

CHAPITRE 6

VALIDATION ET RÉSULTATS DE MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

Ce chapitre présente l'étude comparative sur l'intégration des AMF activés ou non dans une plaque de composite réalisée à l'aide du modèle d'éléments finis. Enfin, une discussion suivra sur les résultats obtenus et les développements futurs de ce modèle numérique.

La façon de valider le modèle, selon la philosophie de rupture successive des endroits les plus faibles, consiste à comparer la solution obtenue à la solution théorique d'une plaque en traction. Les démonstrations des calculs analytiques sont présentées à l'annexe 3, tandis que le programme *Matlab* qui les applique se trouve à l'annexe 4. La théorie classique des stratifiés propose que les bris arrivent par couches [3]. Puisque la plaque ne comporte aucune région plus faible qu'une autre, ce sont les plis complets et les plus faibles qui se brisent en premier. La figure 56 compare le résultat de traction jusqu'à la rupture d'une plaque de composite calculée par la théorie classique des stratifiés et le logiciel d'analyse par éléments finis *Ansys*.

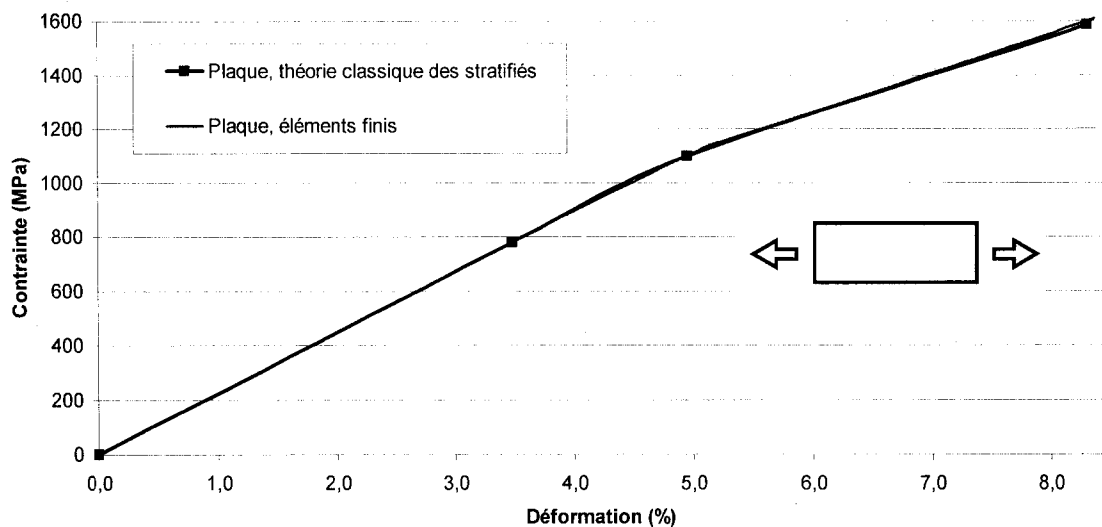


Figure 56 Calcul de rupture théorique et par É.F. d'une plaque composite sans concentrateur de contrainte ni AMF

Il n'y a pratiquement aucune différence entre les deux méthodes de calcul, même si le critère de rupture de la déformation maximale est utilisé lors du calcul analytique et le critère de Tsai-Wu lors du calcul É.F. En représentant parfaitement le résultat théorique, le programme et la méthode d'analyse par É.F. sont donc validés et jugés comme fonctionnels.

Le calcul par éléments finis utilise les mêmes matrices de résolution que la théorie classique des stratifiés. Cependant, les calculs se font sur chaque élément du maillage. Pour une plaque sans concentrateur de contrainte, il n'y a pas d'influence sur la précision de la réponse, comme il est démontré à la figure 56. Par contre, lorsque la géométrie présente des discontinuités, le calcul analytique devient inutilisable. Enfin, dans la section suivante, le calcul par éléments finis à l'aide du logiciel *Ansys* permet d'analyser les composites hybrides présentant un concentrateur de contrainte.

6.1 Analyse de la plaque de composite avec un concentrateur de contrainte

Maintenant que le modèle d'éléments finis est validé, l'analyse des différentes configurations ainsi que les résultats obtenus sont donc présentés. Pour débiter, la simulation par éléments finis de la plaque de composite avec un concentrateur de contrainte en son centre est comparée au test expérimental (figure 57).

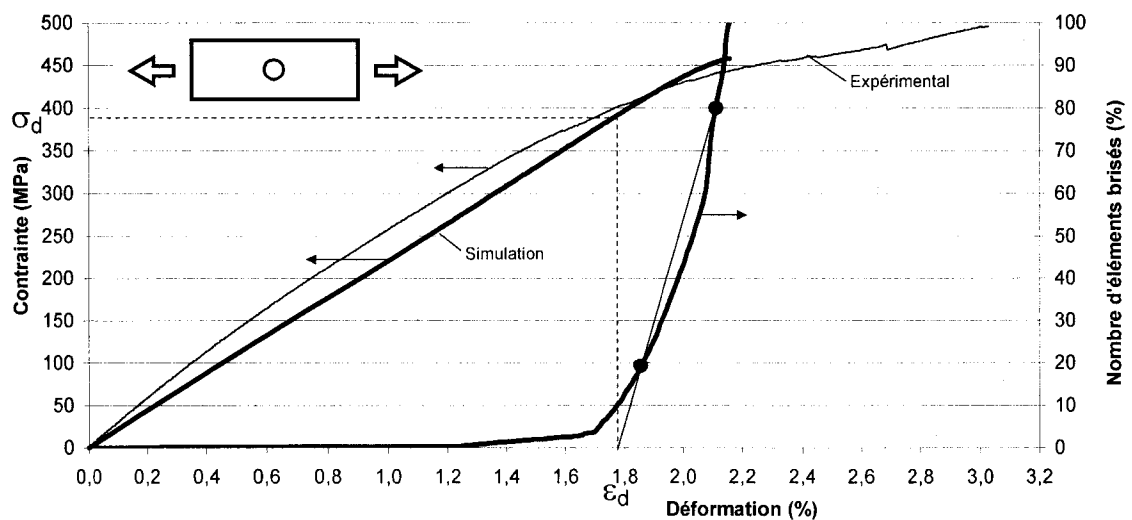


Figure 57 Validation du test de traction d'une plaque de composite trouée

La faible différence de rigidité entre la courbe simulée et celle obtenue expérimentalement confirme la bonne corrélation des calculs utilisés précédemment. Comme il a été mentionné, les valeurs du critère de rupture ont été ajustées afin de représenter le mieux possible le test expérimental. Un parallèle a été fait entre l'analyse par l'émission acoustique (enregistrement de l'énergie relâché lors de la rupture) et le bris des éléments du maillage provenant du modèle éléments finis. En utilisant la même technique d'analyse des résultats (80 % et 20 % du nombre d'éléments brisés pour trouver le point d'inflexion), il est alors possible de déterminer une contrainte et une déformation de détérioration avec l'analyse par éléments finis (figure 57). Le tableau XVIII résume les résultats importants de la comparaison entre ces deux différents tests.

Tableau XVIII

Valeurs comparatives entre le modèle éléments finis et le test expérimental de traction d'une plaque de composite trouée

échantillon simulé	Description plaque	σ_d MPa	ε_d %	σ_u MPa	R (σ_d/σ_u) %
B	Avec cc, sans AMF, Exp.	412,3	1,86	495	83,3
E	Avec cc, sans AMF, É.F.	394,13	1,79	457,88	86,1
différence (%)		-4,4	-3,8	-7,5	3,3

L'ajustement des contraintes ultimes servant à définir le critère de rupture est fait pour rapprocher la contrainte et la déformation de détérioration entre la simulation et l'expérimental. La différence entre ces valeurs se situe en dessous des 5 %. L'utilisation importante de ces matériaux doit se faire en dessous de la contrainte de détérioration, voilà pourquoi ce sont ces valeurs qui sont utilisées afin de comparer et évaluer les composites hybrides. L'observation de la détérioration du modèle numérique en fonction de la contrainte donne une validation supplémentaire de la contrainte et la déformation de détérioration. La figure 58 expose ce processus visuel.

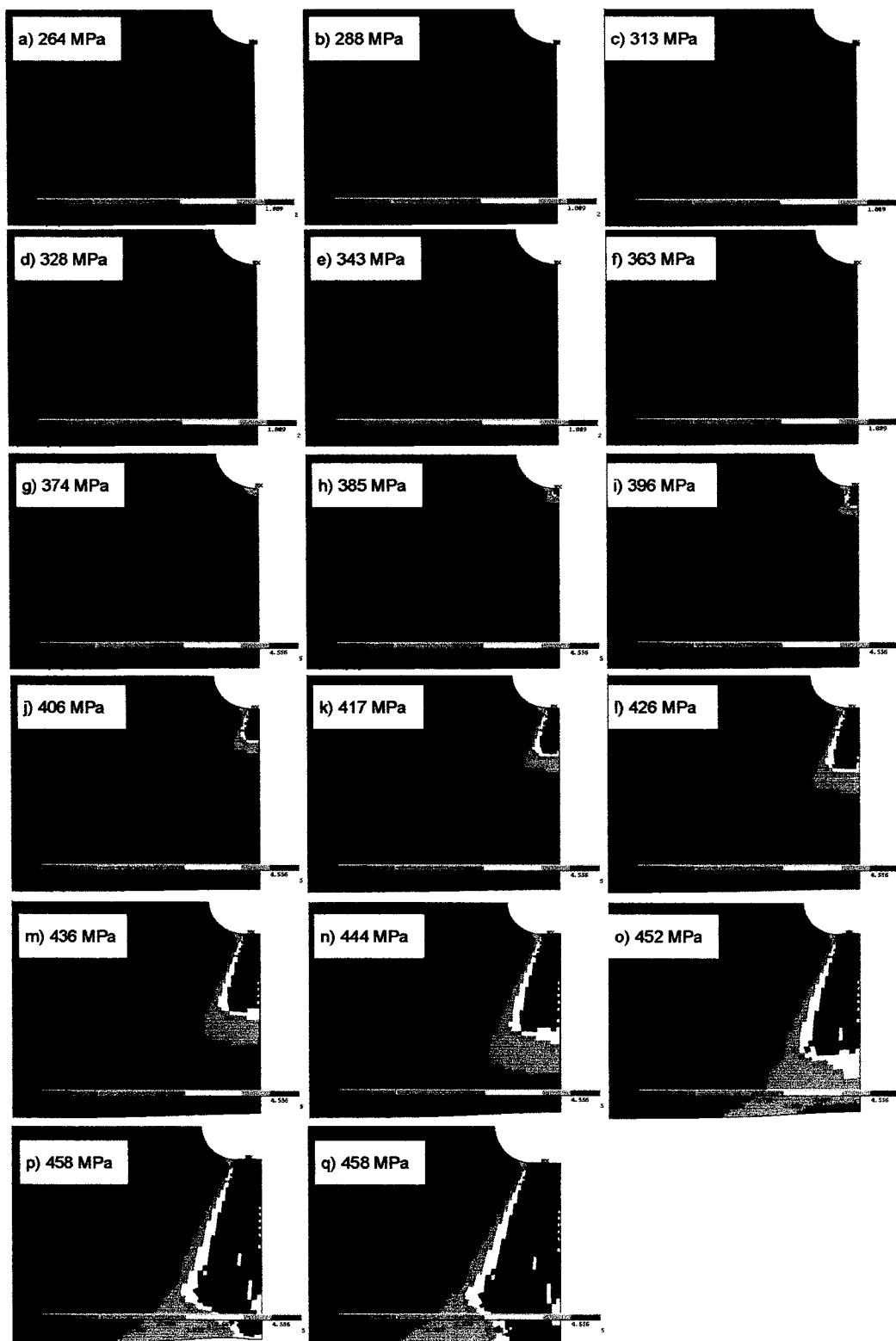


Figure 58 Processus visuel de détérioration du composite, plaque sans fil

Les chiffres représentant le jeu de couleur correspondent au nombre de couches brisées d'un élément. Le chiffre 2 correspond à 1 pli brisé, mais en réalité, on doit multiplier par deux ce résultat puisque le modèle est symétrique dans son épaisseur. Réciproquement, le chiffre 3 correspond à 2 plis brisés, jusqu'au chiffre 5 qui représente le bris complet du composite en épaisseur. Le premier bris est montré en position a) de la figure 58. Les images a) à f) montrent un début de rupture des plis à 90°, associés à la fissuration de la matrice. L'image g) présente le début de fissuration à travers l'épaisseur. Cette fissure se propage un peu plus sur l'image h) et i). À ce moment, on peut considérer le défaut comme important. Justement, la contrainte et la déformation de détérioration trouvées précédemment se situent entre ces deux images. La technique du point d'inflexion avec le nombre d'éléments brisés est donc représentative pour trouver le point maximal d'utilisation du composite. Par la suite, les images j) à p) montrent l'évolution de la fissure à travers la largeur de la plaque. Enfin, l'image q) présente l'échantillon complètement brisé. La contrainte n'augmente plus et l'absence de charge à l'intérieur du matériau se fait remarquer par l'absence de striction dans le sens vertical comparativement à l'image p). Le comportement jusqu'à la rupture est maintenant bien représenté par le modèle d'éléments finis. Les comparaisons et analyses des composites hybrides peuvent alors être faites avec confiance.

6.2 Analyse sur l'insertion des fils AMF dans la structure de composite

La prochaine étape consiste à quantifier, par l'entremise d'une simulation numérique, le gain en performance provenant de l'ajout de seulement 2,8 % volumique de fils dans une structure de composite. La figure 59 montre la différence obtenue sur la courbe contrainte – déformation entre les simulations par éléments finis de l'échantillon troué avec ou sans fils métalliques.

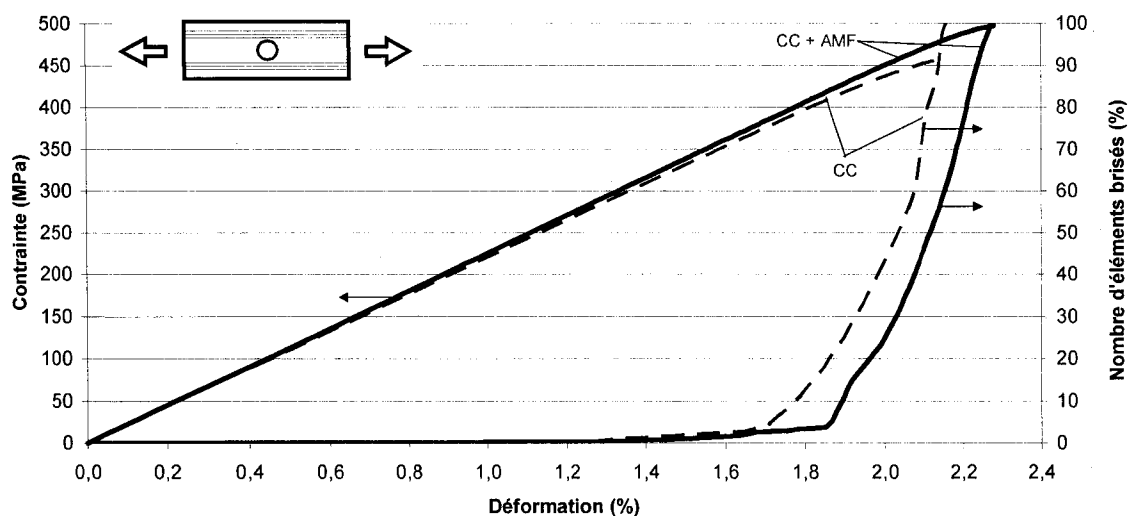


Figure 59 Comparaison d'une plaque de composite trouée avec et sans fils

L'ajout des fils provoque le décalage de la courbe du nombre d'éléments brisés en fonction de la déformation (figure 59). La détérioration est donc retardée. De plus, une augmentation de rigidité est remarquée par l'ajout des fils. Le tableau XIX présente la même comparaison, mais en chiffre.

Tableau XIX

Valeurs comparatives entre le modèle de plaque trouée avec et sans fil d'AMF

échantillon simulé	Description plaque	σ_d MPa	ε_d %	σ_u MPa	R (σ_d/σ_u) %
E	Avec cc, sans AMF	394,13	1,79	457,88	86,1
F	Avec cc, avec AMF	425	1,89	496,8	85,5
différence (%)		7,8	5,6	8,5	-0,6

Sans considérer les effets négatifs de l'intégration des AMF, une augmentation mineure de toutes les propriétés mécaniques est observée. Avec une précontrainte des fils de 100 MPa, un changement positif du comportement en traction est relevé, particulièrement sur l'aspect visuel de la détérioration comme en témoigne la figure 60.

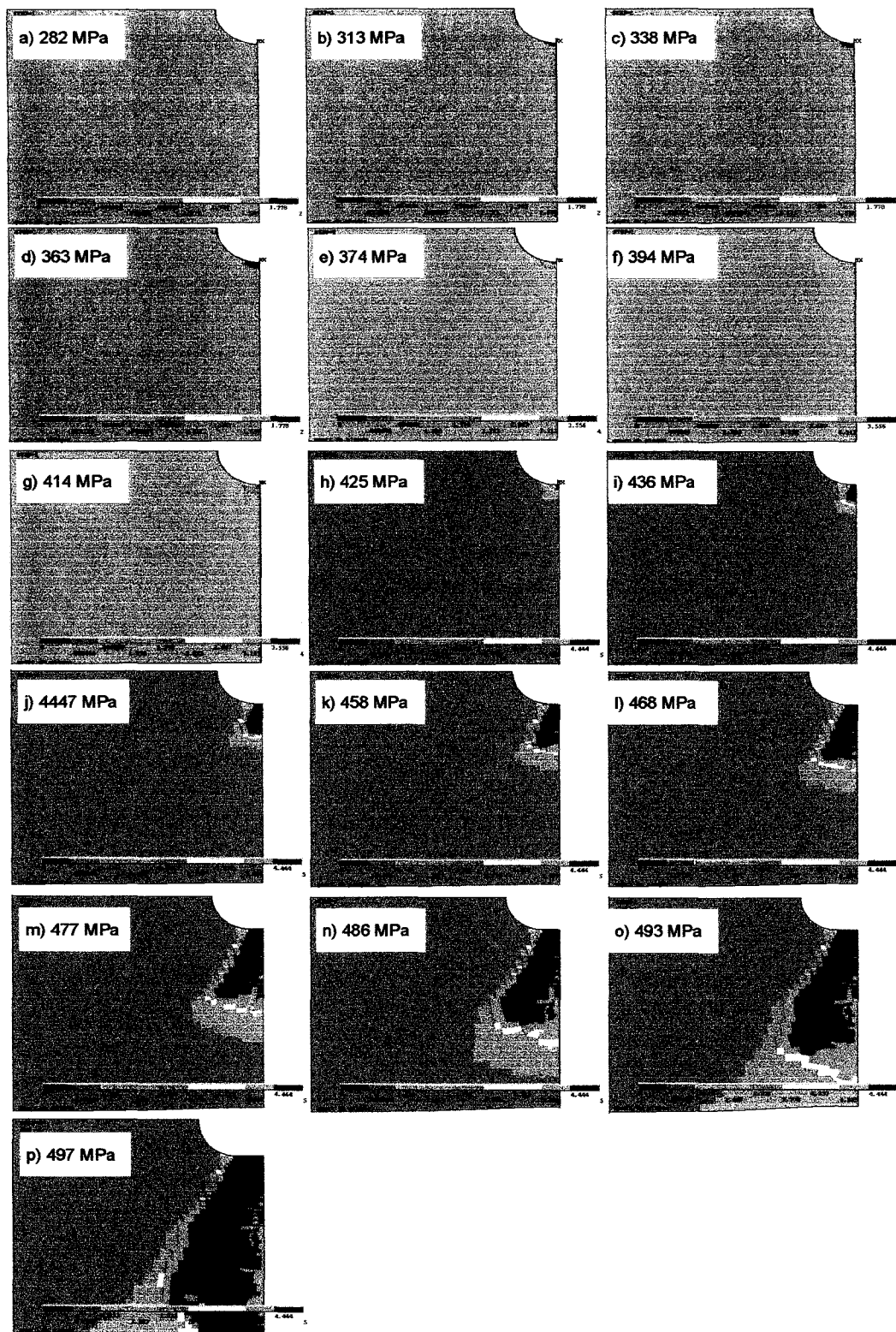


Figure 60 Processus visuel de détérioration du composite muni de fils

Les images a) à d) représentent le début de fissuration des plis à 90°. Les images e) à g) montrent encore le début des défauts, mais cette fois-ci sur 3 plis et localisé en dessous du trou. Il y a un phénomène de germination de défauts au dessus des fils qui ne se fait pas remarquer dans le test de la plaque sans fil. L'image h) représente le départ de la fissuration qui va mener à la rupture complète du composite. Cette image correspond exactement avec la contrainte et la déformation de détérioration. Finalement, les images de i) à p) exposent la suite du processus de rupture ainsi que le bris des fils dans les dernières photos. De plus, en comparant ces images à celles de la figure 58, la détérioration visuelle paraît moins progressive à cause du support additionnel qu'offrent les fils.

6.3 Analyse sur l'activation des fils AMF dans la structure de composite

La présente simulation par éléments finis analyse les effets de l'activation des fils AMF dans la structure de composite. La figure 61 compare les résultats de deux simulations. La première simulation correspond à la plaque de composite avec les fils, tandis que la deuxième se différencie par l'activation thermique de ceux-ci.

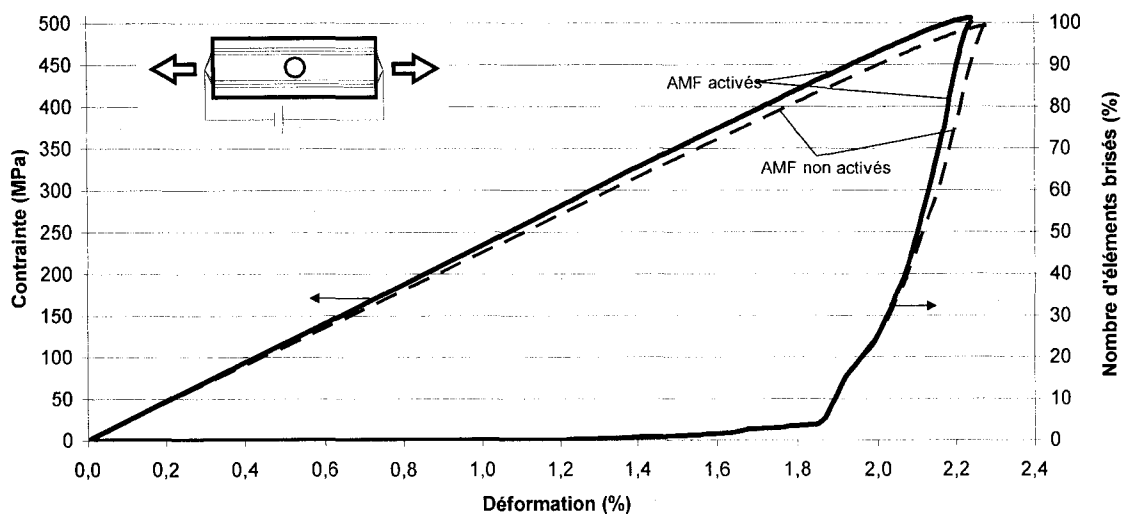


Figure 61 Comparaison d'une plaque de composite avec fils non activés et activés

La différence entre les deux simulations se situe au niveau de la précontrainte. Elle est fixée à 100 MPa pour la simulation sans activation et 470 MPa pour la simulation avec

les fils activés. L'activation des fils semble faire augmenter uniquement la rigidité. Le tableau XX résume les valeurs numériques obtenues suite à ces simulations.

Tableau XX

Valeurs comparatives entre le modèle de plaque avec fils non activés et activés

échantillon simulé	Description plaque	σ_d MPa	ε_d %	σ_u MPa	R (σ_d/σ_u) %
F	Avec cc, avec AMF	425	1,89	496,8	85,5
G	Avec cc, avec AMF activé	440	1,89	505,7	87,0
différence (%)		3,5	0,0	1,8	1,7

L'augmentation de la précontrainte de 100 MPa à 470 MPa donne des effets positifs relativement faibles. L'analyse visuelle de la contrainte n'est pas présentée pour cette simulation parce que son comportement est similaire à celui de la figure 60. Il est à noter que le début des défauts importants (début de fissuration localisé au bas du trou) coïncide encore une fois avec la contrainte et à la déformation de détérioration.

6.4 Discussion et recommandations

Suite à la description et la validation du modèle d'éléments finis, les paramètres du critère de rupture ont été ajustés pour bien représenter le test expérimental de la plaque avec un concentrateur de contrainte. Ensuite, la simulation du composite hybride permet de conclure que l'ajout et l'activation des fils proche du concentrateur de contrainte sont bénéfiques en retardant le point de détérioration. Cette contrainte de détérioration augmente de 7,8 % lors de l'ajout des fils et de 3,5 % supplémentaire lors de l'activation ce ceux-ci. Tandis que la déformation de détérioration a augmentée de 5,6 % pour les deux simulations. Ce gain n'est pas significatif d'autant plus qu'aucun phénomène négatif relié à l'intégration des fils n'est simulé (concentrateurs de contrainte causés par l'ajout de fils, phénomène de décollement de l'interface matrice / fils, phénomènes thermiques lors de l'activation, etc.). La conclusion du chapitre quatre stipule que les composantes utilisées dans la fabrication du composite ne sont pas appropriées pour l'utilisation présente. Les simulations numériques viennent alors

renforcer cette idée en ajoutant que la présente conception n'est pas assez performante pour espérer voir de grands changements au niveau du comportement mécanique. Cependant, même avec seulement 2,8 % volumique d'AMF, des bienfaits sont remarqués sur un matériau qui est déjà très optimisé. Donc, tout indique que les travaux de développement pointent vers la bonne direction. Maintenant, avec un modèle numérique validé permettant de simuler un chargement simple, la conception des composites hybrides peut évoluer plus rapidement.

Le modèle d'éléments finis est bien adapté pour les composites utilisés en aérospatiale qui manifestent un comportement fragile. Par conséquent, il y a une différence entre la simulation des matériaux et les tests expérimentaux. Les matériaux utilisés sont moins fragiles et moins sensibles au phénomène d'entaille ou de concentration de contrainte que les composites carbone / époxy utilisés en aérospatiale. Les résultats du test expérimental avec le concentrateur de contrainte devaient donner une contrainte ultime de rupture d'environ la moitié de la valeur obtenue. Voilà la raison des grandes valeurs de contraintes ultimes utilisées dans le critère de rupture pour la simulation numérique.

CONCLUSION

Le présent mémoire démontre toute la démarche et la nécessité de développer des composites hybrides : de la fabrication à la modélisation en passant par les tests expérimentaux. Les matériaux intelligents possèdent la capacité de détecter les défauts et ainsi augmenter la sécurité des composantes critiques. Ils peuvent aussi posséder les qualités d'auto guérison pour limiter la propagation des dommages. Le but de ce travail est d'évaluer la capacité d'un matériau à exécuter ces deux tâches. Avec l'intégration des alliages à mémoire de forme dans des composites, ce double rôle est maintenant possible.

Dans le chapitre deux, les tests et la caractérisation des matériaux permettent de dégager les grandes lignes pour l'utilisation des AMF dans la détection des déformations. Dans l'état martensitique, cet alliage exprime un facteur de jauge de $G=5,03$. Cette performance est comparable aux meilleures jauges de déformations existantes sur le marché. De plus, elles ne peuvent pas accommoder de grandes déformations et le prix de ces matériaux est élevé comparativement aux AMF. Le facteur de jauge est stable et linéaire sur une plage de déformation aussi grande que 4% pour les TiNi, comparativement à 1 ou 2% pour les jauges de déformation standards. L'utilisation des circuits de conditionnement permet d'améliorer la précision de lecture. Enfin, d'autres tests doivent être entrepris pour relever les effets thermiques observés avec l'utilisation de ce matériau comme jauge résistive.

Les chapitres 3 et 4 mettent l'accent sur les paramètres d'activation, la fabrication et les tests expérimentaux des composites hybrides. Les nombreuses expériences en traction sur les fils AMF permettent de fixer les limites d'utilisation. Une prédéformation de 4% et un chauffage à 110 °C permettent d'obtenir une contrainte de compression de 470 MPa. Le respect de la procédure d'ensachage sous vide et les précautions spéciales prises lors de la fabrication permettent d'obtenir des composites hybrides uniformes et sans défauts visuels. La façon d'analyser et de caractériser les échantillons consiste à jumeler l'émission acoustique avec les tests de traction. Le concept de contrainte et déformation de détérioration permet de donner la limite

d'utilisation du composite. Similaire à la limite d'écoulement, ce point est à la base de l'analyse comparative entre les différents échantillons. Les résultats montrent une baisse d'environ 10% des performances du composite lors de l'intégration des AMF, tandis que l'activation des fils fait chauffer le composite et ramollit la matrice. Ces mauvaises performances mécaniques sont associées à une mauvaise conception et à l'augmentation de température. L'utilisation d'une résine dont le point de ramollissement se trouve sous la température d'activation des AMF est à bannir.

Aux chapitres 4 et 5, un modèle d'éléments finis a été créé, validé et testé avec succès. Le processus de dégradation est bien représenté dans les résultats. Tirée de la méthode d'analyse des résultats d'émission acoustique, une méthodologie similaire est utilisée avec les éléments finis afin de déterminer les contraintes et déformations de détérioration. Basée sur l'accumulation des bris d'éléments, cette nouvelle technique est confirmée par l'observation de la propagation des défauts. Les résultats confirment les conclusions des tests expérimentaux sur le manque de performance de la conception présente. Cependant, avec seulement 2,8 % volumique d'AMF dans le composite, des améliorations sont observées avec le modèle éléments finis. Une preuve que les travaux sont sur la bonne voie.

L'expertise acquise à travers les manipulations et les résultats de tests permettent d'émettre certaines suggestions pour la continuation du projet. Les futures structures devraient utiliser des préimprégnés dont les résines peuvent être utilisées à haute température sans influencer les propriétés mécaniques du composite. L'intégration de fils AMF de plus petit diamètre devrait réduire la concentration de contrainte et la formation de défauts. De plus, en augmentant la fraction volumique de 2,8 à environ 10% et en utilisant un AMF générant une plus grande contrainte, les performances observées seront majeures. Pour les simulations numériques, les délaminations devraient représenter encore plus fidèlement la réalité de rupture des composites. Enfin, ce travail n'apporte pas tous les résultats souhaités, mais par contre, un grand pas est franchi dans le développement de ces nouveaux matériaux.

Pour conclure ce mémoire, un article (annexe 5) et une présentation orale de ce travail ont été présentés à une conférence internationale sur les matériaux intelligents. Cet exposé fut fait le 14 octobre 2005 à Toronto au Canada lors du *Cansmart 2005*.

MCours.com