

Variations Dimensionnelles et Comportement Mécanique de Plusieurs Espèces de Fibres Végétales en Conditions Hydro/Hygrothermiques Contrôlées

William Garat, Stéphane Corn, Nicolas Le Moigne, Johnny Beaugrand,
Patrick Ienny, Anne Bergeret

► **To cite this version:**

William Garat, Stéphane Corn, Nicolas Le Moigne, Johnny Beaugrand, Patrick Ienny, et al.. Variations Dimensionnelles et Comportement Mécanique de Plusieurs Espèces de Fibres Végétales en Conditions Hydro/Hygrothermiques Contrôlées. Revue des composites et des matériaux avancés, Lavoisier, 2019, 29 (5), pp.299-304. 10.18280/rcma.290504 . hal-02432958

HAL Id: hal-02432958

<https://hal.mines-ales.fr/hal-02432958>

Submitted on 25 Jan 2021

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.

Dimensional Variations and Mechanical Behavior of Various Plant Fibre Species under Controlled Hydro / Hygrothermal Conditions

Variations Dimensionnelles et Comportement Mécanique de Plusieurs Espèces de Fibres Végétales en Conditions Hydro/Hygrothermiques Contrôlées

William Garat¹, Stéphane Corn¹, Nicolas Le Moigne^{1*}, Johnny Beaugrand^{2,3}, Patrick Ienny¹, Anne Bergeret¹

¹ C2MA, IMT Mines Ales, Université de Montpellier, 6 avenue de Clavières, 30100 Ales, France

² Laboratoire FARE (INRA), Université de Reims Champagne Ardenne, 2 esplanade Roland Garros, 51100 Reims, France

³ Biopolymères Interactions Assemblages (BIA), INRA, 44 316 Nantes, France

Corresponding Authors Emails: nicolas.le-moigne@mines-ales.fr

Keywords:

natural fibres, swelling, mechanical properties, hydro/hygrothermal conditions

Mots-clés :

fibres végétales, gonflement, propriétés mécaniques, conditions hydro/hygrothermiques

ABSTRACT:

The behavior of biocomposites and their durability are largely influenced by the variations in intrinsic properties between plant species, as well as their high sensitivity to hydro/hygrothermal conditions. In order to quantify these phenomena, we studied the effect of environmental conditions (temperature, relative humidity and immersion) on the dimensional variations and on the mechanical behavior of fiber bundles from several botanical origins with contrasting phenotypic characteristics. Our results evidenced differences in swelling and plasticization behaviors from one species to another, thus opening interesting perspectives for the predictive modeling of the “in service” mechanical behavior of biocomposites.

RÉSUMÉ :

Le comportement des biocomposites et leur durabilité sont influencés en grande partie par la différence de propriétés intrinsèques entre les espèces végétales ainsi que par la forte sensibilité de ces renforts aux conditions hydro/hygrothermiques. Afin de quantifier ces phénomènes, nous avons étudié l'effet des conditions environnementales (température, humidité relative et immersion) sur les variations dimensionnelles et le comportement mécanique de faisceaux de fibres d'origines botaniques aux caractéristiques phénotypiques contrastées. Nos résultats ont mis en évidence des comportements de gonflement et de plastification différenciés d'une espèce à l'autre, ouvrant ainsi des perspectives intéressantes pour la modélisation prédictive du comportement mécanique « en service » des biocomposites.

1. INTRODUCTION

Actuellement, l'industrie montre un intérêt croissant pour le développement des biocomposites. Des fibres végétales d'origine botanique variée sont d'ores et déjà intégrées comme renforts dans les composites à matrice polymère [1-3]. L'utilisation industrielle de matériaux issus de la biomasse peut être considérée comme une contribution à la résolution des problèmes environnementaux actuels, notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la pollution. Toutefois, les connaissances scientifiques et technologiques relatives aux fibres végétales de renfort ne permettent pas aujourd'hui de proposer une stabilité de performances totalement contrôlée.

Afin de pouvoir contrôler, modéliser et prédire le comportement mécanique des biocomposites lors de leur mise en œuvre et de leur utilisation, il est essentiel d'avoir une connaissance approfondie des caractéristiques morphologiques et des propriétés mécaniques des fibres végétales, en particulier parce qu'elles dépendent fortement des conditions d'humidité et de température [4-8]. Certains auteurs ont proposé des éléments utiles pour répondre à ces

questions. Pejic et al. [9] ont étudié le rôle des biopolymères non-cellulosiques comme les hémicelluloses et la lignine sur le phénomène de gonflement des fibres de chanvre. Ils ont étudié le comportement d'absorption d'eau des fibres élémentaires et des faisceaux pour différentes compositions biochimiques après extraction par des traitements chimiques. Les résultats ont montré que lorsque la teneur en biopolymères non-cellulosiques était progressivement réduite, l'absorption d'eau des fibres élémentaires de chanvre augmentait jusqu'à 2,7 fois et que ce phénomène était encore plus accentué pour les faisceaux de fibres élémentaires. D'autres auteurs ont étudié les effets des conditions environnementales telles que l'humidité relative (HR) sur la rigidité et la résistance à la traction des fibres élémentaires de lin et d'ortie. Par exemple, Bruce et Davies [6] ont observé que la diminution moyenne du module de traction était de 0,39 GPa par % HR pour les fibres de lin et de 0,24 GPa par % HR pour les fibres d'ortie dans l'intervalle 30-70 % HR. Plus récemment, Placet et al. [7] ont montré que l'absorption d'eau a une influence significative sur la rigidité à la traction et la résistance des fibres de chanvre sous chargement cyclique. Ils ont observé une augmentation

inattendue du module et de la résistance à la traction jusqu'à un certain taux d'HR entre 50 et 70% HR pouvant être associé au point de saturation en eau des cellules. Une diminution du module et de la résistance est observée à HR plus élevée, liée à la plastification des polysaccharides amorphes.

Le but de ce travail est de caractériser les variations dimensionnelles et le comportement mécanique de faisceaux de fibres végétales extraits de diverses espèces de plantes dans des conditions hydro/hygrothermiques variables et contrôlées. Basée sur une technique de mesure de la section transversale par balayage laser automatisé [10] et sur un test de micro-traction, conduits tous deux dans une chambre climatique ou en cellule d'immersion, les variations des dimensions transversales et l'évolution du comportement mécanique des faisceaux de fibres végétales ont été étudiées.

2. PARTIE EXPÉRIMENTALE

2.1 Sélection des faisceaux de fibres végétales

Les caractérisations des variations dimensionnelles et du comportement mécanique des fibres végétales ont été effectuées pour des faisceaux de fibres extraits de cinq espèces phylogénétiquement différentes, et ayant des fonctions dissemblables dans la plante. En raison de leurs diverses origines botaniques, ces lots de faisceaux de fibres présentent des caractéristiques morphométriques [10], des microstructures et des compositions biochimiques contrastées. Trois d'entre eux appartiennent au clade des dicotylédones et sont communément appelés « fibres libériennes ». Ces fibres sont faiblement lignifiées (<5 %), et ont une fonction de support structurel de la tige dans la plante : le lin (*Linum usitatissimum*), le chanvre (*Canabis sativa*) en culture annuelle de fibres (après rouissage) et l'ortie (*Urtica dioica*) comme plante herbacée pérenne. Les deux autres espèces font partie du clade des monocotylédones et sont vivaces. Ces fibres sont fortement lignifiées (> 9 %) et ont une fonction principalement conductrice dans la plante : le sisal (*Agave sisalana*) provenant de la feuille d'agave et le palmier (*Phoenix dactylifera*) présent sous forme de tapis de gaine foliaire entourant la tige (Tableau 1).

Tableau 1. Teneur en lignine pour les cinq espèces végétales déterminée selon la méthode de Klason

Espèces végétales	Palmier	Sisal	Chanvre	Ortie	Lin
Teneur en lignine (%)	16,20 ± 0,28	9,27 ± 0,10	4,71 ± 0,30	4,58 ± 0,19	3,67 ± 0,29

2.2 Méthodes de caractérisation des faisceaux de fibres végétales

2.2.1 Caractérisation dimensionnelle

Un dispositif d'analyse dimensionnelle appelé « FDAS » (Fibre Dimensional Analysis System, Diastron Ltd, Hampshire, Royaume-Uni) a été utilisé pour mesurer les dimensions transversales des faisceaux de fibres et ainsi estimer l'aire de section droite qui est généralement évolutive le long des faisceaux de fibres végétales. Cette méthode expérimentale, basée sur le balayage laser automatisé de l'objet, est décrite en détail dans une étude précédente [10].

Au cours de la mesure, l'échantillon est mis en translation et en rotation, permettant ainsi de collecter jusqu'à 450 valeurs de diamètre apparent par révolution sur une section, chaque section étant séparée d'un pas longitudinal minimum de 40 µm. La non-circularité des sections transversales des faisceaux de fibres est ainsi mesurée et prise en compte. Pour chaque faisceau de fibres, un modèle elliptique utilisant un traitement statistique des diamètres apparents de 42 sections transversales (équiréparties sur une longueur de 30 mm) a été appliqué afin d'estimer l'aire médiane de la section résistive transverse.

2.2.2 Mesure des propriétés mécaniques

La rigidité et la résistance axiales de chaque échantillon, respectivement exprimées par le module de Young, la déformation et la contrainte à rupture, ont été obtenues à partir de tests de micro-traction réalisés sur un dispositif appelé « LEX » (Linear Extensometer, Diastron Ltd, Hampshire, Royaume-Uni) équipé d'une cellule de charge de 20 N et contrôlé par le logiciel UvWin® 3.60. La conversion force-contrainte est basée sur l'aire médiane de section résistive estimée au FDAS. Les essais ont été effectués à une vitesse de déplacement de 0,02 mm/s et pour une longueur de jauge de 30 mm. Le module de Young a été déterminé dans la zone linéaire proche de la rupture (entre 1 et 3 % de déformation dans cette étude) selon la norme NF T25-501, en tenant compte de la compliance machine.

2.2.3 Contrôle des conditions hydro/hygrothermiques

L'objectif de ces essais *in situ* est d'analyser l'influence de l'humidité relative sur les dimensions transversales et le comportement mécanique des faisceaux de fibres. Les deux appareils d'analyse (dimensionnelle -FDAS- et mécanique -LEX-) ont été placés dans une chambre climatique (Figure 1) fournie par la société ETS (Electro-Tech Systems Inc, Pennsylvanie, USA) pour réguler la température à 23 °C et l'humidité relative (HR) à 20, 50 et 73 %. Pour chaque espèce végétale et chaque taux d'humidité relative, 20 faisceaux de fibres ont été testés après avoir été acclimatés pendant 13h.

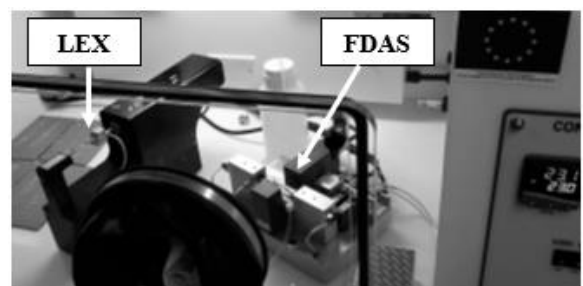


Figure 1. Dispositifs FDAS et LEX positionnés dans la chambre climatique contrôlée en température et en humidité relative

Une cellule d'immersion « DSM » (Dynamic Swelling Module, Diastron Ltd., Hampshire, Royaume-Uni) adaptée sur le dispositif FDAS permet de mesurer les dimensions des faisceaux de fibres en immersion. Les faisceaux de fibres ont été immergés dans de l'eau déionisée à 23 °C (le temps d'immersion correspondant à la durée de la mesure, soit 1 min) afin de réaliser les mesures dimensionnelles, puis ont été rapidement positionnés sur le dispositif de micro-traction LEX pour les essais mécaniques. Pour chaque espèce

végétale, 20 faisceaux de fibres ont été testés après une période d'acclimatation de 13h à 23 °C et 50 % d'HR.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Influence de l'humidité relative sur les variations dimensionnelles

3.1.1 Variation de l'aire médiane de section transversale

L'influence de l'humidité relative sur les variations dimensionnelles des faisceaux de fibres végétales, et en particulier sur le gonflement de la section transversale, a été analysée. L'évolution de l'aire de section médiane, normalisée par rapport à une aire de section à 50 % HR, a été reportée pour chaque taux d'humidité relative (voir Figure 2). A 20 % HR, le retrait des fibres végétales est faible, soit en moyenne $3,5 \pm 1$ %, bien qu'il soit plus prononcé dans le cas des faisceaux de fibres d'ortie, c'est-à-dire $6,9 \pm 3$ %. À 73 % HR, le gonflement est faible pour toutes les espèces (inférieur à 10 %) avec une faible dispersion. Dans les conditions d'immersion, le gonflement augmente considérablement.

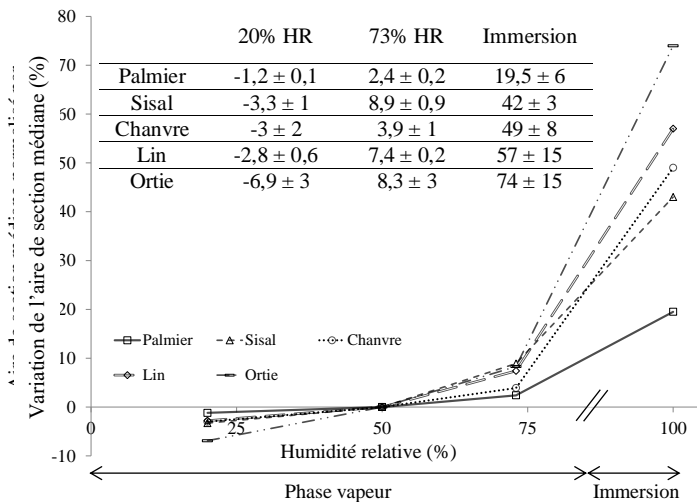


Figure 2. Variation de l'aire médiane de section transversale normalisée par rapport à l'aire de section à 50 % HR en fonction de l'humidité relative à 23 °C

De grandes différences sont observées en fonction des espèces de fibres végétales, avec des amplitudes de gonflement variant de $19,5 \pm 6$ % pour les faisceaux de palmier et jusqu'à 74 ± 15 % pour les faisceaux de fibres d'ortie. Il convient de souligner que les faisceaux de fibres fortement lignifiées comme le palmier et le sisal tendent à avoir un gonflement de section transversale plus faible que les faisceaux de fibres faiblement lignifiés comme le lin, le chanvre et l'ortie (Tableau 1). L'influence des biopolymères non-cellulosiques tels que la lignine sur l'absorption d'eau et le gonflement des fibres de chanvre a notamment été étudiée par Pejic et al. [9]. Selon les auteurs, une extraction de la lignine tend à augmenter la capacité de rétention d'eau des fibres de chanvre.

3.1.2 Variation du facteur de forme de la section transversale

La Figure 3 présente, pour les différentes espèces de fibres végétales, l'évolution du facteur de forme médian (α) de leur section transversale, c'est-à-dire la médiane des rapports du diamètre maximum sur le diamètre minimum mesurés pour

chacune des sections du faisceau considéré, en fonction de l'humidité relative. Le facteur de forme est un indicateur morphométrique de la non-circularité de la section transversale des fibres végétales [10]. Dans le cas des faisceaux de fibres de palmier et de sisal, l'humidité relative a peu d'influence sur les facteurs de forme qui sont proches de 1, c'est-à-dire qu'ils présentent une section de forme quasi-circulaire. En effet, leurs facteurs de forme médians restent similaires, soit aux alentours de 1,20 et 1,27 respectivement pour le palmier et le sisal, sur toute la gamme d'humidité relative étudiée (de 20 % HR à l'immersion). On peut donc conclure que le gonflement de leur section transversale est isotrope.

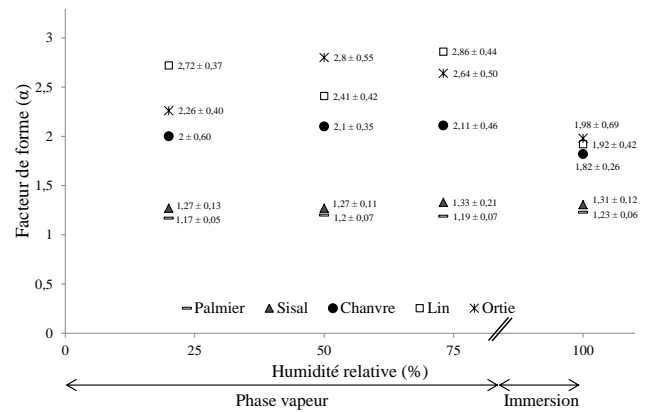


Figure 3. Evolution du facteur de forme médian α en fonction de l'humidité relative à 23 °C pour les différents types de faisceaux de fibres végétales

Tableau 2. Caractéristiques et variations dimensionnelles des faisceaux de fibres à 50 % HR et en immersion et à 23 °C

Faisceaux de fibre	Conditions hydro/hygro thermiques	Facteur de forme (α)	Accroissement médian (%)	
			Diamètre maximum	Diamètre minimum
Palmier	50% HR	$1,20 \pm 0,07$	-	-
	immersion	$1,23 \pm 0,06$	$9 \pm 3,7$	$10 \pm 1,8$
Sisal	50% HR	$1,27 \pm 0,11$	-	-
	immersion	$1,31 \pm 0,12$	14 ± 4	23 ± 5
Chanvre	50% HR	$2,10 \pm 0,35$	-	-
	immersion	$1,82 \pm 0,26$	$15 \pm 2,5$	$27 \pm 6,8$
Lin	50% HR	$2,41 \pm 0,42$	-	-
	immersion	$1,92 \pm 0,42$	17 ± 5	35 ± 8
Ortie	50% IR	$2,80 \pm 0,55$	-	-
	immersion	$1,98 \pm 0,69$	$18 \pm 5,5$	54 ± 16

En revanche, les faisceaux de fibres libériennes présentent des facteurs de forme médians plus élevés et plus dispersés, qui sont influencés par l'humidité relative et en particulier en immersion. Pour ces faisceaux, le gonflement est anisotrope et est caractérisé par une augmentation du diamètre minimum

supérieure à celle du diamètre maximum, conduisant à une diminution significative du facteur de forme de section en conditions d'immersion. Les faisceaux de fibres de chanvre, de lin et d'ortie présentent des facteurs de forme médians en immersion de $1,82 \pm 0,26$, $1,92 \pm 0,42$ et $1,98 \pm 0,69$ respectivement, ce qui implique que ces faisceaux deviennent moins aplatis (Tableau 2). On peut supposer que ce phénomène de gonflement anisotrope est dû à la réhydratation des fibres élémentaires qui ont été aplatis du fait du dessèchement progressif des cellules en fin de croissance, après récolte et coupe des tiges ou feuilles. Ainsi, plus l'épaisseur des parois cellulaires sera faible, plus l'effet d'aplatissement sera important lors de la dessiccation et plus la diminution du facteur de forme lors de la réhydratation sera importante.

3.2 Influence de l'humidité relative sur le comportement mécanique

La Figure 4 montre l'effet de l'humidité relative (HR) sur les propriétés mécaniques des faisceaux de fibres végétales. On constate que les faisceaux de fibres de palmier et de sisal présentent des propriétés plus faibles que les fibres libériennes. Ce sont les faisceaux de fibres de lin qui présentent les meilleures propriétés mécaniques et ce indépendamment de l'humidité relative testée.

Le module de Young (Figure 4.a) diminue fortement lorsque l'HR est augmentée, pour toutes les espèces de fibres végétales comme par exemple pour les faisceaux de fibres de lin avec une diminution de 18 GPa entre 20 % HR et l'immersion (soit une chute moyenne de 0,22 GPa par % HR contre 0,39 GPa par % HR sur l'intervalle 30-70 % HR pour l'étude de Bruce et Davies [6]). Seuls les faisceaux de fibres d'ortie présentent un module de Young qui augmente de presque 5,7 GPa entre 20 et 50 % HR pour décroître fortement à 73 %HR puis en immersion. Ces résultats démontrent que la diffusion de l'eau au sein des parois cellulaires et de la lamelle mitoyenne qui les cimentent contribue fortement à la plastification des polysaccharides amorphes constitutifs du faisceau, améliorant la flexibilité du réseau cellulosique et diminuant ainsi la rigidité [6, 8, 9]. Une autre explication avancée par Placet et al. [7] réside dans un changement d'orientation de l'angle micro-fibrillaire (MFA) lors du gonflement des fibres végétales.

Concernant la résistance à la rupture en traction (Figure 4.b) pour les faisceaux de fibres libériennes (chanvre, ortie et lin), une augmentation avec l'HR jusqu'à un seuil d'humidité relative compris entre 50 et 73 % HR a été observée. Au-delà de cette valeur seuil d'HR, une baisse de la résistance à la traction est observée comme par exemple pour les faisceaux de fibres de lin avec une diminution de 236 MPa au passage de 73 % RH à l'immersion. La résistance à la traction des faisceaux de fibres de palmier diminue de 45 MPa entre 20 et 73 % HR sans diminution supplémentaire après l'immersion. Ces évolutions particulières de la résistance à la rupture en fonction du taux d'humidité, sont probablement liées aux points de saturation en eau des parois cellulaires qui varient selon les espèces de fibres végétales étudiées. On notera que la plastification des polysaccharides amorphes des parois cellulaires peut conduire à une baisse de la résistance à la traction [4, 7].

Pour finir, la déformation à la rupture (Figure 4.c) confirme le phénomène de relaxation du réseau lors de la plastification. En effet, la déformation moyenne à rupture

augmente lorsque l'HR augmente jusqu'à une valeur seuil d'humidité relative, avant de chuter en immersion et ce quelle que soit la nature du faisceau de fibre. Des essais dynamiques de sorption/désorption sous chargement cyclique menés par Placet et al. [7] ont par ailleurs montré une augmentation de la capacité d'amortissement des fibres élémentaires de chanvre jusqu'à un seuil de HR aux alentours de 70 %.

La probabilité de rupture des faisceaux de fibres en fonction de l'humidité relative a été étudiée en utilisant une approche statistique de Weibull à 2 paramètres, comme le montre la Figure 5 pour les faisceaux de fibre de lin et de palmier. Plusieurs auteurs ont déjà utilisé cette approche, comme Silva et al. [11] pour les faisceaux de fibres de sisal et Placet et al. [7] pour les fibres élémentaires de chanvre. Le module de Weibull, qui décrit le degré de dispersion de la résistance à la rupture, est associé à l'hétérogénéité de la microstructure des faisceaux et notamment l'hétérogénéité de distribution des défauts. La détermination des paramètres de Weibull comme la résistance à la traction caractéristique notée « σ_0 » et le module de Weibull notée m , a été faite sur la base d'une minimisation au sens des moindres carrés, pour une probabilité de rupture de 50 %.

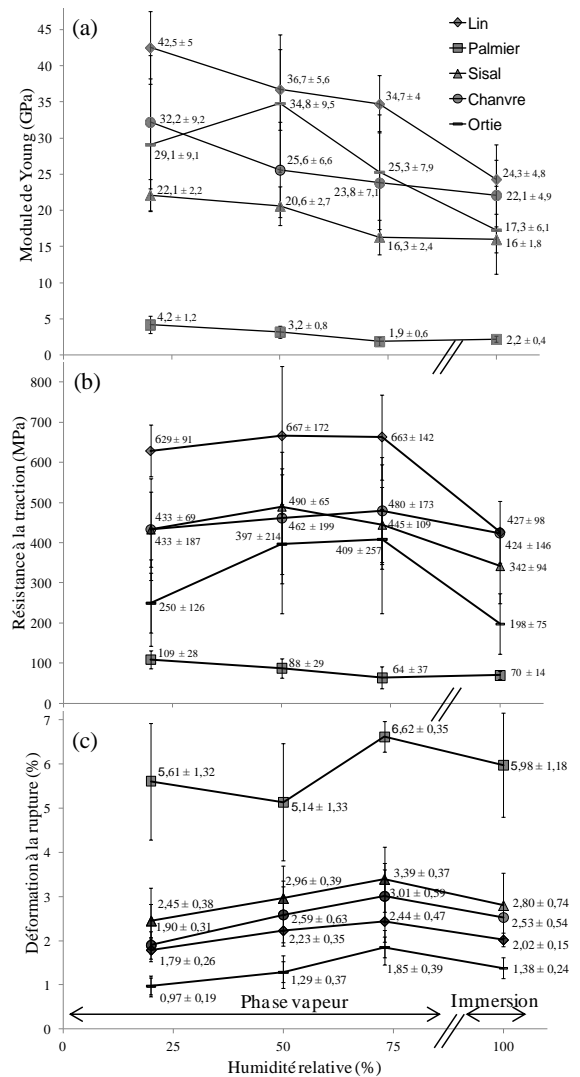


Figure 4. Evolutions respectivement en (a) du module de Young, en (b) de la résistance à la rupture en traction et en (c) de la déformation à rupture en fonction de l'humidité relative à 23 °C pour les différentes espèces de fibre

Comparées aux valeurs rapportées dans la littérature pour des fibres élémentaires (par exemple : 1,46 à 1,79 sur la gamme de 10 à 80 % HR pour des fibres de chanvre [7]), les valeurs du module de Weibull noté « m » dans le Tableau 3 pour les faisceaux de fibres sont relativement élevées (de 1,9 à 9,3). Pour des faisceaux de fibres de sisal, Silva et al. [11] ont déterminé des modules de Weibull de 4,6 et 3 pour des longueurs de jauge de 10 et 40 mm, respectivement. Nos résultats reflètent une faible dispersion des valeurs de résistance à la traction, caractéristique d'une homogénéité de distribution des défauts pour les faisceaux de fibres testés, en particulier pour les fibres de sisal et de lin (Tableau 3). On constate par ailleurs que le module de Weibull est fortement influencé par l'HR, ce qui peut être associé à une variation de la distribution des défauts au sein des faisceaux et à leur gonflement en fonction de l'HR qui implique également une variation du volume sollicité en traction.

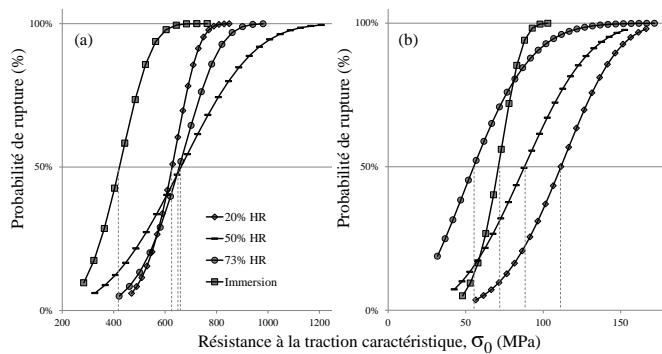


Figure 5. Distribution de Weibull pour les faisceaux de fibre de lin (a) et de palmier (b) en fonction de l'humidité relative à 23 °C

Tableau 3. Résistance à la traction caractéristique (σ_0) et module de Weibull (m) en fonction de l'humidité relative à 23 °C pour les différents faisceaux de fibres végétales

Faisceaux de fibre	Paramètres de Weibull	Conditions hydro/hygrothermiques			
		20% HR	50% HR	73% HR	Immersion
Palmier	σ_0 (MPa)	111	88	55	71
	m	4,3	3,1	2,2	6,6
Sisal	σ_0 (MPa)	432	492	458	375
	m	6,5	9,3	4,5	3,6
Chanvre	σ_0 (MPa)	431	433	494	398
	m	3,7	2,3	3,34	2,8
Lin	σ_0 (MPa)	627	661	654	422
	m	8,4	3,4	5,9	4,8
Ortie	σ_0 (MPa)	239	400	354	180
	m	1,9	1,9	2,1	2,4

4. CONCLUSIONS

Les résultats de cette étude ont permis de quantifier l'influence de l'humidité relative sur les dimensions transversales et le comportement mécanique des faisceaux de fibres, leur origine botanique s'avérant être un facteur très influant. Il a été constaté que le gonflement, dans des conditions de HR contrôlées, diffère entre les espèces de fibres végétales en raison des variations de leur composition biochimique et de leur microstructure. En particulier, les faisceaux de fibres faiblement lignifiées comme le lin, le

chanvre et l'ortie ont présenté un gonflement beaucoup plus important en immersion que pour des HR de 20, 50 et 73 %. Fait intéressant, leur facteur de forme (indicateur de la non-circularité de la section transversale) est également considérablement diminué en immersion, les faisceaux de fibres étant ainsi moins aplatis dans des conditions de fortes HR. En ce qui concerne le comportement mécanique, l'humidité relative a une influence négative sur le module d'Young dont la valeur diminue avec l'augmentation de l'HR quelle que soit l'espèce végétale considérée, mettant en évidence un fort effet de plastification des parois cellulaires. En outre, la résistance à la traction augmente avec l'humidité relative jusqu'à un seuil d'humidité relative avant de diminuer fortement pour les humidités relatives plus élevées. Cette valeur seuil variable, comprise entre 50 et 73% HR, doit être liée aux variations du point de saturation en eau des différentes espèces de fibres végétales.

En conclusion, nos résultats démontrent que l'état d'hydratation, de gonflement et de plastification des parois cellulaires jouent un rôle très important sur le comportement mécanique des faisceaux de fibres végétales à la fois dans le domaine élastique et à rupture. L'origine botanique, la microstructure et la composition biochimique des fibres végétales sont fortement impliquées dans ces mécanismes.

REMERCIEMENTS

William Garat remercie Montpellier SupAgro pour le financement de ses travaux de doctorat. Les auteurs remercient Arnaud Day (Fibres Recherche Développement, Troyes, France) pour la fourniture des fibres d'ortie, et Yann Leray et Steve Bucknell (Diastron Ltd., Hampshire, Grande-Bretagne) pour leur support technique sur les appareils FDAS et DSM.

REFERENCES

- [1] Mohanty, A., Misra, M., Drzal, L. (Eds.) (2005). Natural fiber, biopolymer, and biocomposites. CRC press, Taylor & Francis.
- [2] Baley, C. (2013). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Techniques de L'Ingénieur, AM5130 v2, pp. 1-17.
- [3] Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.P., Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. Progress in Polymer Science, 37(11): 1552-96. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- [4] Thuault, A., Eve, S., Blond, D., Bréard, J., Gomina, M. (2014). Effects of the hygrothermal environment on the mechanical properties of flax fibres. Journal of Composite Materials, 48(14): 1699-1707. <https://doi.org/10.1177/0021998313490217>
- [5] Baley, C., Morvan, C., Grohens, Y. (2005). Influence of the absorbed water on the tensile strength of flax fibers. In: Macromolecular Symposia, WILEY-VCH Verlag, 222(1): 195-201. <https://doi.org/10.1002/masy.200550425>
- [6] Bruce, D.M., Davies, G.C. (1998). Effect of environmental relative humidity and damage on tensile properties of flax and nettle fibres. Textile Research Journal, 68(9): 623-629. <https://doi.org/10.1177/004051759806800901>

- [7] Placet, V., Cisse, O., Boubakar, M.L. (2012). Influence of environmental relative humidity on the tensile and rotational behaviour of hemp fibres. *Journal of Materials Science*, 47(7): 3435-3446. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-6191-3>
- [8] Jin, S., Gong, X.L. (2011). Influence du vieillissement en humidité relative sur les propriétés mécaniques des fibres de chanvre. Actes du 20ème Congrès Français de Mécanique, Presses universitaires de Franche-Comté Besançon (France), pp. 1-6.
- [9] Pejic, B.M., Kostic, M.M., Skundric, P.D., Praskalo, J.Z. (2008). The effects of hemicelluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers. *Bioresource Technology*, 99(15): 7152-7159. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.073>
- [10] Garat, W., Corn, S., Le, M.N., Beaugrand, J., Bergeret, A. (2018). Analysis of the morphometric variations in natural fibres by automated laser scanning: towards an efficient and reliable assessment of the cross-sectional area. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 108: 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.02.018>
- [11] Silva, F.A., Chawla, N., Toledo, F.R.D. (2008). Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. *Composites Science and Technology*, 68(15-16): 3438-3443. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.10.001>