

CHAPITRE 4

COMPOSITES HYBRIDES

Le présent chapitre sert à démontrer le potentiel d'utilisation des AMF dans des composites pour augmenter la sécurité et contrôler la propagation des défauts. Ce travail est basé principalement sur la capacité d'activation des AMF (pour ralentir la propagation des défauts) et leur interaction avec les composites.

Il faut tout d'abord démontrer que l'insertion des AMF ne nuit pas à la performance de la structure composite. De plus, il faut démontrer le potentiel de limitation d'endommagement en réponse à l'activation d'une structure AMF intégrée dans le composite. Le moyen pour y parvenir consiste à pratiquer des tests de traction comparatifs pour qualifier et quantifier les avantages et inconvénients de ce nouveau matériau. De plus, l'émission acoustique est utilisée conjointement aux tests de traction pour apporter des précisions sur l'état d'endommagement des structures. Pour débiter, il faut caractériser les matériaux composites utilisés et finalement, tester et comparer les composites hybrides de carbone / époxy / AMF.

La fabrication des composites hybride est un défi en soi car elle demande beaucoup de minutie et d'équipement. Une rigueur de travail est nécessaire pour assurer de bonnes propriétés mécaniques aux composites. À travers cette section, l'emphase est mise sur les méthodes ainsi que sur les équipements utilisés afin de produire des composites hybrides.

4.1 Préparation des fils

Le traitement thermique à 550 °C pendant une heure produit une couche d'oxyde sur la surface du fil. En plus d'augmenter la résistance électrique du fil, faussant les lectures provenant de l'utilisation comme jauge de déformation, elle nuit à l'adhérence entre le fil et la matrice du composite. Une solution acide composée de [28;29] :

- 3% vol. d'acide fluorhydrique (HF),
- 15% vol. acide nitrique (HNO_3),
- 82% vol. d'eau distillée

permet d'enlever la majorité de l'oxyde des fils lors d'une immersion de trois minutes. Par la suite, un léger sablage permet de compléter la désoxydation et d'augmenter la rugosité du fil. Ces étapes peuvent déformer le fil ou engendrer une transformation de phase par chauffage lors de l'immersion dans l'acide ou le chauffage par friction lors du sablage. Pour revenir à la structure qui permet la génération de contrainte, il faut chauffer les fils au delà de la température de fin de transformation austénitique (> 25 °C) et les refroidir en dessous de la température de fin de transformation de phase R (< 5 °C). Maintenant, le fil est sans déformation et sa structure se trouve en état biphasé à température ambiante et à contrainte nulle. Fait de façon manuelle, une déformation à environ 4,5 % de la longueur initiale est requise pour obtenir 4% de déformation après le retour élastique. Par la suite, un gabarit est utilisé pour aligner, séparer et tendre les fils dans la même direction avant l'intégration dans le composite (figure 36).

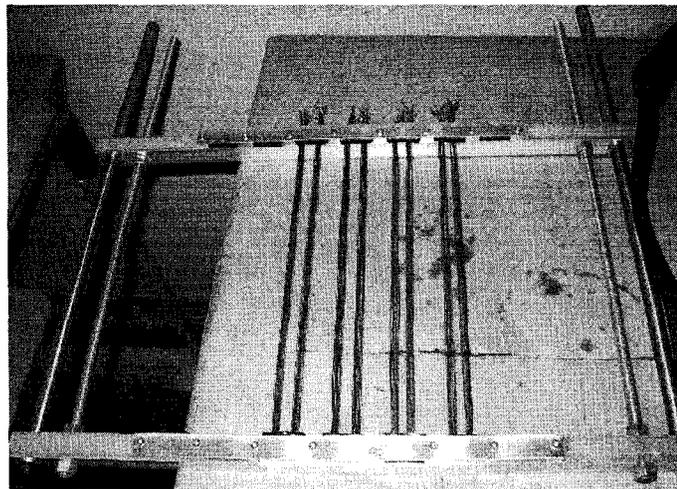


Figure 36 Gabarit pour retenir et aligner les fils

Chaque éprouvette de composite hybride est composée de vingt fils, séparés de façon égale. Une fois les fils tendus et bien disposés sur le gabarit, un dernier dégraissage à l'acétone complète la préparation des fils.

4.2 Préparation et fabrication du composite hybride

Dans la plupart du temps, l'adaptation du procédé de fabrication est faite en fonction du choix des matériaux, et ceux-ci sont choisis pour combler un besoin. Cependant, la facilité de fabrication peut être un facteur déterminant dans le choix d'un matériau. Justement, l'utilisation d'une résine et d'un durcisseur pour une cuisson à température ambiante a été préférée à l'utilisation des préimprégnés. Ces derniers nécessitent tous une cuisson à une température d'environ 180 °C pour les carbones époxy utilisés en aéronautique [43]. Une température élevée pendant plusieurs heures peut affecter négativement la performance de génération de contrainte de l'AMF (déformation plastique, fluage). Mais encore, il faut non seulement un gabarit permettant d'aligner les fils, mais aussi, il faut empêcher la contraction de ceux-ci pendant la cuisson du composite. La résine réticulant à température ambiante permet d'éviter ces nombreux problèmes. Elle est utilisée avec un tissu unidirectionnel de fibres de carbone, d'où l'empilement de plusieurs plis orientés différemment permet d'obtenir un stratifié. Le choix des angles d'orientation est déterminé par la norme ASTM D 5766 relatives aux tests de traction des composites comportant un trou pour concentrer la rupture au centre de la plaque. L'empilement angulaire est donc : $[45/90/-45/0]_{ns}$ où l'index (n) permet de répéter cette séquence symétrique et l'index (s) indique le nombre de fois désiré pour atteindre l'épaisseur voulue.

Avec l'épaisseur du tissu de carbone, 8 couches (n=2) sont nécessaires pour atteindre une épaisseur de deux à quatre millimètres. Le résultat donne un composite symétrique et balancé où les fils AMF se trouvent encastrés entre les couches à zéro degré. Pour améliorer la qualité du produit fini, une technique de fabrication d'ensachage sous vide est employée. En plus de réduire la présence de vide, cette méthode augmente le volume de fibre et uniformise la résine à travers l'échantillon. Pour faciliter et diminuer le temps de fabrication, une grande plaque est fabriquée et une fois coupée, elle produira plusieurs éprouvettes. Ne remplaçant pas les préimprégnés et la cuisson à l'autoclave en terme de qualité de produit fini, l'ensachage sous vide doit respecter un procédé de fabrication rigoureux, tel qu'expliqué dans l'énumération suivante, afin de garantir une qualité adéquate.

Matériel utilisé

- Tissu en fibre de carbone de 10 onces/verges carré (0.34 kg/m²), 4 plis à 45 °, 2 plis à 90 ° et 2 plis à 0 ° pour un total de 8 couches.
- Époxy, Mia-poxy 100
- Durcisseur, Hardener 95
- Plaque de mélamine servant de base de travail
- Plastique démoulant
- Plastique respirant
- Plaque, servant de poids
- Tissu absorbant
- Plastique étanche
- Adhésif
- Pompe sous vide avec connexions
- Rouleau de débullage
- Balance
- Fils d'AMF dans le gabarit (figure 36).

Procédure de mise en forme

Une fois que tous les matériaux sont coupés, les étapes suivantes doivent être respectées dans l'ordre et dans le temps :

1. Nettoyer la plaque de mélamine à l'acétone
2. Mettre l'adhésif (collant des deux côtés) tout le tour de la plaque, ne pas enlever le papier de la partie supérieur tout de suite.
3. À l'aide de la balance, mélanger la résine avec le durcisseur selon le ratio par poids suivant : 100 résine pour 24 durcisseur
4. À partir de cette étape-ci, un maximum de 38 minutes est permis pour se rendre jusqu'à l'étape # 20
5. Étendre un film de résine sur la plaque de mélamine
6. Mettre le tissu à 45 ° sur la résine et rajouter de la résine

7. Passer le rouleau sur le tissu pour bien étendre la résine et imbiber toute la fibre, tel que montré à la figure 37

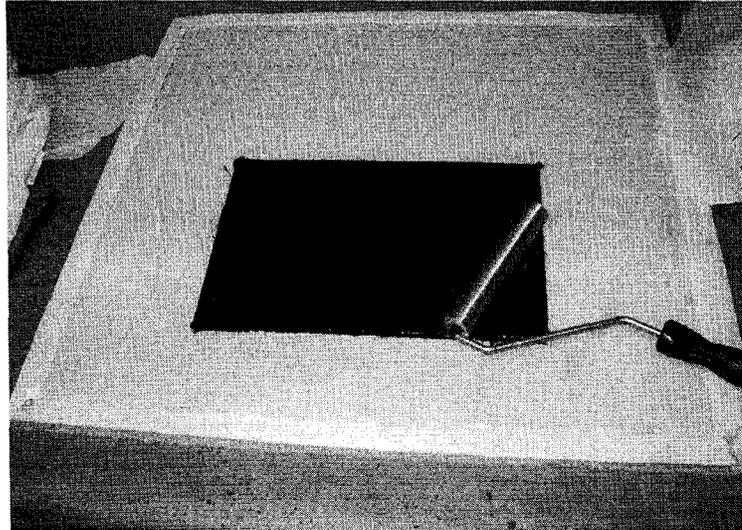


Figure 37 Préparation manuelle d'une plaque de composite

8. Mettre l'autre tissu de carbone à 90 °, et entre la résine et passer le rouleau
9. Répéter l'étape # 8 avec le tissu à -45 et 0 °
10. Mettre les fils d'AMF dans la direction à 0 °
11. Répéter l'étape # 8 avec le tissu à 0,-45,90 et le 45 °
12. Déposer tissu démoulant sur le stratifié
13. Déposer le plastique respirant
14. Mettre le coton absorbant
15. Déposer le poids
16. Mettre le coton absorbant
17. Placer la partie inférieure du raccord permettant de faire le vide
18. Sceller la plaque de mélamine avec le plastique étanche à l'aide de l'adhésif entourant la plaque. La figure 38 résume l'empilement des différents matériaux utilisés.

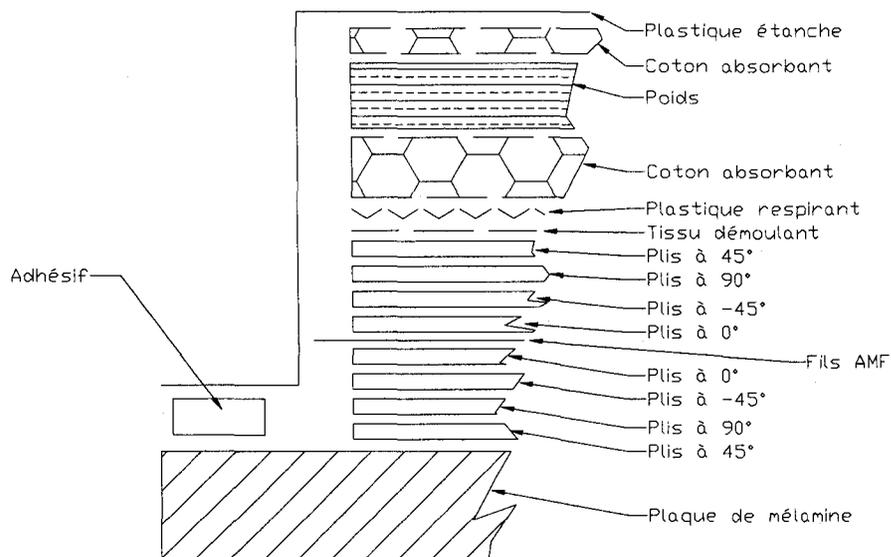


Figure 38 Ensachage sous vide

19. Percer le sac à l'endroit du raccord et connecter le boyau de la pompe à vide
20. Démarrer la pompe pour créer un vide pendant 24 heures (figure 39)

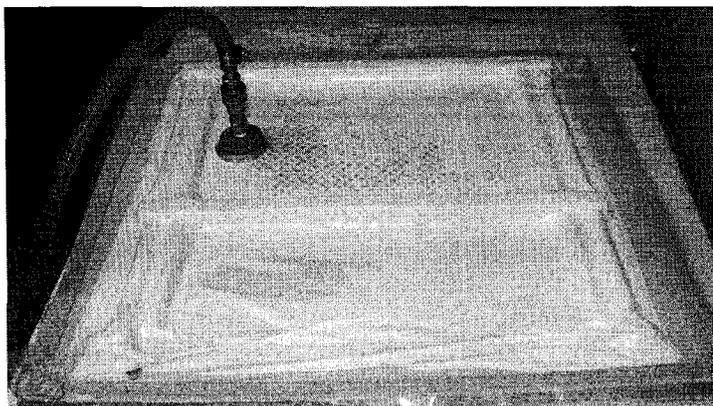


Figure 39 Vide créé sur une plaque de composite

21. Démouler la pièce
22. Laisser reposer pendant sept jours pour compléter la réticulation.

Le résultat est une plaque de composite hybride présentée à la figure 40.

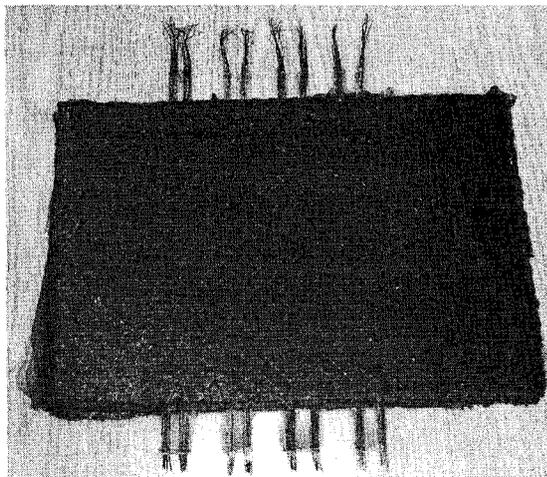
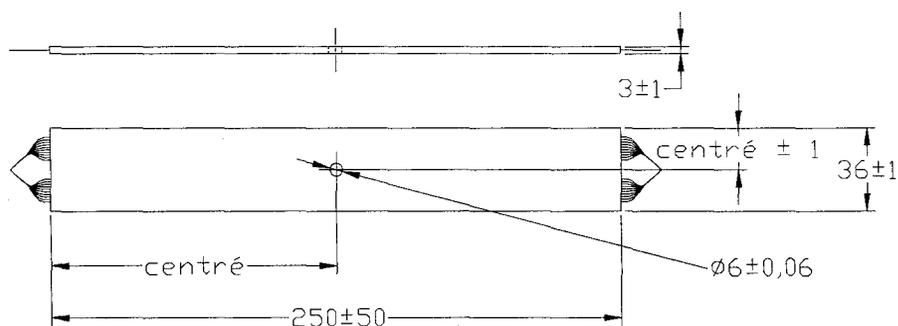


Figure 40 Plaque de composite hybride

La plaque est ensuite découpée et percée selon les spécifications de la norme ASTM D5766 (figure 41).



Dimensions en mm

Figure 41 Dimensions de l'éprouvette de composite

Certaines dimensions ont une grande tolérance de fabrication. Par contre, l'éprouvette doit respecter des critères géométriques supplémentaires. Le ratio largeur / diamètre du trou doit être maintenu à six et le ratio diamètre du trou / épaisseur doit être maintenu entre 1,5 et 3 (ASTM D5766). Pour diminuer la formation de fissure de délaminage, la plaque est coupée sur un banc de scie avec une lame à poussière de diamant. Un alignement précis de la coupe doit être fait pour centrer les vingt fils d'AMF. Le trou est

ensuite percé avec un forêt en acier rapide. Le perçage du composite doit être fait entre deux plaques pour éviter l'effilochage de fibres causé par l'effet de vis du forêt. Les arrêtes du trou doit être tranchante et non ébavurées. La surface du trou doit être sans fissure de délamination. Le résultat final est présenté à la figure 42.



Figure 42 Éprouvette de composite hybride

Vérification de la teneur en fibre de carbone

Un bon moyen de valider le procédé de fabrication consiste à faire une pyrolyse pour déterminer la teneur en fibre de l'échantillon. Cette technique est facile et rapide à utiliser. Il suffit de placer un échantillon de composite dans le four à 550 °C pendant une trentaine de minutes pour faire brûler la résine. Une fois que la résine est partie en fumée, il ne reste plus que les fibres de carbone. Le poids des éléments distinctifs est obtenu premièrement en mesurant le poids du composite (W_c) et ensuite celui des fibres (W_f). Le poids de la matrice (W_m) se calcule en soustrayant le poids du composite par le poids de la fibre récupéré après la pyrolyse.

$$W_m = W_c - W_f \quad (3.8)$$

En faisant l'hypothèse que la présence de vide est négligeable, la teneur en volume (v_f) s'obtient en utilisant la formule suivante :

$$v_f = \frac{\rho_m W_f}{(\rho_m W_f + \rho_f W_m)} \quad (3.9)$$

En connaissant la masse volumique des différents constituants :

$$\rho_m = 1218 \frac{kg}{m^3} \quad \text{et} \quad \rho_f = 1758 \frac{kg}{m^3}$$

la teneur en volume de fibre de l'échantillon représente 60 %. Selon la littérature [44], ce résultat prouve que notre fabrication avec ensachage sous vide est faite de façon adéquate.

Analyse de la fraction volumique d'AMF dans l'échantillon

Cette donnée permet de quantifier la quantité de matériaux actifs utilisés en fonction de la grosseur du composite. Un ratio d'aire permet de trouver rapidement la teneur volumique d'AMF (v_{AMF}) dans le composite.

$$v_{AMF} = \frac{S_{AMF}}{(S_{\text{échantillon}} - S_{AMF})} \quad (3.10)$$

La section des vingt fils (S_{AMF}) divisée par la section du composite sans les fils ($S_{\text{échantillon}} - S_{AMF}$) permet d'obtenir la fraction volumique d'AMF. Avec la configuration présente, la teneur volumique de fils AMF est d'environ 2,8 %.

4.3 Analyse des dommages par émission acoustique

Principe

Le principe d'écoute par émission acoustique repose sur le fait que chaque mécanisme d'endommagement d'un matériau peut être identifié grâce à sa signature acoustique. Les émissions acoustiques dans les composites sont produites par les mécanismes de ruptures comme : la fissuration de la matrice, le décollement des interfaces et les ruptures de fibres. Les émissions sont des vagues de contraintes produites par un relâchement d'énergie suite à l'initiation ou à la progression du mécanisme de rupture. Ces perturbations sont enregistrées à l'aide d'un capteur piézoélectrique qui convertit les vagues de contraintes relâchées par le matériau en un signal électrique. Bien qu'elles ne permettent pas de localiser l'endroit du défaut, cette méthode de détection semble particulièrement adaptée à notre problématique.

Équipement acoustique utilisé

Les essais sont effectués à l'aide d'un système complet d'analyse et d'acquisition d'émission acoustique "DISP", de marque "Physical Acoustic Corporation". Pendant

les phases de test, les signaux sont enregistrés par un capteur piézoélectrique fixé sur l'échantillon au moyen de ruban adhésif. La gamme de fréquences enregistrée par ce capteur est de 50 kHz à 200 kHz. Les signaux ont été amplifiés avec un gain total de 60 dB. Le seuil de détection du système d'émission acoustique a été fixé à 45 dB (tous évènements d'amplitude inférieure à 45 dB n'ont pas été enregistrés). Ce seuil permet de filtrer les bruits extérieurs lors des essais (bruits de la machine de traction par exemple).

Terminologie utilisée

On parvient à interpréter les résultats des mesures acoustiques en analysant quatre paramètres importants du signal acoustique : l'amplitude des évènements, l'énergie, le nombre d'évènements ou le nombre de "counts" et la durée de l'évènement. La figure 43 montre un signal acoustique typique avec sa terminologie associée.

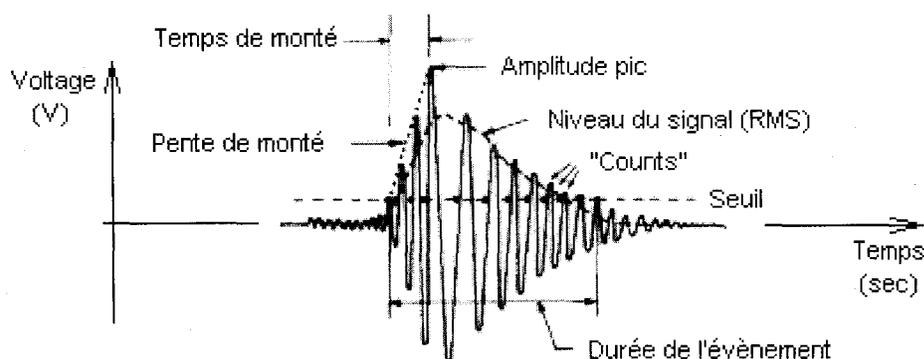


Figure 43 Terminologie du signal acoustique

- Amplitude :

Un son peut être caractérisé par son intensité, qualité qui fait distinguer un son fort d'un son faible. L'intensité, exprimée en décibel (dB), est liée à l'amplitude des vibrations sonores. Cette caractéristique renseigne directement sur la nature de l'évènement qui a généré le signal sonore (type du mécanisme d'endommagement). Les faibles amplitudes correspondent aux fissurations de la matrice (45-60 dB), les amplitudes moyennes, aux mécanismes de délaminage (60-85 dB), et les fortes amplitudes, aux ruptures de fibres (85-100 dB) [45].

- Nombre d'évènements ou "counts" :

Les "counts" sont le nombre de fois que le voltage de sortie du capteur croise le seuil fixé par l'utilisateur. Cette donnée est la plus utilisée pour l'analyse des composites. Le paragraphe sur l'application de l'émission acoustique décrira la façon d'interpréter les "counts" produits par le composite. Les évènements sont caractérisés par une onde comportant plusieurs "counts", la figure 43 représente un évènement. Elles peuvent étre cumulés pour suivre l'évolution d'une pièce sollicitée en fatigue pour identifier la rupture d'un pli ou l'avancée rapide d'une fissure qui génère un grand nombre de signaux acoustiques dans un court laps de temps. Ces informations donnent des indications sur les changements se produisant à l'intérieur du matériau.

- Énergie :

L'énergie (marse) d'un évènement correspond à l'aire mesurée sous l'enveloppe du signal. L'énergie est une fonction de l'amplitude de voltage et de la durée d'un évènement. Au même titre que le nombre d'évènements, l'énergie nous renseigne sur la santé de la pièce lorsqu'elle est mise en rapport avec l'allongement ou le niveau de charge agissant sur cette dernière. Il est possible de relier l'énergie libérée lors d'un essai de traction avec la rigidité de la pièce testée. Plus la pièce est rigide, plus l'énergie libérée par les évènements (dommages) est grande.

Application

Avec des tests destructifs, comme un test de traction, plusieurs propriétés du matériau découlent de la courbe contrainte - déformation, notamment : le module d'élasticité, la limite d'écoulement et la limite ultime en tension. Cependant, une courbe contrainte - déformation obtenue avec un composite, donne une estimation du module d'élasticité tandis que la limite d'écoulement ne peut pas étre définie. La courbe contrainte en fonction de la déformation ne peut pas donner d'indication sur les dommages permanents des composites. La seule valeur incontestable se trouve à étre la contrainte ultime.

Par contre, le point d'inflexion de la courbe d'émission acoustique en fonction de la charge semble être une bonne indication de la limite d'utilisation du composite. La figure 44 nous montre cette technique.

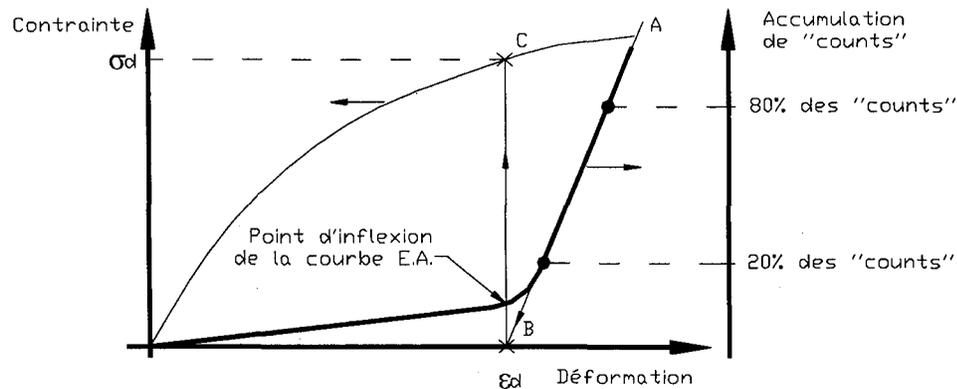


Figure 44 Point d'inflexion de la courbe d'émission acoustique

Selon Mitchell [46], cette méthode définit un point clair qui est équivalent à la limite d'écoulement des métaux. De plus, ce point d'inflexion est déterminé à partir de la mesure de l'énergie émise de l'intérieur du matériau plutôt que la mesure externe de la charge et du déplacement. Ce dernier correspond au début des dommages irréversibles. L'interprétation de la valeur numérique du point d'inflexion en terme de contrainte ou déformation s'obtient de façon graphique. Une ligne (A B, figure 44) est tracée entre le point à 80 % et 20 % de la courbe d'accumulation de "counts" en fonction de la déformation. L'intersection de cette ligne avec l'axe des x se trouve à être le point d'inflexion en déformation (B)(déformation de détérioration, ϵ_d). De ce point, une ligne verticale (B C) est tracée jusqu'à l'intersection de la courbe contrainte déformation. Ce point de jonction se trouve à être le point d'inflexion analogue à la limite d'écoulement pour un métal. Cette position se nomme la contrainte de détérioration (σ_d). Cette technique constitue donc, l'outil d'analyse de nos différents échantillons de composite hybride.

La position du point d'inflexion (R) par rapport à la contrainte ultime est une caractéristique propre au matériau. Un paramètre R (en %) s'obtient en divisant la contrainte de détérioration par la contrainte ultime. Ce paramètre est une

caractéristique propre du matériau. Pour un composite en fibre de verre / polyester, R se trouve à 40 % de la contrainte ultime, tandis qu'un composite de carbone / époxy R correspond à environ 70 %. Cette valeur reste inchangée pour les échantillons avec le même empilement, les mêmes matériaux et les mêmes conditions de chargement. Cette limite d'utilisation en fonction de la contrainte ultime demeure encore la même pour un composite dégradé en service. La contrainte ultime diminue en fonction des défauts présents, mais le paramètre R demeure inchangé. Cette technique est donc très performante pour tester et comparer des structures en composite.

4.4 Essais de traction combinés avec l'analyse acoustique

Methodologie

La réalisation des essais de traction s'effectue en 4 étapes:

1. Essai de calibration et rodage des systèmes:
Réalisé avec un échantillon sans AMF ni concentrateur de contrainte, le test est fait sur une machine de traction et avec l'écoute par émission acoustique.
2. Essai avec une plaque de composite muni d'un concentrateur de contrainte:
La norme ASTM D5766 propose de faire un trou au milieu de l'échantillon de composite pour concentrer la rupture au centre de la plaque. Les résultats de cette expérimentation servent de comparaison aux prochains essais.
3. Essai avec concentrateur de contrainte et fils métalliques:
Réalisé avec un échantillon muni d'un concentrateur de contrainte et des fils intégrés dans le plan milieu du composite, ce test sert à vérifier si l'ajout de fils métalliques proche d'un concentrateur de contrainte nuit à la performance générale du composite.
4. Essai avec concentrateur et fils d'AMF chauffés:
Réalisé avec un échantillon muni d'un concentrateur de contrainte et des fils AMF activés par résistance électrique, ce test sert à évaluer le gain de la contrainte et la déformation de détérioration en activant les fils AMF. Une

augmentation de ces valeurs indiquerait que le mécanisme peut arrêter la propagation des défauts.

Appareil de traction utilisé

La machine de traction utilisée est une *MTS 810* (Eden Prairie, MN, É.U.), pouvant générer 100 KN. Le contrôle s'effectue en déplacement et la valeur de la charge est mesurée par une cellule de charge. La fréquence d'échantillonnage est fixée à 2 Hz. La vitesse de déplacement, contrôlée hydrauliquement, est fixée à 1 mm/min. Mis à part l'intégration des AMF dans la structure, les tests reposent sur la norme ASTM D5766 décrivant le test de résistance en traction d'un laminé de composite à matrice de polymère.

Traction d'une plaque en composite sans concentrateur de contrainte et sans AMF

La résistance d'un composite est affectée par ses défauts. Même si l'échantillon n'a pas de trou au centre, de nombreux concentrateurs de contrainte existent. Le premier endroit se trouve sur les surfaces libres obtenues par découpage. La coupe affecte cette zone, qui est déjà normalement très sollicitée en cisaillement interlaminaire lors d'une traction due à l'anisotropie du matériau [3]. À très faible chargement, l'initiation de microfissures est remarquée. Deuxièmement, l'action de serrer l'échantillon dans les mors produit un changement de section et une forte contrainte de compression causant inévitablement la rupture aux mors. Donc, le but de ce premier essai de rodage consiste à vérifier le module d'élasticité et déterminer la contrainte et la déformation de détérioration par la technique de l'émission acoustique. La figure 45 montre la courbe de traction avec le résultat d'écoute par émission acoustique de l'échantillon A. Tandis que le tableau VII résume les valeurs importantes de cet essai sur la plaque sans concentrateur de contrainte ni AMF.

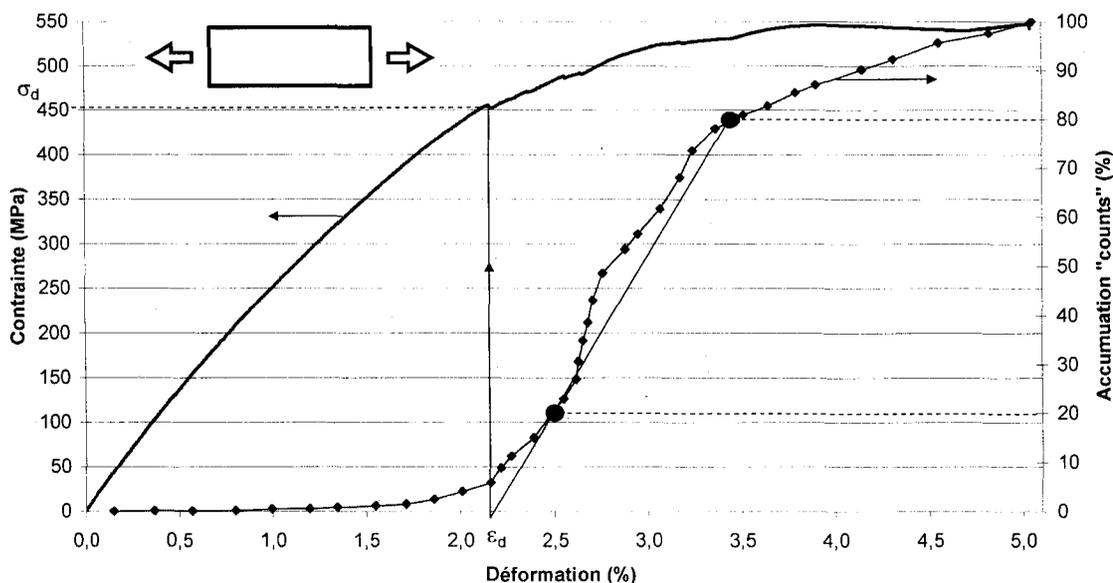


Figure 45 Résultat d'un essai de traction et émission acoustique sur une plaque composite

Tableau VII

Propriétés mécaniques d'une plaque de composite

échantillon	Description plaque	σ_d MPa	ε_d %	σ_u MPa	R (σ_d/σ_u) %
A	Sans cc, ni AMF	450	2,1	548	82,1

Bien que les matériaux composites soient des matériaux fragiles, la courbe contrainte - déformation montre une zone qui ressemble à un seuil de déformation plastique. Cette particularité est le résultat d'un matériau multicouche orthotrope se brisant d'une couche à l'autre, en suivant la propagation d'une fissure principale. Dans d'autres cas, lorsque le matériau est plus homogène, la rupture se produit en escalier. Le pli le plus faible brise en premier, transmettant la charge au second et ainsi de suite.

Les amplitudes ou les énergies provenant de la signature acoustique sont difficiles à analyser pour un composite multicouche. Les différents modes de ruptures se

produisent de façon aléatoire sur chacun des plis. Par contre, l'initiation des dommages est bien définie par la fissuration de la matrice et par la suite, le signal devient vite saturé d'informations. Donc, pour les tests comparatifs, la contrainte et la déformation de détérioration ainsi que la position du point d'inflexion seront les seules informations utiles provenant de l'émission acoustique. La contrainte ultime ne représente pas la vraie contrainte maximale de ce type de matériau puisque la rupture est produite aux mors de la machine. Pour déterminer la contrainte ultime, il faut utiliser des talons pour éviter la concentration de contrainte causée par les mors de la machine. Par contre, la position du point d'inflexion R, exprimé en pourcentage de la contrainte ultime, devrait rester au même endroit, même pour un échantillon endommagé. Le prochain test fera cette preuve.

Traction sur une plaque avec concentrateur de contrainte et sans AMF

La façon de provoquer la rupture du composite au milieu de l'échantillon consiste à faire un trou au milieu de celui-ci. Un composite est un matériau fragile, ou il n'y a pas de phénomène de striction et très peu de déformation plastique. Le trou va engendrer une concentration de contrainte qui diminuera la résistance mécanique de l'éprouvette et localiser la zone d'endommagement. Tous les composites présentent un comportement élastique linéaire avant la rupture, c'est-à-dire sans déformation plastique. Ils sont alors très sensibles aux entailles ou aux défauts. Le trou au milieu de la plaque permet de concentrer les contraintes sur une seule région de la plaque. La figure 46 nous montre l'essai de traction représentatif de la plaque avec un concentrateur de contrainte en forme de trou de 6 mm de diamètre.

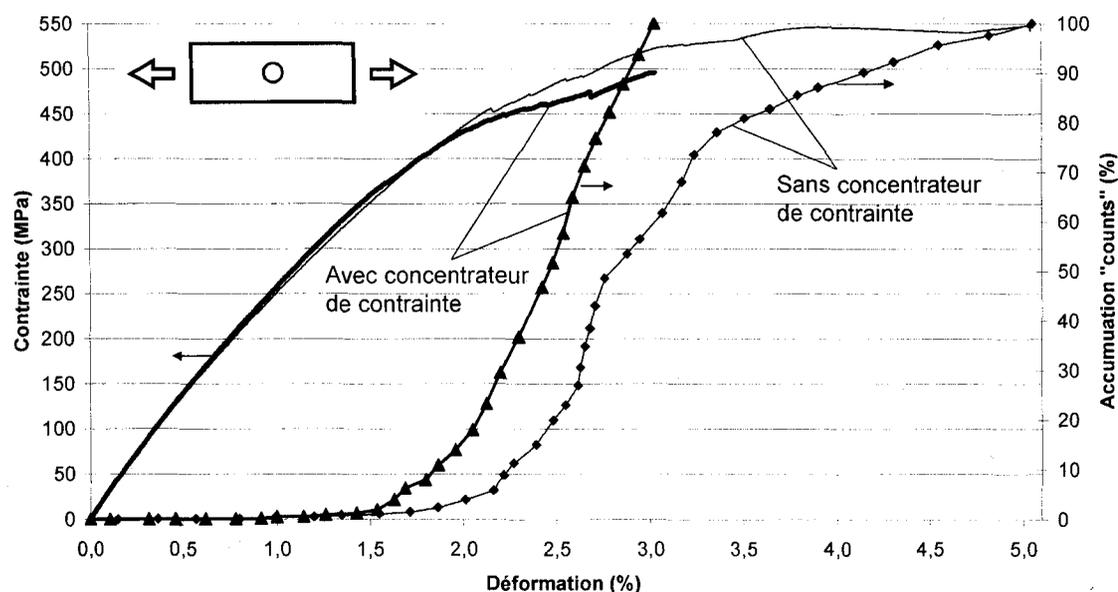


Figure 46 Test de traction et émission acoustique sur une plaque avec et sans concentrateur de contrainte

Selon la norme ASTM, la contrainte est calculée à partir de l'aire complète de l'échantillon, sans considérer le trou. Pour obtenir des résultats comparables à d'autres tests de ce genre, il faut respecter les dimensions géométriques proposées par la norme. Pour donner un ordre de grandeur, en considérant la diminution de l'aire causée par la présence du trou, les valeurs de la contrainte augmentent d'un facteur de 1,2. Avec cette correction, le niveau de contrainte développée avant la rupture entre ces deux échantillons est similaire. Par contre, le comportement est différent au niveau de la déformation. Le trou concentre la contrainte et la déformation dans la section centrale, tandis que l'échantillon non troué comporte deux zones fortement sollicitées, c'est-à-dire près des mors du haut et du bas. Cette différence se voit dans la déformation à la rupture qui atteint presque le double pour un échantillon sans concentrateur de contrainte. Point de vue sonore, la rupture est beaucoup plus nette et régulière sur l'échantillon avec une concentration de contrainte. Le tableau VIII résume les valeurs numériques des deux tests.

Tableau VIII

Propriétés mécaniques des différentes plaques de composite avec et sans trou

échantillon	Description plaque	σ_d MPa	ε_d %	σ_u MPa	R (σ_d/σ_u) %
A	Sans cc, ni AMF	450	2,1	548	82,1
B	Avec cc, sans AMF	412,3	1,86	495	83,3
différence (%)		-8,4	-11,4	-9,7	1,4

Le module d'élasticité reste inchangé et la position du point d'inflexion de la courbe d'émission acoustique est semblable. Ce sont les résultats identiques que les échantillons de même fabrication et composition doivent avoir.

Contrairement aux matériaux métalliques, l'effet de l'entaille sur la résistance varie selon la grosseur de cette entaille et pratiquement indépendamment de sa géométrie. Pour un trou de gros diamètre (largeur/diamètre ≤ 6) sous chargement axial, la valeur du concentrateur de contrainte approche le facteur théorique des plaques larges par la relation suivante [47]:

$$K_t = 1 + \left\{ 2 \left[\left(\frac{E_x}{E_y} \right)^{\frac{1}{2}} - \nu_{xy} \right] + \frac{E_x}{G_{xy}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

De plus, il a été démontré que l'équation précédente se réduisait à la valeur bien connue $K_t = 3$ pour un laminé quasi isotropique. Donc, le facteur de concentration de contrainte de nos échantillons est égal à 3. Par contre, au fur et à mesure qu'il y a ruptures des plis du laminé, l'échantillon perd ses propriétés de quasi-isotropie. Alors, le facteur de concentration de contrainte augmente légèrement. Il est alors facile de supposer qu'une éprouvette parfaite peut résister à 3 fois plus de charge qu'une éprouvette trouée. En réalité, les effets de bords jumelés aux défauts présents réduisent de beaucoup l'influence du concentrateur de contrainte sur la rupture. La majorité des délaminations partent des surfaces libres, puisqu'il y a de grandes contraintes de cisaillement interlaminaire. Donc, un échantillon sans concentrateur de

contrainte serait plus de un et moins de trois fois supérieures aux valeurs de l'éprouvette avec concentrateur de contrainte.

Étant donné que notre étude est comparative, la vraie valeur de la contrainte ultime n'est pas importante. Il faut un test qui soit répétitif et stable. Avec le trou au milieu, les échantillons brisent tous au même endroit et la façon de retenir les éprouvettes n'influence pas les résultats. À présent, tous les autres tests seront faits avec un concentrateur de contrainte. La modification des matériaux composites avec l'intégration des AMF pourra alors être comparée.

Traction sur une plaque avec concentrateur de contrainte et fils métalliques

Le procédé de fabrication, les impuretés ainsi que les changements de section influencent directement les performances des composites. Ici, les fils encastrés de 0,4 mm de diamètre sont beaucoup plus gros que les fibres de carbone qui mesurent seulement quelques microns. Cette grande différence cause des zones riches en résine et du même coup génère des concentrateurs de contraintes dans leur proximité. Pour le test de traction sans activation des AMF, un remplacement a été fait pour des raisons économiques. Occupant le même volume et ayant une rigidité semblable sur le plateau de chargement de l'AMF, un alliage de cuivre simulera la présence et l'influence des AMF. La figure 47 représente le résultat du test avec et sans fil.

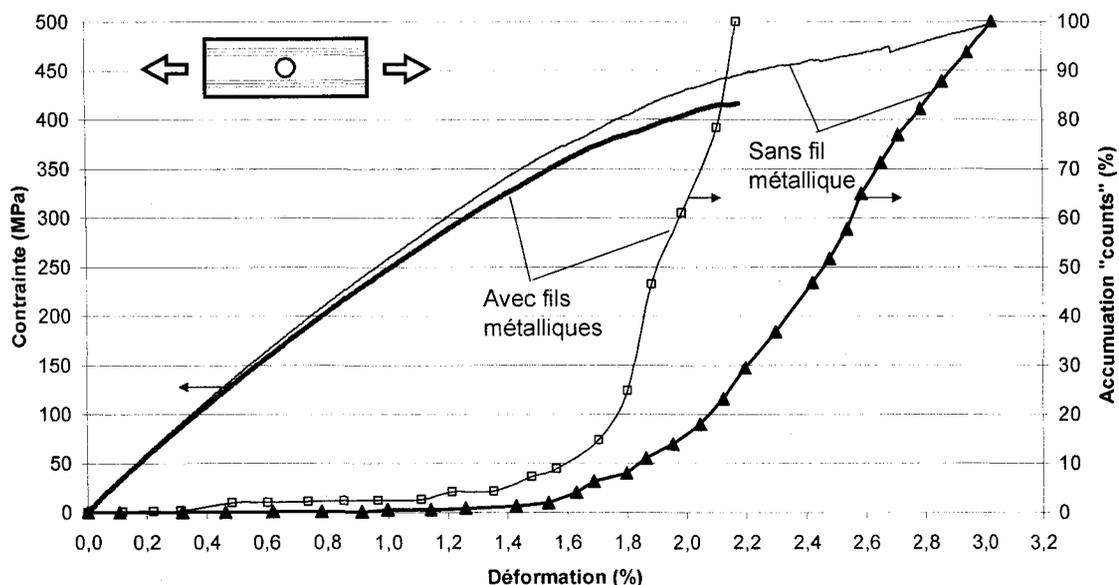


Figure 47 Test de traction et émission acoustique sur une plaque avec concentrateur de contrainte sans et avec les fils simulant les AMF

Les fils affectent la structure sur la contrainte ultime, la rigidité et la déformation avant la rupture. Le tableau IX donne les valeurs numériques de cette comparaison.

Tableau IX

Propriétés mécaniques des différentes plaques de composite avec et sans fil

échantillon	Description plaque	σ_d MPa	ε_d %	σ_u MPa	$R (\sigma_d/\sigma_u)$ %
B	Avec cc, sans fil métallique	412,3	1,86	495	83,3
C	Avec cc, avec fils métalliques	369,6	1,67	416	88,8
différence (%)		-10,4	-10,2	-16,0	6,7

L'intégration de ce renfort nuit légèrement au comportement global du composite. Du point de vue acoustique, ce matériau est différent. La position du point d'inflexion R se trouve à être beaucoup plus proche de la contrainte ultime pour le composite avec renfort métallique. Une solution afin de réduire au maximum les effets négatifs d'un corps étranger dans le composite, serait de réduire considérablement le diamètre des

fils. Ce changement améliorerait du même coup la performance de jauge résistive de l'AMF.

Traction sur une plaque avec fils AMF activés

Dans cet essai, le composite hybride est activé avant d'appliquer une charge sur celui-ci. Cette expérimentation devrait démontrer le potentiel d'activation des AMF en un seul test. Les résultats sont ensuite comparés à l'éprouvette avec fils non activés (figure 48). Les fils sont chauffés jusqu'à 110 °C. Le tableau X présente les valeurs numériques de cet essai.

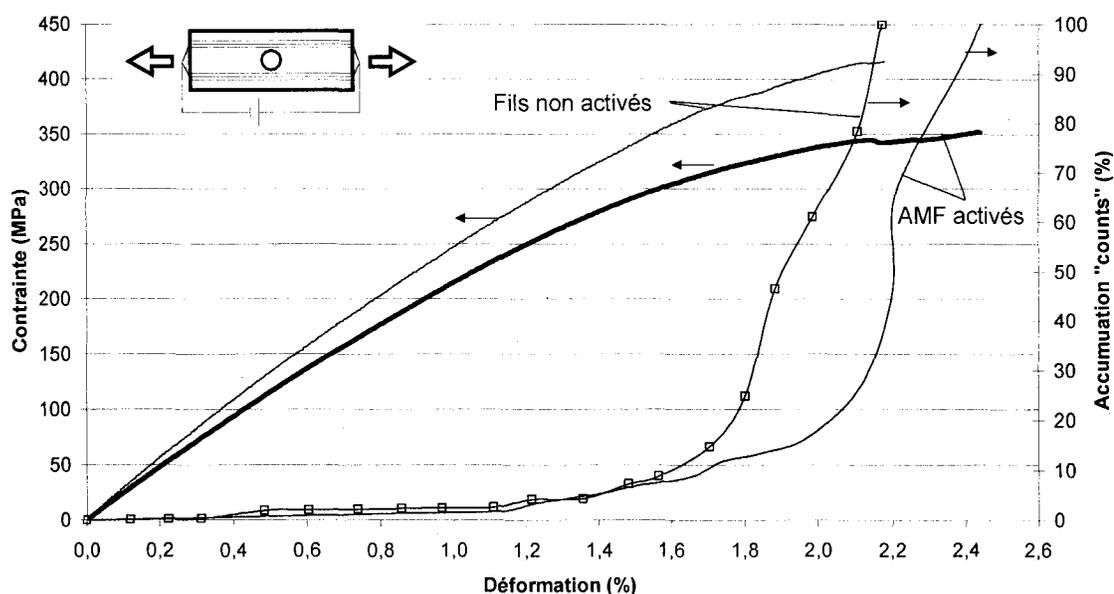


Figure 48 Test de traction et émission acoustique sur une plaque avec fils activés et non activés

Tableau X

Propriétés mécaniques des différentes plaques de composite avec et sans activations

échantillon	Description plaque	σ_d (MPa)	ε_d (%)	σ_u (MPa)	R (σ_d/σ_u) (%)
C	Avec cc, avec fils métalliques	369,6	1,67	416	88,8
D	Avec cc, avec AMF activé	335,1	1,95	351,4	95,4
	différence (%)	-9,3	16,8	-15,5	7,3

L'émission acoustique indique encore une fois la modification de la structure avec une augmentation de la position du point d'inflexion R lorsque l'échantillon est chauffé. De plus, un retardement de la déformation de détérioration (ε_d) est remarqué. Par contre, la baisse de performance du composite hybride, au niveau de la contrainte de détérioration (σ_d), s'explique de la façon suivante. Malgré le fait que les fils AMF génèrent une force, celle-ci demeure négligeable devant la force totale appliquée sur le composite. En effet, les 20 fils de 0,4 mm de diamètre génèrent une force de 1,18 KN tandis que le composite commence à se détériorer au-dessus de 40 KN. Donc, avec une intégration de 2,75 % volumique d'AMF, la force générée représente seulement 3 % de la force de début de détérioration du composite. Cependant, cette augmentation de force est contrecarrée par l'augmentation de la température pendant l'activation des fils ce qui diminue la rigidité du composite. Cette réduction est directement causée par le polymère du composite. Pour s'en assurer, deux tests ont été pratiqués sur la résine époxy. Le premier consiste à faire une DSC avec un échantillon pour connaître ses propriétés thermiques. Un balayage de 0 à 175 °C à une vitesse de 10 °C par minute permet de bien visualiser sur la figure 49 la transformation vitreuse de cet époxy.

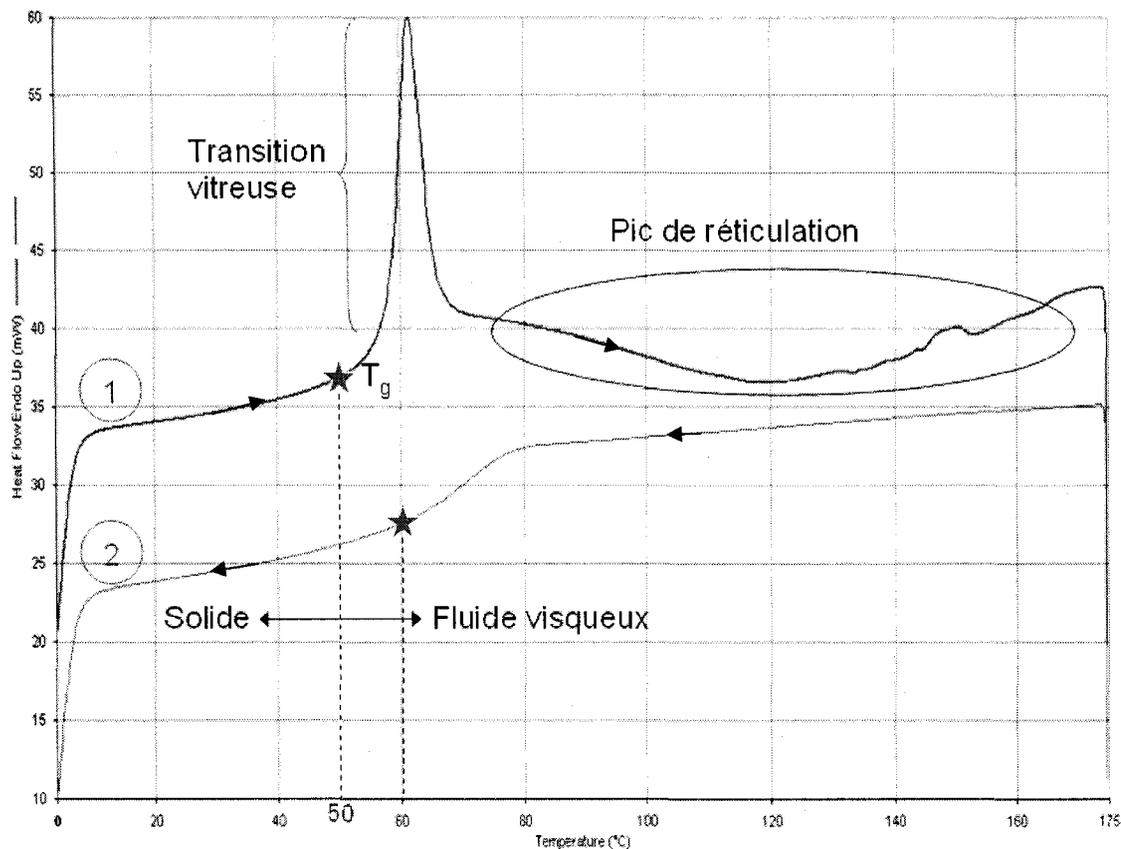


Figure 49 DSC sur la résine utilisée (1 : comportement au chauffage, 2 : comportement au refroidissement)

La courbe 1 représente le chauffage de 0 à 175 °C. La température de transition vitreuse coïncide avec le bas du pic endothermique qui correspond à environ 50 °C. Par la suite, la bosse exothermique indique une réticulation de la résine. La courbe 2 représente le refroidissement de celle-ci. La température de transition vitreuse est caractérisée par le point d'inflexion de la courbe, soit à environ 60 °C. Cette température est légèrement plus élevée au refroidissement qu'au chauffage puisque la réticulation a été complétée en chauffant le polymère.

Afin de valider ces résultats et de bien comprendre l'influence de la température sur le composite, le second test consiste à tester le polymère en traction à différentes températures. Pour ce faire, des cylindres d'époxy ont été fabriqués dans le but de calculer la rigidité à différentes températures. Les résultats mis sur une échelle

logarithmique montrent qu'à environ 50 °C, il y a une chute de la rigidité qui caractérise le point de ramollissement du polymère (figure 50).

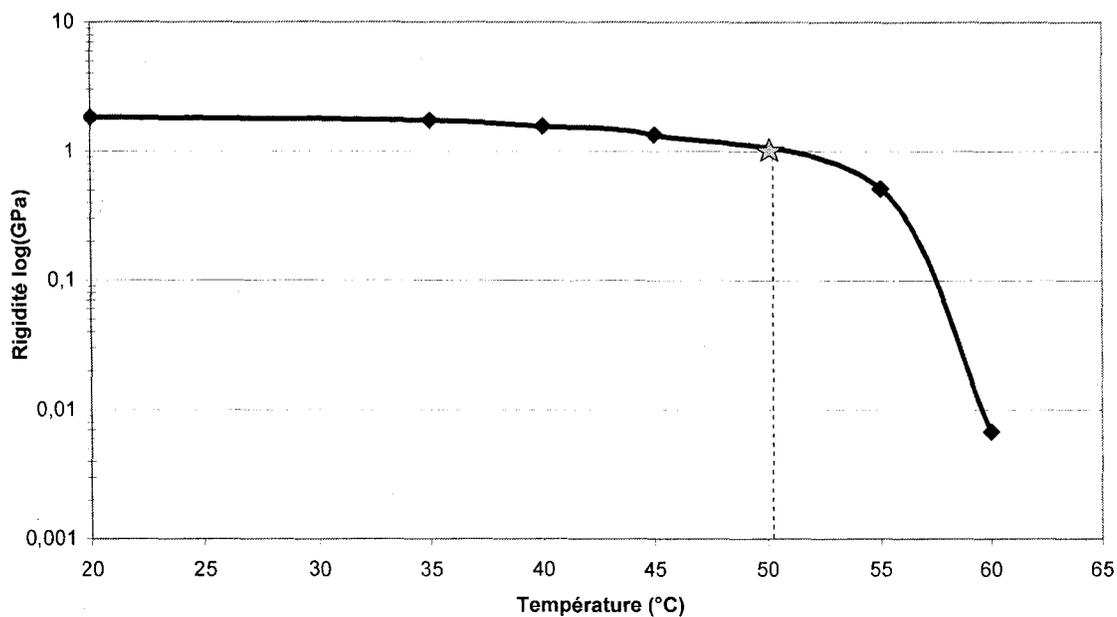


Figure 50 Rigidité en fonction de la température de l'époxy

Cette perte de rigidité est bénéfique sur la déformation de détérioration. Une augmentation de près de 17 % signifie que la matrice du polymère devient plus ductile à haute température. Les microfissures de la matrice se développent moins rapidement. Par contre, la résilience mécanique du composite se trouve affectée négativement par l'activation des AMF. Suite aux tests et à l'expérience acquise, des solutions et des modifications de ce composite hybride seront discutées à la prochaine section.

4.5 Discussion

La méthode d'écoute par émission acoustique permet de bien définir une limite d'utilisation du matériau. La position du point d'inflexion R augmente lorsque les fils sont intégrés dans la structure et lorsqu'ils sont activés. De plus, les dommages irréversibles en déformation (ϵ_d) sont retardés lorsque les fils sont activés.

Le résultat final des tests de traction avec les fils d'AMF activés ne permet pas de conclure sur la capacité de ce système à prévenir la détérioration des composites endommagés. Plusieurs problèmes découverts lors des expérimentations expliquent ce manque de performance. L'utilisation d'une résine qui réticule à température ambiante semblait être le meilleur choix de matériau pour éviter plusieurs problèmes de fabrication. Cependant, les performances qu'offre ce type de résine ne permettent pas son utilisation à haute température. La température de ramollissement de la résine est sous la température d'activation des fils AMF. La diminution de la rigidité et de la contrainte de détérioration sont les résultats de l'échauffement de la résine. Le choix du diamètre et de la quantité volumique de fils AMF sont aussi des choix discutables dans cette première conception de composites hybrides. L'insertion de fils de gros diamètre dans le composite cause une perte d'environ 10 % sur la contrainte et la déformation de détérioration. En plus, avec seulement 2,8 % du taux volumique d'alliage à mémoire de forme dans la structure, la force de compression générée est faible comparativement à la force nécessaire pour propager des défauts.

Suite aux problèmes relevés, des solutions alternatives sont présentées pour continuer les recherches et faire avancer le développement de ces matériaux prometteurs. Il faut inévitablement utiliser des préimprégnés avec des résines spécialement conçues pour résister à des hautes températures. De façon générale, plus la température de cuisson est élevée, plus le composite est résistant thermiquement. L'utilisation des préimprégnés change les procédés de fabrication décrits à la section 4.2. Pour obtenir de bonnes propriétés mécaniques, une cuisson à l'aide d'un autoclave en suivant la procédure recommandée par le manufacturier diminue au minimum les défauts. La cuisson à une température plus élevée que la température de début de transformation

austénitique de l'AMF nécessite alors un gabarit qui permet d'empêcher la contraction des fils lors de la cuisson. De plus, le changement de procédé de fabrication implique la modification de la sélection de l'alliage à mémoire de forme. Ce choix devra être fait pour empêcher la déformation plastique de celui-ci pendant la cuisson du composite (≈ 180 °C). Un alliage de TiNi avec une température de fin de transformation plus haute et la possibilité de générer une plus grande contrainte serait une solution plus avantageuse. Une réduction du diamètre du fil permettrait de diminuer la concentration de contrainte en minimisant l'impact négatif de l'insertion des capteurs / actionneurs dans le composite et favoriserait la sensibilité de détection de l'allongement. Ensuite, pour bien quantifier tout le potentiel de limitation de dommages lors d'une activation, le pourcentage volumique d'AMF devrait passer de 2,8 % à au moins 10 %. Ce sont les principaux changements à apporter aux prochaines générations de composites hybrides. Enfin, il faudrait faire des tests de détection de défauts pour valider le concept de capteur présenté au chapitre 2.

MCours.com