

## **Composite stratifié hybride carbone/lin : caractérisation des renforts**

### ***Carbon/ Flax hybrid laminate composite : reinforcements characterization***

**Etonam Tossou<sup>1</sup>, Alexandre Vivet<sup>1</sup>, Thibaut Simon<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> : Département, CIMAP  
Université de Caen Basse Normandie / IUT d'Alençon  
Pôle universitaire de Montfoulon, 61250 Damigny  
e-mail : etonam.tossou@unicaen.fr / alexandre.vivet@unicaen.fr

#### **Résumé**

La caractérisation du renfort est importante pour bien comprendre le comportement d'un matériau composite lors de sa mise en œuvre. Dans cet article, le travail de caractérisation réalisé sur des renforts tissés de lin et de carbone sera présenté. Des observations à la caméra ont été réalisées sur le tissu. Le but est de comprendre son architecture afin de connaître les sources de porosité. Un modèle 3D du tissu a été ensuite créé grâce à l'identification de certains paramètres entre autres le nombre de fils constituant les mèches, le diamètre des fils, les espacements inter-mèches... Des essais de compaction sur des couches de tissus de lin ont montré que le lin n'est pas compactable (faible taux volumique de fibres) à cause de la présence des porosités. Afin de compenser cette porosité, plusieurs séquences hybrides lin/carbone ont été testées à travers des tests de compaction. Le tissu de carbone est non poreux comparé au lin. Les résultats ont montré que les propriétés d'un composite stratifié dépendent de la séquence d'empilement. Nous en sommes arrivés à la conclusion selon laquelle pour obtenir une structure compacte, il faut placer les plis de carbone de part et d'autres des plis de lin.

#### **Abstract**

The reinforcement characterization is important in order to understand the behavior of a composite material during manufacturing process. In this article, the characterization work carried out on woven flax and carbon reinforcements will be presented. Optic observations were made on the flax fabric. The goal is to understand its architecture in order to know the sources of porosity. A 3D model of the fabric was then created by identifying some parameters such as the number of yarns constituting the tows, the diameter of the yarns, the spacings between the tows.. Compaction tests on laminates of flax fabrics have shown that flax is not compactable (low fiber volume ratio) because of the presence of porosities. In order to reduce this porosity, several hybrid lin / carbon sequences were tested through compaction tests. The carbon fabric is non-porous compared to flax. The results showed that the properties of a composite laminate depend on the stacking sequence. We have come to the conclusion that in order to obtain a compact structure, carbon plies must be placed on each side of the flax plies

**Mots Clés :** renfort tissu, caractérisation, compaction, mise en œuvre

**Keywords:** fabric reinforcement, characterization, compaction, manufacturing

### **1. Introduction**

Dans ce travail, on s'intéresse à la caractérisation de renforts tissés utilisés dans les matériaux composites. Nous travaillons sur des stratifiés hybrides carbone/lin. Donc notre étude porte sur ces deux renforts.

Le but est, à part l'allègement de la structure, de développer un matériau multifonctions capables d'offrir de grandes performances mécaniques comme l'amortissent de vibrations et l'absorption d'énergie durant un choc. Nous trouvons qu'il est important de connaître le comportement du renfort.

En effet, au sein du renfort, la présence de certains défauts comme la porosité détériore significativement les propriétés du matériau composite final. La caractérisation expérimentale du renfort serait donc pertinente afin de prédire et d'éviter une telle situation [1].

Le but de notre étude est d'une part de comprendre l'architecture du tissu de lin à travers la caractérisation optique et d'autre part de voir si l'on pourrait compenser par le carbone les porosités contenues dans le tissu de lin qui est un matériau assez poreux contrairement au tissu de carbone.

Pour ce faire, nous avons donc développé des essais de compaction sur plusieurs couches de tissus de lin et de carbone, hybrides et non hybrides. De ces essais, nous remarquons que le lin est nettement moins compactable que le carbone. Pour avoir une meilleure structure en termes de propriétés mécaniques, il faut mettre les plis de carbone de chaque côté des plis de lin.

Ce travail nous a également permis de créer un modèle 3D du tissu de lin.

Dans cet article, seront présentés les différents matériaux utilisés, la démarche expérimentale suivie ainsi que les résultats et discussions. Une conclusion générale sera finalement établie.

## 2. Démarche expérimentale

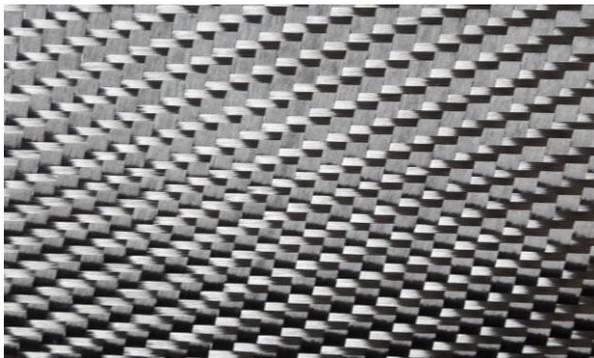
### 2.1 Description des tissus utilisés

Deux différents tissus ont été utilisés dans cette étude : le lin et le carbone. Ils sont représentés sur les figures (Fig. 1 et Fig. 2)

Le tissu de carbone est un sergé 2/2 et possède un grammage (masse par unité de surface) de 189 g/m<sup>2</sup>. Quant au tissu de lin, son grammage est de 240 g/m<sup>2</sup>. Il est constitué de mèches blanches et grises suivant le sens trame ou chaîne. Contrairement au carbone, il a une armure de type toile et est tissé d'une manière assez complexe.

La première partie de notre étude est motivée par la compréhension de cette armure.

Dans la section suivante nous allons décrire les différentes techniques utilisées pour caractériser ce tissu.



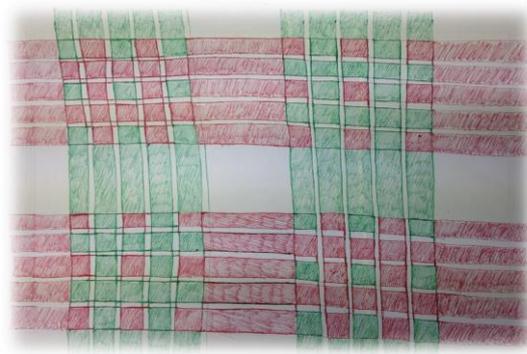
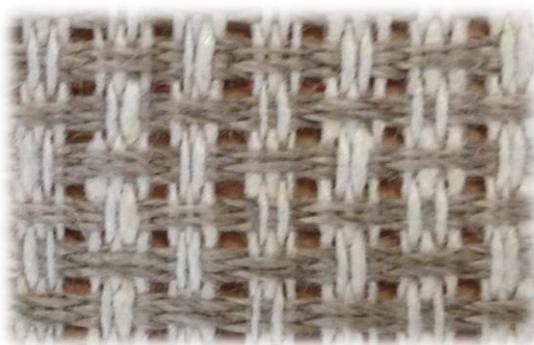
*Fig. 1. Tissu de carbone*



*Fig. 2. Tissu de lin*

### 2.2 Caractérisation du tissu de lin

Après une observation attentive du tissu, nous avons dans un premier temps essayé de comprendre le tissage des mèches de trame et de chaîne et l'entremêlement des fils entre eux. La figure (Fig. 3) illustre clairement l'architecture de ce tissu. Les mèches sont composées de 5 fils tant au niveau de la trame que de la chaîne.



*Fig.3. Architecture du tissu de lin*

Les fils se tissent d'une manière très spéciale. Si nous désignons par t un fil trame et c un fil chaîne, nous voyons aussi bien dans le sens horizontal que vertical, une alternance de ces deux systèmes : (2t-3c-3t-2c) et (2c-3t-3c-2t) au niveau des nœuds du tissu. La figure suivante (Fig. 4), où nous avons effectué des observations à la caméra optique confirme cette configuration.

Après avoir compris l'architecture de ce tissu de lin, nous nous intéressons à présent à une étude paramétrique afin de compléter notre travail de caractérisation.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, des observations optiques ont été faites sur différents endroits du tissu afin de déterminer l'espacement entre les mèches de trame et les mèches de chaîne.



Fig. 4. Zoom sur un nœud

Ensuite nous avons extrait une certaine quantité de fils, blancs et gris du tissu (Fig. 5a) et nous avons effectué des mesures optiques (Fig. 5b). L'objectif est de connaître le diamètre d'un fil élémentaire.



Fig. 5a. Fils constituant les mèches

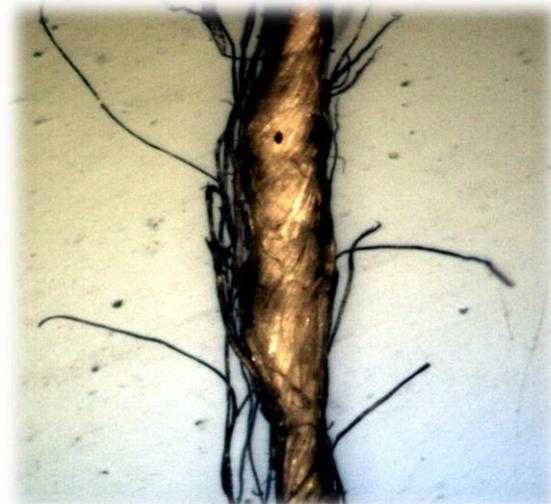


Fig. 5b. Fil élémentaire vu au microscope

Enfin des mesures ont été faites afin de connaître l'épaisseur du tissu de lin.

La connaissance de ces différents paramètres nous permettra de construire une représentation 3D d'un pli du tissu et d'estimer à cet effet le taux de fibres contenu dans celui-ci.

### 2.3 Construction d'un modèle 3D

La construction du modèle 3D a été réalisée à l'aide du logiciel TexGen développé pour la modélisation des structures textiles. Le nombre de fils par mèche, l'espacement entre les mèches aussi bien dans la direction trame que dans la direction chaîne ainsi que l'épaisseur du tissu sont nécessaires pour la mise en place de cette représentation volumique.

### 2.4 Essai de compaction

À la suite de la caractérisation décrite précédemment, des essais de compaction ont été menés sur les tissus de lin et de carbone. Plusieurs séquences d'empilement ont été testées. Les séquences sont réparties en deux groupes : les non-hybrides et les hybrides.

Le but est de connaître le taux de fibres que nous pouvons obtenir lors de la mise en œuvre du composite à travers le procédé d'infusion de résine sous vide et d'en déduire la structure la plus compacte.

La compaction a été faite à l'aide de deux massifs en acier, l'un fixe et l'autre mobile, de forme cylindrique de diamètre 100 mm montés sur une machine de traction MTS Criterion Model 43. L'effort de compaction est mesuré grâce à un capteur d'effort de 5 kN. Un extensomètre mesure le déplacement du plateau mobile. L'essai est exécuté à une vitesse de 0.5 N/mm.

Les tests ont été menés sur huit différentes séquences dont six hybrides et deux non hybrides. Chaque séquence est constituée de 8 plis. Les plis sont des disques de 120 mm de diamètre. La configuration 50% lin et 50% carbone est choisie au niveau des séquences hybrides. Afin de garder les propriétés du matériau final homogènes, une symétrie miroir est respectée. La figure (Fig. 6) montre le dispositif expérimental que nous avons utilisé.

Les essais ont été répétés plusieurs fois et à chaque fois les tissus sont renouvelés car nous considérons que les tissus se déforment après chaque compactage et donc leurs propriétés évolueraient.

Les résultats obtenus présentent l'évolution de la pression de compaction en fonction de la fraction volumique de fibres.



*Fig. 6. Dispositif expérimental*

### 3. Résultats et discussions

#### 3.1 Paramètres géométriques et représentation 3D du tissu de lin

Les différents paramètres mesurés se présentent comme suit :

- diamètre de fil sens trame et chaîne : 0.374 mm avec un écart type de 30% ;
- l'espacement inter-chaînes : 0.866 mm avec un écart-type de 16% ;
- l'espacement inter-trames : 0,773 mm, avec un écart-type de 14% ;
- l'épaisseur moyenne : 0,748 mm, ce qui correspond à deux fois le diamètre du fil.

Connaissant donc ces paramètres, nous sommes en mesure d'établir la représentation volumique (Fig. 7) d'une maille du tissu de lin sous TexGen.

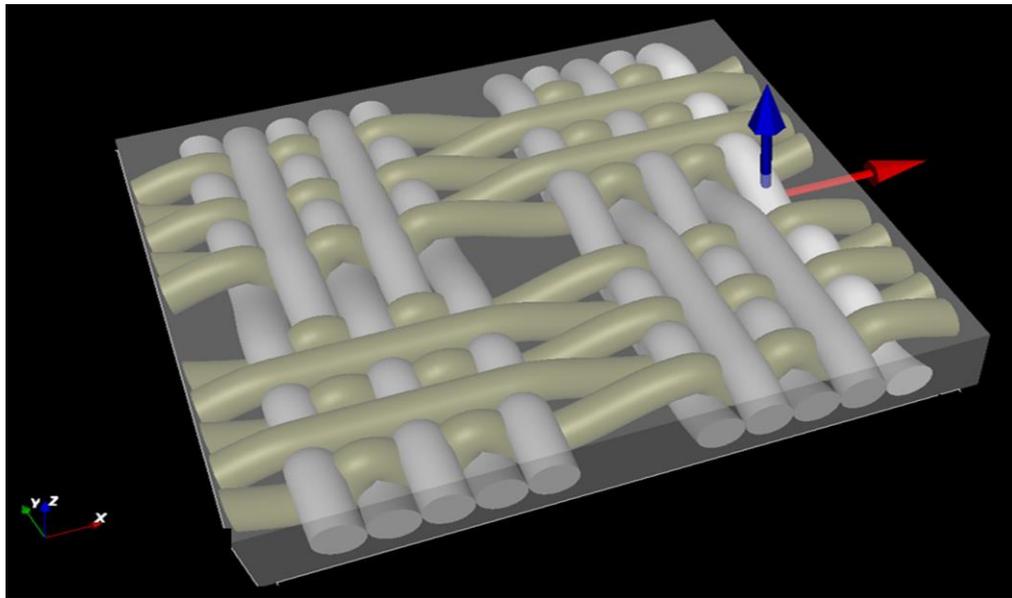


Fig. 7. Représentation 3D du tissu de lin

Ce travail nous a permis de calculer la fraction volumique de fibres qui s'élève à 65 % dans la maille représentée.

#### 3.1 Essais de compaction

L'effort de compaction et le déplacement des plateaux de compaction ont été mesurés lors des essais mais les résultats montreront la pression de compaction en fonction du taux volumique de fibres. La pression  $P$  est le rapport entre l'effort mesuré  $F$  et la surface du tissu  $S$  ( $S=\pi r^2$  où  $r$  est le rayon du plateau) tandis que la fraction volumique  $V_f$  est donnée par la relation suivante (Eq. 1) [3] :

$$V_f = \left( \frac{G_c n_c}{\rho_c} + \frac{G_l n_l}{\rho_l} \right) \frac{1}{\delta} \quad (\text{Eq. 1})$$

où  $G_c$ ,  $n_c$ ,  $\rho_c$  et  $G_l$ ,  $n_l$ ,  $\rho_l$  sont respectivement le grammage, le nombre de plis et la masse volumique du tissu de carbone et de lin.  $\delta$  est l'épaisseur du renfort comprimé. La relation (Eq. 2) montre le calcul de cette épaisseur.

$$\delta = e_i - \Delta e \quad (\text{Eq. 2})$$

avec  $e_i$  l'épaisseur initiale du renfort qui correspond à l'écart entre les deux plateaux avant le début de l'essai et  $\Delta e$  la variation de déplacement mesurée par la machine d'essai.

Les courbes qui seront présentées ont été obtenues par fitting des points expérimentaux selon une loi puissance  $P = a(V_f)^b$  [2] sous Matlab, où  $a$  et  $b$  sont des paramètres que l'on peut aisément déterminer. La figure (Fig. 8) montre, la dispersion des points expérimentaux pour les essais réalisés sur le tissu de lin

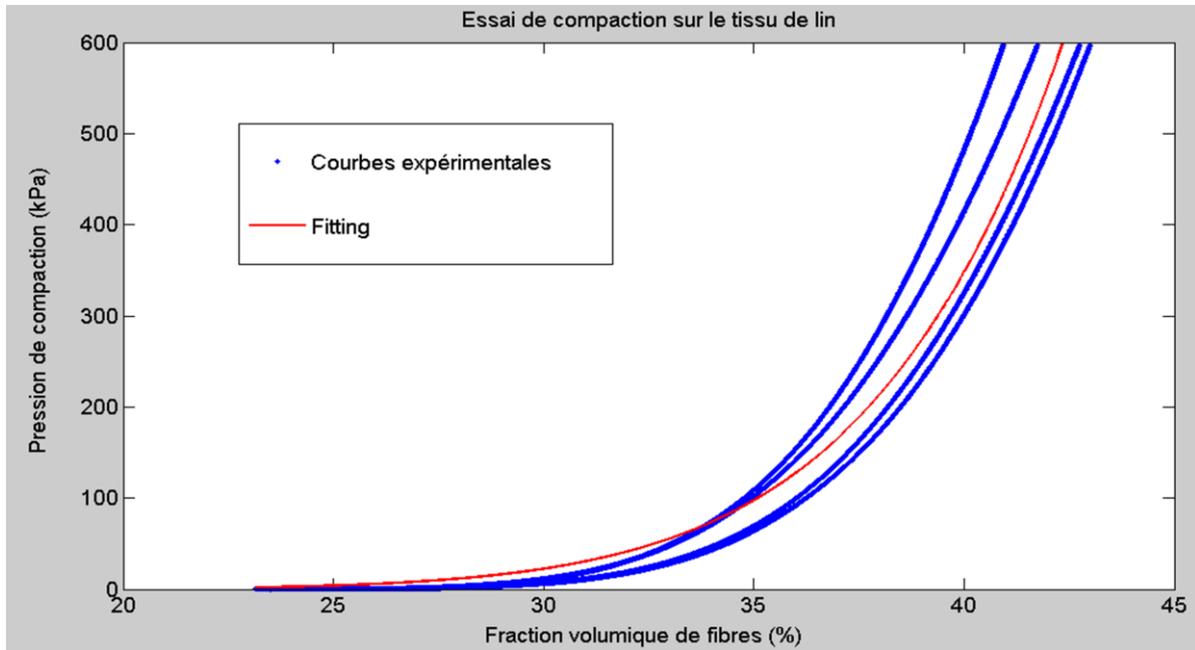


Fig. 8. Courbe de dispersion

### 3.1.1 Les couches non-hybrides

Les courbes issues des essais menés sur les séquences non-hybrides 100% lin et 100% carbone sont indiquées sur la figure (Fig. 8)

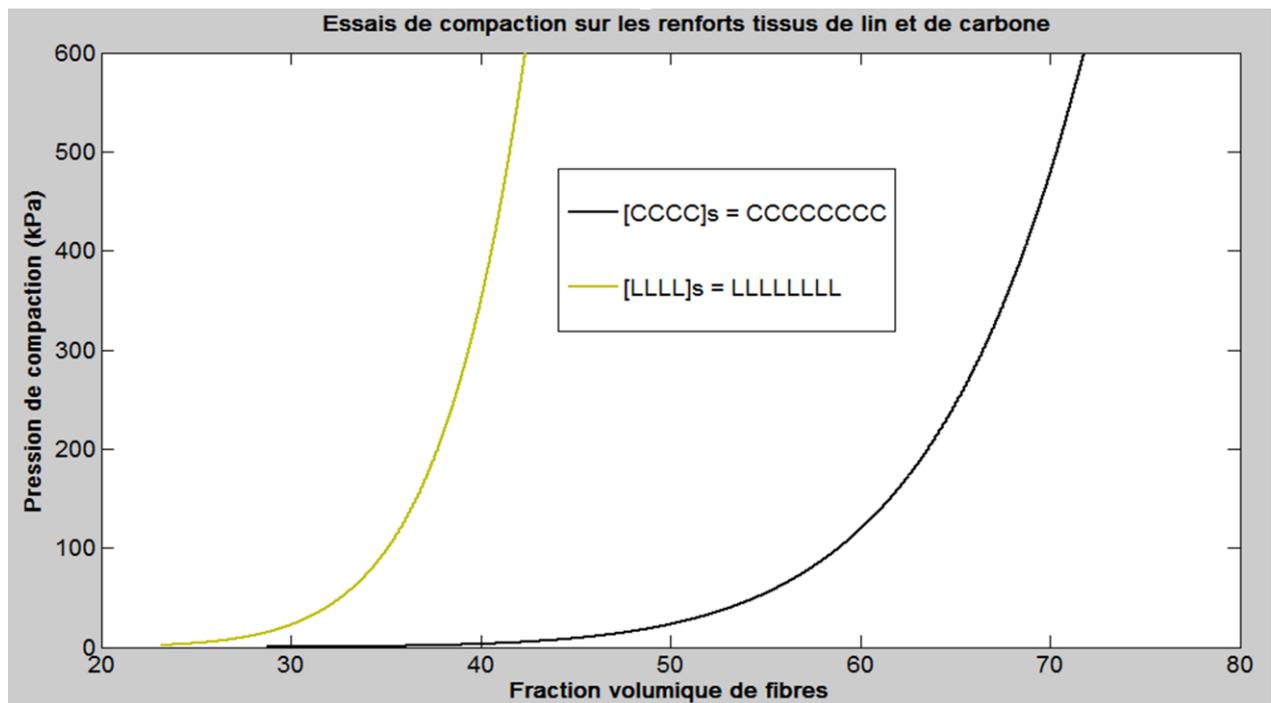


Fig. 8. Résultats des essais de compaction sur les séquences non-hybrides

Nous observons un comportement non linéaire avec une augmentation rapide de la pression de compaction en fonction de la fraction volumique de fibres.

En début d'essai, lorsque les efforts appliqués sont faibles, l'épaisseur du renfort diminue essentiellement à cause de la fermeture des pores entre les fibres et de la désondulation (redressement) des mèches. Plus les efforts sont importants, plus les fibres sont en contact et le frottement entre fibres commence à s'opposer à la compaction. La résistance à la compression du renfort augmente alors exponentiellement avec la pression. A partir d'un certain effort, quand les vides entre fibres sont suffisamment petits et quand le glissement de fibres atteint sa limite, les fibres sont elles-mêmes comprimées. On voit que les efforts s'élèvent rapidement en fonction de la fraction volumique [2].

À 1 bar (pression d'infusion), nous obtenons, pour 8 plis, 35% comme fraction volumique de fibres pour le lin et 59% pour le carbone. On en déduit que le lin est nettement moins compactable que le carbone. Ceci est dû non seulement au renfort de type fil qui est non déformable par rapport à un renfort mèche mais aussi à la présence des espaces inter-mèches dans le tissu de lin.

### 3.1.2 Les couches hybrides

Les résultats obtenus par rapport aux séquences non-hybrides sont montrés (Fig. 9). Les six séquences testées sont données dans le tableau (Tab. 1) avec leurs taux de fibres respectifs.

On observe le même type de comportement. Dans ce cas, la fraction volumique de fibres évolue de 40 à 43%, à une pression de 1 bar. On remarque que la séquence [CCLL]<sub>s</sub> avec 2 couches de carbone sur chaque extrémité et 4 couches de lin au milieu a la meilleure fraction volumique de fibres et par conséquent possède le taux de porosité le plus faible. On en déduit qu'elle présente la structure la plus compacte. Pour améliorer les propriétés du stratifié hybride, il faut mettre les plis de carbone à l'extérieur. Cela remplit les espaces inter-mèches et diminue ainsi les porosités.

On retient finalement que malgré le fait que le carbone n'arrive pas à compenser totalement les porosités contenues dans le tissu de lin, l'hybridation avec le carbone améliore nettement le taux de fibres initialement obtenu avec une séquence 100% lin.

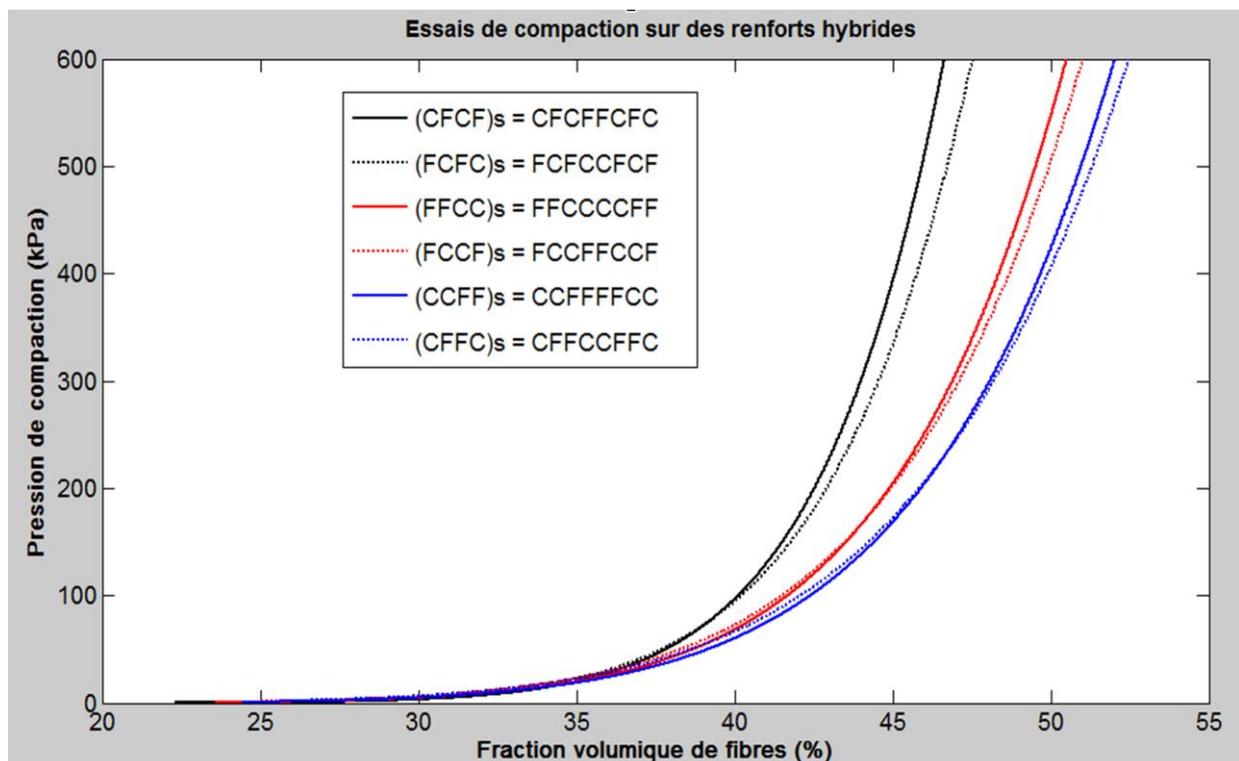


Fig. 9. Résultats des essais de compaction sur les séquences hybrides

Séquence	[CCLL]s	[CLCL]s	[CLLC]s	[LCCL]s	[LCLC]s	[LLCC]s
Taux de fibres à 1 bar (%)	43,325	40,16	43,225	42,3	40,5	42,5

Tab. 1. Les différentes séquences d'empilement avec leurs taux de fibres maximum respectifs à 1 bar

#### 4. Conclusion

Le comportement d'un matériau composite dépend de celui de ses constituants que sont la matrice et le renfort. Dans ce travail nous nous sommes intéressés au renfort. Des travaux de caractérisation ont été menés sur des renforts tissés de lin et de carbone. Les résultats de notre étude ont été présentés. Le travail a été fait en deux volets.

Une étude de caractérisation dont le but est de comprendre l'architecture du tissu de lin a été faite dans un premier temps et des essais de compaction ont été réalisés sur plusieurs séquences d'empilement dans un second temps. Nous avons réussi à identifier la manière dont le tissage a été fait au niveau des mèches et des fils. Grâce à des mesures et observations optiques nous avons déterminé des paramètres qui caractérisent ce tissu. Ceci nous a permis d'en construire une représentation volumique d'une maille de ce tissu et d'estimer le taux de fibres.

Nous avons vu à travers les essais de compaction que suivant le type de séquence le taux de fibres varie. Le choix de la séquence d'empilement est donc très important dans le processus de mise en œuvre du composite car ses propriétés en dépendent.

Le lin, à cause de sa structure poreuse est moins compactable que le carbone. Pour améliorer ce défaut, plusieurs hybridations équilibrées de ces deux matériaux ont été faites et on a trouvé qu'en mettant les couches de carbone de part et d'autre des couches de lin, on obtient la meilleure séquence en termes de propriétés mécaniques. Les prochains travaux seront consacrés à la mise en œuvre de ces différents matériaux par infusion de résine et seront ensuite caractérisés par le biais d'autres essais.

#### Références

- [1] J-E. ROCHER, S. ALLAOUI, G. HIVET, E. BLOND, « Caractérisation expérimentale du comportement de deux renforts 3D de mèches coméleées ». *JNC 18, Nantes, France*. Papier 134. <hal-00835903>, Juin 2013.
- [2] Q.T. NGUYEN, « Analyse expérimentale et numérique de la compaction des renforts fibreux. Application pour la perméabilité ». *Thèse de doctorat*, Octobre 2011.
- [3] Q.T. NGUYEN, E. VIDAL-SALLE and al, « Mesoscopic scale analyses of textile composite reinforcement compaction ». *Composites: Part B 44*, pp. 231–241, 2013