



HAL
open science

Simulation et analyse par tomographie X de la déformation à l'échelle mésoscopique de renforts textiles de composites en cours de mise en forme = Simulation and tomography analyses of textile composite reinforcement deformation during forming

Emmanuelle Vidal-Salle, Pierre Badel, Eric Maire, Sébastien Gatouillat,
Philippe Boisse

► **To cite this version:**

Emmanuelle Vidal-Salle, Pierre Badel, Eric Maire, Sébastien Gatouillat, Philippe Boisse. Simulation et analyse par tomographie X de la déformation à l'échelle mésoscopique de renforts textiles de composites en cours de mise en forme = Simulation and tomography analyses of textile composite reinforcement deformation during forming. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 8 p. hal-00391074

HAL Id: hal-00391074

<https://hal.science/hal-00391074v1>

Submitted on 11 Jun 2009

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.

Simulation et analyse par tomographie X de la déformation à l'échelle mésoscopique de renforts textiles de composites en cours de mise en forme

Simulation and tomography analyses of textile composite reinforcement deformation during forming

E. Vidal-Sallé¹, P. Badel¹, E. Maire², S. Gatouillat¹ et P. Boisse¹

1 : Université de Lyon, CNRS INSA-Lyon, LaMCoS UMR5259

2 : Université de Lyon, CNRS INSA-Lyon, Mateis UMR5510

20, avenue Albert Einstein – F. 69621 Villeurbanne Cedex

e-mail : philippe.boisse@insa-lyon.fr

Résumé

La mise en forme de renforts tissés de composites par le procédé RTM conduit à des déformations importantes, en particulier pour les géométries à double courbure. La connaissance du comportement mécanique des renforts et de leurs géométries déformées à l'échelle mésoscopique est nécessaire dans plusieurs applications, en particulier lors de la détermination de la perméabilité du renfort. Une analyse mécanique à l'échelle mésoscopique des déformations de renforts tissés est proposée. Elle inclut un modèle continu de comportement hypo-élastique, isotrope transverse, prenant en compte les spécificités du comportement d'une mèche. La dérivée objective associée est basée sur la rotation de la direction des fibres. Dans le plan transverse aux fibres, les contributions sphériques et déviatoriques sont découplées. La tomographie aux rayons X est utilisée pour obtenir les géométries expérimentales non déformées et déformées des renforts tissés. Les simulations réalisées sur un volume élémentaire représentatif sont validées à la fois à partir d'essais mécaniques et de ces images de tomographie.

Abstract

During the pre-forming stage of the RTM processes, large deformations can occur, especially for double curved shapes. Knowing the mechanical behaviour and the actual geometry of fibrous reinforcements at the mesoscopic scale is of great importance for several applications like permeability evaluations. A mechanical analysis of the reinforcement at meso-scale is proposed. It includes a specific hypo-elastic continuous transversely isotropic model. The associated objective derivative is based on the material rotation. The transverse isotropy assumption allows a spherical-deviatoric decomposition. X-ray tomography is used to obtain the experimental undeformed and deformed geometries of the fabric. Finite element simulations are realised on a representative unit cell and are compared to both mechanical testing results and x-ray imaging.

Mots Clés : Renforts tissés, Mise en forme, Analyse mésoscopique, Hypo-élasticité, Tomographie

Keywords : Composite Forming, Finite Element, X-Ray tomography, Meso-scale analysis

1. Introduction

L'injection sur renfort est généralement constituée de plusieurs étapes. Dans un premier temps, un renfort sec est mis en forme, ensuite, la résine est injectée sur cette pré-forme et enfin, l'ensemble est cuit pour obtenir la pièce finie. Pendant la première phase, c'est-à-dire le formage du renfort sec, celui-ci peut subir des déformations très importantes, en particulier lorsqu'il s'agit de réaliser des pièces de géométrie complexe (à double courbure). Dans ce cas, les distorsions angulaires dans le plan du tissu peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 40 à 50°. Ces distorsions ont une influence notable sur les propriétés finales du composant mais également sur la perméabilité du renfort.

Il s'agit ici de présenter des simulations de la déformation du renfort tissé à l'échelle de la cellule élémentaire représentative (CER) c'est-à-dire à l'échelle d'une maille élémentaire. Ces simulations permettent de déterminer les caractéristiques macroscopiques du tissu sec (sans résine) dans le domaine des grandes déformations. Par caractéristiques macroscopiques on entend les caractéristiques mécaniques qui constituent les données d'entrée des simulations de mise en forme du renfort sec. Mais les simulations à l'échelle mésoscopique permettent d'aller plus loin dans la mesure où elles rendent possible la connaissance de la géométrie du réseau chaîne-trame déformé. Elles permettent donc de donner aux

calculs de perméabilité le squelette solide à partir duquel des calculs d'écoulement de type Stokes (ou Stokes-Brinkman) peuvent être réalisés.

Si les lois de comportement continues peuvent être assez naturellement validées (ou invalidées) par des essais mécaniques plus ou moins faciles à mettre en œuvre, accéder à la géométrie locale du renfort peut s'avérer problématique. La tomographie aux rayons X s'avère être un moyen efficace et prometteur puisqu'elle permet d'accéder à cette géométrie de manière non destructive et, qui plus est, in-situ, c'est-à-dire sous chargement statique. Cette technique peut être utilisée à différentes échelles en fonction de la résolution des images obtenues, elle permet alors d'avoir accès à divers types d'informations qui permettent de valider les modèles de comportement à l'échelle de la mèche.

Dans le cadre des travaux présentés ici, les mèches sont vues comme un matériau continu qui prend en compte les spécificités des matériaux fibreux. En effet, les fibres constituant une mèche peuvent bouger les unes par rapport aux autres, ce qui génère une grande flexibilité en flexion. Le modèle proposé ici est hypo-élastique et utilise une dérivée objectivée basée sur la rotation matérielle de la mèche. Le comportement de la mèche est supposé isotrope transverse. Ce comportement transverse est de première importance dans la mesure où les écrasements de mèches ont un impact significatif sur tous les modes de déformation de la cellule élémentaire.

2. Tomographie aux rayons X

Comme indiqué dans l'introduction, les géométries locales, aussi bien initiales que déformées ont été obtenues par tomographie X. Cette technique non invasive permet d'avoir accès aux géométries à l'intérieur des échantillons, ce qui constitue incontestablement un grand avantage.

2.1. Description rapide du matériel utilisé

Le principe du micro tomographe utilisé est le même que celui d'un scanner médical, à ceci près que dans un scanner médical, le patient est immobile et la source de rayons X se déplace autour de lui alors que dans le cas du tomographe de laboratoire, la source est fixe et c'est l'échantillon qui tourne par rapport à la source. L'algorithme de reconstruction utilisé permet de donner une image tridimensionnelle [1]. Les fibres constituant les renforts absorbant plus les rayons X que l'air, un filtrage simple permet de visualiser efficacement les fibres sur les images obtenues.

Le tomographe de laboratoire utilisé dans le cadre de cette étude est un modèle du commerce [2]. Il contient un tube à émission de rayons X avec une cible de tungstène. La taille du focus, et donc la résolution, est ajustable de 1 à 5 μm . Le détecteur utilisé est constitué de 1900 x 1900 éléments sensibles de taille 127 x 127 μm . Pour les scans réalisés dans cette étude, le faisceau est réglé à des valeurs proches de 90 keV et 170 μA sans filtre additionnel. La source de rayons X étant conique, il est facile d'obtenir une large gamme de résolutions en plaçant l'échantillon à différentes distances entre la source et le détecteur. Ainsi des résolutions de 1,5 μm à 80 μm sont possibles.

2.2. Observations à haute résolution

Les images à haute résolution donnent des informations très intéressantes sur la position des fibres : leur position relative et leurs densités locales. Les différents items de la (Fig. 1) permettent de mettre en évidence qu'une densification des mèches apparaît aussi bien en tension biaxiale qu'en cisaillement. Sur les trois images, une estimation qualitative de la distribution des fibres permet de conclure à une répartition aléatoire. Une analyse quantitative de la morphologie des images permet une estimation plus précise [3]. La covariance $C(x)$, c'est-à-dire la probabilité que deux points à la distance x l'un de l'autre appartiennent à la même phase (c'est-à-dire l'air ou la fibre) est calculée dans deux directions perpendiculaires (suivant la largeur et suivant l'épaisseur de la mèche). Le graphe obtenu, appelé covariogramme, permet de quantifier la distribution des fibres dans la mèche.

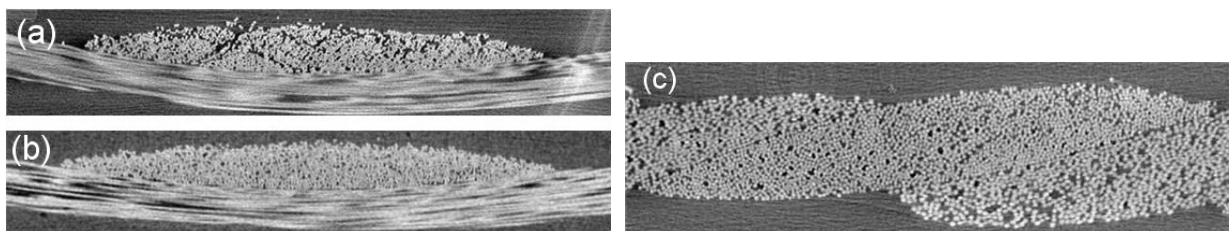


Fig. 1. Taffetas de verre (a) non déformé (résolution 3 μm) (b) en tension biaxiale (résolution 5 μm) et (c) cisailée à 46° (résolution 2.85 μm)

Si les covariogrammes des deux directions sont similaires, on peut considérer que l'échantillon est isotrope en terme de distribution des fibres. C'est exactement ce qui peut être observé (Fig. 2) où les points correspondent à des moyennes sur 20 mesures sur 4 mèches différentes, les carrés sur lesquels sont effectuées les mesures contenant tous en moyenne 70 fibres.

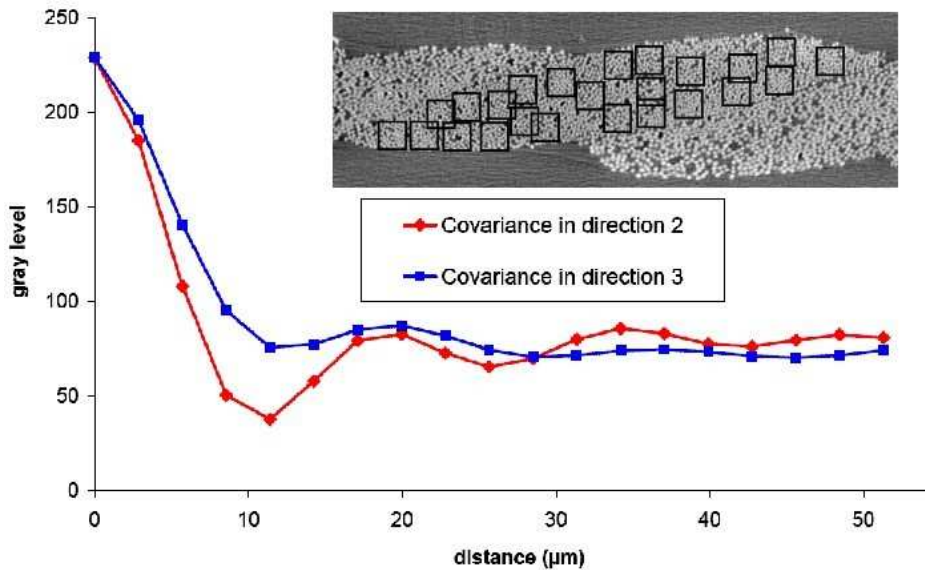


Fig. 2. Covariance moyenne dans les directions horizontale et verticale sur les 20 zones d'observation (carrés noirs)

Ces deux courbes montrent que le premier minimum (correspondant à la dimension moyenne des fibres) et le premier maximum (la distance moyenne entre deux fibres) sont obtenus pour les mêmes distances dans les deux directions. Cette observation permet de justifier l'hypothèse d'isotropie transverse évoquée plus haut.

2.3. Evolution de la géométrie sous chargement

En faisant des observations à une échelle moins fine, plusieurs mèches peuvent être observées en même temps, et on peut avoir une idée assez précise des géométries à l'échelle mésoscopique. Trois types de renforts ont été observés (Fig. 3). Le premier est un interlock fin (le G1151[®] d'Hexcel), le second, un sergé 2x2 de carbone et enfin un taffetas de verre, le même que celui observé à haute résolution.

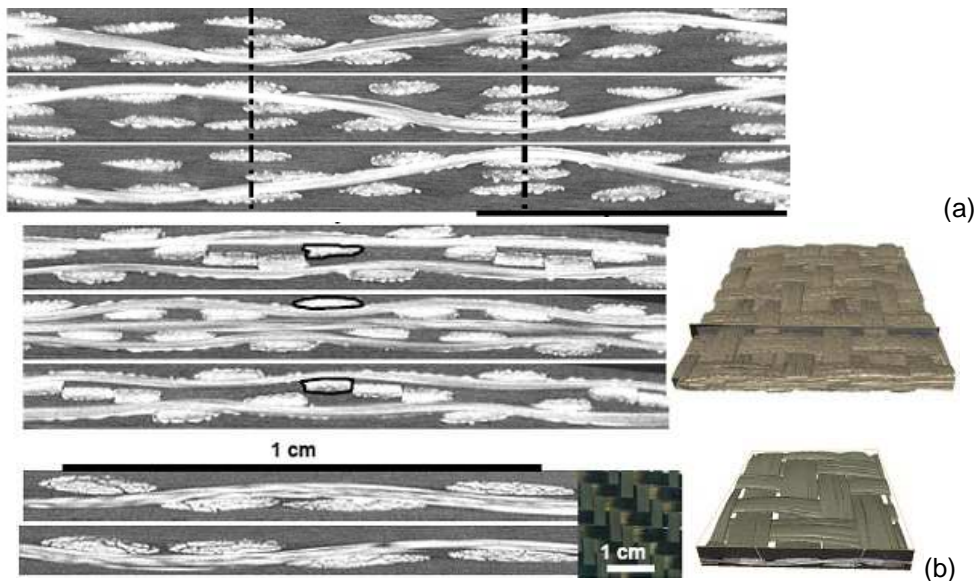


Fig. 3. G1151[®] (a) et sergé 2x2 de carbone (b) Reconstructions 3D et différentes coupes

Les images du G11R1[®] non déformé mettent bien en évidence la complexité du tissage et la grande variabilité des sections de mèches. On peut ainsi constater que même pour la géométrie non déformée, les mèches de trame initialement superposées ne restent pas forcément dans le même plan. On constate

également que la variabilité des sections de mèches ne se retrouve pas uniquement entre mèches voisines mais également le long d'une même mèche. Ces sections peuvent aussi bien être elliptiques que très élancées ou même rectangulaires.

3. Comportement mécanique

3.1. Loi de comportement

La loi de comportement utilisée dans le cadre de ce travail est basée sur un modèle hypo-élastique [4]. En s'appuyant sur les observations tomographiques à haute résolution exposées plus haut, le comportement mécanique est supposé isotrope transverse. Il faut donc identifier d'une part le comportement longitudinal de la mèche, et d'autre part son comportement transverse en prenant soin de choisir un repère de travail cohérent. Ce repère est choisi de telle façon que la direction $\underline{\mathbf{f}}_1$ corresponde à la direction longitudinale de la mèche.

Une loi hypo-élastique (ou loi en taux) peut se mettre sous la forme :

$$\underline{\underline{\underline{\underline{\sigma}}}}^{\nabla} = \underline{\underline{\underline{\underline{\mathbf{C}}}}} : \underline{\underline{\underline{\underline{\mathbf{D}}}}} \quad (\text{eq. 1})$$

où $\underline{\underline{\underline{\underline{\sigma}}}}^{\nabla}$, $\underline{\underline{\underline{\underline{\mathbf{D}}}}}$ et $\underline{\underline{\underline{\underline{\mathbf{C}}}}}$ sont respectivement la dérive objective du tenseur des contraintes de Cauchy, le tenseur des taux de déformation et le tenseur de comportement élastique tangent. Cette équation est intégrée pendant l'incrément de temps $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ grâce à la formule de Hughes et Winget [5] classiquement utilisée dans les codes d'éléments finis.

$$\left[\underline{\underline{\underline{\underline{\sigma}}}}^{n+1} \right]_{\mathbf{e}_i^{n+1}} = \left[\underline{\underline{\underline{\underline{\sigma}}}}^n \right]_{\mathbf{e}_i^n} + \left[\underline{\underline{\underline{\underline{\mathbf{C}}}}}^{n+1/2} \right]_{\mathbf{e}_i^{n+1/2}} \left[\underline{\underline{\underline{\underline{\Delta \varepsilon}}}} \right]_{\mathbf{e}_i^{n+1/2}} \quad (\text{eq. 2})$$

avec $\left[\underline{\underline{\underline{\underline{\Delta \varepsilon}}}} \right]_{\mathbf{e}_i^{n+1/2}} = \left[\underline{\underline{\underline{\underline{\mathbf{D}}}}} \right]_{\mathbf{e}_i^{n+1/2}} \Delta t$ l'incrément de déformation à mi-pas défini à partir du taux de déformation.

Dans l'équation 2, $\left[\underline{\underline{\underline{\underline{\mathbf{S}}}}} \right]_{\mathbf{e}_i^n}$ représente la matrice des composantes du tenseur $\underline{\underline{\underline{\underline{\mathbf{S}}}}}$ exprimée dans la base $\mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j \otimes \dots \otimes \mathbf{e}_m$ au temps t^n .

$\{\mathbf{e}_i\} = \{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$ est un repère orthogonal qui tourne avec la matière. La rotation correspondante est également celle qui est utilisée pour définir la dérivée objective du tenseur des contraintes de Cauchy.

3.2. Choix de la dérive objective

La très forte valeur de la rigidité de tension de la direction de la mèche devant toutes les autres rigidités, rend le suivi de cette direction matérielle particulièrement importante. Sans cela, le cumul des incréments de contraintes risqué d'être entaché d'erreurs conséquentes à chaque pas de calcul. Par conséquent, le repère tournant, noté $\{\underline{\mathbf{f}}_i\}$ doit être attaché à la direction des fibres, notée $\underline{\mathbf{f}}_1$. Autrement dit, il faut utiliser une dérivée objective basée sur la rotation des fibres [6]. L'intérêt de ce choix réside également dans le fait que le tenseur de comportement élastique (eq. 2) est ainsi exprimé dans ce repère à chaque instant. C'est particulièrement intéressant dans la mesure où son allure et ses composantes sont déterminées expérimentalement dans ce repère. Il est alors naturel de dissocier le comportement longitudinal du comportement transverse. Le comportement longitudinal est piloté par la rigidité de tension dans la direction des fibres $\underline{\mathbf{f}}_1$ alors que le comportement transverse ne conduira qu'à des composantes dans le plan $(\underline{\mathbf{f}}_2, \underline{\mathbf{f}}_3)$.

3.3. Comportement transverse

Le changement de forme de la section transverse des mèches est un des points importants dans l'analyse mésoscopique. Comme cela a été constaté sur les images de tomographie, les mèches tendent à s'écraser dans le plan transverse pour la plus part des chargements. Ces effets locaux jouent un rôle majeur dans le comportement mécanique du renfort. Dans le présent travail les parties « sphérique » et déviatorique du phénomène sont découpées. Cette séparation est guidée par les résultats de tomographie où deux

modes de déformation de la section transverse sont clairement identifiés : compaction du réseau de fibres (par exemple en traction biaxiale Fig. 1b) et changement de forme (en cisaillement pur, Fig. 1c). Ces deux modes correspondent aux transformations sphérique et déviatorique de la section transverse : la partie sphérique est liée au changement de densité du paquet de fibres et la partie déviatorique à son changement de forme. Il sera supposé que ces deux modes de déformation sont découplés.

Les parties longitudinale et transverse du tenseur des contraintes sont séparées :

$$[\boldsymbol{\varepsilon}]_{f_i} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \text{sym.} & & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{\varepsilon}_L]_{f_i} + [\boldsymbol{\varepsilon}_T]_{f_i} \quad (\text{eq.3})$$

où $\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}$, correspond au cumul de $\underline{\mathbf{D}}\Delta t$ dans le repère tournant. Les développements suivants ne concernent que le plan $(\underline{\mathbf{f}}_2, \underline{\mathbf{f}}_3)$ et l'on considère la restriction de $[\boldsymbol{\varepsilon}_T]_{f_i}$ à $(\underline{\mathbf{f}}_2, \underline{\mathbf{f}}_3)$:

$$[\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_T]_{f_i} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \text{sym.} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad [\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_T]_{f_i} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \text{sym.} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_s & 0 \\ 0 & \varepsilon_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_d & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{23} & \varepsilon_d \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 4})$$

où $\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{2}$ est la composante sphérique et $\varepsilon_d = \frac{\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33}}{2}$, ε_{23} sont les composantes déviatoriques.

Ce formalisme où les parties sphérique et déviatoriques sont découplées est très utilisé dans les modèles de plasticité. Il a aussi été proposé pour un modèle micromécanique de mèche [7].

Le comportement est supposé être élastique non-linéaire et la même séparation existe pour les contraintes. Les relations suivantes sont considérées :

$$\Delta\sigma_s = A\Delta\varepsilon_s \quad \Delta\sigma_d = B\Delta\varepsilon_d \quad \Delta\sigma_{23} = B\Delta\varepsilon_{23} \quad (\text{eq. 5})$$

où $\Delta\sigma_s$, $\Delta\sigma_d$, $\Delta\varepsilon_s$ and $\Delta\varepsilon_d$ sont respectivement les parties sphérique et déviatoriques des incréments de contrainte et de déformation. A et B sont des caractéristiques élastiques. Utilisant une notation de Voigt :

$$[\tilde{\mathbf{C}}_T]_{f_i} = \begin{bmatrix} (A+B)/2 & (A-B)/2 & 0 \\ (A-B)/2 & (A+B)/2 & 0 \\ 0 & 0 & B \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 6})$$

La forme des coefficients A et B (qui ne sont pas des constants) doit être précisée. Sous l'effet de la compression transverse, le matériau fibreux devient plus rigide dans les deux modes sphérique et déviatorique compte tenu de la densification du réseau de fibres. Sous l'effet de la tension longitudinale, le comportement sphérique (compaction des fibres) devient plus rigide. A partir de ces remarques les coefficients A et B sont supposés être de la forme suivante :

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-p\varepsilon_s} e^{n\varepsilon_{11}} \\ B &= B_0 e^{-p\varepsilon_s} \end{aligned} \quad (\text{eq. 7})$$

Le comportement transverse est donc déterminé par 4 coefficients.

3.4. Modèles géométrique et conditions aux limites

La géométrie du modèle éléments finis doit être définie. Celle-ci doit assurer la non-pénétration des mèches [8]. Le modèle concerne une cellule élémentaire du renfort qui est (en général) périodique. Cette cellule n'est pas unique. On cherche à utiliser une cellule dont les bords sont matériels de telle sorte que des conditions aux limites en déplacements puissent leur être appliquées (Fig. 4).

La périodicité du matériau tissé doit également être assurée. Ceci est obtenu en utilisant des conditions aux limites appropriées [9].

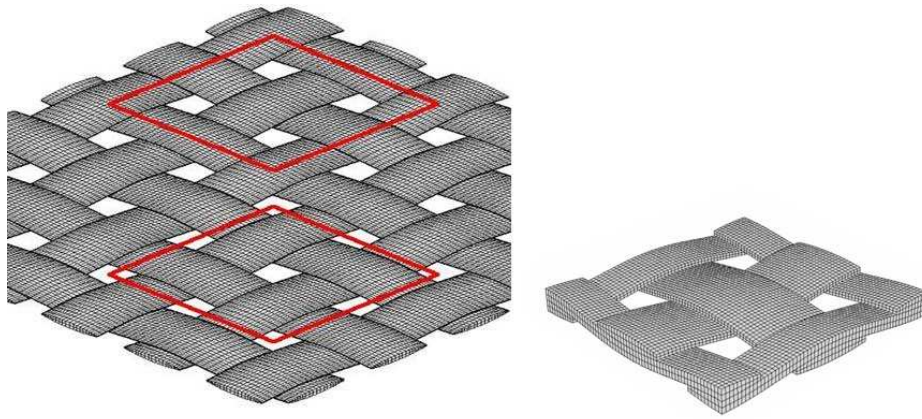


Fig. 4. Cellule élémentaire représentative pour un renfort de type taffetas en cisaillement plan.

4. Simulations et analyses par tomographie

Le modèle de comportement mécanique présenté ci-dessus est introduit dans un sous-programme VUMAT du code Abaqus/Explicit. Différents tests permettent de déterminer les paramètres matériaux. Le module d'Young E_1 est obtenu par tension sur une mèche. La détermination des quatre paramètres de comportement transverse A_0 , B_0 , n , p est obtenue par méthode inverse [10] à partir d'une tension biaxiale du tissu qui comprime très fortement les mèches dans le plan transverse.

Module d'Young longitudinal E_1 (MPa)	52 500
Paramètre transverse A_0 (MPa)	1.86 E-3
Paramètre transverse B_0 (MPa)	6.25 E-3
Paramètre transverse n	4060
Paramètre transverse p	39.9
Module de cisaillement transverse G_1 (MPa)	20

Table 1. Paramètres matériaux pour un taffetas de verre

4.1. Comparaison des sections transverses

La fig. 5 montre les sections transverses obtenues par tomographie pour l'état initial et après une traction equi-biaxiale correspondant à un effort de 11 N sur chaque mèche. Ces sections sont comparées à celles obtenues par la simulation (frontière en trait noir). La comparaison est satisfaisante. L'écrasement transverse de la mèche est de 12.5% pour la simulation et de 13.3% pour la tomographie.

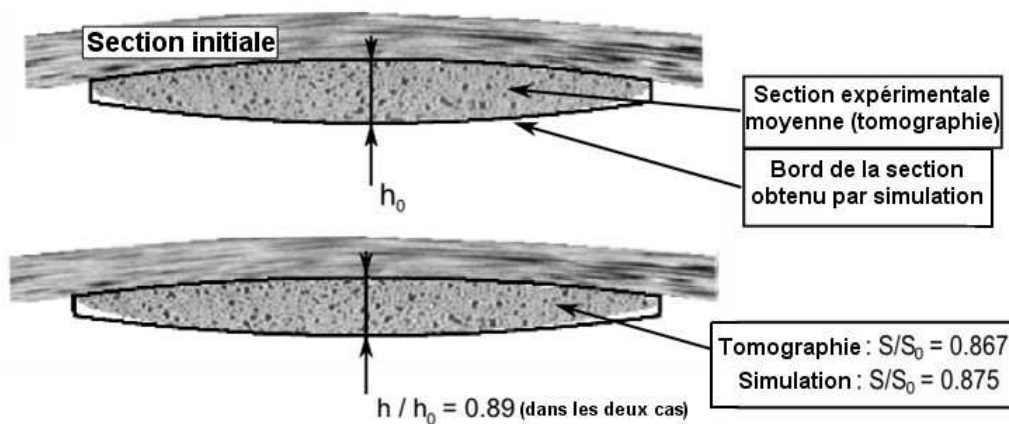


Fig. 5. Comparaison entre les sections transverses obtenues par simulation et tomographie pour une traction equi-biaxiale.

Les analyses tomographiques du matériau cisailé sont réalisées à l'échelle de 2.85 microns et pour un angle de cisaillement de 46° . La Figure 6 montre la comparaison entre les images de tomographie pour plusieurs coupes réalisées le long d'une même mèche. La section transverse est compactée de façon notable. Les sections intermédiaires subissent une rotation. Ces aspects sont correctement obtenus par la simulation.

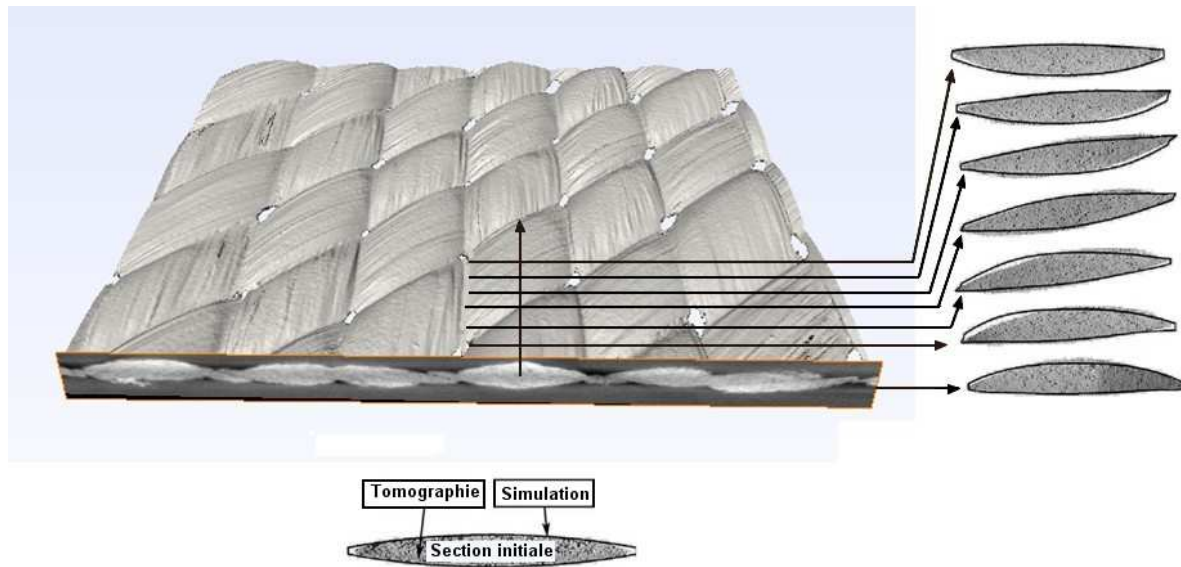


Fig. 6. Comparaison entre la simulation et la tomographie pour différentes coupes le long de la mèche dans le cas d'un angle de cisaillement de 46° .

5. Conclusion

L'intérêt de ces analyses à l'échelle mésoscopique réside tout d'abord dans leur utilisation comme tests virtuels des propriétés mécaniques du matériau. Ceci est particulièrement nécessaire lorsque le renfort est dans sa phase de conception. Un deuxième aspect réside dans la possibilité de déterminer les perméabilités du renfort déformé en simulant un flux de résine dans le renfort. Les perméabilités sont très sensibles à la déformation du renfort et les mesures expérimentales très délicates. Les simulations d'écoulements de résine dans des mailles déformées obtenues à partir des calculs mésoscopiques présentés ci-dessus permettent de déterminer ces perméabilités pour différentes déformations du renfort [11].

Il a été montré que les simulations de déformations à l'échelle mésoscopique sont en bon accord avec les analyses par tomographie X. Comme évoqué dans le paragraphe 2.3, d'autres analyses sont actuellement en cours sur des renforts de géométries plus complexes tels que des sergés, satins ou des interlocks.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien du cluster MACODEV (région Rhône-Alpes)

Références

- [1] J. Baruchel, J.Y. Buffière, E. Maire, P. Merle, G. Peix. X ray tomography in material science. Paris: Hermès (eds), 2000
- [2] http://www.phoenix-xray.com/en/applications/3d_computed_tomography/
- [3] Delarue A, Jeulin D. 3D morphological analysis of composite materials with aggregates of spherical inclusions. Image Anal. Stereol. 2003; 22: 153-161.
- [4] Truesdell C. Hypo-elasticity. J. Rat. Mech. Anal. 1955; 4: 83-133.

- [5] Hughes TJR, Winget J. Finite rotation effects in numerical integration of rate constitutive equations arising in large deformation analysis. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 1980; 15: 1862-1867.
- [6] Boisse P, Gasser A, Hagege B, Billoet JL. Analysis of the mechanical behavior of woven fibrous material using virtual tests at the unit cell level. *J. Mater. Sci.* 2005; 40 5955–5962.
- [7] Simacek P, Karbhari VM. Notes on the modeling of preform compaction: I-micromechanics at the fiber bundle level, *J. Reinf. Plast. Compos.* 1996; 15: 86-122
- [8] Hivet G, Boisse P. Consistent 3D geometrical model of fabric elementary cell. Application to a meshing preprocessor for 3D finite element analysis. *Finite Elem. Anal. Des.* 2005; 42: 25–49.
- [9] 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, 2433–2440
- [10] Schnur DS, Zabaras N. An inverse method for determining elastic material properties and a material interface, *Int. J. Numer. Meth. Engrg.* 1992; 33: 2039-2057
- [11] 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* 68, 2008, 1624–1630