

COMPORTEMENT MECANIQUE DES RENFORTS TISSES

E. Vidal-Sallé, C. Florimond, S. Gatouillat, P. Badel, N. Hamila, P. Boisse *Université de Lyon, INSA-Lyon, LaMCoS UMR5259, F-69621, France. Téléphone : 04 72 43 81 46, Télécopie : 04 72 43 85 25, emmanuelle.vidal-salle@insa-lyon.fr*

Mots clés : Matériau fibreux, Comportement mécanique, Loi de comportement, Caractérisation, Essais mécaniques

1. INTRODUCTION

L'utilisation croissante des matériaux fibreux, et plus particulièrement des tissus dans les composites structuraux, rend nécessaire une bonne connaissance de leur comportement pendant les phases de mise en œuvre de façon à être capable de prévoir l'impact de la mise en forme sur les propriétés mécaniques des pièces composites en service. Il est également nécessaire de savoir quelles conditions de mise en œuvre permettront de garantir la faisabilité des pièces. Or, au moment de leur mise en œuvre, les renforts de composite présentent une grande souplesse qu'il est impératif de maîtriser.

Pour toutes ces raisons, la mécanique des milieux fibreux s'inscrit dans le contexte général des grandes transformations et nécessite un traitement particulier aussi bien au niveau expérimental que théorique. Le présent article a pour objet de faire une revue rapide des principales caractéristiques mécaniques des tissus (essentiellement 2D) ainsi que les outils de modélisation.

Cet article s'articule donc autour de deux grands thèmes : le comportement mécanique des tissus, les essais qui permettent de le mettre en évidence ; la mise en place de lois de comportement ad hoc.

2. COMPORTEMENT MECANIQUE DES RENFORTS TISSES

Un tissu est un entrelacement de fils, eux-mêmes constitués de la juxtaposition de quelques centaines ou quelques milliers de filaments. Ces derniers peuvent être assemblés en nappes unidirectionnelles mais, le plus souvent, dans le cas des tissus, ils sont torsadés (on parle alors de fils retordus) pour faciliter leur tissage.

Le tissu en lui-même sera caractérisé par la façon dont les fils sont entrelacés. On parlera de l'armure du tissu. Pour les tissus « plats », on parle de trois familles principales d'armures : le taffetas (ou toile), le sergé et le satin. Chaque armure présente des avantages et des inconvénients qui vont les rendre plus ou moins aptes à répondre aux attentes des ingénieurs. Mais le tissu est également caractérisé par d'autres grandeurs comme la densité du renfort, son embuvage... quantités qui seront reprises plus loin dans ce document.

La question légitime qui se pose alors est : lorsqu'on observe le comportement mécanique du tissu, que peut-on attribuer aux différentes caractéristiques physiques et géométriques de celui-ci ?

2.1 Comportement dans le plan

L'intérêt premier des renforts tissés est lié à leur facilité de mise en œuvre sur des formes complexes. Cela implique donc des caractéristiques mécaniques particulières, spécialement en cisaillement.

2.1.1 Cisaillement dans le plan : un tissu est un entrelacement d'au moins deux réseaux de fils, initialement orthogonaux. Ces deux réseaux ne sont pas collés l'un à l'autre et seuls les efforts de

contact permettent de garantir la cohérence du tissu. Par conséquent, les fils peuvent tourner les uns par rapport aux autres ce qui confère au tissu une grande souplesse vis-à-vis du cisaillement dans le plan comme le montre la figure (1).

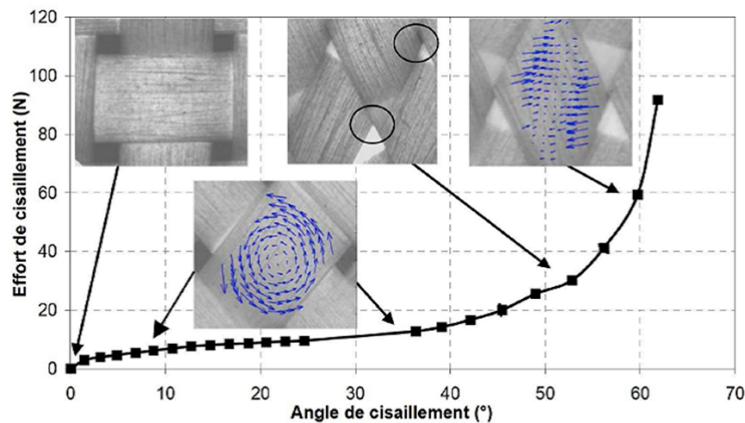


Figure 1. Que se passe-t-il lors du cisaillement d'un tissu ? (Dumont et al, 2003)

Dans un premier temps, les fils sont « libres » de tourner les uns par rapport aux autres, seuls les efforts de frottement entre les fils gênent ce mouvement, la raideur correspondante est donc assez faible. Cette étape dure tant que le mouvement de rotation (qui s'accompagne dans la direction hors plan par une augmentation de l'ondulation des fils) n'est pas bloqué par les fils du second réseau. On constate alors une rigidification progressive du tissu. Ce dernier phénomène s'accélère lorsque le contact latéral entre fils d'un même réseau s'amorce. Généralement, c'est le moment où la raideur du tissu dans le plan devient supérieure à sa raideur de flexion (hors plan donc), et où des plissements apparaissent (Boisse et al. 2006, Prodromou et Chen, 1997).

Deux essais sont utilisés pour caractériser le comportement en cisaillement des tissus : l'essai de cadre (ou picture frame test) et l'essai sur biais (ou bias extension test). Ces deux essais font l'objet d'une littérature importante auquel le lecteur est appelé à se référer (Kawabata 1980, Zhu et al. 2007, Cao et al. 2008, Launay et al. 2008, Lomov et al. 2008).

A une échelle inférieure, on constate que le cisaillement se traduit par une variation importante de la forme des fils (Badel et al. 2008).

2.1.2 Comportement en tension : un tissu est particulièrement rigide lorsqu'on le sollicite dans la direction de ses fibres. Cependant, l'embuvage du tissu, c'est-à-dire le rapport de longueur des fils et du tissu, rend le comportement en traction des tissus non-linéaire.

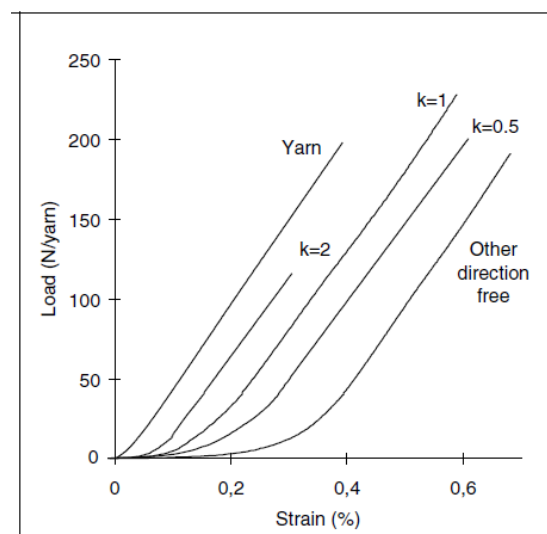


Figure 2. Allure des résultats de traction biaxiale sur tissu 2D (Buet-Gauthier et Boisse, 2001)

En effet, lorsqu'on tend un tissu, on commence par tendre les fils initialement ondulés du tissu, et c'est seulement une fois que les fils sont tendus (et ceux de la direction transverse encore plus ondulés si le tissu est libre) que l'on commence réellement à tendre les fils. Par conséquent, la courbe de traction que l'on obtient est très souple au début puis se rigidifie fortement lorsqu'on commence à tendre les fils. La raideur de cette seconde partie de courbe est quasiment identique à celle de la courbe de traction d'un fil seul.

Lorsque la sollicitation correspond à de la traction biaxiale, un phénomène vient se superposer à ce qui est décrit ci-dessus. En effet, si les deux réseaux de fils sont tendus simultanément, l'interaction entre les deux réseaux va avoir pour conséquence de comprimer les fils. Ce phénomène, tout comme celui du cisaillement a pu être observé par Badel *et al.* (2008) lors d'essais de traction biaxiale sous tomographe.

Comme pour les essais de cisaillement, une littérature abondante existe (Kawabata *et al.* 1973, Buet-Gautier et Boisse 2001, Willems *et al.* 2008, Carvelli *et al.* 2008).

2.2 Comportement hors plan

Après avoir balayé les caractéristiques dans le plan du tissu, intéressons-nous maintenant à son comportement hors plan. Lui aussi est influencé par la mésostructure du tissu.

2.2.1 Compression : lors de la réalisation de pièces composites, le renfort est généralement comprimé. Cette compression a une influence sur la perméabilité du renfort et donc les conditions de son imprégnation. La plupart du temps, les essais de compression donnent lieu à une modélisation 1D du comportement du tissu (dans la direction hors plan) (Comas-Cardona *et al.* 2007, Kelly 2008). Or, l'effet de la compression du tissu est éminemment 3D. En effet, lorsque le tissu est comprimé, les fils se compriment, mais en raison de leur grande souplesse transverse (seule l'ensimage et l'entrelacement assurent la cohérence des fils), ils changent également de forme de manière non négligeable. Par conséquent, pour prendre en compte correctement l'effet de la compression du tissu, il est nécessaire de descendre à l'échelle directement inférieure, c'est-à-dire celle du fil (Saunders *et al.* 1998, Lin *et al.* 2008, Nguyen *et al.* 2012). Les courbes macroscopiques obtenues présentent une forte non linéarité comme le montre la figure (3)

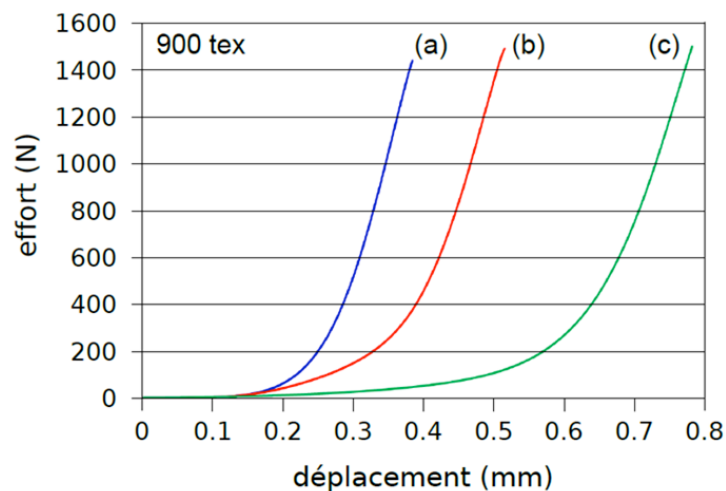


Figure 3. Allure des résultats de compression sur tissu 2D (Florimond 2013)

L'allure des courbes de compression est toujours constituée d'une zone de faible raideur (au début de l'essai) suivie d'une zone de très fort raidissement.

La première partie de la courbe correspond au mouvement de comblement des espaces libres entre fils et la seconde correspond à la compaction des fils. Par conséquent, plus le tissu est initialement peu dense, plus la courbe sera décalée vers la droite.

2.2.2 Flexion : la dernière particularité des tissus, lorsqu'on les compare aux matériaux continus classiques est leur très grande souplesse en flexion. En effet, encore une fois en raison des mouvements possibles entre filaments au sein des fils et entre fils au sein du tissu, il est beaucoup plus aisé de faire fléchir un tissu que tout autre matériau continu. Cette rigidité est d'ailleurs tellement plus faible que toutes les autres qu'elle est souvent négligée. Hamila *et al.* (2009) ont toutefois montré que sa prise en compte permettait de prévoir de façon plus réaliste la forme et le moment d'apparition des plissements.

Les principaux essais sont décrits dans la littérature (Kawabata 1980, Lahey et Heppler 2004, de Bilbao *et al.* 2010). Ce qui ressort de ces essais, c'est que si le comportement en flexion du tissu peut être assimilé en première approximation à un comportement « classique » mais avec des rigidités qui ne sont pas liées à la rigidité de tension ; lorsqu'on regarde ce qui se passe à l'échelle du fil il en va tout autrement. En effet, si on fait un parallèle avec la flexion d'une poutre, pour laquelle une part de la matière est comprimée pendant que l'autre est tendue, on constate que cette cinématique n'est pas possible pour un fil constitué de milliers de filaments très souples et capables de glisser les uns contre les autres. Il en résulte une cinématique très particulière qu'il n'est pas simple de prendre en compte Charmetant *et al.* (2012) évoquent la possibilité de devoir considérer le fil comme un milieu de second gradient.

2.3 Synthèse

Si on fait le bilan des particularités de comportement mécanique des tissus, on constate donc que le comportement macroscopique, c'est-à-dire à l'échelle du tissu, est fortement influencé par sa mésostructure, c'est-à-dire l'architecture du tissu (ou armure) ; sa densité (ou duitage) ; et bien sûr la nature des fibres. Il est donc parfois nécessaire d'identifier également le comportement d'un fil.

Quoi qu'il en soit, un tissu se caractérise par une grande souplesse en cisaillement dans le plan et en flexion ; un comportement non linéaire avec forte rigidification en tension et compression.

Ces considérations imposent donc l'écriture de lois de comportement capables de décrire ce comportement de manière satisfaisante.

3. MODELISATION DU COMPORTEMENT

Une fois le comportement identifié, qu'en faire ? Si l'objectif est de modéliser la mise en forme d'un renfort, c'est le tissu en lui-même qu'il faut modéliser. Mais on a vu que lorsqu'on s'intéresse à la perméabilité du renfort, une approche plus locale doit être privilégiée. Suivant les cas, on va donc s'intéresser au tissu ou au fil

3.1 Modélisation à l'échelle du tissu

Les outils de modélisations dont on peut disposer aisément sont, pour la plupart, issus de la mécanique des milieux continus, il est donc légitime de tenter d'utiliser ces outils. Malheureusement, on a vu que le comportement du tissu, en raison de sa discontinuité intrinsèque, diffère de celui d'un matériau continu. De plus, lors des opérations de mise en forme, le renfort (c'est pour cela qu'il a été choisi) est amené à subir de grandes déformations. Il est donc nécessaire de décrire le comportement mécanique du tissu dans le contexte des grandes transformations.

3.1.1 Approche continue : elle s'appuie sur l'approche classique et utilise les mêmes outils. Toute la difficulté réside dans le suivi des directions matérielles qui ne restent pas orthogonales entre elles lors de la déformation. De très nombreuses lois de comportement ont été proposées mais à ce jour aucune ne fait l'unanimité. On peut citer entre autre les lois proposées par Spencer (2000), Yu *et al.* (2002), Peng et Cao (2005), King *et al.* (2005), Boisse *et al.* (2005), Ten Thije *et al.* (2007), Badel *et al.* (2008), Khan *et al.* (2010). La principale difficulté de mise en œuvre réside dans sa mise en œuvre mathématique et ne peut pas capturer certains défauts comme la perte de cohérence du réseau puisqu'elle est basée sur l'hypothèse de continuité de la matière.

3.1.2 Approche discrète : elle considère que le tissu est un assemblage de fils qui sont modélisés indépendamment les uns des autres (Picket et al. 2005, Durville 2005, Sze et al. 2005, Duhovic et Bhattacharyya 2006, Ben Boubaker et al. 2007, Gatouillat et al. 2013). Une telle approche présente l'avantage de permettre la prise en compte des pertes de cohérence du réseau fibreux. Elle permet également de connaître les directions de fils directement. Le plus gros inconvénient est lié aux temps de calculs très longs (essentiellement en raison des très nombreux contacts à prendre en compte). Une telle approche nécessite donc soit de connaître le comportement des fils qui constituent le tissu ; soit de le simplifier en une raideur de tension dans le sens des fils et une raideur de cisaillement au niveau des interactions entre fils.

3.1.3 Approche semi-discrète : elle consiste à considérer le tissu comme un ensemble de cellules élémentaires liées entre elles par l'intermédiaire d'un champ continu de déplacements (Boisse et al. 2005, Hamila et Boisse 2007, 2008). L'intérêt est donc double : on peut utiliser le formalisme habituel des éléments finis tout en traduisant de façon simple et sans problème mathématique insoluble le comportement discret du matériau.

3.2 Modélisation à l'échelle du fil

On a vu plus haut que pour certaines applications, l'échelle du tissu n'est pas forcément la plus pertinente et qu'il est parfois nécessaire de descendre à l'échelle du fil. Le plus souvent, on va considérer le fil, pourtant constitué d'un assemblage de filaments, comme un matériau continu au comportement isotrope transverse.

Il faut ensuite choisir le type de loi de comportement le plus adéquat, et surtout le plus aisé à mettre en œuvre. Deux écoles coexistent : celle qui utilise une approche hypo-élastique et celle qui privilégie une approche hyper-élastique. Dans un cas comme dans l'autre, il faut prendre un certain nombre de précautions pour que la loi de comportement soit mathématiquement bien formulée et physiquement acceptable.

3.2.1 Modélisation hypo-élastique : une loi de comportement hypo-élastique permet de relier un incrément de contraintes au taux de déformations subi par le matériau.

$$\underline{\underline{\sigma}}^{\vee} = \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{D}} \quad (1)$$

Ce type de loi est couramment utilisé en plasticité et se prête bien à la modélisation de comportement fortement non linéaires en grandes transformations (Truesdell 1955, Xiao et al. 1997, Belytschko et al. 2000). Il y a toutefois un point sur lequel il est important de faire attention, c'est le choix de la dérivée objective du tenseur des contraintes qui sera choisi. Si les dérivées de Green-Naghdi et de Jaumann sont couramment utilisées dans les codes de calcul (Dienes 1979, Dafalias 1983), Badel et al. (2007) ont montré que dans le cas du matériau « fil » ces dérivées, qui sont des rotations moyennes de la matière ne sont pas adaptées au cas de matériaux pour lesquels une direction, celle des fibres, est plusieurs ordres de grandeur plus raides que toutes les autres.

Une fois prises les précautions ci-dessus, l'intégration temporelle du chargement se fait en utilisant classiquement la formule de Hughes et Winget (1980) :

$$[\underline{\sigma}^{n+1}]_{\mathbf{f}_i^{n+1}} = [\underline{\sigma}^n]_{\mathbf{f}_i^n} + [\underline{C}^{n+1/2}]_{\mathbf{f}_i^{n+1/2}} [\underline{\Delta \epsilon}]_{\mathbf{f}_i^{n+1/2}} \quad (2)$$

Où $[\underline{\Delta \epsilon}]_{\mathbf{f}_i^{n+1/2}} = [\underline{D}]_{\mathbf{f}_i^{n+1/2}} \Delta t$ et $[\underline{S}]_{\mathbf{f}_i^n}$ représente la matrice des composantes du tenseur $\underline{S}$ exprimée dans la base $\underline{\mathbf{f}}_i \otimes \underline{\mathbf{f}}_j \otimes \dots \otimes \underline{\mathbf{f}}_m$ au temps t^n .

Moyennant ces précautions, le tenseur de comportement 4^{ème} ordre est simple à exprimer et peut être identifié à l'aide des essais décrits dans le paragraphe précédent.

3.2.2 Modélisation hyper-élastique : elle présente le gros avantage de pouvoir être écrite en configuration lagrangienne et donc sans se préoccuper de ce que vont devenir les directions matérielles. La difficulté réside alors dans le choix d'un potentiel de déformation capable de décrire tous les modes de déformation et respectant toutes les théorèmes de représentation (Truesdell et Noll 1992). En particulier, le potentiel de déformation doit respecter le principe d'indifférence matérielle. Cette condition sera respectée si on prend soin d'écrire le potentiel en fonction des invariants de la transformation.

Dans le cas d'un matériau non isotrope, il faut que le potentiel respecte également les symétries du matériau. Dans le cas d'un matériau isotrope transverse comme l'est généralement considéré le fil, cela nécessite d'introduire un tenseur de structure $\underline{\underline{\mathbf{M}}}$ défini par :

$$\underline{\underline{\mathbf{M}}} = \underline{\underline{\mathbf{m}}} \otimes \underline{\underline{\mathbf{m}}} \quad (3)$$

Où $\underline{\underline{\mathbf{m}}}$ est le direction des fibres dans le fil.

On peut alors écrire un potentiel de déformation faisant intervenir 5 invariants définis dans l'équation (4) :

$$\begin{aligned} I_1 &= Tr(\underline{\underline{\mathbf{C}}}) \\ I_2 &= \frac{1}{2} \left(Tr(\underline{\underline{\mathbf{C}}})^2 - Tr(\underline{\underline{\mathbf{C}}}^2) \right) \\ I_3 &= Det(\underline{\underline{\mathbf{C}}}) \\ I_4 &= \underline{\underline{\mathbf{C}}} : \underline{\underline{\mathbf{M}}} \\ I_5 &= \underline{\underline{\mathbf{C}}}^2 : \underline{\underline{\mathbf{M}}} \end{aligned} \quad (4)$$

A l'aide de ces invariants, on peut trouver des invariants ayant un sens physique. Itskov et Aksel (2004) ont montré que pour que le potentiel soit admissible, il doit être polyconvexe et coercif. Si ces conditions sont respectées, alors la matrice de comportement tangent correspondante sera définie positive et la loi de comportement sera acceptable.

Tout l'enjeu est alors de trouver ce potentiel. Pour les renforts « secs », peu de modèles sont proposés (Bonet et Burton 1998, Charmetant 2011).

3.3 Synthèse

La modélisation des tissus ou des fils doit répondre à un grand nombre de conditions. En fonction des informations recherchées, une approche semblera mieux adaptée qu'une autre, mais il est certain que les outils de modélisation doivent être choisis en fonction des objectifs à atteindre.

Plus on voudra aller loin dans la précision, plus les modèles devront être complexes et plus ils seront difficiles à identifier.

4. CONCLUSION

Le comportement mécanique des renforts tissés est complexe car ceux-ci sont plus des structures que des matériaux à proprement parler. Le challenge est donc de trouver le meilleur compromis entre la précision et la simplicité d'utilisation des outils de simulation à notre disposition.

Le matériau n'est pas continu, mais c'est de cette façon qu'on souhaite le voir. Cela impose une plus grande imagination pour bâtir des lois continues traduisant la discontinuité.

La difficulté liée à l'identification restera cependant présente et il est important qu'un grand effort soit fait pour fiabiliser toutes les familles d'essais mécaniques sur renfort.

De plus, le développement important des matériaux composites à matrice thermoplastique laisse présager de nouveaux types de comportement où les conditions environnementales seront

importantes. Il faudra alors être capable de traduire non seulement les interactions entre fibres mais entre fibres et résine chaude.

Il faudra donc pouvoir modéliser des problèmes liant plusieurs physiques et plusieurs échelles, tout cela dans des temps et avec des complexités les plus faibles possibles.

REFERENCES

- Badel P., Vidal-Sallé E., Boisse P. “Computational determination of in-plane shear mechanical behaviour of textile composite reinforcements”, *Computational Materials Science* **40** (2007) pp. 439–448.
- Badel P., Vidal-Sallé E., Maire E., Boisse P., “Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale”, *Composites Science and Technology* **68** (2008) pp.2433–2440.
- Badel P.; Gauthier S., Vidal-Sallé E.; Boisse P. “Rate constitutive equations for computational analyses of textile composite reinforcement mechanical behaviour during forming”, *Composites: Part A* **40** (2009) pp. 997–1007.
- Belytschko T., Wing K.L., Moran B. “Nonlinear finite elements for continua and structures”, Chichester: *John Wiley Edr*; (2000).
- Ben Boukaber B., Haussy G., Ganghoffer J.F. “Discrete models of woven structures. Macroscopic approach”, *Composites: Part B* **38** (2007) pp. 498–505.
- Boisse P., Gasser A., Hagège B., Billoet J.L. “Analysis of the mechanical behavior of woven fibrous material using virtual tests at the unit cell level”, *Journal of materials science* **40** (2005) pp. 5955–5962.
- Boisse P., Zouari B., Daniel J.L. “Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite performing”, *Composites: Part A* **37** (2006) pp. 2201–2212.
- Bonet J., Burton A.J. “A simple orthotropic, transversely isotropic hyperelastic constitutive equation for large strain computations”, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* **162** (1998) pp. 151–164.
- Buet-Gautier K., Boisse P. “Experimental Analysis and Modeling of Biaxial Mechanical Behavior of Woven Composite Reinforcements”, *Experimental Mechanics* **41-3** (2001) pp. 260–269.
- Cao J., Akkerman R., Boisse P., Chen J., et al. “Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results”, *Composites: Part A* **39** (2008) pp. 1037–1053.
- Carvelli V., Corazza C., Poggi C. “Mechanical modelling of monofilament technical textiles”, *Computational Materials Science* **42** (2008) pp. 679–691.
- Charmetant A., Orliac J.-G., Vidal-Sallé E., Boisse P. “Hyperelastic model for large deformation analyses of 3D interlock composite preforms”, *Composites Science and Technology* **72** (2012) pp. 1352-1360.
- Charmetant A., Vidal-Sallé E., Boisse P. “Approche hyperélastique pour la simulation de renforts tissés de composites. Etude en grandes transformations à l’échelle mésoscopique”, *Revue des composites et matériaux avancés* **21** (2011) pp. 9-22.
- Comas-Cardona S., Le Grogne P., Binetruy C., Krawczak P. “Unidirectional compression of fibre reinforcements. Part 1: A non-linear elastic-plastic behaviour”, *Composites Science and Technology* **67** (2007) pp. 507–514.
- Dafalias Y.F. “Corotational rates for kinematic hardening at large plastic deformations”, *Trans ASME, J Appl Mech* **50** (1983) pp. 561–565.
- de Bilbao E., Soulat G., Launay D., Hivet J., Gasser A. “Experimental study of bending behaviour of reinforcements”, *Experimental Mechanics* **50** (2010) pp. 333–351.
- Dienes J.K. “On the analysis of rotation and stress rate in deforming bodies”, *Acta Mech* **32** (1979) pp. 217–232.
- Duhovic M., Bhattacharyya D. “Simulating the deformation mechanisms of knitted fabric composites”, *Composites: Part A* **37(11)** (2006) pp. 1897–1915.
- Dumont F., Hivet G., Rotinat R., Launay J., Boisse P., Vacher P. “Mesures de champs pour des essais de cisaillement sur renforts tissés”, *Mécanique et Industries* **4** (2003) pp. 627–635.
- Durville D. “Numerical simulation of entangled materials mechanical properties”, *Journal of Materials Science* **40** (2005) pp. 5941 – 5948.
- Florimond C. “Contributions à la modélisation mécanique du comportement de mèches de renforts tissés à l’aide d’un schéma éléments finis implicite” *Thèse de l’INSA de Lyon* (2013) 149 p.

- Gatouillat S., Bareggi A., Vidal-Sallé E., Boisse P. "Meso modelling for composite preform shaping - Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network", *Composites: Part A* **54** (2013) pp. 135-144.
- Hamila N., Boisse P. "A Meso-Macro Three Node Finite Element for Draping of Textile Composite Preforms", *Appl Compos Mater* **14** (2007) pp. 235-250.
- Hamila N., Boisse P. "Simulations of textile composite reinforcement draping using a new semi-discrete three node finite element", *Composites: Part B* **39** (2008) pp. 999-1010.
- Hamila N., Boisse P., Sabourin F., Brunet B. "A semi-discrete shell finite element for textile composite reinforcement forming simulation", *Int. J. Numer. Meth. Engng* **79** (2009) pp. 1443-1466.
- Hughes T.J.R., Winget J. "Finite rotation effects in numerical integration of rate constitutive equations arising in large deformation analysis", *Int. J. Num. Meth. Eng.* **15** (1980) pp. 1862-1867.
- Itskov, M. and Aksel, N. "A Class of Orthotropic and Transversely Isotropic Hyperelastic Constitutive Models Based on a Polyconvex Strain Energy Function", *International Journal of Solids and Structures* **41** (2004) pp. 3833-3848.
- Kawabata S. "The standardization and analysis of hand evaluation", Osaka, Japan: *The Textile Machinery Society of Japan* (1980)
- Kawabata S., Niwa M., Kawai H. "The finite deformation theory of plain weave fabrics", *J Textile Inst* **64** (1973) pp. 21-85.
- Kelly P.A. "A compaction model for liquid composite moulding fibrous materials", *Proceedings of FPCM-9 - Montréal (Québec), Canada -* (2008)
- Khan M. A., Mabrouki T., Vidal-Sallé E., Boisse P. "Numerical and Experimental Analyses of Woven Composite Reinforcement Forming using a Hypoelastic Behaviour. Application to the Double Dome Benchmark", *Journal of Materials Processing Technology* **210** (2010) pp. 378-388.
- King M.J., Jearanaisilawong P., Socrate S. "A continuum constitutive model for the mechanical behavior of woven fabrics", *International Journal of Solids and Structures* **42** (2005) pp. 3867-3896.
- Lahey T.J., Heppler G.R. "Mechanical modeling of fabrics in bending", *Trans ASME* **71** (2004) pp. 32-40.
- Launay J., Hivet G., Duong A.V., Boisse P. "Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements", *Composites Science and Technology* **68** (2008) pp. 506-515.
- Lin H., Long A.C., Sherburn M., Clifford M.J. "Modelling of mechanical behaviour for woven fabrics under combined loading", *Int J Mater Forming* **1-Suppl 1** (2008) pp. 899-902.
- Lomov S.V., Boisse P., de Luycker E., Morestin F., et al. "Full-field strain measurements in textile deformability studies", *Composites: Part A*, **39-8** (2008) pp. 1232-1244.
- Nguyen Q. T., Vidal-Sallé E., Boisse P., Park C.H., et al. "Mesoscopic scale analyses of textile composite reinforcement compaction" *Composites: Part B* **44** (2012) pp. 231-241.
- Peng X., Cao J. "A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics", *Composites: Part A* **36** (2005) pp. 859-874.
- Pickett A.K., Creech G., de Luca P. "Simplified and Advanced Simulation Methods for Prediction of Fabric Draping", *European Journal of Computational Mechanics* **14** (2005) pp. 677-691.
- Prodromou A. G., Chen J. "On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms", *Composites: Part A* **28A** (1997) pp. 491-503.
- Saunders R. A., Lekakou C., Bader M. G. "Compression and microstructure of fibre plain woven cloths in the processing of polymer composites", *Composites: Part A* **29** (1998) pp. 443-454.
- Spencer A.J.M. "Theory of fabric-reinforced viscous fluids", *Composites: Part A* **31** (2000) pp. 1311-1321.
- Sze K.Y., Liu X.H. "Fabric drape simulation by solid-shell finite element method", *Finite Elements in Analysis and Design* **43** (2007) pp. 819 - 838.
- ten Thije R.H.W., Akkerman R., Huétink J. "Large deformation simulation of anisotropic material using an updated Lagrangian finite element method", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* **196** (2007) pp. 3141-3150.
- Truesdell C. "Hypo-elasticity", *J Ration Mech Anal* **4** (1955) pp. 83-133.
- Truesdell, C. and Noll, W. "The Nonlinear Field Theories of Mechanics", *Springer-Verlag*, Berlin. (1992).
- Willems A., Lomov S.V., Verpoest I., Vandepitte D. "Optical strain fields in shear and tensile testing of textile reinforcements", *Composites Science and Technology* **68** (2008) pp. 807-819.

- Xiao H., Bruhns O.T., Meyers A. "Hypo-Elasticity Model Based upon the Logarithmic Stress Rate", *Journal of Elasticity* **47** (1997) pp. 51–68.
- Yu W.R., Pourboghata F., Chungb K., Zampalonia M., Kang T. J. "Non-orthogonal constitutive equation for woven fabric reinforced thermoplastic composites", *Composites: Part A* **33** (2002) pp. 1095–1105
- Zhu B., Yu T.X., Tao X.M. "Large deformation and slippage mechanism of plain woven composite in bias extension", *Composites: Part A* **38** (2007) pp. 1821–1828.