



HAL
open science

Simulation de la mise en forme des composites à renforts tissés : Approche continue

Majed Youssef, Philippe Boisse, Damien Soulat

► To cite this version:

Majed Youssef, Philippe Boisse, Damien Soulat. Simulation de la mise en forme des composites à renforts tissés : Approche continue. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01813029

HAL Id: hal-01813029

<https://hal.science/hal-01813029>

Submitted on 12 Jun 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.

Public Domain

Simulation de la mise en forme des composites à renforts tissés : Approche continue

M. Youssef*—**P. Boisse****—**D. Soulat***

* *Laboratoire de Mécanique des Systèmes et des Procédés
LMSP, UMR CNRS 8106 ENSAM Paris- Polytech'Orléans
151, Boulevard de l'Hôpital 75013 Paris
8, Rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans Cedex 2*

** *Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides
LaMCoS, UMR CNRS 5514, INSA de Lyon
69621 Villeurbanne Cedex*

Majed.Youssef@paris.ensam.fr

RÉSUMÉ. Différentes approches liées aux échelles caractéristiques d'un milieu fibreux sont présentées. Nous nous intéressons à la simulation de la mise en forme de pièces composites à forme non-développable. On identifie, par une approche continue, une loi de comportement représentant les mécanismes de déformation membranaires d'un pré-imprégné à renfort bidirectionnel. Quelques spécificités de la formulation actuelle sont illustrés par un essai de cadre déformable et un exemple de préformage.

ABSTRACT. Several approaches related to the various characteristic scales of a fibrous medium are presented. We are interested in the forming simulation of double-curvature composite parts. We identify, by means of a continuum approach, A constitutive law representing the in-plane deformation mechanisms of a bi-directional pre-impregnated reinforcement. Some specificities of the current formulation are illustrated by a picture frame test and a performing example.

MOTS-CLÉS : Milieux fibreux ; Simulation de mise en forme ; renforts tissés ; Approche continue

KEYWORDS : Fibrous mediums ; Forming ; Finite elements ; Fabrics ; Continuum approach

1. Introduction

Les performances macroscopiques d'un composite sont définies par les propriétés intrinsèques de ses deux constituants et par leur liaison. Dans le cas du thermoformage, le renfort se présente soit sous la forme de mats continus (nappes distribuées de façon généralement unidirectionnelle) pour la production de formes développables, soit sous la forme de tissés (entrecroisement de chaînes et de trames) pour la production de formes non-développables.

La théorie concernant la mise en forme des pièces composites à forme développable ayant fait l'objet d'études récentes [CHE 01], la simulation des procédés de mise en forme de pièces à double courbure reste encore à explorer. Plusieurs approches permettent de modéliser le comportement de tels milieux (homogénéisation, méthodes variationnelles, approches discrètes, drappage). L'objectif étant de simuler le thermoformage de composites thermoplastiques ou thermodurcissables à la température de mise en forme, l'approche continue se distingue par son efficacité dans l'obtention de solutions rapides et par son meilleur traitement des problèmes aux limites. On montre quelques spécificités de la formulation actuelle par un essai de cadre déformable et un exemple d'emboutissage de tissu équilibré en fibre de verre.

2. Modélisation du milieu fibreux et approches liées aux échelles

Les approches liées aux échelles sont différentes selon que l'on s'intéresse au milieu au niveau global ou que l'on s'y intéresse au niveau de ses constituants. Dans le premier cas, le milieu est traité comme étant continu, mais doit intégrer les spécificités qui traduisent, au niveau macro le comportement particulier lié à sa composition fibreuse. Dans le second cas, on s'intéresse à chacun des constituants (fil, maille, fibre...), le milieu continu n'existe pas forcément en tant que tel et la structure fibreuse est donnée par l'ensemble de ses constituants en interactions.

L'approche *discrète* traduit bien la particularité de la structure interne au niveau micro ou méso. Les propriétés mécaniques du tissu, peuvent être, par exemple, prises en compte par l'utilisation d'éléments spécifiques où le modèle s'appuie sur l'énergie de déformation en tension des fibres dans les directions chaîne et trame du tissu [BOI 97], ou encore par le biais d'éléments analogiques (masse, ressorts) [MAG 01][TAN 03]. La difficulté de cette approche réside dans le très grand nombre de composants représentés à l'échelle locale et peut être très coûteuse dans le cas d'une géométrie complexe.

L'approche *continue*, également capable de reproduire le comportement de tels milieux, est plus efficace et permet un meilleur traitement des problèmes aux limites. Une façon simple, pour représenter le comportement du matériau, serait de pondérer les modules d'un modèle élastique définie à priori par des taux liés aux températures de sa mise en forme [LIM 00]. Cependant, pour mieux prendre en

compte les symétries matérielles et pour une meilleure imposition des hypothèses liées au milieu anisotrope en question, utiliser la théorie des représentations des fonctions tensorielles [BOH 86] semble plus judicieux.

2.2.1. Approche continue

Le modèle *continu* visqueux unidirectionnel, appelé aussi IFRF [ROG 89], découle des modèles élastiques linéaires à renforts fibreux établis par [SPE 72] et ont fait l'objet de plusieurs travaux concernant la caractérisation et la simulation de mise en forme de pré-imprégnés unidirectionnels [OBR 91][PIC 92] :

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + T\mathbf{A} + 2\eta_t\mathbf{D} + 2(\eta_L - \eta_t)(\mathbf{AD} + \mathbf{DA}) \quad [1]$$

Le modèle *continu* visqueux pour un milieu continu incompressible et inextensible à deux directions de fibres [SPE 00], s'écrit sous la forme générale :

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + T_a\mathbf{a} \otimes \mathbf{a} + T_b\mathbf{b} \otimes \mathbf{b} + \boldsymbol{\tau} \quad [2]$$

La contrainte visqueuse $\boldsymbol{\tau}$ représente alors un intérêt particulier, dans le cas de composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable. Dans le cas des préformes sèches, le terme hydrostatique et la contrainte visqueuse s'annulent et le milieu est caractérisé uniquement en fonction des tensions des fibres [BOI 97] :

$$\mathbf{T} = T_a\mathbf{a} \otimes \mathbf{a} + T_b\mathbf{b} \otimes \mathbf{b} \quad [3]$$

La réponse d'un composite est anisotrope et possède des propriétés directionnelles (non prises en compte dans les travaux de [MCG 97]). La contribution visqueuse doit dépendre non seulement de \mathbf{D} , mais aussi de \mathbf{a} et \mathbf{b} . On cherche un modèle visqueux où $\boldsymbol{\tau}$ est linéaire en \mathbf{D} , restriction qui peut être retirée : la modélisation sera alors certes plus complète, mais proportionnellement, son traitement sera plus compliqué et plus difficile à appliquer en pratique.

La solution la plus simple est alors de modifier la formulation qui découle du comportement élastique linéaire anisotrope pour l'adapter au cas fluide [JOH 95] :

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta\mathbf{D} + 2\eta_2(\mathbf{AD} + \mathbf{DA} + \mathbf{BD} + \mathbf{DB}) + 2\eta_3(\mathbf{C}^*\mathbf{D} + \mathbf{DC}^*) \quad [4]$$

S'appuyant sur le fait que les deux directions de fibres sont équivalentes, cette démarche n'explique aucune correspondance entre modèle élastique et visqueux.

Dans un souci de généralisation et de prise en compte de la réorientation des fibres ainsi que de l'architecture du renfort (effet de treillis) [SPE 00], le comportement de la résine peut finalement être décrit par :

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta\mathbf{D} + 2\eta_1(\mathbf{AD} + \mathbf{DA}) + 2\eta_2(\mathbf{BD} + \mathbf{DB}) + 2\eta_3(\mathbf{CD} + \mathbf{DC}^T) + 2\eta_4(\mathbf{C}^T\mathbf{D} + \mathbf{DC}) \quad [5]$$

La figure 1 montre la réponse du modèle à un cisaillement positif et un cisaillement négatif dans un essai de cadre déformable, la différence observée a été

constatée expérimentalement par [MCG 97].

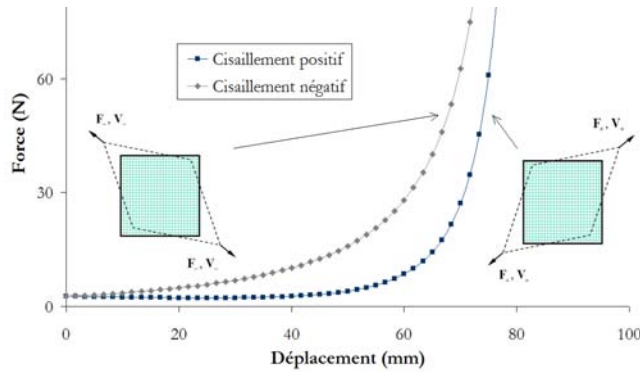


Figure 1. $V = 100\text{mm/mn}$ ($L_{\text{Bar}} = 150\text{mm}$, $\eta_{\dots} = 0.05 : 0.2\text{MPa.s}$)

3. Analyse expérimentale et numérique

On montre ici un exemple de simulation de mise en forme et d'essai de cadre déformable. Les éléments utilisés sont de type Belytschko-Tsay membranaire. La formulation corotationnelle permet d'éviter la complexité liée aux dérivées objectives et permet une bonne réactualisation des directions de fibres en fixant le système de coordonnées à l'élément. Le choix de la vitesse de déformation facilite l'évaluation de la loi de comportement puisque la contrainte conjuguée est celle de Cauchy. La contribution visqueuse de la résine est basée sur un modèle de Maxwell incluant une seule direction de fibre. La contrainte totale est obtenue par superposition d'un modèle élastique global stabilisant le calcul et d'un modèle élastique pour chaque direction de fibres [PIC 92].

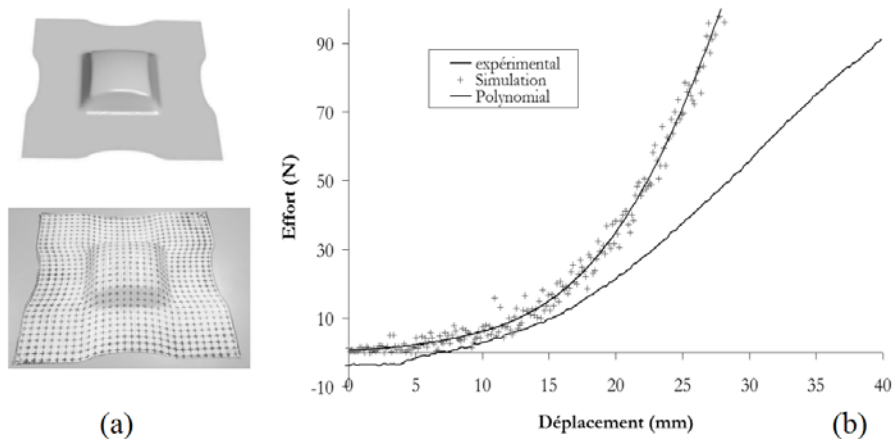


Figure 2. (a) Emboutissage d'un taffetas de verre équilibré T6 (b) Efforts de contact entre flan et poinçon.

Avec un seul point d'intégration dans l'épaisseur, la conséquence est que les effets de flexion qui sont communs dans la mise en forme (emboutissage particulièrement) ne sont plus inclus. Ces effets, à caractère non-linéaire [LOM 03], sont en effet soit négligés soit surestimés dans les formulations existantes. La figure 2 montre la différence observée entre les efforts de contact, entre flan et poinçon, obtenus par calcul et obtenus expérimentalement. La figure 4 montre la réponse à un cisaillement positif et négatif d'un pré-imprégné Cetex dans une simulation d'essai de cadre déformable.

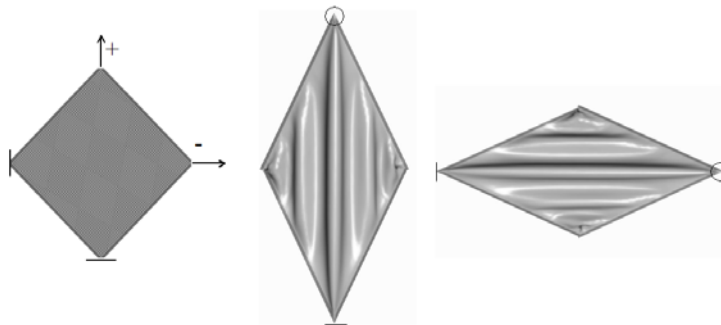


Figure 3. (a) Simulation de l'essai du cadre déformable (Cetex (PPS/ Carbone)).

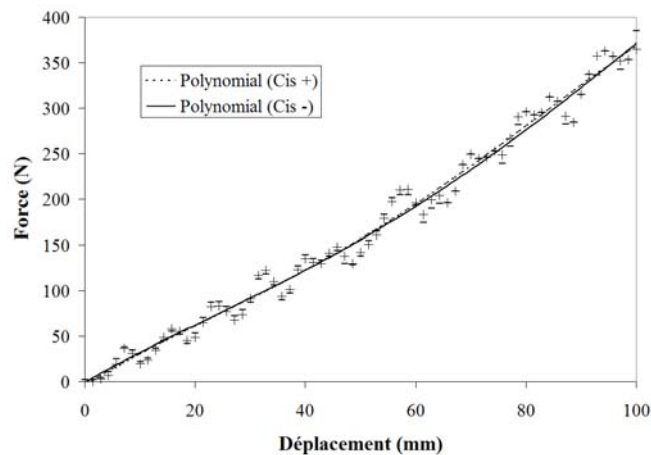


Figure 4. (a) Courbes force-déplacement (essai figure 3) $V_{dép}=100\text{mm/mn}$.

Le modèle de comportement identifié précédemment servira à représenter les mécanismes de déformation membranaires prépondérantes. L'intégration se fera sur un élément coque de type Reissner-Mindlin (HL, BTW) en tenant compte des effets de flexion hors-plan et dans le plan du tissu. Des essais d'emboutissage de formes non développables ont déjà été réalisés sur des pré-imprégnés à usage industriel comme le Twintex (PP/Verre), le Cetex (PPS/Carbone) et l'Hexform (Epoxy/Verre) pour une confrontation simulation essai.

4. Bibliographie

- [BOH 86] BOHLER J. P., Application of tensor functions in solid mechanics, *CISM COURSES and Lectures*, n° 292, Berlin 1986.
- [BOI 97] BOISSE P., BORR M., BUET K. and CHEROUAT A., « Finite element simulations of textile composite forming including the biaxial fabric behaviour », *Composites Part B*, vol. 28, 1997, p. 453-464.
- [CHE 01] CHERUET A., « Analyse et simulation de la mise en forme de composites thermoplastiques », Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 2001.
- [JOH 95] JOHNSON A. F., « Rheological model for the forming of fabric reinforced thermoplastic sheets », *Composites Manufacturing*, vol. 63, 1995, p153-160.
- [LIM 00] LIM T.C., ZAKO M., SAKATA S. and RAMAKRISHNA S., « Geometrical non-linearity of textile composites in large deformation », *Adv. Comp. Lett.*, vol. 9, 2000, p. 257-266.
- [LOM 03] LOMOV S. V., VERPOEST I., BARBURSKI M. and LAPERRÉ J., « Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part 2. KES-F characterisation of the deformability of the preforms at low loads », *Composites: Part A*, vol. 34, 2003, p. 359-370.
- [MAG 01] MAGNO M., GANGHOHHER J.F., « Un modèle mésoscopique en grandes perturbations de matériaux textiles–Application à l'armure toile », *C.R. Acad. Sc. Paris*, vol. 329, 2001, p. 149-152.
- [MCG 97] MCGUINNESS C. B. and BRADAIGH C.M.O. « Development of Rheological models for forming flows and picture-frame shear testing of fabric reinforced thermoplastic sheets », *J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 73, 1997, p. 1-28.
- [OBR 91] OBRADAIGH C.M and PIPES R.B., « Finite element of composite sheet forming », *Comp. Manuf.*, vol. 2, 1991, p. 161-170.
- [PIC 92] PICKET A.K., QUECKBORNER T., DE LUCA P. and HANG E., « An explicit finite element solution for the forming prediction of continuous fibre reinforced thermoplastic sheets », *Comp. Manuf.*, vol. 6, 1992, p.237-243.
- [ROG 89] ROGERS T.G., « Rheological characterization of anisotropic materials », *Composites*, vol. 20, 1989, p. 21-27.
- [SPE 72] SPENCER A.J.M., *Deformation of fiber-reinforced materials*, Calendron Press, Oxford, 1972.
- [SPE 00] SPENCER A.J.M. « Theory of fabric-reinforced viscous fluid », *Composites Part A*, vol. 31, 2000, p.1311-1321.
- [TAN 03] TANOV R. and BRUEGGERT M., « Finite element modelling of non-orthogonal loosely woven fabrics in advanced occupant restraint system ». *Finite Element Analysis and Design*, vol. 39, 2003, p. 357-367.