

Différentes approches pour la simulation de la mise en forme des renforts fibreux de composites. Les intérêts de l'approche mésoscopique.

S. GATOULLAT ^a, E. VIDAL-SALLE ^a, P. BOISSE ^a

*a. Université de Lyon, CNRS
INSA-Lyon, LaMCoS UMR5259, F-69621, Villeurbanne, France*

Résumé :

Cet article présente une modélisation à l'échelle mésoscopique de la simulation de la mise en forme des renforts fibreux. Le comportement mécanique de chaque constituant est plus simple à modéliser que dans les modèles continus et des aspects difficiles de ces derniers, tels que l'actualisation de la direction des mèches, sont intégrés naturellement. La contrepartie réside dans le très grand nombre de composants à prendre en compte avec des contacts complexes entre eux. Les intérêts de cette approche sont également détaillés.

Abstract:

This paper presents a modelling at the mesoscopic scale of woven composite reinforcements. The mechanical behaviour of each compound is then simpler than for continuous models and difficult aspects such as yarn's direction updating are naturally built in. The counterpart lies in the large amount of components with complex contacts between them. Interests of this approach are also detailed.

Mots clefs : composites, renforts tissés, analyse méso/macro, simulation de mise en forme, éléments finis

1 Introduction

Les procédés LCM (Liquid Composite Molding) consistent à injecter une résine sur un renfort fibreux préalablement mis en forme. La simulation du formage de ce renfort permet de tenir compte de ses déformations à la fois dans l'étape d'injection et dans l'analyse des caractéristiques mécaniques de la pièce composite en service.

Les différentes approches développées pour la simulation de la mise en forme des renforts continus sont présentées. Les plus utilisées sont les approches continues qui supposent qu'un continuum fibreux au comportement particulier peut remplacer l'ensemble des fibres constituant le renfort. Le comportement de ce matériau continu en grandes transformations doit traduire les spécificités du comportement d'un textile. Si de nombreux modèles ont été proposés dans ce but, il n'en existe pas qui soit unanimement reconnu. Dans cet article les spécificités du comportement mécanique des textiles et leur prise en compte dans les principaux modèles seront rappelées ainsi que leurs domaines d'utilisation possible et leurs limites en mise en forme des matériaux fibreux.

Une autre approche consiste à considérer les composants du renfort fibreux aux échelles inférieures, soit à l'échelle de la mèche ou fil (échelle mésoscopique), soit à l'échelle de la fibre (échelle microscopique). Le comportement mécanique de chaque constituant est alors plus simple et des aspects difficiles dans les modèles continus, tels que l'actualisation de la direction des mèches, sont intégrés naturellement. La

contrepartie réside dans le très grand nombre de composants aux échelles inférieures avec des contacts complexes entre eux.

Si des travaux existent à l'échelle microscopique, utilisant des modèles qui décrivent chaque fibre [1], le très grand nombre de fibre par mèche (3K à 96K) limite leur utilisation et ne permet pas à ce jour d'envisager des simulations de mise en forme.

On présente dans cet article une approche basée sur une modélisation à l'échelle mésoscopique. Chaque mèche est représentée par un ensemble de membranes. La géométrie initiale du modèle traduit le tissage du renfort. Les contacts entre les mèches sont pris en compte. La mèche étant composée d'un grand nombre de fibres, son comportement est très spécifique compte tenu des glissements possibles entre ces fibres. On utilise pour cela un modèle hypoélastique basé sur une dérivée objective spécifique. Ces aspects seront détaillés et l'on montera l'intérêt de l'approche mésoscopique. En particulier des phénomènes tels que le « détissage », c'est-à-dire le glissement en translation des réseaux chaîne et trame, peuvent être mis en évidence.

2 Les différentes approches

2.1 Approche macroscopique

Les approches macroscopiques permettent de réaliser la simulation de pièces complexes. Pour ce faire, ils doivent traduire le comportement particulier des tissus. Il a été montré [2] que le comportement en tension des deux réseaux de mèches sont dépendants du rapport $k = \varepsilon_{11} / \varepsilon_{22}$ des déformations dans les directions chaîne et trame. La FIG. 1 montre les courbes tension/déformation pour un taffetas de verre équilibré. Ce comportement en tension, bien que faisant intervenir des rigidités importantes, n'est pas prépondérant lors de la mise en forme des renforts tissés. Cependant, malgré les faibles déformations dans le sens des fibres, la grande rigidité longitudinale de celles-ci peut faire apparaître des efforts importants.

Les tissus doivent principalement leur déformabilité à la possibilité pour les réseaux chaîne et trame de tourner l'un par rapport à l'autre. Ce comportement de cisaillement dans le plan du tissu se caractérise par trois phases. Dans un premier temps, les mèches tournent les unes par rapport aux autres [3]. Seuls le frottement des mèches entre elles et leur changement d'embuvage (ou d'ondulation) engendrent une résistance. Dans un second temps, les mèches viennent en contact latéral. Cette seconde phase se traduit par une rigidification importante du tissu. Enfin, les mèches se compactent transversalement. La FIG. 2 présente une courbe de cisaillement d'un taffetas de verre. L'énergie nécessaire pour continuer la rigidification étant alors plus importante que l'énergie nécessaire au flambement du tissu, on voit apparaître des plis. La rigidité de flexion, très faible est généralement négligée. Il a été montré [4] que celle-ci influe sur la forme des plis.

Une des approches macroscopiques existantes est celle proposée dans [5]. Dans ce modèle, le tissu est modélisé par un continuum intégrant les propriétés mécaniques des mèches des deux réseaux chaîne et trame. Si l'on ne prend pas en compte la flexion des mèches, l'énergie interne d'un élément est alors donnée par :

$$-W_{\text{int}} = \sum_{p=1}^{n_{\text{CER}}} \left(\varepsilon_{11}(\vec{\eta}) T^{11}(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}) L_1^p + \varepsilon_{22}(\vec{\eta}) T^{22}(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}) L_2^p \right) + \sum_{p=1}^{n_{\text{CER}}} \gamma(\vec{\eta}) C(\gamma) \quad (1)$$

où ε_{11} (resp. T_{11}), ε_{22} (resp. T_{22}) sont les déformations (resp. les tensions) dans les directions des mèches chaîne et trame et γ (resp. C) l'angle (resp. le couple) de cisaillement entre les deux réseaux de mèches. L_1^p et L_2^p représentent le nombre de cellules élémentaires représentatives (CER) dans les directions chaîne et trame.

Ce type d'approche permet, outre la simulation de la mise en forme de pièces complexes (dont les multiplis), de mettre en évidence les plissements éventuels. Par contre, il n'est pas possible de connaître la forme finale des mèches, connaissance nécessaire pour simuler le flux de résine lors de la phase d'injection. De plus, de

par leur nature continue, ces modèles ne permettent pas de prévoir les phénomènes de détissage.

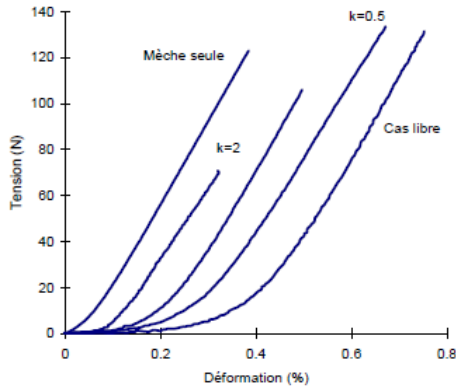


FIG. 1 - Courbes de comportement en traction biaxiale pour les mèches trames d'un taffetas de verre équilibré [2]

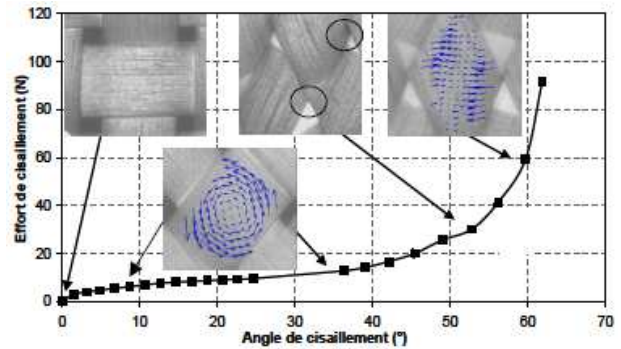


FIG. 2 - Courbe de comportement en cisaillement d'un taffetas de verre [6]

2.2 Approche mésoscopique basée sur l'étude de la cellule élémentaire représentative (CER)

L'approche mésoscopique consiste à considérer une cellule élémentaire représentative (CER) du tissu et à simuler son comportement pour en déduire le comportement macroscopique de celui-ci. La CER est choisie de manière à représenter le plus petit motif du tissage permettant de reconstruire le tissu complet. Les conditions aux limites appliquées au motif doivent traduire la périodicité de celui-ci [7]. Un modèle cohérent respectant les propriétés du tissage a été proposé dans [8]. Le constituant élémentaire de ce type de modèle est la mèche. Son comportement est caractérisé par sa rigidité en tension et par le comportement de sa section transverse reflétant le phénomène de compaction. Ce dernier est supposé isotrope dans la section transverse à la mèche. Le comportement est modélisé par une loi hypoélastique :

$$\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\sigma}}}}}}^\nabla = \underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{C}}}}}} : \underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{D}}}}}} \quad (2)$$

où $\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\sigma}}}}}}^\nabla$ et $\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{D}}}}}}$ sont respectivement les tenseur des contraintes de Cauchy et le tenseur taux de déformation. $\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{C}}}}}}$ est le tenseur de comportement du matériau. $\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\sigma}}}}}}^\nabla$ est une dérivée objective du tenseur $\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\underline{\sigma}}}}}}^\nabla$ que nous allons définir. Les mèches étant constituées de fibres, leur comportement diffère de celui d'un solide continu et certaines précautions doivent être prises lors de la discrétisation des mèches par des éléments finis volumiques. Il a été montré [9] que seule l'utilisation d'une dérivée objective basée sur une rotation suivant la direction longitudinale des mèches est possible.

Les modélisations de ce type présentent l'avantage de décrire précisément la géométrie des mèches et du tissage et de ce fait permettent de considérer les contacts entre mèches de manière précise. Elles permettent ainsi d'obtenir les propriétés macroscopiques du tissu à partir des propriétés des mèches. La contrepartie réside dans le fait que ces méthodes ne permettent pas la simulation de mise en forme de renforts tissés. En effet, leur extension de la CER au tissu complet n'est pas envisageable à ce jour étant donnée la puissance de calcul nécessaire. De plus, les phénomènes macroscopiques tels que les plissements et les détissages ne peuvent pas être mis en évidence, les plissements intervenant à l'échelle macroscopique et les détissages étant exclus du fait des conditions aux limites imposées.

2.3 Approche méso/macro

L'approche méso/macro présentée ici a pour objectif de permettre la simulation de la mise en forme à

l'échelle macroscopique de renforts de composites tout en considérant une description mésoscopique du tissu. Cela est rendu possible par la simplification de la description géométrique du tissage (FIG. 3 et FIG. 4). Les éléments volumiques utilisés lors de l'approche précédente sont remplacés par des éléments de membrane ou de coque et une loi de comportement du même type que celle présentée précédemment est utilisée.

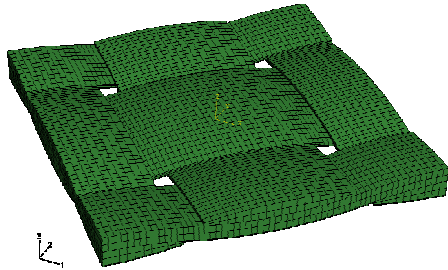


FIG. 3 - Model mésoscopique de taffetas pour l'étude de la CER (47214 DDLs)

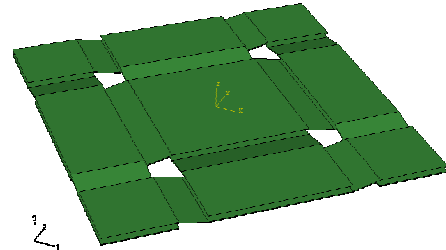


FIG. 4 - Model mésoscopique de taffetas pour l'étude méso/macro (216 DDLs)

Des approches similaires ont été utilisées dans [10] pour simuler le comportement balistique d'un tissu ou encore dans [11] où des non-tissés ont été modélisés par deux réseaux de mèches liés par leurs coutures.

3 Résultats

Nous présentons ici deux simulations effectuées par une approche méso/macro. La première est une simulation d'un essai expérimental couramment pratiqué sur les tissus, à savoir l'essai de cadre (picture frame test). La seconde est une simulation d'emboutissage hémisphérique. Le tissu considéré est un taffetas de verre. Celui-ci a été modélisé dans un premier temps par des éléments de membrane.

3.1 Essai de cadre

L'essai de cadre consiste à placer un échantillon de tissu carré dans un cadre constitué de quatre barres reliées à leurs extrémités par des liaisons pivots. Le tissu est positionné de manière à ce que les deux réseaux de mèches soient alignés avec les bords du cadre pour qu'aucune mèche ne s'allonge au cours de la déformation du cadre et que seul le cisaillement intervienne.

La FIG. 5 présente la déformation d'un tissu composé de 32 mèches chaîne et 32 mèches trame. La simulation fait nettement apparaître la formation des plis. L'effort de traction correspondant au cas expérimental est calculé à partir des déplacements des coins de la grande diagonale du cadre et du travail. Cet effort est rapporté à la surface du tissu [12] pour pouvoir être comparé aux résultats expérimentaux disponibles. La FIG. 6 présente la courbe de cet effort normalisé en fonction de l'angle de cisaillement. Les résultats expérimentaux issus d'un benchmark international [12] sont donnés FIG. 7.

On constate que l'on retrouve la forme générale de la courbe avec ses trois phases. Cependant, la première phase donne lieu à des efforts relativement faibles par rapport aux efforts intervenant pour les angles de cisaillement importants. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, lors des essais expérimentaux, les mèches sont toujours en légère tension et il a été montré que la tension initiale des mèches influe largement sur la phase initiale de cisaillement [13]. De plus, dans cette simulation, les phénomènes de flexion n'ont pas été pris en compte. La modification de l'ondulation des mèches se fait alors sans effort. Ces deux causes ont pour effet de minimiser le frottement entre les mèches d'où cette faible pente initiale de la courbe d'effort surfacique. D'autre part, on remarque que les efforts mis en jeu diffèrent de manière importante des efforts mesurés expérimentalement. Cela montre que les paramètres matériaux de la mèche doivent être adaptés pour que le modèle simplifié soit représentatif.

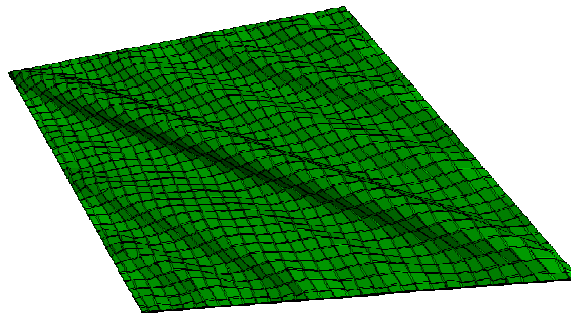


FIG. 5 - Taffetas cisailé lors d'un essai de cadre

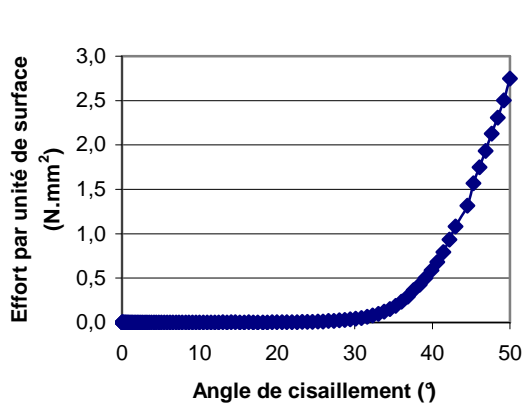


FIG. 6 - Effort de cisaillement normalisé issu de la simulation de l'essai de cadre pour un taffetas de 32x32 mèches

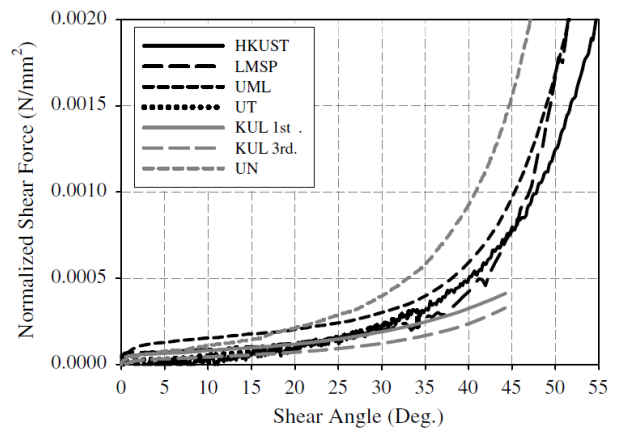


FIG. 7 - Efforts de cisaillement normalisés issus d'essais réalisés par différentes équipes internationales [12]

3.2 Emboutissage hémisphérique

Ce procédé consiste à mettre en forme un tissu à l'aide d'un poinçon et d'une matrice. Le tissu, posé sur la matrice est entraîné par le poinçon dans celle-ci. Un serre flanc maintient le tissu afin de limiter l'avalement de ce dernier par la matrice. L'état du tissu après mise en forme est donné FIG. 8.

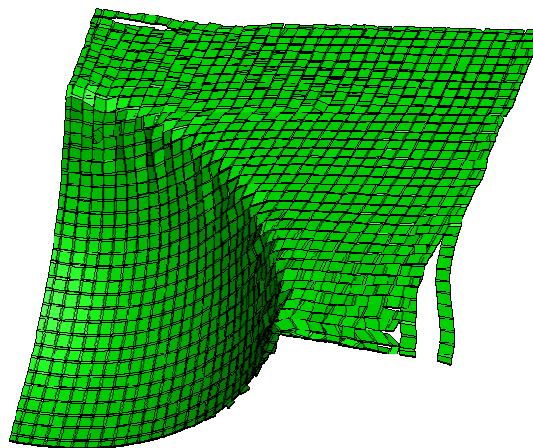


FIG. 8 - Quart de tissu mis en forme par un poinçon et une matrice hémisphériques

Cette mise en forme met en évidence les phénomènes de détissage qui peuvent apparaître. On voit en effet que les mèches extérieures du tissu ont tendance à sortir de celui-ci. Ce résultat montre également la capacité de la méthode à s'appliquer sur des cas réels de mise en forme.

4 Conclusion

L'approche méso/macro présentée ici permet la simulation de la mise en forme de renforts de composites tissés. Elle présente pour avantages de représenter l'ensemble des mèches du tissu et les interactions entre elles tout en permettant la simulation d'un grand nombre de cellules de tissage. Les données comme les efforts que subissent les mèches, l'apparition des détissages ou des plissements sont accessibles là où elles ne le sont pas avec les autres méthodes. Cette approche nécessite néanmoins d'adapter les paramètres matériau des mèches. L'utilisation d'éléments de coques permettrait d'introduire la rigidité de flexion des mèches mais cela nécessite un traitement spécifique car la mèche, ensemble de fibres, ne se comporte pas comme une coque constituée d'un matériau continu.

Références

- [1] Durville D., Une approche pour la simulation numérique des milieux enchevêtrés et des structures tissées, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 août 2007
- [2] Buet-Gautier K., Analyse et simulation du comportement mécanique des renforts composites tissés, Université d'Orléans, 1998
- [3] Buet-Gautier K., Boisse P., Experimental analysis and modeling of biaxial mechanical behavior of woven composite reinforcements, *Experimental Mechanics*, 2001, 41, 260-269
- [4] Hamila N., Simulation de la mise en forme des renforts composites mono et multi plis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007
- [5] Hamila N., Boisse P., A meso-macro three node finite element for draping of textile composite preforms, *Applied Composite Materials*, 2007, 14, 235-250
- [6] Dumont F., Contribution à l'expérimentation et à la modélisation du comportement mécanique de renforts de composites tissés, Université Paris VI, 2003
- [7] Badel P., Vidal-Sallé E., Boisse P., Computational determination of in-plane shear mechanical behaviour of textile composite reinforcements, *Computational Materials Science*, 2007, 40, 439-448
- [8] Hivet G., Modélisation mésoscopique pour le comportement bi-axial et la mise en forme des renforts de composites tissés, Université d'Orléans, 2003
- [9] Badel P., Vidal-Sallé E., Boisse P., Large deformation analysis of fibrous materials using rate constitutive equations, *Computers & Structures*, 2008, 86, 1164-1175
- [10] Sapozhnikov S. B., Forental M. V., Dolganina N. Y., Improved methodology for ballistic limit and blunt trauma estimation for use with hybrid metal/textile body armor, *Finite element modelling of textiles and textile composites*, 2007
- [11] Creech G., Pickett A. K., Meso-modelling of Non-Crimp Fabric composites for coupled drape and failure analysis, *Journal of Materials Science*, 2006, 41, 6725-6736
- [12] Cao J. & al., Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39, 1037-1053
- [13] Badel P., Analyse mésoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008