
RÉSUMÉ

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier l'effet de la microstructure sur l'amorçage et propagation de décollements entre fibre et matrice. Dans ce but, des modèles de Volume Élémentaire Représentatif (VER) des composites unidirectionnels et des stratifiés croisés sont développés, caractérisés par différentes configurations des fibres et degré d'endommagement. L'amorçage du décollement est analysé par rapport à la distribution des contraintes à l'interface entre fibre et matrice. En revanche, la propagation du décollement est étudiée avec l'approche de la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture (MLER), et plus spécifiquement avec l'évaluation du taux de restitution d'énergie en Mode I et Mode II. Les champs de déplacement et contrainte sont calculés avec la Méthode des éléments finis (MEF) dans le logiciel Abaqus. La détermination des composants du taux de restitution d'énergie est effectuée avec la technique de fermeture virtuelle de fissure implémentée par l'auteur en langage Python.

La solution élastique du problème de décollement entre fibre et matrice est caractérisée par la présence de deux régimes : celui de fissure ouverte et celui de fissure fermée. Dans le deuxième cas, il existe une zone proche de la pointe de fissure où les lèvres du décollement sont en contact. Dans le premier cas, le décollement est ouvert et il n'existe aucun contact entre les lèvres du décollement. Dans le régime de fissure ouverte, les champs des déplacements et contraintes présentent une singularité oscillatoire. Une étude de convergence de la technique de fermeture virtuelle de fissure est donc requis et constitue le premier élément du travail de cette thèse. Il est constaté que le taux de restitution d'énergie total ne dépend pas de la taille des éléments proches de la pointe de fissure, alors que le taux en Mode I et Mode II présentent une dépendance significative de la taille des éléments dans le cas de fissure ouverte. Il est montré que le taux de restitution d'énergie en Mode I et Mode II ne converge pas, ce à dire que le comportement asymptotique n'est pas limité. Par conséquent, il n'est pas possible d'utiliser l'erreur entre itérations successives comme mesure de la convergence de la solution et une comparaison est donc nécessaire avec des résultats obtenus avec une autre méthode. Le taux de restitution d'énergie calculé avec la méthode d'éléments de frontière, disponible dans la littérature, est choisi comme référence. Ensuite, la propagation de décollement entre fibre et matrice est étudiée dans Volume Élémentaire Représentative de : composites unidirectionnels avec épaisseur variable, mesuré par le nombre des rangées des fibres, de ceux extrêmement minces (une rangée des fibres) au plus épais ; stratifié croisé avec un pli central à 90° d'épaisseur variable, mesuré par le nombre des rangées des fibres, de ceux extrêmement minces (une rangée des fibres) au plus épais ; composites unidirectionnels épais, modélisés comme infinis à travers l'épaisseur. Configurations multiples

de l'endommagement sont aussi examinées, qui correspondent à différentes étapes du processus d'amorçage des fissures transverses : décollements isolés ; décollements interagissant distribués dans la direction d'application de la charge mécanique ; décollements localisés sur fibres consécutives à travers l'épaisseur. Entre les résultats plus importants, il est constaté que ni l'épaisseur du pli à 90° ni l'épaisseur du pli à 0° influence le taux de restitution d'énergie du décollement, différemment de ce qu'a été observé pour les fissures transverses. En revanche, il est montré que le taux de restitution d'énergie est affecté de manière significative par l'interaction mutuelle entre décollements dans la direction d'application de la charge et qu'il existe une distance caractéristique (mesuré par le nombre des fibres sans endommagement) déterminant la région d'influence entre décollements.

Enfin, la taille du décollement juste après l'amorçage et la taille ultime du décollement sont estimées à partir de l'analyse de la distribution des contraintes à l'interface entre fibre et matrice (pour l'amorçage) et sur la base du critère de Griffith de la MLER. La taille maximale d'un décollement dans un stratifié croisé est estimé dans l'intervalle 40° - 60° , résultat qui est en très bon accord avec précédentes observations microscopiques disponibles dans la littérature.

ABSTRACT

The main objective of the present work is to investigate the influence of the microstructure on debond growth along the fiber arc direction. To this end, models of 2-dimensional Representative Volume Elements (RVEs) of Uni-Directional (UD) composites and cross-ply laminates are developed. The Representative Volume Elements are characterized by different configurations of fibers and different damage states. Debond initiation is studied through the analysis of the distribution of stresses at the fiber/matrix interface in the absence of damage. Debond growth on the other hand is characterized using the approach of Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM), specifically through the evaluation of the Mode I, Mode II and total Energy Release Rate (ERR). Displacement and stress fields are evaluated by means of the Finite Element Method (FEM) using the commercial solver Abaqus. The components of the Energy Release Rate are then evaluated using the Virtual Crack Closure Technique (VCCT), implemented in a custom Python routine.

The elastic solution of the debonding problem presents two different regimes: the *open crack* and the *closed crack* behaviour. In the latter, debond faces are in contact in a region of finite size at the debond tip; in the latter, the debond is everywhere open and no contact exists between the faces. In the *open crack* regime, it is known that stress and displacement fields at the debond tip present an oscillating singularity. A convergence analysis of the VCCT in the context of the FEM solution is thus required to guarantee the validity of results and represents the first step of the work presented in this thesis. It is found that the total ERR does not depend on the size of elements at the debond tip, while the values of Mode I and Mode II ERR depend on element size in the *open crack* or *mixed mode* case. It is furthermore shown that Mode I and Mode II ERR do not converge, i.e. their asymptotic behavior for decreasing element size is not bounded. Thus, error reduction between successive iterations cannot be used to validate the solution and comparison with another method is required. Results obtained with the Boundary Element Method (BEM), available in the literature, are selected to this end.

Debond growth under remote tensile loading is then studied in Representative Volume Elements of: UD composites of varying thickness, measured in terms of number of rows of fibers, from extremely thin (one fiber row) to thick ones; cross-ply laminates with a central 90° ply of varying thickness, measured as well in terms of number of rows of fibers, from extremely thin (one fiber row) to thick ones; thick UD composites (modelled as infinite along the through-the-thickness direction). Different damage configurations are also considered, corresponding to different stages of transverse crack onset: non-interacting isolated debonds; interacting debonds distributed along the loading direction; debonds on consecutive fibers along the through-the-thickness direction. Among the most relevant

results, it is found that neither the 90° ply thickness nor the 0° ply thickness influences debond ERR in cross-ply laminates, differently from what is observed for transverse cracks with the so-called ply-thickness and ply-block effects. On the other hand, debond interaction along the loading direction is shown to influence significantly the Energy Release Rate, but this interaction possesses a characteristic distance (in terms of number of undamaged fibers) that defines the region of influence between debonds.

Finally, an estimation of debond size at initiation and of debond maximum size is proposed based on arguments from stress analysis (for initiation) and on Griffith's criterion from LEFM (for propagation). For a debond in a cross-ply laminate, its maximum size is estimated to lie in the range $40^\circ - 60^\circ$, which is in strong agreement with previous results from microscopic observations available in the literature.