



HAL
open science

Analyse prédictive du processus d'étirage de rubans de fibres végétales : exemple du lin

Moussa Gomina, Antoine Barbulee, Joel Breard, Davy Duriatti

► To cite this version:

Moussa Gomina, Antoine Barbulee, Joel Breard, Davy Duriatti. Analyse prédictive du processus d'étirage de rubans de fibres végétales : exemple du lin. 21èmes Journées Nationales sur les Composites, Jul 2019, Bordeaux, France. pp.1-10. hal-02394002

HAL Id: hal-02394002

<https://hal.science/hal-02394002>

Submitted on 4 Dec 2019

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.

Analyse prédictive du processus d'étirage de rubans de fibres végétales : exemple du lin

Predictive analysis of drawing plant fiber rovings: example of flax

Moussa Gomina¹, Antoine Barbulée², Joël Bréard³, Davy Duriatti²

1 : CRISMAT UMR 6508 / CNRT MATERIAUX
ENSICAEN, 6 Bd Maréchal Juin, F- 14050 Caen Cedex 4
e-mail : moussa.gomina@ensicaen.fr

2 : DEPESTELE/TEILLAGE VANDECANDELAERE
5 rue de l'Eglise, F- 14540 Bourguébus
e-mail : dduriatti@depestele.com

3 : LOMC UMR 6294 / CNRT MATERIAUX
Université du Havre, Normandie Université
53 rue Prony, F- 78058 Le Havre
e-mail : joel.breard@univ-lehavre.fr

Résumé

L'étirage est le processus industriel qui consiste à affiner un ruban de fibres, c'est à dire obtenir une section prédéterminée plus faible et la plus homogène possible. Les changements morphologiques qui s'ensuivent sont corrélés à des réductions des propriétés mécaniques du ruban. Dans ce travail, nous étudions l'influence des étirages successifs sur la morphologie de rubans de fibres de lin issus du peignage. Les cinétiques de raccourcissement et de réduction de section des faisceaux de fibres dans les rubans sont déterminées en analysant les variations de population (en longueur ou en section) avant et après chaque étirage. Il ressort que la réduction de section des faisceaux de fibres est plus prononcée que l'est leur raccourcissement. Par ailleurs, ce processus réduit fortement la teneur des rubans en résidus corticaux restant après le peignage, ce qui contribue à améliorer leur imprégnation par les polymères.

Abstract

Drawing is the industrial process of refining a roving of fibers so as to obtain a predetermined smaller and more homogeneous cross-section. The ensuing morphological changes are correlated with reductions in the mechanical properties. In this work, we investigate the influence of successive drawings on the morphology of flax fiber rovings. The kinetics of shortening and cross-section reduction of fiber bundles in the rovings are determined by analyzing population changes (length or cross-section) before and after each drawing. It appears that the reduction in cross-section of fiber bundles is more pronounced than is their shortening. Furthermore, drawing greatly reduces the content of the rovings in residues not eliminated by combing, which contributes to improve their impregnation with polymers.

Mots Clés : Composite biosourcé, fibre de lin, étirage, morphologie, endommagements, propriétés mécaniques.

Keywords: Biocomposites, flax fiber, drawing, morphology, damage, mechanical properties.

1. Introduction

Dans l'industrie textile, le titre en *tex* indique la masse en grammes de 1000 mètres de fil. Un fil plus fin donne une meilleure tenue et une grande souplesse au tissu, permet une infiltration plus facile de la résine à cœur des rubans dans la mise en œuvre des composites et procure une structure plus homogène au matériau, ce qui améliore ses performances mécaniques et sa durée de vie. Il est donc primordial que le titre des rubans soit parfaitement maîtrisé. Dans le cas des fibres végétales, le titre d'un ruban en sortie de peignage fluctue selon l'approvisionnement à l'entrée. Pour obtenir un ruban homogène dans sa longueur avec un titre prédéfini, on procède par des étirages successifs qui sollicitent les faisceaux en tension, en compression et en cisaillement plan, d'où une dégradation des propriétés mécaniques des rubans secs.

L'étude menée a pour objectif de proposer un outil d'analyse qualitative et quantitative des effets des traitements de défibrage des fibres végétales (rouissage, teillage, peignage, étirage) sur leurs propriétés mécaniques. Après une brève description du processus d'étirage, une méthode nouvelle de détermination de la distribution en longueur des faisceaux de fibres est présentée. Cet outil est alors utilisé pour analyser les deux effets principaux de l'étirage : le raccourcissement des faisceaux de fibres et leur affinage. Nous terminons en soulignant les apports de l'étirage à l'amélioration de la santé matière des fibres végétales utilisées comme renfort dans les composites biosourcés.

2. Méthodes

2.1 Matériaux

Les propriétés des fibres de lin sont dépendantes notamment de la variété et des conditions environnementales qui prévalaient pendant la croissance de la plante [1-3]. Le lin de la variété Arétha étudié dans ce travail a poussé au nord de Caen en 2012 dans la commune de Saint-Contest, sur un sol limoneux épais (3 mètres). Le rendement de production est 9,8 tonnes de paille par hectare, les résultats d'un teillage fort sur toute la parcelle donnent un taux de filasse de 27% et un taux d'étoupes de 10,5%.

2.2 Description du processus d'étirage

Si un ruban peigné de titre T_1 arrive avec une vitesse v_1 entre une roue en bois tournant à la vitesse v_2 en co-rotation avec et un rouleau en acier, il sortira avec un titre $T = T_1 * v_1 / v_2 = T_1 / E_1$. En procédant à n étirages successifs, le taux d'étirage cumulé est $\prod_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{E_i} \right)$. Cette opération est donc un moyen très efficace pour affiner les rubans. Si l'étirage est pratiqué en parallèle sur p rubans de titre T_i , on pourra les croiser en sortie pour obtenir un ruban de titre $T_j = p * T_i * v_1 / v_2$. En procédant à n croisements successifs, le taux de croisement cumulé est $\prod_{i=1}^{n-1} C_i$. Ainsi donc, le taux d'étirage global s'écrit :

$$T_n = T_1 * \prod_{i=1}^{n-1} \frac{C_i}{E_i} \quad (\text{Eq. 1})$$

Si l'on considère une propriété linéique P_1 (telle le titre) variable sur une longueur de ruban l et dont les distributions sont décrites par une loi normale avec un écart type relatif $\sigma_{1_{relatif}}(l)$, et si l'on admet que n étirages successifs ne créent pas de variabilités supplémentaires, alors l'écart relatif résultant sur cette longueur l s'écrit :

$$\sigma_{n_{relatif}}(l) = \frac{\sigma_{1_{relatif}}(l)}{\sqrt{C_n}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Ainsi, croiser plusieurs rubans diminue l'efficacité de l'étirage (C_i/E_i au lieu de $1/E_i$) mais c'est aussi un moyen puissant pour niveler les variabilités naturellement apportées par les accidents de production en amont de la fabrication des rubans. A titre d'exemple, effectuer 7 étirages successifs en croisant 4 rubans donne un taux de croisement global $C_n = 4096$.

2.3 Distribution des longueurs de faisceaux de fibres

Le rapport d'aspect d'un renfort fibreux, défini par le rapport de la longueur des fibres sur leur diamètre, est déterminant pour le comportement mécanique des fibres dans le composite. Il est donc intéressant de comprendre l'évolution de la longueur et de la finesse des fibres en fonction des étirages successifs. Par ailleurs, quand un faisceau s'interrompt, la charge qu'elle supportait est reportée sur les faisceaux voisins dans le composite. La distribution des longueurs du renfort crée donc une hétérogénéité des contraintes dans le composite et favorise l'amorce d'endommagement dans la matrice aux extrémités des fibres.

Pour déterminer la répartition des longueurs des faisceaux constitutifs du ruban, nous avons développé une méthode de mesure qui renseigne à la fois sur la longueur des faisceaux et sur leur agencement dans le ruban, et permet d'étudier facilement de gros volumes plus représentatifs.

Un ensemble de faisceaux de fibres (ruban ou groupe de rubans parallélisés pour les faibles titrages) est prélevé (Fig. 1a), puis serré fortement dans un étau à l'abscisse $x=0$ pour bien maintenir tous les faisceaux (Fig. 1b). Avec un peigne, les faisceaux et fibres qui ne sont pas retenus sont éliminés. Les faisceaux restants sont coupés tous les 2 cm en s'approchant du point de serrage (Fig. 1c).

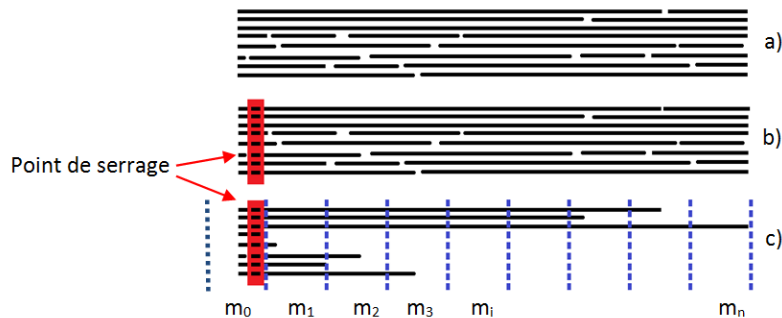


Fig. 1 : Illustration de la méthode utilisée pour déterminer la distribution de masse le long d'un ruban

2.4 Mesures de section des rubans

Pour l'étude de la finesse, les rubans sont mis dans un tube métallique et enrobés d'une résine époxy. Après durcissement du polymère, la surface de coupe transverse aux fibres est polie et l'aire totale des fibres est mesurée par microscopie optique en utilisant un logiciel d'analyse d'image développé au laboratoire. Cette méthode de mesure des paramètres métriques (aire, périmètre, facteur de forme...) est longue, mais les résultats convergent assez vite en fonction du nombre de faisceaux mesuré. Les écorces (en noir) ne sont pas prises en compte pour les mesures des sections des rubans car leur contribution mécanique est considérée comme négligeable (Fig. 2).

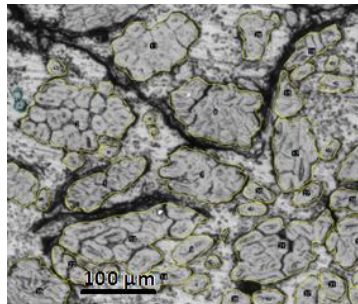


Fig. 2 : Mode de délimitation des contours de faisceaux

3. Résultats et discussion

3.1 Distribution des longueurs de faisceaux

Dans le cas du ruban issu du peignage (1^{er} étirage), la variation de masse en fonction du nombre de coupes (ou de la distance au point de serrage) est représentée sur la figure 3a. Les résultats d'une simulation numérique qui utilise un algorithme Excel-VBA sont également représentés. Ce programme génère des fibres avec des longueurs variables suivant une loi Normale $N(m, \sigma)$. Les fibres sont disposées aléatoirement le long du ruban et on simule le raccourcissement du ruban. Tant que les valeurs issues de la simulation diffèrent sensiblement de celles mesurées expérimentalement, le programme modifie les paramètres de la loi Normale. Ici, la loi Normale ($m=24$; $\sigma=11$) semble bien représenter les mesures expérimentales sur ce ruban au stade du premier étirage. Les variations de la longueur moyenne des faisceaux de fibres et l'écart type associé sont présentées sur la figure 3b. On remarque que l'écart type relatif des dispersions des longueurs autour de la moyenne est à peu près constant et vaut 44%. Cette façon d'analyser les faisceaux accorde la même importance aux faisceaux, indépendamment de leurs longueur et volume ; on qualifie cette distribution de fréquentielle. Pour affiner l'analyse, il faut pondérer les mesures par la

longueur des faisceaux ; on obtient alors des densités qualifiées de volumiques. Cela permet de respecter la conservation du volume de fibres d'un étirage à l'autre. Le tableau I illustre les répartitions normales fréquentielle et volumique à différents stades d'étirage.

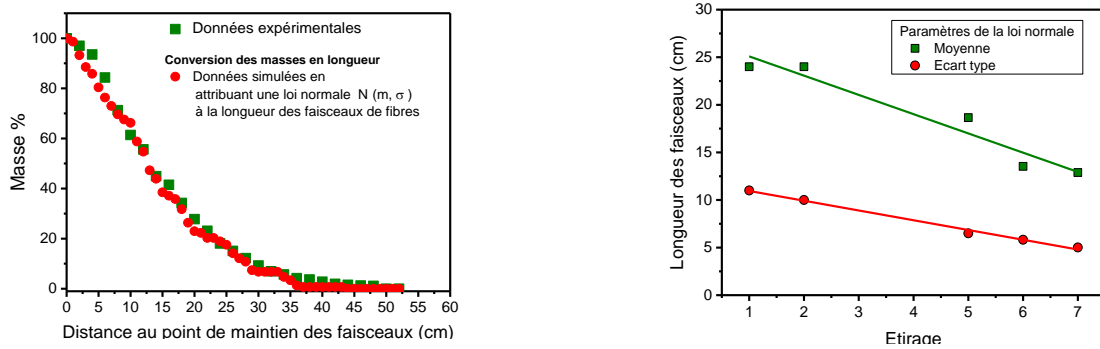


Fig. 3 : Comparaison des mesures expérimentales aux données de simulation(a) ; évolution de la longueur des fibres avec la succession des étirages (b)

Cette façon d'analyser les données accorde la même importance aux faisceaux, indépendamment de leurs longueur et volumes ; on qualifie cette distribution de fréquentielle. Pour affiner l'analyse, il faut pondérer les mesures par la longueur des faisceaux ; on obtient alors des densités qualifiées de volumiques. Cela permet de respecter la conservation du volume de fibres d'un étirage à l'autre. Le tableau I illustre les répartitions normales fréquentielle et volumique à différents stades d'étirage.

		Étirage	1	2	3	4	5	6	7
Répartition normale fréquentielle	Moyenne		25,09	23,07	21,05	19,03	17,01	14,99	12,97
	Ecart type		10,95	9,93	8,91	7,89	6,87	5,85	4,83
Répartition normale volumique	Moyenne		32,5	29,8	27,1	24,3	21,5	18,7	16
	Ecart type		10	9	8,2	7,2	6,4	5,5	4,6

Tableau I : Description des longueurs de faisceaux par des lois normales à différents stades d'étirage

Sur la figure 4, la courbe de Gauss en noir correspond à l'état des faisceaux après le 1^{er} étirage et celle en rouge à la distribution après le 2^{ème} étirage. Les décalages entre ces deux courbes correspondent à la population disparue (à droite) et à celle apparue (à gauche). Le volume de fibres disparu est bien égal au volume de fibres apparu et il concerne 10,7% du volume total de fibres pour ce 2^{ème} étirage. Ces faisceaux rompus sont 60% plus longs que la moyenne de l'ensemble des faisceaux du ruban pour tous les stades d'étirage. Ceci s'explique par une plus grande probabilité de trouver un maillon faible sur un faisceau plus long, mais aussi par une plus forte sollicitation en traction de ces longs faisceaux.

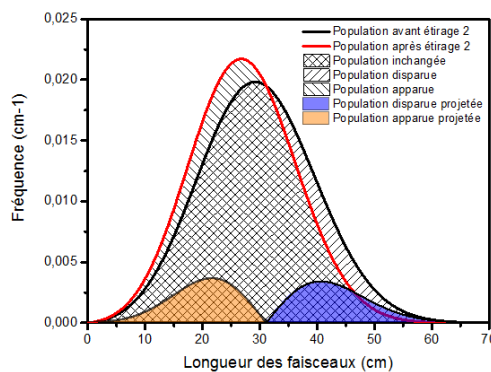


Fig. 4 : Représentation de l'évolution des distributions pendant l'étirage 2.

Pour mieux comprendre le mode de rupture des faisceaux, on s'intéresse exclusivement aux populations de faisceaux rompus (Fig. 5).

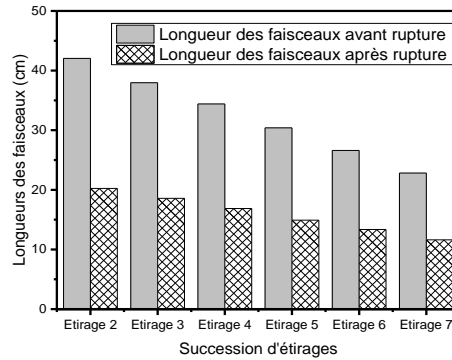


Fig. 5 : Longueurs des fibres avant et après rupture pour chaque étirage i

Connaissant la longueur moyenne des faisceaux avant rupture, L_{avant} , et après rupture, $L_{après}$, on définit le nombre moyen de ruptures pour chaque stade de l'étirage :

$$N_{rup} = \frac{L_{avt}}{L_{après}} - 1 \quad (\text{Eq. 3})$$

Les résultats reportés dans le tableau II indiquent un taux de ruptures par faisceau voisin de 1, or les faisceaux qui disparaissent de la population subissent obligatoirement au moins une rupture. Donc la grande majorité des faisceaux présente exactement une rupture (et aucune rupture double). Puisque la quasi-totalité des faisceaux casse en deux, on peut retenir que les faisceaux passent directement de la population disparue à la population apparue. La distribution de faisceaux dite inchangée garde les faisceaux étirés dans le même état qu'avant l'étirage. Cette allégation n'aurait pas pu être faite si nous avions des ruptures doubles : une première rupture pourrait faire passer directement une portion de faisceaux dans la population apparue, alors que la portion restante pourrait migrer dans la population non modifiée et prendre la place de faisceaux de mêmes longueurs qui auraient migré dans la population néoformée.

Etirage	2	3	4	5	6	7
Longueur avant rupture (cm)	42,1	38,0	34,4	30,4	26,6	22,8
Longueur après rupture (cm)	20,2	18,6	16,9	14,9	13,4	11,6
N nombre moyen de ruptures par faisceau	1,07	1,04	1,03	1,03	0,99	0,96

Tableau II : Longueurs moyennes des faisceaux avant et après étirage et nombre de rupture

Le volume de fibres rompues croît quand le nombre d'étirages augmente (Figure 6) ; dans le même temps, leur longueur moyenne diminue. Ainsi, la fréquence des ruptures augmente au cours des étirages successifs. La fréquence des ruptures de faisceaux par unité de longueur de ruban, $F_{rupture}$. Peut être définie en fonction du nombre de ruptures $N_{ruptures}$, du nombre de faisceaux par section de ruban $N_{faisceaux}$, et de la longueur de ruban considérée, L_{Ruban} :

$$F_{rupture} (\% . cm^{-1}) = \frac{N_{ruptures}}{N_{faisceaux}} * \frac{1}{L_{Ruban}}. \quad (\text{Eq. 4})$$

et finalement par le taux volumique de faisceaux rompus et la longueur moyenne des faisceaux après rupture :

$$F_{rupture}(\%.cm^{-1}) = \frac{V_{fibres\ rompues}}{V_{ruban}} * \frac{1}{Longueur\ des\ faisceaux\ après\ rupture} \quad (Eq. 5)$$

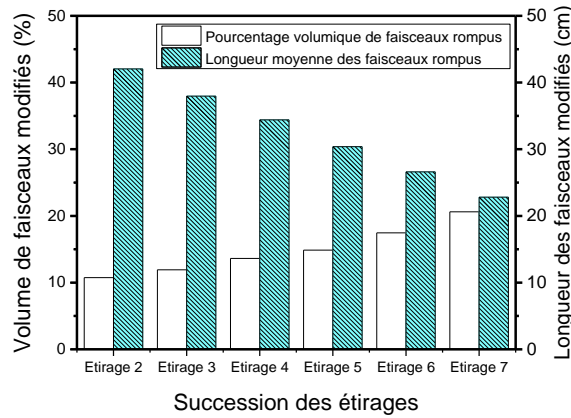


Fig. 6 : Pourcentages et longueurs moyennes des faisceaux rompus à l'étirage *i*

L'évolution de cette densité de ruptures représentée sur la figure 7 montre une allure fortement croissante en fonction du nombre d'étirages.

Si l'on schématise le faisceau de fibres comme une chaîne de maillons ayant chacun sa propre distribution des résistances, alors ce faisceau va casser une première fois lors des premiers étirages (au niveau du maillon le plus faible de la chaîne, selon [4]). Lors des étirages suivants, si la résistance des maillons non rompus est conservée, alors il faudra solliciter plus fortement le faisceau pour casser un nouveau maillon (dont la résistance est supérieure à celle du premier maillon cassé). En poursuivant ce raisonnement, on imagine qu'il devrait y avoir une diminution de la densité de ruptures de faisceaux en fonction du nombre d'étirages (à cause d'une disparition progressive des maillons faibles). Pourtant la densité de ruptures augmente avec les étirages successifs. On pourrait supposer que la sollicitation mécanique de la fibre est amplifiée avec les étirages, mais cette hypothèse est exclue car les réglages sont quasiment les mêmes sur toutes les machines. L'autre possibilité est celle d'une diminution de la résistance des maillons encore intacts au cours des étirages successifs. Il y aurait donc un affaiblissement des propriétés mécaniques du faisceau de fibres, associé à une diminution de la cohésion entre les fibres unitaires plutôt qu'à une dégradation des propriétés mécaniques de ces fibres. En effet, l'écrasement des faisceaux par les rouleaux modifie fortement leur cohésion. Une augmentation de la finesse des faisceaux induit une diminution de l'effet d'enchevêtrement sur les propriétés mécaniques du faisceau, et cela peut expliquer l'accroissement de la densité des ruptures de faisceaux en fonction des étirages successifs

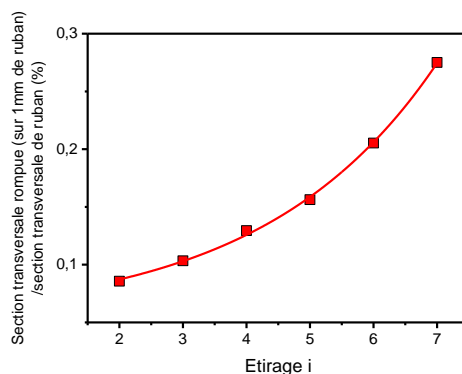


Fig. 7 : Evolution de la densité de ruptures en fonction du rang d'étirage

Si l'on schématise le faisceau de fibres comme une chaîne de maillons ayant chacun sa propre distribution des résistances, alors ce faisceau va casser une première fois lors des premiers étirages (au niveau du maillon le plus faible de la chaîne, selon [4]). Lors des étirages suivants, si la résistance des maillons non rompus est conservée, alors il faudra solliciter plus fortement le faisceau pour casser un nouveau maillon (dont la résistance est supérieure à celle du premier maillon cassé). En poursuivant ce raisonnement, on imagine qu'il devrait y avoir une diminution de la densité de ruptures de faisceaux en fonction du nombre d'étirages (à cause d'une disparition progressive des maillons faibles). Pourtant la densité de ruptures augmente avec les étirages successifs. On pourrait supposer que la sollicitation mécanique de la fibre est amplifiée avec les étirages, mais cette hypothèse est exclue car les réglages sont quasiment les mêmes sur toutes les machines. L'autre possibilité est celle d'une diminution de la résistance des maillons encore intacts au cours des étirages successifs. Il y aurait donc un affaiblissement des propriétés mécaniques du faisceau de fibres, associé à une diminution de la cohésion entre les fibres unitaires plutôt qu'à une dégradation des propriétés mécaniques de ces fibres. En effet, l'écrasement des faisceaux par les rouleaux modifie fortement leur cohésion. Une augmentation de la finesse des faisceaux induit une diminution de l'effet d'enchevêtrement sur les propriétés mécaniques du faisceau, et cela peut expliquer l'accroissement de la densité des ruptures de faisceaux en fonction des étirages successifs.

3.2 Analyse de l'affinement des faisceaux

Pour une fibre et une matrice données, les performances d'un composite sont gouvernées par l'état de l'interface fibre-matrice qui lui-même dépend de divers traitements physico-chimiques d'optimisation (mouillabilité, adhésion...). Dans le cas des fibres naturelles, une augmentation de la quantité d'interface entre les deux phases par défibrage permet d'accroître l'énergie de rupture à travers les mécanismes de décohésion et de frottement fibre-matrice.

Au cours des étirages successifs, les faisceaux s'affinent et s'éclaircissent du fait que la teneur en écorces diminue. La figure 8 illustre les deux états extrêmes des fibres après les étirages 1 et 7.

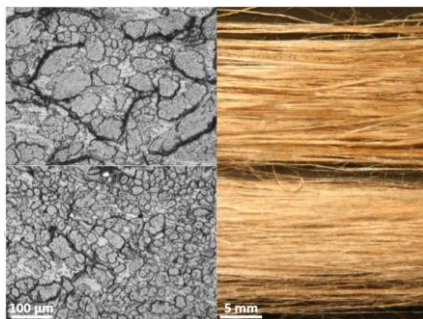


Fig. 8 : Aspect des faisceaux en coupe (a) et vue longitudinale (b), après 1 étirage (en haut) et après 7 étirages (en bas)

Pour décrire l'évolution de la finesse des faisceaux, certains auteurs utilisent la répartition fréquentielle des sections [6, 7], c'est-à-dire avec un poids identique pour chaque faisceau ou fibre, malgré des volumes très différents. Du point de vue du matériau, la participation d'un faisceau dans une sollicitation mécanique est proportionnelle à sa section. C'est pourquoi une proportion volumique (ou surfacique) est préférée pour décrire la densité de la section des faisceaux. En plus, les longueurs de faisceaux ont été étudiées sur le même mode de pondération. Les distributions des sections de faisceaux ont été décrites par une loi de Weibull en étudiant les rubans portés aux stades d'étirage 1, 5 et 7. Les variations de distribution volumique de la finesse des faisceaux pendant les étirages 2 et 7 sont présentées sur les figures 9a et 9b, respectivement. A partir de ces graphes, on peut déterminer le pourcentage volumique et la finesse des populations de faisceaux modifiées par chaque étirage (Fig. 10). On vérifie que le volume de fibres dans la population disparue est bien égal au volume de fibres dans la population créée. En faisant une analogie avec le nombre de

ruptures par faisceau (Tableau II), on calcule un nombre de divisions moyen par faisceau, N_{division} , en faisant le rapport de la section moyenne dans la population disparue, S_{avant} , sur la section moyenne dans la population apparue, $S_{\text{après}}$:

$$\text{Taux de division} = \frac{S_{\text{avant}}}{S_{\text{après}}} \quad (\text{Eq. 6})$$

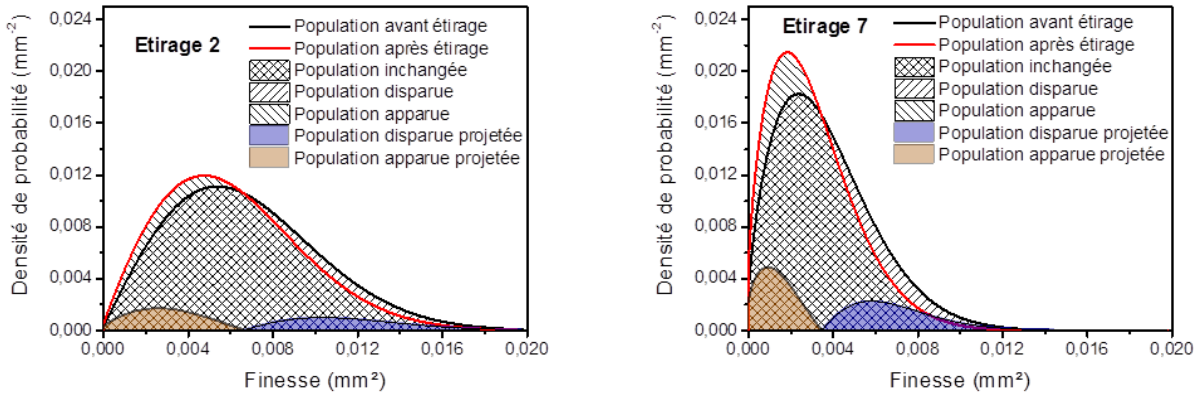


Fig. 9 : Variations des populations aux étirages 2(a) et 7 (b)

L'étude en termes de longueur donnait exactement une rupture par faisceau, les fibres passaient alors directement de la population disparue à la population apparue. On pouvait donc assurer qu'aucun faisceau de la population inchangée ne subissait de rupture transversale au cours de l'étirage. En ce qui concerne les taux de division (compris entre 4 et 5), on ne peut pas certifier que la proportion déplacée (décalage entre les courbes) est bien égale à celle des faisceaux modifiés par des ruptures longitudinales. Il est fort probable que des faisceaux de la population qui disparaît migrent dans la population dite inchangée et que cela soit compensé par une migration de faisceaux de la population inchangée vers la population néoformée.

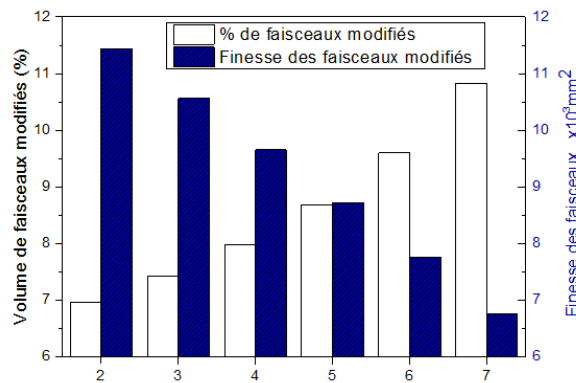


Fig. 6 : Pourcentages et sections moyennes des faisceaux modifiés à l'étirage i

La proportion de faisceaux modifiée augmente à chaque étape de l'étirage, pourtant les faisceaux sujets à des divisions sont de plus en plus fins. Donc, à proportion égale, ils sont plus nombreux. En plus, le taux de division augmente avec les étirages successifs. A partir de ces trois mesures qui vont dans le même sens, nous allons chercher à définir un paramètre à même de caractériser l'intensité des ruptures longitudinales dans les faisceaux à chaque étape de l'étirage. Pour cela, nous avons d'abord établi la relation entre la section et le périmètre des faisceaux de forme elliptique. La longueur d'interface créée entre deux étirages successifs, par fissuration longitudinale des

faisceaux, est représentée sur la figure 11 en fonction du nombre d'étirages. Elle double entre le 2^{ème} et le 7^{ème} étirage.

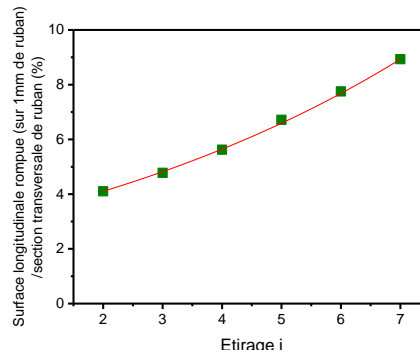


Fig. 11 : Surface de fissuration longitudinale des faisceaux de fibres en fonction du rang de l'étirage

Le rapport d'aspect (ratio longueur/diamètre) est un paramètre important pour l'emploi des fibres comme renfort dans les composites. Il s'y attache le concept de longueur critique de fibre qui entre dans l'évaluation de l'efficacité de renforcement d'une fibre. Connaissant les distributions expérimentales des sections et longueurs moyennes des faisceaux aux stades d'étirage 1, 5 et 7, on cherche à déterminer par simulation numérique une loi qui relie les sections de faisceaux choisis au hasard à des longueurs de faisceaux que l'on compare aux longueurs mesurées expérimentalement. Les interrelations entre les longueurs et les sections de faisceaux optimales sont représentées sur la figure 12a pour les trois stades d'étirage, et comparées aux données relatives à la fibre unitaire de lin. On remarque que le rapport d'aspect des faisceaux diminue quand le nombre d'étirages est augmenté, mais il reste élevé et cela justifie l'appellation « fibre longue » pour ces faisceaux. Suivant le traitement de défibrage appliqué, les ruptures transverses des faisceaux seront plus ou moins dominants sur celles longitudinales. Sachant que la proportion de ces deux modes de rupture joue sur le rapport d'aspect du faisceau, il est intéressant de définir l'efficacité d'un défibrage par la proportion des aires de rupture longitudinale dans les faisceaux de fibres :

$$\beta = \frac{\text{Surface longitudinale rompue}}{\text{Surface transversale rompue}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Ce paramètre est représenté sur la figure 12b où l'on remarque que les ruptures longitudinales sont prépondérantes en nombre par rapport aux ruptures transversales. Ceci est dû à deux raisons. La première est inhérente au matériau : le mode d'agencement de l'interface fibre-fibre lui confère de faibles propriétés mécaniques car il n'y a pas d'incrustations entre les fibres. Plus cette interface est faible plus la probabilité de rupture longitudinale est grande. La seconde explication se rapporte à l'action mécanique du défibrage qui écrase les faisceaux et les rompt dans le sens transversal.

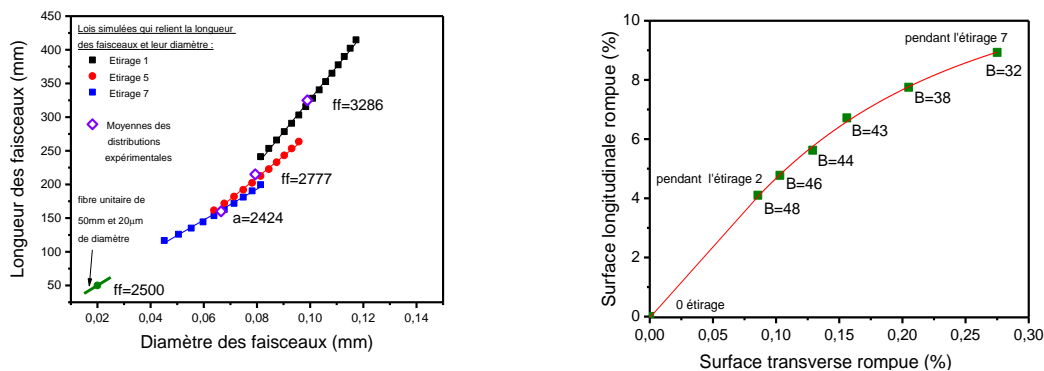


Fig. 12 : Interrelations entre la longueur et le diamètre des faisceaux (a) ; comparaisons des deux modes d'endommagement des faisceaux de fibres pendant l'étirage (b)

On désigne par le terme écorce l'ensemble des tissus situés dans la partie externe de la tige au-delà des faisceaux de fibres. L'écorce constitue une interface entre le milieu extérieur et les tissus vivants de la plante. Sa finesse et sa transparence permettent qu'un maximum de lumière parvienne jusqu'aux faisceaux, mais elle est également une barrière contre les agressions du milieu extérieur. L'écorce s'organise en trois couches : le parenchyme cortical (ou cortex), une couche de cellules appelée épiderme et la cuticule constituée de subérine (cire). La finesse de l'écorce et sa proximité avec les faisceaux de fibres font qu'elle est difficile à retirer pendant les défibrages mécaniques [8]. Le caractère hydrophobe de la cuticule peut limiter la mouillabilité et l'adhésion de la résine avec la fibre, ce qui participe à limiter les propriétés mécaniques des composites. Les parois des cellules du cortex sont constituées essentiellement de la lamelle mitoyenne et de la paroi primaire, ce qui leur confère une composition riche en pectines. Ces composés pectiques au caractère hydrophile et hydrophobe gonflent en se gorgeant d'eau et rétrécissent au séchage, ce qui induit des endommagements intempestifs dans les composites biosourcés incorporant des fibres végétales [9]. Le taux d'écorce est mesuré à partir des sections transverses ; leur couleur noire et leur position par rapport aux faisceaux permet de les identifier facilement. La mesure exprime la longueur d'écorce par rapport à la section des faisceaux (Fig. 13a), ou la quantité d'interface fibre-matrice polluée par les écorces (Fig. 13b). L'étirage apporte une diminution de la teneur en écorces, ce qui permet d'envisager une meilleure liaison faisceau-matrice et, il rend disponible une plus grande surface d'interface du fait de la division des faisceaux. Ces apports contribuent à une plus grande durabilité des matériaux composites biosourcés en présence d'humidité.

4. Conclusion

Un intérêt majeur de cette étude est qu'elle fournit des moyens d'évaluer l'efficacité d'un traitement de défibrage, aussi bien du point de vue de son effet sur la morphologie du renfort que de la dépense énergétique nécessaire. Si le but du défibrage est d'affiner au maximum les faisceaux tout en gardant un rapport d'aspect élevé, alors il sera d'autant plus efficace énergétiquement si son action provoque préférentiellement des ruptures longitudinales.

Remerciements

Les auteurs remercient DEPESTELE pour la fourniture des fibres de lin et BpiFrance pour le financement du projet TRAMPLIN. Ils remercient les partenaires à ce projet BMP, Fantex et MFTech pour leurs apports respectifs dans la conduite de ces travaux.

Références

- [1] Chemikosova SB, Pavlencheva NV, Gur'yanov OP, Gorshkova TA, "The effect of soil drought on the phloem fiber development in long-fiber flax". *Russ J Plant Physiol* 2006;53: 656–62. Doi:10.1134/S1021443706050098.
- [2] Thygesen LG. The effects of growth conditions and of processing into yarn on dislocations in hemp fibres. *J Mater Sci* 2011; 46:2135–9. Doi:10.1007/s10853-010-5049-4..
- [3] Lefeuvre A, Bourmaud A, Morvan C, Baley C. Elementary flax fibre tensile properties: Correlation between stress-strain behaviour and fibre composition. *Ind Crops Prod* 2014; 52:762–9. Doi:10.1016/j.indcrop.2013.11.043.
- [4] Weibull W. "A statistical distribution function of wide applicability". *J Appl Mech* 1951;18:293–7.
- [5] Coroller G, Lefeuvre A, Le Duigou A, Bourmaud A, Ausias G, Gaudry T, et al. Effect of flax fibres individualisation on tensile failure of flax/epoxy unidirectional composite. *Compos Part Appl Sci Manuf* 2013;51:62–70. doi:10.1016/j.compositesa.2013.03.018.
- [6] Martin N, Davies P, Baley C. Comparison of the properties of scutched flax and flax tow for composite material reinforcement. *Ind Crops Prod* 2014;61:284–92. doi:10.1016/j.indcrop.2014.07.015.
- [7] Shepherd W. Flax stem anatomy and fibre strand fineness. *Mater Veg* 1956;2:58–63. doi:10.1007/BF01889775.
- [8] M. Rouch, M. Gomina, A. Roy, D. Duriatti, "Acceptation des essais usuels de vieillissement accéléré pour l'étude de composites biosourcés incorporant des fibres végétales : exemple du lin", soumis aux JNC21, 1-3 juillet 2019, Bordeaux, France.