

Modélisation et simulation par élément finis du comportement transverse de mèches de fibres de carbone

H.Moustacas^{1,2}, D.Durville¹, Y.Wielhorski²

¹ MssMA, Ecole Centrale Supélec, {helene.moustacas,damien.durville,}@centralesupelec.fr

² YQMX Snecma Villaroche, Safran Aircraft Engines, yanneck.wielhorski@safrangroup.com

Résumé — Une approche de simulation par éléments finis du comportement sous compression transverse de mèches de fibres de carbone est présentée afin de caractériser les propriétés mécaniques non-linéaires de ces mèches, et d'introduire les caractéristiques de ce comportement dans des modèles de tissés tridimensionnels interlock, utilisés comme préformes textiles pour la réalisation de pièces composites. La simulation de ces chargements de compression transverse sur des mèches de fibres est réalisée à l'aide d'un logiciel dédié à la modélisation de milieux fibreux enchevêtrés, cherchant à prendre en compte les interactions de contact-frottement au sein d'ensembles de fibres. Les résultats obtenus par simulation sont comparés à des mesures expérimentales. L'influence de l'introduction d'un désordre aléatoire dans la configuration initiale sur les résultats obtenus permet de mettre en évidence l'importance d'une reproduction fidèle des aspects aléatoires de l'arrangement initial considéré.

Mots clés — comportement de milieux fibreux, mécanique non linéaire, contact-frottement, compression transverse.

1 Introduction

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans l'industrie, tout particulièrement les composites à matrice organique et à fibre de carbone. Safran Aircraft Engines a prouvé la compétitivité de ces nouveaux matériaux en développant des aubes en composite (résine epoxy, renfort interlock 3D). La compréhension du comportement complexe de telle structures comme les préformes en interlock 3D, caractérisées par diverses non-linéarités (géométrique, matériel, ...) passe par l'analyse aux différentes échelles (macroscopique, mésoscopique, microscopique). Pour cela, la compréhension du comportement transverse du constituant des tissés est nécessaire, soit des mèches composées plusieurs dizaines de milliers de fibres de carbone. On cherche à simuler le comportement de ces mèches en adaptant et en utilisant le logiciel de simulation par éléments finis dédiés aux milieux enchevêtrés MULTIFIL, qui s'attache à modéliser les interactions contact-frottement au sein d'ensembles de fibre [1].

Le comportement en compression transverse de mèches de filaments est contrôlé pour une large part par les glissements entre les filaments régis par les interactions de contact-frottement. L'approche éléments finis utilisée pour simuler ce problème vise à déterminer l'équilibre statique du milieu fibreux considéré en prenant en compte les interactions de contact frottant entre poutre à l'aide d'éléments de contacts discrets, et en ayant recours à un schéma de résolution implicite. De premiers résultats ont été obtenus en utilisant cette approche sur des mèches textiles comportant un nombre réduit de filaments [5]. Les travaux présentés ici visent à simuler le comportement de mèches présentant un très grand nombre de filaments. Un modèle de macro-filament, destiné à représenter le comportement d'ensembles de filaments réels est mis en œuvre afin de considérer un nombre raisonnable de composants dans la simulation.

Les résultats de simulation sont comparés à des résultats d'essais. Les comparaisons mettent en évidence la nécessité de prendre en compte le taux de vide important constaté dans les mèches considérées. Un désordre aléatoire est introduit dans la configuration initiale des mèches considérées afin de prendre en compte ce taux de vide important. L'amélioration des résultats obtenue montre l'importance d'une description fidèle de la configuration initiale des mèches étudiées.

2 MULTIFIL : recherche de l'équilibre mécanique d'un ensemble de poutres en interactions de contact-frottement

Une mèche est modélisée comme un assemblage de N poutres subissant des grandes transformations et des grands déplacements et en interaction contact-frottement. Nous supposons que chaque poutre est représentée dans une configuration matérielle par un ouvert Ω_R^i défini par :

$$\Omega_R^i = \{ \boldsymbol{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3) \in \mathbf{R}^3; \xi_1^2 + \xi_2^2 \leq R_i^2, 0 < \xi_3 < L^i \} \quad (1)$$

A chaque instant t , cette configuration matérielle est envoyée par bijection sur une configuration spatiale Ω_t^i ; la configuration initiale étant notée Ω_t^0 . On suppose que la surface de toute poutre Ω^i se décompose en 3 parties :

- $\Gamma_u^{(i)}$ la surface où sont appliqués des déplacements imposés ;
- $\Gamma_f^{(i)}$ la surface où sont appliquées des forces ;
- $\Gamma_{c,j}^{(i)}$ la portion de surface de la poutre i en contact avec la poutre j telle que la surface de contact totale s'écrive comme $\Gamma_c^{i,j} = \Gamma_{c,i}^{(j)} \cup \Gamma_{c,j}^{(i)}$

Nous supposons que les interactions de contact-frottement se produisent que sein de couples de particules matérielles ($\boldsymbol{\xi}^{(i)}$ et $\boldsymbol{\xi}^{(j)}$) appartenant à un instant t et que le contact entre ces deux particules l'interaction génère de deux forces opposées $\mathbf{R}_{i \rightarrow j}(\boldsymbol{\xi}^{(i)}, t)$. Le problème d'équilibre de l'ensemble des poutres est posé sous la forme du principe des travaux virtuels suivant :

Trouver \mathbf{u} cinématiquement admissible tel que pour tout \mathbf{v} cinématiquement admissible :

$$\underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \int_{\Gamma_c^{i,j}} \mathbf{R}_{i \rightarrow j}(\boldsymbol{\xi}^{(i)}, t) \cdot (\mathbf{v}(\boldsymbol{\xi}^{(i)}) - \mathbf{v}(\boldsymbol{\xi}^{(j)})) d\gamma}_{\text{travail virtuel des interactions contact-frottement}} + \underbrace{\sum_{i=1}^N \int_{\Omega_0^i} \text{Tr} \left(\mathbb{S}(\mathbf{u}) \frac{d\mathbb{E}}{d\mathbf{u}} \cdot \mathbf{v} \right) d\omega}_{\text{travail des efforts internes}} = \underbrace{\sum_{i=1}^N \int_{\Gamma_{f,0}^i} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} d\gamma}_{\text{travail des forces externes}} \quad (2)$$

Dans cette formulation lagrangienne, le travail des forces internes est exprimé sur la configuration initiale à l'aide du second tenseur de Piola-Kirchhoff $s(\mathbf{u})$ et du tenseur des déformations de Green-Lagrange E .

3 Cinématique enrichie à l'ordre 1

La nature élançée des fils ou des poutres qui constituent les textiles se prête à une mise en œuvre des modèles de type poutre à cinématique enrichie développé dans le cadre de la modélisation des câbles [1]. Le modèle cinématique de poutre vise à décrire la cinématique dans le volume de la poutre, soit la position de chaque point de la poutre à l'aide de champs définis sur la fibre moyenne de la poutre. L'approche mise en place ici consiste à développer un modèle cinématique de poutre s'exprimant linéairement par rapport aux coordonnées transverses. On considère que la poutre occupe un volume Ω_ξ décrit par un

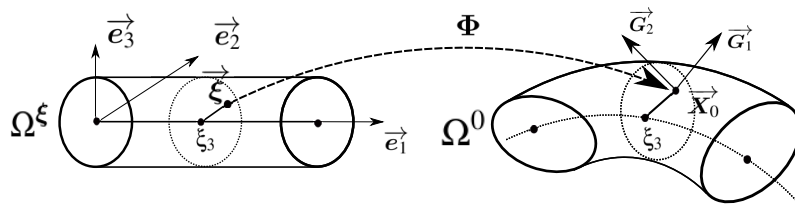


FIGURE 1 – configuration de référence, configuration initiale et tenseur des transformations initiales

cylindre droit de longueur L , de rayon R et de génératrice selon l'axe \vec{e}_3 :

$$\Omega_\xi = \{ \vec{\xi} \in \mathbf{R}^3; |\xi_1^2 + \xi_2^2| \leq R^2; 0 \leq \xi_3 \leq L \} \quad (3)$$

En notant \vec{x}^{3D} le placement à l'instant t de toute particule matérielle $\vec{\xi}$ de la poutre, considérée comme un milieu tridimensionnel standard, le développement limité au premier ordre de ce placement s'écrit de

la façon suivante :

$$\vec{x}^{3D}(\vec{\xi}, t) = \vec{x}^{3D}(0, 0, \xi_3, t) + \xi_1 \frac{\partial \vec{x}^{3D}(0, 0, \xi_3, t)}{\partial \xi_1} + \xi_2 \frac{\partial \vec{x}^{3D}(0, 0, \xi_3, t)}{\partial \xi_2} + o(0, 0, \xi_3, t) \quad (4)$$

Ainsi, la position de toute particule matérielle de la poutre considérée sera décrite par la position \vec{x} en tout instant t dans la configuration actuelle et par la position \vec{X} dans la configuration initiale. Le déplacement d'une particule sera noté et représenté par le champ $\vec{u}(\vec{\xi}, t)$ [1].

$$\vec{x}(\vec{\xi}, t) = \vec{r}(\xi_3, t) + \xi_\alpha \vec{g}_\alpha(\xi_3, t) \quad \forall \alpha = 1, 2 \quad (5)$$

$$\vec{X}(\vec{\xi}, 0) = \vec{r}(\xi_3, 0) + \xi_\alpha \vec{g}_\alpha(\xi_3, 0) = \vec{R}(\xi_3) + \xi_\alpha \vec{G}_\alpha(\xi_3) \quad \forall \alpha = 1, 2 \quad (6)$$

$$\vec{u}(\vec{\xi}, t) = \vec{x}(\vec{\xi}, t) - \vec{X}(\vec{\xi}, 0) = \vec{r}(\xi_3, t) - \vec{R}(\xi_3) + \xi_\alpha (\vec{g}_\alpha(\xi_3, t) - \vec{G}_\alpha(\xi_3)) \quad (7)$$

$$= \vec{q}(\xi_3, t) + \xi_\alpha \vec{h}_\alpha(\xi_3, t) \quad (8)$$

Ce modèle comprenant neuf degrés de libertés permet de considérer des déformations planes dans la section. L'augmentation de l'ordre de développement du modèle cinématique permettrait de prendre en compte d'autres déformations telles que le gauchissement dans la section. Ce modèle s'exprime aisément en grandes transformations et a la particularité de s'affranchir des grandes rotations nécessaires à la description en grands déplacements des modèles faisant l'hypothèse des sections rigides. Pour finir, une loi rhéologique doit être adaptée à ce modèle. Le tenseur des déformations de Green-Lagrange s'exprime :

$$\mathbb{E}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \left(\frac{d\vec{u}}{d\vec{X}} + \left(\frac{d\vec{u}}{d\vec{X}} \right)^t + \frac{d\vec{u}}{d\vec{X}} \left(\frac{d\vec{u}}{d\vec{X}} \right)^t \right) \text{ avec } \frac{d\vec{u}}{d\vec{X}} = \frac{d\vec{u}}{d\vec{\xi}} \left(\frac{d\vec{X}}{d\vec{\xi}} \right)^{-1} = \frac{d\vec{u}}{d\vec{\xi}} \Phi^{-1} \quad (9)$$

Dans le cas où la configuration de référence est initialement droite, la configuration de référence et la configuration initiale sont identiques, donc le gradient de la configuration initiale Φ est égal à la matrice identité. Le gradient de déplacement s'écrit alors de la façon suivante :

$$\frac{d\vec{u}}{d\vec{\xi}} = \frac{\partial u}{\partial \xi_i} \otimes e_i = \vec{h}_\alpha(\xi_3, t) \otimes \vec{e}_\alpha + (\xi_\alpha \vec{h}'_\alpha + \vec{q}') \otimes \vec{e}_3 \quad (10)$$

En utilisant sa définition précédente, le tenseur des déformations de Green-Lagrange s'écrit alors comme un polynôme de ξ_α [3]. De la même façon que le tenseur des déformations, le second tenseur de Piola-Kirchhoff s'exprime de manière polynomiale et suit une loi de comportement élastique.

$$\mathbb{E}(\mathbf{u}) = \mathbb{E}_0(\xi_3) + \xi_\alpha \mathbb{E}_\alpha(\xi_3) + \xi_\alpha \xi_\beta \mathbb{E}_{\alpha\beta}(\xi_3) \quad (11)$$

$$\mathbb{S}(\mathbf{u}) = \mathbb{S}_0(\xi_3) + \xi_\alpha \mathbb{S}_\alpha(\xi_3) + \xi_\alpha \xi_\beta \mathbb{S}_{\alpha\beta}(\xi_3) \quad (12)$$

4 Prise en compte du contact-frottement et création d'un élément de contact

Dans un milieu tel que les structures textiles où les zones d'interactions peuvent être particulièrement denses, on souhaite d'abord que la mise en œuvre de la détection du contact soit réalisée automatiquement. La méthode utilisée dans MULTIFIL s'appuie sur la définition du domaine d'interaction $\Gamma_c^{i,j}$. Dans un premier temps, on cherche à déterminer parmi l'ensemble des lignes moyennes des poutres en interaction, soit des paires de portions de poutres séparées d'une distance inférieure à δ . Soit $\gamma_{prox,R}^{(i,j)}$ une telle paire de portion de lignes proches définies par des intervalles d'abscisses curvilignes $[s_d^{(i)}, s_f^{(i)}]$ dans la configuration de référence de la manière suivante :

$$\gamma_{prox,R}^{(i,j)} = \gamma_R^{(i)} \cup \gamma_R^{(j)} = [s_d^{(i)}, s_f^{(i)}] \cup [s_d^{(j)}, s_f^{(j)}] \quad \text{tel que :} \quad (13)$$

$$\forall \xi_3^{(i)} \in \gamma_R^{(i)}, \exists \xi_3^{(j)} \in \gamma_R^{(j)} \text{ tel que : } \|\Phi_t(0, 0, \xi_3^{(i)}) - \Phi_t(0, 0, \xi_3^{(j)})\| \leq \delta \quad (14)$$

Dans un second temps, une ligne géométrique intermédiaire moyenne $l_{prox,t}^{(i,j)}$ est construite pour chaque paire de lignes proches. Nous définissons une bijection entre deux portions de lignes proches

associant les points ayant la même abscisse curvilignes relatives s sur les deux portions de lignes proches $\gamma_{prox,R}^{(i,j)}$.

$$l_{prox,t}^{(i,j)} = \left\{ x_{int}^{(i,j)}(s); \forall 0 \leq s \leq 1 \right\}, x_{int}^{(i,j)}(s) = \frac{1}{2} \left(\Phi_t(s_d^{(i)} + s(s_f^{(i)} - s_d^{(i)})) + \Phi_t(s_d^{(j)} + s(s_f^{(j)} - s_d^{(j)})) \right) \quad (15)$$

Cette géométrie intermédiaire représente une approximation, pour la configuration actuelle de contact, de la ligne de contact pouvant se produire entre deux poutres. Les particules candidates seront cherchées dans une direction orthogonale $t_{int}(s)$ à cette géométrie moyenne. Pour connaître ces particules, on cherche tout d'abord à déterminer les centres des sections géométriques susceptibles d'être en contact. Pour tout point d'abscisse s sur la géométrie moyenne, on suppose que le centre des sections candidates se situent aux intersections du plan normal à la ligne intermédiaire avec les lignes moyennes des poutres. Les particules candidates au contact se situent sur le contour de ces sections et seront positionnées à l'intersection de la projection, dans le plan de la section, de la direction entre les deux centres de section, avec le contour. Ainsi nous avons déterminé deux particules susceptibles ($\xi^{(i)}\xi^{(j)}$) de rentrer en contact et défini un élément de contact $E_c(\xi^{(i)}\xi^{(j)})$.

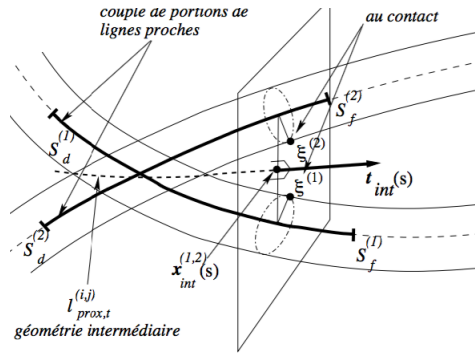


FIGURE 2 – Détermination des particules prédites entrer en contact à partir de la géométrie intermédiaire du domaine d'interaction [2]

Les éléments de contacts étant définis, les interactions de contact normal sont prises en compte par un modèle pénalisé présentant une régularisation quadratique pour les faibles pénétrations. La raideur de pénalisation pour le contact est ajustée régulièrement au cours de l'algorithme au niveau de chaque zone de contact afin de contrôler la pénétration maximale constatée au niveau de chacune de ces zones. Les interactions tangentielles suivent un modèle de frottement régularisé de Coulomb, prenant en compte un déplacement relatif réversible avant l'apparition du glissement.

5 Compression transverse d'une mèche en fibre de carbone sous MULTIFIL

MULTIFIL permet d'effectuer des modélisations de "macrofibres" représentant un certain nombre de fibres. Le comportement de ces "macrofibres" est mécaniquement homogénéisé en fonction du nombre de fibres qu'elles modélisent. Dans cette étude, nous nous intéressons uniquement à la géométrie fibreuse et plus particulièrement aux déformations du constituant structurel, soit une mèche de fibres de carbone en compression transverse.

5.1 Données expérimentales

Afin de valider les résultats numériques, nous nous appuyons sur des essais de compressions transverses réalisés au Laboratoire Physique et Mécaniques Textiles (LPMT) de Mulhouse. Le principe est de positionner sur un plan une mèche de 48 mille (48K) fibres de 10cm, avec un retordage. Le côté gauche est considéré comme encastré et une tension est imposée à l'aide d'une masse sur le côté droit de la mèche. Plusieurs masses ont été imposées sur différents essais afin d'observer leur influences sur l'épaisseur et la largeur de la mèche. Un cône à base circulaire d'un diamètre de 5cm est piloté en déplacement et est centré sur la mèche de manière à appliquer une déformation transverse.

5.2 Simulation de la compression transverse d'une mèche

Pour appliquer la méthodologie présentée ci-dessus à la simulation de la compression transverse de mèches de carbone, nous partons d'une configuration initiale représentant une mèche. Le nombre de filaments dans une mèche étant beaucoup trop important, on utilise un modèle dit de macro-filament, censé représenter le comportement d'un ensemble de N filaments réels. Le macrofilament est supposé constitué du même matériau homogène que les filaments ; sa rigidité axiale équivaut à celle du paquet de filaments qu'il représente, mais ses rigidités en torsion et en flexion sont nettement diminuées par rapport à celles d'une poutre homogène de sorte qu'elles correspondent à la somme des rigidités correspondantes des filaments élémentaires.

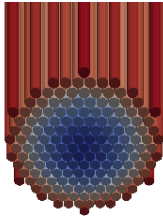


FIGURE 3 – Configuration initiale de la mèche, les macro-fibres sont droites

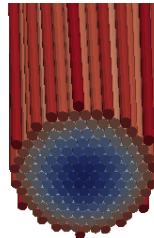


FIGURE 4 – Configuration de la mèche après torsadage

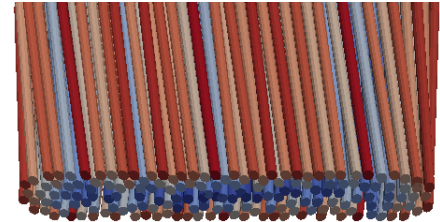


FIGURE 5 – État finale de la mèche, compression maximale atteinte par MULTIFIL

Les macro-filaments sont considérés comme droits dans la configuration initiale (figure 3), et assemblés selon un motif hexagonal compact. Les mèches considérées étant torsadées, on commence par appliquer des torsions aux extrémités de l'assemblage jusqu'à atteindre le niveau de torsadage souhaité. La compression transverse est simulée en considérant des interactions de contact frottant entre les macro-filaments et des obstacles rigides pilotés en déplacement, représentant le dispositif expérimental.

5.3 Résultats des premières simulations avec MULTIFIL

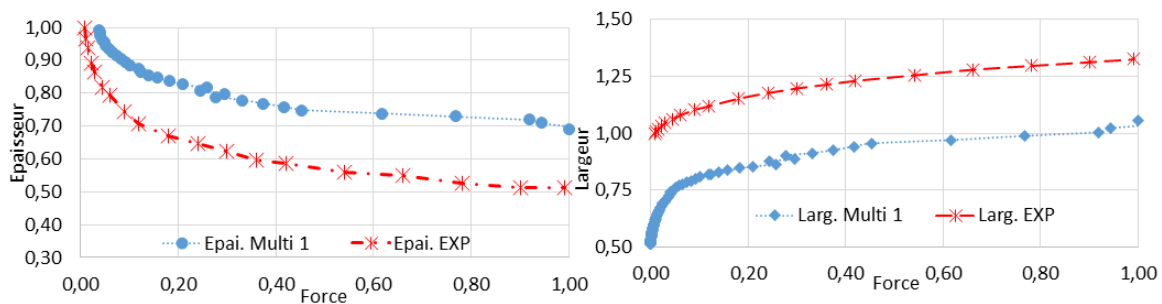


FIGURE 6 – Courbes de compaction : Evolution de l'épaisseur par rapport à la force (gauche) et de la largeur par rapport à la force (droite) (Valeurs adimensionnées), données expérimentales (EXP) et numériques (Multi 1)

Les courbes de compactions présentées en figure 6 représentent l'évolution de l'épaisseur (gauche) et de la largeur (droite) en fonction d'un effort. Les tendances de ces courbes issues de la simulation (courbes "Multi 1") sont similaires aux courbes expérimentales (courbes "EXP"). Cependant pour un effort donné, les résultats de simulation donnent une mèche plus épaisse et moins large que dans les essais. La rigidité initiale apparaît moindre dans les simulations que dans les essais.

Une seconde étude est réalisée sur l'évaluation du taux volumique de fibre (TVF) dans la mèche. Le type de mèche utilisée dans l'essai a un TVF de 30% initialement et peut atteindre 70/80%. Ce taux décrit la quantité de vide présent dans la mèche. Si on considère à 1 la quantité totale de matière, le taux volumique de fibre maximum correspondant à un assemblage hexagonal compact proche de 90%. Le calcul du TVF est obtenu en divisant la somme des aires des sections des macro-filaments (dans le modèle)

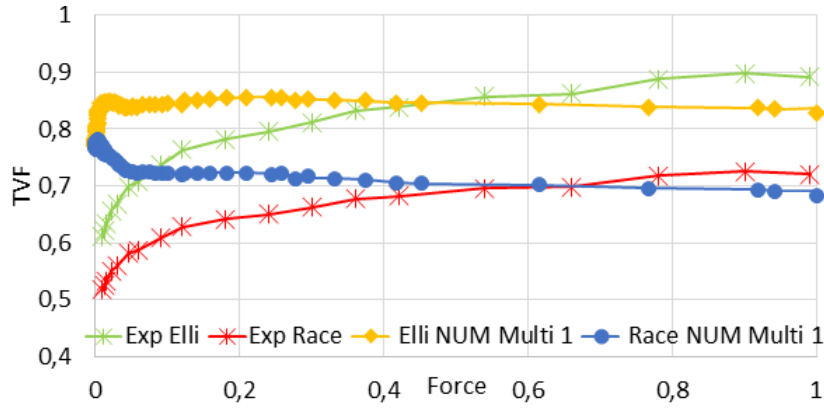


FIGURE 7 – Évaluation du taux volumique de fibre, comparaison entre les données expérimentales (courbes EXP) et numérique (courbes NUM)

ou des fibres (dans les essais) par l'aire de la section de la mèche. Pour approcher la forme de la section de la mèche à partir des mesures de la l'épaisseur et de la largeur, deux approximations différentes sont utilisées : un approximation par une ellipse, dont le grand axe et le petit axe sont définis respectivement par la moitié de la largeur et de l'épaisseur, et une approximation dite de "Racetrack" formée par un rectangle encadré de deux demi disques. Les TVF calculés à partir de ces deux approximations de la section de la mèche sont représentés sur la Figure 5.3, pour les résultats d'essais et de simulation.

Compte tenu de nos observations précédentes, le TVF numérique initial ne correspond pas aux données expérimentales. En effet, la figure 3 représente la géométrie initiale de la mèche. Lors de la définition de la configuration initiale, les macrofilaments sont construit en projetant de droite à gauche les centres des sections définis selon une configuration hexagonale compacte. Suites aux observations faites sur le TVF, cette configuration n'est pas admissible. Nous avons décidé d'introduire du désordre dans la configuration initiales.

6 Introduction de désordre dans la configuration initiale de la mèche

Le faible TVF de fibres mesuré dans les essais témoigne d'espaces laissés libres entre ces fibres. Une hypothèse pour expliquer la présence de ces vides entre les filaments consiste à supposer que ces filaments présentent des ondulations, possiblement liées à des variations de longueur, et que ces ondulations maintiennent les filaments écartés. Afin de tester la validité de cette hypothèse, nous avons cherché à reproduire un effet analogue en introduisant un désordre aléatoire qui vient perturber l'arrangement hexagonal compact de macro-filaments d'égales longueurs, tel que considéré précédemment.

Pour introduire ce désordre, plutôt que de considérer des macro-filaments droits dans la configuration initiale, une perturbation sinusoïdale de la forme suivante a été considérée :

$$\vec{x}_i = \vec{x}_0 + sLV_d^f + \alpha \sin(2\pi s\beta) \vec{V}_i^f \quad (16)$$

Pour chaque fibre et à une abscisse curviligne s donnée, nous appliquons une perturbation sinusoïdale au vecteur directeur de la fibre moyenne \vec{V}_d^f dans la direction transverse \vec{d}_i de façon aléatoire pour chaque fibre. Le paramètre α correspond à l'amplitude du désordre multiplié par une valeur aléatoire (comprise entre 0 et 1) et le paramètre β correspond à un angle aléatoire choisis pour chaque fil (voir figure 8).

Cette perturbation sinusoïdale a deux effets principaux : d'une part, la perturbation sinusoïdale aléatoire est de nature à créer un léger enchevêtrement entre les filaments, et d'autre part, l'aspect aléatoire des amplitudes de la perturbation engendre de légères différences de longueur entre les macrofilaments, qui tendent à renforcer les ondulations sur les macro-filaments les plus longs.

Lors de la simulation, l'étape qui définit la configuration initiale est suivie d'étape de relaxation pour atteindre une état stable. Des entrées supplémentaires sont paramétrées pour limiter la pénétration et conserver l'état de désordre. Grâce à ces étapes, nous conservons l'enchevêtrement produit dans la configuration initiale.

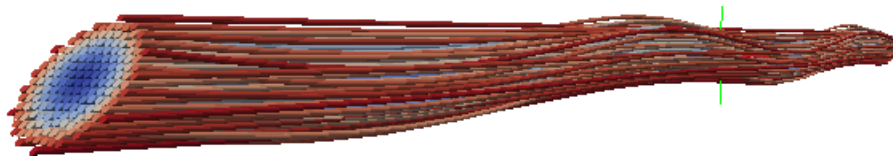


FIGURE 8 – Représentation d’une demi mèche, configuration initiale de la mèche, la perturbation correspond à 8 fois la taille d’un rayon de macrofilament et est répétée 4 fois

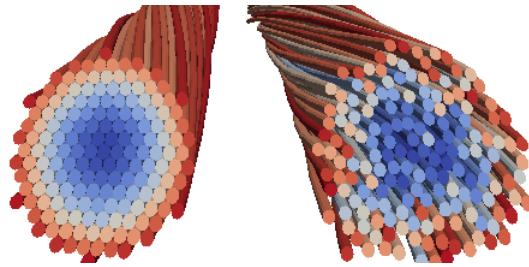


FIGURE 9 – Représentation d’une demi mèche, configuration de la mèche après retordage, sans désordre à gauche et avec désordre à droite (la perturbation correspond à 8 fois la taille d’un rayon de macrofilament et est répétée 4 fois)

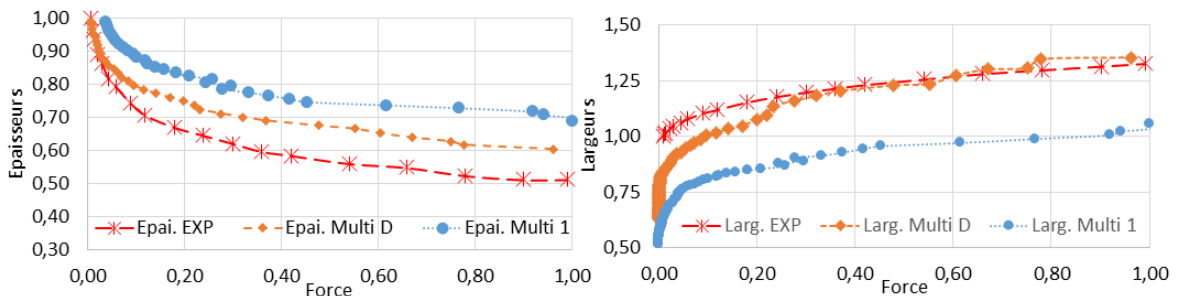


FIGURE 10 – Courbes de compaction : Evolution de la largeur par rapport à la force (gauche) et de l’épaisseur par rapport à la force (gauche) (Valeurs adimensionnées) ; Données expérimentales, résultats des simulation sans désordre(Multi1) et avec désordre (MultiD)

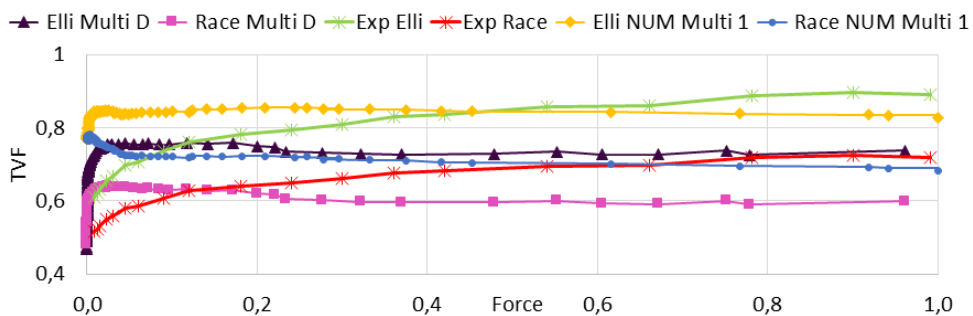


FIGURE 11 – Evaluation du taux volumique de fibre, comparaison entre les données expérimentales et numérique (avec et sans désordre)

L'introduction de ce désordre conduit à un meilleur accord entre résultats numériques et mesures expérimentales, en particulier au début démarrage du chargement en compression transverse (voir Figure 10), avec une évolution de la raideur transverse beaucoup plus proche. Les taux volumiques de fibres initiaux se révèlent aussi en meilleur accord (voir Figure 11).

7 Conclusions

L'objet de cette étude était d'étudier et de déterminer le comportement d'une mèche de carbone en compression transverse par une approche numérique.

Les simulations avec introduction du désordre produisent des résultats satisfaisant par rapport aux données expérimentales. L'introduction d'un désordre par la modélisation de macrofilements de longueurs différentes est une hypothèse forte mais qui permet de nous approcher au plus près des données expérimentales. Des études à l'échelle mésoscopique montrent qu'en compression transverse, des mèches composées en fibres de carbone passent par 3 étapes de comportement [4] :

- une première phase linéaire correspondant au glissement des fibres avec le minimum d'énergie ;
- une seconde phase non linéaire traduit la compression des pores dans les mèches et de la structure constituée pas les fibres ;
- la dernière phase linéaire correspondrait à une phase de déformations transverses des filaments eux-même.

Une prise en compte des déformations des sections devrait permettre d'améliorer les résultats de la simulation pour les fortes compressions.

7.1 Références bibliographiques

Références

- [1] D.Durville *.Modélisation du comportement mécanique des câbles métalliques*,Revue Européenne des Éléments Finis, 1998.
- [2] D.Durville. *Modélisation par éléments finis du comportement mécanique de structures textiles : de la fibre au tissu*,Revue Européenne des Éléments Finis , 2002.
- [3] D.Durville.*Contact-friction modeling within elastic beam assemblies : an application to knot tightening*,Revue Européenne des Éléments Finis, 1998.
- [4] B.Chen AH.Cheng TW.Chou ; *A nonlinear compaction model for fibrous preforms*,Composites, Part A, 2001.
- [5] N.Moustaghfir S.El-Gherzal Jeguirim D.Durville S. Fontaine C.Wagner-Kocher ; *Transverse compression behavior of textile rovings : finite element simulation and experimental study*,J Mater Sci ,2012.
- [6] S.El-Gherzal Jeguirim S. Fontaine C.Wagner-Kocher N.Moustaghfir D.Durville ; *Transverse compression behavior of polyamide 6.6 rovings : Experimental study*,Textile Research Journal ,2011