

Nouvelle approche pour la caractérisation mécanique des fibres naturelles

F. ILCZYSZYN^a, A. CHEROUAT^b, G. MONTAY^a

a. Université de Technologie de Troyes (UTT), Institut Charles Delaunay, Equipe LASMIS, 12, rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes

b. Université de Technologie de Troyes (UTT), Institut Charles Delaunay, Equipe GAMMA3, 12, rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes

Résumé :

Les fibres naturelles de chanvre sont aujourd'hui utilisées comme renfort dans des matériaux composites. Ces agro-composites ont des propriétés écologiques et mécaniques intéressantes qui les rendent attractifs pour de nombreuses applications, comme par exemple l'ameublement extérieur ou des pièces de structures dans l'automobile. Les propriétés mécaniques des fibres de chanvre sont assez difficiles à déterminer de part la dispersion qualitative des fibres et de part la géométrie même des fibres. Dans cette étude, nous proposons une nouvelle méthode de caractérisation mécanique des fibres naturelles et de chanvre en particulier. Cette caractérisation permet de déterminer trois propriétés fondamentales que sont le module de Young, la contrainte et la déformation à la rupture. Pour cette étude, nous avons utilisé l'essai de micro-traction des fibres couplé à une méthode d'imagerie numérique et à la méthode des éléments finis. L'essai de traction permet de déterminer la force et le déplacement maximum. L'imagerie numérique permet quant à elle de mesurer plus finement la section de la fibre sur toute sa longueur. Enfin la méthode des éléments finis permet de prendre en compte la géométrie réelle de la fibre qui n'est plus considérée comme un simple cylindre.

Abstract :

These last years, hemp fibres are using as reinforcement for compounds based on polymer in different industrial manufacturing for their interesting mechanical and ecological properties. The hemp fibres present a non constant cross section and complex geometry that can have a high effect on their mechanical properties. The mechanical properties of hemp fibres (Young modulus, longitudinal stress and failure strain) are rather difficult and request a specific characterization method. In this study, a micro-traction test coupled with a numerical imaging treatment and a finite elements method are used. The mechanical tensile test allows to determinate the evolution of the traction load in function of the displacement until the fibre crack. The numerical imaging allows to measure finely the hemp cross section along the fibre and aims to reconstruct a 3D hemp fibre object model from an image sequence captured by a mobile camera. And lastly, the finite elements method allows one to take the real fibre geometry into consideration for the mechanical characterization using inverse optimization simplex method.

Mots clefs : Fibre végétale, chanvre, caractérisation, essai de traction, optimisation, éléments finis

1 Introduction

Les fibres utilisées comme renfort dans les matériaux composites à matrice polymère sont principalement des fibres synthétiques comme les fibres de carbone ou de verre. Ces fibres présentent de très bonnes propriétés mécaniques et géométriques. Cependant d'autres fibres peuvent être utilisées comme les fibres végétales qui présentent des propriétés mécaniques, physiques et chimiques intéressantes ainsi que des avantages économiques et environnementaux certains [1-3]. Parmi les

fibres végétales couramment utilisées, celles issues de la plante de chanvre présentent de bonnes propriétés mécaniques. Mais les connaissances de ce type de renfort sont peu détaillées dans la littérature et les méthodes pour déterminer les propriétés mécaniques de ces fibres sont quasiment inexistantes. La majorité des études considère la fibre comme un simple cylindre pour déterminer certaines propriétés mécaniques fondamentales. Cette hypothèse simplifie considérablement l'analyse des propriétés. Dans ce travail, les propriétés d'une fibre de chanvre ont été déterminées de différentes manières en nous approchant au plus près de la géométrie réelle de la fibre. Dans cette étude, nous proposons une nouvelle méthode pour déterminer finement la section de la fibre en nous appuyant sur l'imagerie numérique. Dans cette communication, après avoir présenté le matériel utilisé, nous détaillerons la méthode de mesure ainsi que la manière avec laquelle la fibre est modélisée. Enfin, nous comparerons les résultats obtenus en considérant différentes méthodes pour mesurer la section de la fibre.

2 Matériel et méthode

Une machine de micro-traction type *Kammrath & Weiss* (FIG. 1a) a été utilisée pour mettre en tension la fibre de petite taille avec une vitesse d'avance de la traverse de l'ordre de $1 \mu\text{m.s}^{-1}$. La cellule de force a une capacité de charge maximum de 50N avec une précision de mesure de l'ordre du 1/100N.

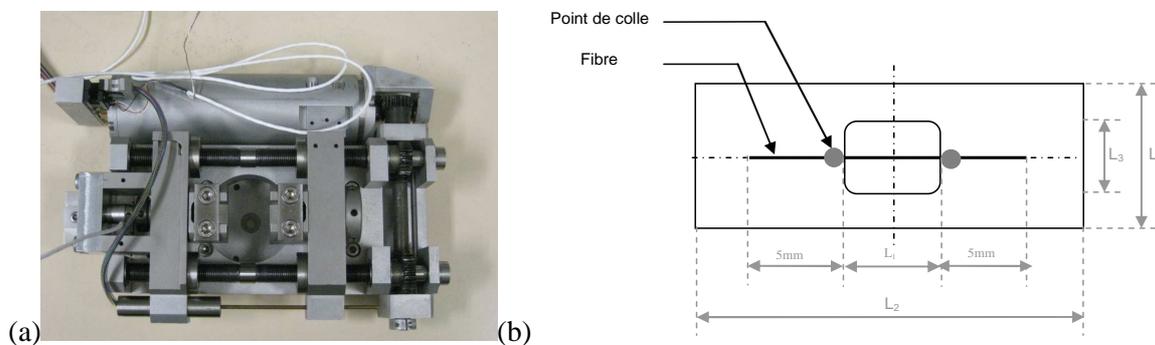


FIG. 1 - Photo de la machine de micro-traction (a) et support – montage des fibres (b)

La méthode d'essai présentée dans cet article s'applique à des fibres unitaires comme à des faisceaux. Les fibres ont été montées sur un support en papier ajouré en son milieu, schématisé sur la figure FIG. 1b. La longueur de l'ajournement (longueur L_1) correspond à la longueur de jauge qui est la longueur réelle de fibre testée. Pour les essais nous avons pris une longueur L_1 de 10mm. Les longueurs L_2 , L_3 et L_4 ont été fixées respectivement à 60, 6 et 10mm. Les fibres ont été obtenues par un défibrage manuel qui n'est pas censé détériorer les fibres. Les fibres de chanvre, cultivées dans l'Aube en France, ont été extraites de la plante et séparées du faisceau manuellement.

3 Traitement numérique des images

Par leur aspect végétal, les fibres de chanvre présentent de fortes variations géométriques. Le diamètre varie le long de la fibre ce qui a pour conséquence un profil non constant, comme le montre la FIG. 2a. De plus la section d'une fibre n'est pas circulaire, le diamètre varie aussi en fonction de l'orientation. Il n'existe pas de géométrie standard de la fibre. Différentes méthodes sont employées comme la méthode de mesure par diffraction de la lumière utilisée par C. Romão [4], la méthode de mesure par microscopie électronique MEB utilisée par L. Y. Mwaikambo [5], la méthode de mesures ponctuelles suivant la longueur de la fibre considérant celle-ci circulaire utilisée par R. Schledjewski [6], ou encore la méthode de mesure ponctuelle en prenant en compte la non-circularité de la section utilisée par S. S. Munawar [7]. Ces méthodes présentent deux inconvénients : certaines sont des mesures ponctuelles qui sont par la suite moyennées et d'autres ne prennent pas en compte la non-circularité de la section. Ainsi les variations extrêmes du profil risquent de ne pas être détectées. Le but est de connaître au plus juste, la géométrie exacte de la fibre en palliant à ces deux inconvénients. Ainsi une méthode de détection du profil et de détermination du diamètre moyen de la fibre par imagerie numérique, prenant en compte la variation du diamètre, a été mise en place. La méthode consiste à

prendre cinq images (FIG. 2b) de la fibre testée à différentes orientations (0° , 36° , 72° , 108° et 144°) à l'aide d'un montage spécifique (FIG. 3 et FIG. 4).

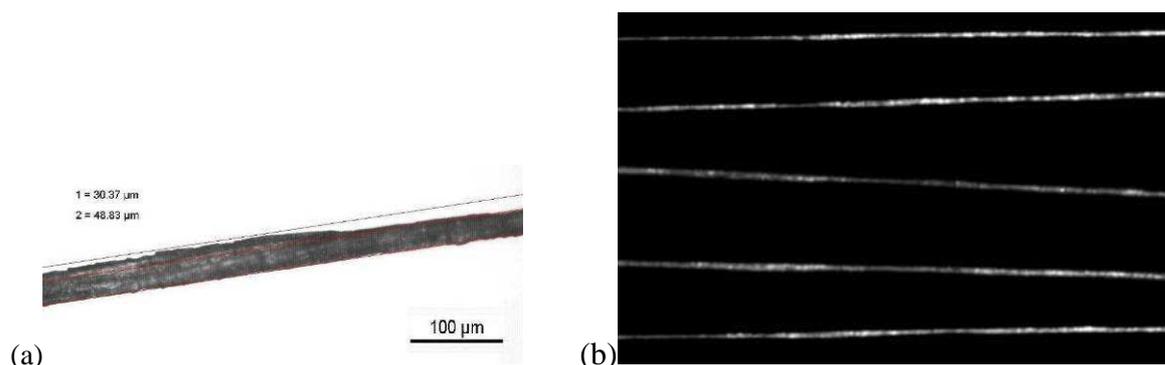


FIG. 2 - Microscopie d'une fibre de chanvre, a) image locale et b) image de l'ensemble d'une fibre pour différentes orientations

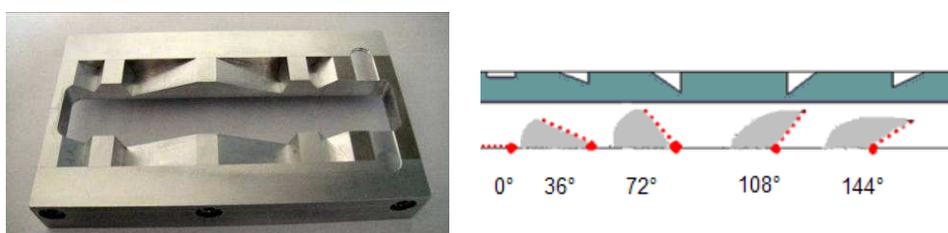


FIG. 3 - Photo et schéma du montage permettant l'orientation angulaire de l'échantillon

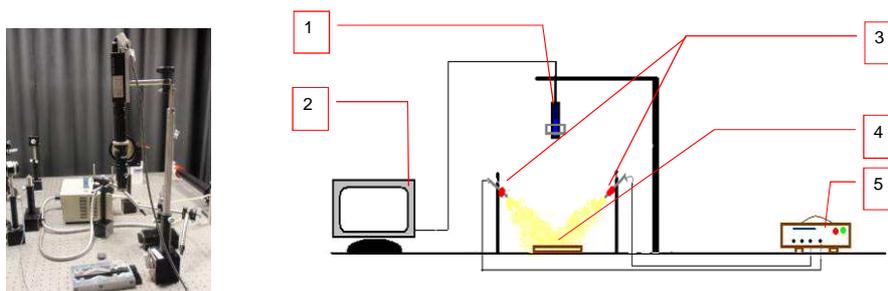


FIG. 4- Photo et schéma du montage permettant la prise de photo

- 1: Caméra avec un objectif microscopique (équivalent à un grossissement $\times 5$), 2: Ordinateur
- 3: Eclairage sous lumière blanche et froide, 4: Montage permettant l'orientation des fibres
- 5: Console permettant de paramétrer l'éclairage

Un programme utilisant les bibliothèques d'OpenCV a été développé, pour le traitement automatique des images. Le principe est de calculer à partir d'une image numérique (FIG. 2b), le nombre de pixel qui est contenu dans la fibre et de multiplier ce nombre par la taille d'un pixel exprimée en mètre. L'aire ainsi obtenue est équivalent à l'intégration du profil suivant la longueur de la fibre (1). D'un point de vue expérimental, cela revient à faire n mesures locales du diamètre le long de la fibre avec n très grand (environ 800 mesures).

$$Aire = \int_L f(x) = \sum_{i=1}^n d_i \quad (1)$$

avec $f(x)$ l'équation du profil de la fibre, L la longueur de la fibre et d_i le diamètre local pour une position donnée le long de la fibre.

Ainsi nous obtenons la valeur du diamètre moyen pour une image par la relation suivante :

$$D_i = \frac{Aire}{L} \quad (2)$$

avec D_i le diamètre moyen pour une orientation

L'obtention du contour revient à déterminer le profil supérieur et inférieur ; sachant que les extrémités gauche et droite de la fibre sont les bords de la photo. Pour obtenir les points décrivant le contour supérieur et inférieur, il est nécessaire de détecter les pixels de la fibre ayant un positionnement vertical qui soit maximum et minimum. En multipliant les coordonnées des pixels qui composent le profil par la taille d'un pixel en mètre, on obtient les points géométriques du profil. Ce programme détermine, pour chaque orientation : les coordonnées des points du profil de la fibre (sur le figure FIG. 5) et le diamètre moyen (diamètres D_i) qui tient compte de la variation du profil de la fibre (FIG. 6)

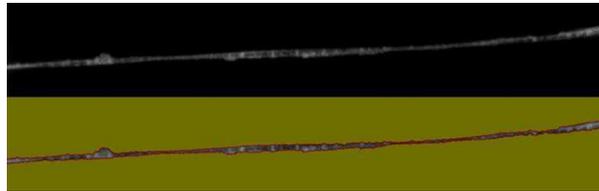


FIG. 5 - Photo d'une fibre avant et après traitement de l'image

4 Modélisation de la fibre

Les données géométriques du profil de la fibre obtenues par imagerie numérique sont suffisantes, pour avoir une description réelle de la section (FIG. 6).

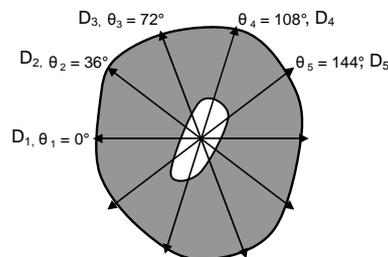


FIG. 6 - Profil réel de la section transverse d'une fibre de chanvre

A partir de ces données géométriques, la fibre a été modélisée de cinq manières différentes, en considérant la section moyenne de la fibre circulaire (méthode1) ou polygonale (méthode2), la section dans la zone où la fibre va se rompre comme étant circulaire (méthode3) ou polygonale (méthode4) et en modélisant la fibre en 3D (méthode5) considérant celle-ci comme non-circulaire et non-constante suivant sa longueur (FIG. 7).

Section moyenne	Méthode 1 Section circulaire et constante le long de la fibre	 $\sigma = \frac{F}{S_{\text{circulaire}}}$
	Méthode 2 Section non-circulaire et constante le long de la fibre	 $\sigma = \frac{F}{S_{\text{polygonale}}}$
Section zone de rupture	Méthode 3 Section circulaire au niveau de la zone de rupture	 $\sigma = \frac{F}{S_{\text{circulaire}_{\text{rupture}}}}$
	Méthode 4 Section polygonale au niveau de la zone de rupture	 $\sigma = \frac{F}{S_{\text{polygonale}_{\text{rupture}}}}$
Modèle 3D	Méthode 5 Section réelle non-circulaire et non-constante	

FIG. 7 – Différentes méthodes de modélisation de la fibre

Pour le modèle circulaire, la valeur de la section a été calculée à partir de la valeur moyenne des diamètres obtenue pour chaque orientation de la fibre (3). Pour le modèle polygonale, la valeur de la section a été calculée en utilisant un algorithme permettant le calcul de l'aire d'un polygone.

$$S_{\text{circulaire}} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\sum_{i=1}^5 D_i}{5} \right)^2 \quad (3)$$

Pour le modèle 3D, la fibre a été modélisée sous CatiaV5 (FIG. 8) à partir de 10 sections prises le long de la fibre obtenues par le traitement d'image. Une optimisation (Matlab simplex) par méthode inverse issue de la simulation numérique par la méthode des éléments finis (Abaqus) a été utilisée pour retrouver les propriétés mécaniques de la fibre en tenant compte de la géométrie réelle de celle-ci.

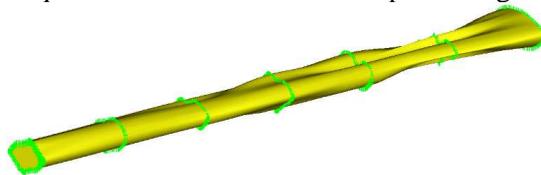


FIG. 8 – Modèle 3D d'une fibre

5 Résultats et interprétations

Nous avons testé plusieurs échantillons. Dans cette partie sera présenté les résultats d'un échantillon pour lequel les cinq méthodes de caractérisation ont été appliquées. Pour les méthodes 1 à 4 la contrainte maximum, la déformation à rupture et le module d'Young ont été calculé en considérant soit la section moyenne, soit la section dans la zone de rupture comme étant circulaire ou polygonale. Pour la méthode 5, la valeur du module d'Young a été déterminée par optimisation de sorte que la courbe expérimentale force de traction en fonction du déplacement de la traverse s'ajuste à la courbe numérique qui prend en compte la géométrie réelle de la fibre (FIG. 9). La valeur de la contrainte maximum correspond à la contrainte maximale suivant l'axe de traction calculée par la simulation numérique (FIG. 10b).

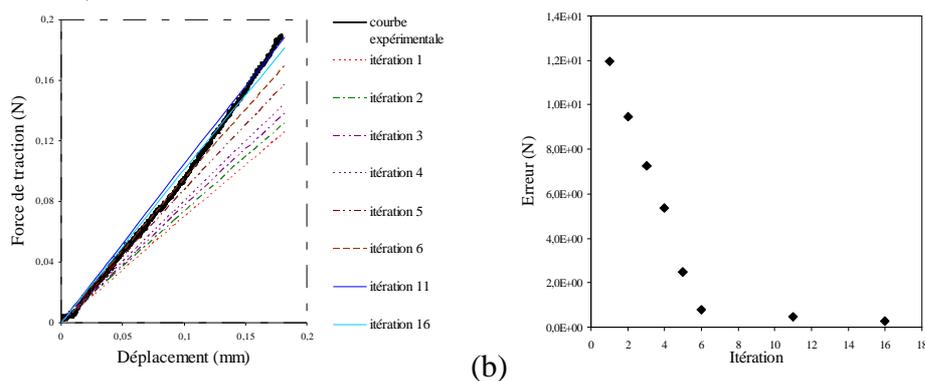


FIG. 9 – Résultat de l'optimisation du module d'Young, a) Comparaison courbe force – déplacement expérimentale et numérique b) évolution de l'erreur en fonction de l'itération de calcul

Les propriétés mécaniques obtenues par les cinq méthodes de caractérisation sont présentées dans le tableau (TAB. 1). La section locale dans la zone de rupture est plus faible que la section moyenne de la fibre avec un écart d'environ 28% entre les deux approches (méthodes 1,2 et méthode 3,4). Considérer la section comme circulaire (méthode 1 et 3) donne un écart de 7% pour la contrainte maximum et pour le module d'Young par rapport aux méthodes 2 et 4 qui considèrent la section réelle de la fibre.

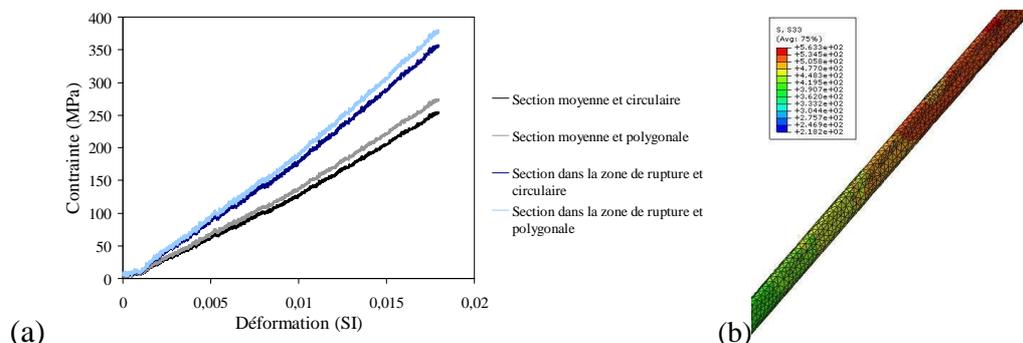


FIG. 10 – Contrainte de la fibre en fonction des différentes méthodes, a) Contrainte – déformation en fonction de la méthode 1,2,3 et 4 b) Zone de contrainte maximum obtenue par la méthode 5

La modélisation 3D (méthode 5) de la fibre est l'approche la plus fine puisqu'elle tient compte de la non-circularité de la section et de la variation de celle-ci suivant la longueur de la fibre. Il a été constaté que considérer la fibre comme un cylindre qui est l'hypothèse la plus réductrice, donne une erreur pour le module d'Young de 44% et une erreur de 104% pour la contrainte à rupture. Tenir compte de la non-circularité de la section et de l'état de contrainte critique de la fibre dans la zone où va se produire la rupture (méthode 4) permet d'approximer les propriétés mécaniques avec une erreur de 3% pour le module d'Young et une erreur de 25% pour la contrainte à rupture.

			Diamètre	Section	Δl à rupture	Force à rupture	Déformation à rupture	Contrainte maximum	Module d'Young
			mm	mm ²	μm	N	SI	MPa	MPa
e46_1	global	circulaire	0,031863	0,000745	180,00	0,19	0,0180	255	14164
		polygonnale		0,000691				275	15271
	zone de rupture	circulaire	0,026	0,000531				358	19872
		polygonnale		0,0005				380	21104
	3D							521	20441

TAB. 1 –Propriétés mécaniques de la fibre pour différentes méthodes de caractérisation

6 Conclusion

Cette étude a mis en évidence l'importance de la géométrie de la fibre pour la caractérisation mécanique des fibres de chanvre. Différentes méthodes ont été présentées qui tiennent compte de la non-circularité de la fibre soit en considérant une mesure de la section locale au niveau de la zone où la rupture va se produire, soit en considérant la fibre dans son ensemble en calculant une section moyenne. Une dernière méthode a été présentée, qui tient compte de la non-circularité de la section et de la variation de celle-ci suivant la longueur de la fibre. Pour cela un modèle de la fibre en 3D a été créé, qui par la suite a été intégré dans un calcul par élément fini. Par l'optimisation de la courbe numérique force en fonction du déplacement par rapport à la courbe de traction expérimentale, nous retrouvons le module d'Young qui tient compte de la géométrie réelle de la fibre. Il a été montré qu'émettre la simple hypothèse d'une fibre de forme circulaire, était insuffisante pour caractériser au plus juste le comportement des fibres de chanvre en traction.

7 Remerciements

Ce travail bénéficie du soutien financier du Conseil Général de l'Aube dans le cadre du programme de recherche MAPROFI.

References

- [1] Wambua P., Jan Ivens, Verpoest. I., Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics, *Composites Science and Technology* 63,1259-1264, (2003)
- [2] Joshi S.V., Drazl L.TL., Mohanty A.K., Arora S., Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composite, *Composites: Part A* 35, 371-376, 2004
- [3] Mohanty A.K., Missa M., Drazl L.T., Natural fibres, biopolymers and bio composites, 2005
- [4] Romão C., Vieira P., Peito F., Marques A.T., Esteves J.L., Single filament mechanical characterisation of hemp fibres for reinforcing composite materials. *Molecular crystals and liquid crystals* Vol. 418, 87-99, 2004
- [5] Mwaikanbo L.Y., Ansell M.P., Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials – I. hemp fibres. *J Master Sci* 41, 2483-2496, 2006
- [6] Schledjewski R., Medina L., Schlarb A.K., Mechanical and morphological characterization of selected natural fibres. *Advanced Composites Letters* Vol. 15 N°2, 2006
- [7] Munawar S.S., Umemura K., Kawai S., Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fiber bundles, *The Japan Wood Research Society* 53:108-113, 2007
- [8] Ilcyszyn F., Cherouat A., Montay G., Caractérisation des propriétés mécaniques de fibres de chanvre, *Conférence Matériaux 2010 Nantes, colloque 12*