



HAL
open science

Simulations éléments finis de la déformation des renforts fibres de composites aux échelles macro et mésoscopique

Nahiène Hamila, Pierre Badel, Emmanuelle Vidal-Salle, Philippe Boisse

► To cite this version:

Nahiène Hamila, Pierre Badel, Emmanuelle Vidal-Salle, Philippe Boisse. Simulations éléments finis de la déformation des renforts fibres de composites aux échelles macro et mésoscopique. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01413201

HAL Id: hal-01413201

<https://hal.science/hal-01413201v1>

Submitted on 9 Dec 2016

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Simulations éléments finis de la déformation des renforts fibreux de composites aux échelles macro et mésoscopique

N. Hamila, P. Badel, E. Vidal-Salle, P. Boisse

Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides

LaMCoS, INSA de Lyon

69621 Villeurbanne Cedex, France

{Nahiene.Hamila,Pierre.Badel, Emmanuelle.Vidal-Salle,Philippe.Boisse}@insa-lyon.fr

Résumé – La connaissance du comportement mécanique des tissus utilisés comme renforts de composites est nécessaire pour réaliser des simulations de préformage. Cette étude vise à rappeler la spécificité du comportement mécanique des tissus secs et à déterminer ses propriétés mécaniques par des essais virtuels. Pour ceci, des analyses éléments finis 3D des cellules tissées unitaires sont réalisées. Ces calculs ne sont pas classiques compte tenu de la constitution des fils faits de milliers de fibres de petits diamètres

Ces comportements matériaux seront utilisés dans des simulations macroscopiques dans des cas d'emboutissages. Il sera discuté de l'importance des différentes rigidités dans l'apparition et la forme des plis.

Mots clés – Milieux fibreux, matériaux composites, mise en forme.

1 Introduction

Les procédés de mise en forme des matériaux composites sont nombreux et souvent délicats. Le procédé RTM (Resin Transfer Moulding) est apprécié pour sa capacité à mettre en forme des pièces à géométries complexes et fortement non développables. Le procédé RTM se décompose en une étape de mise en forme du renfort, par procédé d'emboutissage par exemple, puis de l'injection de résine sur ce renfort. Les efforts de recherche concernant les procédés d'emboutissage portent tant sur l'aspect expérimental que sur l'aspect numérique. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail qui consiste à établir des méthodes de simulation de mise en forme des renforts textiles à fibres continues pour les matériaux composites.

La simulation de la mise en forme des renforts composites a plusieurs objectifs. Elle permet de déterminer la faisabilité ou les conditions de cette faisabilité et surtout elle permet de connaître la position des fibres après formage. Ceci est important pour la détermination des caractéristiques mécaniques du composite en service et pour le calcul de la perméabilité après drapage nécessaire pour une analyse correcte de l'injection. Les simulations évitent les coûteuses études expérimentales par essais-erreurs.

Le comportement du renfort tissé est multi échelles. On distingue une échelle qualifiée de microscopique correspondant à l'échelle de la fibre, d'une échelle mésoscopique représentant l'échelle de la mèche, et une échelle macroscopique qui est celle de la pièce composite (Figure 1). Le comportement macroscopique d'un renfort est directement hérité des phénomènes aux échelles supérieures. Le comportement des fibres, le mode d'assemblage sous forme de mèches puis sous forme de renfort va en déterminer les caractéristiques principales.

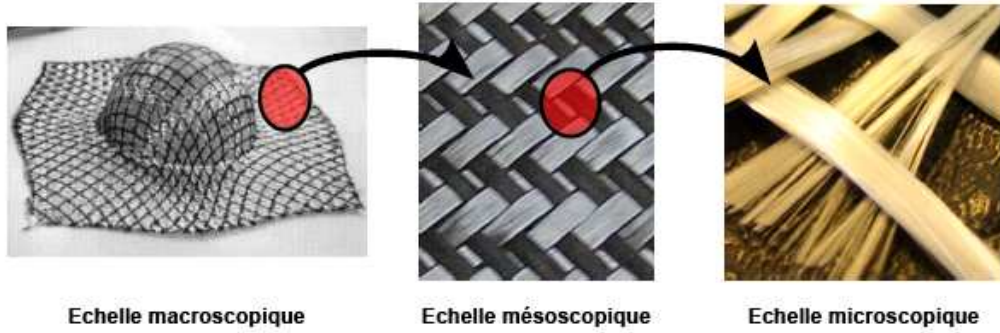


Figure 1 - Les trois échelles caractéristiques de l'étude des renforts tissés

2 Analyse mécanique des renforts tissés à l'échelle mésoscopique

Réaliser des simulations mésoscopiques des déformations de renforts textiles par la méthode des éléments finis requiert un modèle de comportement du matériau « mèche ». Ce comportement est très particulier en raison de la nature fibreuse du matériau que l'on devra pourtant considérer comme continu. Ainsi, la grande rigidité longitudinale des mèches devant les autres rigidités et le comportement transverse de la mèche sont deux aspects importants pour ce type d'analyse.

2.1 Modèle de comportement mécanique

Le modèle de comportement adopté ici est écrit dans le cadre de l'hypo-élasticité [1]. Le comportement mécanique est supposé isotrope transverse dans le plan perpendiculaire à la direction des fibres que l'on note $\underline{\mathbf{f}}_1$.

Une loi de comportement hypo-élastique a la forme suivante : $\underline{\underline{\underline{\sigma}}}^\nabla = \underline{\underline{\underline{\mathbf{C}}}} : \underline{\underline{\underline{\mathbf{D}}}}$ où $\underline{\underline{\underline{\sigma}}}^\nabla$ et $\underline{\underline{\underline{\mathbf{D}}}}$ sont respectivement les tenseurs de taux de contraintes de Cauchy objectif et de taux de déformation et $\underline{\underline{\underline{\mathbf{C}}}}$ le tenseur de comportement. Cette équation est intégrée sur un incrément de temps $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ en utilisant la formule de Hughes & Winget [2] fréquemment utilisée dans les codes de calcul par éléments finis :

$$\left[\underline{\underline{\underline{\sigma}}}^{n+1} \right]_{\mathbf{e}_i^{n+1}} = \left[\underline{\underline{\underline{\sigma}}}^n \right]_{\mathbf{e}_i^n} + \left[\underline{\underline{\underline{\mathbf{C}}}^{n+1/2}} \right]_{\mathbf{e}_i^{n+1/2}} \left[\underline{\underline{\underline{\Delta \epsilon}}} \right]_{\mathbf{e}_i^{n+1/2}} \quad (1)$$

où $\left[\underline{\underline{\underline{\mathbf{S}}}} \right]_{\mathbf{e}_i^n}$ est la matrice des composantes d'un tenseur $\underline{\underline{\underline{\mathbf{S}}}}$ exprimé dans la base $\{ \underline{\mathbf{e}}_i \} = \underline{\mathbf{e}}_i \otimes \underline{\mathbf{e}}_j \otimes \dots \otimes \underline{\mathbf{e}}_m$. $\{ \underline{\mathbf{e}}_i \}$ est la base tournée dont la rotation est utilisée pour le calcul des dérivées objectives. Le premier point principal du modèle est abordé au travers de cette équation. En effet, la très grande rigidité longitudinale des fibres requiert de suivre précisément leur direction sous peine d'accumuler d'importantes erreurs sur les contraintes. Pour cela, la base tournée, noté $\{ \underline{\mathbf{f}}_i \}$, doit être attachée à la direction de fibre $\underline{\mathbf{f}}_1$, c'est-à-dire que l'on utilise une dérivée objective en rotation basée sur la rotation des fibres. Les deux autres vecteurs $\underline{\mathbf{f}}_2$ et $\underline{\mathbf{f}}_3$ de la base tournée doivent suivre les mouvements de corps rigide. $\underline{\mathbf{f}}_2$ est défini par projection dans le plan transverse du vecteur initial transporté par la déformation et $\underline{\mathbf{f}}_3$ par produit vectoriel [3]. Finalement, la matrice $\left[\underline{\underline{\underline{\mathbf{C}}}} \right]_{\mathbf{f}_i}$ utilisée dans l'équation ci dessus est écrite dans cette base liée aux fibres, ce qui offre l'avantage de pouvoir distinguer ses composantes

longitudinales et transversales afin de bien les identifier. Ce modèle a été comparé, pour des tests élémentaires, aux modèles classiques en grandes transformations (Jaumann, Green Naghdi), et il s'avère que pour un matériau à une direction de fibres, ces derniers ne garantissent pas un état de contrainte cohérent alors, à l'inverse de ce modèle. Un test de cisaillement sous tension est le plus discriminant.

Le comportement transverse est le second aspect important pour les analyses car il intervient sur les changements de forme des sections de mèches. On propose ici une approche dans laquelle les phénomènes sphériques et déviatoriques sont découplés dans le plan transverse aux fibres. Les observations de coupes encouragent cette approche : on distingue clairement deux modes de déformation de la mèche (Figure 2). D'une part la compaction du réseau de fibres (visible en tension, par exemple) et d'autre part un réarrangement du réseau de fibres entraînant un changement de forme de la section transverse de la mèche. On considère par la suite que ces deux modes de déformation sont découplés, ce qui reste valide sous l'hypothèse d'isotropie dans ce plan [4].

La séparation en parties sphériques et déviatoriques de la partie transverse du tenseur des contraintes s'écrit :

$$[\tilde{\sigma}_T]_{f_i} = \begin{bmatrix} \sigma_s & 0 \\ 0 & \sigma_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_d & \sigma_{23} \\ \sigma_{23} & -\sigma_d \end{bmatrix} \quad \text{avec } \sigma_s = \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} \text{ et } \sigma_d = \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{2} \quad (2)$$

Pour l'instant, le modèle est purement élastique (non linéaire) et le découplage proposé mène aux relations : $\sigma_s = A\varepsilon_s$; $\sigma_d = B\varepsilon_d$; $\sigma_{23} = C\varepsilon_{23}$ où ε_s et ε_d sont définis de la même manière que σ_s et σ_d et A, B, C sont les coefficients élastiques. On peut montrer que $B=C$. Finalement le modèle de comportement transverse contient deux coefficients élastiques indépendants, ce qui correspond effectivement à un milieu isotrope bidimensionnel.

Pour compléter la description du modèle, la forme de A et B doit être spécifiée. Pour cela, nous nous basons sur des hypothèses physiques simples. Sous compaction, le matériau se rigidifie à la fois en comportement sphérique et en comportement déviatorique en raison de la densification du paquet de fibres. Sous tension longitudinale également, le comportement sphérique doit être plus rigide. L'influence de la tension longitudinale sur le comportement déviatorique étant moins évidente, elle n'est pas considérée ici. A partir de ces hypothèses, la forme proposée pour les coefficients A et B est la suivante : $A=A_0e^{-p\varepsilon_s}e^{n\varepsilon_{11}}$ et $B=B_0e^{-p\varepsilon_s}$.

2.2 Simulations mésoscopiques

En raison de la périodicité du renfort, il convient de ne modéliser qu'une partie du renfort, appelée cellule élémentaire (voir figure 1b, cellule déformée) et d'appliquer des conditions aux limites adaptées. Dans certains cas, la géométrie minimale à modéliser peut être diminuée en raison de certaines symétries mais il ne s'agit pas du cas général, par exemple cela n'est pas possible en cisaillement.

Sur le plan mécanique, on s'intéresse aux résultats donnant le couple de cisaillement en fonction de l'angle de cisaillement. Ce genre de données peut être important lors de la conception d'un tissu, elles sont aussi utilisées pour alimenter les simulations de mise en forme de renforts de composites. En effet, ce comportement est à l'origine des plis, non souhaités, qui peuvent se former.

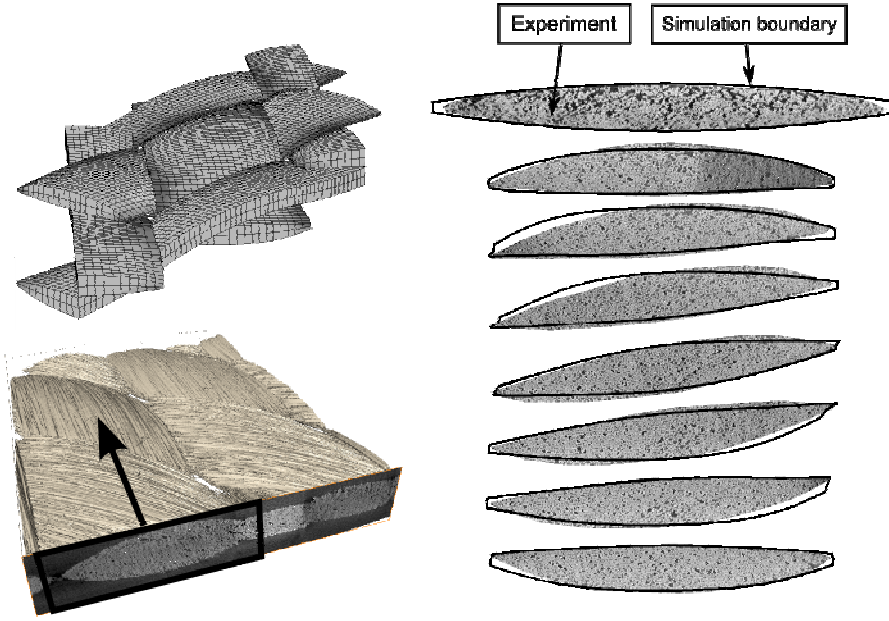


Figure 2 - Résultats de simulations de cisaillement et comparaison avec la tomographie.

Sur le plan de la géométrie déformée qui peut être utilisée pour de nombreuses applications (dont en particulier l'évaluation de la perméabilité [5]), la reconstruction par tomographie a été faite à une résolution de $2.85 \mu\text{m}$ pour un angle de cisaillement de 46° . La comparaison avec la simulation est donnée pour un jeu de sections le long d'une demi-période (Figure 2). On note que la section simulée est compactée assez fortement et que le modèle reproduit les dissymétries et distorsions de la section transverse de mèche due au cisaillement du renfort.

3 Modélisation et simulations de tissus

3.1 Le modèle semi-discret

Dans le travail présenté l'approche est qualifiée de semi-discrète [6]. Le renfort tissé est traité comme un ensemble discret de CER. Cela a pour avantage de pouvoir décrire directement l'énergie de déformation grâce aux mesures expérimentales faites à l'échelle macroscopique ou par simulations numériques tridimensionnelles à l'échelle mésoscopique. Ainsi le travail des efforts internes dans le champ de déplacement virtuel $\underline{\eta}$ sera la somme des travaux dans chaque

CER, c'est-à-dire la somme du travail virtuel des efforts de tension $W_{\text{int}}^t(\underline{\eta})$, de cisaillement

$W_{\text{int}}^s(\underline{\eta})$ et de flexion $W_{\text{int}}^b(\underline{\eta})$ avec :

$$W_{\text{int}}^t(\underline{\eta}) = \sum_{p=1}^{\text{ncell}} {}^p\varepsilon_{11}(\underline{\eta}) {}^pT^{11} {}^pL_1 + {}^p\varepsilon_{22}(\underline{\eta}) {}^pT^{22} {}^pL_2 \quad (3)$$

$$W_{\text{int}}^s(\underline{\eta}) = \sum_{p=1}^{\text{ncell}} {}^p\gamma(\underline{\eta}) {}^pC_\gamma \quad (4)$$

$$W_{\text{int}}^b(\underline{\eta}) = \sum_{p=1}^{\text{ncell}} {}^p\chi_{11}(\underline{\eta}) {}^pM^{11} {}^pL_1 + {}^p\chi_{22}(\underline{\eta}) {}^pM^{22} {}^pL_2 \quad (5)$$

Où ncell est le nombre de CER, T la tension dans la direction des mèches, qui est couplé à la déformation ε , C le couple découlant de l'actions des chaînes sur les trames associé à l'angle de cisaillement γ et M le moment de flexion associée à la courbure χ .

3.2 Simulation mettant en valeur l'influence des différentes rigidités

La prise en compte ou non de chacune des énergies de déformation des équations 1 à 3 conduit à un résultat géométrique et mécanique sensiblement différent. Deux exemples proposés Figure 3 inspirés de [7] permettent de mettre cela en valeur. Dans les simulations proposées, on soumet un coussin (circulaire en rouge et carré en blanc) à une pression surfacique suiveuse. Dans la Figure 3a l'énergie de cisaillement n'a pas été prise en compte. En comparant ce résultat à la Figure 3b il est clair que l'apparition des plissements est une conséquence directe de la prise en compte de cette forme d'énergie. Il reste cependant que la forme des plissements n'est réaliste que si on inclue la rigidité de flexion (Figure 3c).

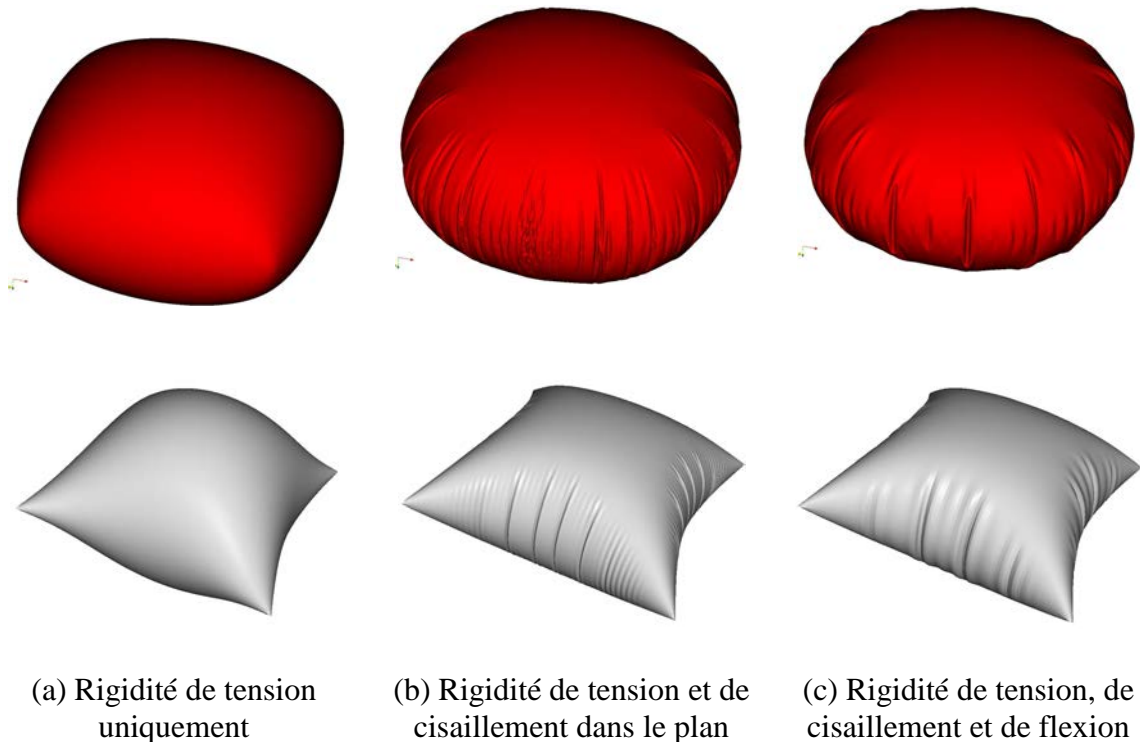


Figure 3 – Mise en valeurs de l'influence des différentes rigidités de tissu

4 Conclusions

Les textiles sont des matériaux multi-échelles. L'analyse de leur déformation à l'échelle mésoscopique et macroscopique a été présentée. L'échelle mésoscopique peut être utilisée comme tests virtuel pour déterminer les comportement du renfort et également en vue de la détermination de la perméabilité. Pour ce qui est des analyses macroscopiques, les rigidités de cisaillement et de flexion sont de second ordre par rapport à celles de tension. Néanmoins elle sont nécessaire pour obtenir l'apparition et le développement de plissements dans la simulation.

Références

- [1] Truesdell C. Hypo-elasticity. *J. Rat. Mech. Anal.*; 4: 83-133 , 1955.
- [2] Hughes TJR, Winget J. Finite rotation effects in numerical integration of rate constitutive

equations arising in large deformation analysis. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 1980; 15: 1862-1867, 1980.

- [3] P. Badel, S. Gauthier, E. Vidal-Salle; P. Boisse; Rate constitutive equations for computational analyses of textile composite reinforcement mechanical behaviour during forming, *Composites Part A*, On line, doi : 10.1016/j.compositesa.2008.04.015
- [4] P. Badel, E. Vidal-Salle, E. Maire, P. Boisse, Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic, *Composites Science and Technology* 68 (2008) 2433–2440
- [5] F. Loix, P. Badel, L. Orgéas, C. Geindreau, P. Boisse, Woven fabric permeability : from textile deformation to fluid flow mesoscale simulations, *Composites Science and Technology* 68: 1624–1630, 2008
- [6] N. Hamila, P. Boisse. Simulations of textile composite reinforcement draping using a new semi-discrete three node finite element. *Composites Part B*, 39 : 999–1010 , 2008.
- [7] Flores Fernando G., Onate Eugenio. *Application of a rotation-free triangle element for finite strain analysis of thin shells and membranes*, Ed : ONATE E., KROPLIN B. Textile Composites And Inflatable Structures. Springer, 2005, pp.69-88.