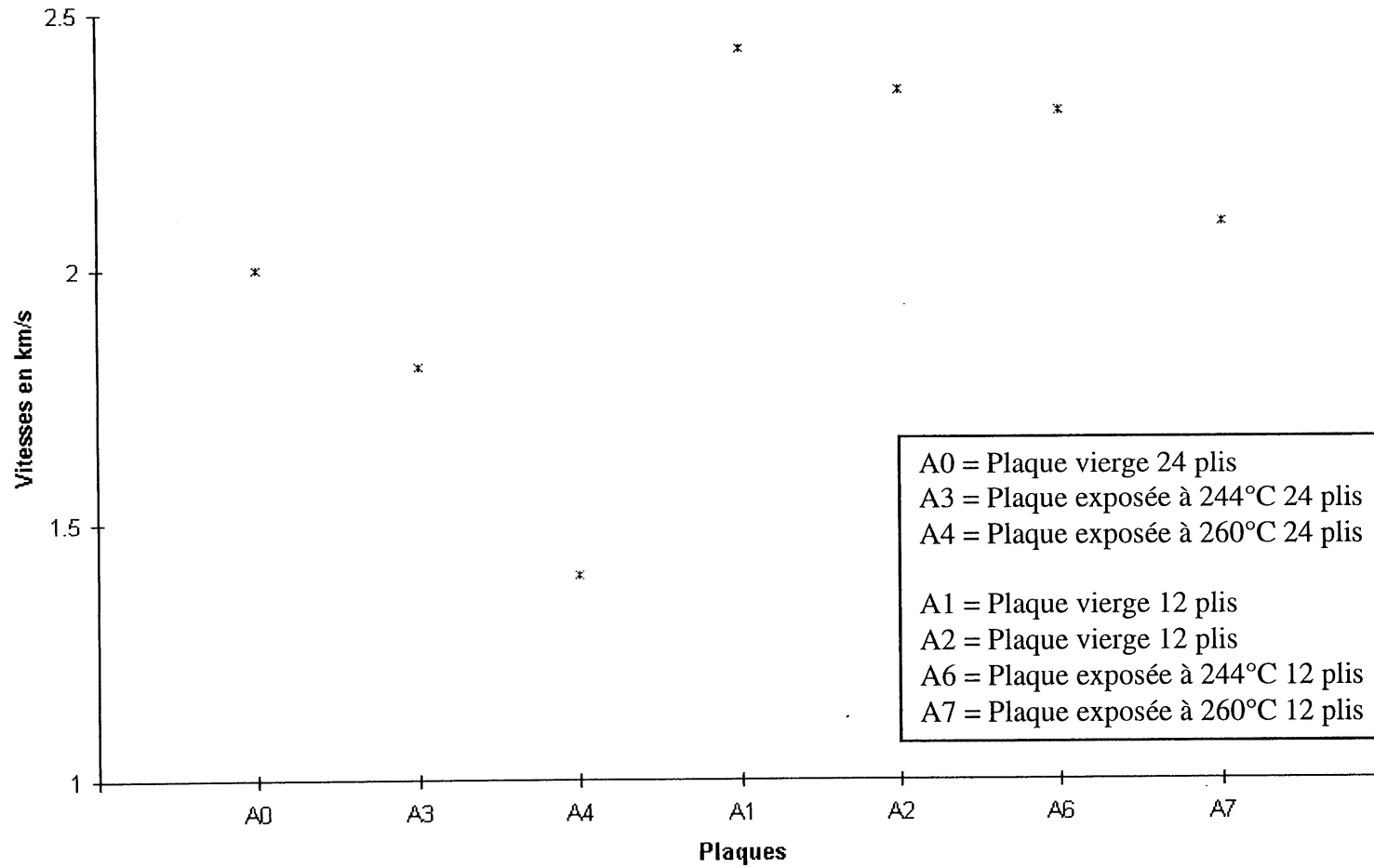


Figure 3.13 - Vitesses de propagation des plaques composites selon la direction 90°

Puisque les valeurs fournies par Tsai sont celles d'un composite vierge, la comparaison se fait avec les plaques vierges de 24 plis A0 et celles de 12 plis, A1 et A2. Ainsi, les vitesses de propagation obtenues par l'AU reste en dessous de 10% d'erreur par rapport aux valeurs théoriques dans la majorité des cas (figure 3.14).

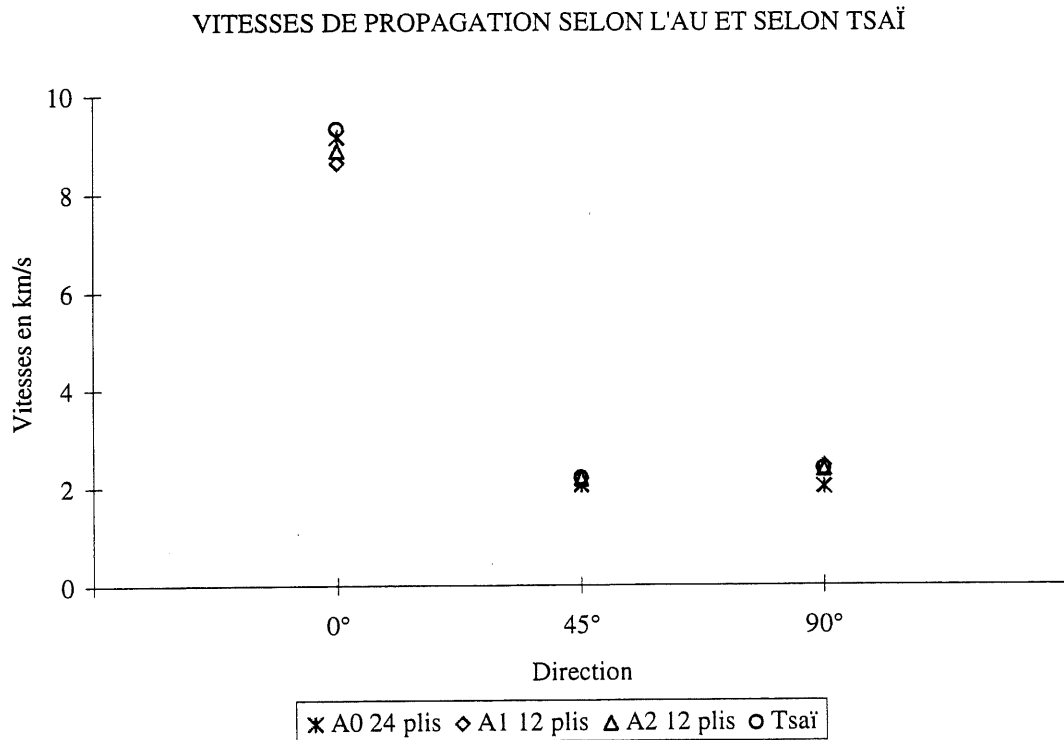


Figure 3.14 - Comparaison des vitesses de propagation théoriques et selon l'AU

Cette figure est encore un justificatif du choix de l'acousto-ultrasonique comme méthode de caractérisation. Elle révèle que l'AU est valable en ce qui concerne les plaques composites vierges.

Suivant l'équation (11) et connaissant la densité  $\rho$  du composite, il est possible d'évaluer la matrice de rigidité puis les modules d'élasticité dans les directions principales. Comme exemple de calcul, le tableau 3.6 montre les modules de rigidité en GPa pour les plaques composites vierges de 24 et 12 plis.

Tableau 3.6 - Éléments de la matrice de rigidité en GPa par AU pour les plaques vierges

Plaques	Module à $0^\circ$ , $C_{11}$	Module à $45^\circ$ , $C_{12}$	Module à $90^\circ$ , $C_{22}$
A0, 24 plis, vierge	134.0	2.27	6.40
A1, 12 plis, vierge	118.9	3.72	9.45
A2, 12 plis, vierge	125.9	3.80	8.84

Il reste à évaluer maintenant les propriétés mécaniques à savoir les modules de Young  $E_1$  et  $E_2$  respectivement dans le sens parallèle aux fibres et dans le sens perpendiculaire aux fibres et le module de rigidité  $G_{12}$ .

En se servant de la même formulation mathématique présentée à l'équation (11), le calcul de la matrice de compliance  $S$  permet de trouver  $E_1$ ,  $E_2$  et  $G_{12}$ . Le tableau 3.7 présente les propriétés mécaniques des plaques composites testées.

Tableau 3.7 - Modules d'élasticité  $E_1$ ,  $E_2$  et  $G_{12}$  en GPa pour les plaques composites testées

Plaques	Module $E_1$	Module $E_2$	Module $G_{12}$
A0, 24 plis, vierge	133.2	6.4	7.1
A1, 12 plis, vierge	117.4	9.3	7.1
A2, 12 plis, vierge	117.4	9.3	7.1
A3, 24 plis, d. 244°C	168.9	5.2	7.1
A4, 24 plis, d. 260°C	162.3	3.1	7.1
A6, 24 plis, d. 244°C	124.1	8.3	7.1
A7, 24 plis, d. 260°C	111.3	6.2	7.1

Ici aussi il est possible de représenter ces modules sur des figures pour faciliter leur visualisation. Tel que mentionné plus haut, le module de rigidité est considéré comme constant quelque soit la plaque choisi. Les figures 3.15 et 3.16 montrent les modules d'élasticité dans les directions parallèle et perpendiculaire aux fibres.

### MODULE DE YOUNG SELON LA DIRECTION PARALLÈLE AUX FIBRES

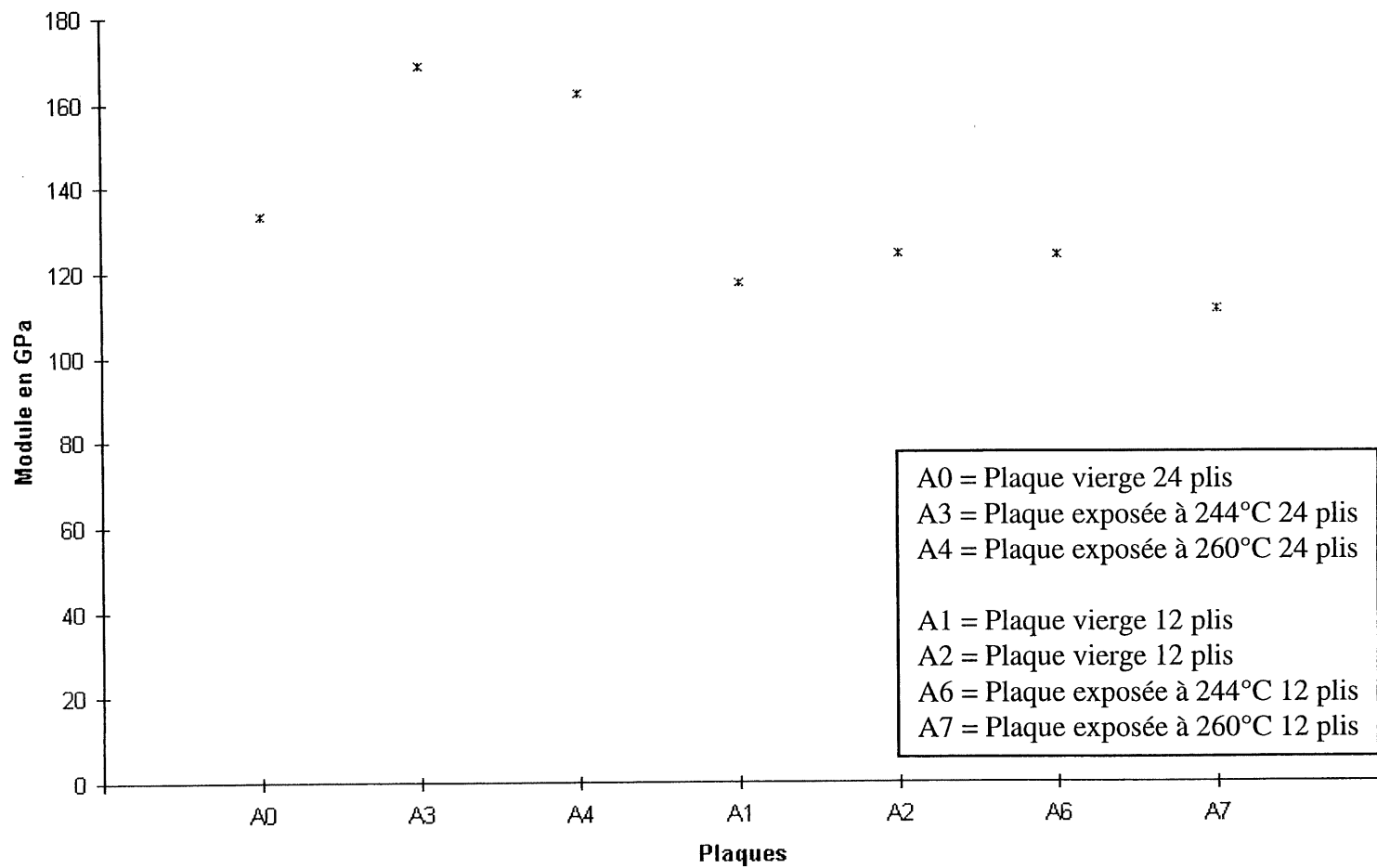


Figure 3.15 - Module d'élasticité des plaques composites dans la direction parallèle aux fibres



### MODULE DE YOUNG SELON LA DIRECTION PERPENDICULAIRE AUX FIBRES

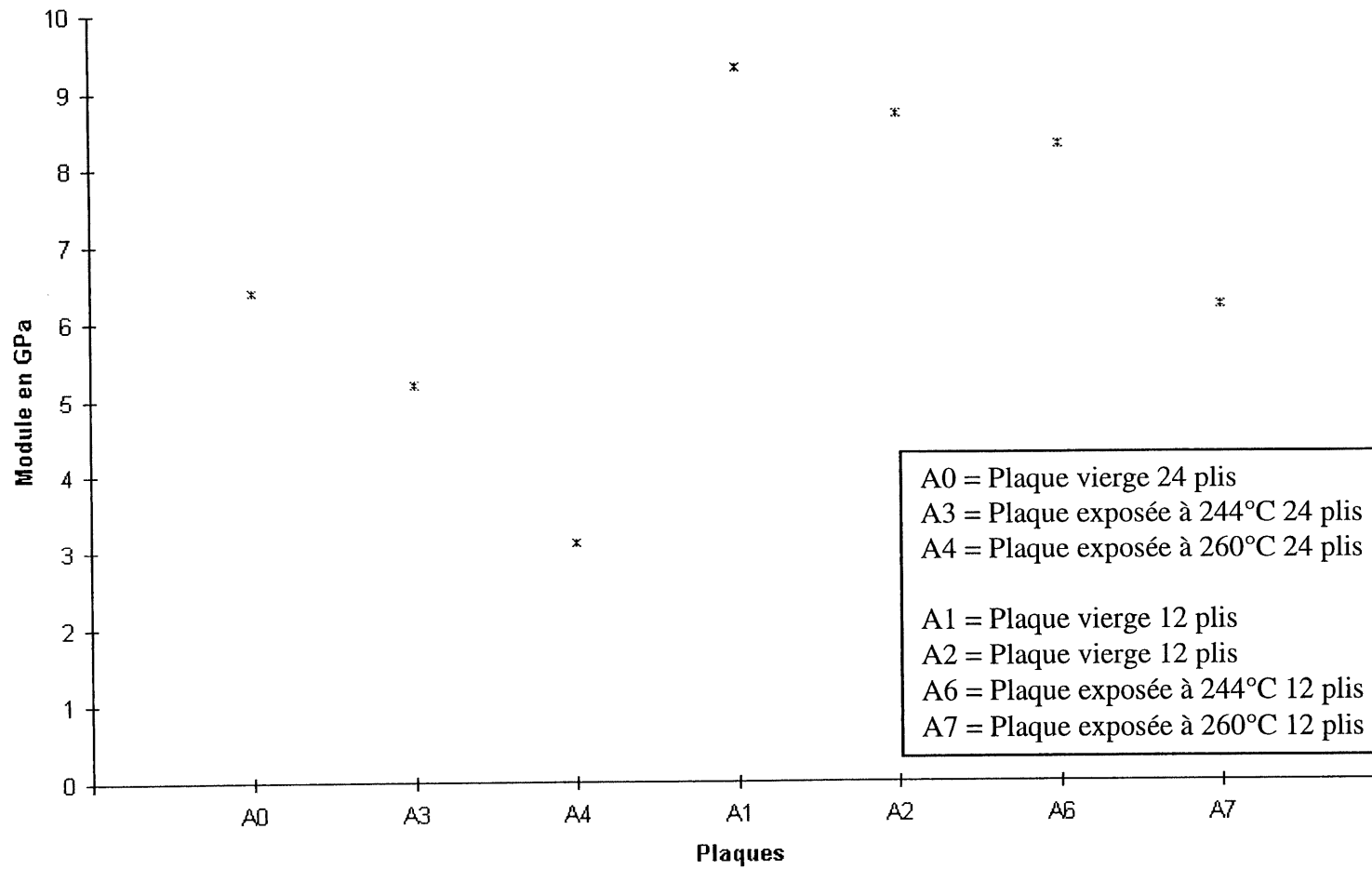


Figure 3.16 - Module d'élasticité des plaques composites dans la direction perpendiculaire aux fibres

Pour les modules  $E_1$  et  $E_2$  du composite AS4/3501-6, Tsai donne en GPa:

$$E_1 = 138,$$

$$E_2 = 8.96.$$

En comparant les valeurs obtenues par l'AU à celles présentées par Tsai pour le cas des plaques vierges, comme il a été mentionné plus haut pour les vitesses, la marge d'erreur des modules  $E_1$  et  $E_2$  montrent la fiabilité de l'acousto-ultrasonique comme méthode de contrôle non-destructive. Il faut noter que le module  $E_2$  de la plaque vierge de 24 plis A0 est assez loin de la valeur de Tsai. Il sera vu ultérieurement si ce décalage est dû à l'épaisseur de la plaque ou à tout autre problème.

En conclusion, il faut retenir que la technique de l'acousto-ultrasonique s'avère être un outil efficace pour caractériser de façon nondestructive la dégradation des matériaux composites. À partir de cette méthode il a été possible de trouver les modules d'élasticité de plaques composites vierges et dégradées.

Il faut noter que suivant l'exposition thermique, les valeurs des vitesses de propagation changent. En effet, dans les trois directions,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$  la vitesse des plaques dégradées de 24 plis varie par rapport à celle de la plaque vierge de 24 plis et cette constatation se répète pour les plaques de 12 plis. Pour toutes les deux épaisseurs de plaque, on note que la vitesse de propagation est la plus sensible dans la direction  $90^\circ$  en ce qui concerne la dégradation thermique.

Il reste à savoir si cette conclusion rejoint les résultats d'une caractérisation étalon, la caractérisation mécanique des plaques qui sera l'objet du chapitre suivant.

## CHAPITRE 4

# LA CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES PLAQUES

### **Introduction**

L'essai de traction est le test le plus couramment utilisé en ingénierie pour déterminer les propriétés mécaniques d'un matériau. En règle générale, il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à un chargement axial et à mesurer l'allongement correspondant. Pour être valable, l'essai de traction doit donner des mesures significatives et impliquer des états de contrainte simples et connus. Par ailleurs, l'essai de traction doit produire des valeurs de propriétés mécaniques qui permettront d'apprécier le comportement du matériau.

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter une méthode valide de comparaison pour évaluer la précision des résultats obtenues par la méthode AU. Après une brève description de l'éprouvette de test, les différentes procédures utilisées pour la caractérisation mécanique du matériau seront examinées et les résultats seront sommairement commentés.

L'essai de traction nécessite, pour une bonne interprétation des résultats, une bonne reproductibilité; le nombre limité de plaques composites disponibles n'a permis de tester qu'un petit nombre d'éprouvettes. Toutefois, les résultats ici présentés donnent des valeurs des propriétés mécaniques des plaques étudiées qui se rapprochent de celles trouvées dans la littérature pour le même composite.

### **4.1 - Les éprouvettes**

Sur chacune des plaques de cette étude, quatre éprouvettes ont été prélevées pour effectuer l'essai de traction (voir figure 4.1). Ces éprouvettes ont été découpées à l'I.R.A (Ottawa) suivant les standards en vigueur. Par la suite des talons sont fixés aux extrémités à l'aide d'une résine époxyde, pour éviter l'endommagement du composite dans les mâchoires de la machine de traction.

Il est impératif que le nettoyage et sablage des talons ainsi que les extrémités des éprouvettes extraites des plaques composites où sont collés les talons soient effectués soigneusement pour obtenir une bonne adhérence. Par la suite, il faut préparer la colle époxyde en mélangeant une

résine EPO-KWICK de Buehler au durcisseur de la même marque à température ambiante. L'opération consiste à déposer quelques gouttes du mélange sur la surface des talons en prenant soin de ne pas contaminer ces derniers durant la manipulation. L'éprouvette est alors posée sur les talons et l'alignement de l'ensemble vérifié.

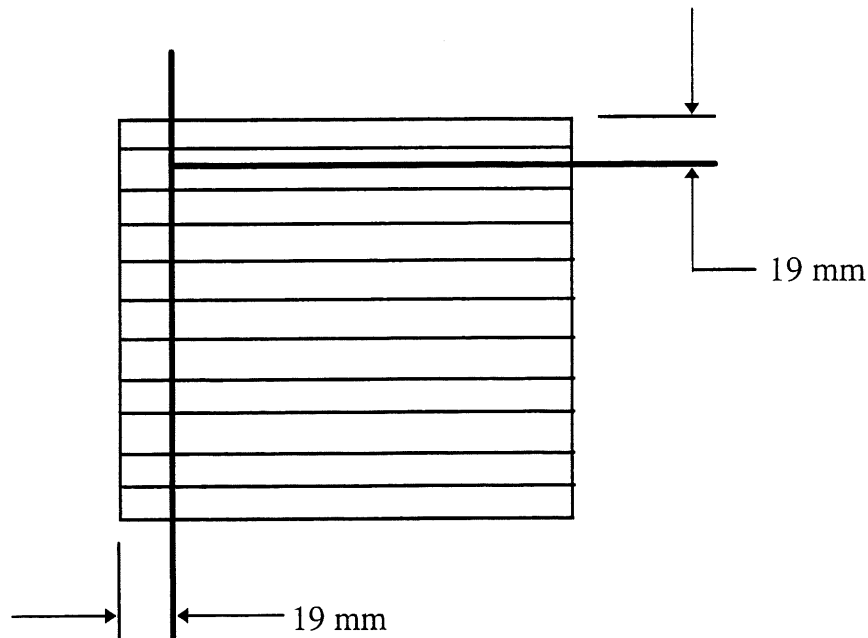


Figure 4.1 - Exemple de découpe de deux éprouvettes

Il faut éviter d'appliquer de la pression sur les talons afin que la résine époxyde puisse s'étaler de façon uniforme par capillarité. Par ailleurs il faut choisir des talons plus long pour les éprouvettes d'épaisseur plus importante.

L'éprouvette vue dans les deux plans est montré aux photos 4.1 et 4.2.

Suivant, la même procédure de fabrication, un total de 28 éprouvettes ont été préparées pour les test de traction. Clairement, le nombre d'éprouvettes n'est pas élevé pour caractériser de la meilleure manière les propriétés mécaniques du composite mais considérant le coût de mise en oeuvre de ces matériaux composites de hautes performances, il est facile de comprendre que l'Institut de Recherche Aérospatiale a montré une grande générosité en fournissant les matériaux de cette étude.

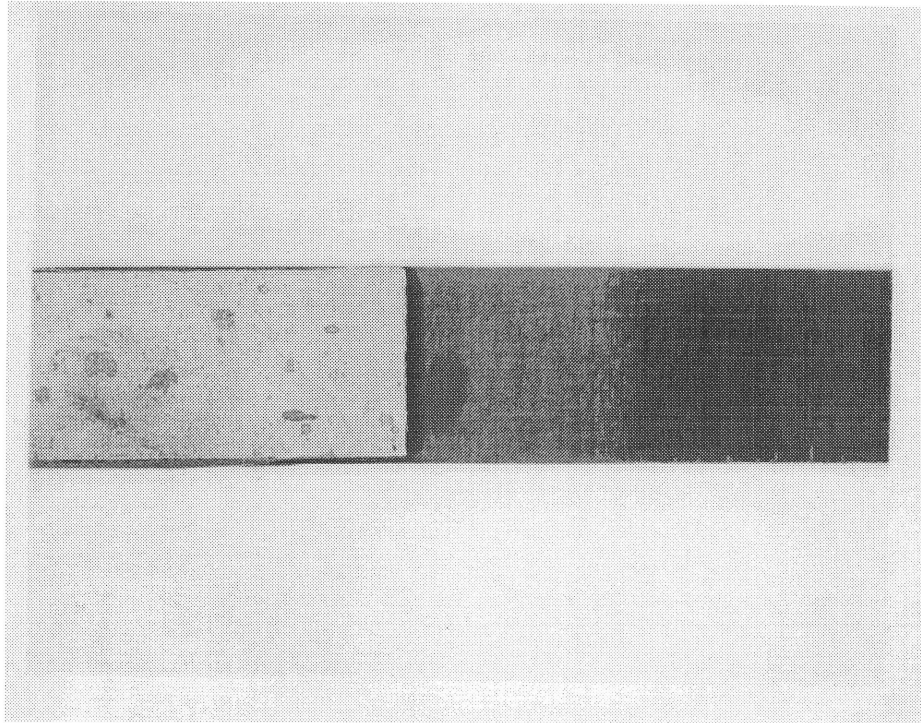


Photo 4.1 - L'éprouvette de traction vue de face

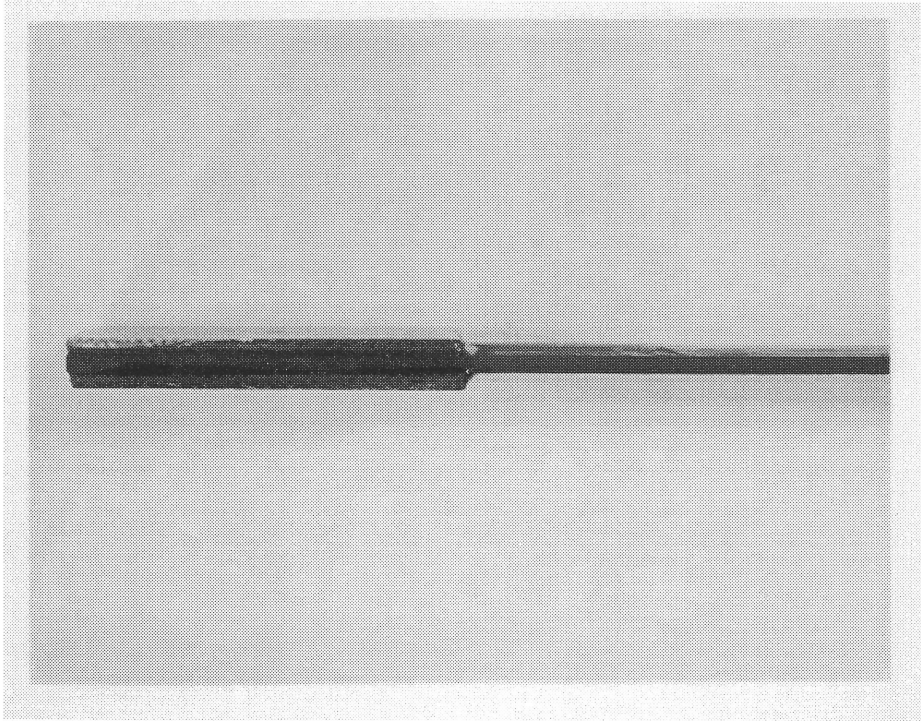


Photo 4.2 - L'éprouvette de traction vue de côté

## 4.2 - Équipements et procédures

Les appareils utilisés pour les tests de traction sont les suivants:

- une machine de test Universel Instron model 4206;
- une console de calibration Instron;
- un système informatique d'acquisition et de contrôle;
- un extensomètre.

Une vue d'ensemble du montage expérimental est présentée à la photo 4.3.

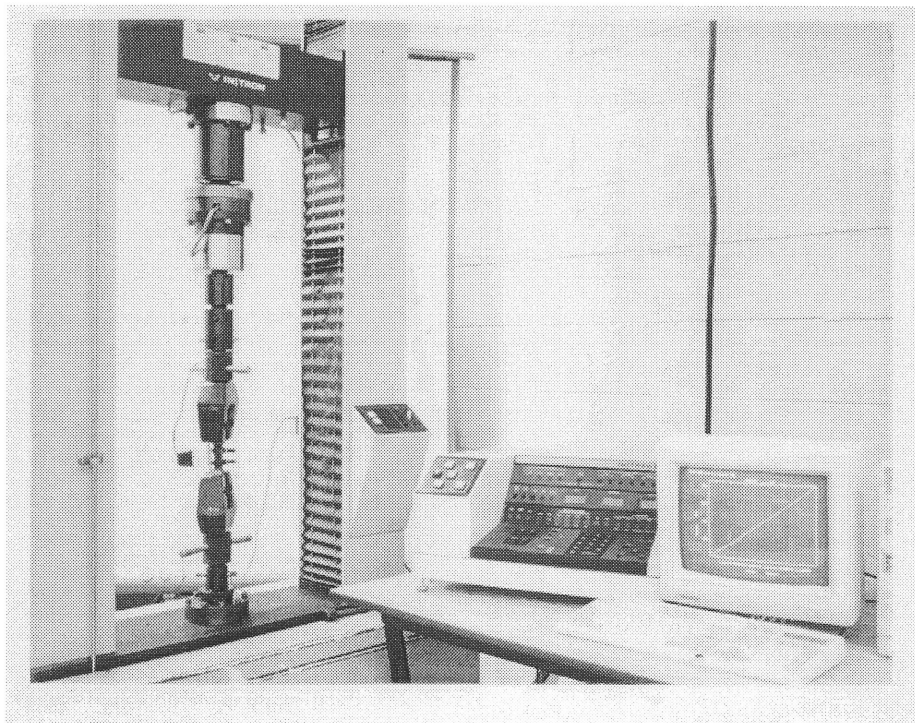


Photo 4.3 - Vue d'ensemble du montage expérimental pour les essais mécaniques

Les différentes étapes à réaliser sont alors:

- prendre les mesures de longueur, largeur et d'épaisseur de l'éprouvette;
- placer l'éprouvette dans les mâchoires de la machine;
- fixer l'extensomètre sur l'éprouvette (photo 4.4);

- procéder à la calibration à partir de la console;
- entrer les paramètres et démarrer le test à partir de l'ordinateur.

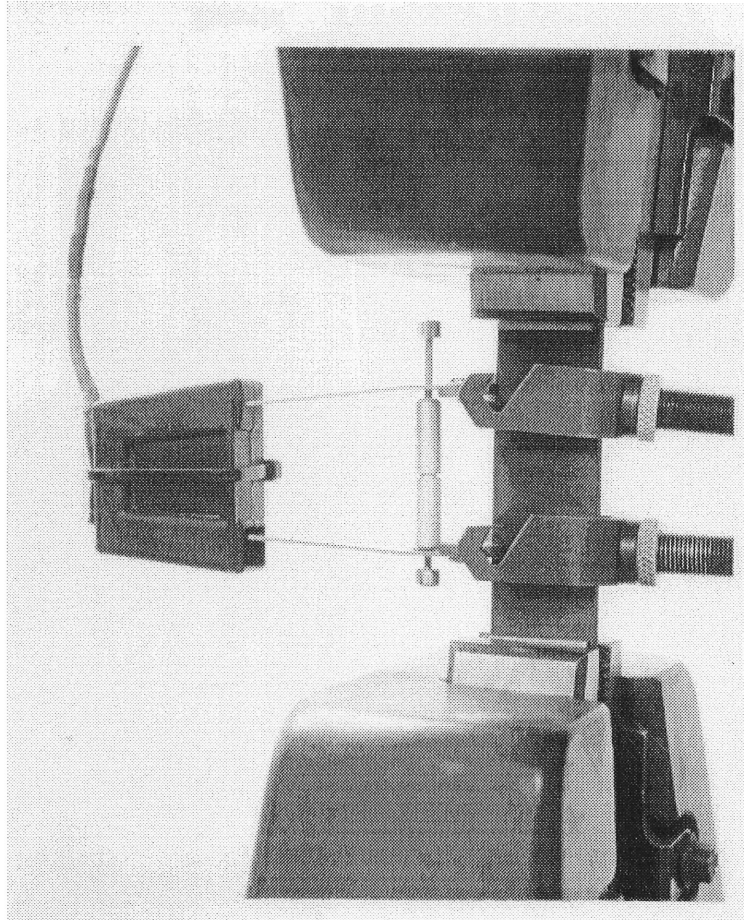


Photo 4.4 - L'éprouvette et l'extensomètre dans les mâchoires de la machine

Il est crucial pour les éprouvettes en matériau composite d'avoir un extensomètre étant donné que ces matériaux présentent le caractère de rupture fragile. Le domaine élastique du graphique force-déplacement renferme toute l'information pour la caractérisation du matériau. Avec un extensomètre, il est plus facile d'obtenir cette information avec grande précision.

Une fois le test lancé, la courbe de traction se dessine simultanément sur l'écran de l'ordinateur et les données du test sont stockées dans la mémoire de l'appareil pour être analysées par la suite.



### **4.3 - Résultats des essais mécaniques**

Dans le sens longitudinal de l'éprouvette (sens des fibres), le test se fait assez facilement car les manipulations sont moins délicates et l'éprouvette a peu de chance de se casser accidentellement avant le test. La rupture se fait d'une façon plutôt "explosive" avec restitution d'énergie élastique entraînant la désintégration presque totale de l'éprouvette (photos 4.5 et 4.6). Cette constatation se répète pour toutes les expositions c'est à dire pour les éprouvettes vierges ou dégradées thermiquement. Par ailleurs, dans tous les cas de figures, il faut noter que l'initiation de la rupture a toujours lieu dans la zone de test entre les mâchoires.

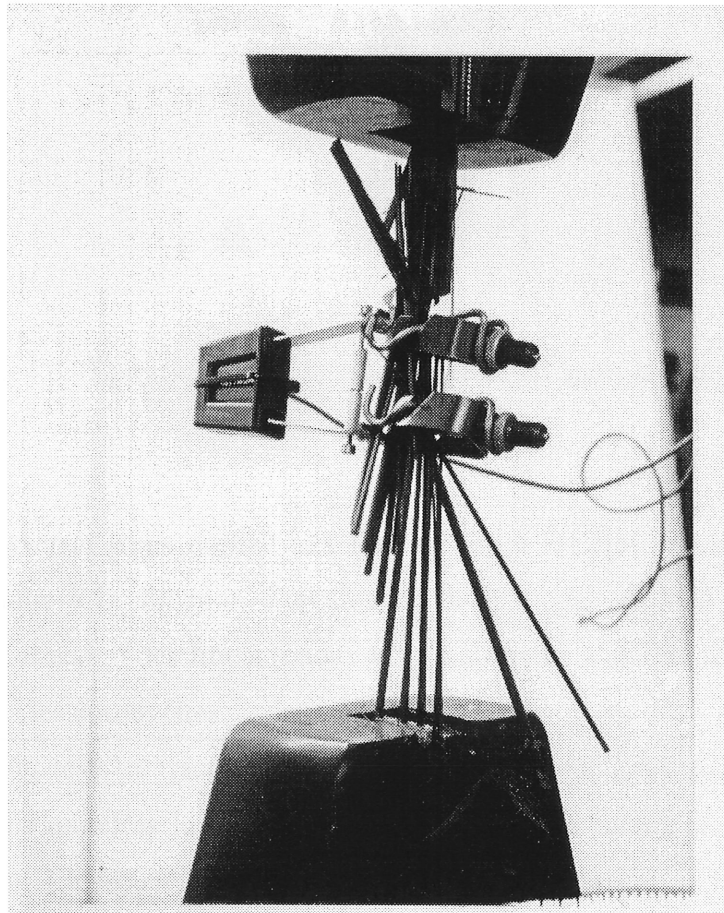


Photo 4.5 - Éprouvette dans le sens longitudinal après le test de traction



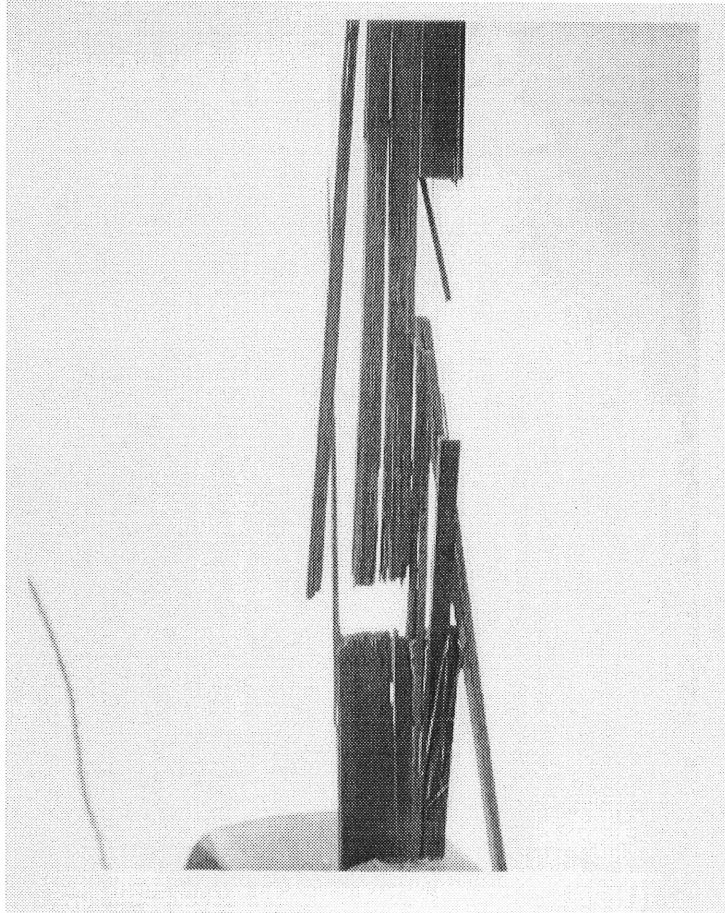


Photo 4.6 - Éprouvette dans le sens longitudinal après le test de traction

Dans le sens transversal (sens normal aux fibres), toutes les éprouvettes se sont rompues de façon perpendiculaire à la direction d'application de la charge et donc par la même occasion parallèlement à la direction des fibres (photo 4.7). La rupture s'est produite entièrement dans la matrice pour toutes les éprouvettes.

Dans l'ensemble, les tests de traction se sont déroulés sans problèmes majeurs et de façon assez répétitives. Notons toutefois le décollement occasionnel des talons ce qui a entraîné aussitôt l'annulation du test. L'éprouvette est alors recollée et le test repris.

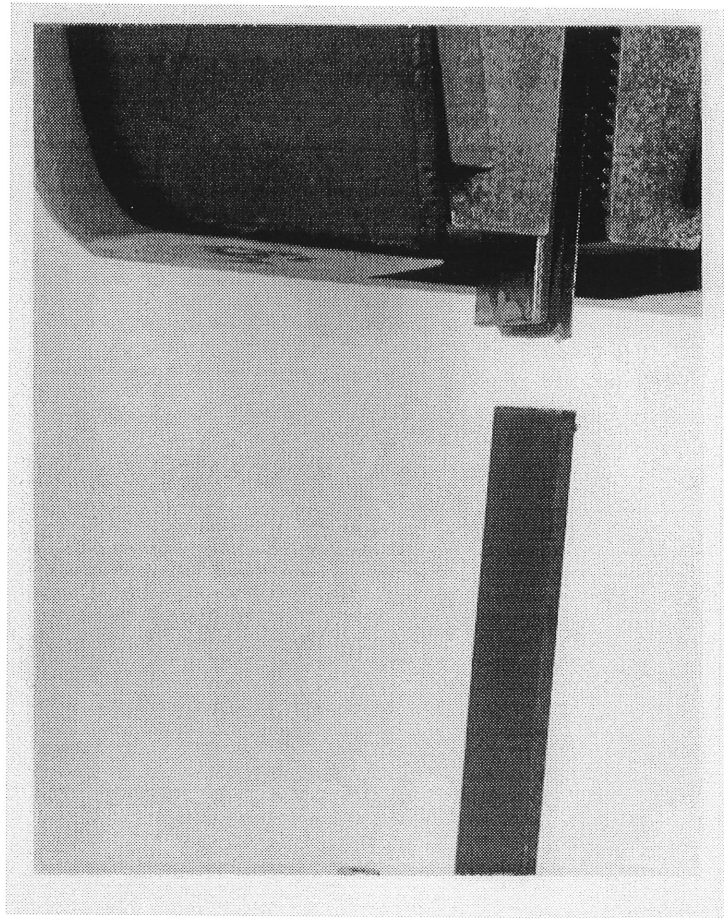
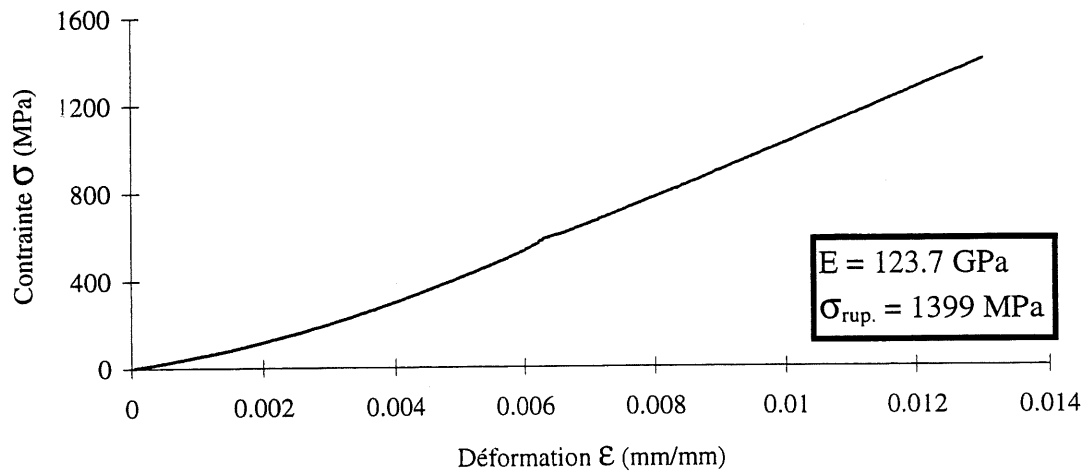


Photo 4.7 - Éprouvette dans le sens transversal après le test de traction.

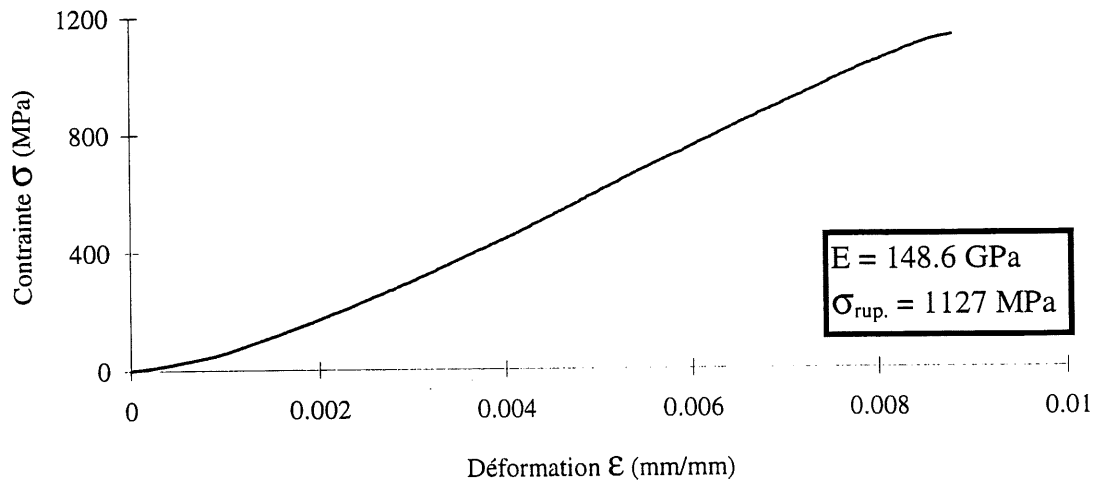
Suivant les photos 4.5, 4.6 et 4.7, les niveaux de chargement sont différents pour les éprouvettes longitudinales et transversales. Un chargement très supérieur doit être appliquée dans le sens parallèle aux fibres pour atteindre la rupture de l'éprouvette. Les courbes typiques de traction pour l'éprouvette longitudinale et transversale sont présentées aux figures 4.2 et 4.3 et une plus grande force est nécessaire pour rupturer les éprouvettes longitudinales. On peut aussi observer que la contrainte à la rupture pour une éprouvette vierge est plus élevée que celle de l'éprouvette thermiquement affectée. Ces observations s'appliquent à la majorité des éprouvettes testées.

## COURBE CONTRAINTE DÉFORMATION



(a)

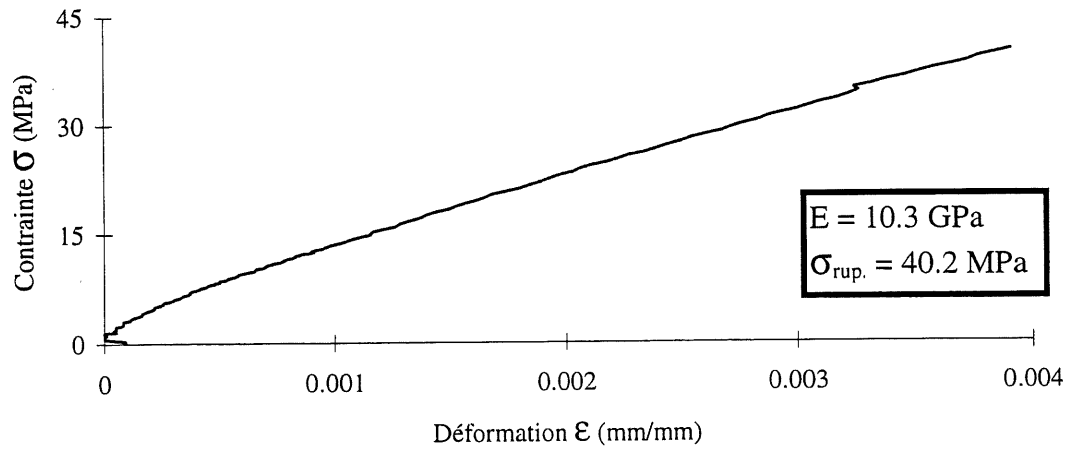
## COURBE CONTRAINTE DÉFORMATION



(b)

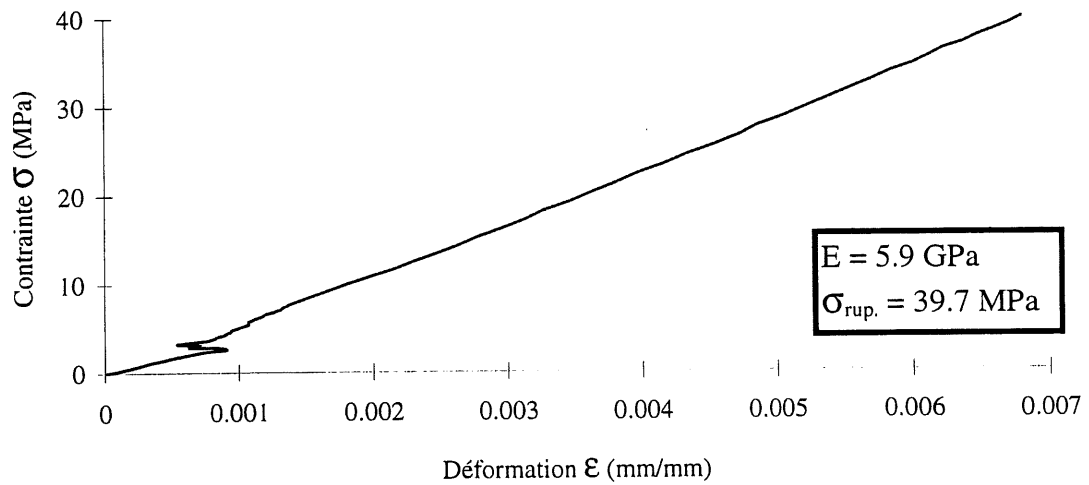
Figure 4.2 - Courbes contrainte déformation, éprouvettes 24 plis vierge (a) dégradée à 260°C (b), sens parallèle aux fibres

### COURBE CONTRAINTE DÉFORMATION



(a)

### COURBE CONTRAINTE DÉFORMATION



(b)

Figure 4.3 - Courbes contrainte déformation, éprouvettes 24 plis vierge (a) dégradée à 260°C (b), sens perpendiculaire aux fibres

Ainsi, à partir des courbes de traction des différentes éprouvettes, il a été possible de calculer les modules d'élasticité. Les valeurs des modules d'élasticité obtenues à partir du test mécanique sont reportées au tableau 4.1. Les valeurs des modules présentés dans ce tableau correspondent aux moyennes d'essais effectués sur les quatre éprouvettes de chacune des plaques composites.

Tableau 4.1 - Modules d'élasticité  $E_1$  et  $E_2$  en GPa obtenus par test mécanique

Plaques	Module d'élasticité $E_1$	Module d'élasticité $E_2$
A0, 24 plis, vierge	114.7	10.3
A1, 12 plis, vierge	125.7	9.4
A2, 12 plis, vierge	127.1	8.1
A3, 24 plis, d. 24°C	140.5	6.7
A4, 24 plis, d. 26°C	122.7	5.9
A6, 12 plis, d. 24°C	144.4	7.8
A7, 12 plis, d. 26°C	137.2	6.3

Comme pour les résultats des essais AU (voir figures 3.15 et 3.16), les modules  $E_1$  et  $E_2$  sont aussi présentés sous forme de graphique permettant de visualiser la variation des modules d'élasticité des plaques composites vierges et dégradées par l'effet thermique (figures 4.4 et 4.5). Il est apparent que l'allure des courbes est différente selon la direction des fibres dans les éprouvettes. Dans le sens longitudinal (sens des fibres), le module d'élasticité augmente puis diminue légèrement alors que dans le sens transversal (sens normal aux fibres), il diminue avec l'exposition thermique du composite.

Évidemment, les mêmes observations peuvent être faites lorsqu'on évalue la matrice de rigidité de chacune des plaques en utilisant les valeurs des modules d'élasticité  $E_1$  et  $E_2$ . Puisque les valeurs respectives des propriétés physiques du composite (densité, rapport de Poisson,..) sont connues les constantes d'élasticité du composite de même que les vitesses de propagation des ondes équivalentes peuvent être déterminées afin d'évaluer leur variation en fonction de l'exposition thermique du composite. Les résultats de cette analyse sont présentés aux tableaux 4.2 et 4.3.

## RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES

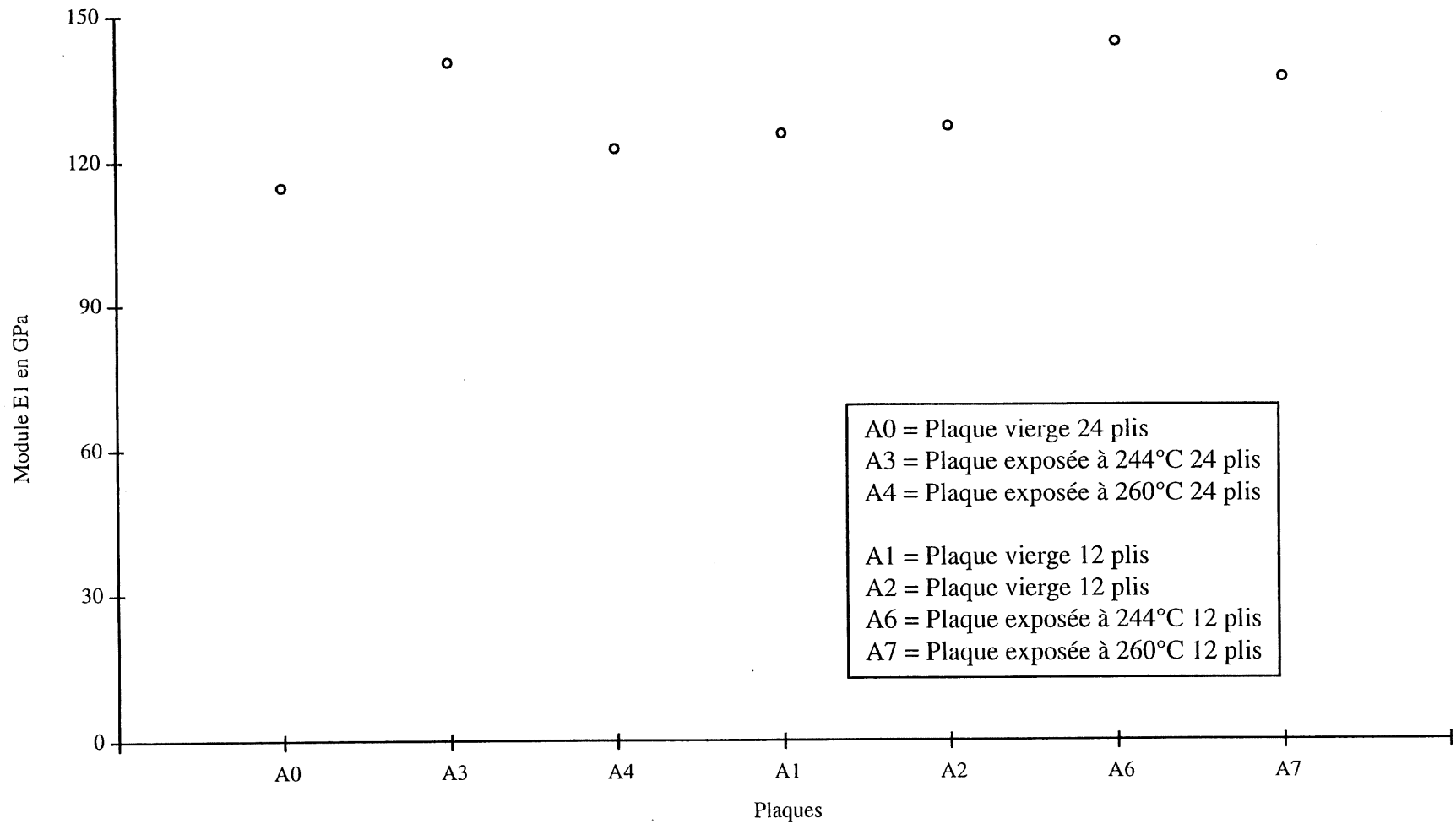


Figure 4.4 - Modules d'élasticité  $E_1$  obtenus par essais mécaniques

## RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES

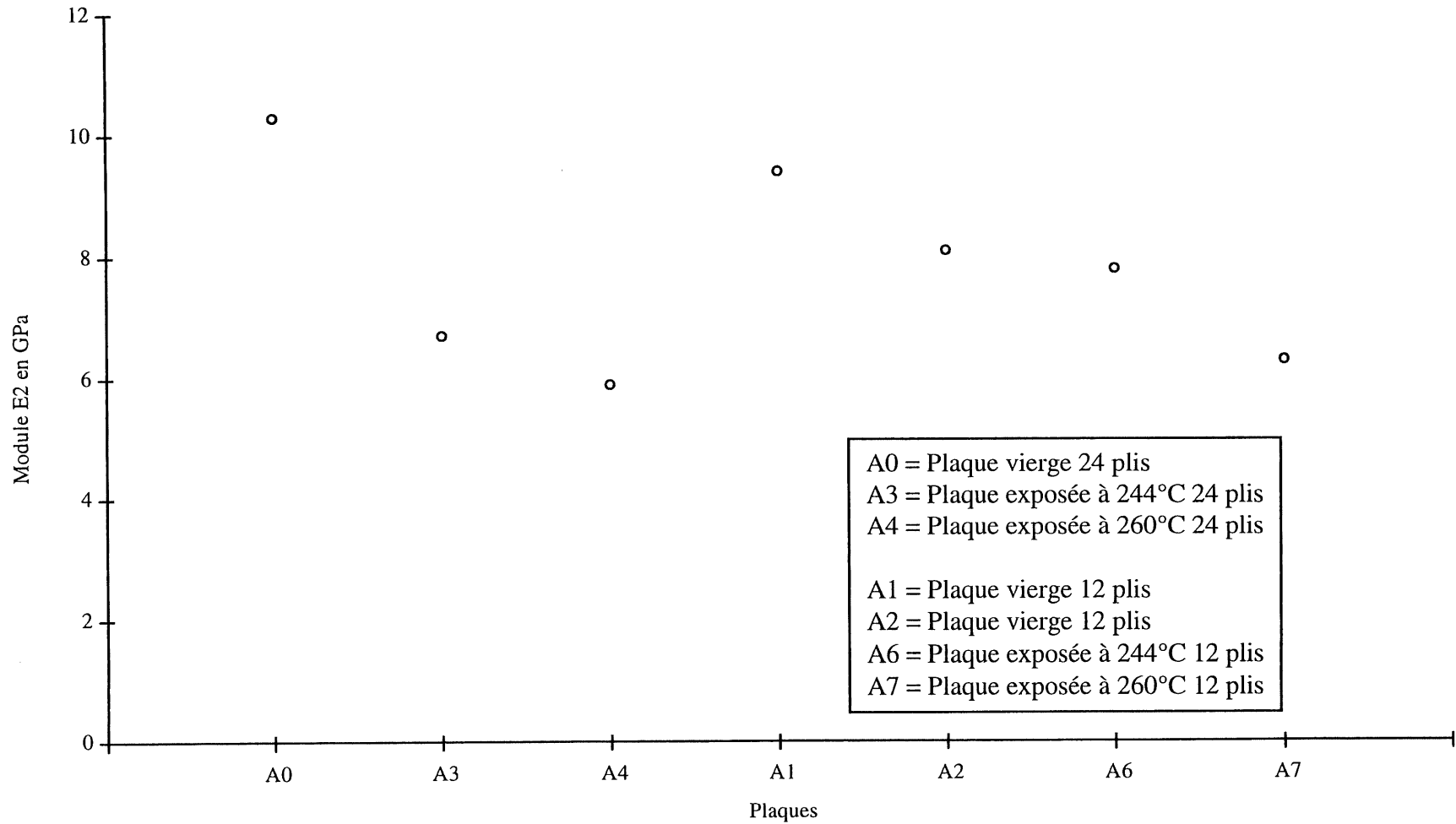


Figure 4.5 - Modules d'élasticité  $E_2$  obtenus par essais mécaniques

Tableau 4.2 - Éléments de la matrice de rigidité en GPa pour les plaques testées mécaniquement

Plaques	Rigidité $C_{11}$	Rigidité $C_{12}$	Rigidité $C_{22}$
A0, 24 plis, vierge	115.6	3.11	10.4
A1, 12 plis, vierge	126.6	2.8	9.5
A2, 12 plis, vierge	127.8	2.4	8.1
A3, 24 plis, d. 244°C	141.9	2.0	6.7
A4, 24 plis, d. 260°C	123.2	1.8	5.9
A6, 24 plis, d. 244°C	145.1	2.4	7.9
A7, 24 plis, d. 260°C	137.8	1.9	6.3

Tableau 4.3 - Vitesses de propagation équivalentes en km/s

Plaques	Vitesse $V_{11}$	Vitesse $V_{12}$	Vitesse $V_{22}$
A0, 24 plis, vierge	8.5	2.3	2.6
A1, 12 plis, vierge	8.9	2.2	2.4
A2, 12 plis, vierge	8.9	2.1	2.3
A3, 24 plis, d. 244°C	9.4	2.0	2.1
A4, 24 plis, d. 260°C	8.8	2.0	1.9
A6, 24 plis, d. 244°C	9.5	2.1	2.2
A7, 24 plis, d. 260°C	9.3	2.0	2.0

En comparant ces résultats entre eux on remarque une différence dans les valeurs même des plaques vierges de 24 plis et de 12 plis. Parallèlement, pour les plaques dégradées de 24 plis et celles de 12 plis les modules présentent aussi une certaine variation. Donc l'épaisseur des plaques jouent un rôle non négligeable dans l'évaluation des propriétés mécaniques des composites [15,16].



La littérature nous fournit des données de même nature pour le AS4/3501-6. Pour les plaques vierges, les valeurs publiées par Tsai (voir page 37), se compare bien à celles trouvées puisque la marge d'erreur est entre 8 et 17% pour le module  $E_1$  et entre 10 et 15% pour le module  $E_2$ . Lee, Plamondon et Gaudert [37] ont aussi réalisé des travaux mécaniques avec le composite AS4/3501-6 et là encore une comparaison des résultats mécaniques donne une dispersion variant entre 6 et 15% pour le module  $E_1$  et de l'ordre de 16% pour le module transversal. En général, une dispersion de 10 à 15% dans les résultats mécaniques pour les composites est tout à fait acceptable. Ainsi, nos résultats des essais mécaniques pour les plaques vierges étant conformes à ceux de la littérature, on peut retenir que la procédure expérimentale utilisée pour caractériser le matériau composite est valide.

Il s'agit maintenant d'aborder une analyse et une discussion critique comparative des résultats des essais acousto-ultrasonique et des tests mécaniques afin d'établir une corrélation entre les propriétés mécaniques et la vitesse de propagation de l'onde dans les signaux acousto-ultrasoniques et d'indiquer les limitations de la méthode AU. Cette démarche permettra d'établir un lien entre la variation des propriétés mécaniques et la dégradation thermique du matériau due à l'exposition du composite à des températures élevées.

## CHAPITRE 5

### ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### **Introduction**

Aux chapitres 3 et 4 sont présentés les résultats obtenus par la méthode acousto-ultrasonique et par les tests mécaniques. Ce chapitre poursuit une analyse de ces résultats pour ensuite conclure par une discussion critique dégageant le niveau de corrélation entre les propriétés mécaniques et le caractère des signaux AU. Ainsi, l'analyse et la discussion seront effectuées selon deux étapes:

- la corrélation des propriétés mécaniques aux résultats obtenus par AU, pour caractériser la dégradation thermique des plaques composites utilisées dans ce travail de recherche.
- l'analyse microscopique pour corroborer les résultats de la corrélation.

#### **5.1 - Corrélation des mesures AU aux propriétés mécaniques**

Le paramètre DELAI est celui mesuré par la méthode acousto-ultrasonique. Ce paramètre permet d'évaluer la vitesse de propagation de l'onde comprise dans les signaux AU. De l'autre côté, les essais mécaniques permettent d'obtenir les modules d'élasticité  $E_1$  et  $E_2$ . Établir une comparaison et le cas échéant une corrélation nécessite la transformation des modules d'élasticité en vitesses. Les formules présentées au chapitre 1 permettent de faire exactement cela. Ainsi, en regroupant dans un même tableau les résultats obtenus par les essais acousto-ultrasoniques et les vitesses dérivées des modules d'élasticité  $E_1$  et  $E_2$ , une première analyse peut être faite (tableau 5.1). Les ordres de grandeur des vitesses présentées sont identiques pour les mesures AU et les tests mécaniques. Par ailleurs, il semble que la tendance des résultats des tests mécaniques permet de faire un parallèle avec ceux de l'AU pour ce qui est des vitesses des plaques vierges comparativement à celles des plaques dégradées. C'est donc dire que l'AU est sensible aux mêmes effets de dégradation du composite que les tests mécaniques.

Pour mieux saisir cette tendance, il est utile de montrer sur la même figure les vitesses de propagation des ondes AU et celles dérivées à partir des essais mécaniques pour les plaques vierges, ainsi que les vitesses théoriques proposées par la littérature (voir figures 5.1, 5.2 et 5.3).

Ces figures montrent que la mesure de vitesse par l'AU est en fait une méthode valide et confirment que l'acousto-ultrasonique est une méthode fiable et valide quant à la caractérisation d'un matériau composite non dégradé.

Tableau 5.1 - Comparaison des vitesses AU aux vitesses dérivées des modules  $E_1$  et  $E_2$

Plaques	Vitesse à 0°, $V_{11}$		Vitesse à 45°, $V_{12}$		Vitesse à 90°, $V_{22}$	
	AU	MÉC	AU	MÉC	AU	MÉC
A0, 24 plis, vierge	9.15	8.5	2.04	2.3	2.00	2.6
A1, 12 plis, vierge	8.62	8.9	2.20	2.2	2.43	2.4
A2, 12 plis, vierge	8.87	8.9	2.16	2.1	2.35	2.3
A3, 24 plis, d. 244°C	10.29	9.4	2.31	2.0	1.81	2.1
A4, 24 plis, d. 260°C	10.08	8.8	2.30	2.0	1.40	1.9
A6, 24 plis, d. 244°C	8.92	9.5	2.30	2.1	2.31	2.2
A7, 24 plis, d. 260°C	8.87	9.3	2.28	2.0	2.09	2.0

**COMPARAISON DES VITESSES POUR LA PLAQUE A0,  
VIERGE 24 PLIS**

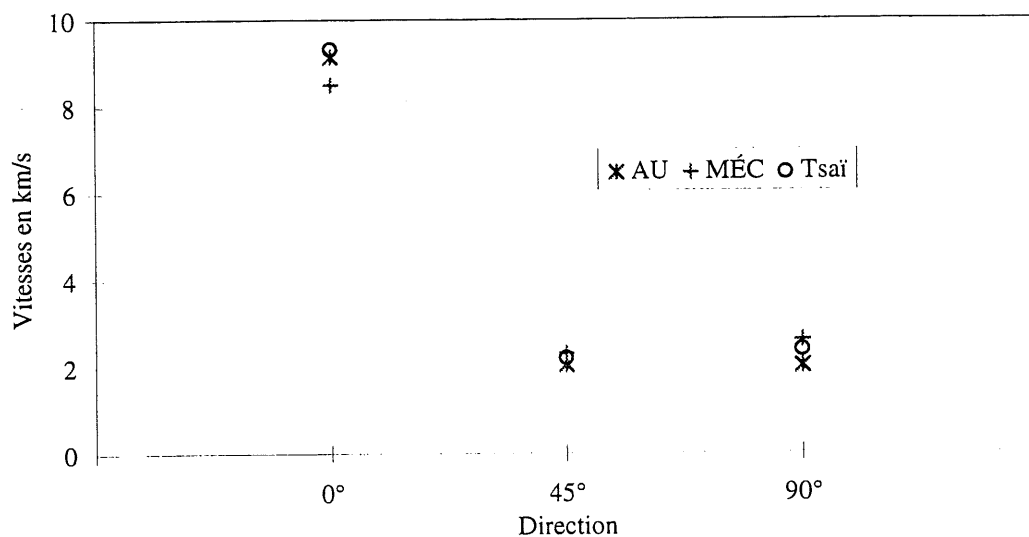


Figure 5.1 - Comparaison des vitesses selon l'AU, les tests mécaniques et Tsai, plaque vierge A0

**COMPARAISON DES VITESSES POUR LA PLAQUE A1,  
VIERGE 12 PLIS**

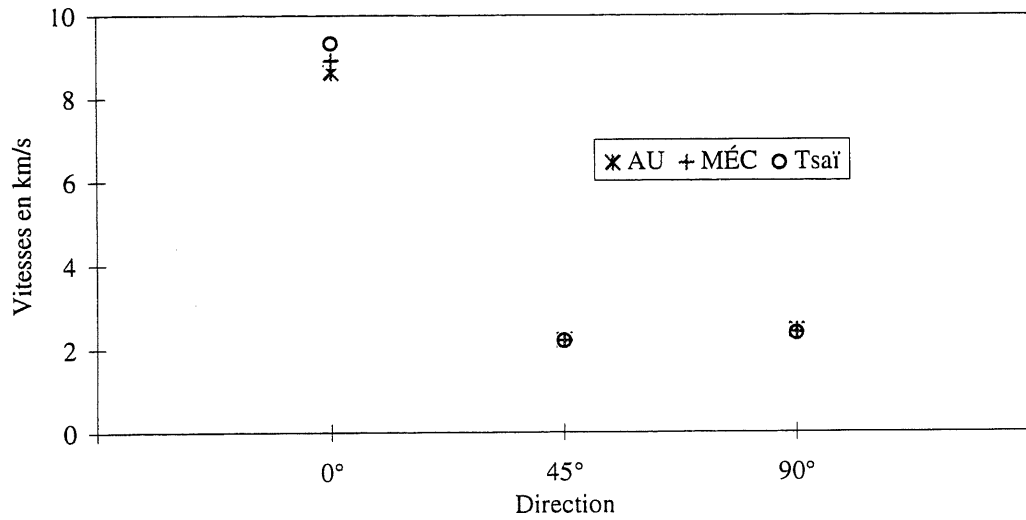


Figure 5.2 - Comparaison des vitesses selon l'AU, les tests mécaniques et Tsai, plaque vierge A1

**COMPARAISON DES VITESSES POUR LA PLAQUE A2,  
VIERGE 12 PLIS**

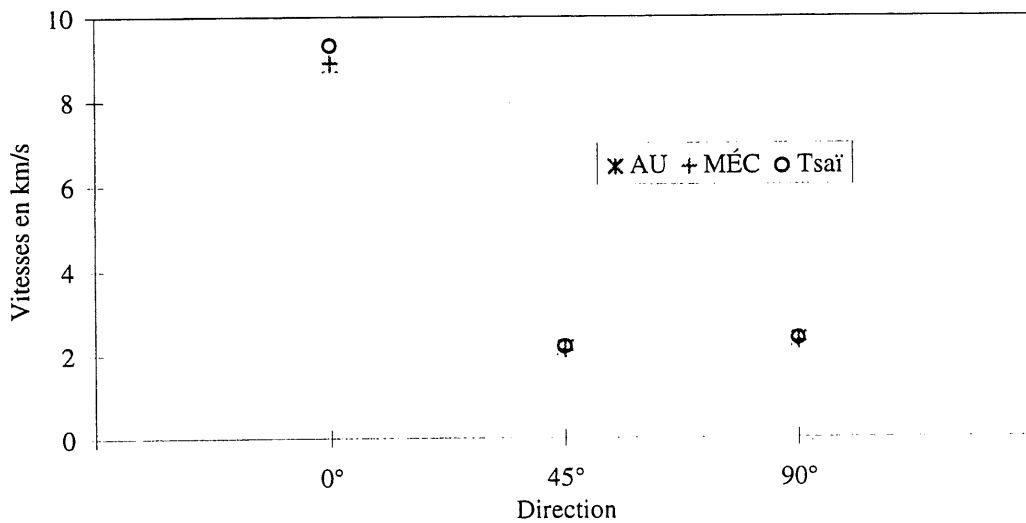


Figure 5.3 - Comparaison des vitesses selon l'AU, les tests mécaniques et Tsai, plaque vierge A2

Par ailleurs, la distribution des vitesses AU obtenue selon l'orientation des fibres concorde fidèlement avec la prédiction obtenue par le modèle théorique présenté à la figure 8. Il s'agit maintenant d'appliquer la technique pour diagnostiquer le composite en évaluant l'effet de l'exposition thermique sur les propriétés mécaniques.

Les figures 5.4 et 5.5 présentent les modules d'élasticité  $E_1$  et  $E_2$  obtenus par les tests mécaniques et ceux dérivées des mesures AU. En fait, ces graphiques représentent une superposition des figures 3.15 et 4.4 puis 3.16 et 4.5. La première remarque concerne le fait que les courbes permettent d'identifier deux classes de résultats selon le nombre de plis. En effet, les résultats des tests mécaniques et des essais acousto-ultrasonique se distinguent suivant que la plaque est 24 ou 12 plis. La tendance reste similaire dans les deux cas avec une assez bonne concordance entre résultats des essais AU et mécaniques. Il faut cependant noter que la variation entre les essais AU et mécaniques est moins prononcée dans le cas des plaques de 12 plis. Ce résultat est toutefois prévisible car l'onde mécanique qui traverse la plaque composite rencontre moins d'interactions et se propage donc mieux pour les plaques plus minces. Il faut aussi rappeler que les essais AU sont assez complexes à réaliser de par le fait qu'ils nécessitent pour une bonne reproductibilité qu'un soin particulier soit apporté à tous les facteurs susceptibles d'influencer le signal acousto-ultrasonique. Étant donné que le but ultime est l'identification de la dégradation thermique des plaques exposées par une corrélation des résultats AU aux résultats des essais mécaniques, l'accent sera mis sur le fait que les résultats AU présente un profil semblable aux résultats des tests mécaniques.

Ainsi, l'observation de la figure 35 montre que le module d'élasticité  $E_1$  des plaques composites de 24 plis augmente avec la durée de l'exposition thermique. En fait, comparé au module de la plaque vierge A0, il y a d'abord une augmentation pour une température d'exposition de 244°C puis, à partir de cette valeur une légère diminution pour une exposition à une plus forte température (260°C). Sur cette même figure, on remarque que le profil de comportement des plaques de 12 plis est semblable. Rappelons qu'une augmentation du module d'élasticité d'au plus 16% se situe dans la plage de variations définies comme acceptables pour les propriétés mécaniques des matériaux composites.

On constate donc indiquer que le module d'élasticité  $E_1$  du composite augmente légèrement selon l'axe des fibres avec l'exposition thermique, que ce soit pour les plaques de 12 ou 24 plis .

### MODULE D'ÉLASTICITÉ E1 POUR LES PLAQUES TESTÉES

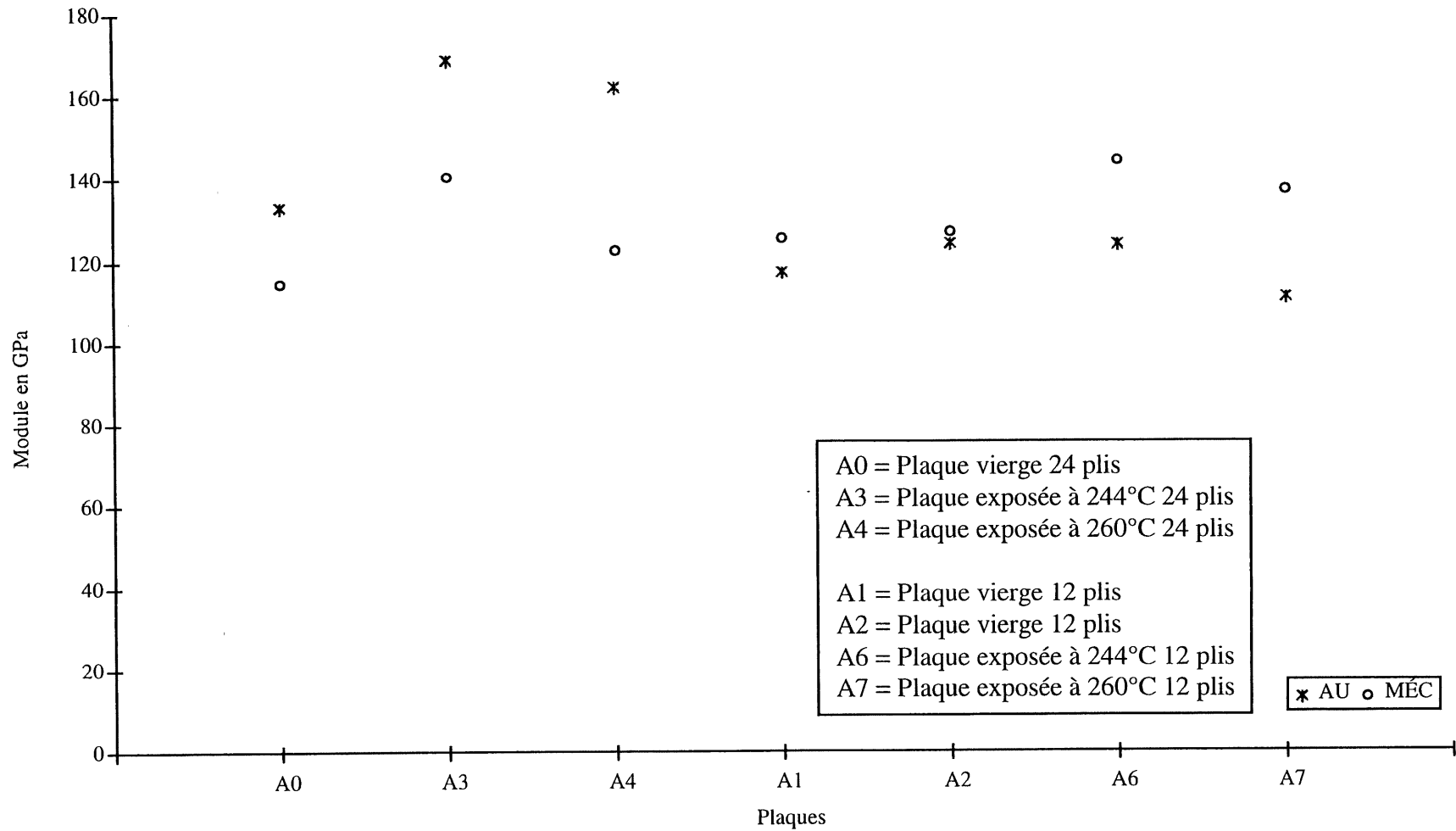


Figure 5.4 - Comparaison des modules d'élasticité E1 pour les plaques testées

### MODULE D'ÉLASTICITÉ E2 POUR LES PLAQUES TESTÉES

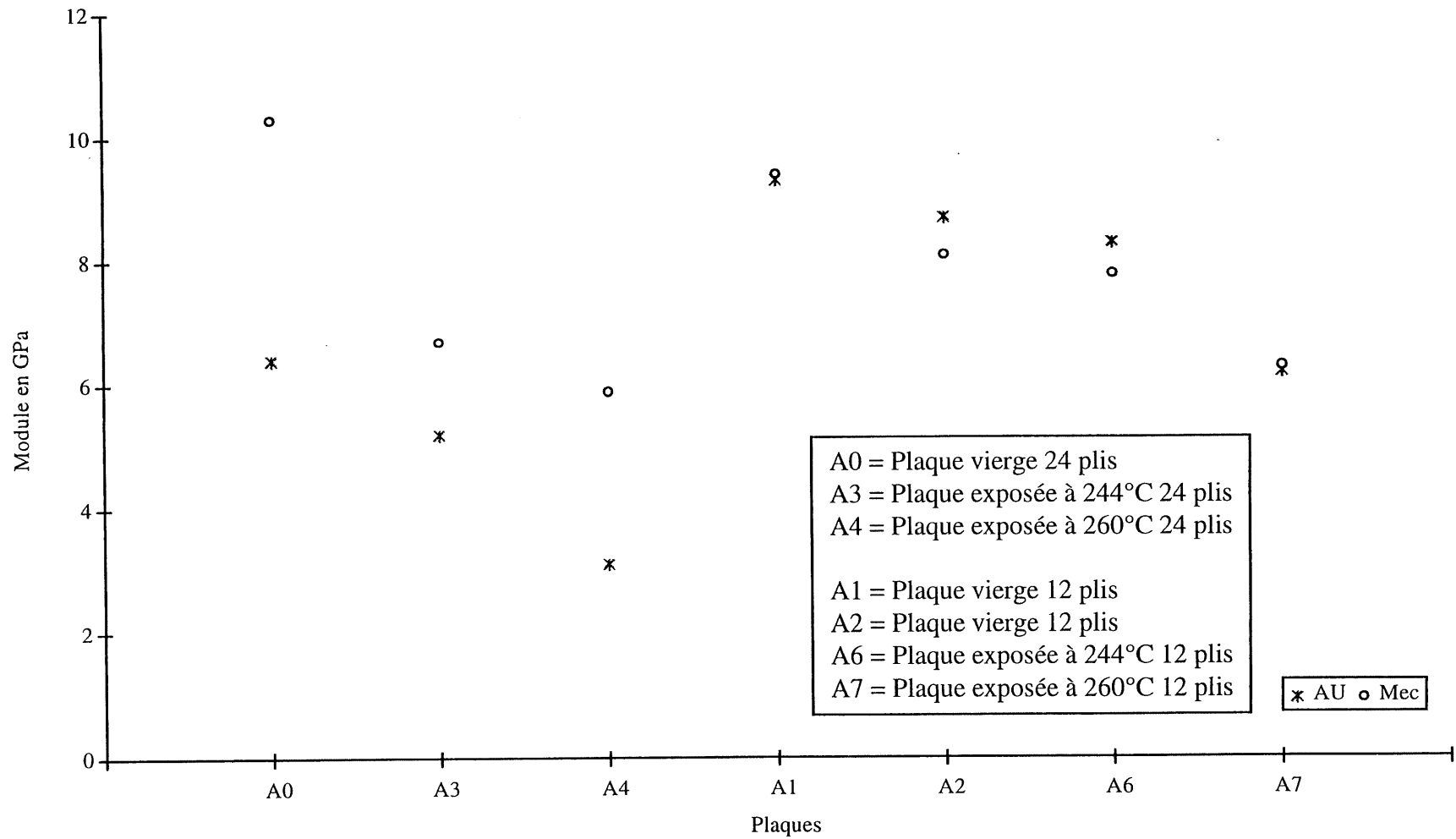


Figure 5.5 - Comparaison des modules d'élasticité E2 pour les plaques testées

En fait, le module dans le sens des fibres devrait rester sensiblement le même car en général les fibres de renforcement ont un coefficient d'expansion thermique plus faible que celui de la résine de plusieurs ordres de grandeurs. Les fibres de carbone AS4 ont un coefficient d'expansion thermique très faible voir égal à zéro dans le sens axial alors que l'époxyde de la matrice a un coefficient plutôt élevé. Cela se traduit bien dans le composite unidirectionnel de notre étude car dans le cas du composite AS4/3501-6, le coefficient d'expansion thermique est:

$$\alpha_L = -0.9 \times 10^{-6} / ^\circ C \quad \text{dans le sens longitudinal}$$

$$\alpha_T = 27 \times 10^{-6} / ^\circ C \quad \text{dans le sens transversal}$$

Il est donc normal et prévisible que l'exposition thermique ait très peu d'effet sur les plaques composites. Il reste que l'effet auquel on s'attend, s'il y en a, soit plutôt une diminution des propriétés mécaniques. Dans le chapitre 4 de cette étude, on observait que la contrainte à la rupture des plaques dégradées étaient plus faibles que celles des plaques vierges dans le sens longitudinal. Cette variation dans la contrainte de rupture, même si elle n'est pas importante (voir figure 4.2), correspond bien au fait que dans le sens des fibres il est très difficile d'apprécier l'effet thermique sur les propriétés mécaniques. Ainsi, le fait que le module de rigidité augmente peut provenir simplement soit du nombre restreint de mesures effectuées ou soit possiblement la présence de contraintes résiduelles dans le composite. En effet, lors du refroidissement des plaques, après l'exposition thermique à 244°C et 260°C, la matrice sollicite les fibres en compression qui sous l'effet du haut module des fibres se traduit donc par le développement de contraintes résiduelles de tension dans la matrice et à l'interface fibre-matrice [37]. Ce comportement peut expliquer la légère augmentation de la rigidité dans le sens longitudinal des fibres définie par le module d'élasticité  $E_1$ .

La figure 5.5 présente la variation de la rigidité dans le sens transversal des fibres pour les plaques composites testées. Pour chacune des deux épaisseurs de plaque, 24 plis ou 12 plis, la diminution du module d'élasticité  $E_2$  est apparent à la fois par les mesures acousto-ultrasoniques et les tests mécaniques. Cette fois-ci la variation du module d'élasticité est significative et de loin au delà des écarts normaux de 16% acceptables c'est à dire entre 19% et 52% pour les plaques de 24 plis et jusqu'à 33% pour les plaques de 12 plis.

Ces résultats indiquent que le composite perd de sa rigidité selon l'axe transversal par rapport aux fibres avec l'exposition thermique et que les propriétés de la matrice sont affectées lorsque la



résine est exposée aux hautes températures. Il est clair que pour un composite unidirectionnel, les propriétés de la résine dominent dans la direction transversale de même que le coefficient d'expansion thermique du composite AS4/3501-6 n'est pas négligeable. Donc ces résultats étaient prévisibles. Comme il a été mentionné plus haut, l'exposition thermique se traduit par un réchauffement puis un refroidissement d'où l'apparition de contraintes résiduelles. Ces contraintes peuvent se relaxer en brisant les liaisons moléculaires et ce faisant, il y a création de micro-endommagements dans la résine et à l'interface fibre-matrice. Ces micro-endommagements sont souvent responsables de multiples problèmes tels que délaminage, déchaussement et décohésion de la matrice ce qui ne manquent pas de dégrader les propriétés mécaniques du matériau dans le sens transversal. La figure 5.5 montre bien le résultat d'une dégradation thermique de la matrice.

Il vient donc que la dégradation thermique de la résine époxyde de la matrice en fonction de l'exposition thermique peut être identifiée et quantifiée en faisant des mesures dans le sens transversal par rapport aux fibres et que l'acousto-ultrasonique est un outil capable de caractériser ce type d'endommagement.

## **5.2 - Analyse microscopique**

Comme il a été dit plus haut, les contraintes résiduelles dues à l'exposition thermique peuvent contribuer à la formation de micro-endommagements dans les matériaux composites. Ces micro-endommagements se révèlent en général dans la matrice et autour des fibres par l'apparition de micro-fissures.

Un autre phénomène qui intervient est probablement le relâchement de gaz après l'exposition thermique. Pendant l'exposition, la résine en chauffant prend du volume alors que pendant le refroidissement elle se contracte.

Ainsi, à l'aide d'une inspection d'abord visuelle à l'aide d'une loupe et au microscope électronique à balayage (MEB) il est possible de mettre en évidence ces deux phénomènes.

L'examen visuel des plaques dégradées révèle une certaine décoloration de la surfaces (oxydation) La morphologie de la surface des plaques dégradées, surtout celles de 24 plis, a aussi subi des changements et ne ressemble plus à celles des plaques vierges. Cette rugosité superficiel est possiblement attribuable à un certain degré de pyrolyse qui a eu lieu dans la résine

lors de l'exposition thermique. Lee et ses collaborateurs [37] ont rapporté le même type d'observation dans leurs travaux sur le composite AS4/3501-6.

Des examens micrographiques ont été réalisés sur des coupes à travers les plaques dégradées le plus loin possible du bord pour tenter d'observer ce qui se passe le plus au centre possible.

Ainsi, trois vues ont été sélectionnées comme l'indique la figure 5.6:

- une vue normale aux fibres
- une vue parallèle aux fibres
- une vue avec forte inclinaison pour voir de façon étalé les fibres.

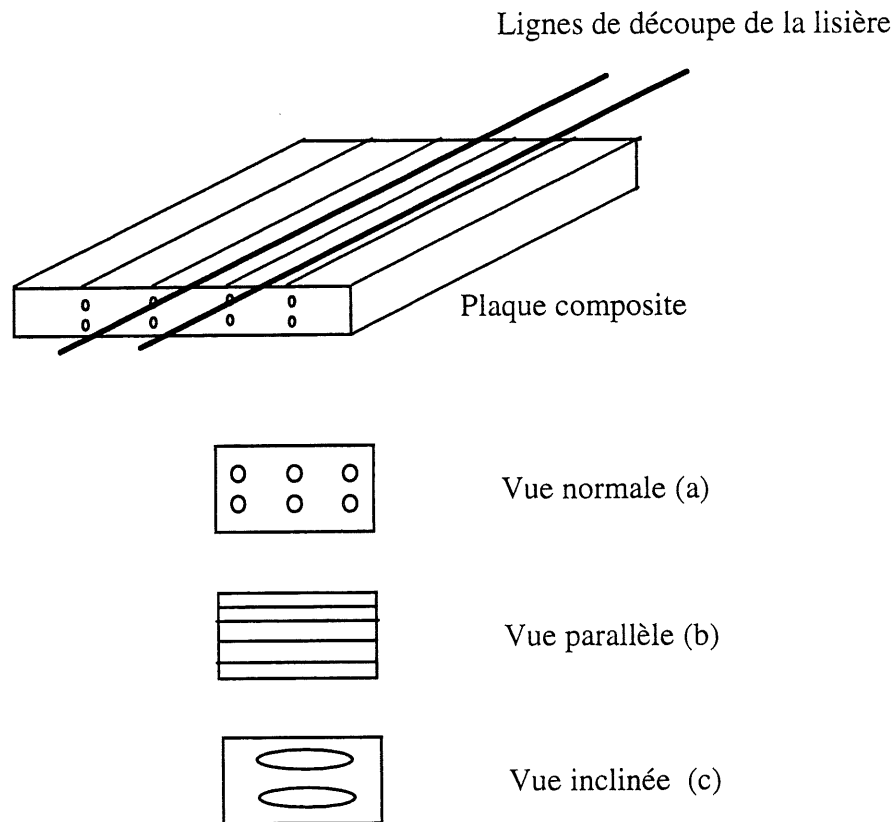


Figure 5.6 - Découpe des échantillons pour l'examen micrographique

Tous les échantillons prélevés des plaques composites sont alors imprégnés à la cire et enrobés d'époxy EPO-KWICK, sans évacuation pour éviter que l'époxy ne pénètre dans le composite.

On procède alors au sablage, nettoyage et polissage préliminaire sans alcool ou solvant organique afin de ne pas dissoudre la cire. Après examination au microscope optique, il a été déduit qu'un polissage secondaire était nécessaire pour la microscopie électronique à balayage (MEB). Il faut ensuite dissoudre la cire dans un bain d'alcool agité par un vibreur ultrasonique. Les échantillons sont alors prêts pour l'examen au microscope optique et au MEB.

Suivant que l'un ou l'autre des phénomènes dont il a été question plus haut agissent en combinaison dans le processus de dégradation du composite et de ses propriétés mécaniques, une série de photos ont été prises mettant en évidence les mécanismes d'endommagement.

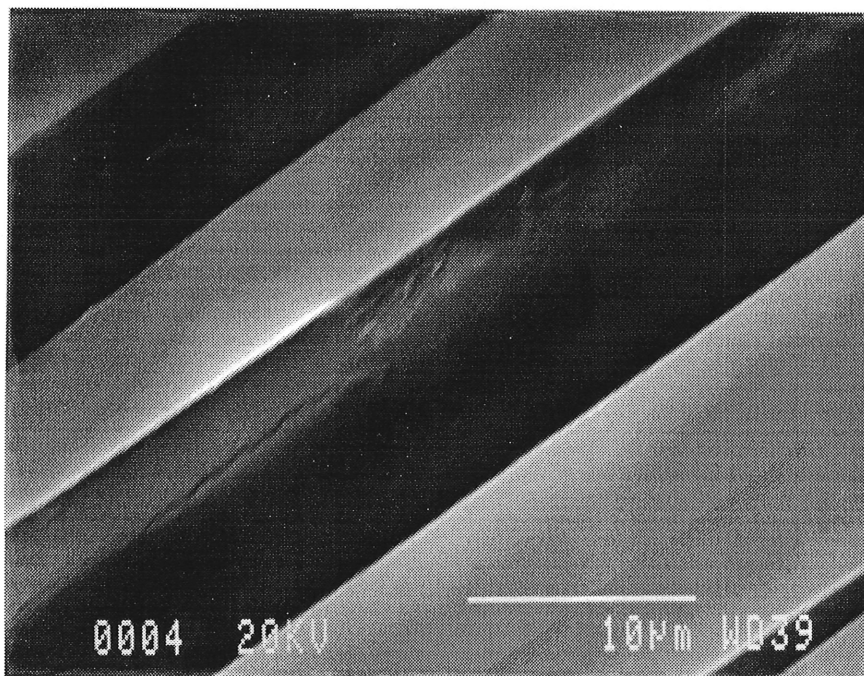


Photo 5.1 - Micro-fissurations dans la matrice

Sur la photo 5.1, on distingue les micro-fissures dans la matrice. Les contraintes résiduelles ainsi que la contraction dans la résine sont responsables de la naissance de cette endommagement. Comme le montre la photo 5.2, l'endommagement microscopique dans la matrice au niveau de l'interface fibre/matrice se propage en créant sur son passage décohéation et rupture de la matrice. À un certain seuil d'endommagement, les fissures se propagent dans les couches adjacentes comme le montre la photo 5.3. C'est déjà un endommagement macroscopique car on peut



discerner une certaine délamination ainsi que des ruptures transversales et longitudinales entre les couches.

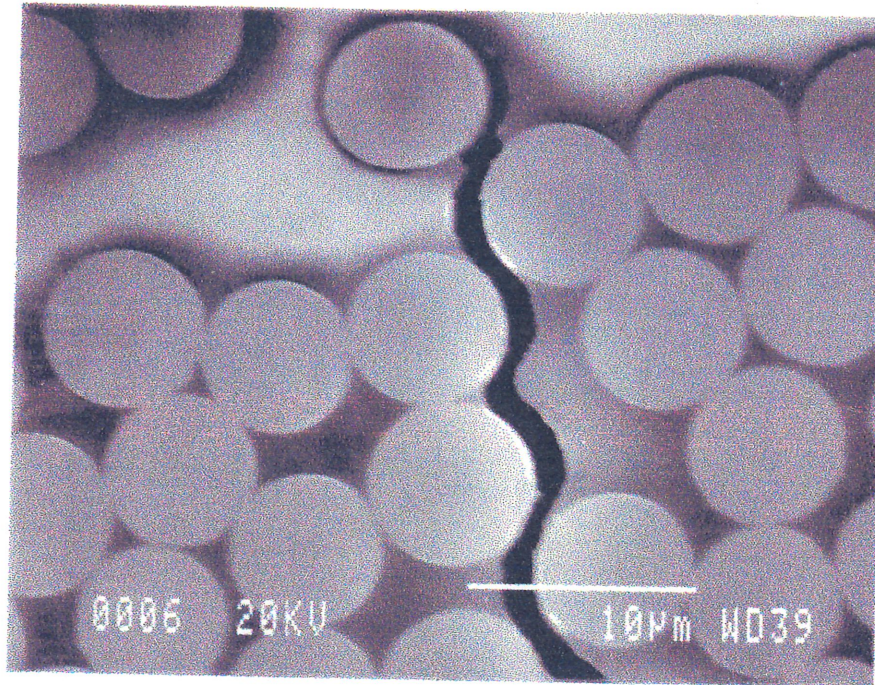


Photo 5.2 - Propagation d'une fissure dans l'interface fibre-matrice

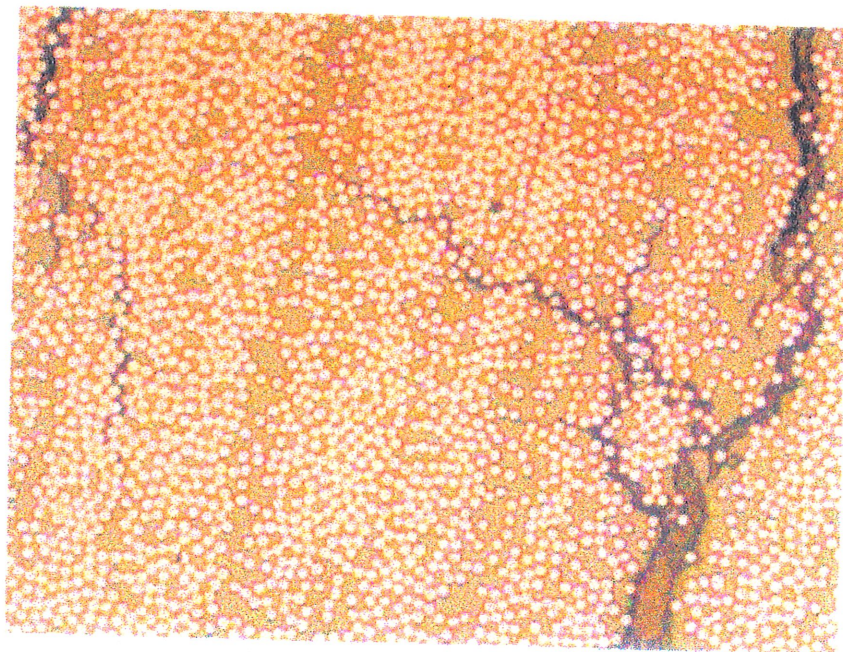


Photo 5.3 - Propagation de l'endommagement entre les couches



À partir des photos 5.4 et 5.5, on peut voir un autre type d'endommagement à savoir un déchaussement et un décollement par la présence de zones noires juste autour des fibres.

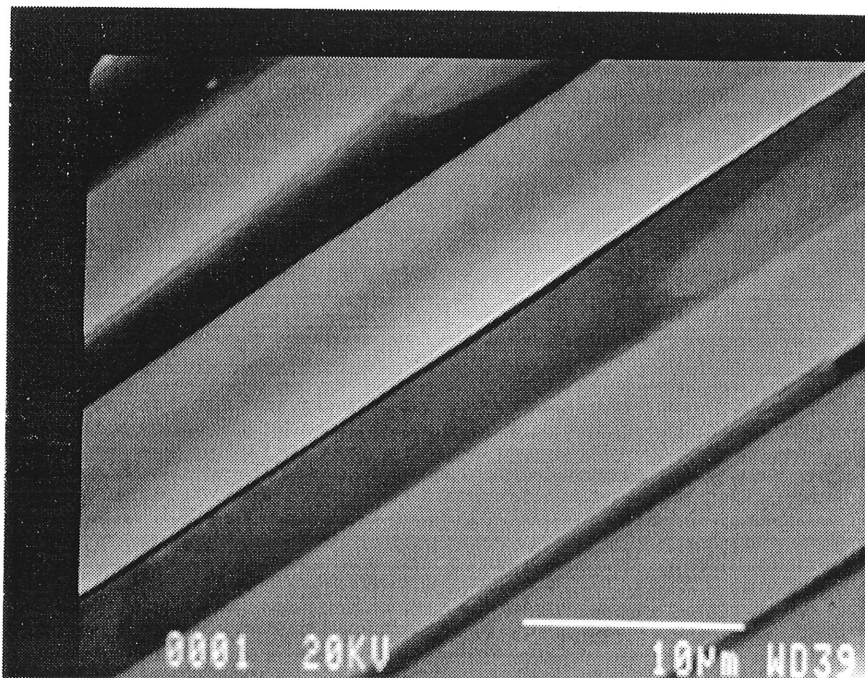


Photo 5.4 - Déchaussement autour d'une fibre, vue parallèle

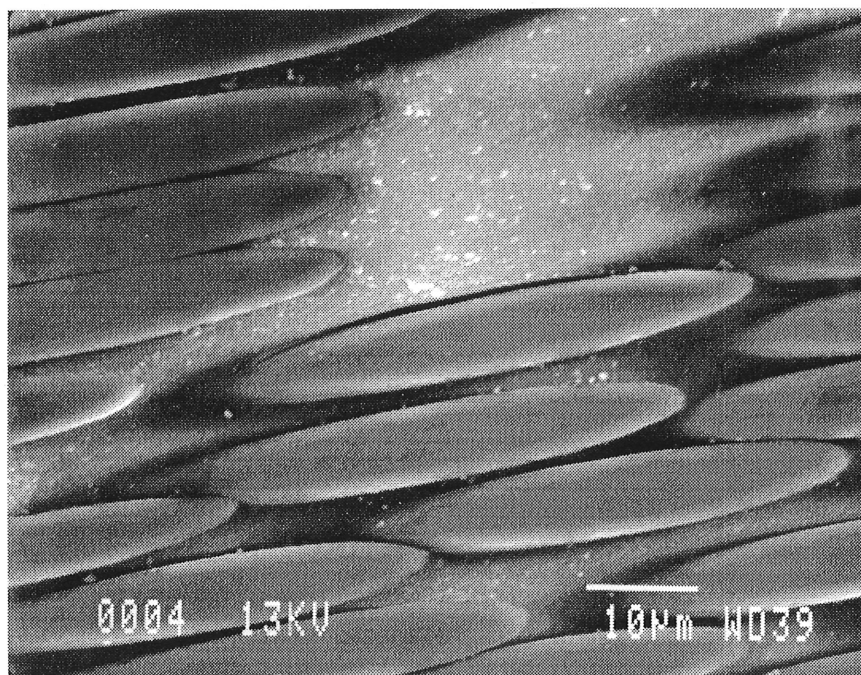


Photo 5.5 - Déchaussement autour d'une fibre, vue inclinée

On remarque aussi que ce phénomène se produit dans une région à faible concentration de fibre (voir photo 5.5). La photo suivante (photo 5.6) montre le résultat d'une décohésion et d'un déchaussement plus prononcé puisque la résine se détache de part et d'autre des fibres. Ceci suppose alors un mouvement de délamination.

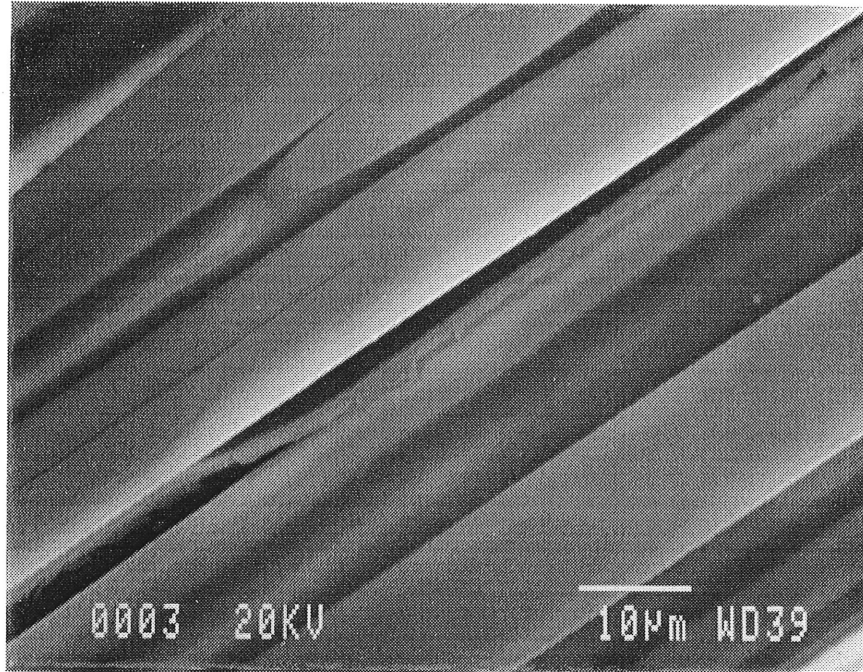


Photo 5.6 - Décollement de la résine autour d'une fibre

Effectivement en observant la photo 5.7, on remarque un pont de résine de part et d'autre de deux plis. Ici, c'est le décollement de la résine et un délaminage en mode I qui sont mis en évidence.

Le résultat auquel on aboutit quelque soit le type d'endommagement au départ, c'est un endommagement macroscopique comme montré à la photo 5.8 et à la photo 5.9.



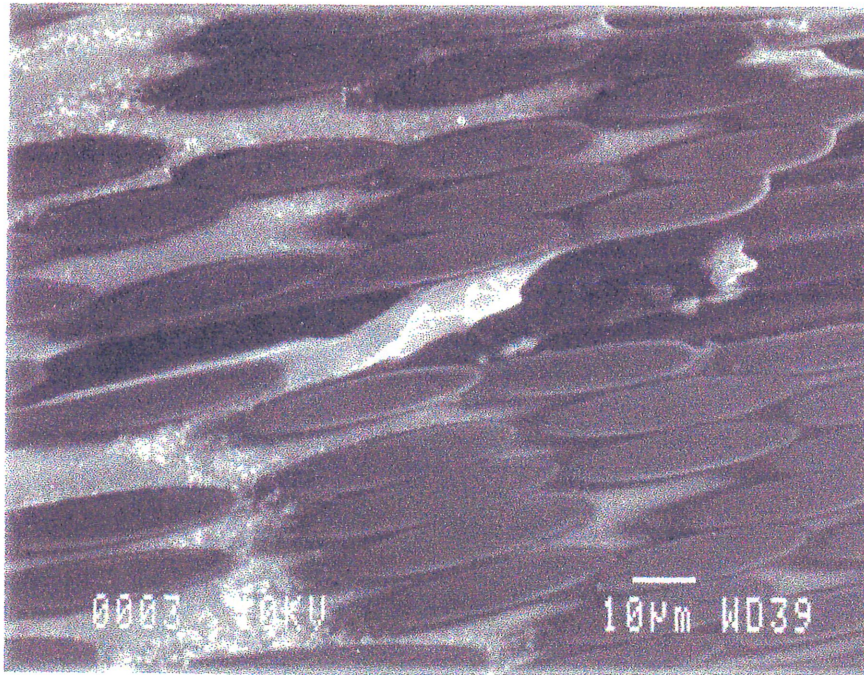


Photo 5.7 - Pont de résine entre deux plis

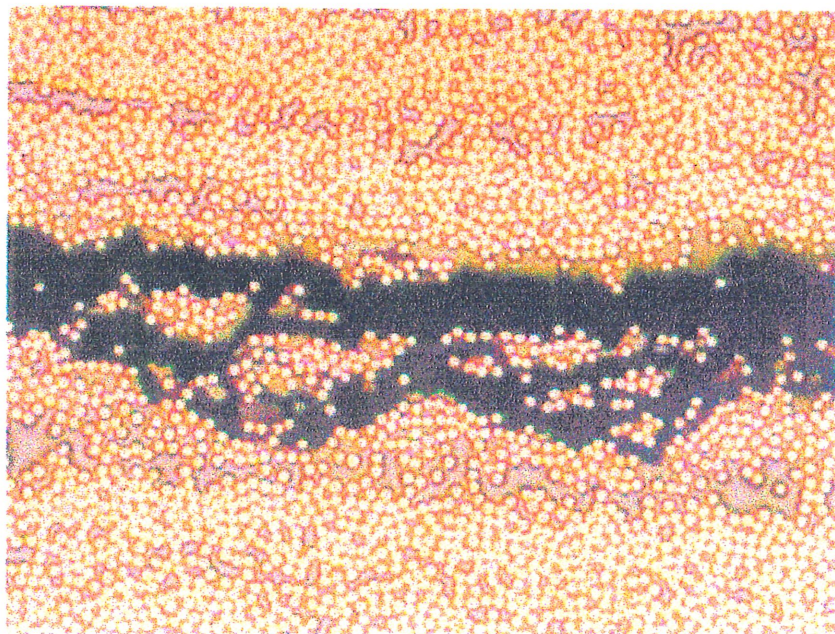


Photo 5.8 - Délaminage entre les couches

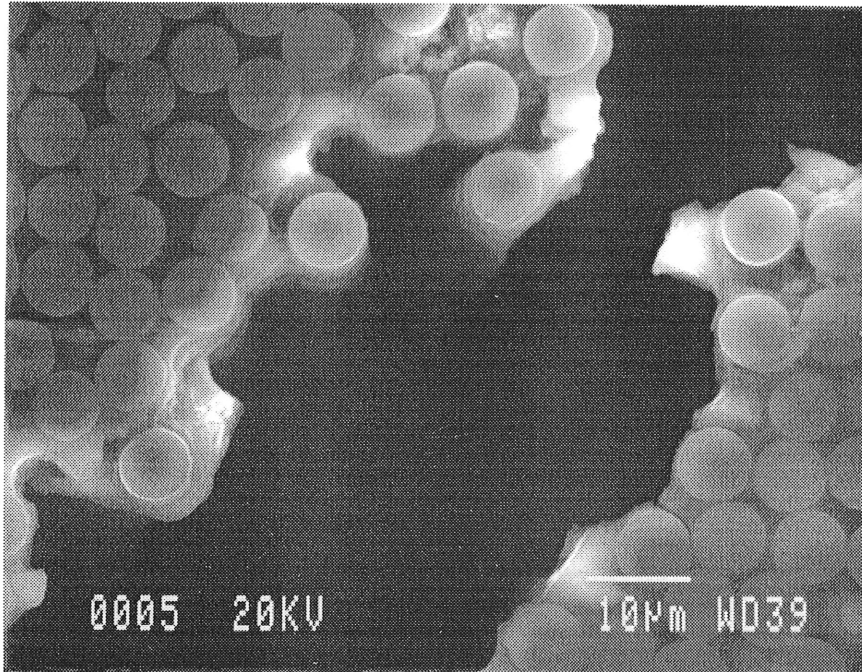


Photo 5.9 - Délaminage

Il est à noter que l'examen microscopique n'a révélé aucun endommagement dans les fibres quel que soit la plaque choisie. Par ailleurs, comme il a été démontré à l'aide des micrographies, seule la matrice exhibe de l'endommagement. Cela est conforme aux résultats discutés plus haut qui montre la dégradation des propriétés transversales du composite comme la conséquence de la dégradation de la matrice.

Ainsi, par la technique de l'acousto-ultrasonique, il a été possible de corrélérer les propriétés mécaniques des plaques composites aux mesures AU non seulement pour les plaques vierges mais aussi pour les plaques dégradées thermiquement. En effet, la dégradation thermique a été identifiée à partir des essais mécaniques de traction dans le sens transversal et à l'aide des mesures AU. Il a été possible de révéler cette dégradation en interrogeant le composite sur une seule face des plaques et sans les détruire. C'est dire à quel point notre méthode acousto-ultrasonique a pu être utile.



## CONCLUSIONS

Le présent travail s'est proposé de faire le suivi de la dégradation des propriétés élastiques pour diagnostiquer l'état de santé du composite AS4/3501-6 sollicité thermiquement. Ce suivi devait reposer sur une technique d'évaluation non-destructive fiable et pratique qui permettrait dans un premier temps de développer une méthodologie pour évaluer les propriétés mécaniques des composites. Dans un deuxième temps, il s'agissait de justifier le potentiel de la méthode du suivi déterminant l'effet d'une dégradation thermique sur les propriétés d'un composite.

Les résultats de cette étude permettent de tirer les conclusions suivantes:

- La méthode choisie, à savoir acousto-ultrasonique est une méthode fiable capable d'évaluer les modules d'élasticité des matériaux composites de façon non-destructive et avec l'accès à une seule face des plaques étudiées. En effet, l'onde injectée dans le matériau se transforme et "s'adapte" selon le matériau, la géométrie et les endommagements qu'elle rencontre produisant ainsi un signal de sortie complexe mais très riche en information.
- Les paramètres temporels (RMS, Énergie, Délai temporel,...) calculés à partir des techniques de traitement numérique des signaux acousto-ultrasoniques permettent de quantifier l'information contenue dans les signaux et d'évaluer l'effet de la dégradation thermique.
- Il a été possible de déterminer les modules d'élasticité de plaques composites vierges et dégradées thermiquement et d'évaluer l'endommagement dû à l'exposition en suivant l'évolution des propriétés en fonction de la température par la technique de l'acousto-ultrasonique et par essais mécaniques. La corrélation entre les mesures AU et les tests mécaniques permet d'affirmer que l'AU est capable d'évaluer l'endommagement thermique dans les plaques composites.
- Il a été démontré que la rigidité des plaques composites est affectée principalement dans le sens transversal lorsque les plaques sont exposées à des températures préjudiciables à l'intégrité de la matrice. L'analyse du module d'élasticité  $E$  a permis de quantifier le taux de dégradation du module en fonction de la température d'exposition thermique du composite.
- L'examen microscopique combiné à l'AU s'est avéré être une bonne technique pour corroborer les résultats. Elle a permis de confirmer les corrélations faites entre l'AU et les

tests mécaniques et la visualisation de l'endommagement de la matrice, le seul type d'endommagement observé dans notre étude.

À la lumière de tous ces éclaircissements, différentes extensions théoriques et expérimentales peuvent être suggérées:

- il serait intéressant de modéliser le signal de sortie acousto-ultrasonique afin de pouvoir déterminer tout changement lors de la propagation de l'onde dans le matériau composite.
- pour faciliter l'interprétation des résultats du traitement numérique, des techniques de reconnaissance de forme devraient être combinées à l'AU pour l'évaluation de la dégradation thermique sur le matériau composite à travers les paramètres temporels.
- l'expansion du programme expérimental de ce travail à plusieurs types de composites devrait aussi être envisagée ainsi que l'examination d'une plage d'exposition thermique plus large et des durées d'exposition plus grandes afin d'étendre la validité des techniques expérimentales utilisées.
- un système de mesure adaptatif tel que les réseaux de neurones, capable de discerner un échantillon dégradé d'un vierge devrait aussi être examiné.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1 - A. Vary, Acousto-Ultrasonics, Non-Destructive Testing of Fiber Reinforced Plastics Composites, Chapter 1, Vol. 2, J.Summerscales, Ed., Elsevier Applied Science Publishers, Essex, England, pp. 1-54, 1990.
- 2 - A. Vary, The Acousto-Ultrasonic Approach, NASA TM-78846, Technical Memorandum, 29p., 1987.
- 3 - Wolfgang Sachse and Yih-Hsing Pao, Ultrasonic Non-destructive Testing of Composite Materials, Air force AFOSR-TR-83-0150, Final Report, 51p., 1983.
- 4 - K. Rajaiiah, Ragghavendra Rao, Damage Assessment in Composites Through NDE: Some Recent Studies In India, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol, 13, pp. 125-135, 1990.
- 5 - K. Kawashima, M. Watanabe, I. Fujji and F. Gomi, Ultrasonic measurement of Anisotropic Elastic constants of Alumina/Aluminium composites, ICCM/9, Metal Matrix Composites, Vol. I, University of Zaragoza, Spain, pp. 227-233, 1993.
- 6 - K. Shinohara , T. Seo, Anisotropy of elastic constants of in Situ Pb-Sn eutectic composite measured by pulse-echo method, Sadhana, Vol. 1, Parts 3 & 4, pp. 389-396, 1987.
- 7 - J. E. Zimmer, J. R. Cost, Determination of the Constants of a Unidirectional Fiber Composite Using Ultrasonic Velocity Measurements, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 47, Numero 3 (Part 2), pp. 795-803, 1970.
- 8 - H. N. Hashemi, Ultrasonic Wave Propagation in Graphite Fiber Composites, Master of Science, MIT, USA, 1979.
- 9 - Voichita Bucur, Ondes Ultrasonores dans le bois - Caractérisation Mécanique et Qualité de certaines essences de bois, Thèse de Docteur Ingénieur, Saint-OUEN, FRANCE, 1984.
- 10 - Mansour Keyvani, Contribution à la caractérisation micromécaniques et ultrasonore du comportement et de l'endommagement des matériaux composites de type SMC, Thèse de l'école Centrale de Paris, FRANCE, 1992.
- 11 - Mudry, Launay, Preziosa, Gilleta, Mesure des constantes élastiques du bois par ultrasons, Revue d'acoustique, No 66, pp. 191-193, 1983.

- 12 - W. Reynolds, S. Wilkinson, The Propagation of Ultrasonic Waves in CFRP Laminates, Ultrasonics, pp. 109-114, May 1974.
- 13 - T. Vinh, Mesures ultrasonores de constantes élastiques des matériaux composites, Sciences et Techniques de l'Armement, 54, 2e Fasc., pp. 265-289, 1981.
- 14 - I. Ritchie, H. Rosinger, A. Shillinglaw, W. Fleury, The dynamic elastic behaviour of a fibre-reinforced composite sheet: I. The precise experimental determination of the principal elastic moduli, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 8, Great Britain, pp. 1733-1749, 1975.
- 15 - V. K. Srivastava, R. Prakash, Prediction of Material Property Parameter of FRP Composites Using Ultrasonic and Acousto-Ultrasonic Techniques, Composites Structures, No 8, pp. 311-321, 1987.
- 16 - A. Vary, Acousto-Ultrasonic Characterization of Fiber Reinforced Composites, Materials Evaluation, Vol. 40, No 6, pp. 650-654, May 1982.
- 17 - Moon, Jerina, Hahn, Acousto-ultrasonic wave propagation in Composite Laminates, Acousto-Ultrasonics: Theory and Application, Plenum Press, New York, USA, pp. 111-125, 1987.
- 18 - Minachi, Hsu, Determination of Elastic constants of thick composites using acousto-ultrasonic technique, Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Plenum Press, New York, USA, pp. 1623-1630, 1991.
- 19 - A. G. Beattie, Acoustic Emission, Principles and Instrumentation, Sandia Report, SAND 82-2825, 141p., 1983.
- 20 - E. Dieulesaint, D. Royer, Ondes élastiques dans les solides, Ed. Masson et Cie, 1974.
- 21 - Y. Chevalier, Testing Anisotropic Viscoelastic Composite media by ultrasonic waves - scalar invariants method, Durability of polymer based composite systems for structural applications, A. H. Cardon and G. Verchery, Ed., Elsevier Applied Science Publishers, Essex, England, pp. 336-344, 1991.
- 22 - C. A. Ross, R. L. Sierakowski, C. T. Sun, Dynamic Response of Composite Materials, SEM Education Committee Program, Second Ed., 29p., 1985.
- 23 - Jean Curutcharry, Sur la détermination des constantes élastiques des matériaux composites par une méthode ultrasonore, Thèse de docteur en physique, Université de Bordeaux I, France, 1974.

- 24 - A. Vary et R. F. Lark, Correlation of fiber composite Tensile Strength with the Ultrasonic Stress Wave Factor, TM-78846, NASA, Cleveland, 1978.
- 25 - K. Ono, R. De Spain, Characterization of Carbon Fiber Composites Using Acousto-Ultrasonic Techniques, Proceedings of the first International Symposium on Acoustic Emission from Reinforced Composites, Society of the plastics Industry Inc., pp. 1-5, Juillet 1983.
- 26 - A. Govada, E. G. Henneke, R. Talreja, Acousto-ultrasonic measurements to monitor damage during fatigue of composites, ASME, New York, USA, pp 55-60, 1984.
- 27 - H. E. Kautz, Acousto-ultrasonic verification of the strength of filament wound composite material, NDE, vol. 3, p.75, 1986.
- 28 - K. K. Phani, N. R. Bose, Hydrothermal ageing of CSM-Laminate during water immersion- An acousto-ultrasonic study, Journal Mat. Sci., Vol. 21, No. 10, pp. 3633-3637, 1986.
- 29 - Lorenzo, Hahn, Damage Assessment by Acousto-Ultrasonic technique in Composites, American Society for Testing & Materials, p.380-97, April-1<sup>st</sup> May 1986.
- 30 - Moon, Jerina, Hahn, Evolution of the Wave Envelope in Composite Laminates in Acousto-ultrasonic technique, Nondestructive Testing and Evaluation for Manufacturing and Construction, Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA, pp. 47-65, 1990.
- 31 - Kiernan, Duke, PC Analysis of an Acousto-Ultrasonic Signal, Mater. Eval., Vol. 46, No 10, pp. 1344-1352, Sept. 1988.
- 32 - A. Vary, Acousto-ultrasonics:an update, Acoustic Emission: Current Practice and Future Directions, North Carolina, USA, pp. 95-104, 20-23 Mar. 1989.
- 33 - D.L. Fecko, K.V. Steiner, J.W. Gillespie, Novel approach to visualization of Acousto-Ultrasonic data, Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings pt 2, Publ by Soc of Plastics Engineers, Brookfield, CT, USA, pp. 2366-2368, 1994.
- 34 - Haul-Te Chien, Shuh-Haw Sheen, Apostolos C Raptis, Alternative approach of Acousto-Ultrasonic technique for monitoring material anisotropy of fiber-reinforced composites, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency, Control Vol. 41 No 2, pp. 209-214, Mar 1994.
- 35 - S. Beland, R. F. Scott, C. Randon, C. Roy, A. Maslouhi, Evaluation of High Temperature Degradation in Composites Using Acousto-Ultrasonic Techniques, ICCM/9. Composites: Properties and Applications, Vol. VI, Madrid, Spain, pp. 843-850, 12-16 July 1993.

36 - H. E. Kautz, Determination of Plate Wave Velocities and Diffuse Field Decay Rates With Broadband Acousto-Ultrasonic Signals, J. Acoust. Emiss., 12, (1-2), pp. 65-70, Jan. 1994.

37 - Lee, Plamondon, Gaudert, The Effect of Elevated Temperature Spikes on Mechanical Properties of Carbon Fibre Epoxy Composites, 38 th International SAMPE Symposium, Society for the advancement of Material and Process Engineering, pp. 1582-1593, 10-13 May 1993.