

# Etude du comportement mécanique de non-tissé Lin/PP à l'échelle renfort et composite

I. GNABA<sup>a\*</sup>, F. OMRANI<sup>a</sup>, M. FERREIRA<sup>a</sup>, D. SOULAT<sup>a</sup>, P. WANG<sup>a</sup>, P.  
VROMAN<sup>a</sup>

a. Univ.Lille Nord de France, GEMTEX, ENSAIT, Roubaix, France

\* imen.gnaba@ensait.fr

## Résumé :

*De par leurs propriétés mécaniques proches de celles des fibres synthétiques notamment du verre et pour leurs potentialités de revalorisation, l'utilisation des composites à base des fibres naturelles (Lin, chanvre, jute...) prend beaucoup d'ampleur dans divers domaines tels que l'industrie des transports. Le présent travail met l'accent sur l'influence des paramètres d'élaboration sur le comportement mécanique de renforts non-tissés Lin/PP. Pour ce faire des essais de caractérisation textile (masse surfacique, épaisseur...) mais également mécaniques en traction, flexion et lors du préformage sont décrits et analysés.*

## Abstract :

*Currently, the use of composites reinforced with natural fibres (flax, hemp...) is steadily increasing. This is explained by the fact of the excellent mechanical properties which are similar to those for materials reinforced with technical fibres (glass, carbon ...).*

*The present study focuses firstly on the textile characterisation of flax/PP nonwoven as well as its mechanical behaviour.*

*Therefore, several tests in tensile, bending, Forming ... have been carried out in order to highlight the influence of the parameters of elaboration as well as the manufacturing process.*

**Mots clefs :** non-tissés, fibres naturelles, comportement mécanique

**Keywords:** nonwoven, natural fibres, mechanical behaviour

## 1 Introduction

Depuis des décennies, l'industrie des transports utilise des textiles techniques en tant que renforts fibreux pour la réalisation de composites à matrice organique. Cependant, de par la disponibilité des fibres naturelles végétales (80% de la production européenne de lin est en France), l'intégration de celles-ci en substitution des fibres synthétiques dans les composites, fait l'objet de nombreux travaux dans la littérature. Les fibres naturelles constituent une alternative et deviennent des concurrentes aux autres natures de fibres grâce à leur faible coût, leur facilité de mise en œuvre, des propriétés

mécaniques similaires à celles de la fibre de verre et leur capacité d'être recyclée. Ces avantages présentent un intérêt dans divers secteurs d'applications (bâtiment, filtration, automobile...), pour lesquels la fibre de verre domine le marché à hauteur de 87%. Les statistiques du marché mondial montrent une demande en constante augmentation des fibres de lin [1].

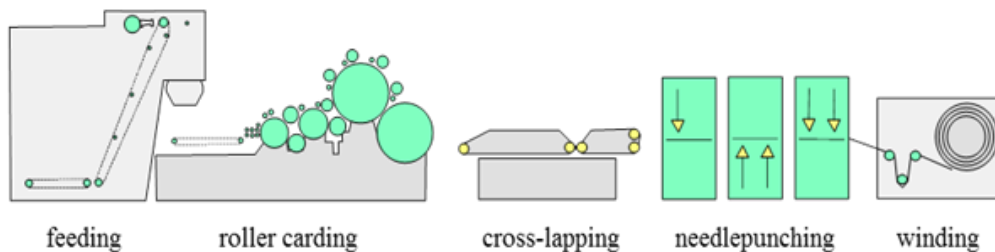
C'est dans ce contexte que s'intègre le présent travail ayant pour objectif l'étude du comportement mécanique des non-tissés à base de fibres naturelles et plus précisément de fibres de lin. Les essais réalisés se focalisent sur l'influence des paramètres de fabrication des non-tissés (masse surfacique, épaisseur, densité d'aiguilletage...) et sur les caractéristiques mécaniques du renfort.

## 2 Matériaux et méthodes expérimentales

### 2.1 Les non-tissés

Dans la présente étude, les non-tissés utilisés ont été élaborés par voie sèche où tous les échantillons ont subi une étape de consolidation mécanique par aiguilletage. Un système contenant une multitude d'aiguilles métalliques est entraîné dans un mouvement vertical pour que les aiguilles viennent transpercer la nappe afin d'enchevêtrer les fibres.

Le procédé de fabrication par voie sèche exige le passage par une étape de cardage pour individualiser, paralléliser et homogénéiser toutes les fibres afin de former un voile. La figure 1 montre un exemple de ligne de production de non-tissé, comprenant trois étapes principales: le cardage, le recouvrement et l'aiguilletage.



**Figure 1:** Ligne de production des non-tissés.

L'étape de cardage permet de paralléliser et d'organiser les fibres et par la suite la réalisation du voile de non-tissé. Le grand tambour (faisant partie des rouleaux de cardage « roller carding ») forme la nappe en superposant le voile issu du cardage afin d'atteindre le poids approprié. Enfin, l'aiguilletage consolide la structure fibreuse en enchevêtrant les fibres dans la direction de l'épaisseur. La densité d'aiguilletage s'exprime en coups/cm<sup>2</sup> (notée p/cm<sup>2</sup>).

Pour une structure non-tissé, il est important d'évoquer la notion de direction où le sens MD (direction machine) représente la direction de mise en œuvre du matériau, alors que le sens CD (direction transverse) est orthogonal au sens machine (MD).

### 2.2 Présentation des lots de matières

Deux lots de non-tissé Lin/PP, obtenus à partir de la même fibre de lin, ont été utilisés:

- Un premier lot, désigné par BC5 qui est un mélange de filasse de lin et de polypropylène, et caractérisé par un rapport de masse de 50/50. Pour cette série de matière, la densité d'aiguilletage reste à une valeur constante égale à 50 p/cm<sup>2</sup> mais la masse surfacique varie afin d'en étudier l'influence sur le comportement mécanique.

- La deuxième série, notée BC3 est constituée d'un mélange d'étope de lin et de polypropylène ayant un rapport massique 70/30, respectivement en Lin/PP. Pour ce lot, on fait varier la densité d'aiguilletage.

Il convient de noter que tous les échantillons sont aiguilletés des deux côtés avec les mêmes aiguilles et à la même profondeur de pénétration. Le tableau 1 illustre les différentes caractéristiques des deux lots de matière considérés dans la présente étude.

**Tableau 1** : Caractéristiques des non-tissés utilisés.

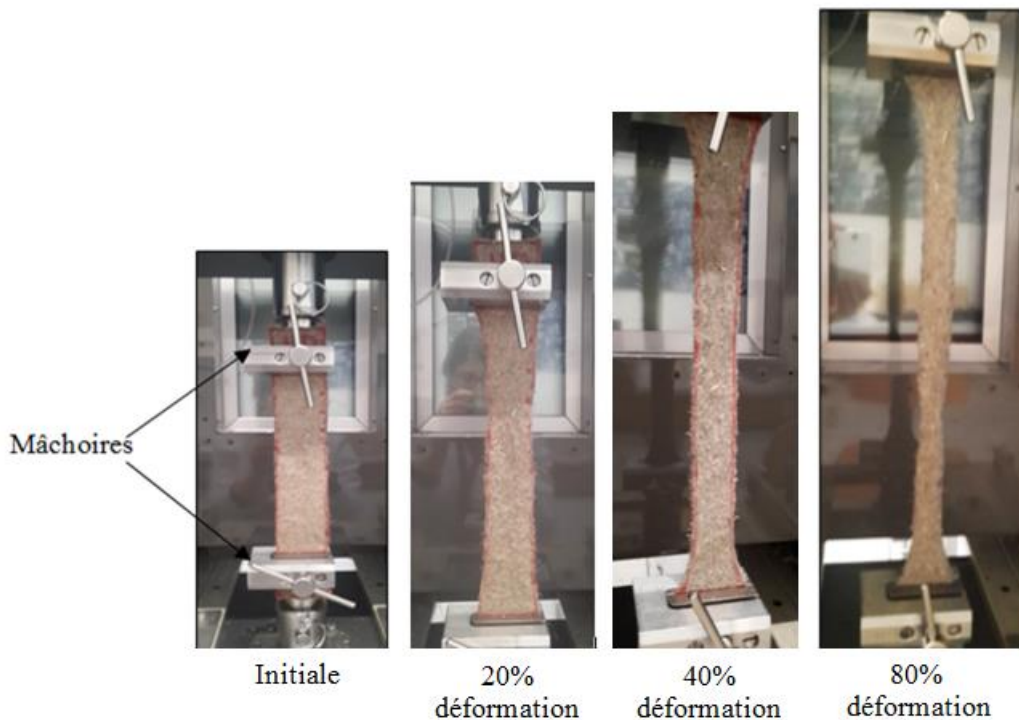
Séries	Échantillons	Rapport Massique Lin/PP (%)	Densité d'aiguilletage (p/cm <sup>2</sup> )	Longueur des fibres de lin (mm)	Longueur des fibres de PP (mm)	Epaisseur (mm)
BC 5	BC5-12	50/50	50	80	40	9.5±0.1
	BC5-16	50/50	50	80	40	8.5±0.1
	BC5-18	50/50	50	80	40	8.5±0.1
BC 3	BC3-R150	70/30	150	60	40	7.6±0.1
	BC3-R250	70/30	250	60	40	8.3±0.1
	BC3-R350	70/30	350	60	40	7.8±0.1
	BC3-R450	70/30	450	60	40	7.5±0.1

## 2.3 Méthode de caractérisation

Afin de déterminer les propriétés des renforts secs étudiés, deux étapes seront réalisées: la première consiste en une caractérisation textile de l'échantillon (mesure de la masse surfacique) et la deuxième est consacrée à la caractérisation mécanique afin de quantifier le comportement de renforts non-tissés. Pour ces essais, cinq éprouvettes par échantillon ont été testées dans les deux directions (MD et CD), dont la valeur moyenne sera représentée.

La caractérisation textile est basée sur la détermination de la masse surfacique des échantillons. Les éprouvettes sont découpées à l'aide d'un emporte-pièce de 1 dm<sup>2</sup>. Ce test suit la norme NFG 07-150 [2].

En ce qui concerne, la caractérisation en traction des renforts non-tissés qui s'effectue par le biais d'un banc de traction MTS et selon la norme EN ISO 13 934-1 [3]. La cellule de force est de 10 kN et les dimensions des éprouvettes sont de 300 × 50 mm<sup>2</sup>. L'échantillon, placé entre les deux mors a une longueur de 200 mm et la vitesse utilisée est de 100 mm/min. La figure 2 montre un exemple d'un non-tissé testé lors d'un essai de traction.



**Figure 2** : Essai de traction d'un non-tissé (référence BC5-18\_CD).

En plus des essais de traction, l'étude porte sur l'analyse du comportement en flexion qui est, dans le cas des structures textiles, un point majeur pour évaluer la drapabilité du matériau lors de sa mise en œuvre dans les applications industrielles [4].

La raideur en flexion peut être déterminée par l'intermédiaire du dispositif KES ou cantilever [5-9]. La littérature montre que lorsqu'un textile fléchit sous l'effet de son propre poids, les paramètres caractérisant la déformation ne dépendent que de la longueur de flexion et de la hauteur initiale [10, 11] mais que l'effet de frottement peut introduire des écarts sur la rigidité en flexion [12-14]. La raideur en flexion d'une structure textile peut varier en fonction de la direction de l'échantillon comme confirmé par Omrani *et al.* [15] sur un non-tissé à base de lin ayant une raideur en flexion différente en MD et CD. Le banc de test de flexion utilisé, est basé sur la méthode du flexomètre à angle fixe [10, 11, 16].

### 3 Analyse des résultats

#### 3.1 Caractérisation textile

La figure 3 reporte les mesures de masse surfacique pour les séries BC5 et BC3. La série BC5 est réalisée de sorte à augmenter la masse surfacique mais à densité d'aiguilletage constante. Pour la série BC3 élaborée avec une densité d'aiguilletage variable, l'augmentation de l'aiguilletage conduit à une légère variation de la masse surfacique, autour de  $1600 \text{ g/m}^2$ . Pour ces non-tissés de masse surfacique élevée, l'écart-type entre ces échantillons est de  $\pm 5\%$ .

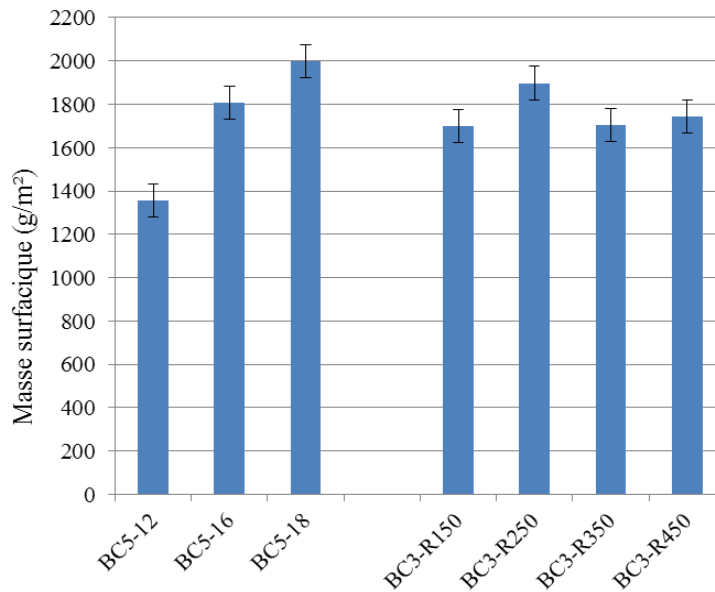


Figure 3: Mesure de la masse surfacique pour les deux séries de non-tissé.

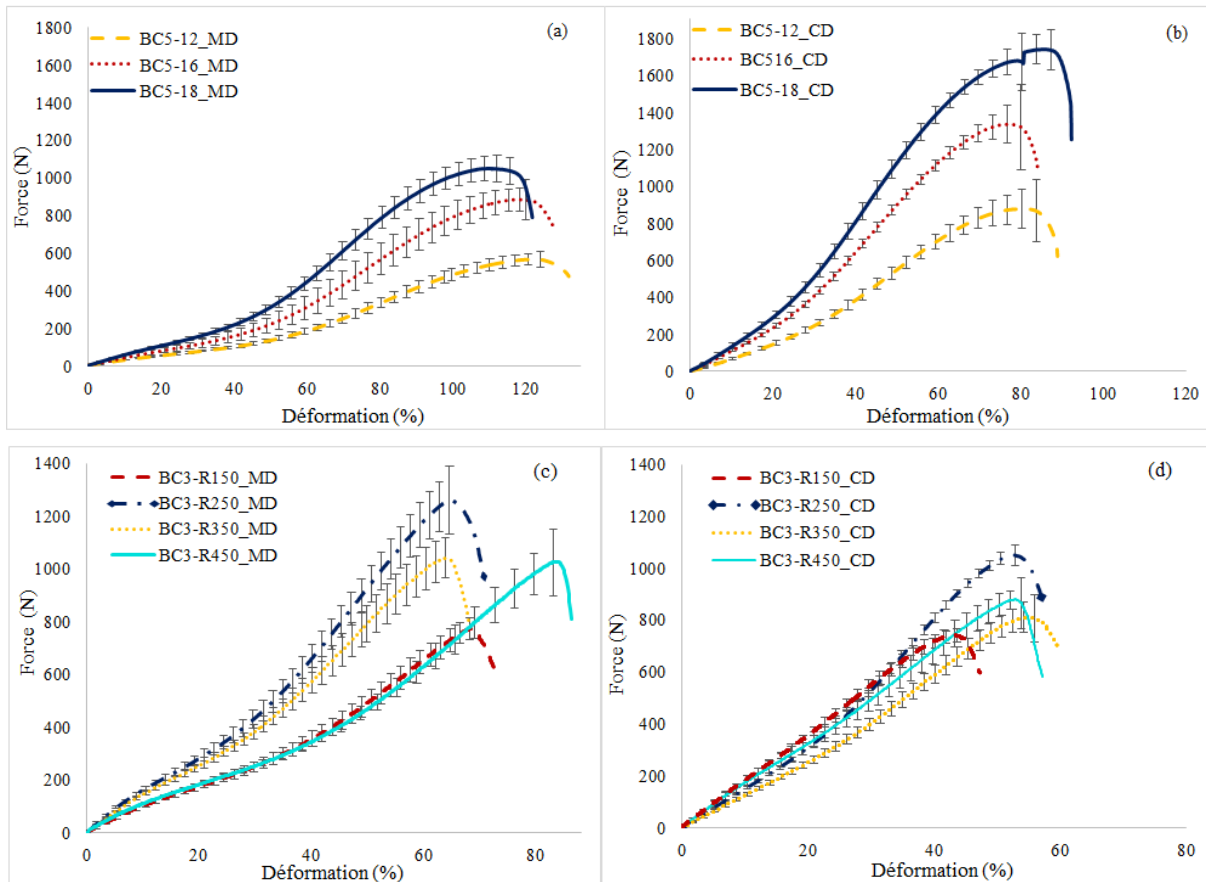
### 3.2 Traction des renforts secs

La figure 4 illustre les courbes Effort/Déformation issues des essais de traction dans les directions MD et CD pour l'ensemble des non-tissés (BC5 & BC3). Comme indiqué précédemment, la courbe présentée correspond à la courbe moyenne de cinq éprouvettes testées avec les écarts-types. Toutes les courbes présentées dans la figure 4 montrent un comportement non linéaire en grande déformation, qui diffère dans les directions MD et CD ce qui est conforme à la littérature [17]. À partir de ces courbes, on peut distinguer trois phases différentes dans le comportement du non-tissé. Une première zone linéaire associée à l'orientation des fibres dans la direction de la force appliquée, suivie d'une seconde partie caractérisée par une pente plus élevée jusqu'à la phase de rupture. Ce phénomène est défini comme une rigidification du comportement en traction de la même manière que le comportement mécanique en traction des composites à base de lin, décrit dans [18, 19, 20]. Les résultats en traction mettent en évidence un comportement anisotrope dans les deux directions (MD et CD), en particulier pour la série BC5 (figure 4 (a) & (b)). Cependant, l'écart-type dans le sens machine (MD) est plus marqué que dans le sens transverse (CD). Ceci peut être expliqué par la variation de la densité locale au sein de la structure (les déformations à la rupture sont plus importantes dans la direction machine) comme décrit par Omrani *et al.* [15]. On peut par ailleurs déduire des courbes de la série BC5 que le comportement mécanique est proportionnelle à la variation de la masse surfacique où une augmentation de la masse surfacique entraîne un comportement en traction plus élevé (en termes d'efforts à rupture).

La série BC3 (figure 4 (c) & (d)) montre un comportement quasi-similaire des non-tissés en sens CD. Alors que dans le sens MD, les non-tissés BC3-R150 et BC3-R450, ayant la plus faible et la plus élevée densité d'aiguilletage ( $150 \text{ p/cm}^2$  et  $450 \text{ p/cm}^2$ ), ont un comportement en traction similaire et les non-tissés 'moyennement' aiguilletés (BC3-R250 et BC3-R350) présentent un comportement mécanique en traction identique.

Cinq caractéristiques mécaniques peuvent être déduites de ces courbes de traction: l'effort maximal (noté  $F_{\max}$ ), la déformation à la rupture, deux pentes (Pente 1 & 2) exprimées en N, et calculées respectivement entre [0-20%] et [20-40%] et la rigidification définie par le rapport entre ces deux

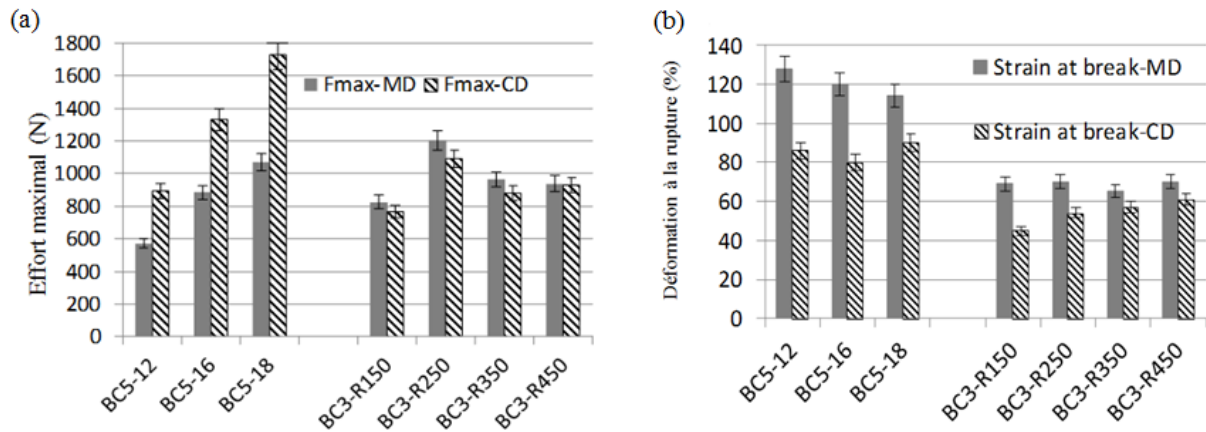
pentés (Pente 2/Pente 1). L'influence de la variation de la masse surfacique et de la densité d'aiguilletage sur le comportement mécanique des non-tissés sera analysée sur ces paramètres.



**Figure 4:** Comportement en traction: (a): BC5\_MD, (b) : BC5\_CD, (c) : BC3\_MD, (d) : BC3\_CD.

On reporte dans la figure 5 (a et b) les valeurs respectivement des efforts et des déformations maximales pour les séries BC5 et BC3 issues des courbes de traction. Concernant la série BC5, on en déduit que le comportement en traction des non-tissés dépend de la variation de la masse surfacique où l'augmentation de ce paramètre entraîne des propriétés mécaniques plus intéressantes, en termes de résistances comme décrit dans la littérature [21]. L'anisotropie est marquée avec des propriétés dans le sens CD plus élevées que le sens MD ; en termes de déformations à la rupture, autant dans le sens CD, cette caractéristique est insensible à la variation de masse surfacique autant l'augmentation de celle-ci conduit à une réduction de la déformation à la rupture dans le sens machine (MD).

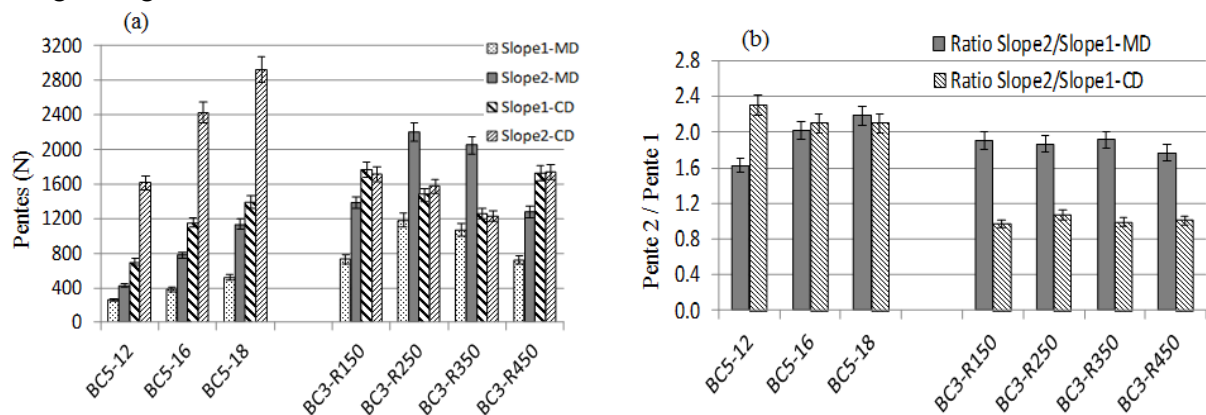
Concernant la série BC3, sur ces deux paramètres l'influence de la densité d'aiguilletage est bien marquée sur le comportement en traction. L'augmentation de la densité d'aiguilletage tend à homogénéiser le comportement en traction et à minimiser l'anisotropie entre les deux directions, en termes d'efforts mais également en déformation à la rupture, pour atteindre, notamment pour les échantillons avec la plus haute densité d'aiguilletage (BC3-R450) un comportement quasi-isotrope entre les deux directions. Même si les deux séries n'ont pas été élaborées avec la même proportion de fibres (50/50 de lin/PP pour le BC5 ; 70/30 pour la série BC3), la comparaison des valeurs obtenues sur ces deux paramètres entre ces échantillons de BC3 et la série BC5-16, de masse surfacique assez proche (voir figure 3) montre que l'augmentation de la densité d'aiguilletage tend à diminuer les efforts dans le sens transverse, et les déformations dans les deux directions.



**Figure 5:** Propriétés mécaniques en traction des BC5 & BC3 en sens MD & CD : (a) force maximale, (b) déformation à la rupture.

La figure 6 met en évidence les deux pentes calculées respectivement entre [0-20%] et [20-40%] à partir de ces courbes de traction et exprimées en N ainsi que le rapport entre ces deux pentes. Les histogrammes de la série BC5 montre que l'augmentation de la masse surfacique entraîne une augmentation de ces rigidités en traction dans les deux directions avec des valeurs plus importantes dans le sens CD. Cette augmentation de la masse surfacique conduit à augmenter le ratio des deux pentes, dans le sens machine, afin d'atteindre une rigidification similaire à celle dans le sens CD.

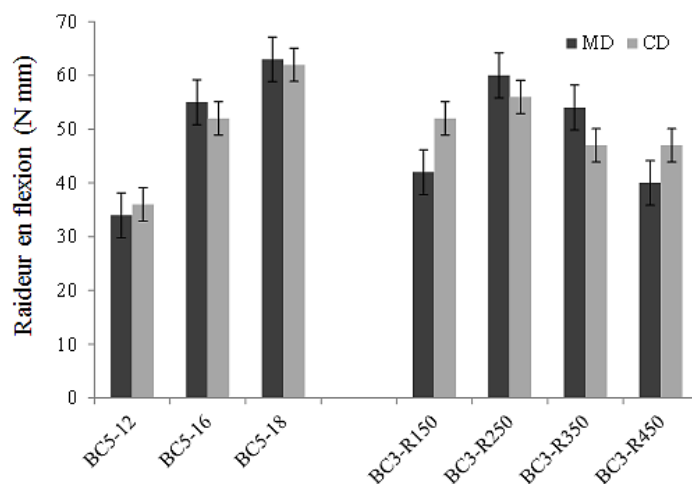
Pour la série BC3, l'augmentation de la densité d'aiguilletage n'a peu d'effet sur les deux pentes considérées dans le sens transverse (CD), qui restent du même ordre de grandeur, et par conséquent peu de phénomènes de rigidification, avec un rapport proche de 1 (figure 6 (b)). En sens machine, le ratio de rigidification atteint un rapport double de celui de CD, indépendamment de la densité d'aiguilletage.



**Figure 6:** Illustrations pour BC5 & BC3 en sens MD & CD de : (a) : pentes en traction, (b) : rapport des pentes.

### 3.3 Flexion sèche

Les résultats obtenus à l'issue des essais de flexion par le dispositif KES (cantilever) sont rapportés dans la figure 7. On constate également que la raideur en flexion augmente avec l'augmentation de la masse surfacique (série BC5). Pour la série BC3, l'augmentation de la densité d'aiguilletage se concrétise par une évolution puis une décroissance des raideurs en flexion.



**Figure 7:** Raideur en flexion des séries BC5 & BC3 en sens MD & CD.

Afin de synthétiser les différents résultats obtenus, on a procédé à un calcul des ratios de la raideur en flexion en sens MD & CD, comme illustré dans le tableau 2. On remarque que les non-tissés BC5 ont une raideur en flexion quasi-similaire dans le sens MD & CD, et par conséquent, un comportement en flexion assez homogène pour les différents non-tissés de ce lot de matière et dans les deux directions. Alors que pour la série BC3, on note un même rapport de rigidité CD/MD pour les non-tissés à haute (BC3-R450) et à basse (BC3-R150) densité d'aiguilletage et supérieur à 1, et par ailleurs un rapport CD/MD proche de 1 pour les structures à aiguilletage modéré (BC3-250 & BC3-R350). L'influence de la densité d'aiguilletage sur l'isotropie du matériau, constatée pour les caractéristiques en traction, semble moins prépondérante pour le comportement en flexion

**Tableau 2 :** Ratio des raideurs en flexion CD/MD.

Séries	Références	Ratio CD/MD
BC5	BC5-12	1.05
	BC5-16	0.95
	BC5-18	0.98
BC3	BC3-R150	1.23
	BC3-R250	0.93
	BC3-R350	0.87
	BC3-R450	1.18

On exprime dans le tableau 3 les ratios de rigidité à la flexion en fonction du rapport de la masse surfacique pour la série BC5. Les résultats montrent que la variation de la raideur en flexion est liée à la variation de la masse surfacique. On constate également une augmentation quasi-identique entre les ratios de la masse surfacique et ceux des raideurs en flexion dans le sens MD et CD. Par conséquent, on peut conclure, qu'à densité d'aiguilletage constante, la masse surfacique influe de manière significative sur le comportement en flexion.



**Tableau 3:** Ratio de raideur en flexion en fonction de la masse surfacique.

Références	Ratio. Masse surfacique	Ratio. Raideur en flexion	
		MD	CD
BC5-12/ BC5-16	1.33	1.62	1.45
BC5-16/ BC5-18	1.13	1.15	1.19

## 4 Conclusion

Dans le présent travail, une étude expérimentale a été menée afin d'étudier l'influence de la variation des paramètres d'élaboration des non-tissés sur le comportement mécanique des renforts non-tissés à base de fibres de lin/PP. Le comportement mécanique en traction est caractérisé par une forte anisotropie et des grandes déformations. Ces caractéristiques, notamment la déformabilité sont un atout pour la réalisation de pièces de formes complexes. Sur deux lots de non-tissés, élaborés pour faire varier séparément la masse surfacique et la densité d'aiguilletage, le comportement mécanique en traction a été identifié à l'état sec, avant imprégnation des renforts. L'augmentation de la masse surfacique des échantillons a conduit à une augmentation des performances mécaniques en résistance et rigidité, tout en conservant l'anisotropie dans les deux directions associées à l'élaboration. La variation de la densité d'aiguilletage a montré une influence sur la réduction de cette anisotropie, en termes d'effort et de déformation à la rupture. Le comportement en traction étant caractérisé par une évolution de la rigidité, le ratio, défini comme une rigidification du comportement a été également étudié. Le comportement en flexion influant dans les procédés de mise en forme sur l'intensité des défauts de type pli, l'analyse expérimentale a également portée sur la détermination de la raideur en flexion, sur les deux lots de matières. L'influence notable de l'augmentation de la masse surfacique sur la raideur a été mise en valeur.

Par conséquent, l'analyse de la déformabilité des non-tissés lors de la mise en forme, première étape du procédé RTM constituera la suite des travaux à venir.

## Références

- [1] Confédération Européenne du Lin et de Chanvre/ [www.mastersoflinen.com](http://www.mastersoflinen.com)
- [2] NFG 07-150, Norme standard pour la mesure de la masse surfacique des structures textiles, [/www.sagaweb.afnor.org/](http://www.sagaweb.afnor.org/)
- [3] EN ISO 13934-1, Norme standard pour la mesure des propriétés en traction des structures non-tissés, [/www.sagaweb.afnor.org/](http://www.sagaweb.afnor.org/)
- [4] M.R. Sadeghi, A.A.A. Jeddi, S.S. Najari, Theoretical and experimental analysis of bending rigidity of plain and twill woven fabrics, *Journal of The Textile Institute*, 2017, published on line: 26 Jan. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00405000.2017.1280760>
- [5] F.T. Peirce, The handle of cloth as a measurable quantity, *Journal of The Textile Institute*, 1937; 21: 377–416
- [6] F.T. Peirce, The geometry of cloth structure, *Journal of The Textile Institute*, 1937; 28: 45–96
- [7] N.J. Abbott, The measurement of stiffness in textile fabrics, *Textile Research Journal*, 1951; 21(6): 435–444
- [8] J. Skelton, The bending behavior of fabrics at high curvatures, *Textile Research Journal*, 1971; 41(2): 174–181

- [9] E. De Bilbao, D. Soulat, G. Hivet, A. Gasser, Experimental Study of Bending Behaviour of Reinforcements, *Experimental Mechanics*, 2010;50: 333–51
- [10] K. Bilisik, Bending behavior of multilayered and multidirectional stitched aramid woven fabric structures, *Textile Research Journal*, 2011, 81, 17:1748-1761
- [11] K. Bilisik, G. Yolacan, Experimental determination of bending behavior of multilayered and multidirectionally-stitched E-Glass fabric structures for composites, *Textile Research Journal*, 2012, 82,10:1038-1049
- [12] P. Grosberg, N.M. Swani, The mechanical properties of woven fabrics part IV: The determination of the bending rigidity and frictional restraint in woven fabrics, *Textile Research Journal*, 1966; 36(4): 338–345
- [13] P. Grosberg, The mechanical properties of woven fabrics part II: The bending of woven fabrics, *Textile Research Journal*, 1966; 36(3): 205–214
- [14] J. Hu, *Structure and mechanics of woven fabrics*, Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2004
- [15] F. Omrani, P. Wang, D. Soulat, M. Ferreira, P. Ouagne, Analysis of the deformability of flax-fibre nonwoven fabrics during manufacturing, *Composite Part B: Eng Available on line November 3*, 2016, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.003>
- [16] ISO 4604: Textiles glass – Woven fabrics – Determination of conventional flexural stiffness – Fixed angle flexometer method, April 2004
- [17] F. Farukh, E. Demirci, B. Sabuncuoglu, M. Acar, B. Pourdeyhimi, V.V. Silberschmidt, Mechanical behaviour of nonwovens: Analysis of effect of manufacturing parameters with parametric computational model, *Computational Materials Science*, Elsevier B.V. , 2014, 94, 8-16, <http://dx.doi.org/10.1016/j.commsci.2013.12.040>
- [18] F. Bensadoun, K.A.M Vallons, L.B. Lessard, I. Verpoest, A.W. Van Vuure, Fatigue behaviour assessment of flax–epoxy composites, *Composite Part A: Applied Science Manufacturing*, 2016; 82:253-66, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.11.003>
- [19] D.U. Shah, R.K. Nag, M.J. Clifford, Why do we observe significant differences between measured and ‘back-calculated’ properties of natural fibres? *Cellulose* 2016, 23, 3, 1481-1490
- [20] D.U. Shah, P.J. Schubel, M.J. Clifford, P. Licence, The tensile behavior of off-axis loaded plant fiber composites: An insight on the nonlinear stress–strain response, *Polymer Composite*, 2012, 33, 9, 1494-1504, DOI: 10.1002/pc.22279
- [21] D. Xue, M. Miao, H. Hu, Permeability anisotropy of flax nonwoven mats in vacuum-assisted resin transfer molding, *Journal of The Textile Institute*, 2011, 102:7, 612-620