



**HAL**  
open science

## Approche mésoscopique pour la mise en forme des renforts tissés de composites

Sébastien Gatouillat, Emmanuelle Vidal-Sallé, Philippe Boisse

► **To cite this version:**

Sébastien Gatouillat, Emmanuelle Vidal-Sallé, Philippe Boisse. Approche mésoscopique pour la mise en forme des renforts tissés de composites. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.71. hal-00597986

**HAL Id: hal-00597986**

**<https://hal.science/hal-00597986>**

Submitted on 3 Jun 2011

**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.

# Approche mésoscopique pour la mise en forme des renforts tissés de composites

## *Mesoscopic approach for the forming of composite woven reinforcements*

Sébastien Gatouillat<sup>1</sup>, Emmanuelle Vidal-Sallé<sup>1</sup> et Philippe Boisse<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : LaMCoS – INSA Lyon UMR CNRS 52 59

Université de Lyon – France

e-mail : sebastien.gatouillat@insa-lyon.fr, emmanuelle.vidal-salle@insa-lyon.fr, philippe.boisse@insa-lyon.fr

### Résumé

Les renforts tissés de composites sont des matériaux dont la mise en forme est délicate. La simulation numérique est un outil précieux pour mettre au point les gammes de fabrication. Différentes approches existent qui présentent des avantages et des inconvénients suivant leur nature. L'approche présentée ici est une approche discrète où chaque mèche de renfort est modélisée à l'aide d'éléments finis de coques. Par rapport aux approches continues classiques, cette façon de procéder permet de prendre en compte les mouvements relatifs entre fils, en particulier les glissements entre réseaux. La description géométrique de la maille élémentaire de tissu est suffisamment précise pour rendre compte des interactions entre fils liées à l'armure du tissu, et en même temps assez grossière pour permettre de travailler avec un nombre de degrés de liberté raisonnable. L'approche proposée va de l'identification des paramètres géométriques et de comportement mécanique du tissu jusqu'aux simulations de mise en forme.

### Abstract

The forming processes of woven reinforcements for composite materials are not easy to perform. Numerical simulations are useful to optimize the forming operation. Several approaches are used. All of them present some advantages and drawbacks. The approach presented here is a discrete one, where each yarn is modeled using 3D shell elements. Compared to the classical continuous approaches, the proposed method allows taking into account the possible sliding between both yarn networks. The geometrical description of the elementary pattern is fine enough to account for the interactions linked to the weave pattern and coarse enough to avoid a huge number of degrees of freedom in the model. The proposed approach deals with all the aspects for the modeling process: from the identification of the geometrical and mechanical properties of the fabric to the forming simulations.

**Mots Clés :** mise en forme ; modèle discret ; tissus 2D ; éléments finis

**Keywords:** dry reinforcement; discrete model; woven fabric; finite element

## 1. Introduction

La simulation numérique de la mise en forme des renforts tissés de composites permet d'étudier et d'optimiser les conditions de faisabilité d'une telle opération en limitant les essais expérimentaux et donc les coûts de mise en œuvre. La simulation permet d'accéder à des informations telles que la position des fibres après formage et leur état de déformation. Ces informations permettent de vérifier a priori si la pièce ainsi formée répondra au cahier des charges en terme de tenue en service. Elles permettent également de prédire l'apparition de défauts lors de la mise en forme (plissements, glissements entre les réseaux, rupture de fibres ou même de mèches).

Les renforts tissés de composites sont des matériaux complexes qui peuvent être observés à différentes échelles. L'échelle macroscopique considère généralement le renfort comme un matériau continu dont le comportement est intimement lié à sa structure interne mais celle-ci n'apparaît pas de manière explicite dans la modélisation. La plupart des simulations numériques de mise en forme à cette échelle utilisent une approche continue [1,2] ou semi-discrète [3]. L'échelle directement inférieure, c'est-à-dire l'échelle mésoscopique, considère quant à elle que le matériau est continu à l'échelle des fils [4]. L'armure du tissu pourra donc être prise en compte de manière explicite dans la modélisation. Dans ce cas, le matériau considéré, c'est-à-dire le toron, présente un comportement particulier lié à la structure d'une mèche constituée de milliers de fibres pouvant se

déplacer les unes par rapport aux autres. Enfin, la dernière échelle est l'échelle microscopique. A cette échelle, le matériau continu de base est la fibre [5].

Aujourd'hui seules les approches macroscopiques permettent de simuler la mise en forme d'un renfort. Les modèles aux échelles inférieures permettent quant à eux d'étudier le comportement d'un renfort à partir de l'assemblage de ses constituants élémentaires. On peut ainsi étudier l'influence de l'armure d'un tissu sur sa formabilité ou évaluer l'évolution de sa perméabilité en fonction de son état de déformation [6].

Le passage méso/macro (ou micro/méso) s'accompagne nécessairement d'une perte d'information liée au passage d'une description discrète à une description continue. Le modèle proposé ici consiste en une description à l'échelle mésoscopique des renforts permettant la simulation de pièces à l'échelle macroscopique. Cela est rendu possible par une simplification de la description mésoscopique grâce l'utilisation d'éléments de coques. Un modèle de comportement hypoélastique spécifique à la mèche est alors considéré. En particulier, la direction des fibres est strictement suivie et un comportement élastique non linéaire permettant de prendre en compte partiellement la compaction transverse est défini. L'identification et la validation du modèle sont effectuées grâce aux essais usuels de caractérisation des renforts. Outre le fait de décrire correctement le comportement en cisaillement des tissus, le modèle permet de prédire les plissements et les glissements de réseaux. Des simulations de mise en forme illustrent ces capacités.

## **2. Présentation du modèle géométrique**

La modélisation que nous proposons a pour objectif de permettre la simulation de la mise en forme de renforts à l'échelle macroscopique tout en offrant une description mésoscopique de la structure. Pour cela, il est indispensable d'utiliser une modélisation géométrique beaucoup plus simple que celles de la littérature comme celle proposée par Hivet [7]. La description proposée s'inspire en ce sens des modèles proposés dans le domaine de la balistique [8-10]. Les phénomènes mis en jeu ne sont cependant pas les mêmes : petites déformations et efforts de tension importants pour les renforts balistiques, grandes déformations en cisaillement et efforts de tension faibles pour les renforts lors de leur mise en forme.

### **2.1.Choix du modèle mésoscopique**

Dans le modèle géométrique proposé par Hivet [7], la mèche est définie par des arcs de cercles et des segments de droites. Les mèches de chaîne et de trame ont des formes complémentaires au contact, évitant ainsi les interpénétrations et les vides. Afin de pouvoir traiter des problèmes faisant intervenir des renforts de grande dimension, il est indispensable de simplifier ce modèle géométrique. En s'inspirant des modèles proposés dans le domaine de la balistique, plusieurs types de simplifications sont possibles :

- garder une description volumique mais en réduisant très nettement le nombre d'éléments décrivant d'une part la ligne moyenne et d'autre part la section de la mèche [8]. La réduction de taille de modèle qui en découle n'est pas suffisante pour permettre de traiter des problèmes de mise en forme.
- modéliser la mèche par des éléments de coque. Cette simplification revient à ne considérer la compaction transverse de la mèche que dans sa largeur. Un seul élément est alors nécessaire dans l'épaisseur de la mèche pour considérer la flexion ; c'est la solution proposée par Barauskas et Nilakantan et Abraitien [9]. La cellule élémentaire représentative (CER) de leur modèle de taffetas comporte alors 1980 degrés de liberté.
- modéliser la mèche par des éléments de membrane. Une telle modélisation revient, en plus des hypothèses effectuées lors de la modélisation par des éléments de coque, à négliger la rigidité des mèches en flexion et permet de diviser le nombre de degrés de liberté du modèle par deux par rapport à une modélisation par des éléments de coque [9]. La simplification du modèle a été poussée à l'extrême par Sapozhnikov et al. [10] qui n'ont utilisé qu'un élément dans la largeur de

la mèche et ont réduit la modélisation de l'ondulation à sa plus simple expression. Leur modèle ne compte alors que 216 degrés de liberté pour une CER de taffetas.

Les études comparatives effectuées dans le cadre de ce travail ont montré que la prise en compte de la flexion était indispensable ce qui exclut de fait la dernière approche. Il ne reste donc plus que la modélisation à l'aide d'éléments de coque. Cependant, l'allure de la CER de Sapozhnikov est reprise.

Dans ce qui suit, les identifications ont été réalisées sur un taffetas mais la procédure proposée est générale et peut être étendue à d'autres armures.

## 2.2. Calcul des paramètres géométriques

Le modèle proposé par Hivet [7] pour la modélisation du taffetas fait intervenir 23 inconnues dans le cas général. Dans le cas où le taffetas est équilibré, c'est-à-dire que les mèches de chaîne et de trame ont les mêmes caractéristiques, le nombre d'inconnues se réduit à 3. Pour l'identification du modèle, Hivet propose alors de considérer les 3 paramètres suivants : l'embuvage  $e$ , exprimé en pourcentage ; la densité de mèche  $d$ , exprimée en  $\text{mm}^{-1}$  ; la largeur de mèche  $c$ , exprimée en mm.

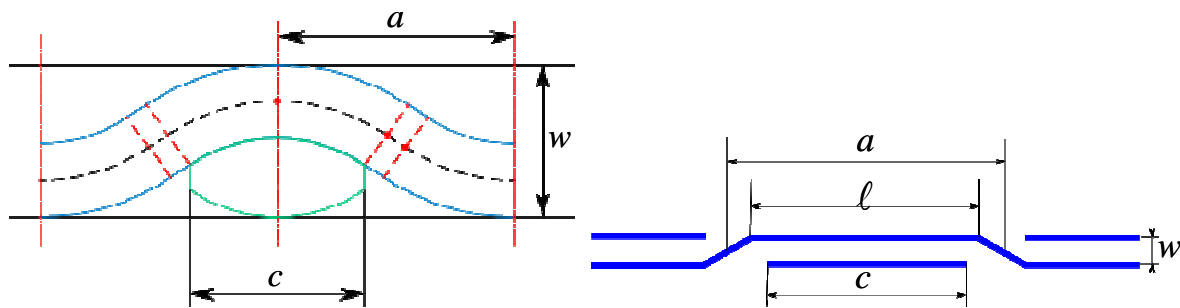


Fig. 1 Modèle géométrique du taffetas d'après Hivet et modèle simplifié utilisé dans cette étude

A partir de ces grandeurs d'autres quantités peuvent être évaluées comme :

- la périodicité du tissage  $a$  :

$$a = 1 / d \quad (\text{Eq. 1})$$

- l'épaisseur du tissu  $w$  :

$$w = \frac{2c}{\sin \varphi} (1 - \cos \varphi) + 2(a - c) \tan \varphi \quad (\text{Eq. 2})$$

Lors des simulations, les mèches sont discrétisées par un nombre fini d'éléments. Au cours de cette discrétisation, tous les paramètres ne peuvent pas garder leur valeur « idéale ». Dans le cas d'une modélisation par des éléments de coque, certains de ces paramètres doivent changer de valeur. Ainsi, pour modéliser un renfort quels que soient les paramètres expérimentaux de densité de mèche, d'embuvage, de largeur de mèche et d'épaisseur de tissu mesurés, seuls trois d'entre eux peuvent garder leur valeur expérimentale.

La densité de mèche  $d$  permet comme dans le modèle de Hivet de déterminer la périodicité  $a$  du tissage. Le paramètre d'embuvage permet ensuite de déterminer la longueur de mèche ondulée  $L_{dp}$  par demi période :

$$L_{dp} = a(1 + e) \text{ pour le tissu réel} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$L_{dp} = \ell + \sqrt{(a - \ell)^2 + \frac{w^2}{4}} \text{ pour le tissu discrétisé} \quad (\text{Eq. 4})$$

par conséquent, les données qui décrivent la géométrie du tissage sont : la densité de mèches  $d$  ; la périodicité  $a$  ; l'embuvage  $e$  ; l'épaisseur du tissu  $w$  ; la longueur de la partie courbe de la mèche (ou plateau)  $\ell$  ; la longueur de la mèche par demi période  $L_{dp}$ .

Les 3 équations (Eq. 1), (Eq. 3) et (Eq. 4) relient ces différents paramètres. Disposant de 6 paramètres à déterminer reliés entre eux par 3 relations, le problème a donc 3 degrés de liberté. Ainsi, 3 paramètres suffisent pour définir le problème comme dans le modèle proposé par Hivet.

Les 6 paramètres  $d$ ,  $a$ ,  $e$ ,  $w$ ,  $\ell$  et  $L_{dp}$  ne peuvent pas être choisis indépendamment. Les analyses effectuées montrent que le paramètre d'ajustement le mieux adapté est l'épaisseur du tissu  $w$ .

D'après sa définition, l'épaisseur  $w$  est égale à deux fois l'amplitude crête à crête que décrit la ligne moyenne d'une mèche (Fig. 1). Si l'on discrétise la ligne moyenne en prenant des noeuds lui appartenant, la longueur de celle-ci sera diminuée puisqu'on remplace des arcs de cercle par les cordes correspondantes. On modifie alors l'embuvage, qui est un de nos principaux paramètres d'entrée du modèle. Une autre méthode consiste à choisir des noeuds n'appartenant pas forcément à la ligne moyenne réelle mais permettant de conserver la longueur de celle-ci et donc la valeur de l'embuvage. On peut alors déterminer l'épaisseur du tissu à partir des autres paramètres :

$$w = 2\sqrt{ae(2a + ae - 2\ell)} \quad (\text{Eq. 5})$$

Cette modification a pour conséquence de modifier la section des mèches et la densité surfacique du renfort. Afin de conserver une raideur des mèches correcte, on doit artificiellement modifier les propriétés mécaniques du matériau les constituant afin que la rigidité des mèches reste la même. Il en va de même pour la densité. Enfin, une épaisseur de contact conforme aux mesures expérimentales peut être définie pour les contacts entre le renfort et les outils de mise en forme.

### 3. Présentation du modèle de comportement du matériau

Le modèle que nous proposons est purement élastique. Il se place dans le cadre des grandes transformations et doit de ce fait être capable de traiter des non linéarités géométriques dues à de grands déplacements et déformations. Le modèle doit également permettre de traiter d'éventuelles non linéarités matérielles. Une formulation hyperélastique [11] peut être envisagée mais la nécessaire détermination d'un potentiel pour ce type de formulation peut être difficile à effectuer. Nous avons donc retenu une formulation hypoélastique [12] pour notre modèle.

La plus grande difficulté rencontrée est liée à la nécessité d'un suivi précis des directions de fibres [13]. Il a été montré dans les travaux précédents que les dérivées objectives classiques telles Green-Naghdi ou Jaumann n'étaient pas adaptées dans le cas de matériaux dont le comportement est fortement orienté. La dérivée objective basée sur la rotation des fibres présentée dans [13] est utilisée ici.

#### 3.1. Comportement mécanique de la mèche

L'étude par tomographie X à l'échelle microscopique d'échantillons de taffetas en tension biaxiale et en cisaillement a montré que la distribution des fibres dans une section de la mèche peut être considérée comme isotrope [14]. Le matériau constitutif des mèches peut ainsi être défini comme étant isotrope transverse. Dans le cadre de l'utilisation d'éléments finis de coque, la notion d'isotropie transverse est trop riche dans la mesure où l'épaisseur de la coque ne varie pas. La loi proposée par Badel [15] doit donc être adaptée au cas des coques.

Le comportement transverse de la mèche se réduit donc à une composante des incréments de contraintes de Cauchy :

$$\Delta\sigma_{22} = C\Delta\varepsilon_{22} \quad (\text{Eq. 6})$$

avec

$$C = C_0 e^{-p'\varepsilon_{22}} e^{n'\varepsilon_{11}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Les coefficients  $C_0$ ,  $p'$  et  $n'$  sont des coefficients à déterminer expérimentalement.

Le comportement longitudinal de la mèche est choisi élastique linéaire même si une petite non-linéarité est parfois rencontrée en début de courbe de traction. De plus, la section de mèche est actualisée de façon que sa rigidité reste constante :

$$E_l = E_l^0 \frac{S_0}{S} \quad (\text{Eq. 8})$$

où  $E_l$  est le module de Young longitudinal actuel de la mèche,  $E_l^0$  son module initial,  $S$  sa section actuelle et  $S_0$  sa section initiale.

Le comportement en flexion sera piloté à la fois par l'épaisseur de la mèche et par son module de cisaillement longitudinal  $G_{12}$ .

Cette loi de comportement est codée dans un sous programme utilisateur d'ABAQUS/Explicit VUMAT.

### 3.2. Identification matérielle

Comme cela a été évoqué plus haut, les paramètres géométriques et matériels sont liés entre eux. L'identification du modèle consiste donc à estimer plusieurs natures de paramètres. Il faut identifier deux paramètres géométriques, l'épaisseur des coques  $h$  et la largeur de la mèche  $c$  (voir Fig. 2). Les autres paramètres sont mécaniques, il s'agit de  $E_l^0$ ,  $G_{12}$ ,  $C_0$ ,  $n'$  et  $p'$ .

A partir d'un essai de traction sur mèche seule et d'un essai de flexion, on détermine les paramètres géométriques et les paramètres longitudinaux  $E_l^0$  et  $G_{12}$ . Un essai de cisaillement permet ensuite de déterminer les paramètres transverses  $C_0$ ,  $n'$  et  $p'$ . Parfois, il peut être nécessaire d'itérer sur la valeur de la largeur  $c$  pour que l'angle de blocage en cisaillement soit correct.

## 4. Validation du modèle

Pour valider le modèle deux types de simulations ont été effectuées : une simulation de traction de biais (bias extension test) et des essais d'emboutissage. Le premier essai montre la capacité du modèle à bien décrire la cinématique des fils lors d'un essai de cisaillement et les seconds permettent de mettre en évidence la capacité du modèle à faire des simulations de mise en forme.

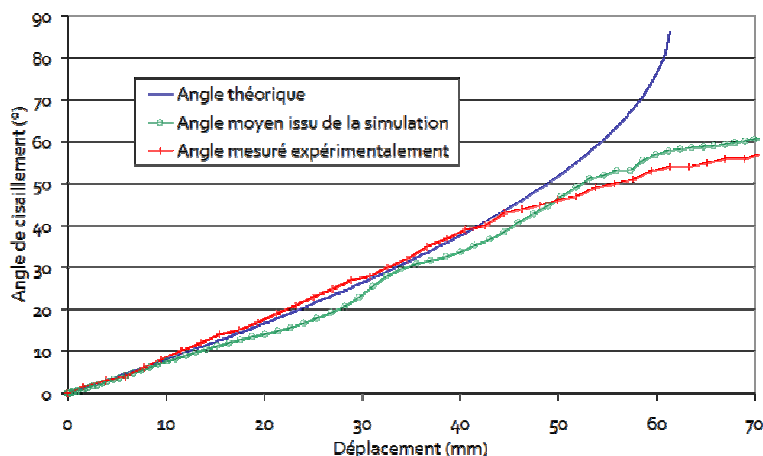


Fig. 3 évolution de l'angle de cisaillement en fonction de l'allongement de l'éprouvette

Le grand avantage de cette approche est sa capacité à décrire les glissements entre réseaux. La Fig. 3 montre que les angles de cisaillement prédits par la simulation sont en bon accord avec les angles expérimentaux même au-delà des 40° connus pour être la limite angulaire de dépouillement théorique du test. Ceci est dû qu'à partir de cet angle, des glissements entre réseaux se produisent

qui minimisent l'angle effectif entre les deux réseaux. La Fig. 4 montre quant à elle que les avalements sont également bien décrits dans l'essai de double dôme.

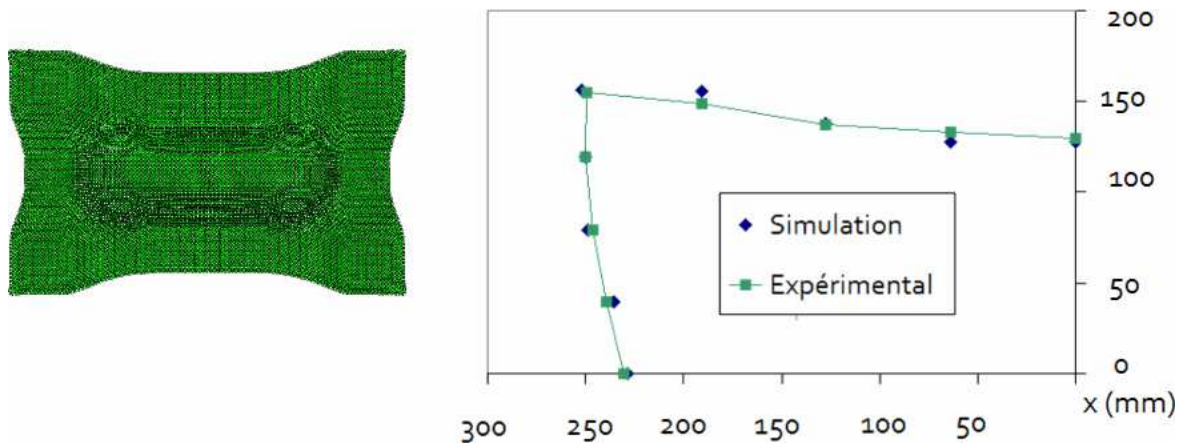


Fig. 4 comparaison des avalements dans le cas du double dôme d'après Khan et al. [16]

## Remerciements

Ces travaux ont bénéficié du support de l'ANR par l'intermédiaire du programme MECAFIBRES.

## Références

- [1] X. Q.Peng, J.Cao, « A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics » *Composites Part A*, vol. 36 n°6, pp. 859-874, 2005
- [2] R. H. W. ten Thijsse, R. Akkerman, J. Huétink, « Large deformation simulation of anisotropic material using an updated Lagrangian finite element method », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 196 n°33-34, pp. 3141-3150, 2007
- [3] N. Hamila, P. Boisse, « A Meso-Macro Three Node Finite Element for Draping of Textile Composite Preforms », *Appl Compos Mater*, vol. 14, 235-250, 2007
- [4] P. Badel, E. Vidal-Sallé, P. Boisse, « Computational determination of in-plane shear mechanical behaviour of textile composite reinforcements » *Computational Materials Science*, vol. 40, n°4, pp. 439-448, 2007
- [5] D. Durville, « Simulation of the mechanical behaviour of woven fabrics at the scale of fibers » *International Journal of Material Forming*, Vol 3, Suppl 2, pp. 1241-1251, 2010
- [6] F. Loix, P. Badel, L. Orgéas, C. Geindreau, P. Boisse « Woven fabric permeability: From textile deformation to fluid flow mesoscale simulations », *Composites Science and Technology*, vol. 68, 1624-1630, 2008
- [7] G. Hivet., P. Boisse. « Consistent 3D geometrical model of fabric elementary cell. Application to a meshing preprocessor for 3D finite element analysis ». *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 42, n°1, pp. 25-49, 2005.
- [8] Y. Duan, M. Keefe, T. A.Bogetti, B.Powers « Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric ». *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 48, n°1, pp. 33-43, 2006
- [9] R. Barauskas, A. Abraitien « Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA ». *International Journal of Impact Engineering*, vol. 34, n°7, pp. 1286-1305, 2007
- [10] S. B. Sapozhnikov, M. V. Forental, N. Y. Dolganina « Improved methodology for ballistic limit and blunt trauma estimation for use with hybrid metal/textile body armor ». In: *Proceedings of the micro-symposium "Finite element modelling of textiles and textile composites"*, 26-28 September 2007, Saint-Petersburg, Russia
- [11] Y. Aimène, E. Vidal-Sallé, B. Hagège, F. Sidoroff, P. Boisse, « A hyperelastic approach for composite reinforcement large deformation analysis », *Journal of Composite Materials*, vol. 44, n°1, pp. 5-22, 2010
- [12] C. Truesdell « Hypo-elasticity ». *Journal of Rational Mechanics Analysis*, vol. 4, pp. 83-133, 1955
- [13] B. Hagège, P. Boisse, J.L. Billoët, « Finite element analyses of knitted composite reinforcement at large strain », *European Journal of Computational Mechanics*, vol. 14, 767-776, 2005
- [14] P. Badel, E. Vidal-Sallé, E. Maire, P. Boisse, « Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale », *Compos. Science and Technology*, vol. 68, 2433-2440, 2008
- [15] P. Badel, S. Gauthier, E. Vidal-Sallé, P. Boisse, « Rate constitutive equations for computational analyses of textile composite », *Composites: Part A*, vol. 40, 997-1007, 2009
- [16] M. A. Khan, T. Mabrouki, E. Vidal-Sallé, P. Boisse « Numerical and Experimental Analyses of Woven Composite Reinforcement Forming using a Hypoelastic Behaviour. Application to the Double Dome Benchmark », *Journal of Materials Processing Technology* vol. 210, 378-388., 2010