



HAL
open science

Modélisation de la mise en forme des renforts de composites tissés monoplis et multiplis

Nahiene Hamila, Fabrice Helenon, Philippe Boisson, Sylvain Chatel

► To cite this version:

Nahiene Hamila, Fabrice Helenon, Philippe Boisson, Sylvain Chatel. Modélisation de la mise en forme des renforts de composites tissés monoplis et multiplis. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01488886

HAL Id: hal-01488886

<https://hal.science/hal-01488886>

Submitted on 14 Mar 2017

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.

Public Domain

Modélisation de la mise en forme des renforts de composites tissés monoplis et multiplis

N. Hamila*— **F. Hélénon***— **P. Boisse***— **S. Chatel****

**Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides UMR 5259, INSA de Lyon, Bâtiment Jacquard, Rue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne Cedex, France*

***EADS CCR, DCR/SP/SM, 12 rue Pasteur, 92152 Suresnes, France*

*{Nahiene.Hamila, Fabrice.Helenon, Philippe.Boisse}@insa-lyon.fr
Sylvain.Chatel@eads.net*

RÉSUMÉ. La simulation numérique de la mise en forme des composites permet d'analyser la faisabilité d'un procédé et ses défauts, mais aussi de déterminer les directions des renforts après la mise en forme. Ces directions conditionnent fortement le comportement mécanique de la pièce composite en service. La mise en forme peut concerner un seul pli ou bien plusieurs simultanément. Dans ce travail, les différentes approches actuellement utilisées pour la simulation de la mise en forme d'un pli de renfort tissé sont décrites. En particulier l'approche semi discrète est utilisée pour le formage hémisphérique simultané de trois plis.

ABSTRACT. The numerical simulation of composite forming permits to envisage the feasibility of a process without defect but also to know the directions of the reinforcements after shaping. These directions condition strongly the mechanical behaviour of the final textile composite structure. In addition, the angles between warp and weft yarns influence the permeability of the reinforcement and thus the filling of the resin in the case of a liquid moulding process. The forming of composite reinforcement can be made on a single ply or simultaneously on several plies. In this paper models for the single woven ply forming simulation are described. The semi-discrete approach is used for the simultaneous hemispherical forming of three layers.

*MOTS-CLÉS : Renforts tissés, Composites, Mise en forme, Éléments finis, Méso-macro.
KEYWORDS: Fabrics/textiles, Composites, Forming, Finite element, Meso-macro.*

1. Introduction

Un effort important porte actuellement sur la modélisation et la simulation des grandes déformations des renforts tissés des composites. Cette mise en forme du renfort tissé est essentielle à la fabrication des composites textiles. Par exemple, la première étape du processus de R.T.M. (injection sur renfort) consiste dans la réalisation de la préforme tissée sèche avant l'injection de résine. Dans le drapage des préimprégnés ou dans le formage des CFRTP (renforts composés de fibres continus et résine thermoplastique), la matrice est présente mais n'est pas durcie et la déformation de la structure est conduite par celle du renfort. La mise en forme d'un composite exploite le mouvement relatif des fibres rendues possibles par l'absence de cohésion de la matrice. Les renforts textiles sont particulièrement efficaces en cas de géométries non développables en raison de l'entrelacement de la chaîne et de la trame. Il est difficile d'obtenir ce type de géométrie avec des renforts unidirectionnels. Un outil de simulation de la mise en forme doit permettre de déterminer la faisabilité d'un procédé, d'en définir les éventuels défauts mais aussi de connaître les directions des renforts après la mise en forme, ce qui est essentiel pour les calculs en service.

L'alternative aux méthodes géométriques (algorithme du filet) pour la mise en forme des renforts tissés [1,2] consiste dans l'analyse mécanique de la déformation de tissu soumis aux conditions aux limites prescrites par le procédé de formage. Ceci nécessite une modélisation du renfort tissé et de son comportement mécanique et une méthode numérique, en général, la méthode des éléments finis. Le comportement mécanique des tissus est complexe compte tenu des interactions des mèches liées au tissage. C'est un problème multi-échelles. Le comportement macroscopique est très lié aux interactions des mèches à l'échelle mésoscopique (échelle de la cellule unitaire tissée) et à l'échelle microscopique (échelle des fibres constituant les mèches). En dépit des nombreux travaux dans le domaine, il n'y a pas de modèle admis de façon unifiée qui décrive les aspects principaux du comportement mécanique des tissus.

2. Approches continues

Une première famille des modèles est obtenue en homogénéisant le comportement mécanique de la méso structure et en considérant le tissu comme un continuum anisotrope [3-5]. Pour des analyses en déformations finies, les codes élément finis emploient fréquemment les équations constitutives élastiques en taux (loi hypoélastique) :

$$\underline{\underline{\underline{\sigma}}}^\nabla = \underline{\underline{\underline{C}}} : \underline{\underline{\underline{D}}} \quad \underline{\underline{\underline{\sigma}}}^\nabla = \underline{\underline{\underline{Q}}} \cdot \left(\frac{d}{dt} \left(\underline{\underline{\underline{Q}}}^\top \cdot \underline{\underline{\underline{\sigma}}} \cdot \underline{\underline{\underline{Q}}} \right) \right) \cdot \underline{\underline{\underline{Q}}}^\top = \underline{\underline{\underline{\dot{\sigma}}}} + \underline{\underline{\underline{\sigma}}} \cdot \underline{\underline{\underline{\Omega}}} - \underline{\underline{\underline{\Omega}}} \cdot \underline{\underline{\underline{\sigma}}} \quad [1]$$

où $\underline{\underline{\boldsymbol{\sigma}}}$ et $\underline{\underline{\mathbf{D}}}$ sont respectivement le tenseur des contraintes de Cauchy et le tenseur de taux de déformation, $\underline{\underline{\boldsymbol{\sigma}}}^\nabla$ est la dérivée objective de $\underline{\underline{\boldsymbol{\sigma}}}$ associée à la rotation $\underline{\underline{\mathbf{Q}}}$. Le schéma incrémental classique de Hughes et de Winget est construit à partir de l'équation [1] pour le calcul des contraintes :

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

avec
$$\left[\underline{\underline{\Delta \boldsymbol{\varepsilon}}} \right]_{\mathbf{e}_i^{n+1/2}} = \left[\underline{\underline{\mathbf{D}}}^{n+1/2} \right]_{\mathbf{e}_i^{n+1/2}} \Delta t \quad [3]$$

Pour un milieu fibreux, le tenseur constitutif $\underline{\underline{\mathbf{C}}}$ est orienté par $\underline{\underline{\mathbf{f}}}$ la direction de fibre, $\underline{\underline{\mathbf{f}}}$ étant une direction matérielle. Soit $\{\underline{\underline{\mathbf{e}}}_i\}$ le repère orthonormé obtenu à partir du repère de base initial tourné par $\underline{\underline{\mathbf{Q}}}$. $\underline{\underline{\mathbf{f}}}$ n'est en général pas fixe dans $\{\underline{\underline{\mathbf{e}}}_i\}$ puisque c'est une direction matérielle. La direction de fibre initiale $\underline{\underline{\mathbf{f}}}^0$ est transformée par $\underline{\underline{\mathbf{F}}}$ (le tenseur de gradient) en $\underline{\underline{\mathbf{f}}} = \underline{\underline{\mathbf{f}}}^1$, tandis que $\{\underline{\underline{\mathbf{e}}}_i\}$ est tourné par $\underline{\underline{\mathbf{Q}}}$. Pour traiter cette situation caractéristique des milieux fibreux, deux approches ont été développées dans le cadre des formulations hypoélastiques présentées ci-dessus. La première [4,5] emploie la dérivée objective classique de Green Naghdi qui est employée dans certains codes E.F. par exemple ABAQUS. Tous les calculs sont exécutés dans le repère tourné par la rotation polaire. L'opérateur de comportement est obtenu dans ce repère à partir de sa forme spécifique dans le repère des fibres par un changement de base. La deuxième approche [6] consiste à utiliser une autre dérivée objective définie par la rotation de la fibre. Il peut être montré que, dans certains cas, la deuxième approche est préférable.

3. Approches discrètes

À l'opposé, certaines approches décrivent les tissés par des modèles entièrement discrets. Chaque fibre ou chaque mèche est modélisée par une poutre droite ou courbe et les contacts sont gérés ou remplacés par des ressorts [7,8]. Compte tenu de la simplicité de chaque composant, la déformation de la structure tissée complète peut être calculée. Néanmoins l'effort numérique demandé par cette approche est très important et limite la richesse de la modélisation locale.

4. Approches semi discrètes

L'approche semi discrète est intermédiaire entre les deux précédentes. Elle associe une méthode éléments finis et une analyse mésoscopique de la cellule unitaire tissée. L'interpolation éléments finis implique une certaine continuité, par

exemple il n'y aura pas de glissement entre les mèches chaîne et trame. Ces éléments finis sont composés d'un nombre fini de cellules tissées (figure 1). Ceci permet de prendre en compte la spécificité du comportement mécanique de ces cellules.

Compte tenu des mouvements relatifs possibles entre les mèches et les fibres, toutes les rigidités d'un renfort tissé sont faibles par rapport à celles de tension dans la direction des mèches. Une approche efficace doit prendre en compte cette spécificité et être aussi simple que possible. Elle doit traduire les aspects principaux du comportement mécanique des renforts tissés. En particulier :

- le comportement non linéaire dû aux ondulations des mèches,
- le verrouillage en cisaillement et les comportements différents avant et après le verrouillage.

On considère une forme simplifiée du travail virtuel des efforts intérieurs sur une maille élémentaire tissée :

$$W_{\text{int}}^{\text{cell}}(\underline{\eta}) = \varepsilon_{11}(\underline{\eta}) T^{11} L_1 + \varepsilon_{22}(\underline{\eta}) T^{22} L_2 + \gamma(\underline{\eta}) C \quad [4]$$

où $\underline{\eta}$ est le déplacement virtuel, L_1 et L_2 sont les longueurs dans les directions chaîne et trame de la maille, C est le couple créé par le cisaillement γ dans le plan sur la maille, T^{11} et T^{22} sont les tensions dans les directions des mèches chaîne et trame. Les autres rigidités sont négligées en particulier celle de flexion. Cette forme demande la connaissance des tensions en fonction des déformations axiales $T^{11}(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22})$ et $T^{22}(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22})$ et du comportement en cisaillement $C(\gamma)$. Ces comportements mécaniques mésoscopiques sont obtenus par des analyses expérimentales ou à partir de calculs éléments finis 3D de la cellule tissée [6, 9, 11].

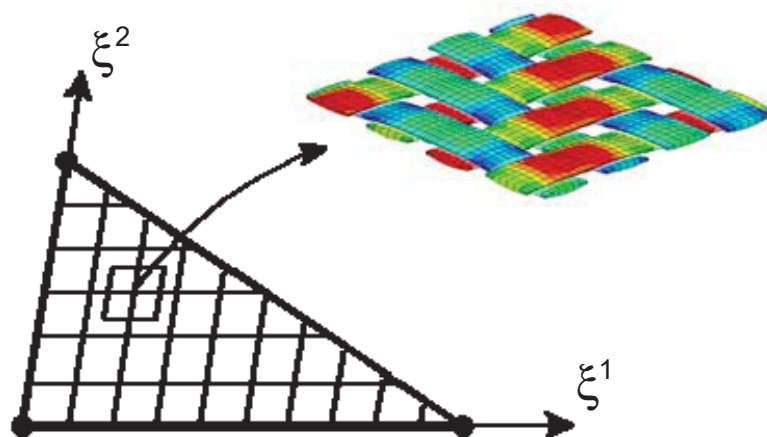


Figure 1. *Elément fini semi discret composé de mailles tissées*

Les efforts intérieurs nodaux sont déduits de l'énergie de déformation obtenue à partir de la déformation de chaque maille placée dans le champ interpolé. Dans le cas du triangle linéaire représenté figure 1 :

$$\left(F_{\text{int}}^e\right)_s = \frac{N_c N_t}{2} \left(B_{11s} L_1 T^{11} \left\| \underline{g}_1 \right\|^{-2} + B_{22s} L_2 T^{22} \left\| \underline{g}_2 \right\|^{-2} + C B_{\gamma s} \right) \quad [5]$$

où N_c et N_t sont les nombres de mèches dans les directions chaîne et trame, \underline{g}_1 et \underline{g}_2 sont les vecteurs matériels covariants dans les directions chaîne et trame, B est la matrice d'interpolation des déformations.

On constate que cette expression est très simple à partir du moment où le comportement de la maille unitaire en traction et cisaillement est connu.

5. Simulation de la mise en forme simultanée d'un renfort à trois plis

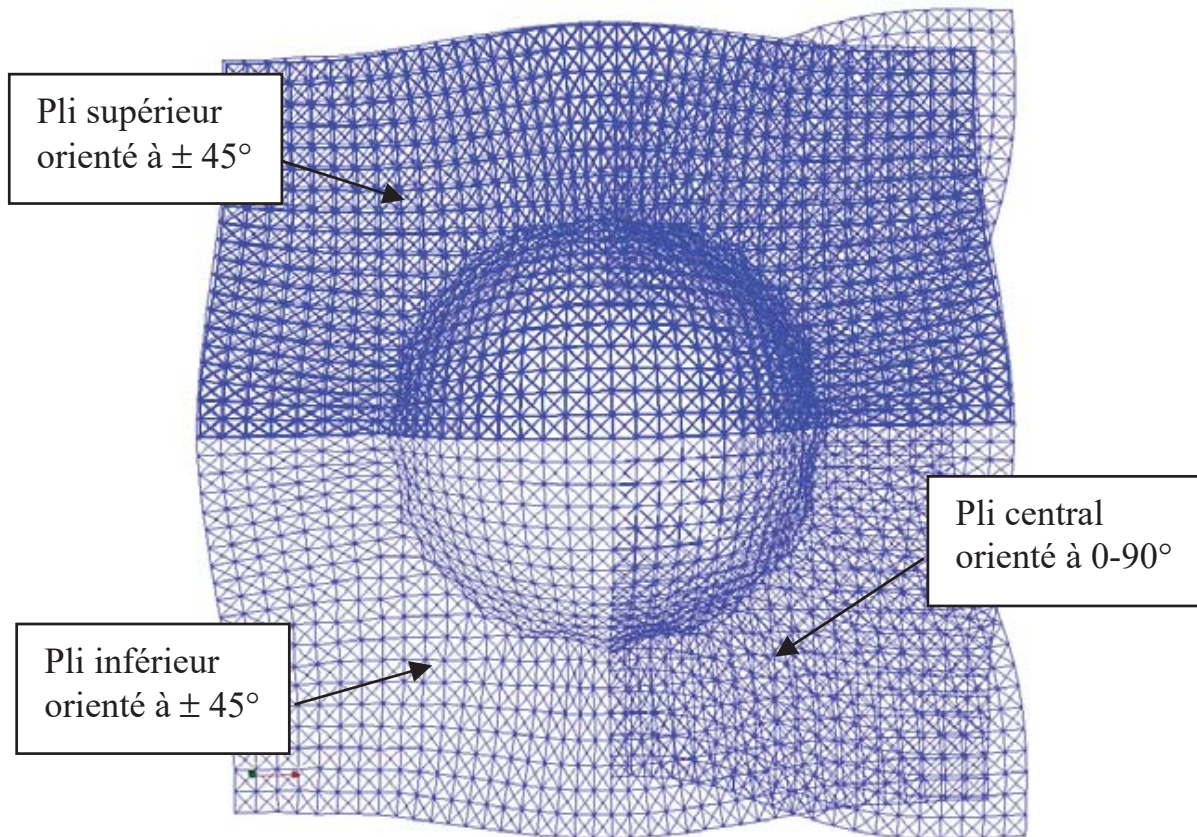


Figure 2. Emboutissage hémisphérique simultané de trois plis

La figure 2 montre le résultat de la simulation du formage par un poinçon hémisphérique de trois plis respectivement à $\pm 45^\circ$, $0-90^\circ$, $\pm 45^\circ$. Les variations d'angles chaîne-trame obtenus donnent des valeurs maximales de 46° (figure 3). Ceci est voisin de l'angle de blocage en cisaillement du renfort et on est à la limite de l'apparition de plissement dans les zones fortement cisailées. On constate sur cet exemple que les différences d'orientations entre les plis conduisent à des grands glissements entre les couches.

6. Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet Européen ITOOL « Integrated Tool for Simulation of Textile Composites »

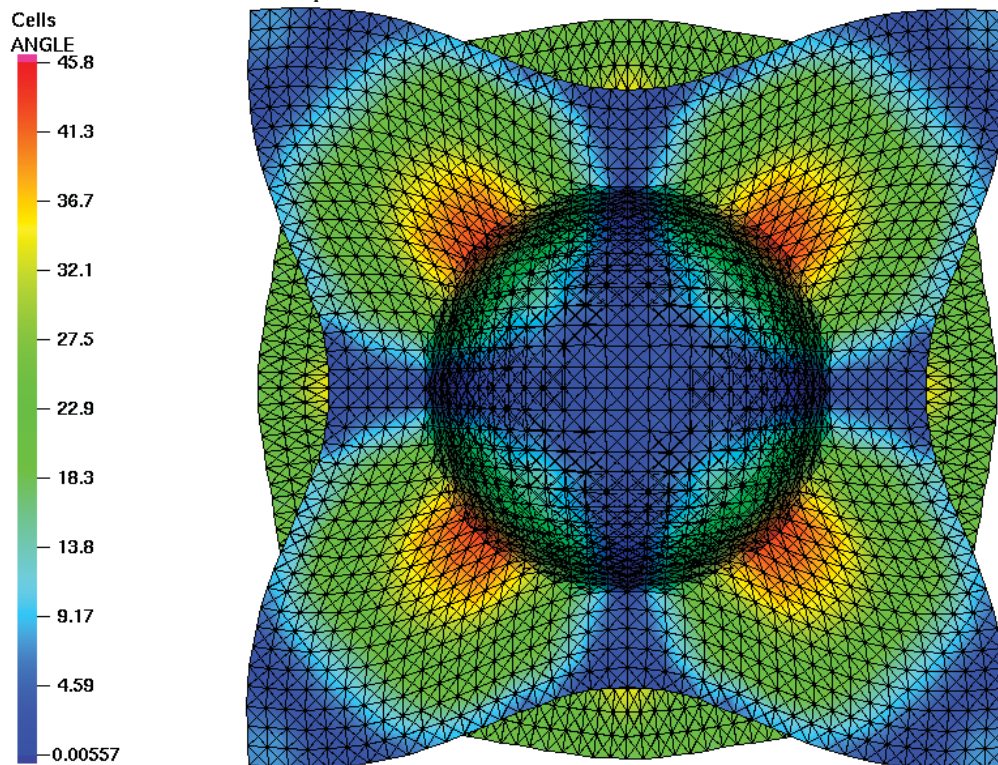


Figure 3. Distorsion chaîne trame pour le pli central

7. Bibliographie

- [1] Van Der Ween F. Algorithms for draping fabrics on doubly curved surfaces, International Journal of Numerical Method in Engineering, 1991, 31, 1414-1426.
- [2] Borouchaki H., Cherouat A., Une nouvelle approche géométrique pour le drapage de structures composites, Revue des Composites et Matériaux avancés , 12, 3, 2002
- [3] Spencer A.J.M. Theory of fabric-reinforced viscous fluid. Composites Part A, 2000, 31, p. 1311-1321.
- [4] L. Dong, C. Lekakou and M. G. Bader, Processing of Composites: Simulations of the Draping of Fabrics with Updated Material Behaviour Law, Journal of Composite Materials, Vol. 35, No. 02/2001
- [5] Peng X., Cao J., A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics, Composites: Part A 36 (2005) 859–874
- [6] Boisse P., Gasser A., Hagege B., Billoet J.L., ‘Analysis of the mechanical behaviour of woven fibrous material using virtual tests at the unit cell level’, Int. J.of Mat. Sci., 40, 5955, 2005
- [7] Ben Boubaker, B., Haussy, B. and Ganghoffer J.F. (2005), ‘Discrete models of fabrics accounting for yarn interactions’, European J. of Computational Mech., 14 (6-7), 653-676
- [8] D. Durville, Numerical simulation of entangled material properties, Journal of Material Science, 40, 5941-5948, 2005
- [9] Boisse P, Gasser A and Hivet G, ‘Analyses of fabric tensile behaviour: Determination of the biaxial tension-strain surfaces and their use in forming simulations’, Composites Part A, 2001 32(10) 1395-1414.

- [10] Boisse, P., B. Zouari, and J.L. Daniel Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite preforming. *Composites A*, 37-12, (2006), 2201-2212
- [11] P. Badel, E. Vidal-Sallé, P. Boisse Computational determination of in plane shear mechanical behaviour of textile composite reinforcements, *Computational Material. Sci.*, to appear 2007