Lien entre paramètres matériaux/procédés et performances d'une structure composite à renfort tissé : approche multimodèle et multiéchelle.

G. Grail, M. Hirsekorn, Nicolas Carrere, G. Hivet, Ridha Hambli

▶ **To cite this version:**

G. Grail, M. Hirsekorn, Nicolas Carrere, G. Hivet, Ridha Hambli. Lien entre paramètres matériaux/procédés et performances d'une structure composite à renfort tissé : approche multimodèle et multiéchelle.. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.33. hal-00603123

HAL Id: hal-00603123
https://hal.science/hal-00603123

Submitted on 24 Jun 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Lien entre paramètres matériaux/procédés et performances d'une structure composite à renfort tissé : approche multimodèle et multiéchelle.

Link between materials/manufacturing parameters and structural performances of woven composites : a multimodel and multiscale approach.

G. Grail[1], M. Hirsekorn[1], N. Carrère[1], G.Hivet[2] et R. Hambli[2]

1 : ONERA – The French Aerospace Lab – F – 92322 Châtillon
e-mail : gael.grail@onera.fr, martin.hirsekorn@onera.fr, nicolas.carrere@onera.fr

2 : Institut Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Energétique
Ecole polytechnique de l'Université d'Orléans – F – 45072 Orléans
e-mail : gilles.hivet@univ-orleans.fr, ridha.hambli@univ-orleans.fr

Résumé

Afin d'établir un lien entre paramètres matériaux/procédés et performances structurales d'une pièce composite à renfort tissé, une chaîne de calcul est présentée ici. Elle repose sur des modélisations multimodèles et multiéchelles de la conception de la pièce composite (mise en forme du tissu, injection de la résine, et cuisson du composite), dont les résultats alimentent des modélisations du comportement mécanique du matériau, à l'échelle de la fibre (micro), du toron (méso) et du composite (macro). Les effets de l'endommagement sur le matériau sont aussi étudiés. Pour cela, il nous a fallu développer des procédures de maillage permettant d'obtenir des cellules saines et endommagées (insertion discrète de fissures au sein du maillage) adaptées à l'étude de ces matériaux à l'échelle mésoscopique, échelle particulièrement importante car représentant l'architecture du tissu.

Abstract

In order to establish a link between materials/manufacturing process parameters and structural performances of a woven composite part, a virtual modeling chain is presented. It is based upon multi-physics and multi-scale modeling of the manufacturing process (preforming, resin injection and curing), whose results feed multi-scale mechanical models of the material behaviour, from the fiber scale (micro) over the yarn scale (meso) to the scale of the structure (macro). The effect of damage on the material properties is studied. Special emphasis is given to the meso-scale representing the reinforcement architecture. To this aim meshing procedures have been developed, that are able to create finite element meshes of intact and damaged meso-scale volumes (via crack insertion into the intact mesh).

Mots Clés : composite tissé, multiéchelle, endommagement, homogénéisation, maillage
Keywords : *woven composite, multi-scale modeling, damage, homogenization, mesh*

1. Introduction

L'optimisation des structures est un enjeu majeur dans l'industrie aéronautique. Pour cela, l'une des façons de procéder est de travailler sur le matériau. Les composites offrent des caractéristiques intéressantes, par leur ratio propriétés mécaniques/densité accrue et leur excellente tenue à l'environnement par rapport aux matériaux métalliques, améliorant considérablement les performances structurales des aéronefs. Ils peuvent alors potentiellement générer d'un point de vue industriel un important gain de poids alors même qu'alléger les avions pour diminuer les coûts de transport est devenu un enjeu stratégique primordial. Les composites peuvent être classés en fonction (i) de leur matrice (organique, céramique ou métallique) choisie en fonction de la température d'utilisation ou (ii) de leur architecture (stratifié d'UD, tissée, tressée…). Cette étude s'intéresse plus particulièrement aux matériaux composites à matrice organique à renfort tissé bi-dimensionnel (Figure 1a) ou tri-dimensionnel (Figure 1b), caractérisés par une orientation à 90° des torons de chaînes et de trames dans le plan. Les avantages de ce type de matériau par rapport aux

composites stratifiés unidirectionnels plus largement utilisés sont [1] : (i) une drapabilité importante permettant la conception de préformes proches de la forme de l'objet final diminuant les coûts de fabrication et (ii) une meilleure tolérance aux défauts. Les tissés 3D, grâce à l'insertion d'un renfort dans la troisième direction (voir annotation sur la Figure 1b) offrent de plus (iii) une très bonne tenue à l'impact par rapport aux composites stratifiés car ils réduisent de manière significative le délaminage et surtout sa propagation, et (iv) une meilleure tenue aux sollicitations hors-plan.

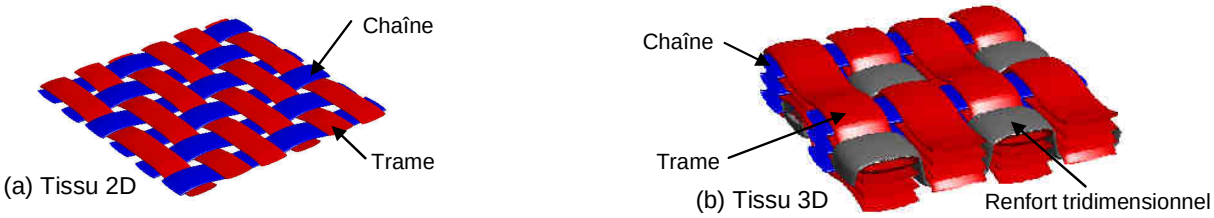


Fig. 1. Exemple de préforme tissé, obtenues par Gentex [2] : (a) tissu bidimensionnel (taffetas), (b) tissu tridimensionnel (orthogonal).

L'utilisation de ce type de matériau est potentiellement très importante pour toutes les applications nécessitant une bonne tenue hors-plan, mais ne travailler que sur les constituants de base du matériau (fibres, résines,…) et sur les conditions d'élaboration (méthodes d'injection, cycle thermique, mise en forme dans le moule…) avant d'aborder la structure de l'appareil ne suffit plus. En effet, il est maintenant nécessaire de concevoir le matériau *a priori* pour l'adapter localement à sa fonction au sein de la structure globale. C'est avec cette vision que le potentiel d'optimisation des matériaux composites tissés devient particulièrement intéressant, notamment par une gestion au « juste besoin » de leur anisotropie. Cependant, la multitude des paramètres de conception et des paramètres matériaux influençant les performances d'une structure composite, et l'absence de relations directes établies entre elles rendent toute optimisation structurale complexe. C'est pourquoi il apparaît aujourd'hui indispensable de mettre en place une chaîne de calcul reliant propriétés matériaux et procédés aux performances structurales finales. C'est l'objectif de ce travail.

Dans un premier temps, nous présenterons l'approche générale adoptée (partie 2), et plus particulièrement la démarche suivie pour modéliser la déformée du renfort tissé du composite après préformage (partie 3). Enfin nous nous concentrerons sur l'échelle mésoscopique du matériau composite tissé afin de prévoir l'évolution des propriétés élastiques en fonction de l'endommagement (partie 4). De plus, nous aborderons dans cette partie les problématiques liées au maillage des cellules de composite tissé à cette échelle.

2. Présentation générale de la démarche.

La démarche proposée comporte essentiellement trois étapes. La première étape de cette étude est consacrée à la mise en place d'une chaîne de calcul directe complète. La seconde consistera à effectuer une étude de sensibilité (i) de chacun des paramètres d'entrées et (ii) de l'ensemble des paramètres des modules. Il s'agit ici d'identifier les éléments de la chaîne les plus influents afin de, dans une troisième étape, être capable de mettre en place le fonctionnement inverse de la chaîne en vu de son utilisation dans un contexte d'optimisation. La première étape de cette approche est présentée par la suite.

2.1. Mise en place d'une chaîne de calcul multimodèle modulable

La chaîne de calcul directe proposée est représentée sur la Figure 2. Elle fait le lien entre des paramètres matériaux tels que les propriétés intrinsèques aux constituants de base du matériau ou à l'armure du renfort textile, des paramètres relatifs au procédé de fabrication et les caractéristiques

finales de la pièce composite comme ses performances mécaniques ou sa forme finale. Elle est constituée de sept différents modules contenant un ou plusieurs modèles, qui se suivent dans l'ordre indiqué sur la Figure 2. Chacun de ces modules représente une étape complète dans (i) le procédé d'élaboration du composite – il s'agit des modules *Préformage du tissu sec*, abordée en troisième partie de cet article, *Injection de la* résine [3], et *Cuisson du composite* [4] - ou dans (ii) l'étude du comportement du matériau – ce sont les modules *Modélisation à l'échelle microscopique*, *Modélisation à l'échelle mésoscopique* et *Modèle d'endommagement macroscopique* (voir partie 2.2). Le dernier module *Réponse de la structure* doit utiliser la loi de comportement macroscopique, adaptée au matériau composite tissé étudié et prenant en compte l'endommagement, dans un calcul de structure à taille réelle. Il fournit ainsi les propriétés finales de la pièce composite.

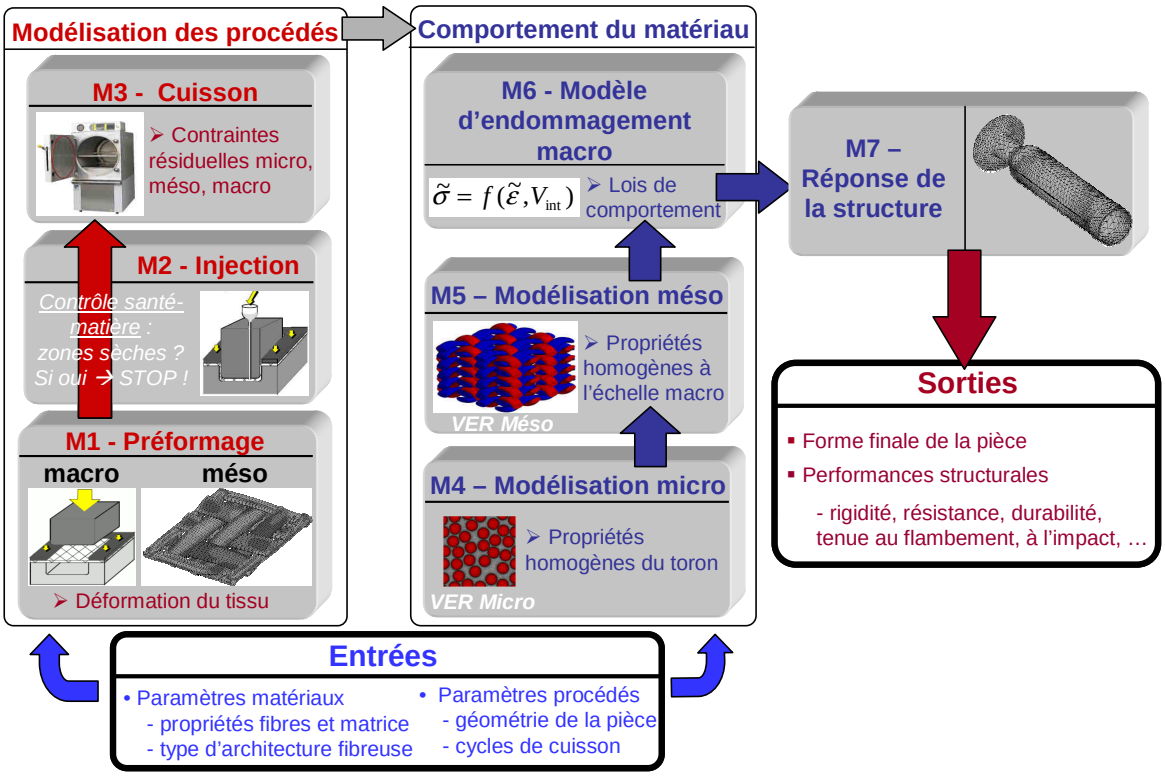


Fig. 2. Chaîne directe avec ses sept différents modules élémentaires. A droite de chacun des modules sont notés les données qu'ils doivent fournir en sortie.

En donnant à cette chaîne cette structure modulable, nous voulons par la suite être capable d'y intégrer les différentes améliorations parues dans chacun des domaines pris de façon individuels, qu'elles soient personnelles ou publiées dans la littérature, sans devoir la reconstruire à chaque fois. C'est pourquoi dans cette étude, notre attention se porte sur les liens qui unissent les différents modules. Afin de rendre cette chaîne évolutive, ces liens doivent être les plus indépendants possibles des modèles utilisés dans chacun des modules. C'est dans cette optique que l'un des premiers travaux effectué a consisté à définir les entrées et sorties de chacun des modules, synthétisées sur la Figure 2. Notons aussi que pour l'instant (i) le passage d'un module au suivant nécessite des interventions de l'utilisateur (changement de format de données par exemple), et (ii) la plupart de ces modules reposent sur des modèles déjà existants et disponibles dans la littérature.

2.2. Une chaîne de calcul multiéchelle

2.2.1. Choix d'une approche multiéchelle

Les matériaux composites tissés sont des matériaux par nature multiéchelles : l'échelle microscopique - celle des fibres qui constituent les torons, noyées dans la matrice (quelques

microns pour une fibre) - l'échelle mésoscopique - celle d'un motif élémentaire de tissu, formé de l'entrelacement de torons (ensemble torsadé de dizaine de milliers de fibres, 1K à 72K, le tout de l'ordre du mm) - et pour finir l'échelle macroscopique – celle de la structure (de quelques cm à quelques mètres). La plupart des modèles permettant d'établir le comportement des composites tissés à matrice organique sont établis à l'échelle macroscopique (une couche d'un composite stratifié) et reposent sur des concepts et des méthodes de la mécanique des milieux continus [5-6]. Cependant, ces approches phénoménologiques ne permettent ni la compréhension des phénomènes ni l'établissement des liens entre les paramètres matériaux (architecture du tissu, mode de cuisson, rupture d'une fibre…) et le comportement du matériau. C'est pourquoi nous avons choisi d'adopter ici une autre approche, qui consiste à partir (i) de l'état du matériau après procédé, obtenu aux trois échelles d'études, et (ii) de la connaissance des propriétés matériaux microscopiques, puis par homogénéisation de remonter à l'échelle du toron et enfin de déterminer les propriétés mécaniques homogènes de la cellule tissée élémentaire [2, 7]. Ces approches numériques multiéchelles du problème rendent possible une étude plus prédictive des matériaux composites à renfort tissé mais nécessitent un coût élevé de mise en œuvre. Nous retiendrons principalement (i) la connaissance fine des mécanismes d'endommagement ainsi que de leur évolution en fonction du chargement et (ii) la détermination et la représentation par un maillage EF du Volume Elémentaire Représentatif (VER) aux échelles pertinentes. Ce dernier point devient véritablement problématique dans le cas des composites tissés à l'échelle mésoscopique, dont l'armure présente une géométrie complexe, et sera abordé en quatrième partie de cet article.

2.2.2. Le Modèle d'endommagement macroscopique

L'objectif de la partie *Comportement du matériau* (Figure 2) est d'obtenir une loi de comportement macroscopique du matériau composite après procédé et prenant en compte les effets liés à l'endommagement du matériau, afin de l'utiliser dans un calcul EF à échelle réelle. En effet, bien qu'il existe des techniques de modélisation multiéchelles directes dans un calcul de structure [8], la taille et la complexité des modèles mésoscopiques imposent l'utilisation d'un modèle d'endommagement macroscopique afin de palier les coûts de calcul excessifs intervenant si l'on effectue directement le passage de l'échelle mésoscopique à l'échelle de la structure. Cependant la plupart de ces modèles d'endommagement macroscopiques restent phénoménologiques et reposent sur une description des effets de mécanismes physiques observés expérimentalement (anisotropie initiale du matériau, anisotropie de l'endommagement, viscosité [6]). Ainsi les approches multiéchelles peuvent servir de plateforme d'essais virtuels dans le but de déterminer la valeur de certains paramètres de couplage, ou encore pour enrichir les modèles en rendant compte de phénomènes difficilement quantifiables expérimentalement (propriétés mécaniques ou effet de l'endommagement hors-plan).

2.2.3. Des échelles microscopique et mésoscopique à l'échelle macroscopique

Sur la base des résultats obtenus par la modélisation des procédés, les modules *Modélisation microscopique* et *Modélisation mésoscopique* doivent permettre l'étude du comportement mécanique du matériau après sortie du moule de cuisson en procédant par homogénéisations successives, le matériau « toron » homogène obtenue à l'échelle microscopique étant utilisé dans le modèle mésoscopique. Si les techniques sont aujourd'hui clairement établies pour mener à bien cette homogénéisation d'un point de vue des propriétés élastiques, seuls quelques travaux ont été menés pour prévoir le comportement non linéaire [9]. De plus, la prévision de l'endommagement et de la rupture reste un challenge aussi difficile que primordial. En effet, si l'on se fixe comme ambition la prévision de la tenue de la structure, il est indispensable d'être capable de prévoir l'amorçage de l'endommagement ainsi que sa cinétique. Les modules *Modélisation microscopique* et *mésoscopique* et leur lien avec le *Modèle d'endommagement macroscopique* demandent donc un développement particulier. Par souci de concision, seule la modélisation à l'échelle mésoscopique et

la mise en place d'essais virtuels d'endommagement pour nourrir le modèle macroscopique est présentée plus en détail dans la partie 4, plus de détails concernant l'échelle microscopique peuvent être trouvés dans [10].

3. Modélisation du Préformage du tissu sec.

3.1. Développement sur deux échelles : l'échelle macroscopique et l'échelle mésoscopique

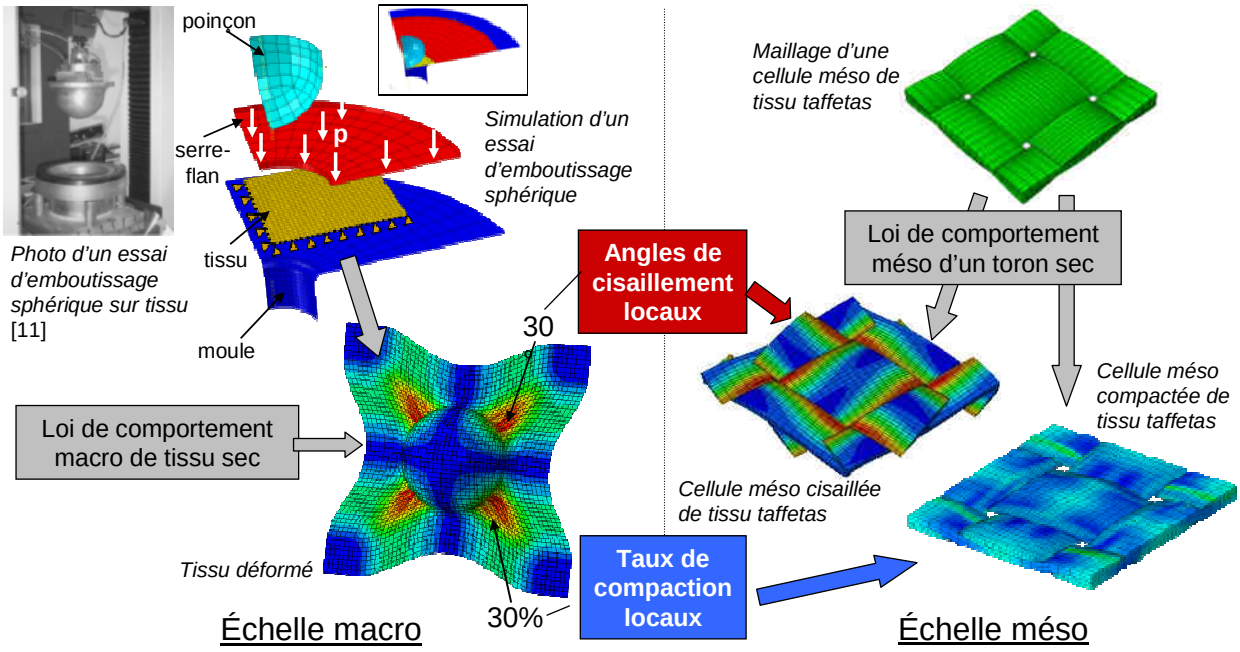


Fig. 3. Exemple de la démarche utilisée dans le module Préformage

Afin de décrire de façon correcte les propriétés du tissu sec (perméabilité) et avec matrice (propriétés mécaniques du composite) il est nécessaire de prendre en compte l'effet de la déformation du tissu lors de sa mise forme en fonction des propriétés des fibres, du type d'architecture fibreuse et des paramètres procédés tels que la forme du moule ou la vitesse d'emboutissage. C'est la fonction du module *Préformage* qui doit fournir en sortie la drapabilité du tissu, la géométrie macroscopique du tissu mis en forme et l'ensemble des géométries mésoscopiques locales. Pour cela, il se développe sur deux échelles (Figure 3) :

- une première simulation de la mise en forme du tissu est réalisée à l'échelle macroscopique et permet d'obtenir localement la valeur de paramètres géométriques locaux comme par exemple l'orientation locale des torons ou la variation d'épaisseur du tissu.
- une seconde simulation à l'échelle mésoscopique permet ensuite de déterminer la déformée locale d'une cellule de tissu, en fonction des paramètres d'entrées déterminés à l'échelle supérieure.

3.2. Simulation de la mise en forme du tissu sec

La Figure 3 illustre la démarche proposée. Les simulations présentées ont été réalisées avec le logiciel commercial Abaqus, solveur dynamic/Explicit. Nous nous plaçons en conditions quasi-statique : temps de simulation de 0,1s et vitesse de chargement telle qu'à tout moment l'énergie cinétique globale du système reste inférieure à 2% de l'énergie interne. Les contacts entre tous les éléments de la simulation (toron-toron, bati-toron) sont gérés avec frottement (coefficient de friction de 0,2) automatiquement par le logiciel (type *general explicit*). A l'échelle macroscopique, le dispositif mis en place est un emboutissage hémisphérique classique. La pression exercée sur le serre-flan est paramétrable. A l'échelle mésoscopique, la mise en place des conditions aux bords

périodiques réalisant le cisaillement pur ou la compaction d'une cellule de tissu sec est intégralement réalisée de façon automatique par un script Python développé dans le cadre de cette étude. Deux ingrédients sont ensuite nécessaires pour simuler la mise en forme du tissu sec : une loi de comportement et un maillage.

3.2.1. Loi de comportement de tissu sec

Afin de pouvoir mettre en place le module *Préformage*, nous avons utilisé dans nos simulations des lois élastiques linéaires standard disponibles dans Abaqus. Ainsi à l'échelle mésoscopique notre matériau homogène « toron » est isotrope transverse, et le tissu macroscopique est orthotrope et renforcé par deux réseaux de poutres sans rigidité de flexion (REBAR layer dans Abaqus), disposés orthogonalement. Il est évident que pour obtenir des résultats plus précis, il sera nécessaire d'implémenter dans notre chaîne de calcul des lois de comportement plus adaptées à la mise en forme des tissus secs [11-12].

3.2.2. Maillage : choix du modèle géométrique de tissu sec à l'échelle mésoscopique

Tandis qu'à l'échelle macroscopique nous modélisons le tissu sec par un plan d'éléments coques, l'échelle mésoscopique requiert un modèle géométrique représentant l'armure tissée. Pour notre étude, nous avons choisi un modèle dit « cohérent » [13], représentant les torons de fibres par un matériau homogène avec une section transverse variable et sans interpénétration entre torons. La Figure 3 montre une cellule mésoscopique de tissu taffetas obtenue par ce modèle, que nous avons ensuite maillée dans Abaqus par des éléments C3D8 réduits car, en plus d'être des éléments robustes et largement utilisés, permettent d'orienter facilement le matériau isotrope transverse homogène « toron » selon la direction du maillage (option d'Abaqus).

3.3. Lien entre le module Préformage et le reste de la chaîne : la problématique du maillage

Cette première approche nous permet d'obtenir des maillages proches des mésostructures déformées réelles. Ils servent ensuite de données d'entrée dans les modules *Injection de résine*, *Cuisson du composite* et *Modélisation mésoscopique*. Après un post-traitement, ils peuvent être directement exploités par le module *Injection de résine* afin de déterminer la perméabilité des cellules mésoscopiques déformées [3]. En revanche, les deux autres modules demandent en entrée un maillage de composite à renfort tissé, dont la création pose de sérieux problèmes techniques qui pour l'instant sont délicats à surmonter (voir partie 4). Ce point illustre la difficulté de la mise en place d'une chaîne de calcul modulable.

4. La Modélisation mésoscopique

4.1. Géométrie et maillage d'une cellule élémentaire méso

La problématique du maillage à l'échelle mésoscopique se localise au niveau des zones de contact entre torons. En effet, localement le volume de matrice entre deux torons peut devenir trop faible, pour être maillé. Pour passer cette difficulté, nous devons pour l'instant utiliser un modèle géométrique qui génère les lignes neutres des torons (des tableaux de points dans un fichier texte), espacés d'une distance *delta* (paramétrable) au niveau des zones de croisement, comme par exemple le modèle Gentex (Figure 1, [2]) utilisé dans la partie 4. Cette hypothèse autorise la création d'éléments volumiques non dégénérés dans ces zones étroites. L'inconvénient est, outre les approximations géométriques propres au modèle, qu'on ne peut pas atteindre des taux volumiques de fibres élevés dans le composite. Cependant, dans un premier temps, pour mettre en place la chaîne de calcul, ce type de modèle géométrique est pleinement suffisant, mais par la suite les géométries déformées issues de la partie *Modélisation des procédés* de la chaîne devront être utilisées. Les lignes neutres sont ensuite traitées par une procédure de maillage créée dans le cadre

de ce travail et présentée sur la Figure 4. Elle utilise les mailleurs développés par l'INRIA (www-roc.inria.fr/gamma/). Elle crée, en plus du maillage final du composite tissé, les différents fichiers nécessaires à un calcul par la méthode des éléments finis (fichier d'orientation matériau, fichier de calcul,…) avec le code de calcul utilisé dans cette étude : ZéBuLoN. L'utilisateur doit fournir en entrée les lignes neutres des torons modélisant le renfort. L'utilisateur doit aussi rassembler dans un fichier texte les dimensions du composite final et les paramètres du maillage voulu (taille et qualité de maille). Une autre hypothèse ici réalisée est que la section transverse des torons reste constante le long de la ligne neutre, section transverse qui doit être fournit en entrée de la procédure de maillage. Une fois ces étapes préliminaires effectuées, la procédure de maillage se décompose en cinq étapes :

- *Etape 1* : les géométries des torons et du complémentaire matrice sont créées par un script couplant Matlab et ZéBuloN (extrusion des sections transverses le long des lignes neutres, opérations booléennes entre le volume « matrice » et les volumes « torons »).

- *Etape 2* : les surfaces des géométries précédentes sont maillées en respectant les paramètres donnés en entrée.

- *Etape 3* : le premier maillage est remaillé avec YAMS afin d'avoir un nouveau maillage surfacique qui forme des éléments de meilleure qualité au niveau des croisements entre torons lors du remplissage volumique, et respectant les paramètres données en entrée.

- *Etape 4* : le maillage surfacique obtenu est « périodisé » par une procédure développée dans le cadre de cette étude : les maillages de chaque paire de faces externes opposées sont rendus strictement identiques au vecteur de périodicité près. Cette étape est nécessaire pour réaliser des calculs en conditions périodiques avec ZéBuLoN.

- Etape 5 : le maillage surfacique périodique est finalement rempli par GHS3D et devient un maillage volumique constitué d'éléments tétraédriques linéaires.

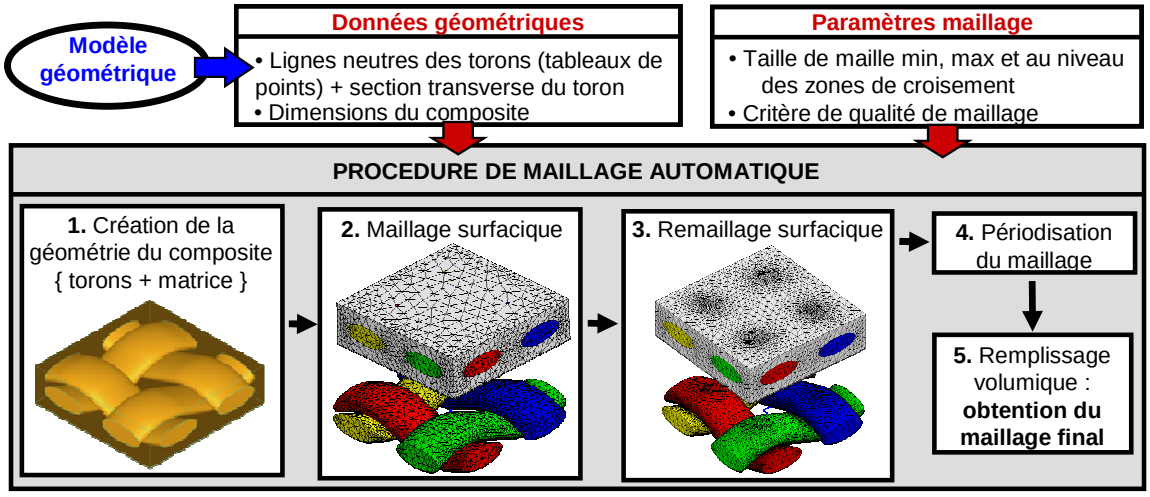


Fig. 4. Procédure de maillage automatique de cellules composites tissés mésoscopique.

4.2. Mise en place d'essais d'endommagement virtuels

4.2.1. Insertion discrète de fissures dans les maillages de cellule composite méso

Afin d'aller vers une meilleure prévision des propriétés mécaniques d'un matériau sain ou non, il est nécessaire de prendre en compte l'endommagement (amorçage et cinétique) pouvant intervenir suite à certaines sollicitations. Il est donc nécessaire de disposer d'un modèle multiéchelle permettant d'étudier l'effet de l'endommagement mésoscopique sur les propriétés à l'échelle macroscopique. L'une des manières de faire est d'insérer l'endommagement de manière discrète directement dans une cellule composite mésoscopique, en post-traitement du maillage. Pour cela, une procédure permettant l'insertion de fissures au sein d'un maillage de composite tissé a été

développée dans le cadre de cette étude. Elle exploite un algorithme de découpe de maillage réalisé sur ZéBuloN [14] et les mailleurs de l'INRIA. Cette procédure est illustrée par la Figure 5. La fissure est modélisée par une surface, qui est maillée puis introduite au sein du composite (Figure 5a). Ensuite l'algorithme réalise la découpe de l'ensemble d'éléments voulu (un toron sur la Figure 5b) selon la surface. Le maillage surfacique obtenu est ensuite post-traité afin d'améliorer sa qualité (Figure 5c), puis maillé volumiquement. Enfin, les nœuds se trouvant sur la surface de fissure introduite dans le maillage sont doublés pour former deux lèvres de fissures. Cette méthode permet l'insertion de différentes formes de fissures au sein de tout type de composite tissé. Rappelons aussi, comme expliqué dans les parties 2.2.2. et 2.2.3., que la modélisation des composites tissés à l'échelle mésoscopique doit aussi permettre la mise en place d'essais d'endommagements virtuels. Ces essais doivent aider à l'identification des paramètres constituant la loi d'endommagement macroscopique, et a donc pour objectif à plus long terme la diminution du coût des campagnes d'essais. Une telle approche va dans ce sens (voir partie suivante).

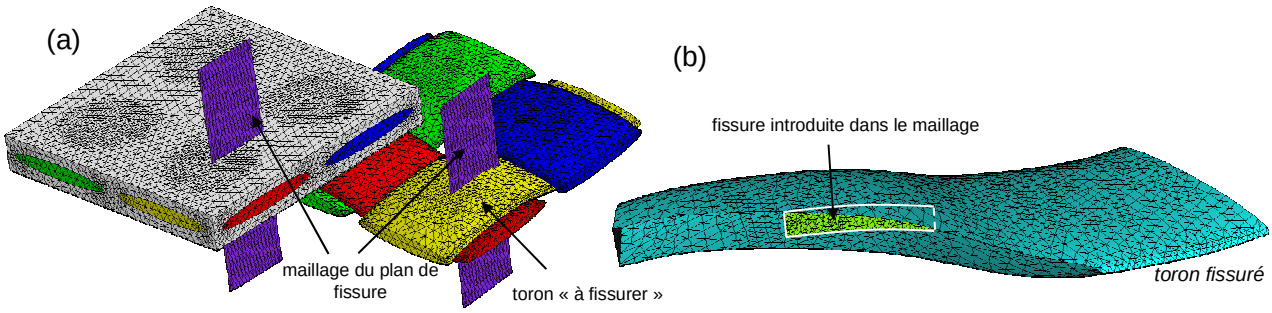


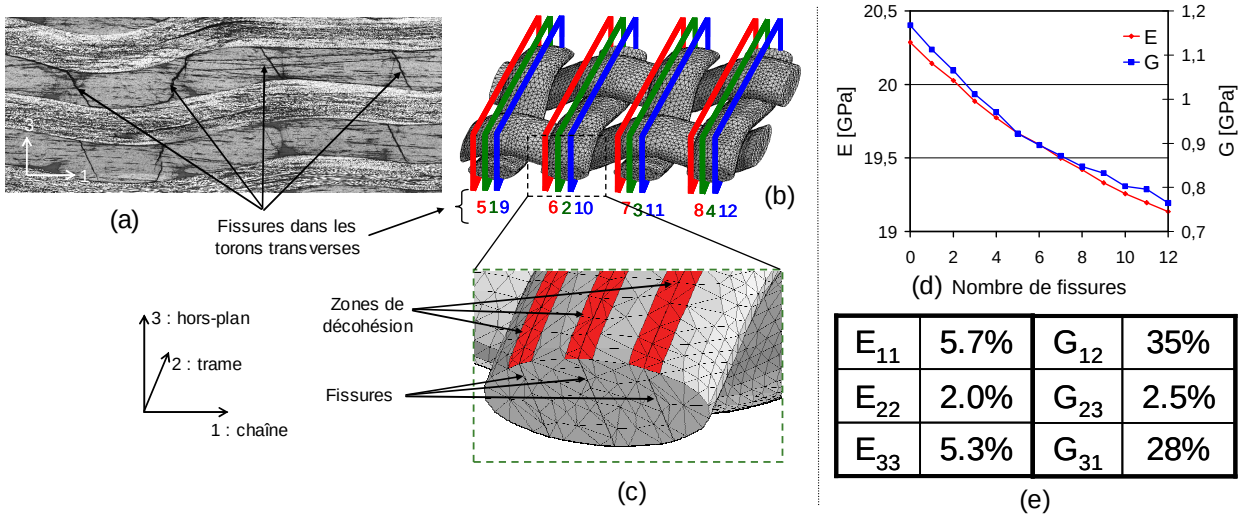
Fig. 5. (a) maillage d'une cellule mésoscopique de composite tissé « taffetas », et de son renfort (b) maillage du toron dans lequel on a introduit une fissure plane, intersection entre le toron et le plan de fissure visible sur(a).

4.2.2. Homogénéisation des propriétés élastiques de composites tissés endommagés

Les simulations que nous avons réalisées ont été réalisées avec le code de calcul ZéBuLoN, sous conditions aux limites périodiques. Cette supposition reste très classique dans le domaine des composites tissés [12, 15]. Une homogénéisation à l'échelle microscopique nous permet d'obtenir le matériau « toron » élastique homogène isotrope transverse [10]. L'orientation matériau est faite en début d'incrément en projetant orthogonalement chaque point de Gauss sur la ligne neutre du toron auquel il appartient, dont la tangente fournit la direction principale d'isotropie transverse du matériau.

La Figure 6 illustre la méthodologie suivie dans le cadre de cette étude afin de montrer l'effet de l'insertion successive de douze fissures planes, coupant les trames sur toute leur longueur, sur les propriétés mécaniques élastiques homogènes d'une cellule composite tissé mésoscopique de type taffetas, dont le renfort est illustré sur la Figure 6b (la matrice n'est pas représentée sur cette figure, mais elle est présente dans la simulation numérique). Cet ordre a été guidé par des observations réalisées à l'ONERA (Figure 6a) ainsi que par différents auteurs [9, 16], qui indiquent que les premiers endommagements interviennent dans les torons transverses à la direction de chargement. Nous avons donc représentés différentes configurations successives d'endommagement, comme le montre la Figure 6b, représentant l'état progressif du matériau après un chargement en traction uniaxiale selon la direction 1 (la direction des chaînes). Les fissures ont été introduites selon la procédure présentée dans la partie 4.2.1. Une décohésion toron-matrice (Figure 6c) a été ensuite ajoutée en bord de fissure à l'aide d'un outil basé sur [2]. Nous constatons une diminution progressive de l'ensemble des modules élastiques homogènes de la cellule (Figure 6d et e). L'insertion de fissures assouplit le matériau, ce qui semble intuitif. Plus précisément, les modules les plus touchés sont ceux qui sont associés à une direction dont l'endommagement est très présent. Ainsi, les modules E_{11} (direction normale aux plans des fissures) et E_{33} (principale composante de la

normale aux surfaces de décohésions toron/matrice en pointe des fissures transverses) ont une diminution plus importante que E_{22} (légère influence des décohésions et aucun effet des fissures). Toutefois ces pertes de propriétés restent faibles, car ce sont les torons longitudinaux sains (chaînes) qui portent principalement la charge lors d'une traction dans le sens 1. De même, les modules de cisaillement dans les directions des plans de fissures G_{12} et G_{31} sont nettement plus affectés par ce type d'endommagement que le module G_{23}, comme le montre le tableau de la Figure 3e. En effet, les fissures insérées sont planes, donc les deux plans constituant les lèvres de la fissure peuvent glisser l'un par rapport à l'autre, diminuant grandement la rigidité dans les directions du plan de fissure. Nous pouvons aussi noter que les modules de cisaillement sont nettement plus affectés par ce type d'endommagement que les modules d'élasticité, ce qui s'explique par le fait que le soutien apporté par les torons longitudinaux sains est beaucoup moins important en cisaillement qu'en traction.



E_{11}	5.7%	G_{12}	35%
E_{22}	2.0%	G_{23}	2.5%
E_{33}	5.3%	G_{31}	28%

Fig. 6. (a) section en sens chaîne (direction du chargement) d'un interlock carbone-epoxy – cliché ONERA (b) schéma montrant l'insertion successives de 12 fissures dans les torons trames (c) zoom sur une extrémité d'une trame (d) évolution du module d'élasticité homogène normal au plan des fissures et du module de cisaillement homogène dans le plan des fissures (e) évolution des modules élastiques homogènes de la cellule méso

Ces résultats illustrent la démarche adoptée, en montrant la sensibilité des propriétés élastiques homogènes de la cellule composite suite à la modification d'un paramètre d'entrée, ici l'insertion d'un certain type d'endommagement. Cette méthodologie, bien qu'encore en plein développement, doit aussi aider à l'identification des paramètres constituant la loi d'endommagement macroscopique, objectif à plus long terme présenté dans la partie 2.2.2.

5. Conclusions et perspectives

Afin de parvenir à optimiser les pièces composites à renfort tissé en prenant pour paramètres d'entrées leur fonction au sein de la structure ainsi que les propriétés de ses constituants, une chaîne de calcul directe a été proposée. Elle fait le lien entre les paramètres matériaux et procédés et les performances structurales. Cette chaîne est multiéchelle, multimodèle et modulable : chacun de ses modules comprend un ou plusieurs modèles liés à une échelle d'étude particulière : microscopique, mésoscopique ou macroscopique. Cette chaîne est principalement basée sur des modèles déjà disponibles dans la littérature, le travail étant ici de développer les liens entre les différents modules. Pour l'instant, le passage d'un module au suivant nécessite encore des interventions directes de l'utilisateur, mais des travaux sont menés afin d'automatiser « au maximum » cette chaîne. Le frein majeur à sa bonne mise en place se situe à l'échelle mésoscopique, où se pose la problématique de la représentation géométrique du renfort tissé et la création d'un maillage

exploitable dans un calcul EF. Deux modèles géométriques sont utilisés actuellement dans la chaîne proposée : un pour simuler la mise en forme du tissu sec, l'autre pour prévoir les propriétés élastiques finales du matériau composite dont le maillage est réalisé par une procédure développée dans le cadre de cette étude. Des recherches sont menées afin de travailler sur des maillages de composites dont le renfort tissé est déformé. Au niveau de l'étude du comportement du matériau, la prévision des propriétés élastiques est en excellente voie. Cependant, il reste du chemin à parcourir. En effet, la prévision de l'amorçage et de l'évolution de l'endommagement, ainsi que ses effets sur les différentes propriétés mécaniques homogénéisées du matériau restent un véritable challenge et constituent le point central de nos études. Afin de faire un premier pas vers la compréhension des mécanismes liés à l'endommagement de ce type de matériau, l'approche retenue dans cette étude est de modéliser l'endommagement de façon discrète, en insérant une fissure au sein du maillage. Là encore, des problématiques de maillage se posent. Le développement d'un outil permettant de couper le maillage d'un toron selon une surface nous a permis d'obtenir des premiers résultats. De plus, il faudra à l'avenir introduire d'autres complexités dans cette étude, telles que la viscosité de la matrice, ou la variation locale de ses propriétés en fonction du taux de réticulation. L'objectif final de cette chaîne de calcul est de prévoir la sensibilité des paramètres de sortie aux variations d'un paramètre d'entrée, afin de déterminer quels sont les paramètres réellement influents.

Références

[1] Mouritz A, Bannister M, Falzon P, Leong K. « Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites ». *Composites Part A*, vol. 30, p. 1444-1461, 1999.

[2] Couégnat G. « Approche multiéchelle du comportement mécanique de matériaux composites à renfort tissé ». *Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux 1*, 2008.

[3] Laine B. « Modélisation de la perméabilité des renforts fibreux utilisés dans la fabrication de pièces composites pour l'industrie aéronautique ». *Thèse de doctorat de l'ENSAM Paris*, 2008 [20] El Hage C. « Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel ». *Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne*, 2006.

[4] Hirsekorn M, Grail G, Carrère N. « Modeling the Curing Process of a Thermosetting Matrix and its Influence on Mechanical Behavior and Strength of Woven Fiber Reinforced Composites ». *Proceedings of TEXCOMP 2010*, p. 221-228, Lille, France, 26-28 Octobre 2010.

[5] Hochard C, Lahellec L, Bordreuil C. « A ply scale non-local fibre rupture criterion for CFRP woven ply laminated structures ». *Composite Structures*, vol. 80, p. 321–326, 2007.

[6] Marcin L. « Modélisation du comportement des matériaux composites tissés et analyse de la nocivité des défauts sur la tenue structurale ». *Thèse de doctorat*, Université Bordeaux 1, 2009.

[7] Bogdanovich AE, Pastore CM. « Material-smart analysis of textile reinforced structures ». *Composite Science and Technology, vol*. 56, p. 291–309, 1996..

[8] Feyel F, Chaboche JL. « FE² multiscale approach for modelling the elastoviscoplastic behaviour of long fibre SiC/Ti composite materials ». *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 183, p. 309-330, 2000.

[9] El Hage C. « Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel ». *Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne*, 2006.

[10] Hirsekorn M, Grail G, Carrère N. « Multi-scale modeling of the effect of damage in woven fiber reinforced composites ». *Proceedings of ECCM14*, paper 446, Budapest, Hongrie, 7-10 Juin 2010.

[11] Aimene Y, Hagège B, Sidoroff F, Vidal-Salle E, Boisse P, Dridi S. « Hyperelastic Approach for Composite Reinforcement Forming Simulations ». *International Journal of Material Forming*, Suppl. 1, p. 811-814, 2008.

[12] Boisse P, Gasser A, Hagège B, Billoet JL. « Analysis of the mechanical behaviour of woven fibrous material using virtual tests at the unit cell level ». *Journal of Materials Science*, vol. 40, p. 5955-5962, 2005.

[13] Hivet G, Boisse P. « Consistent 3D geometrical model of fabric elementary cell. Application to a meshing preprocessor for 3D finite element analysis ». *Finite Elements in Analysis and Design*, vol 42, p. 25–49, 2005.

[14] Chiaruttini V, Feyel F, Chaboche JL. « A robust meshing algorithm for complex 3d crack growth simulations ». *IV European Conference on Computational Mechanics*, Paris, France, May 16-21 2010.

[15] Lomov SV, Ivanov DS, Truong TC, Verpoest I, Baudry F, Vanden Bosche K, Xie H, « Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensil test ». *Composites of Science and Technology*, vol. 68, p. 2340-2349, 2008.

[16] Lomov SV, Ivanov DS, Verpoest I, M, Zako M, Kurashiki T, Nakai H, Hirosawa S. « Meso-FE modelling of textile composites : Road map, data flow and algorithms ». *Composites of Science and Technology*, vol. 67, p. 1870-1891, 2007.