HAL
open science

Simulation du préformage de renforts composites textiles 3D

Emmanuel de Luycker, Philippe Boisse, Fabrice Morestin, David Marsal

To cite this version:

Emmanuel de Luycker, Philippe Boisse, Fabrice Morestin, David Marsal. Simulation du préformage de renforts composites textiles 3D. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. 10.1051/meca/2010031 . hal-01413821

HAL Id: hal-01413821

https://hal.science/hal-01413821

Submitted on 11 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

Simulation du préformage de renforts composites textiles 3D

E. De Luycker[12], P. Boisse[1], F. Morestin[1], D. Marsal[2]

[1] Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures LaMCoS (UMR CNRS 5259)
18-20 rue des sciences, INSA-Lyon, F-69621, France
{Emmanuel.De-Luycker, Philippe.Boisse, Fabrice.Morestin}@insa-lyon.fr

[2] Département Matériaux YQMM, Snecma Villaroche
Réau, rond point R. Ravaud, 77550 Moissy-Cramayel, France
David.Marsal@snecma.fr

Résumé – Ce travail s'inscrit dans le cadre de la modélisation du préformage de matériaux composites. Le cas traité ici est celui des interlocks : des textiles 3D permettant d'éviter le délaminage rencontré avec des stratifiés. Un élément fini semi-discret permettant de modéliser le comportement d'une préforme interlock complète est proposé. Les paramètres matériaux sont identifiés à partir d'essais mécaniques et la simulation est validée par comparaison avec l'expérience.

Mots clés – Eléments finis, mise en forme, composites, textiles, interlocks.

1 Introduction

Les composites, présentant un rapport résistance/masse très avantageux sont de plus en plus utilisés notamment dans l'industrie aéronautique. Ce développement est également favorisé par la diminution du prix des matières premières et la maîtrise de procédés permettant des coûts de production limités tels que le RTM (resin transfer molding) au cour duquel la résine est injectée sur un renfort sec préformé dans un moule.

Pour les pièces de forte épaisseur, les interlocks [1], illustrés Figure 1, ont fait leur apparition. Ces matériaux tissés dans l'épaisseur permettent d'éviter les délaminages rencontrés dans les composites classiques et facilitent l'élaboration de pièces épaisses en évitant l'empilement d'un nombre élevé de plis. Leur application à des pièces structurelles telles que les aubes de soufflante de moteurs d'avions Snecma représentée Figure 1 est ainsi possible.

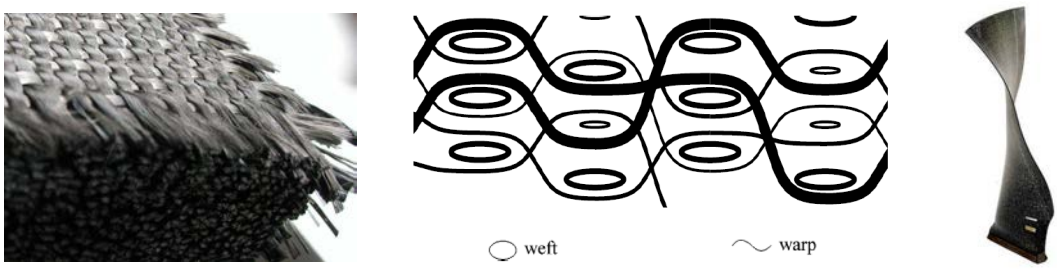


Figure 1 – Tissé interlock 3D / aube de soufflante Snecma à renfort interlock

Dans ce contexte, la maîtrise des propriétés dynamiques et de tenue à l'impact du matériau fini est indispensable. Le comportement du composite étant très influencé par la direction des

fibres, une connaissance fine du préformage présente donc un intérêt certain. La simulation numérique de ce préformage permet d'accéder à la mésostructure du composite fini (taux volumique de fibres, position et orientation des mèches, angle de cisaillement entre les réseaux) et permet également de quantifier la faisabilité d'une mise en forme (apparition de plis ou de flambements, efforts sur les outils, ruptures de fibres). Les données issues du préformage (taux de fibres, cisaillement) sont aussi précieuses pour évaluer la perméabilité du matériau et ainsi prévoir la phase d'injection (apparition de zones sèches ou de zones pauvres en fibres).

2 Simulation du préformage de renforts interlocks

Plusieurs méthodes existent pour la simulation de renforts 2D, s'appuyant sur des approches continues ou discrètes [2,3,4]. En 3D, pour les pièces considérées, aucune de ces approches n'est satisfaisante car une prise en compte des contacts entre mèches conduit à des coûts de calcul prohibitifs et la non périodicité du matériau conduit à des difficultés grandes transformations en terme d'homogénéisation. Néanmoins, la mésostructure initiale est connue puisque nécessaire au tissage de la préforme. Le comportement macroscopique d'un matériau est influencé par sa microstructure et sa mésostructure. Nous proposons d'utiliser l'information de position de chaque mèche dans le textile pour rendre compte de son anisotropie. Pour cela, un élément fini semi-discret dédié aux matériaux interlocks illustré Figure 2 est introduit. Le comportement global de l'interlock est découpé en deux contributions, l'une modélisée de manière discrète, issue des mèches en tension, l'autre par un modèle continu, issue des autres mécanismes.

2.1 Ecriture spécifique de l'équation de la dynamique

Le comportement mécanique d'un tissé 3D interlock est très spécifique. La raideur d'une mèche constituée de milliers de fibres (généralement entre 3 K et 48 K fibres) est principalement une rigidité de tension dans la direction tangente à la mèche. Le très faible diamètre des fibres (entre 5 µm et 20 µm pour le carbone, l'aramide et le verre) et leur mouvement relatif possible confèrent à la mèche des rigidités de flexion, cisaillement et compression transverse très faibles devant la rigidité de tension. Les déformations du matériau pendant le préformage sont alors principalement dues aux tensions dans les mèches. Ceci doit évidemment être nuancé car dans certaines directions, la rigidité due aux tensions peut être négligeable ; les autres rigidités deviennent alors prépondérantes.

Dans le principe des travaux virtuels, nous distinguons donc pour les efforts internes, un terme de tension $W_{\text{int}}^{\text{t}*}$ et un terme provenant des autres contributions $W_{\text{int}}^{\text{a}*}$.

$$\begin{aligned} &W_{\text{ext}}^{*} - \left(W_{\text{int}}^{\text{t}*} + W_{\text{int}}^{\text{a}*}\right) = W_{\text{acc}}^{*} \\ &W_{\text{int}}^{\text{t}*} + W_{\text{int}}^{\text{a}*} = U_n^{T*}\mathbf{F}_{int} = U_n^{T*}\left(\mathbf{F}_{\text{int}}^{t} + \mathbf{F}_{\text{int}}^{o}\right) \end{aligned} \tag{1}$$

Les termes de tension conduisant à ces efforts internes prépondérant étant donné la raideur élevée des mèches en tension, la géométrie de chaque mèche est prise en compte pour permettre le calcul du comportement anisotrope de la structure. Un modèle discret est utilisé à ce niveau alors que les autres contributions sont prises en compte par un modèle continu hypoélastique isotrope.

3 Elément fini spécifique

3.1 Elément fini constitué de segments de mèches

La préforme interlock 3D est maillée avec des éléments hexaédriques tels que celui représenté Figure 2. Des segments de mèches sont ajoutés en calculant l'intersection des mèches réelles avec chaque élément. Nous utilisons un élément à huit nœuds avec des fonctions de forme tri-linéaires. Par cohérence avec cette interpolation, les mèches sont prises rectilignes à l'intérieur de l'élément, l'ondulation éventuelle d'une mèche dans l'élément étant prise en

compte par une modification du comportement de chaque mèche. L'élément est Lagrangien, ainsi, la position des mèches reste inchangée dans l'espace de référence et leur cinématique est déterminée à partir des déplacements nodaux de l'élément. La position de chaque mèche dans chaque élément est déterminée à partir des spécifications de la préforme nécessaires à son tissage (trajet spatial de chaque mèche).

Figure 2 – Elément fini semi-discret lagrangien constitué de mèches

3.2 Efforts internes de tension

Les mèches sont modélisées par des segments le travail virtuel de tension développé à l'intérieur de la mèches *p* est l'intégrale sur la longueur de mèche L^p du produit de la tension T^p avec le gradient symétrisé du déplacement virtuel dans la direction de la mèche $\varepsilon^p(\underline{\mathbf{u}}^*)$.

$$W_{\text{int}}^{\text{t}p}(\underline{\mathbf{u}}^*) = \int_{L^p} T^P \, \varepsilon^p(\underline{\mathbf{u}}^*) \, dL \tag{2}$$

Après discrétisation élément fini, le vecteur des efforts internes est obtenu par sommation des contributions des N^m mèches contenue dans l'élément. L'intégration est réalisée à partir de deux points de Gauss sur chaque mèche.

$$W_{\text{int}}^{\text{t}e}(\underline{\mathbf{u}}^*) = \sum_{p=1}^{N^m} \int_{L^p} T^P \, \varepsilon^p(\underline{\mathbf{u}}^*) \, dL = \mathbf{U}_n^{*\text{T}} \mathbf{F}_{\mathbf{int}}^{\text{t}e} \tag{3}$$

Le calcul de la déformation virtuelle est réalisé par suivi des vecteurs covariants de l'élément et projection sur le vecteur normé tangent à la mèche comme explicité dans [5]. La tension est déterminée à partir d'une raideur de mèche et de la déformation cumulée. Pour prendre en compte une ondulation de mèche dans l'élément, le comportement de la mèche est pris non linéaire. Cette non linéarité représentée Figure 3 est déterminée à partir de la différence le longueur de la mèche réelle (ondulée) et du segment rectiligne qui la représente.

Figure 3 – Comportement d'une mèche droite et d'une mèche ondulée

3.3 Efforts internes des autres contributions – Modèle hypoélastique

La majeure partie du comportement provient des mèches en tension, ce sont elles qui engendrent l'anisotropie caractéristique des tissés, néanmoins, d'autres mécanismes entrent en jeu dans la mécanique des textiles tels que la compression transverse des mèches, le cisaillement ou encore la friction entre les différents éléments. Ces termes restant de second ordre, un modèle hypoélastique isotrope est utilisé pour les modéliser. Ce type d'approche est largement employé dans les codes éléments finis pour modéliser le comportement isotrope de matériaux continus en grandes transformations [6]. Elle sont également extensibles à la plasticité, ce qui est utile si l'on veut prendre en compte les frottements inter mèches [7].

Une dérivée objective du tenseur des contraintes ce Cauchy $\underline{\underline{\boldsymbol{\sigma}}}^{a\nabla}$ est calculée à partir du

taux de déformation $\underline{\underline{\mathbf{D}}}$:

$$\underline{\underline{\sigma}}^{a\nabla} = \underline{\underline{\underline{\underline{C}}}}^{a} : \underline{\underline{D}} \tag{4}$$

L'exposant *a* fait référence aux *autres contributions*, complémentaires de celles des mèches en tension. $\underline{\underline{\underline{\underline{\mathbf{C}}}}}^{a}$ est le tenseur de comportement élastique isotrope. Ce comportement est modifié pour tenir compte de la spécificité des matériaux fibreux qui sont très compressibles, et le module d'Young est modifié pour traduire un raidissement en fonction du taux volumique au sein de chaque élément. Le coefficient de poisson est quant à lui pris nul, ce qui correspond à la réalité pour ce type de matériau, au moins pour de faibles compactions. L'objectivité du taux de contrainte est assurée en utilisant un repère lié à la matière. Dans le cas présent, nous utilisons la dérivée de Jaumann qui suit la rotation moyenne de la matière.

Le cumul de contrainte est ensuite réalisé grâce au schéma d'intégration de Hughes et Winget [6] à partir de l'incrément de contrainte calculé.

$$\left[\boldsymbol{\sigma}^{a\ n+1}\right]_{e_i^{n+1}} = \left[\boldsymbol{\sigma}^{a\ n}\right]_{e_i^{n}} + \left[\mathbf{C}^{a\ n+1/2}\right]_{e_i^{n+1/2}} \left[\Delta\boldsymbol{\varepsilon}\right]_{e_i^{n+1/2}} \tag{5}$$

La base orthonormée $\underline{e}_i$ est déterminée par rotation de la base locale. L'incrément de déformation est calculé à partir du pas de temps et du taux de déformation exprimé à partir des matrices d'interpolation des déformations *B* standard des hexaèdres à huit nœuds.

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}^{n+1/2}\,\Delta t = \mathbf{B}\left(\dot{\mathbf{u}}_n^{e}\right)^{n+1/2} \Delta t \tag{6}$$

Les efforts nodaux élémentaires relatifs aux autres contributions sont calculés par :

$$\mathbf{F}_{int}^{a\,e} = \int_{V^e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}^o \, dV \tag{7}$$

4 Validation de l'élément et identification des paramètres

4.1 Tests élémentaires de validation de l'élément

L'élément est implémenté dans un code en dynamique explicite développé au LaMCoS. Une série de tests élémentaires pour différentes orientations de mèches, à déplacements imposés et à efforts imposés permettent de valider l'élément.

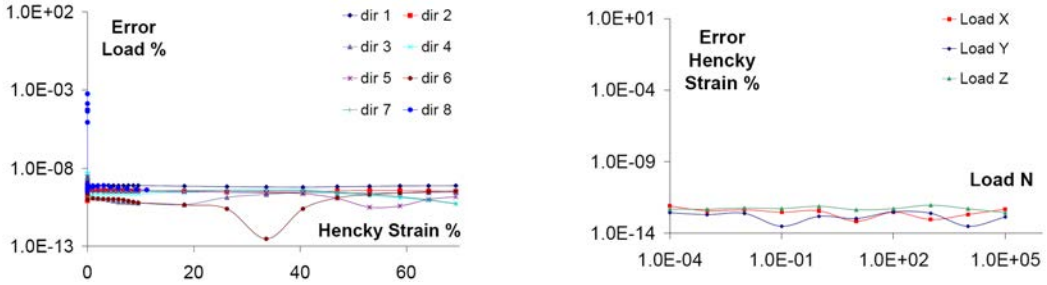


Figure 4 – Erreur sur un élément en traction à déplacements imposés (gauche) et à efforts imposés (droite)

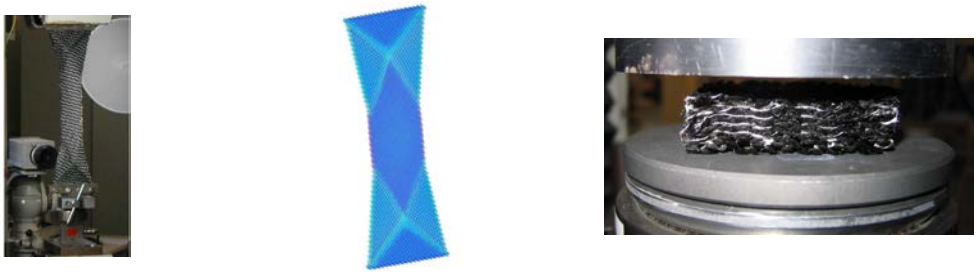
4.2 Essais élémentaires et identification du modèle

Une série d'essais de base (traction, compression et cisaillement) sont simulés. L'essai de cisaillement de Bias Test [8] réalisé par traction d'une éprouvette dont les mèches sont à $^{+}/_{-}$ 45° par rapport à la direction de sollicitation, permettant de vérifier la bonne prise en compte de l'anisotropie de comportement propre aux tissés est illustré Figure 5.

Les paramètres du modèle sont identifiés à partir des trois essais élémentaires, notamment,

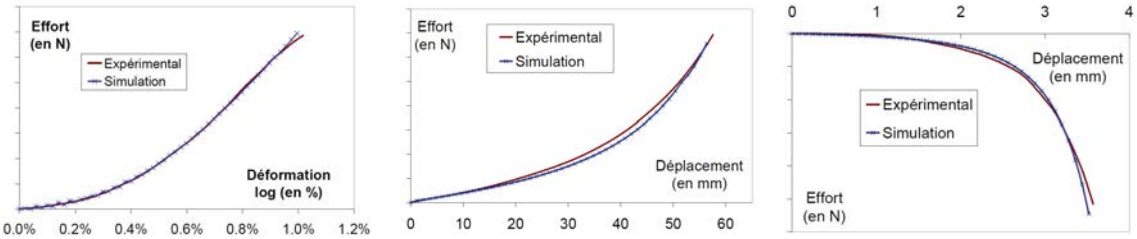
l'essai de traction pour les propriétés du modèle discret et les essais de compression et de cisaillement (voir Figure 5) pour ceux du modèle continu.

Selon le cas, le modèle est identifié de manière directe ou par approche inverse, grâce à un algorithme d'optimisation de type Levenberg-Marquardt [9]. Les données expérimentales et la réponse du modèle sont illustrés Figure 6.



(a) Bias Test (b) Compression

Figure 5 – Essai de cisaillement Bias Test et simulation d'un interlock de type G1151 et essai de compression sur un interlock Snecma de 8.5 couches



(a) Traction (b) Cisaillement Bias Test (c) Compression

Figure 6 – Identification du modèle en traction, cisaillement et compression pour un interlock Snecma de 4.5 couches

5 Simulations du préformage de renforts 3D interlocks et validation expérimentale

Une forme simple à réaliser et possédant une double courbure (nécessaire à la mise en œuvre du cisaillement) est l'hémisphère. Une série d'essais est réalisée sur module d'emboutissage pour des préformes interlock de différentes épaisseurs.

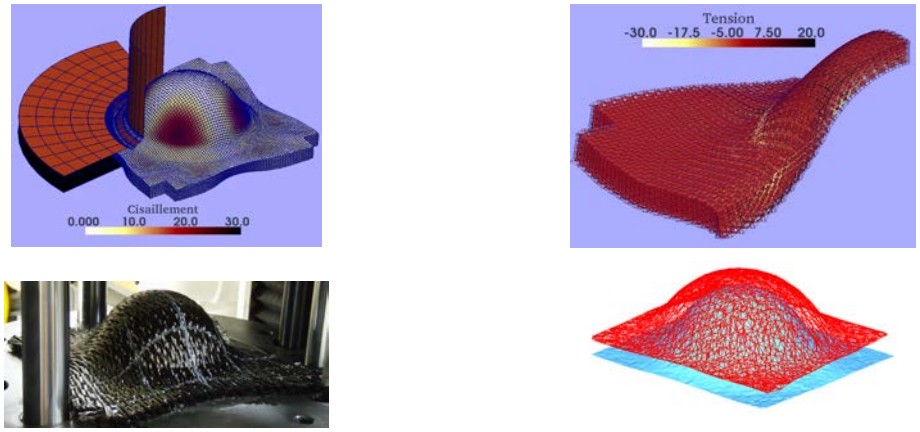


Figure 7 – Simulation d'emboutissage hémisphérique (en haut) angle de cisaillement (en deg) et tension dans les mèches (en N) / Expérimentation (en bas) et mesure 3D par stéréo corrélation

La mesure des angles de cisaillement et le relevé de la déformée 3D par stéréo corrélation permettent de vérifier la pertinence du modèle.

6 Conclusion

Un élément fini hexaédrique constitué de segments de mèches est proposé pour la simulation du préformage de renforts 3D interlocks. La position de chaque mèche est prise en compte de manière discrète alors que les propriétés transverses sont modélisées par un modèle continu hypoélastique. Le modèle semi-discret a été validé et identifié sur des cas tests et des essais mécaniques standard. Il a montré sa pertinence par comparaison essai/simulation d'emboutissages hémisphériques.

Remerciements

Les auteurs remercient la Société SNECMA pour son soutien technique et financier. Ce travail s'inscrit dans le projet fédérateur MAIA de recherche et technologie en mécanique soutenu par le CNRS, l'Onera et le groupe SAFRAN.

Références

[1] Mouritz AP, Bannister MK, Falzon PJ, Leong KH. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites. *Composites Part A* , 30 : 1445–1461, 1999.

[2] Peng X, Cao J. A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics. *Composites Part A*, 36 : 859–874, 2005.

[3] Boisse P, Zouari B, Daniel J L. Importance of In-Plane Shear Rigidity in Finite Element Analyses of Woven Fabric Composite Preforming. *Composites Part A*, 37(12) : 2201-2212, 2006.

[4] Ten Thije RHW, Akkerman R, Huetink J. Large deformation simulation of anisotropic material using an updated Lagrangian finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engeenering*, 196(33-34) : 3141-3150, 2007.

[5] De Luycker E, Morestin F, Boisse P, Marsal D. Simulation of 3D interlock composite preforming. *Composite Structures*, 88(4) : 615-623, 2009.

[6] Hughes TJR, Winget J. Finite rotation effects in numerical integration of rate constitutive equations arising in large deformation analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 15 : 1862-1867, 1980.

[7] Lomov SV et al. Meso-FE modelling of textile composites: road map, data flow and algorithms. *Composites Science and Technology*, 67 : 1870–1891, 2007.

[8] Cao J et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results. *Composites Part A*, 39(6) : 1037-1053, 2008.

[9] Schur DS, Zabaras N. An inverse method for determining elastic material properties and a material interface. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 33 : 2039-2057, 1992.