HAL
open science

Modélisation et Simulation de la Mise en Forme d'un Renfort Sec pour Structures Primaires Aéronautiques

Laure Bouquerel, Nicolas Moulin, Sylvain Drapier, Philippe Boisse

To cite this version:

Laure Bouquerel, Nicolas Moulin, Sylvain Drapier, Philippe Boisse. Modélisation et Simulation de la Mise en Forme d'un Renfort Sec pour Structures Primaires Aéronautiques. 13e colloque national en calcul des structures, Université Paris-Saclay, May 2017, Giens, Var, France. hal-01926717

HAL Id: hal-01926717

https://hal.science/hal-01926717v1

Submitted on 19 Nov 2018

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.

CSMA 2017
13ème Colloque National en Calcul des Structures
15-19 Mai 2017, Presqu'île de Giens (Var)

Modélisation et Simulation de la Mise en Forme d'un Renfort Sec pour Structures Primaires Aéronautiques

L. Bouquerel[1,2], N. Moulin[2], S. Drapier[2], P. Boisse[3]

[1] *Hexcel Reinforcements, France, laure.bouquerel@hexcel.fr*
[2] *Centre SMS & LGF UMR CNRS 5307, Mines Saint-Etienne - Université de Lyon, France, drapier@emse.fr, nmoulin@emse.fr*
[3] *LaMCoS, INSA Lyon, France, philippe.boisse@insa-lyon.fr*

Résumé — HiTape® est un renfort sec unidirectionnel conçu pour répondre au besoin de réduction des coûts tout en maintenant des performances mécaniques comparables à celles des renforts pré-imprégnés. L'objectif du projet est la simulation de la mise en forme de ce renfort. Pour cela, les principaux mécanismes de déformation sont identifiés et une loi de comportement hyperélastique est sélectionnée pour représenter ces différents mécanismes supposés découplés. La simulation est réalisée dans le code Zset à l'échelle macroscopique à l'aide d'éléments de coques.
Mots clés — Simulation par éléments finis, Mise en forme, Mécanisme de déformation, Renfort unidirectionnel.

1 Introduction

Dans le cadre de la mise en œuvre des matériaux composites pour structures primaires aéronautiques, les procédés *directs* (infusion ou injection typiquement) sont aujourd'hui envisagés comme une alternative aux procédés basés sur l'utilisation des pré-imprégnés, car ils présentent potentiellement la possibilité d'augmenter les cadences de production tout en réduisant les coûts et en maintenant des performances mécaniques comparables. Ces procédés impliquent une étape préalable de mise en forme du renfort sec : soit pli par pli, soit en une étape pour un empilement déposé à plat (cette deuxième solution permettant des cadences plus élevées). L'objectif de cette étude est la modélisation et la simulation de la mise en forme d'un empilement du renfort sec UniDirectionnel (UD) HiTape® d'Hexcel [15]. La simulation de l'étape de mise en forme doit permettre de prédire l'apparition des défauts (plissements, etc.) en fonction des paramètres de mise en forme (température, vitesse de formage, etc.) et ainsi d'optimiser le procédé de mise en forme, mais également de réduire les coûts liés aux essais-erreurs lors de la mise au point du procédé.

2 Etat de l'art

2.1 Spécificités de la modélisation de la mise en forme des renforts

Un renfort fibreux est constitué de mèches, elles-mêmes constituées de fibres. Ainsi la modélisation de son comportement lors de la mise en forme peut être faite à différentes échelles. Les modélisations à l'échelle *microscopique* se placent à l'échelle de la fibre, mais sont limitées par le temps de calcul pour un trop grand nombre de fibres (or les mèches contiennent typiquement 3K à 80K fibres). Les modélisations à l'échelle *mésoscopique* se placent à l'échelle de la mèche et ont pour objectif de déterminer les propriétés locales du renfort telles que la perméabilité ou le comportement mécanique. Elles considèrent un Volume Elémentaire Représentatif dont la géométrie peut être obtenue par tomographie X par exemple. Enfin, les modélisations à l'échelle *macroscopique* ont pour but de déterminer les propriétés macroscopiques du renfort, et pour ce qui nous concerne, l'apparition de plissements lors la mise en forme par exemple [11].

Quelle que soit l'échelle considérée, un renfort fibreux présente des modes de déformation particuliers influencés par sa structure, les propriétés des fibres, et le taux volumique de fibres notamment. De plus, le comportement des renforts est anisotrope dû au comportement orthotrope des fibres, et le glisse-

ment entre les fibres, mèches, ou plis est possible. Les mécanismes de déformation potentiels des renforts sont représentés à l'échelle macroscopique sur la Figure 1 en notant $\underline{X_1}$ et $\underline{X_2}$ deux vecteurs orthogonaux appartenant au plan du renfort et $\underline{N}$ un vecteur normal au plan du renfort, ($\underline{X_1}$, $\underline{X_2}$, $\underline{N}$) formant une base de l'espace.

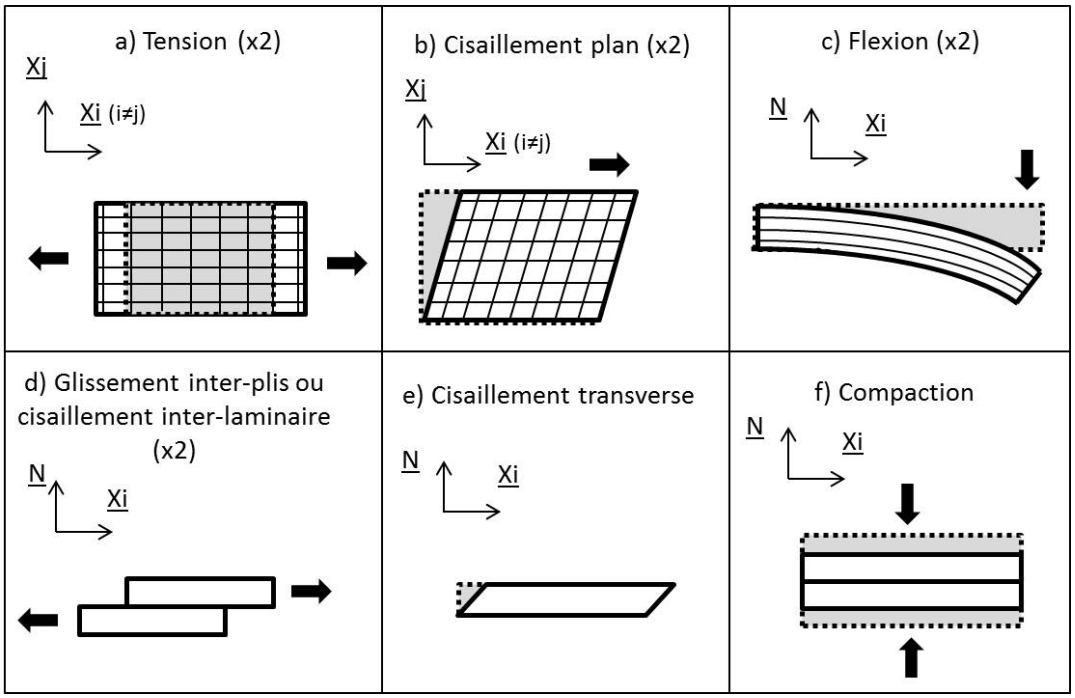

FIGURE 1 – Mécanismes de déformation représentés à l'échelle macroscopique pour un tissé (les $\underline{Xi}$ (i=1,2) sont ici les directions trame et chaîne)

Les mécanismes de déformation prépondérants varient selon les types de renforts. Par exemple dans le cas des tissés, les mécanismes de déformation d'un pli unitaire généralement considérés sont la tension dans les directions trame et chaîne, le cisaillement plan et la flexion (Figure 1 a, b, c) [7, 11] : ils sont représentés à l'échelle mésoscopique sur la Figure 2. Lorsque la mise en forme d'un empilement est considérée, le glissement inter-plis, qui correspond au glissement (frottement) relatif des plis les uns par rapport aux autres, doit de plus être pris en compte. Dans le cas des renforts Non-Crimp Fabrics (NCFs) et interlocks qui sont généralement plus épais, les mécanismes de déformations transverses (compaction et cisaillements transverse Figure 1 e, f) doivent être pris en compte.

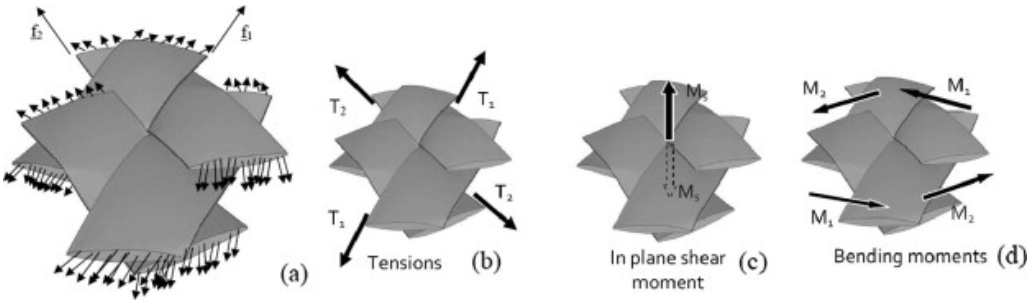

FIGURE 2 – Mécanismes de déformation dans un pli unitaire tissé représentés à l'échelle mésoscopique [7]

Peu de travaux concernent le comportement des UDs lors de leur mise en forme, et ceux qui existent concernent des UDs pré-imprégnés : on peut citer les travaux de Larberg et al. [16], Haanappel et al. [12], et McGuinness et OBradaigh [18]. Larberg a mis en évidence les mécanismes de déformation prépondérants dans le cas de la mise en forme d'un empilement d'UDs pré-imprégnés : le cisaillement plan, la flexion, et le glissement pli-pli ou cisaillement inter-laminaire. Les mécanismes de déformation retenus dans le cas de la mise en forme du renfort UD étudié seront introduits dans la section 3.1.

2.2 Différentes approches possibles

La modélisation de la mise en forme doit être faite dans un cadre non-linéaire *géométrique* puisque l'hypothèse des petites perturbations n'est plus valable (déplacements très grands devant l'épaisseur d'un pli), tout en prenant en compte les non-linéarités *matérielles* qui interviennent dans le cas du comportement en flexion par exemple [6]. Plusieurs approches ont ainsi été proposées dans la littérature.

Les approches *discrètes* considèrent le renfort comme un ensemble de barres et ressorts reliés par des noeuds ; de tels modèles ont été notamment développés par Sze et Liu [20] pour des tissus secs non techniques. Les approches *continues* considèrent le renfort comme un milieu continu homogène élastique décrit par une loi de comportement non-linéaire de type hypoélastique ou hyperélastique. Les modèles hypoélastiques supposent que la vitesse de déformation est liée à un taux de contrainte ; de tels modèles ont été développés notamment par Badel [2] et Hagege [13] pour simuler le comportement de renforts tissés secs et de renforts tricotés respectivement. Les modèles hyperélastiques supposent l'existence d'une énergie de déformation qui ne dépend que de l'état actuel de la déformation supposé non dissipatif. D'après le principe d'objectivité, l'énergie de déformation est une fonction du second tenseur de Piola-Kirchhoff, d'où la loi de comportement générale d'un matériau hyperélastique [4] :

$$\underline{\underline{S}} = 2\,\frac{\partial w}{\partial \underline{\underline{C}}}$$

où $\underline{\underline{S}}$ est le second tenseur de Piola-Kirchhoff, $\underline{\underline{C}}$ est le tenseur de Cauchy-Green droit, et w est l'énergie de déformation. Ces modèles ont par exemple été utilisés pour représenter des renforts tissés à l'échelle macroscopique par Aimene [1] et Guzman [11], et à l'échelle mésoscopique par Charmetant [9]. Enfin les approches *semi-discrètes* considèrent le renfort comme un ensemble d'éléments discrets et continus et ont été par exemple utilisées par Bel [3] pour modéliser un pli de Non-Crimp Fabric par un milieu continu relié aux autres plis par des éléments barres qui autorisent le glissement inter-plis.

Les travaux de modélisation du comportement des renforts UDs sont peu répandus et concernent uniquement les renforts UDs pré-imprégnés qui sont alors modélisés par un milieu continu anisotrope dont les mécanismes de déformation sont supposés découplés. Le renfort est modélisé par des éléments de membrane qui décrivent le comportement dans le plan (cisaillement, tensions), et des éléments de coques pour le comportement hors-plan en flexion. Un tel éléments à 3 noeuds a été développé dans AniForm : il consiste en un élément de membrane et un élément Discrete Kirchhoff Triangle, et a été utilisé pour la modélisation de pré-imprégnés UDs par Larberg [16] et Haanappel [12] avec une loi de Hooke orthotrope. Hamila [14] a également développé un élément similaire. Par ailleurs, le contact entre deux plis de renfort UD pré-imprégné est décrit par la loi de Coulomb (qui représente le contact entre deux solides) [12], qui peut être associée à une loi hydrodynamique (qui représente le contact entre deux solides séparés par un film lubrifiant) [16].

3 Stratégie de modélisation

3.1 Spécificités du renfort et du procédé

HiTape® est un renfort UD destiné à être infusé ou injecté, de chaque côté duquel est contrecollé un voile thermoplastique comme représenté sur la Figure 3 [10, 15]. La présence du voile thermoplastique à la surface du renfort et donc à l'interface entre les plis en fait un matériau non standard intermédiaire entre un renfort sec (dans le pli) et un pré-imprégné (à la surface du pli). Par ailleurs, le procédé de mise en forme considéré pour la modélisation est de type *formage par double-membrane* comme représenté Figure 4 : le renfort placé entre deux membranes est d'abord compacté puis formé, éventuellement en température. On peut considérer que la pression de formage est suiveuse ce qui permet en première approximation de ne pas modéliser les contacts renfort-membrane et membrane-moule.

Les spécificités du procédé et du renfort étudié (pli UD avec voile thermoplastique à la surface) impliquent des mécanismes de déformation propres. Tout d'abord, un pli unitaire HiTape® étant très fin, l'hypothèse des déformations planes est faite et les déformations transverses, à savoir la compaction et les cisaillements transverses (c'est-à-dire dans les plan $(\underline{N}, \underline{X_1})$ et $(\underline{N}, \underline{X_2})$ représentés sur la Figure 1e-f, sont négligés. Ensuite, par sa structure UD, un pli présente très peu de maintien dans la direction transverse aux fibres (Figure 1a) dans le plan du renfort, d'où un risque plus grand de dégradation du pli dans

FIGURE 3 – Structure de HiTape® [15]

cette direction. La tension dans le sens des fibres (Figure 1a) est directement liée à la rigidité des fibres (quasi-inextensibilité). L'importance du cisaillement plan (Figure 1b) reste à démontrer ; Haanappel [12] a notamment montré que certains UDs ne se déforment que très peu en cisaillement, le comportement en flexion (Figure 1c) étant largement prépondérant. Le glissement inter-plis est a priori prépondérant (Figure 1d) et dépend fortement du comportement en température du voile thermoplastique. Ainsi les mécanismes de déformation considérés comme prépondérants pour la mise en forme d'un empilement HiTape® sont la flexion hors-plan, le cisaillement plan (à vérifier) et le glissement inter-plis avec une forte dépendance en température. La stratégie de modélisation doit donc être adaptée pour prendre en compte ces mécanismes.

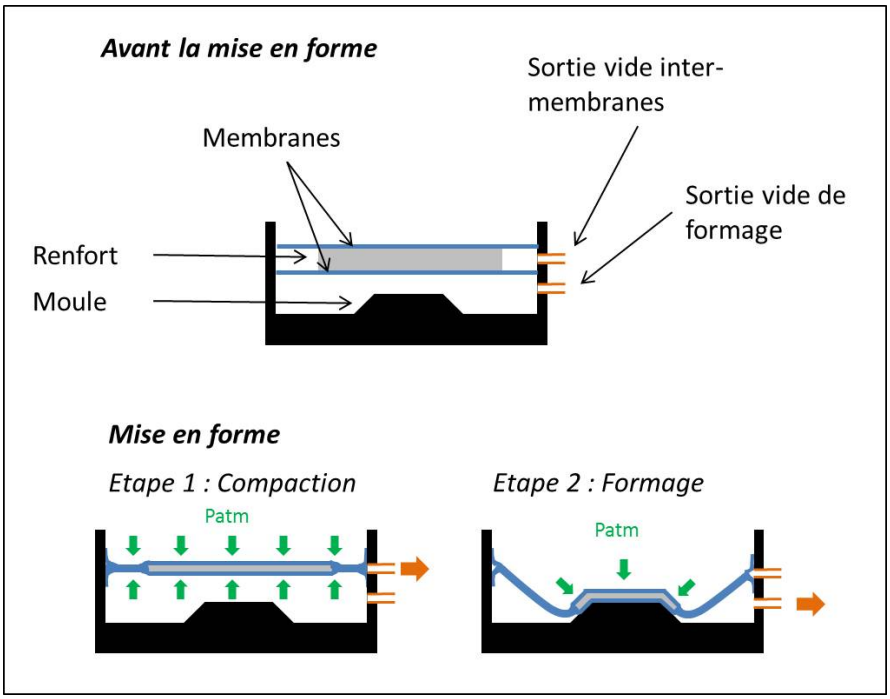

FIGURE 4 – Formage par double-membrane

3.2 Echelle de modélisation

La modélisation est réalisée à l'échelle macroscopique mais sa stratégie n'est pas encore arrêtée car elle dépend des travaux de caractérisation actuellement en cours. Les approches envisagées sont les suivantes : *(i)* représenter un pli par trois couches d'éléments représentant le sandwich voile-fibres-voile, *(ii)* représenter un pli par une couche d'éléments considérée comme un milieu équivalent, *(iii)* représenter un empilement par une couche d'éléments considérée comme un milieu équivalent. Un modèle non-linéaire hyperélastique est a priori retenu, permettant une approche énergétique. Les mécanismes de déformation sont découplés, et le potentiel w correspondant à la déformation d'un pli peut alors s'écrire comme la somme des potentiels de chaque mécanisme. Le glissement entre deux plis lié au comportement du voile devra être décrit ultérieurement. En choisissant une forme polynomiale pour les potentiels découplés, les coefficients polynomiaux sont ensuite déterminés à l'aide de résultats expérimentaux selon une approche phénoménologique. L'identification de ces coefficients nécessite donc la caractérisation de chaque mécanisme de déformation.

La caractérisation du comportement en *flexion hors-plan* est déjà bien avancée avec le flexomètre de Peirce [19] modifié selon la méthode de Liang [17] pour des essais à chaud. Cet essai consiste à soumettre un échantillon à son propre poids et à analyser sa déformée. Le modèle linéaire de Peirce est utilisé dans un premier temps et permet d'évaluer l'influence de la température sur la rigidité de flexion. Cependant, une relation non linéaire entre le moment de flexion et la courbure a été observée et donne lieu actuellement à des caractérisations complémentaires. La caractérisation du *glissement inter-plis* en température est en cours d'étude.

4 Conclusion et futurs développements

Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour la modélisation de la mise en forme de tissus secs ou de pré-imprégnés. Cependant, HiTape® étant un renfort unidirectionnel avec un voile thermoplastique contrecollé, la modélisation de sa mise en forme nécessite une approche spécifique. Les essais de caractérisation permettent notamment de comprendre ses mécanismes de déformation. Les simulations sont réalisées dans le code élément fini Zset [5] qui permet de gérer les non-linéarités et qui dispose d'éléments de coques. Des travaux supplémentaires devront être réalisés pour développer des éléments spécifiques à la modélisation de la mise en forme de renforts secs unidirectionnels.

Références

[1] Y. Aimene. *Approche hyperélastique pour la simulation des renforts fibreux en grandes transformations*, Thèse de doctorat, INSA-Lyon, 2007.

[2] P. Badel. *Analyse mésoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X*, Thèse de doctorat, INSA-Lyon, 2008.

[3] S. Bel. *Analyse et simulation de la mise en forme des renforts de composites NCF*, Thèse de doctorat, INSA-Lyon, 2011.

[4] T. Belytschko, W. Kam Liu, B. Moran. *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, John Wiley & Sons, 2000.

[5] J. Besson, R. Foerch. *Large scale object-oriented finite element code designs*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 142(1-2) :165-187, 1997.

[6] E. de Bilbao, D. Soulat, G. Hivet, A. Gasser. *Experimental study of bending behaviour of reinforcemens*. Experimental Mechanics, 50 :333-351, 2010.

[7] P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Sallé, F. Dumont. *Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses.*, Composite Science and Technology 71, 683-692, 2011.

[8] A. Chabot et A. Ehrlacher. *Modèles Multiparticulaires des Matériaux Multicouches M4_5n et M4_(2n+1)M pour l'analyse des effets de bord*, 11èmes nationales sur les composites, AMAC, 3 :1389-1397, 1998.

[9] A. Charmetant. *Approches hyperélastiques pour la modélisaion du comportement mécanique de préformes tissées de composites*, Thèse de doctorat, INSA-Lyon, 2011.

[10] H. Girardy, J.M. Béraud. *An innovative solution for cost-effective primary aircraft structures*, JEC Composites Magazine, 80 :36-38, 2013.

[11] E. Guzman Maldonado. *Modélisation et simulation de la mise en forme des matériaux composites préimprégnés à matrice thermoplastique et à fibres continues*, Thèse de doctorat, INSA-Lyon, 2016.

[12] S.P. Haanappel, R.H.W. ten Thije, U. Sachs, B. Rietman, R. Akkerman. *Formability analyses of unidirectional and textile reinforce thermoplastics*. Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 56 :80–92, 2013.

[13] B. Hagege. *Simulation du comportement mécanique des milieux fibreux en grandes transformations : Application aux renforts tricotés*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Paris, 2004.

[14] N. Hamila. *Simulation de la mise en forme des renforts composites mono et multi plis*, Thèse de doctorat, INSA-Lyon, 2007.

[15] Hexcel. HiTape® A new efficient composite solution for Primary Aircraft Structures. Retrieved from http ://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/HiTape.pdf

[16] YR. Larberg. *Forming of stacked unidirectional prepreg materials* (Thèse de doctorat). KTH Engineering Sciences, 2012.

[17] B. Liang, N. Hamila, M. Peillon, P. Boisse. *Analysis of thermoplastic prepreg bending stiffness during manufacturing and of its influence on wrinkling simulations*, Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 67 :111–122, 2014.

[18] G.B. McGuinness, C.M. Ó'Brádaigh. *Characterisation of thermoplastic composite melts in rhombus-shear : the picture-frame experiment*. Composites Part A, 29A :115–132, 1998.

[19] F.T. Peirce. *The handle of a cloth as a measurable quanity*, Journal of the Textile Institute, 21 :337-416, 1930.

[20] K.Y. Sze et X.H. Liu. *E new skeletal model for fabric drapes.* International Jounal of Mechanics and Materials in Design, 2(3-4) :225-243, 2005.