

DEVELOPPEMENT D'UN PENDULE DE TORSION INSTRUMENTE POUR LA MESURE DU MODULE DE CISAILLEMENT DES FIBRES

1- Validation de la méthode sur des fibres synthétiques et naturelles

N. Pons, F. Fesquet, B. Gautier, V. Lorient

A. INTRODUCTION

L'utilisation des fibres (synthétiques ou naturelles) comme renforts nécessite une connaissance approfondie de leurs propriétés mécaniques. Parmi ces propriétés, le module de Young E traduit la résistance d'un matériau sollicité en traction ou compression alors que le module de Coulomb G intervient dans la caractérisation des déformations provoquées par les efforts de cisaillement (torsion, etc.). Si le matériau est isotrope (invariance des propriétés physiques en fonction de la direction), G peut se calculer à partir de E et du coefficient de Poisson.

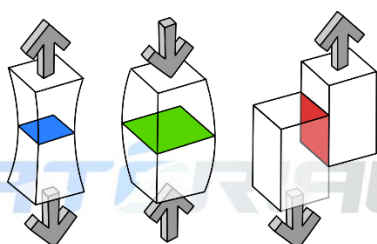


Figure 1 : Modes de sollicitation (traction, compression, cisaillement).

Actuellement, le module de Young des fibres naturelles est mesuré au travers d'essais de traction sur monofilaments. Cependant, ces fibres ont une structure anisotrope ce qui implique que leur module de Coulomb ne peut pas être déterminé à partir des données issues de ces essais de traction.

La mise au point d'une méthode de caractérisation basée sur le pendule de Coulomb va permettre de mesurer la résistance mécanique des fibres végétales en cisaillement. La difficulté principale de cette étude réside dans la nature même de ces fibres qui, contrairement aux fibres synthétiques, présentent des caractéristiques qui peuvent varier en fonction de la variété, du lieu de culture, de l'année de production...

B. METHODOLOGIE

1) Principe du banc (Figure 2)

Un mono-filament est collé entre deux demi-cylindres en aluminium (ou *mors*). Ceux-ci ont une faible masse,

calculée de sorte à ce qu'il n'y ait qu'une très faible sollicitation en traction sur la fibre.

Une fois le collage terminé, le système « filament + mors » est suspendu à l'axe moteur par le mors supérieur. Des pinces pneumatiques pilotées par ordinateur bloquent la masse en suspension quand elle est totalement immobile.

Un angle de torsion est appliqué par le biais du moteur générant une contrainte dans la fibre. Après relâchement de cette contrainte, le mors inférieur oscille librement dans l'air jusqu'à amortissement complet du mouvement.

Pour mesurer l'amplitude et l'amortissement de l'oscillation, le banc est équipé d'une caméra HD sous la masse du pendule. Un logiciel développé par Matériau Ingénierie permet de calculer l'angle du mors en mouvement en fonction de la position initiale.

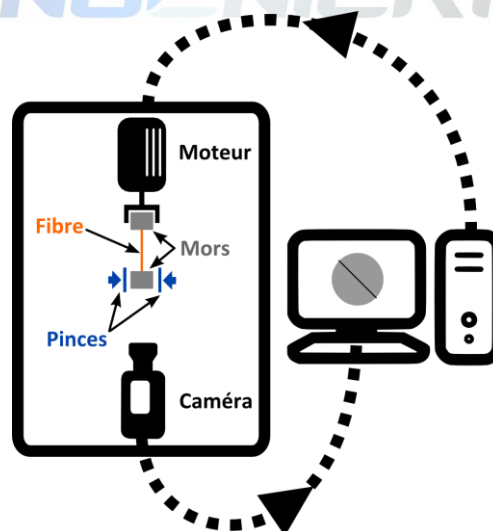


Figure 2 : Schéma de principe du banc de torsion sur monofilament de Matériau Ingénierie.

2) Sens de rotation

Les fibres issues de plantes sont composées des cellules végétales collées entre elles par une couche de lignine (cf. Figure 3). Celle-ci est éliminée au cours de la récolte et des étapes ultérieures de traitement. Ne restent alors que les cellules végétales qui ont la forme de mono-filaments dont la structure interne est constituée :

- du lumen, une zone vide située au cœur de la cellule végétale (variant de 1 à 6% pour une fibre mature);
- des parois secondaires, composées de cristaux de cellulose arrangés de façon hélicoïdale (ceux de la paroi S2 sont orientés selon un angle dit micro-fibrillaire ou MFA) ;
- de la paroi primaire composée de cellulose amorphe.

L'orientation micro-fibrillaire est différente pour les différents types de fibres cellulosiques. C'est un facteur ayant une influence majeure sur les propriétés mécaniques des fibres. A titre d'exemple, le MFA est de 41-45° pour la fibre de coco, 10° pour le lin et 20° pour le sisal. Outre l'orientation des micro-fibrilles, la résistance et la rigidité des fibres vont dépendre de leur constitution, du taux de cellulose, du taux de cristallinité et du degré de polymérisation. Par ailleurs, la maturité des fibres et la partie de la plante dont elles sont issues jouent un rôle important [1].

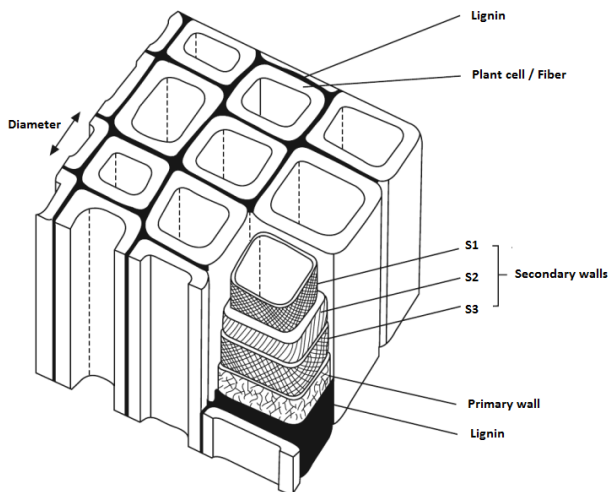


Figure 3 : Structure des fibres cellulosiques.

Considérant l'influence majeure de l'angle micro-fibrillaire, des essais comparatifs dans le sens horaire et dans le sens antihoraire ont été réalisés.

3) Matériaux

Les essais ont été réalisés sur trois types de fibres synthétiques :

- Des fibres verre (5 lots) ;
- Des fibres de carbone ex-PAN (2 lots)
- Des fibres de cuivre (1 lot).

Des essais ont ensuite été réalisés sur des fibres naturelles. Quatre espèces végétales ont été retenues:

- le chanvre (1 lot) ;
- le coco (1 lot);

- le kénaf (1 lot) ;
- le lin (8 lots), qui se présente sous deux formes :
 - ✓ la filasse, obtenue à l'issue du peignage (processus de transformation de la paille) ;
 - ✓ le roving (mèche de fibres facile à tisser) obtenu après une étape de transformation.

C. RESULTATS

1) Fibres synthétiques

Les résultats obtenus sur les fibres synthétiques sont donnés dans le *Tableau 1*. Les valeurs de la colonne « Références » sont soit des valeurs théoriques calculées à partir des modules de Young et du coefficient de Poisson connus de longue date (valables pour des fibres isotropes), soit des valeurs trouvées dans la littérature (cas des fibres de carbone, anisotropes).

Tableau 1 : Module de torsion moyens et écart-types des fibres synthétiques.

Nom	G (GPa)	e.c. (GPa)	Références
Verre E-CR	29,8	0,1	30-36
Verre H	29,1	0,2	33
Verre S	26,3	0,3	35,1
Verre AR	25,5	0,0	30
Verre R	25,6	-	35,5
Cuivre	45,3	0,0	44,7
Carbone H1	21,8	0,4	17-28
Carbone H2	22	2,0	17-28

Le module de torsion obtenu sur le cuivre correspond aux données issues de la littérature [2].

De même, les valeurs obtenues pour les fibres de carbone ex-PAN sont comprises dans la plage de valeurs obtenues par différents auteurs [3-9].

Pour les différentes fibres de verre, des écarts sont observés par rapport aux valeurs théoriques calculées à partir des modules de Young et des coefficients de Poisson (hormis pour la fibre de verre E-CR). Ces écarts sont probablement dus aux valeurs de diamètres utilisées dans les calculs. Pour les fibres synthétiques (autres que le cuivre), nous avons utilisé les valeurs de diamètres théoriques fournies par les fabricants [10]. La présence d'ensimage peut induire une légère différence entre cette valeur et la valeur réelle générant une erreur importante sur le calcul du module. Une mesure systématique des diamètres devra permettre d'améliorer la précision de la mesure.

Tableau 2 : Modules de torsion des fibres naturelles et données structurales & morphologiques de la littérature ^[11-14].

Nom	G (GPa)	e.c. (GPa)	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Pectine (%)	MFA (°)	E (GPa)
<i>Lin D1_f</i>	0,84	0,32	60-81	14-21	2-5	1-4	5-10	50-70
<i>Lin D2_f</i>	0,83	0,28						
<i>Lin D3_f</i>	0,82	0,30						
<i>Lin D1_r</i>	0,43	0,06						
<i>Lin D2_r</i>	0,68	0,12						
<i>Lin D3_r</i>	0,60	0,21						
<i>Lin F1_f</i>	0,89	0,37						
<i>Lin C1_f</i>	1,00	0,43						
<i>Chanvre F1_f</i>	1,03	0,19	70-92	18-22	3-5	1	6	30-60
<i>Coco C1</i>	2,81	0,71	43-46	0-25	45-46	3-4	39-49	6
<i>KénaF C1</i>	0,33	0,18	44-87	22	15-19	2	7-8	22-60

2) Fibres naturelles

Les résultats obtenus sur les fibres naturelles sont donnés dans le *Tableau 2*. Dans un premier temps, nous n'avons pas tenu compte du sens de rotation.

Comparaison des espèces végétales : Le module de la fibre de kénaF est le plus faible (0,33 GPa). L'alliance d'un faible taux de cellulose et d'un angle micro-fibrillaire relativement bas peut expliquer que la résistance en cisaillement soit très faible.

Les modules des fibres de lin (0,82 - 1 GPa) et de chanvre (1,03 GPa) sont quasiment identiques, ces deux types de fibres ayant des structures similaires. Le taux de cellulose et le MFA sont dans les mêmes gammes de valeurs (*Tableau 2*). Cette ressemblance structurale se retrouve au niveau des valeurs de module de Young disponibles dans la littérature.

La fibre de coco possède le module le plus élevé (2,81 GPa). Ce résultat est lié à sa structure radicalement différente, car, même si son taux de cellulose est faible (43-46%), son MFA est compris entre 39 et 49 °.

Remarque : Les écart-types sont plus élevés que pour les fibres synthétiques. Cette dispersion des résultats peut être liée à l'hétérogénéité des fibres naturelles.

Comparaison filasse/roving : L'unique différence entre les fibres provenant des lots de filasse D1_f, D2_f et D3_f et celles issues des lots de rovings D1_r, D2_r et D3_r se situe au niveau de l'étape de transformation supplémentaire subie par ces dernières. Cette étape dégrade les fibres par action mécanique. On observe donc logiquement une diminution du module de Coulomb de 0,57 GPa à 0,83 GPa en moyenne. Par contre, les écart-types tendent à diminuer (0,13 contre 0,3 GPa), ce qui pourrait traduire une homogénéisation des performances des fibres.

Influence du sens de rotation : Certaines fibres naturelles ont été sollicitées en appliquant des torsions dans le sens horaire et dans le sens antihoraire. L'objectif est de vérifier si le sens de sollicitation influence la mesure du module (cf. *Tableau 3*).

Tableau 3 : Module de torsion et écart-types des fibres naturelles en fonction du sens de sollicitation.

Nom	G _{min} (GPa)	e.c. (GPa)	G _{max} (GPa)	e.c. (GPa)
<i>Lin D1_r</i>	0,5	0,07	0,55	0,08
<i>Lin F1_f</i>	0,74	0,13	1,08	0,25
<i>Lin C1_f</i>	0,92	0,28	1,06	0,31

Les lots de filasses F1_f et C1_f montrent des différences de module selon le sens de sollicitation, allant de 0,18 à 0,34 GPa. Le lot Lin D1_r issu d'un roving, ne présente qu'une différence minimale (0,05 GPa) inférieure à l'écart-type.

D. CONCLUSIONS

Cette première série d'essais a montré que notre banc est adapté à la mesure du module de Coulomb des fibres. À la lumière de ces résultats, des relations structures/propriétés ont pu être proposées dans le cas des fibres naturelles.

Des essais complémentaires sont prévus pour affiner les résultats obtenus, notamment ceux concernant la relation entre le MFA et le sens de sollicitation. D'autres types de fibres seront testés (kevlar, nylon, cellulose, etc.) afin de valider les performances de notre banc sur un panel de matériaux plus large.

La prochaine étape du développement de ce banc est en cours et consiste à intégrer au sein de l'appareil un système de mesure précis du diamètre des fibres par diffraction laser. Cette mesure s'effectuera automatiquement avant l'essai (sur une fibre subissant l'effort de traction imposée par le mors inférieur).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Sfiligoj Smole, S. Hribernik, K. Stana Kleinschek & T. Kreže , *Plant Fibres for Textile and Technical Applications*, Advances in Agrophysical Research, Chapter 15 (2013) 398.
- [2] <http://www.copper.org/resources/>
- [3] J. Chen, Y. Lu, D. B. Church & D. Pate, *Torsional modulus of vapor-grown carbon fibers*, Applied Physics Letters 60 (1992) 19.
- [4] V. R. Mehta & S. Kumar, *Temperature dependent torsional properties of high performance fibres and their relevance to compressive strength*, Journal of Materials Science 29 (1994) 3658-3664
- [5] S. Kumar, in Proc. Znt. SAMPE Symp. and Exhib., 35, *Advanced Materials: Challenge Next Decade*, edited by G. Janicki, V. Bailey, and H. Schjelderup (1990) 2224-2235.
- [6] J.-B. Donnet and R.C. Bansal, *International Fiber Science and Technology 10(Carbon Fibers)*, 2d ed., Marcel Dekker, New York (1990) 267-366.
- [7] I. Prasanna Kumar, S. Prakash Kushwaha, P. Mohite & S. Kamle, *Longitudinal Shear Modulus of Single Aramid, Carbon and Glass Fibres by Torsion Pendulum Tests*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering 8, n°2 (2014).
- [8] D. Liu, Y. He, P. Hu, Z. Gan & H Ding, *A modified torsion pendulum for measuring the shear modulus of a single micro-sized filament*, Acta Mechanica Solida Sinica 27, n°3 (2014) 221-233.
- [9] S. Srinivasagopalan, *Thèse*, Université de Washington, Seattle (1979).
- [10] A. Bertherau & E. Dallies, *AM 5 132 - Fibres de verre de renforcement*, Technique de l'ingénieur (2008).
- [11] J. Gassan, A. Chate & A.K. Bledzki, *Calculation of elastic properties of natural fibers*, Journal of Materials Science 36 (2001) 371-3720.
- [12] S. Kawai, S. S. Munawar & K. Umemura, *Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fibers*, Journal of Wood Science 53, N°2 (2007) 108-113.
- [13] S. Kalia, B.S. Kaith, I. Kaur, *Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites—A Review*, Polymer Engineering & Science 49, N°7 (2009) 1253-1272.
- [14] V. Placet, F. Trivaudey, O. Cisse, V. Gucheret-Retel & M.L. Boubakar, *Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibers : A morphological, structural or ultra-structural effect?*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 43, N° 2 (2012) 275–287.