

Approches macroscopiques et mesoscopiques pour la simulation du préformage des renforts de composites dans les procédés LCM

P. Boisse, S. Gatouillat, N. Hamila, E. Vidal-Sallé

LaMCoS, INSA Lyon, France, Philippe.Boisse@insa-lyon.fr

Résumé — Le présent travail a pour objectif de présenter des approches aux échelles macroscopiques et mesoscopiques pour la simulation de la mise en forme des renforts de composites textiles. Une approche mésoscopique décrit chaque mèche d'un renfort tissé. Dans le cas d'un maillage fin elle est utilisée comme essai virtuel en simulant la réponse de la maille élémentaire à différentes déformations. Elle peut être également utilisée pour la simulation de la mise en forme et permet de simuler des glissements des réseaux chaîne trame, c'est-à-dire des décohésions du tissage du renfort. Enfin une approche semi discrète utilise des éléments finis de coque composés de mailles élémentaires tissée sera utilisée pour analysée les causes des plissements dans une mise en forme.

Mots clefs — Préforme, composites, meso/macroscopique

1 Introduction

Les renforts de composites sont constitués par un assemblage de fibres, souvent groupées en fils ou mèches. Cet assemblage conduit à des interactions et permet certains mouvements relatifs des fils (échelle mesoscopique) et fibres (échelle microscopique). Le comportement mécanique qui en résulte est complexe. La nature multi-échelle du renfort textile conduit à différentes approches et modèles.

Une première famille des modèles considère le tissu comme un continuum anisotrope [1-7] dont le comportement mécanique doit tenir compte de l'influence de la meso-structure tissée. Si ces modèles peuvent être facilement intégrés dans les éléments finis classiques, l'identification des paramètres matériels homogénéisés est difficile, particulièrement parce que ces paramètres changent quand le tissu est soumis aux grandes déformations dues à une mise en forme.

A l'opposé, certains auteurs ont proposé des modèles discrets pour les tissus basés sur une modélisation de chaque fil ou fibre tissés habituellement décrits par des éléments simplifiés tels que les poutres et les ressorts [8-10]. Une difficulté importante se situe dans le nombre très grand des composants à l'échelle mesoscopique ou microscopique et des contacts entre ces éléments.

On présente tout d'abord dans ce papier une analyse mesoscopique de la déformation d'une maille élémentaire, c'est-à-dire faite à l'échelle de la mèche. Le comportement de la mèche composée de milliers de fibres est spécifique et décrit ici par un modèle hypoélastique dont la dérivée objective est faite dans un repère qui suit les fibres [11-12]. Le comportement transverse du fil sépare la partie sphérique de la déformation (changement de densité de fibres) et la partie déviatorique (changement de forme). On compare les déformées obtenues dans un cas de cisaillement plan à ceux obtenus par tomographie. Ce modèle de maille élémentaire mésoscopique est ensuite simplifié pour permettre la simulation de la mise en forme d'une pièce entière. Enfin des éléments de type semi-discrets qui peuvent être vu comme intermédiaires entre une approche continue et mésoscopique sont utilisés pour des simulations de mise en forme [13]. Le rôle des rigidités de traction, cisaillement plan et flexion est analysé sur un exemple de mise en forme d'un renfort très déséquilibré.

2. Analyse à l'échelle mesoscopique

2.1 Déformation de la maille élémentaire

Le modèle de comportement adopté ici est écrit dans le cadre de l'hypoélasticité. Le comportement mécanique est supposé isotrope transverse dans le plan perpendiculaire à la direction des fibres que l'on note $\underline{\mathbf{f}}_1$. La loi de comportement est de la forme :

$$\underline{\underline{\underline{\sigma}}}^\nabla = \underline{\underline{\underline{\mathbf{C}}}} : \underline{\underline{\underline{\mathbf{D}}}} \quad (1)$$

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 $\Delta t = t^{n+1} - t^n$

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

$\{\underline{\mathbf{e}}_i\}$ est la base tournée dont la rotation est utilisée pour le calcul des dérivées objectives. 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, notée $\{\underline{\mathbf{f}}_i\}$, doit être attachée à la direction de fibre, 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 [11-12].

Le comportement transverse est le second aspect important pour les analyses car il intervient sur les changements de forme des sections de mèches. Dans l'approche décrite ici, les phénomènes sphériques et déviatoriques sont découplés dans le plan transverse aux fibres. Les observations de coupes de renforts déformés encouragent cette approche : on distingue clairement deux modes de déformation de la mèche. 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 [11]. 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.

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

$$\left[\underline{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}_T \right]_{\mathbf{f}_i} = \begin{bmatrix} \sigma_s & 0 \\ 0 & \sigma_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_d & \sigma_{23} \\ \sigma_{23} & -\sigma_d \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \sigma_s = \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} \quad \text{et} \quad \sigma_d = \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{2} \quad (3)$$

Le modèle est 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. La forme proposée pour les coefficients A et B est la suivante :

$$A = A_0 e^{-p\varepsilon_s} e^{n\varepsilon_{11}} \quad \text{et} \quad B = B_0 e^{-p\varepsilon_s} \quad (4)$$

On compare figure 1 la géométrie déformée obtenue dans un cas de cisaillement plan d'une cellule élémentaire de type taffetas à la géométrie déformée mesurée par tomographie [11].

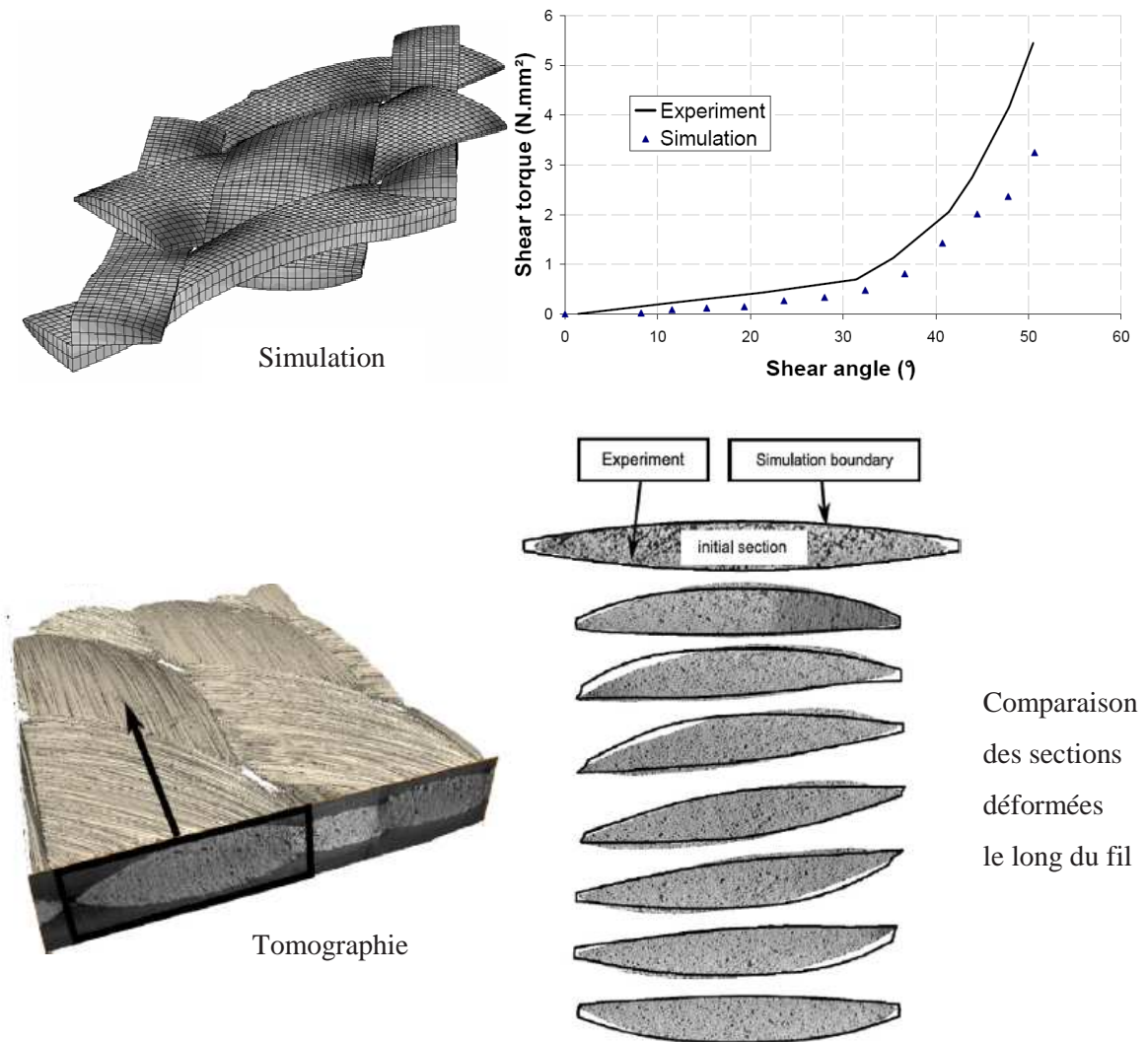


FIG. 1 – Simulations du cisaillement d'une maille élémentaire. Courbe couple/angle de cisaillement. Comparaison calcul/tomographie des sections droites le long du fil

La simulation du cisaillement d'une maille élémentaire est un essai virtuel et donne le couple de cisaillement en fonction de l'angle de cisaillement. Ces données peuvent être importantes lors de la conception d'un tissu, elles sont aussi utilisées pour alimenter les simulations de mise en forme de renforts de composites.

La géométrie déformée peut être utilisée pour de nombreuses applications (en particulier l'évaluation de la perméabilité [14-15]). La reconstruction par tomographie a été faite à une résolution de 2.85 μm pour un angle de cisaillement de 46°. La comparaison avec la simulation est donnée pour un ensemble de sections le long d'une demi-période (figure 1). 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.

2.2 Approche mesoscopique pour la simulation de la mise en forme

L'approche mesoscopique présentée ci-dessus est étendue pour simuler la mise en forme d'une pièce entière. L'intérêt consiste à prendre en compte automatiquement la structure tissée du renfort et de permettre d'éventuels glissements entre les réseaux chaîne et trame. La simulation de la mise en forme de la pièce entière nécessite la simplification de la description géométrique de la cellule tissée (figure 2). Les éléments volumiques utilisés lors de l'approche précédente sont remplacés par des éléments de coque. Une loi de comportement hypoélastique du même type que celle présentée précédemment est utilisée pour le comportement membranaire.

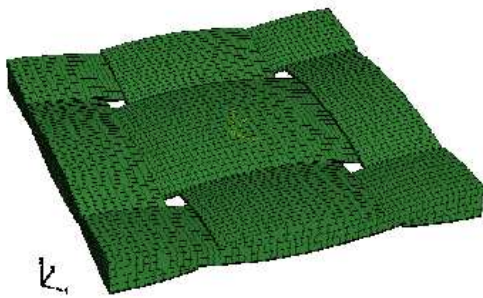


FIG. 2 (a). Model mesoscopique de la CER (47214 ddl)

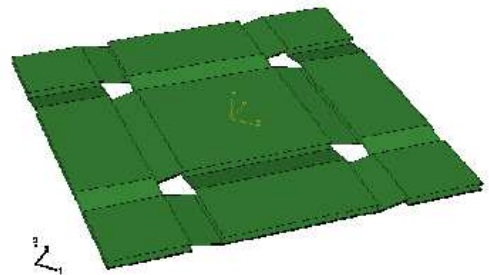


FIG.2 (b). Model mesoscopique pour l'étude mise en forme des renforts (216 ddl)

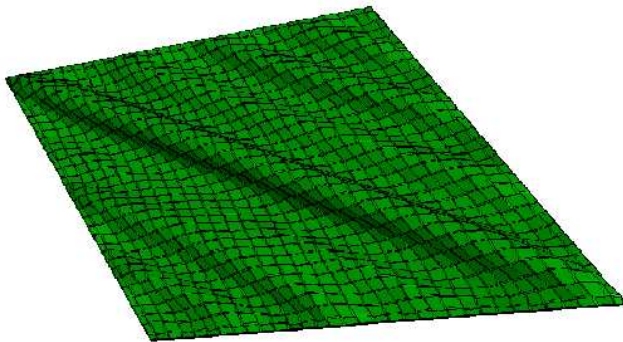


FIG 3. Simulation du test de picture frame utilisant la cellule unitaire de la figure 2b

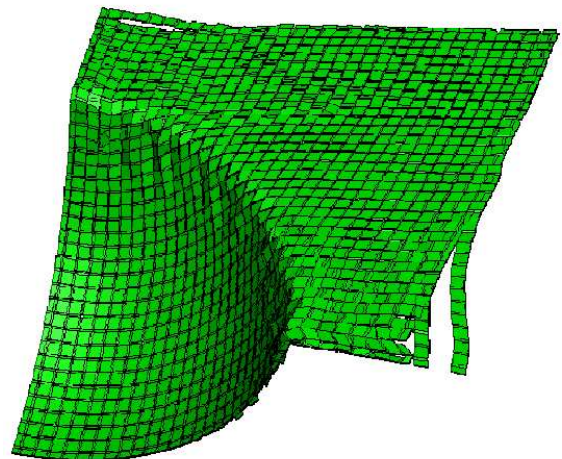


FIG 4. Simulation d'une mise en forme hémisphérique utilisant la cellule unitaire de la figure 2b

Deux résultats de simulations sont présentés figures 3 et 4. Elles utilisent la cellule élémentaire mesoscopique présentée figure 2b. Le premier (figure 3) est un test de cadre rigide (picture frame) qui impose un état de cisaillement pur. Des plissements apparaissent lorsque l'angle de blocage du tissu est atteint. Dans ce test les caractéristiques de cisaillement plan du renfort tissé ne sont pas données;

ils résultent du contact frottement et de l'écrasement des mèches. La figure 4 montre le résultat d'une mise en forme par poinçon hémisphérique. Des mises en forme de complexité assez grande telles que le benchmark international « Double dôme » [16, 17] peuvent être simulées en utilisant une telle approche mésoscopique.

3. Approche semi-discrete

Le renfort fibreux présente dans la plupart des cas suffisamment de continuité pour qu'il puisse être décrit par des éléments finis maillant l'ensemble du renfort considéré comme un milieu continu [18]. Compte tenu de la géométrie des tissus où l'épaisseur est très petite devant les deux autres dimensions, les éléments utilisés se placent dans le cadre d'une hypothèse de coque ou de membrane.

Dans ce dernier cas, la rigidité de flexion du tissu est négligée. Le comportement dans le plan est principalement défini par le comportement en traction biaxiale et en cisaillement. L'approche présentée ici consiste à construire des éléments finis spécifiques aux tissés. Les éléments finis utilisés dans l'exemple présenté ci-dessous sont dits semi-discrets [18, 13]. Ils sont composés de mailles élémentaires tissées. Le comportement de chaque maille élémentaire est défini à partir des essais classiques pour les renforts : tension biaxiale, cisaillement plan et flexion. Des essais virtuels tels que présentés en 2.1 peuvent également être utilisés. Les efforts intérieurs nodaux sont obtenus par sommation des contributions de chaque maille élémentaire. L'expression de chaque composante est simple car seules les rigidités principales sont prises en compte.

Dans ce cadre, un exemple de simulation de mise en forme hémisphérique d'un renfort tissé est montré figure 5. Le tissu est beaucoup plus rigide dans la direction chaîne que dans la direction trame (ratio 250). Le résultat expérimental de la mise en forme conduit à la déformée très dissymétrique suivant les directions chaîne et trame. Dans la partie utile hémisphérique, les carrés initiaux deviennent rectangulaires avec $L_{trame}/L_{chaîne} = 1,8$ au centre du dôme. Les bords du tissés sont également très dissymétriques avec un fort avalement dans la direction chaîne contrairement à la direction trame. De nombreux plis sont présents dans la partie plane, aucun dans la partie utile hémisphérique. On montre le résultat obtenu en fonction des rigidités prises en compte. Dans le premier cas (figures 5b), seule l'énergie de déformation de tension est prise en compte. Dans le deuxième cas (figures 5c), les comportements de tension et de cisaillement dans le plan sont pris en compte pour chaque maille élémentaire. Enfin les trois rigidités tension, cisaillement, flexion sont prises en compte dans le calcul figure 5d. Dans les trois cas la déformée de la partie utile hémisphérique est obtenue en accord avec le résultat expérimental ($L_{trame}/L_{chaîne} = 1,8$ en cohérence avec la mise en forme expérimentale) et une absence de plissements dans cette zone. Ces allongements différents sont effectivement principalement fonction de l'extension des mèches. La dissymétrie de la forme des bords de l'éprouvette est obtenue dans les trois cas. La différence majeure concerne les plissements. Ils sont totalement absents si la seule énergie de tension est considérée. L'introduction de rigidité de cisaillement apporte des plissements (figure 5c) mais leur forme n'est pas celle obtenue par l'expérience (figure 5e). La prise en compte de la rigidité de flexion (figure 5d) conduit à des plissements en accord correct avec l'expérience.

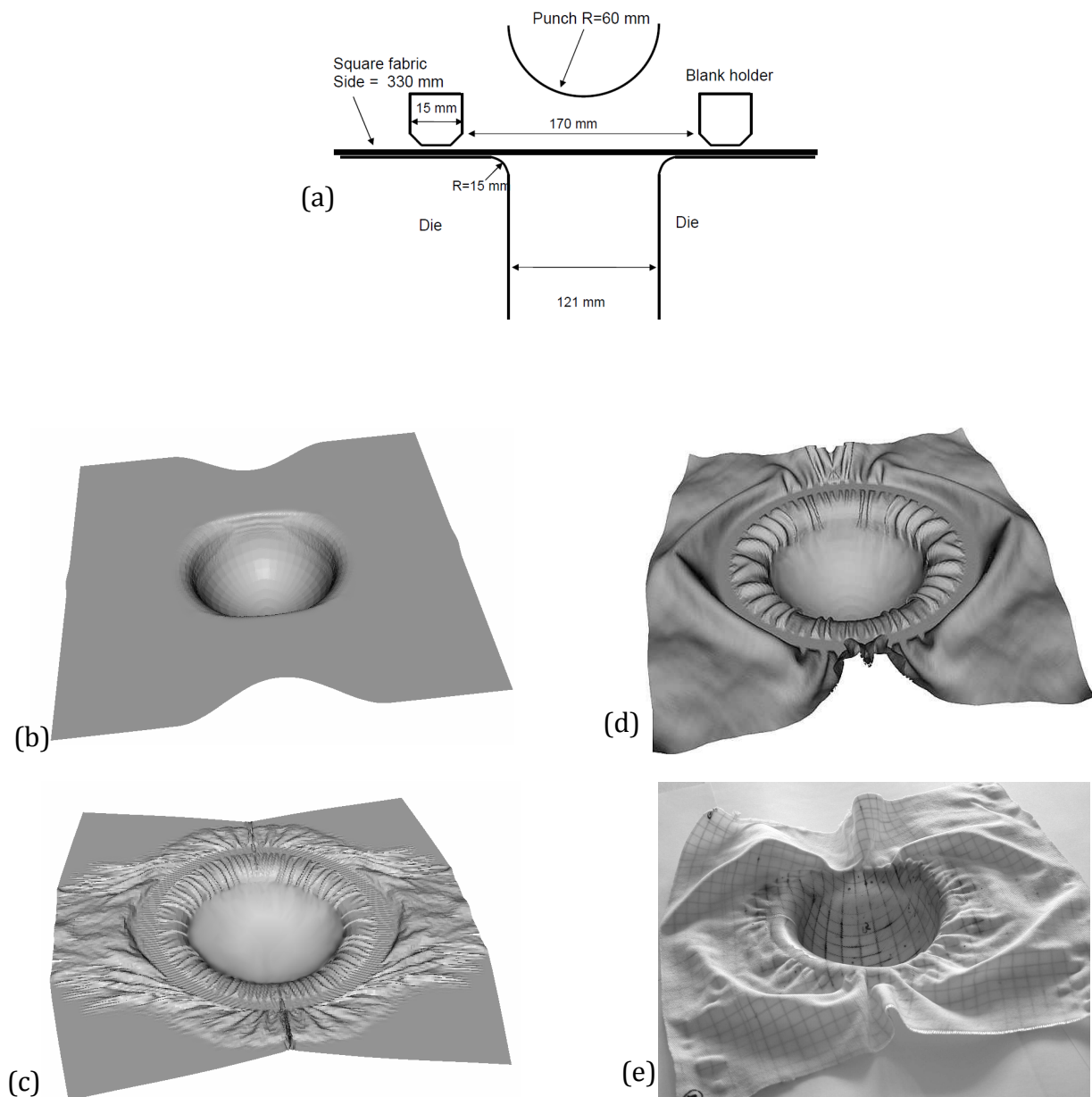


FIG 5. Mise en forme d'un renfort textile déséquilibré
 (a) Géométrie des outils (b) Rigidity de tension seule (c) Rigidity de tension et de cisaillement plan
 (d) Rigidity de tension + cisaillement plan + flexion (e) Mise en forme expérimentale

4 Conclusion

Les textiles sont des matériaux multi-échelles. La simulation de la mise en forme est classiquement réalisée à l'échelle macroscopique en considérant le renfort tissé comme un milieu continu. L'approche semi-discrète utilise des éléments finis de coque et suppose donc une continuité du renfort. Néanmoins elle ne s'appuie pas sur une loi de comportement continue mais sur le comportement mécanique de chaque cellule élémentaire en terme de résultantes d'effort. Une approche mésoscopique

consiste à modéliser chaque fil ou mèche et leurs contacts. Le comportement mécanique de la mèche doit prendre en compte sa composition fibreuse. Si une telle approche est réalisée dans le cadre d'un modèle fin, elle peut être utilisée comme essai virtuel en étudiant les déformations d'une maille élémentaire. Il est également possible de simuler des opérations de mise en forme en utilisant une description simplifiée de chaque maille élémentaires. Les glissements relatifs des réseaux chaîne-trame peuvent alors être simulés.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés pour partie dans le cadre des projets ANR Mecafibres et Lcm3m

Références

- [1] Rogers TG (1989) Rheological characterisation of anisotropic materials. *Composites* 20:21-27
- [2] Spencer AJM. Theory of fabric-reinforced viscous fluid. *Composites: Part A*, 2000; 31: 1311-1321
- [3] Dong L, Lekakou C, Bader MG (2001) Processing of composites: simulations of the draping of fabrics with updated material behaviour law. *Journal of Composite Materials* 35:138-163
- [4] Peng X, Cao J (2005) A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics. *Composites: Part A* 36:859–874
- [5] Ten Thije RHW, Akkerman R, Huetink J. Large deformation simulation of anisotropic material using an updated Lagrangian finite element method. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 2007; 196: 3141-3150.
- [6] Aimène Y, Vidal-Sallé E, Hagège B, Sidoroff F, Boisse P., A hyperelastic approach for composite reinforcement large deformation analysis, *Journal of Composite materials*, Vol. 44, No. 1/2010
- [7] Khan M., Mabrouki T., Vidal-Sallé E., Boisse P., Numerical and experimental analyses of woven composite reinforcement forming using a hypoelastic behaviour. Application to the double dome benchmark, *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (2010) 378–388
- [8] Zhou G, Sun X, Wang Y (2004) Multi-chain digital element analysis in textile mechanics. *Composites Science and Technology* 64:239-244
- [9] Durville D. Numerical simulation of entangled materials mechanical properties. *Journal of Materials Science*. 2005; 40: 5941-5948
- [10] Miao Y, Zhou E, Wang Y, Cheeseman BA (2008) Mechanics of textile composites: Micro-geometry. *Composites Science and Technology* 68:1671-1678
- [11] Badel P., Vidal-Salle E., Maire E., Boisse P., Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale, *Composites Science and Technology* 68 (2008) 2433–2440
- [12] Badel P., Gauthier S., Vidal-Salle E.; Boisse P.; Rate constitutive equations for computational analyses of textile composite reinforcement mechanical behaviour during forming, *Composites: Part A* 40 (2009) 997–1007
- [13] Hamila N., Boisse P., Sabourin F., Brunet M., A semi-discrete shell finite element for textile composite reinforcement forming simulation, *Int. J. Numerical Methods in Engineering* 2009; 79:1443–1466
- [14] Loix F., Badel P., Orgéas L., Geindreau G., Boisse P., Woven fabric permeability : from textile deformation to fluid flow mesoscale simulations, *Composites Science and Technology* 68 (2008) 1624–1630
- [15] Loix F., Orgeas L., Geindreau C., Badel P., Boisse P., J.-F. Bloch J.F., Flow of non-Newtonian liquid polymers through deformed composite reinforcements, *Composites Science and Technology*, 69, April 2009, Pages 612-619
- [16] Gatouillat S., Approche mésoscopique pour la mise en forme des renforts de composites tissés, Thèse de l'INSA de Lyon, 2010.
- [17] Gatouillat S., E. Vidal-Sallé, P. Boisse, Advantages of the meso/macro approach for the simulation of fibre composite reinforcements, *Int J Mater Form* (2010) Vol. 3 Suppl 1:643– 646
- [18] Boisse Ph., Cherouat A., Gelin J.C., Sabhi H., Experimental Study and Finite Element Simulation of Glass Fiber Fabric Shaping Process, *Polymer Composites* (pp 83-95, Vol 16 n°1), ulés.

