

FIBRE VÉGÉTALE ISOLÉE, MICROSTRUCTURE, CARACTÉRISATION EXPERIMENTALE, ET MODELISATION

V. Placet, F. Trivaudey, V. Guicheret-Retel, M.L. Boubakar

FEMTO-ST / Département Mécanique Appliquée, 24 rue de l'Épitaphe, 25 000 Besançon.
Téléphone : 03 81 66 60 55, Télécopie : 03 81 66 67 00, Adresse(s) électronique(s) :
vincent.placet@univ-fcomte.fr, frederique.trivaudey@univ-fcomte.fr, violaine.retel@univ-fcomte.fr,
lamine.boubakar@univ-fcomte.fr

Mots clés : Fibre chanvre / comportement hygro-mécanique / caractérisation / modélisation

1. INTRODUCTION

Les fibres issues de plantes annuelles (PF) cumulent de nombreux atouts tant sur le plan écologique (ressources renouvelables, recyclables, biodégradables), que technique (propriétés mécaniques spécifiques élevées) et socio-économique (faible coût de production et création d'emplois dans les régions productrices de fibres). C'est l'ensemble de ces qualités qui justifie leur utilisation dans la fabrication de matériaux composites. A ce jour, les PF sont utilisées pour la fabrication de matériaux composites essentiellement dans les domaines de la plasturgie, dans l'industrie automobile et dans le secteur de la construction. En Europe, leur utilisation a triplé durant cette dernière décennie pour atteindre environ 1.9% des 1.4 millions de tonnes de composites à matrice organique produits annuellement (Shah 2013). Cette augmentation est notable et la marge de progression possible est encore considérable. Il est également à noter qu'environ 95% de ces composites renforcés par des PF est utilisé dans des applications non-structurales (Carus 2011). Considérant les propriétés mécaniques assez exceptionnelles de certaines PF, comme le lin et le chanvre par exemple, d'autres applications structurales peuvent être envisagées afin de valoriser pleinement cette ressource végétale. Néanmoins, les freins et verrous scientifiques à lever pour accéder à une utilisation massive de ce type de matériaux restent nombreux, et sont liés tant à la filière de production des fibres, qu'aux technologies de fabrication et aux connaissances des propriétés des matériaux constitutifs et à la maîtrise de leur variabilité. Une des difficultés est en particulier liée à la forte sensibilité des fibres végétales aux conditions hygrothermiques. En effet, dans les composites à matrice organique traditionnels renforcés par des fibres inertes (verre et carbone), seule la matrice est susceptible d'absorber de l'eau de manière significative en fonction de son degré d'hydrophilie. Leur sensibilité à la température est également à prendre en compte dans les procédés de fabrication. Les nombreuses et récentes revues de la littérature dans ce domaine permettent de faire un état de l'art relativement exhaustif des connaissances disponibles pour ces matériaux à base de fibres végétales et de matrices organiques synthétiques ou biosourcées (Bledzki and Gassan 1999; Eichhorn, Baillie et al. 2001; Baley, Grohens et al. 2004; Yu, Dean et al. 2006; John and Thomas 2008; Satyanarayana, Arizaga et al. 2009; Summerscales, Dissanayake et al. 2010; Summerscales, Dissanayake et al. 2010; Jawaid and Abdul Khalil 2011; Faruk, Bledzki et al. 2012; Hughes 2012; Madsen and Gamstedt 2013; Shah 2013; Summerscales, Virk et al. 2013), et des verrous scientifiques et technologiques associés. L'utilisation massive de cette ressource d'origine végétale et sa valorisation dans des applications à hautes performances mécaniques et à forte valeur ajoutée requiert en particulier une meilleure compréhension du comportement mécanique des fibres végétales.

Dans ce cadre, plusieurs outils de caractérisation et de modélisation parfaitement adaptés aux spécificités des fibres végétales élémentaires ont été développés au sein de notre équipe. Cet article a pour objectif de souligner les difficultés majeures et les principales précautions à prendre pour assurer une caractérisation et une modélisation fiables et rigoureuses des fibres végétales élémentaires.

2. CARACTÉRISATION EXPERIMENTALE

La grande majorité des données disponibles à l'heure actuelle pour les fibres issues de plantes annuelles concernent le comportement en traction longitudinale. L'essai de traction est préféré à d'autres modes de sollicitation pour des raisons de faisabilité et de facilité de mise en œuvre expérimentale. Bien que généralement simple pour la plupart des matériaux, l'essai de traction présente néanmoins de nombreuses

difficultés lorsqu'il doit être réalisé sur des fibres végétales élémentaires. Ce paragraphe propose de mettre en avant les principales précautions à prendre et les difficultés majeures rencontrées lors de sa mise en œuvre.

2.1 Préparation des fibres élémentaires

Les fibres élémentaires sont généralement isolées des tissus végétaux qui les contiennent à l'aide de méthodes qui peuvent être classées en trois grandes catégories, à savoir les méthodes mécanique, chimique et thermo-hydrrique. Ces méthodes d'isolement peuvent être plus ou moins traumatisantes pour la paroi cellulaire. L'intégrité des propriétés mécaniques n'étant pas toujours conservées, les valeurs identifiées peuvent ainsi largement différer en fonction de la méthode choisie (Burgert, Eder et al. 2005; Burgert, Fruhmann et al. 2005; Burgert, Gierlinger et al. 2005).

Une fois isolées, les fibres unitaires sont positionnées sur des cadres en papier fenêtré. Une goutte de colle est ajoutée à chaque extrémité de la fibre. Ce cadre papier a pour objectif de faciliter la manipulation de la fibre et son positionnement sur le dispositif de traction (Figure 1).

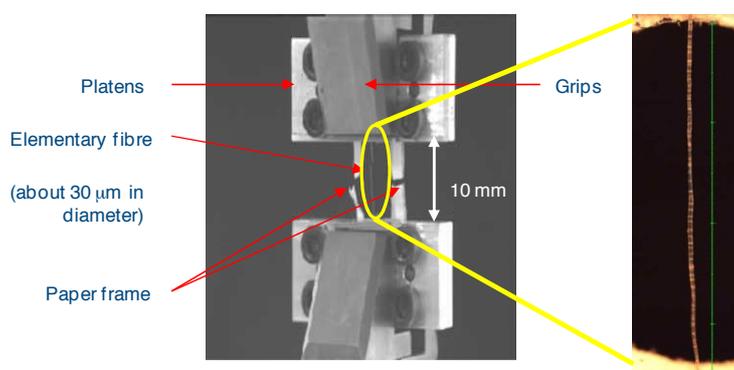


Figure 1: Fibre élémentaire de chanvre positionnée sur un dispositif de traction.

Dans cette méthode, une des premières grandes difficultés consiste à s'assurer du caractère unitaire de la fibre isolée. Bien que majeur, ce point n'est que très rarement abordé dans la littérature. La plupart des auteurs travaillant sur les fibres élémentaires issues des plantes annuelles, essaient de s'assurer du caractère unique de la fibre en travaillant en microscopie optique sous lumière polarisée en s'appuyant sur des critères dimensionnels principalement liés au diamètre externe de la fibre. Pour le chanvre, ces précautions sont insuffisantes. Des travaux récents réalisés dans notre équipe ont montré que pour un même diamètre extérieur de fibre, la structure interne peut être très différente. Le procédé de défibrage ne permet pas d'obtenir le même niveau de dégradation des interfaces pectiques entre fibres, celles-ci peuvent ainsi rester organisées sous forme de faisceaux. La caractérisation rapide et non-destructive de la structure interne des fibres végétales demeure un réel défi pour la communauté scientifique et constitue une étape incontournable pour réaliser des essais de caractérisation fiables.

2.2 Détermination de la section utile

La littérature fait état d'une grande variabilité des propriétés mécaniques des fibres. Cette variabilité peut être attribuée : (i) à la dispersion introduite par les méthodes de caractérisation expérimentale et (ii) à la variabilité même des fibres. Cette dispersion est particulièrement importante au niveau de la rigidité et de la résistance. Virk *et al.* (Virk, Hall et al. 2010) ont démontré sur des fibres de jute que le coefficient de variation (CoV) de la déformation à rupture est considérablement plus faible que celui de la rigidité et de la résistance. Contrairement à la déformation à rupture, ces deux dernières grandeurs dépendent directement de la section utile de la fibre. Il apparaît que des erreurs importantes sont induites au cours de la détermination de la section utile des fibres. La plupart des approches utilisées dans la littérature consistent à déterminer la section utile en considérant la fibre parfaitement cylindrique, en ignorant la présence du vide cellulaire, et en considérant la section constante selon la longueur de la fibre (Figure 2).

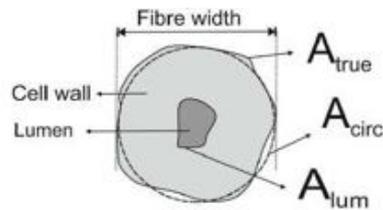


Figure 2: Sections utiles de la fibre élémentaire. Extrait de Aslan et al. (Aslan, Chinga-Carrasco et al. 2011)

D'après Aslan et al. (Aslan, Chinga-Carrasco et al. 2011), c'est une des plus importantes sources de variabilité des propriétés des fibres. Thomason et al. (Thomason, Carruthers et al. 2011) ont montré pour le lin et le sisal, qu'en déterminant la section utile à partir de la mesure du diamètre extérieur et en faisant les hypothèses citées précédemment, une sous-estimation d'environ 60% en moyenne était effectuée sur la rigidité et la résistance des fibres. Cette valeur est en accord avec les 42% trouvés par Virk (Virk 2010) sur le jute. La méthode d'évaluation de la section utile à partir de la mesure du diamètre extérieur n'est donc en aucun cas satisfaisante. La méthode utilisée conditionne complètement les valeurs de rigidité, de résistance et les lois de distribution associées. Bien sûr, même dans les conditions d'une détermination fiable et précise de la section utile, la question de représentativité des valeurs de résistance et rigidité est toujours discutable dans le cas de variations notables de la section utile selon la longueur de la fibre. Là encore le développement de techniques rapides et non-destructives permettant la détermination de la section utile, de son évolution le long de la fibre et également de son évolution pendant un essai de traction représente un point crucial dans la communauté.

2.3 Détermination des propriétés mécaniques en traction

Outre l'erreur commise en utilisant une section utile approchée, de nombreux autres facteurs peuvent être à l'origine de la dispersion des propriétés mécaniques identifiées sur un lot de fibres élémentaires. Quelques points importants sont abordés ci-dessous.

2.3.1 Non-linéarité de la courbe de traction. La littérature fait état à plusieurs reprises d'un comportement non-linéaire en traction à l'échelle de fibres élémentaires issues du bois et de plantes annuelles et également à l'échelle de tissus végétaux composés de plusieurs fibres élémentaires.

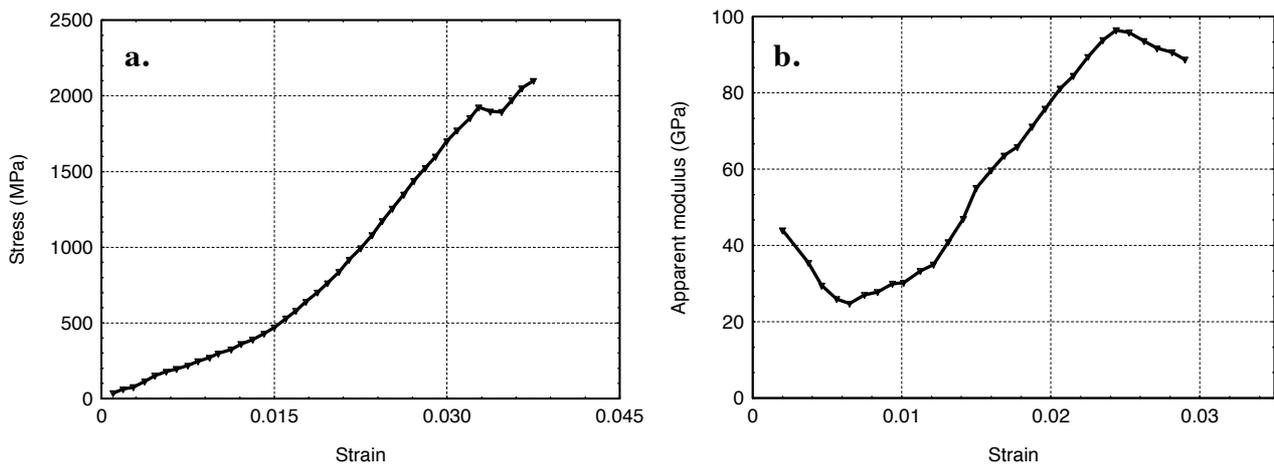


Figure 3: Courbe contrainte / déformation (a) et module apparent / déformation (b) collectées lors d'un essai de traction longitudinale sur une fibre élémentaire de chanvre.

Ces observations ont été faites par Baley (Baley 2002), Charlet (Charlet 2008) et Aslan et al. (Aslan, Chinga-Carrasco et al. 2011) pour les fibres issues du lin, Pickering et al. (Pickering, Beckermann et al. 2007), Duval et al. (Duval, Bourmaud et al. 2011), Placet et al. (Placet, Cisse et al. 2012; Placet, Cisse et al. 2013), Marrot et al. (Marrot, Lefeuvre et al. 2013) pour le chanvre, Page et al. (Page, EL-Hosseiny et al. 1971; Page and El-Hosseiny 1983), Navi et al. (Navi and Heger 2005; Sedighi-Gilani 2006; Sedighi-

Gilani and Navi 2007), Burgert et al. (Burgert, Eder et al. 2005), Keckes et al. (Keckes, Burgert et al. 2003) pour les fibres issues du bois, Cabrolier (Cabrolier 2012), Pot (Pot 2012) pour les tissus issus du bois, Köhler (Kohler 2000) pour d'autres tissus issus de végétaux.

Le Figure 3a représente la réponse-type d'une fibre élémentaire de chanvre, faisant apparaître une forte non-linéarité. En traçant l'évolution du module apparent tangent en fonction de la déformation, il apparaît clairement une forte évolution de celui-ci au cours de l'essai (Figure 3b). L'origine de cette non-linéarité est abordée dans un article dédié (Placet, Cisse et al. 2013).

Au vu de ces résultats, il apparaît indispensable de spécifier, dans toute démarche expérimentale menée sur de telles fibres, la méthode utilisée pour extraire un module apparent à partir de la courbe expérimentale.

2.3.2 Histoire thermo-hygro-mécanique de la fibre. L'histoire thermo-hygro-mécanique des fibres testées conditionne également les propriétés identifiées. Effectivement les fibres issues de plantes annuelles, une fois séparées les unes des autres peuvent présenter des défauts et des vrillages non-négligeables induits par la relaxation de contraintes internes de croissance, par des contraintes de séchage ou par des sollicitations mécaniques liées au procédé de défibrage.

Vrillage initial

Un vrillage initial a été observé sur de nombreuses fibres de chanvre (Figure 4). Nous avons montré que ce vrillage initial influence significativement le comportement en traction des fibres (Placet, Cisse et al. 2013).

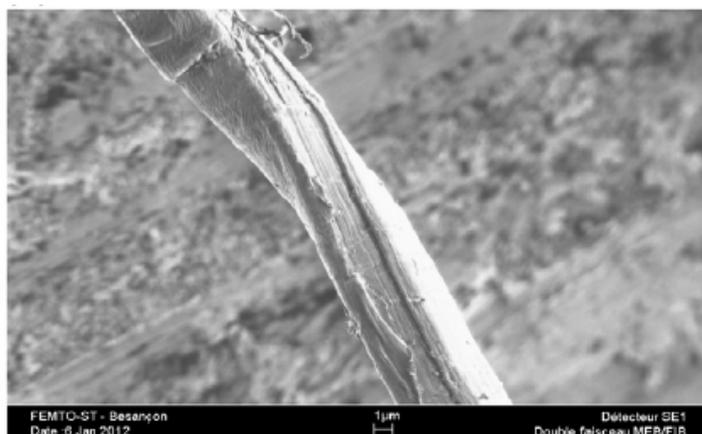


Figure 4: Image MEB d'une fibre de chanvre vrillée.

Dislocations

Des défauts peuvent également être générés par des contraintes induites durant la croissance de la plante, contraintes induites par le vent et par des déficits hydriques, ou par des contraintes mécaniques liées au procédé de défibrage lui-même. Pour le chanvre, ces zones de défauts appelés dans la littérature « genoux » ou encore « nœuds », « dislocations », « kink bands » correspondent à des zones dans lesquelles l'angle des microfibrilles de cellulose est différent de celui des zones avoisinantes. La cellulose cristalline étant biréfringente, il est possible de visualiser aisément ces zones en microscopie optique sous lumière polarisée. Les couleurs observées sont dues aux interférences entre les composantes lentes et rapides de la lumière provenant de la fibre. Les zones de dislocation peuvent parfois être visualisées en microscopie électronique mais à la seule condition que la variation de l'AMF soit accompagnée d'une modification de la topologie de la fibre, ce qui n'est pas systématique (Figure 5).

Ces zones de dislocation, principalement localisées dans la couche S_2 (Thygesen, Bilde-Sørensen et al. 2006), représentent 12 à 21% de la paroi cellulaire totale (Thygesen and Asgharipour 2008). Elles pourraient avoir un impact non-négligeable sur le comportement mécanique en traction de la fibre isolée, en particulier sur sa résistance. Les seuls résultats publiés et connus à ce jour semblent montrer que la résistance des fibres de chanvre n'est pas altérée par une augmentation de la proportion de zones de dislocations (Thygesen, Eder et al. 2007).

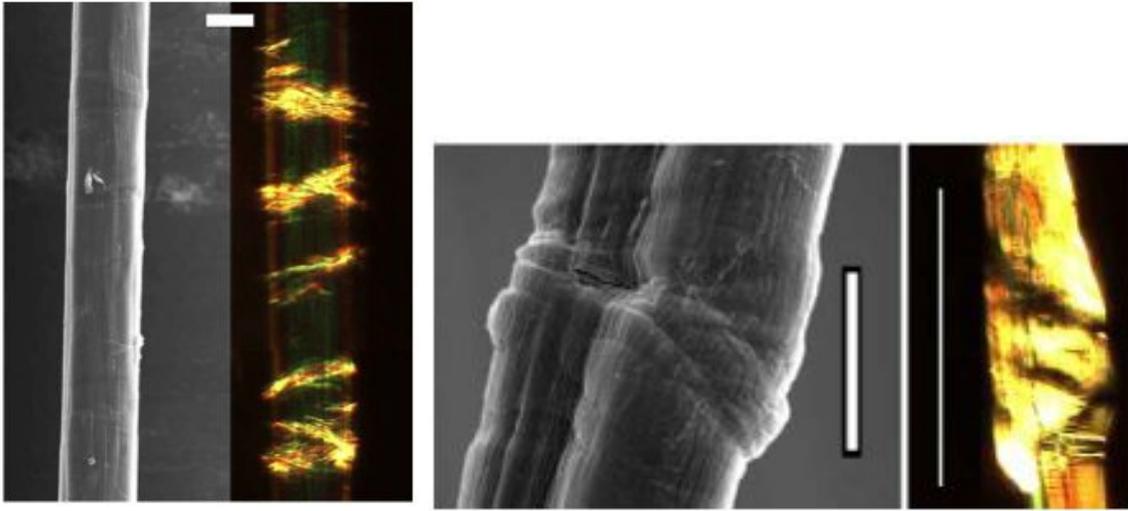


Figure 5: Exemples d'images montrant les mêmes zones d'observation en MEB et LMP. (échelles : gauche -> 20mm, droite -> 10 mm). D'après Thygesen et al. (Thygesen, Bilde-Sørensen et al. 2006).

Dans ce même papier, les auteurs montrent que ces zones de dislocation disparaissent sous sollicitation de traction et qu'une fois déchargée elles ne réapparaissent qu'après des temps très longs. Dans des travaux récents (Placet, Cisse et al. 2013), nous avons montré que la réapparition des zones de défaut était directement dépendante du temps écoulé après déchargement. Bien que nous ne connaissions pas exactement à l'heure actuelle les mécanismes permettant leur création, certaines de ces zones de dislocation sont mises en place pendant le développement de la plante. Il est fort probable que les dislocations puissent être bénéfiques dans le rôle structural que remplissent les fibres. Il est d'ailleurs intéressant de souligner que ces dislocations n'existent pas dans des fibres qui ne remplissent pas de rôle structural dans la plante, comme pour le coton.

Si l'influence des zones de défaut sur les propriétés mécaniques des fibres n'est pas encore complètement déterminée, il paraît néanmoins primordial de prendre en compte leur existence dans une démarche de caractérisation.

Histoire des chargements mécaniques et environnementaux

Une rigidification de certaines PF sous chargements répétés a été mise en évidence dans la littérature avec une augmentation du module d'élasticité apparent de l'ordre de 60-80% pour le lin (Baley 2002) et du même ordre de grandeur pour le sisal par Silva et al. (Silva, Chawla et al. 2009).

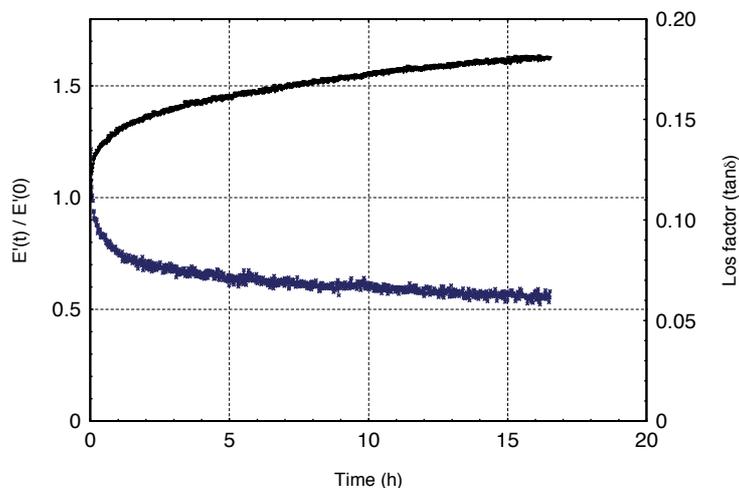


Figure 6: Evolution du module d'Young apparent normalisé et de la capacité d'amortissement sous chargement cyclique. Sollicitation sinusoïdale de traction (Fréquence : 1 Hz, amplitude dynamique : 50 MPa), Humidité Relative : 50%, Température ambiante.

Nous avons également mis en évidence l'existence de ce phénomène de rigidification sous chargement cyclique pour les fibres élémentaires de chanvre. Des rigidifications de l'ordre de 60% ont été observées sous chargement cyclique (Figure 6). Il a également été montré que ce phénomène est partiellement réversible, dépendant de la fréquence de sollicitation (Placet 2010)) et qu'il peut être activé par la température (Placet 2009) et l'humidité. Dans des conditions optimisées, la rigidification peut atteindre des niveaux de l'ordre de 400% (Placet, Cisse et al. 2012).

2.3.3 Conditions aux limites. L'importance des conditions aux limites des essais de traction sur fibres élémentaires, et en particulier du blocage de la rotation, est souvent abordée d'un point de vue théorique. Effectivement l'enroulement en hélice des microfibrilles de cellulose est à l'origine d'un fort couplage traction/torsion. Le module d'Young apparent des fibres dépend ainsi directement des conditions aux limites en rotation (Figure 7).

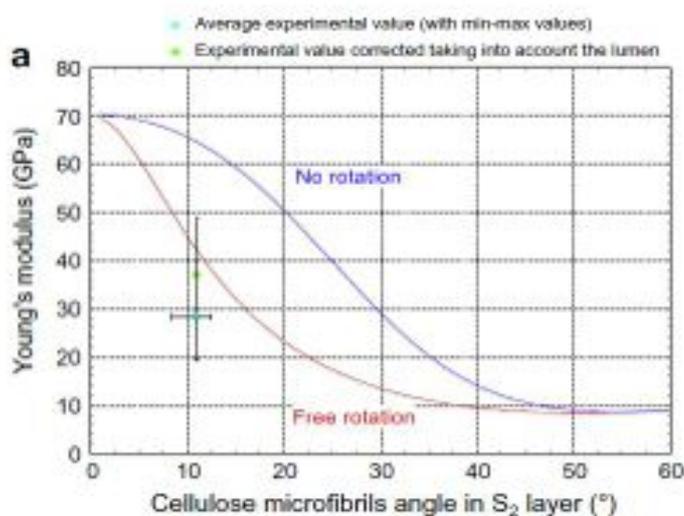


Figure 7: Evolution du module d'Young en fonction de l'AMF pour un essai de traction dans des conditions de rotation libre ou bloquée.

D'un point de vue expérimental, nous avons montré l'existence de ce couplage et son activation possible par des mécanismes de sorption d'eau (Figure 8). Sous chargement de traction constant, l'angle de rotation augmente avec une augmentation d'humidité relative. Une rotation d'environ 25° a été mesurée pour une fibre de 10 mm de long entre 10 et 80 % d'HR. Quand l'HR augmente, la fibre tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Le sens de rotation s'inverse pour le séchage de la fibre. Ceci est cohérent avec l'orientation « Z-twist » des microfibrilles de cellulose dans la couche S_2 des fibres de chanvre.

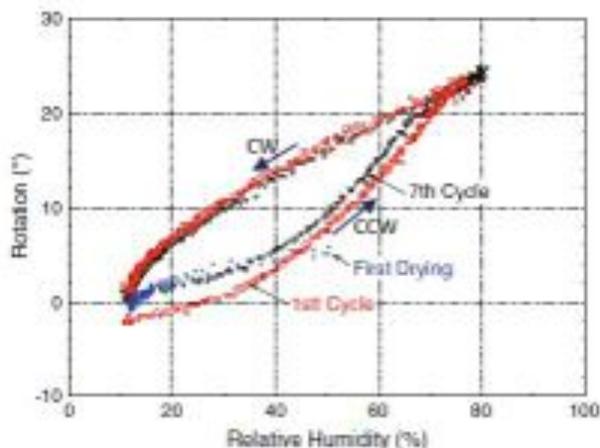


Figure 8: Rotation de la fibre de chanvre soumise à des variations d'HR sous chargement mécanique longitudinal de traction constant.

Il est également important de noter que les conditions d'encastrement des fibres (noyées dans une résine ou une colle) sont mal maîtrisées. Celles-ci peuvent affecter les valeurs de déformation, en particulier lorsque celles-ci sont déterminées à partir du déplacement du mors de traction.

2.3.4 Conditions d'essais

Conditions hygro-thermiques

La teneur en eau des PF augmente avec l'humidité relative. Les interactions entre l'eau et les fibres peuvent être expliquées par la compétition qui existe entre les différents groupes hydroxyles des polymères constitutifs de la paroi cellulaire, et entre ces mêmes groupes, et les molécules ou clusters de molécules d'eau (Pejic, Kostic et al. 2008). La forme sigmoïde des courbes de sorption reflète la combinaison de cet ensemble de mécanismes de sorption entrant en compétition dans les fibres. Les vitesses des différents mécanismes dépendent directement de l'accessibilité des sites de sorption mis en jeu (groupes polaires, micro-cavités et porosités, molécules d'eau...). La courbe peut être généralement décomposée en trois segments. A basse HR (0-15%), l'adsorption d'une monocouche d'eau à la surface de la paroi cellulaire est le processus dominant. Pour des HR comprises entre 15 et 70%, la formation de multicouches dans les microcapillarités transitoires de la paroi cellulaire et la sorption au niveau des zones amorphes et autour des cristallites dominant. Au-delà de 70% HR, les processus de sorption et désorption sont non-fickiens, la condensation capillaire devient le mécanisme dominant (Hill, Norton et al. 2009; Hill, Norton et al. 2010). Les cinétiques de sorption des PF dépendent également étroitement de la température (Saikia and Bora 2003).

Cette sorption d'eau induit chez les PF des variations dimensionnelles de la paroi cellulaire dues aux ruptures des liaisons hydrogènes intra et inter-moléculaires. Du fait des difficultés rencontrées expérimentalement pour les mesurer, ces variations dimensionnelles ne sont que très rarement prises en compte dans la détermination des propriétés mécaniques.

Outre les propriétés physiques, le comportement et les propriétés mécaniques des PF sont également affectés par la sorption/désorption d'eau. Très peu d'études ont été menées sur les PF. Les résultats de la littérature sont parcellaires et parfois contradictoires. Le manque de cohérence des résultats de la littérature n'est pas surprenant au vu des conditions expérimentales adoptées par certains auteurs. Considérant les temps de sorption/désorption extrêmement courts pour des fibres élémentaires, il ne paraît effectivement pas raisonnable de tester les fibres à HR ambiante après conditionnement à l'HR désirée dans une enceinte séparée de la machine d'essais. Il est indispensable de contrôler finement l'HR pendant l'essai. Dans ce contexte, nous avons développé ces dernières années des dispositifs expérimentaux permettant un contrôle fin des conditions hygro-thermiques pendant les essais mécaniques. Les résultats collectés montrent clairement l'influence de l'HR (Placet, Cisse et al. 2012; Placet, Trivaudey et al. 2012) et de la température (Placet 2009) sur les propriétés en traction.

Vitesses de chargement

Bien que peu abordée dans la littérature, la vitesse de chargement représente un paramètre très influent dans la détermination des propriétés mécaniques des fibres végétales. Effectivement, nous avons montré à l'aide d'essais de fluage et d'essais harmoniques le comportement viscoélastique des fibres de chanvre (Cisse, Placet et al. 2013), comportement particulièrement marquée dans certaines conditions hygrothermiques.

3. MODELISATION

La construction de modèles micro-mécaniques pour les fibres végétales élémentaires constitue une étape importante et dont l'objectif est double (i) mieux comprendre dans quelle mesure chacun des mécanismes physiques se déroulant au sein de cette structure complexe pilote le comportement de la fibre et (ii) disposer d'outils de prédiction. Les modèles disponibles dans la littérature sont basés sur des formulations macroscopiques qui utilisent les notions de la mécanique des milieux continus. Il repose sur certaines hypothèses constitutives discutées ci-dessous.

3.1 Géométrie

La plupart des modèles des fibre végétale disponibles dans la littérature sont basés sur la théorie des stratifiés. Ils permettent de relier les paramètres ultrastructuraux et biochimiques et les propriétés des constituants de base de la paroi cellulaire aux propriétés mécaniques de la fibre. Les premiers modèles « type plaque » considèrent la fibre comme une structure stratifiée anti-symétrique. Cette géométrie est très éloignée de la structure réelle de la fibre (Gassan, Chate et al. 2001). Plus récemment des modèles sophistiqués basés sur la théorie des stratifiés tubulaires à parois épaisses ont été développés (Gassan, Chate et al. 2001; Neagu and Gamstedt 2007; Marklund and Varna 2009; Placet, Trivaudey et al. 2012). Ils sont capables de prendre en compte la présence du vide cellulaire et de formuler les relations contraintes-déformations 3D existant dans le stratifié sous chargement mécanique. La résolution analytique nécessite de considérer la fibre comme une structure parfaitement cylindrique à couches concentriques. Moyennant une résolution par EF, il est également possible de prendre en compte la géométrie réelle de la fibre. Ceci requiert de pouvoir accéder expérimentalement à la morphologie 3D de la fibre.

3.2 Propriétés de la paroi cellulaire

Dans ces modèles, chaque couche est considérée comme un composite renforcé par des microfibrilles de cellulose continues noyées dans une matrice amorphe de composants para-cellulosiques et de lignines. Les propriétés des sous-couches pariétales sont calculées par homogénéisation. A ce niveau, la principale hypothèse repose sur la représentation schématique de l'organisation microstructurale et ultrastructurale de la paroi cellulaire. Malgré l'évolution des outils de caractérisation et les avancées récentes, de nombreuses questions demeurent quant à la distribution et l'organisation des constituants polymériques au sein de la paroi, quant à la position de la cellulose amorphe au sein des microfibrilles, l'interaction avec les constituants paracellulosiques (O'Sullivan 1997). Parmi les nombreux schémas proposés et utilisés dans la littérature, il semble néanmoins que l'arrangement mixte suggérant de la cellulose amorphe en série et en parallèle de la cellulose cristalline fasse de plus en plus consensus au sein de la communauté. La modélisation des microfibrilles de cellulose par un renfort continu pourrait donc être discutée. Les modèles auraient beaucoup à gagner d'une meilleure caractérisation et compréhension de l'organisation de la paroi cellulaire.

Une autre source d'incertitude réside dans les propriétés mécaniques de ces polymères constitutifs et leurs évolutions en fonction des conditions hygrothermiques. La plupart des données disponibles dans la littérature datent des années 70, et ont été déterminées sur les polymères extraits. Là encore des mesures de propriétés *in situ* permettraient certainement de collecter des données d'entrée largement plus fiables.

3.3 Lois de comportement

Dans la plupart des modèles actuels, le comportement du matériau homogénéisé ou des constituants de base est considéré élastique linéaire. Seuls quelques auteurs proposent des comportements plus évolués, et en particulier dissipatifs (Sedighi-Gilani 2006; Nilsson and Gustafsson 2007). La source de dissipation est la plasticité. En implémentant ce type de loi de comportement, les auteurs sont capables de reproduire un comportement non-linéaire en traction, similaire à celui observé expérimentalement. Certains auteurs proposent également de prendre en compte certains couplages hygro-mécaniques en implémentant une loi de comportement hygro-élastique (Neagu and Gamstedt 2007; Placet, Trivaudey et al. 2012; Roudier 2012).

Considérant les observations expérimentales, il semble que ces modèles ne sont capables à l'heure actuelle de prendre en compte qu'une partie des mécanismes physiques dont la fibre élémentaire est le siège. Les phénomènes viscoélastiques, les redressements de microfibrilles de cellulose, l'évolution du taux de cristallinité ainsi que les couplages mécano-sorptifs (traction-rotation, accélération du fluage...) sont à l'heure actuelle négligés.

Un modèle de comportement développé dans notre équipe et intégrant l'ensemble de ces mécanismes physiques devraient être publié sous peu.

4. CONCLUSION

Ce papier a permis de dresser un bon nombre de difficultés et de proposer un certain nombre de voies permettant d'améliorer la caractérisation et la modélisation de fibres végétales élémentaires sollicitées en traction longitudinale.

En parallèle et pour mieux répondre aux besoins de la filière composite, un travail d'envergure reste à produire afin de caractériser finement le comportement transverse de ces fibres ainsi que leur comportement sous divers modes de sollicitations.

REFERENCES

- Aslan, M., G. Chinga-Carrasco, et al. (2011). "Strength variability of single flax fibres." *Journal of Materials Science* **46**(19 DO - 10.1007/s10853-011-5581-x): 6344-6354.
- Baley, C. (2002). "Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **33**(7): 939-948.
- Baley, C., Y. Grohens, et al. (2004). "Etat de l'art sur les matériaux composites biodégradables." *Revue des composites et matériaux avancés* **14**: 135-166.
- Bledzki, A. K. and J. Gassan (1999). "Composites reinforced with cellulose based fibres." *Progress in Polymer Science* **24**(2): 221-274.
- Burgert, I., M. Eder, et al. (2005). Properties of chemically and mechanically isolated fibres of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). Part 3: Mechanical characterisation. *Holzforschung*. **59**: 354.
- Burgert, I., K. Fruhmann, et al. (2005). Properties of chemically and mechanically isolated fibres of spruce (*Picea abies*[L.] Karst.). Part 2: Twisting phenomena. *Holzforschung*. **59**: 247.
- Burgert, I., N. Gierlinger, et al. (2005). Properties of chemically and mechanically isolated fibres of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). Part 1: Structural and chemical characterisation. *Holzforschung*. **59**: 240.
- Cabrolier, P. (2012). Caractérisation des propriétés structurales et mécaniques des composantes pariétales du bois à l'échelle du tissu., AgroParisTech.
- Carus, M. (2011). *Bio-composites: technologies, applications and markets*. 4th international conference on sustainable materials, polymers and composites., Birmingham, United Kingdom.
- Charlet, K. (2008). Contribution à l'étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin : relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques., Caen/Basse-Normandie.
- Cisse, O., V. Placet, et al. (2013). *Mechanosorptive creep in single hemp fibres*. Composites Week à Leuven., Leuven, Belgium.
- Duval, A., A. Bourmaud, et al. (2011). "Influence of the sampling area of the stem on the mechanical properties of hemp fibers." *Materials Letters* **65**(4): 797-800.
- Eichhorn, S. J., C. A. Baillie, et al. (2001). "Review: Current international research into cellulosic fibres and composites." *Journal of Materials Science* **36**(9 DO - 10.1023/A:1017512029696): 2107-2131.
- Faruk, O., A. K. Bledzki, et al. (2012). "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010." *Progress in Polymer Science* **37**(11): 1552-1596.
- Gassan, J., A. Chate, et al. (2001). "Calculation of elastic properties of natural fibers." *Journal of Materials Science* **36**(15 DO - 10.1023/A:1017969615925): 3715-3720 LA - English.
- Hill, C. A. S., A. Norton, et al. (2009). "The water vapor sorption behavior of natural fibers." *Journal of Applied Polymer Science* **112**(3): 1524-1537.
- Hill, C. A. S., A. Norton, et al. (2010). "The water vapor sorption behavior of flax fibers - Analysis using the parallel exponential kinetics model and determination of the activation energies of sorption." *Journal of Applied Polymer Science* **116**(4): 2166-2173.
- Hughes, M. (2012). "Defects in natural fibres: their origin, characteristics and implications for natural fibre-reinforced composites." *Journal of Materials Science* **47**(2 DO - 10.1007/s10853-011-6025-3): 599-609.
- Jawaid, M. and H. P. S. Abdul Khalil (2011). "Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review." *Carbohydrate Polymers* **86**(1): 1-18.
- John, M. J. and S. Thomas (2008). "Biofibres and biocomposites." *Carbohydrate Polymers* **71**(3): 343-364.
- Keckes, J., I. Burgert, et al. (2003). "Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood." **2**(12): 810-813.
- Kohler, L. (2000). "Biphasic mechanical behaviour of plant tissues." *Materials Science and Engineering: C* **11**(1): 51-56.
- Madsen, B. and E. K. Gamstedt (2013). "Wood versus Plant Fibers: Similarities and Differences in Composite Applications." *Advances in Materials Science and Engineering* **2013**(564346): 14.
- Marklund, E. and J. Varna (2009). "Modeling the Effect of Helical Fiber Structure on Wood Fiber Composite Elastic Properties." *Applied Composite Materials* **16**(4 DO - 10.1007/s10443-009-9091-9): 245-262.
- Marrot, L., A. Lefeuvre, et al. (2013). "Analysis of the hemp fiber mechanical properties and their scattering (Fedora 17)." *Industrial Crops and Products* **51**(0): 317-327.
- Navi, P. and F. Heger (2005). *Comportement thermo-hydomécanique du bois*., Presses polytechniques et universitaire romandes.

- Neagu, R. C. and E. K. Gamstedt (2007). "Modelling of effects of ultrastructural morphology on the hygroelastic properties of wood fibres." Journal of Materials Science **42**(24 DO - 10.1007/s10853-006-1199-9): 10254-10274.
- Nilsson, T. and P. J. Gustafsson (2007). "Influence of dislocations and plasticity on the tensile behaviour of flax and hemp fibres." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **38**(7): 1722-1728.
- O'SULLIVAN, A. (1997). "Cellulose: the structure slowly unravels." Cellulose **4**(3 DO - 10.1023/A:1018431705579): 173-207.
- Page, D. and F. El-Hosseiny (1983). "The mechanical properties of single wood pulp fibres. Part VI. Fibril angle and the shape of the stress-strain curve." Pulp & paper Canada. **84**(9): 99-100.
- Page, D. H., F. EL-Hosseiny, et al. (1971). "Behaviour of Single Wood Fibres under Axial Tensile Strain." **229**(5282): 252-253.
- Pejic, B. M., M. M. Kostic, et al. (2008). "The effects of hemicelluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers." Bioresour Technol **99**(15): 7152-9.
- Pickering, K. L., G. W. Beckermann, et al. (2007). "Optimising industrial hemp fibre for composites." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **38**(2): 461-468.
- Placet, V. (2009). "Characterization of the thermo-mechanical behaviour of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Special Issue: 15th French National Conference on Composites - JNC15 **40**(8): 1111-1118.
- Placet, V. (2010). Tensile behaviour of natural fibres. Effect of loading rate, temperature and humidity on the "accommodation" phenomena. International Conference on Experimental Mechanics, Poitiers.
- Placet, V., O. Cisse, et al. (2013). "Nonlinear tensile behaviour of elementary hemp fibres. Part I: Investigation of the possible origins using repeated progressive loading with in situ microscopic observations." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing(0).
- Placet, V., O. Cisse, et al. (2012). "Influence of environmental relative humidity on the tensile and rotational behaviour of hemp fibres." Journal of Materials Science **47**(7 DO - 10.1007/s10853-011-6191-3): 3435-3446 LA - English.
- Placet, V., F. Trivaudey, et al. (2012). "Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres: A morphological, structural or ultrastructural effect?" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **43**(2): 275-287.
- Placet, V., F. Trivaudey, et al. (2012). Modeling the influence of environmental relative humidity on the tensile properties of unitarian hemp fibres. ECCM15, Venice, Italy.
- Pot, G. (2012). Caractérisation mécanique du bois vert au cours de sa maturation et modélisation de la réaction gravitropique de jeunes peupliers., Clermond-Ferrand.
- Roudier, A. (2012). Analyse multi-échelle du comportement hygro-mécanique des fibres de lin., Clermond-Ferrand.
- SAIKIA, D. and M. N. BORA (2003). "Study of hygroscopic properties of some plant fibres under thermal condition." Indian journal of pure & applied physics **41**(6): 4.
- Satyanarayana, K. G., G. G. C. Arizaga, et al. (2009). "Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers: "An overview." Progress in Polymer Science **34**(9): 982-1021.
- Sedighi-Gilani, M. (2006). A micromechanical approach to the behavior of single wood fibers and wood fracture at cellular level. Lausanne, EPFL.
- Sedighi-Gilani, M. and P. Navi (2007). "Experimental observations and micromechanical modeling of successive-damaging phenomenon in wood cells' tensile behavior." Wood Science and Technology **41**(1 DO - 10.1007/s00226-006-0094-5): 69-85 LA - English.
- Shah, D. (2013). "Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review." Journal of Materials Science **48**(18 DO - 10.1007/s10853-013-7458-7): 6083-6107.
- Silva, F. d. A., N. Chawla, et al. (2009). "An experimental investigation of the fatigue behavior of sisal fibers." Materials Science and Engineering: A **516**(1â€²2): 90-95.
- Summerscales, J., N. Dissanayake, et al. (2010). "A review of bast fibres and their composites. Part 2 - Composites." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **41**(10): 1336-1344.
- Summerscales, J., N. P. J. Dissanayake, et al. (2010). "A review of bast fibres and their composites. Part 1- Fibres as reinforcements." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **41**(10): 1329-1335.
- Summerscales, J., A. Virk, et al. (2013). "A review of bast fibres and their composites: Part 3- Modelling." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **44**(0): 132-139.
- Thomason, J. L., J. Carruthers, et al. (2011). "Fibre cross-section determination and variability in sisal and flax and its effects on fibre performance characterisation." Composites Science and Technology **71**(7): 1008-1015.
- Thygesen, L. and M. Asgharipour (2008). "The effects of growth and storage conditions on dislocations in hemp fibres." Journal of Materials Science **43**(10 DO - 10.1007/s10853-008-2587-0): 3670-3673.
- Thygesen, L., M. Eder, et al. (2007). "Dislocations in single hemp fibres - investigations into the relationship of structural distortions and tensile properties at the cell wall level." Journal of Materials Science **42**(2 DO - 10.1007/s10853-006-1113-5): 558-564 LA - English.
- Thygesen, L. G., J. B. Bilde-Sørensen, et al. (2006). "Visualisation of dislocations in hemp fibres: A comparison between scanning electron microscopy (SEM) and polarized light microscopy (PLM)." Industrial Crops and Products **24**(2): 181-185.
- Virk, A. (2010). Numerical models for natural fibre composites with stochastic properties.
- Virk, A. S., W. Hall, et al. (2010). "Failure strain as the key design criterion for fracture of natural fibre composites." Composites Science and Technology **70**(6): 995-999.
- Yu, L., K. Dean, et al. (2006). "Polymer blends and composites from renewable resources." Progress in Polymer Science **31**(6): 576-602.