

Simulation par éléments finis de la flexion sur poulie de câbles tressés pour la compréhension des mécanismes d'endommagement

A. Belkhabbaz¹, D. Durville¹, P. Davies²

¹ Laboratoire MSSMAT, CentraleSupélec, {abderrahim.belkhabbaz,damien.durville}@centralesupelec.fr

² IFREMER Centre de Brest, Peter.Davies@ifremer.fr

Abstract — Les câbles synthétiques tressés subissent des endommagements internes lors de leurs passages sur des poulies du fait des interactions de contact-frottement entre leurs constituants internes. Une méthode de simulation par éléments finis est proposée afin de déterminer la configuration initiale a priori inconnue de ces structures tressées, et d'évaluer les contraintes au niveau des brins constituant le câble tressé lors de sa flexion sur une poulie. Différentes architectures de câbles sont étudiées, et des tests de rupture en traction droite et en traction sur poulie sont simulés.

Mots clés — Câbles synthétiques, Simulation par éléments finis, Contact frottement.

1 Introduction générale

Les câbles synthétiques tressés utilisés pour la manutention pétrolière offshore en eau profonde voient leur durée de vie limitée par les endommagements lors de leurs passages sur poulies. En effet, au cours de la descente et la montée des charges, les câbles synthétiques doivent passer sur une série de poulies en particulier au niveau des treuils. Les passages répétés de ces câbles sur ces poulies entraînent une réduction rapide de leur résistance. Les moyens de manutention conventionnels ont recours aux câbles métalliques qui sont utilisés pour des profondeurs inférieures à 500 mètres. Mais ces moyens de manutention s'avèrent de moins en moins efficaces en raison de leurs propres poids qui devient élevé par rapport à la charge utile et leur coût d'installation élevé. Les fibres à haut module élastique (HMPE) s'avèrent alors comme une bonne solution alternative. Les câbles étudiés sont constitués de filaments textiles assemblés en brins torsadés, qui sont ensuite toronés sur un ou deux niveaux, avant d'être tressés. Ils apparaissent donc comme des structures multi-échelles. La modélisation proposée dans cette étude aborde le problème à l'échelle du brin élémentaire. La configuration initiale des câbles tressés étudiés, c'est-à-dire la description géométrique des trajectoires des brins les constituant, résulte des différentes opérations du procédé d'assemblage, et n'est pas connue a priori. L'approche de simulation proposée se fixe comme première tâche de déterminer cette configuration initiale inconnue, en partant d'une configuration arbitraire présentant de fortes inter-pénétrations entre les brins, et en séparant progressivement ces brins.

2 Description de l'approche numérique

Le code Multifil proposé par Durville [1] pour modéliser le comportement des câbles synthétiques est décrit dans la section qui suit. Cette approche qui a été initialement développée pour les matériaux fibreux et enchevêtrés [2], [3] [4] a pour objectif de simuler différents tests, et en particulier les essais de flexion sur poulie des câbles synthétiques tressés.

2.1 Modélisation du comportement à l'échelle des brins

Le problème global est posé sous la forme de la résolution de l'équilibre mécanique d'un ensemble de fibres en interaction de contact-frottement, soumises à de grands déplacements, et dans un cadre quasi-statique. Chacune de ces fibres est représentée par un modèle de poutre à cinématique enrichie dans la section transverse, décrite par les trois vecteurs suivants : un vecteur de position du centre r et deux vecteurs directeurs de section g_1 et g_2 (figure 1). Les vecteurs directeurs permettent de prendre

en compte les déformations de la section transverse. Cette description cinématique rajoute 3 degrés de liberté supplémentaires en comparaison avec le modèle de Timoshenko qui comporte 6 degrés de liberté par section. L'expression du vecteur position d'un point s'écrit à l'aide de ces trois vecteurs, et est donnée par l'équation 1 :

$$x(\xi) = r(\xi_3) + \xi_1 g_1(\xi_3) + \xi_2 g_2(\xi_3) \quad (1)$$

Selon l'expression du vecteur position, le déplacement $u(\xi)$ pour chaque point ξ est donné par l'équation suivante 2 :

$$u(\xi) = u_0(\xi_3) + \xi_1 h_1(\xi_3) + \xi_2 h_2(\xi_3) \quad (2)$$

avec u_0 , le déplacement du centre la section et h_1 , h_2 deux vecteurs qui représentent la variation des vecteurs directeurs de la section.

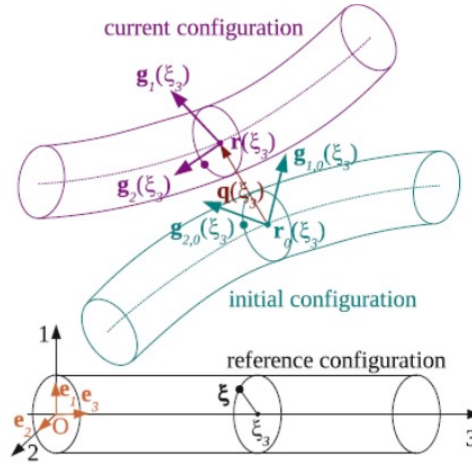


Figure 1: Modèle cinématique de poutre enrichi.

2.2 Détection des zones potentiels aux contacts

Pour accélérer cette phase de détection, il est nécessaire de définir des zones de proximité, dont chacune définit un couple de portions de deux poutres séparées d'une distance inférieure à un critère de proximité δ_{prox} donné. Il est important de préciser que des zones de proximité sont déterminées de manière grossière, de manière à limiter le temps de calcul associé (voir figure 2) . Concrètement, pour chaque paire de poutres, il peut y avoir plusieurs zones de proximité dont la zone k est définie par la relation suivante 3 :

$$\begin{aligned} Z_k^{IJ} &= ([a_k^I, b_k^I], [a_k^J, b_k^J]) \quad \text{tel que} \\ \forall (S^I, S^J) &\in [a_k^I, b_k^I] \times [a_k^J, b_k^J], \\ \|r^I(S^I) - r^J(S^J)\| &\leq \delta_{prox} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 Méthode basée sur la géométrie intermédiaire

Nous avons défini dans la section précédente des zones de proximité, permettant de réduire le temps de calcul pendant la phase de recherche du contact. L'idée originale utilisée dans Multifil est d'utiliser ces zones pour définir des géométries intermédiaires. Chaque géométrie intermédiaire, symétrique vis-à-vis des deux structures, est définie comme la moyenne des deux lignes moyennes des poutres concernées à l'intérieur d'une zone de proximité donnée. Les zones de proximité sont utilisées pour définir une géométrie intermédiaire, notée L_k^{IJ} pour fournir une approximation de la géométrie de contact. Une géométrie intermédiaire est définie comme la moyenne des deux parties de poutres associées à cette zone

de proximité. Pour chaque zone de proximité Z_k^{IJ} , la position $x_{int}(\xi)$ de tout point identifié par son abscisse curviligne relative $\xi \in [0, 1]$ est défini comme le milieu entre les deux points à la même abscisse relative sur les deux parties de poutres par l'équation suivante :

$$x_{int}(\xi) = \frac{1}{2}[r^I((1-\xi)a_k^I + \xi b_k^I) + r^J((1-\xi)a_k^J + \xi b_k^J)] \quad (4)$$

La tangente à la géométrie intermédiaire par rapport à l'abscisse relative s $t_{int}(\xi)$ est déterminée par l'équation 5 en dérivant l'expression ci-dessus :

$$t_{int}\xi = \frac{1}{2}[(b_k^I - a_k^I)r^{I'}((1-\xi)a_k^I + \xi b_k^I) + (b_k^J - a_k^J)r^{J'}((1-\xi)a_k^J + \xi b_k^J)] \quad (5)$$

Ces géométries intermédiaires sont ensuite utilisées comme support géométrique pour générer les éléments de contact. En effet, pour la génération d'éléments de contact, la géométrie intermédiaire est discrétisée, dans chaque zone de proximité, en définissant un ensemble d'abscisses curvilignes relatives ξ sur la géométrie intermédiaire voir (figure3). Le contact est vérifié à certains points discrets x_c définis par leur abscisses curvilignes $x_c = x_{int}(\xi)$. Pour chaque point de la géométrie intermédiaire, un élément de contact est défini comme étant une paire de particules matérielles se trouvant sur les surfaces des poutres qui sont susceptibles d'être en contact à cet endroit. Ce couple est défini $E_c(x_c) = (\xi^I, \xi^J)$ tel que $\xi^I(\xi)$, $\xi^J(\xi)$ entrent en contact à l'abscisse curviligne x_c .

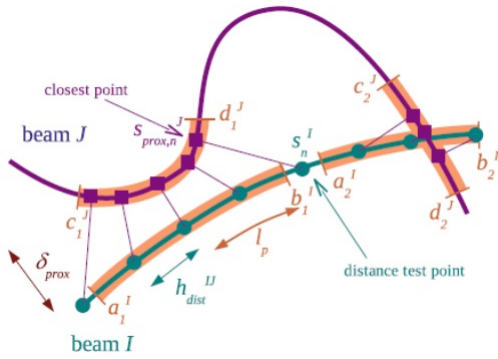


Figure 2: Détermination de la zone de proximité entre les deux poutres.

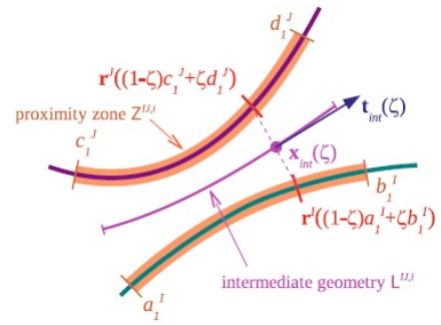


Figure 3: Détermination de la géométrie intermédiaire entre les deux poutres.

2.4 Méthode de résolution numérique de contact

Afin de modéliser les interactions de contact normales entre les brins, une méthode de pénalisation est employée dans le code Multifil. Deux voies d'améliorations sont apportées à la méthode de pénalisation standard : la régularisation de la méthode de pénalisation standard, et l'adaptation locale du coefficient de pénalisation pour chaque zone de proximité. L'idée est de régulariser la force normale avec une partie quadratique pour les faibles pénétrations inférieures à un certain seuil nommé profondeur de régularisation et noté p_{reg} (voir figure 4). Cette régularisation permet une transition "souple" entre l'état de contact et l'état décollé. La dérivée de la réaction normale par rapport aux déplacements est désormais continue. Selon ce modèle de pénalisation régularisée, la réaction normale est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} gap(E_c) \geq 0 &\rightarrow R_N = 0 \\ -P_{reg} \leq gap(E_c) \leq 0 &\rightarrow R_N = \frac{k}{2p_{reg}}(gap(E_c))^2 \\ gap(E_c) \leq -p_{reg} &\rightarrow R_N = -k(gap(E_c) + \frac{k}{2p_{reg}}) \end{aligned} \quad (6)$$

$gap(E_c(\xi_i)) = (x^2(\xi_i^2) - x^1(\xi_i^1), N_{12}(E_c(\xi_i)))$ est la fonction gap définie comme étant la distance qui sépare les deux particules qui forment l'élément de contact. L'estimation de la valeur optimale du coefficient de pénalisation k peut être problématique. Une pénalisation trop faible peut engendrer des grandes pénétrations et une valeur trop élevée engendre des difficultés de convergence. L'approche développée se

base sur l'idée d'ajuster régulièrement le coefficient de pénalisation. L'ajustement est réalisé au niveau des zones de proximité, qui contiennent chacune plusieurs éléments de contact. Un processus itératif est réalisé pour ajuster de manière progressive le coefficient de pénalisation suivant la formule 7 :

$$k_N^{i+1} = \frac{gap_{max}^i}{p_{max}} k_N^i \quad (7)$$

Où gap_{max}^i représente la pénétration maximale relevée au niveau d'une zone de proximité à une itération d'ajustement donnée, et p_{max} est la pénétration maximale autorisée.

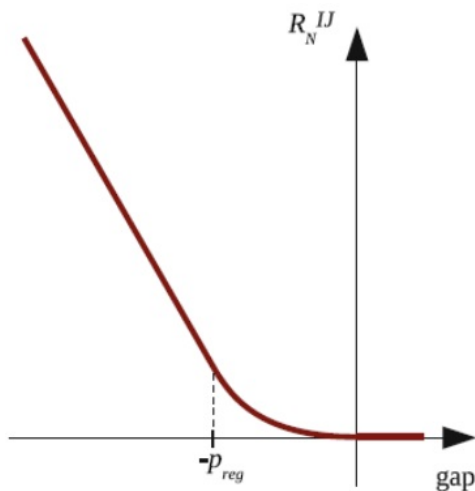


Figure 4: Régularisation quadratique de la force normale du contact R_N .

3 Câble avec un diamètre de 18mm

Les câbles synthétiques tressés étudiés ici sont des structures multi-échelles, obtenues à partir de différentes opérations d'assemblage successives. Les fibres, qui représentent les constituants élémentaires du câble, sont assemblées suivant plusieurs niveaux hiérarchiques en mèches ou brins. Ces derniers sont ensuite assemblés pour former le câble, qui peut être tressé ou torsadé selon le mode d'assemblage adopté. La figure 5 suivante montre une image du câble utilisé obtenu en tressant 12 torons répartis en deux couches.

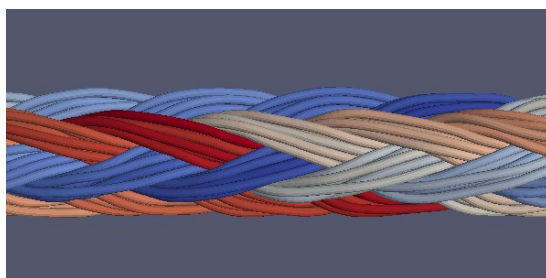


Figure 5: Câble synthétique tressé 12×1

Le câble étudié ici est composé de deux couches de 6 Torons en HMPE. Les deux couches s'orientent dans deux sens opposés et s'entrecroisent. Chaque toron à son tour est constitué de 7 brins torsadés entre eux. La structure du câble est caractérisée à la fois par la longueur du pas périodique et par le motif de tissage.

3.1 Détermination de la configuration initiale du câble

Dans la simulation numérique, chaque brin constituant les torons est considéré comme une poutre avec un comportement élastique linéaire. Les rigidités de flexion et de torsion des brins sont diminuées pour tenir compte de la flexibilité importante du fait qu'ils sont constitués de filaments pouvant glisser les uns par rapport aux autres. La trajectoire de chaque brin est a priori inconnue, on part d'une configuration arbitraire dans laquelle les brins sont décrits par des hélices définies par leur rayon d'hélice, leur angle initial, leur pas et leur sens d'orientation.

La phase de la détermination de la configuration initiale consiste à laisser les interactions de contacts venir séparer les brins initialement interpénétrés, jusqu'à l'obtention d'une structure équilibrée respectant le motif de tressage (voir les figures 6, 7, 8, 9). Durant cette phase, l'orientation de la direction normale de contact entre brins appartenant à des torons différents est fixée en fonction de l'ordre de superposition correspondant au motif de tressage choisi. Afin de limiter de trop grandes perturbations qui viendraient empêcher la convergence des algorithmes de contact, les pénétrations très importantes dans la configuration initiale sont réduites progressivement d'une certaine valeur à chaque étape, jusqu'à séparation complète des torons.

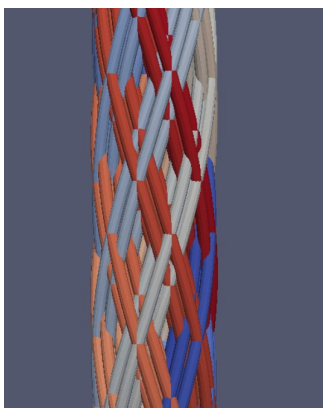


Figure 6: Configuration1

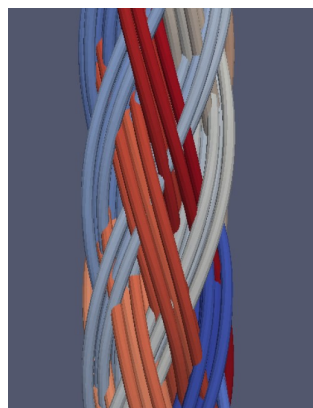


Figure 7: Configuration2

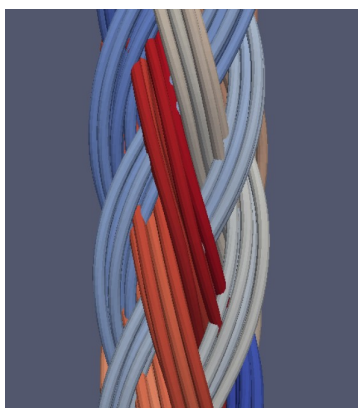


Figure 8: Configuration3

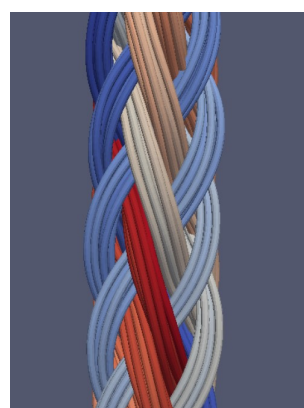


Figure 9: Configuration4

On note que pour appliquer les conditions aux limites, des corps rigides sont créés aux extrémités des constituants correspondant aux différents niveaux hiérarchiques de la tresse (couches et torons). Des modes de liaisons adaptés rigides ou en moyenne dans les différentes directions permettent un pilotage adapté de ces conditions aux limites.

3.2 Essai de traction : Détermination de la force à la rupture

Après avoir calculé la configuration initiale du câble synthétique, on s'intéresse maintenant à la détermination de la force à la rupture du câble fléchi sur poulie en comparaison avec le résultat du câble droit. Pour fléchir le câble sur la poulie, nous partons d'une configuration droite qu'on vient positionner au niveau de la gorge de la poulie, de sorte à ce que le contact initial se produise au milieu du câble. Les deux extrémités du câble sont ensuite progressivement abaissées de manière à venir le mettre en contact avec la poulie. Un déplacement incrémental de l'ordre d'un 1mm est appliqué aux deux extrémités du câble jusqu'à rupture finale. La figure 10 suivante montre l'évolution de la force résultante sur l'extrémité droite du câble en fonction de l'allongement appliqué. On constate, que le câble fléchi sur poulie en partant de deux forces initiales égales à 8747 N et 40000 N casse plus vite que le câble droit. La force à la rupture est de l'ordre de 275 kN pour le câble fléchi comparée à celle du câble droit à 318 kN.

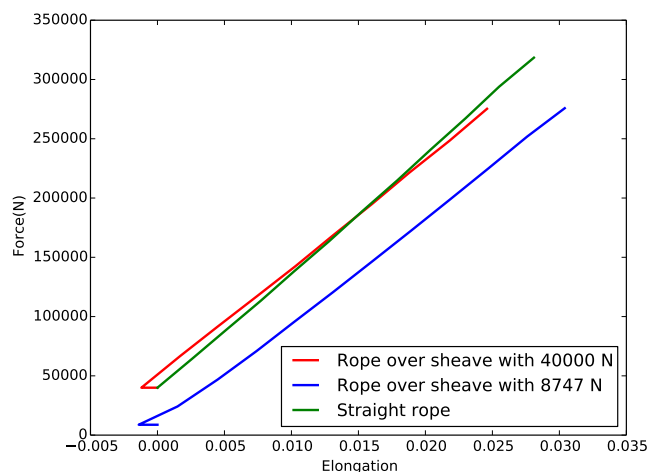


Figure 10: Evolution de la force en fonction de l'allongement

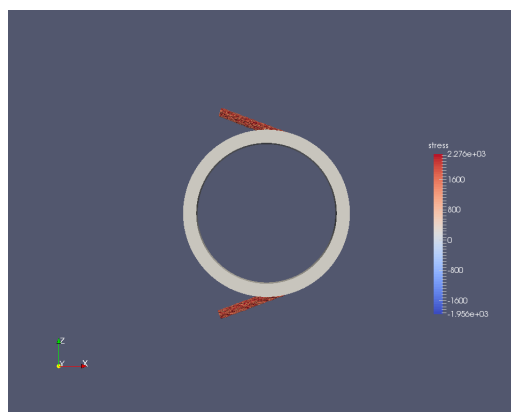


Figure 11: Exemple de flexion du câble sur poulie.

3.3 Corrélation avec l'hétérogénéité du champ de contrainte

Pour bien comprendre et expliquer l'origine de la rupture du câble synthétique, nous allons nous intéresser à la distribution des contraintes dans les brins au sein du câble synthétique. Cette distribution correspond à l'étape de calcul qui précède la rupture. Les figures 12,13 montrent l'évolution des contraintes axiales dans les brins en fonction de l'abscisse curviligne (z) respectivement pour le câble sur poulie et le câble droit. Ce résultat montre une grande fluctuation du champ de contrainte pour le cas du câble sur poulie respectivement à l'entrée et à la sortie lors son passage sur la poulie. Dans ces zones, les déplacements relatifs entre brins induits par la flexion localisée entraînent des transferts d'effort par frottement, conduisant à augmenter la tension dans certains brins. Par contre, une fluctuation uniforme du champ de contrainte est observée le long de l'abscisse curviligne dans le cas du câble droit.

4 Conclusion

Un modèle numérique de modélisation du comportement des câbles synthétiques a été proposé dans ce travail, qui prend en compte des interactions contact-frottement entre les différentes composantes élémentaires. L'approche est d'abord employée pour déterminer la configuration initiale inconnue, à partir d'une configuration arbitraire choisie. Cette phase consiste à laisser les interactions de contacts venir séparer les brins initialement interpénétrés, jusqu'à l'obtention d'une structure équilibrée respectant le motif de tressage. Par la suite, ce modèle numérique est utilisé pour calculer la force à la rupture à la fois du câble sur poulie et du câble droit. Les simulations de passages du câble sur poulie ont permis de mettre en évidence les grandes hétérogénéités au niveau des distributions du champ de contrainte dans les brins, engendrées par la flexion spécialement à l'entrée et à la sortie de la poulie. Le modèle

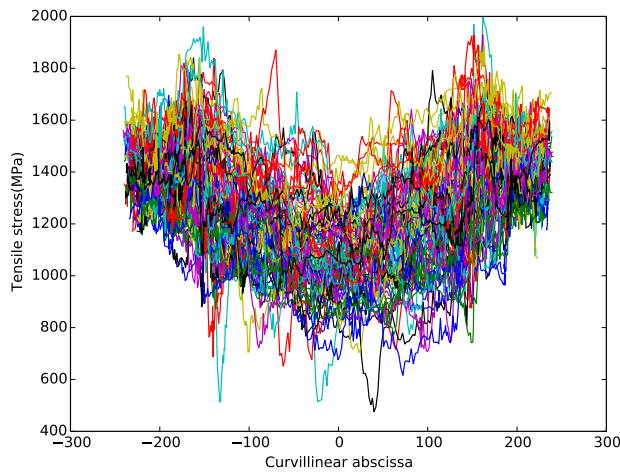


Figure 12: L'évolution de la tension à l'étape juste avant la rupture (câble sur poulie)

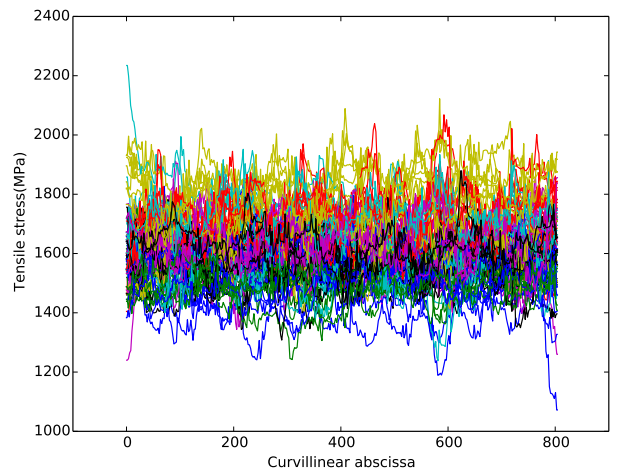


Figure 13: L'évolution de la tension à l'étape juste avant la rupture (câble droit)

développé est maintenant utilisé pour étudier le comportement des gros câbles synthétiques présentant un niveau hiérarchique supplémentaire. En effet, on cherche à caractériser l'endommagement subi par ces gros câbles lors de leurs passages sur poulie en tenant compte de l'effet de la température.

4.1 Références bibliographiques

References

- [1] D. Durville. *Contact-friction modeling within elastic beam assemblies: an application to knot tightening*, *Computational Mechanics* 49 (6) (2012) 687–707
- [2] D. Durville. *A finite element approach of the behaviour of woven materials at microscopic scale*, in *Mechanics of Microstructured Solids*, Springer, 2009, pp. 39–46
- [3] D. Durville. *Simulation of the mechanical behaviour of woven fabrics at the scale of fibers*, *International journal of material forming* 3 (2) (2010) 1241–1251
- [4] D. Durville. *microscopic approaches for understanding the mechanical behaviour of reinforcement in composite*, in: P. Boisse (Ed.), *Composite Reinforcements for Optimum Performance*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Woodhead Publishing, 2011, pp. 461 – 485.