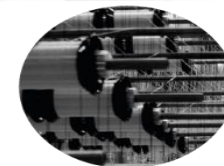
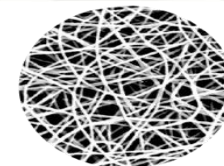
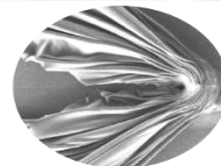
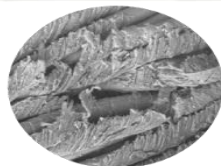
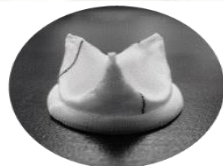
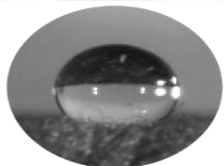
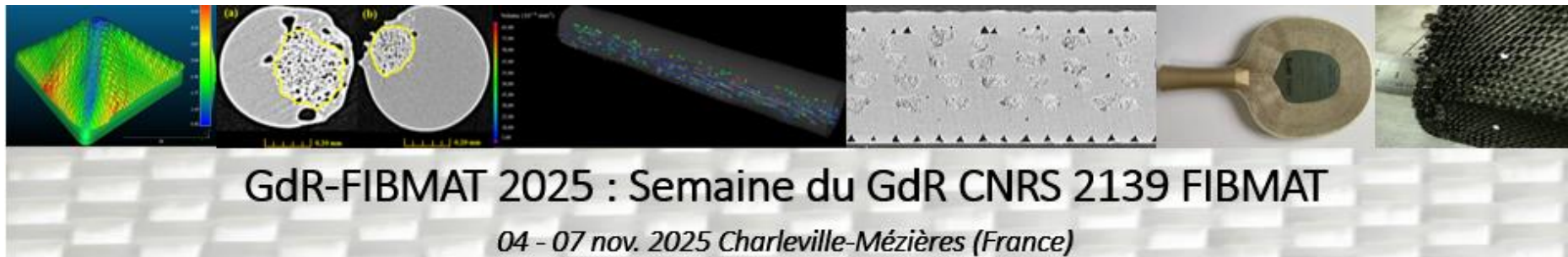


Caractérisation physique et mécanique des fibres textiles : variabilité et techniques expérimentales

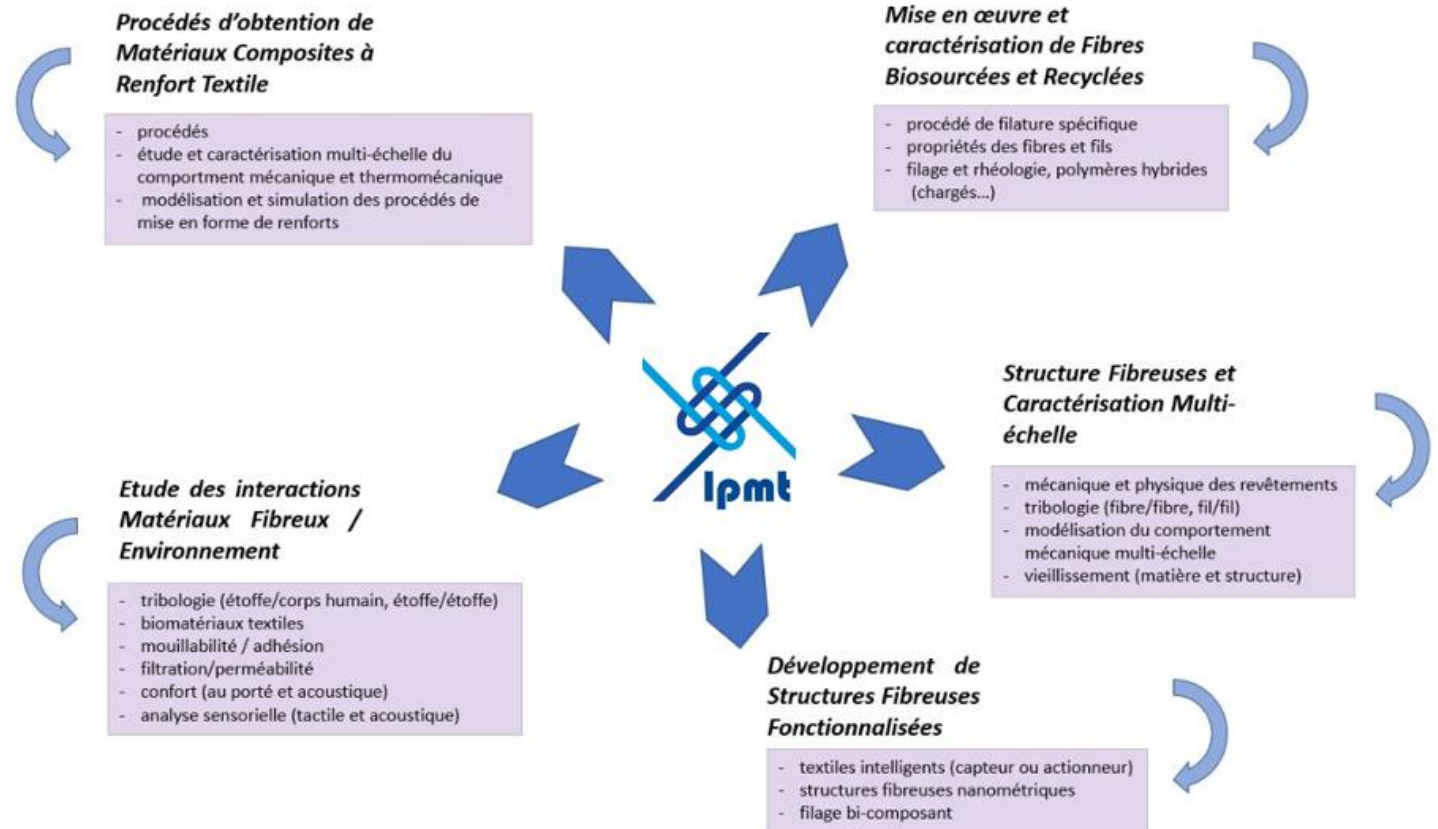
Dr. Wafa MAHJOUB

wafa.mahjoub@uha.fr

Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace, University of Haute Alsace
11 rue Alfred Werner, 68093 Mulhouse, France



Présentation du LPMT



Une équipe de 34 Enseignants Chercheurs / ~ 25 thésards / 7 BIATS
au service de la recherche en textile

1- INTRODUCTION

- Contexte général
- Enjeux scientifiques
- Objectifs du cours

2- QU'EST-CE QU'UNE FIBRE TEXTILE ?

- Définitions
- Différents types de fibres textiles
- Origine et typologie des fibres textiles

3- SOURCES DE VARIABILITÉ

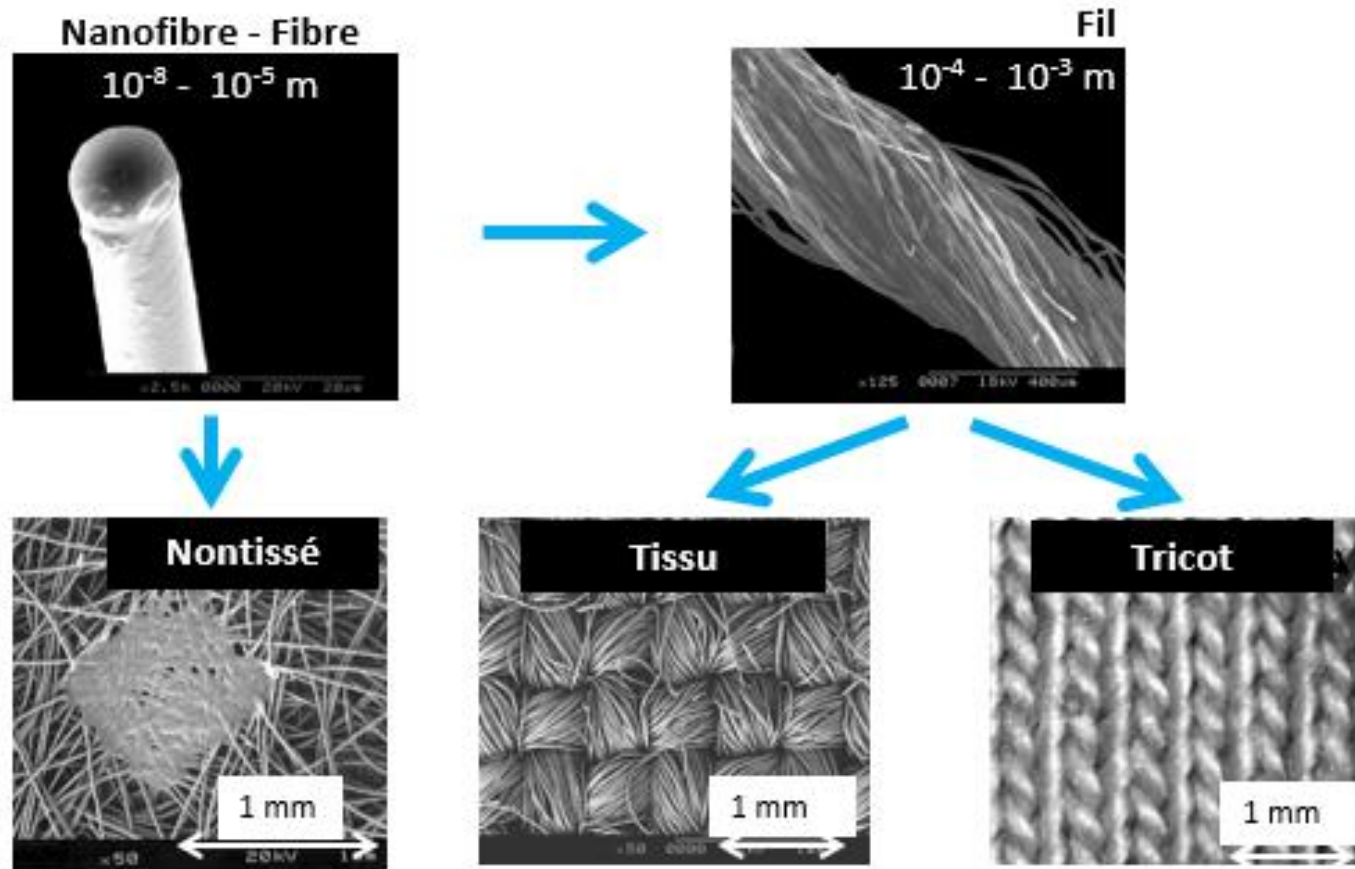
4- CARACTÉRISATION DES FIBRES TEXTILES

- Caractéristiques physiques et mécaniques
- Métrologie textile
- Importance de la caractérisation physique et mécanique

4- CONCLUSION

Contexte général

De la fibre au matériau textile : une structure hiérarchique multi-échelle

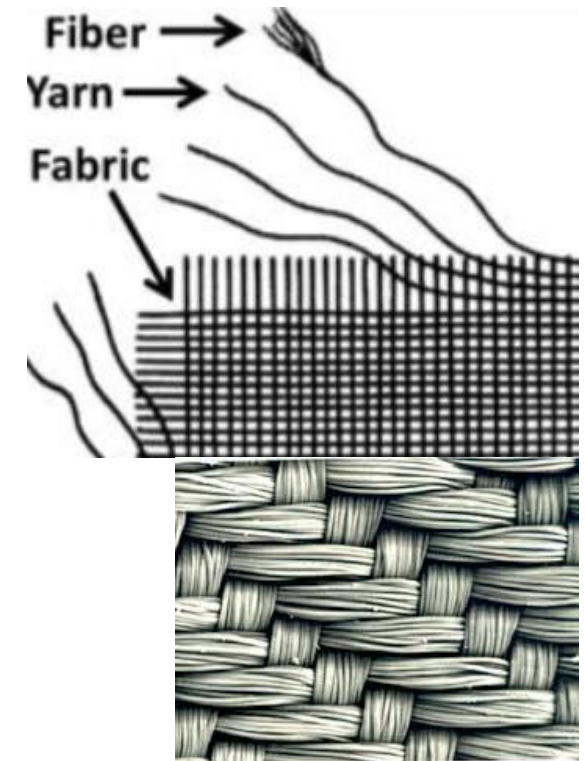


- Chaque niveau d'organisation influence les propriétés globales (mécaniques, physiques).
- Comprendre et quantifier ces propriétés est indispensable pour relier la structure microscopique au comportement macroscopique.

Contexte général

De la fibre au matériau textile : une structure hiérarchique multi-échelle

- A l'échelle macroscopique, on va s'intéresser à la structure textile,
- A l'échelle mésoscopique, on va se préoccuper du fil et de sa morphologie,
- A l'échelle microscopique, on se focalisera sur la fibre.



La caractérisation des fibres est la première étape pour comprendre et maîtriser cette complexité.

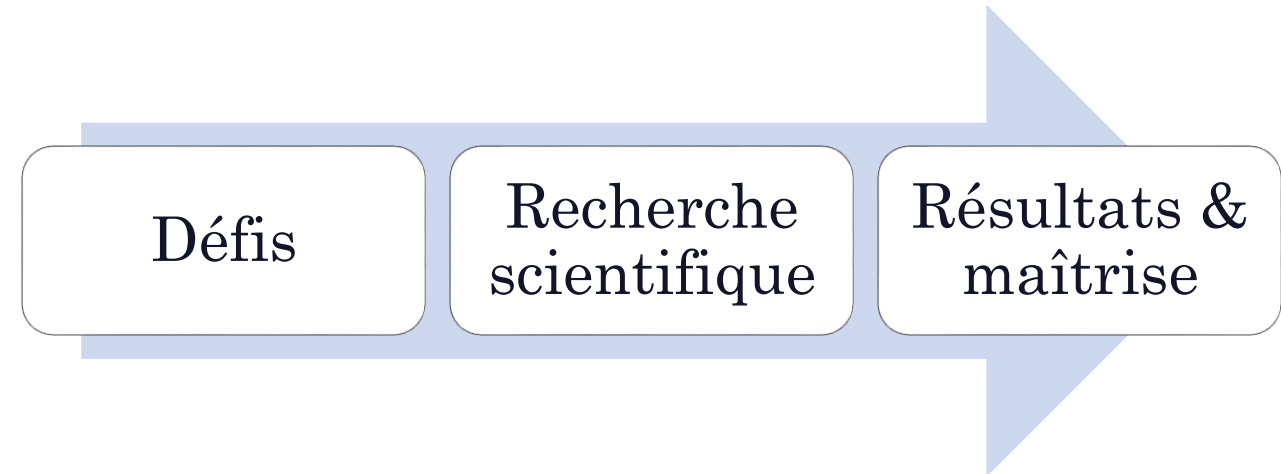
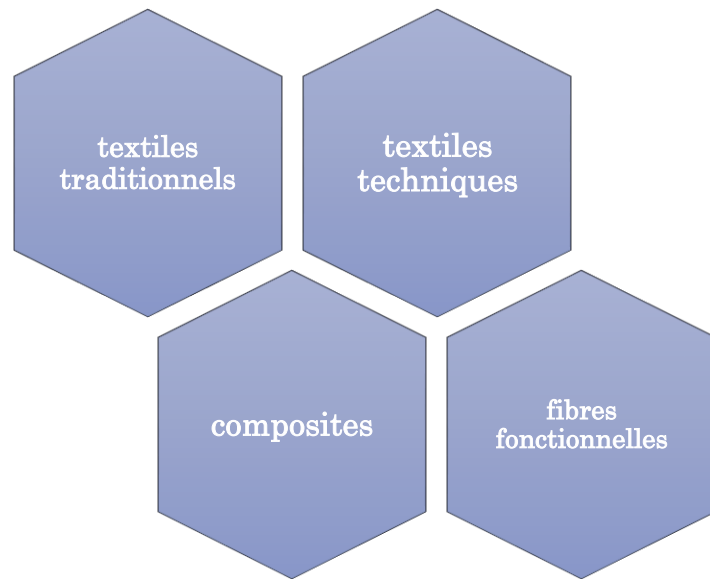
Contexte général

Intérêt de la caractérisation des fibres textile

- Les performances finales (résistance, élasticité, confort, durabilité) dépendent directement des propriétés individuelles des fibres.
- La variabilité intra- et inter-fibres (longueur, finesse, module, ténacité, rugosité) a un impact majeur sur :
 - la filabilité,
 - la régularité du fil,
 - le comportement mécanique des structures,
 - et la fiabilité des matériaux textiles ou des matériaux à base de fibres textiles.
- La compréhension de ces liens multi-échelles permet :
 - de modéliser les comportements mécaniques complexes (viscoélasticité, rupture, fatigue),
 - de concevoir des fibres optimisées pour des usages spécifiques (textiles techniques, composites, biomédicaux).

Enjeux scientifiques

De la recherche fondamentale aux applications industrielles



Mieux comprendre la fibre, c'est mieux concevoir le matériau.

Objectifs du cours

Les fibres textiles

- Identifier la nature, la morphologie et les propriétés physiques et mécaniques de la fibre

Les caractériser

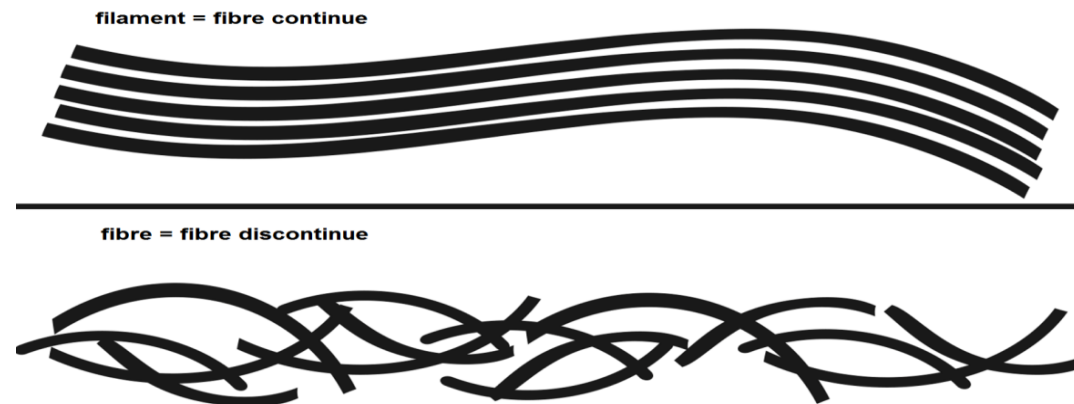
- Mise en œuvre les méthodes expérimentales

Analyser et corréler

- Variabilité & relations structure propriété

Définitions

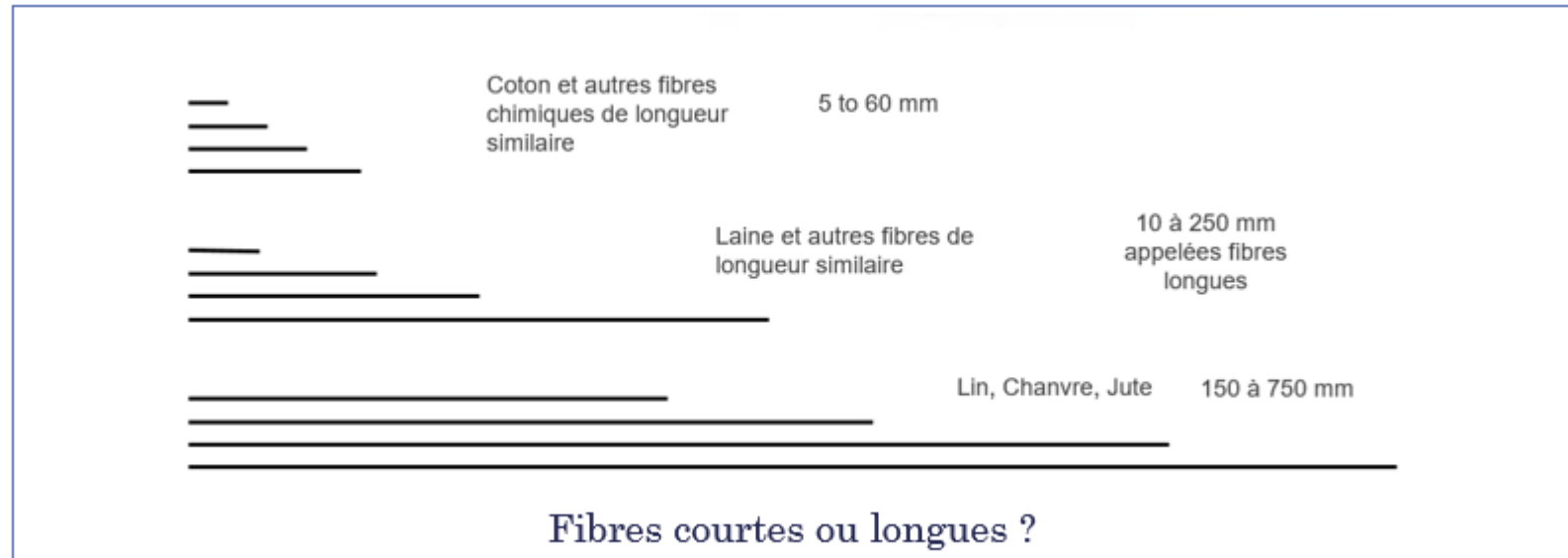
- Une fibre textile est un élément de matière linéaire caractérisé par sa flexibilité, sa finesse, et sa grande longueur.
- Le mot fibre regroupe les **fibres discontinues** (naturelles et chimiques) et les **fibres continues** telles que les monofilaments.



- La notion de fibre englobe les termes de fibre **élémentaire**, **unitaire** et **technique**, chaque catégorie étant définie par sa morphologie.
- D'un point de vue géométrique, la singularité des fibres textiles réside dans leur **rapport longueur/section**, impliquant un comportement mécanique anisotrope et une capacité de flexion élevée.

Définitions

- En première approximation, la fibre peut être assimilée à un cylindre homogène, et se caractérise principalement par :
 - sa **longueur**, qui peut varier de l'ordre du micromètre (fibres discontinues) à plusieurs kilomètres (filaments continus).



- son **diamètre**,

Définitions

- Dans le domaine textile, la finesse des fibres ne peut pas se mesurer directement par le diamètre en raison de leur **section irrégulière**.
- On utilise deux systèmes principaux pour caractériser la grosseur des fibres : le **titrage** et le **numérotage**.

Système	Unité	Définition	Interprétation
Titrage	tex, denier	Rapport de la masse d'un échantillon d'une longueur déterminée. $TITRE = \frac{MASSE}{LONGUEUR}$ Masse en grammes d'un kilomètre de matière (tex) ou de 9000 mètres (denier).	Plus la valeur est grande, plus le matériau est épais.
Numérotage	Nm	Longueur en mètres obtenue avec 1 gramme de matière.	Plus la valeur est grande, plus le matériau est fin.

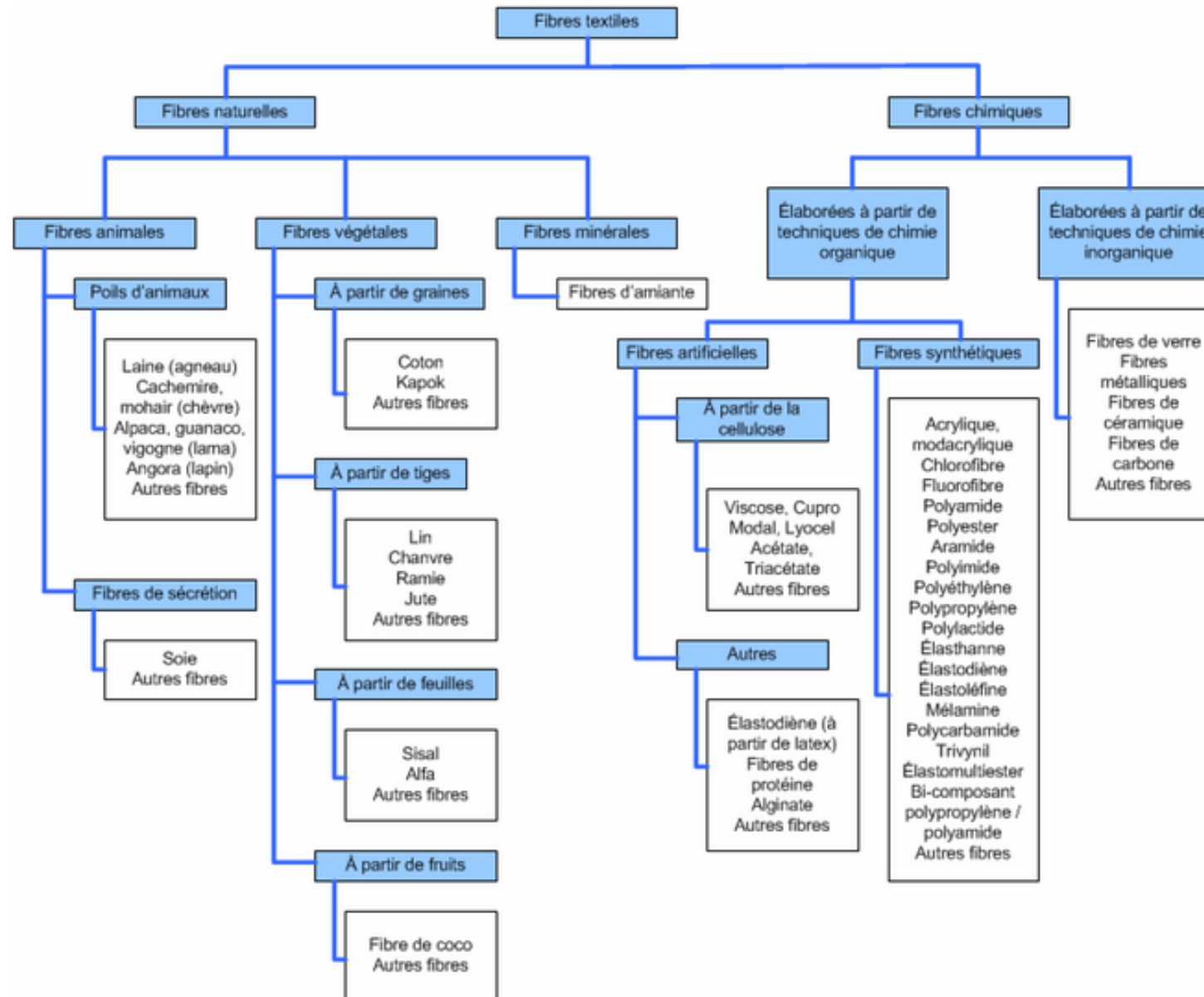
Le dtex : (décitex) c'est le dixième d'un tex

Le ktex : (kilotex) 1ktex équivaut à 1000 tex et est souvent appelé g/m.

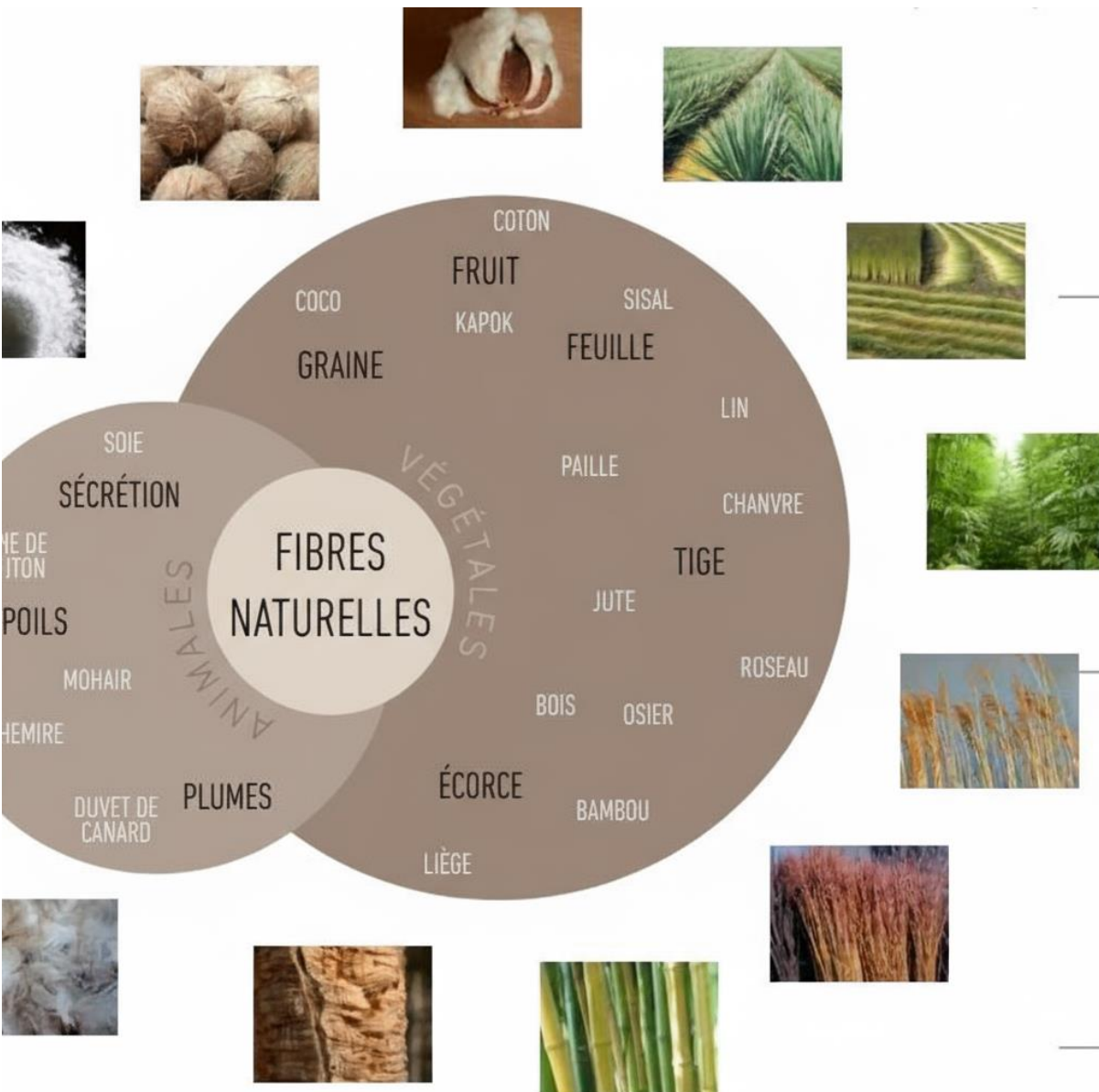
Le dn : (denier) utilisé pour la soie et souvent pour les fibres chimiques ; 1dn = 0,9 dtex

Le μ : (micron) n'est pas une unité gravimétrique; représente le diamètre apparent moyen des fibres en millième de millimètre.

Différents types de fibres textiles



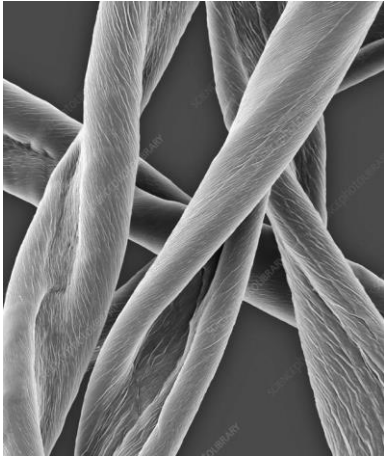
Origine et typologie des fibres naturelles



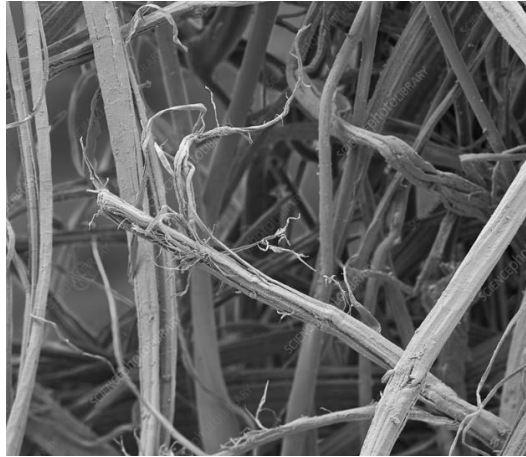
La diversité d'origine et de structure des fibres naturelles entraîne une grande variabilité de leurs propriétés physiques et mécaniques.

Origine et typologie des fibres naturelles

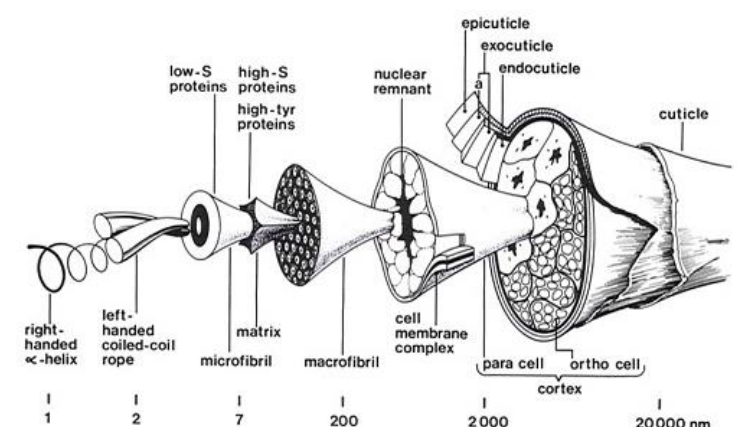
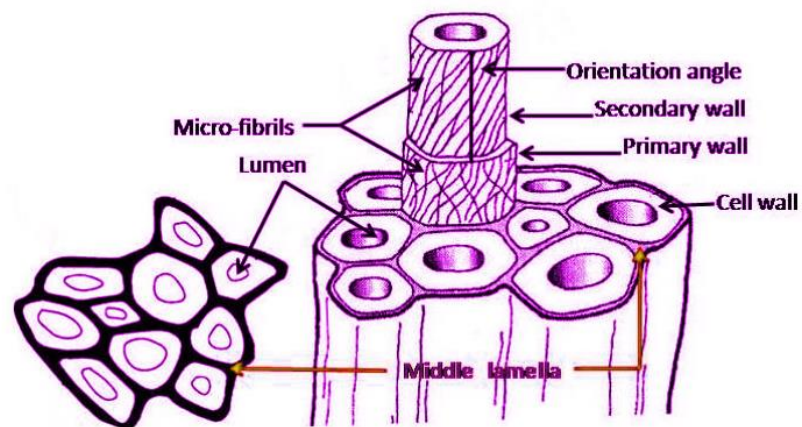
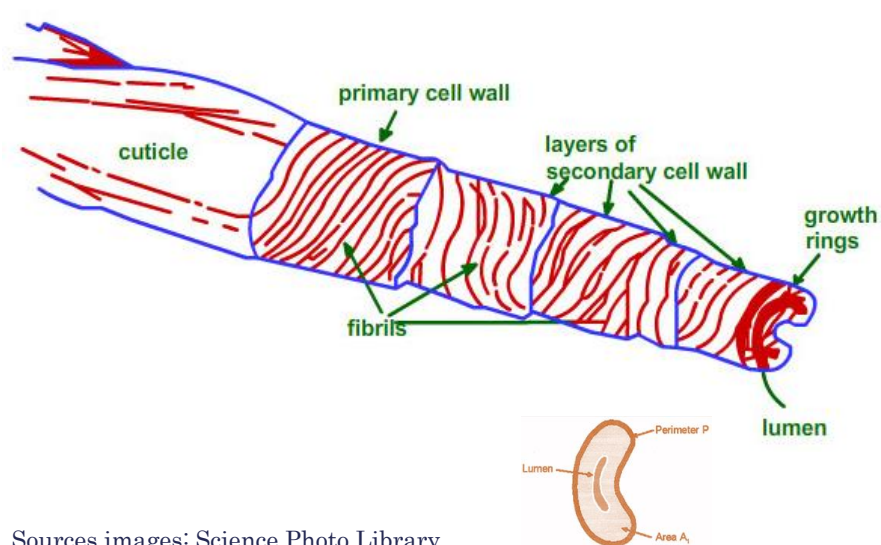
Coton



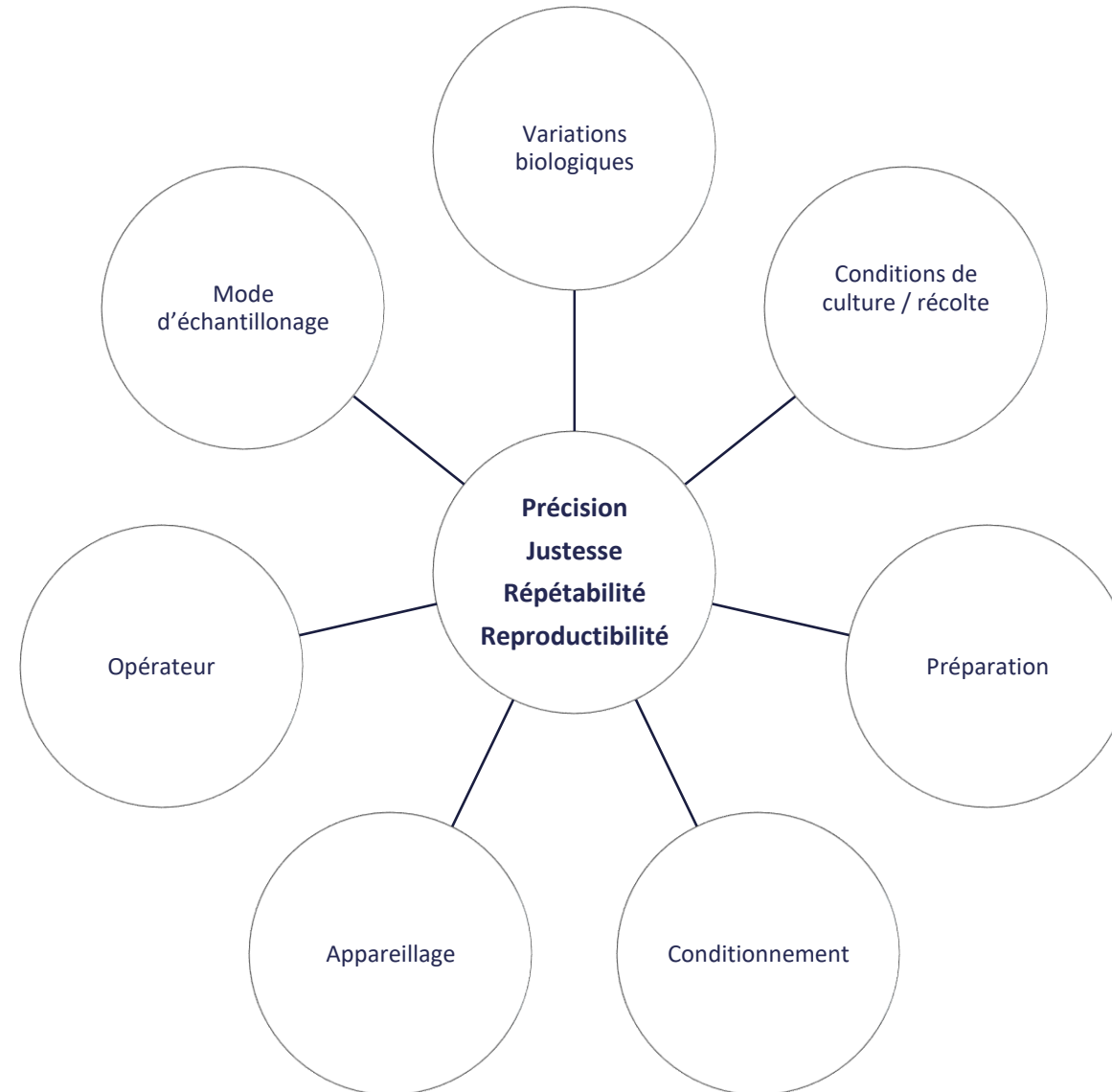
Jute



Laine



La variabilité des fibres : un défi scientifique et expérimental

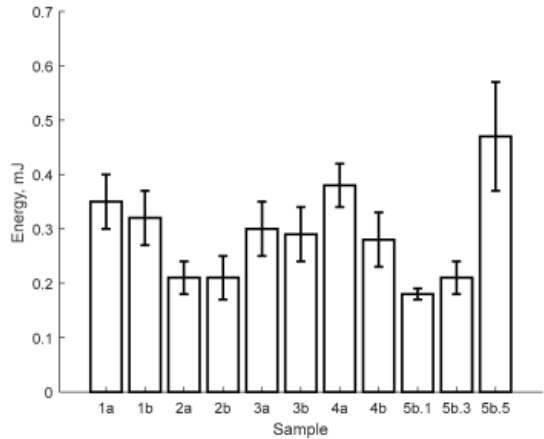
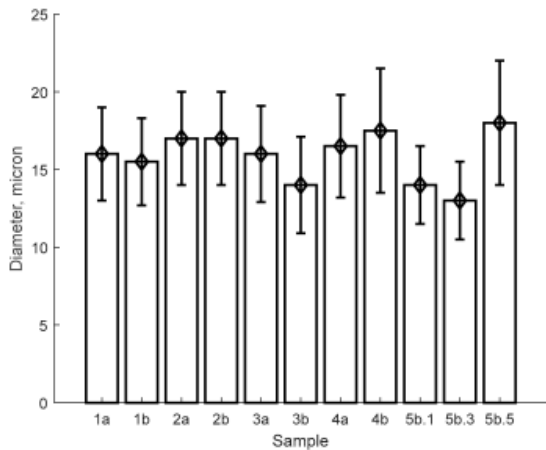
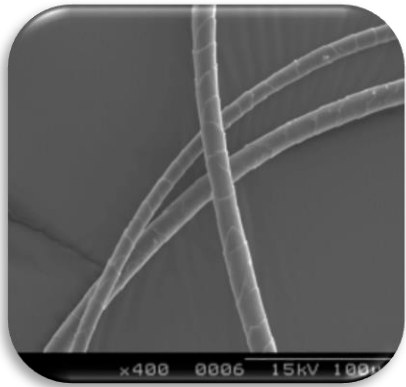


La variabilité des fibres : un défi scientifique et expérimental

Influence des facteurs génétiques et non génétiques sur les propriétés physiques et mécaniques de la fibre de cachemire

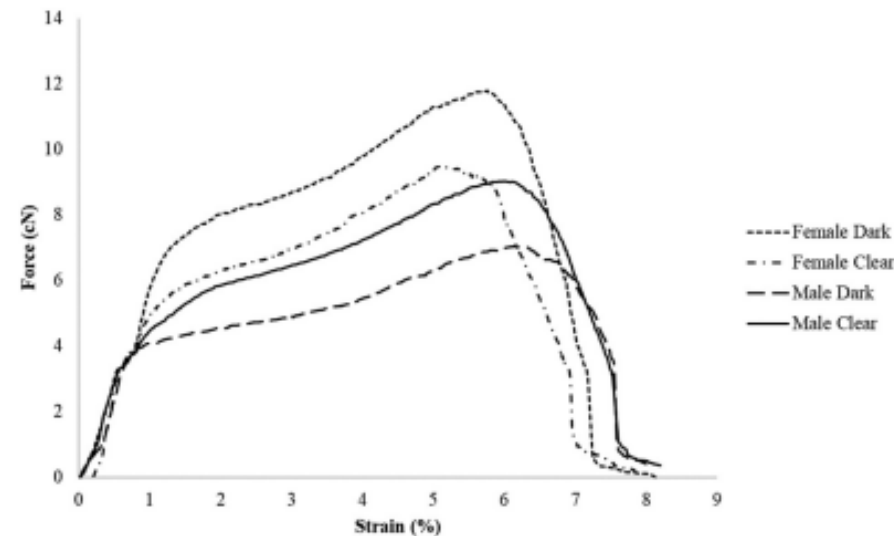
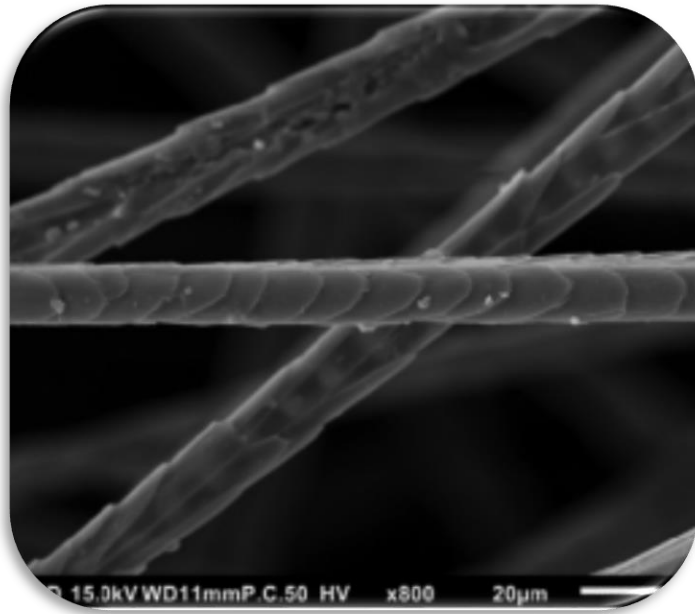
Objectifs: Etude des propriétés physiques et mécaniques de la fibre de cachemire: Influence de facteurs génétiques (race, lignée) et non génétiques (âge, sexe, région) + classification du cachemire pour améliorer sa filabilité.

Type	Department	Region	Age	Gender	Code
Bayandelger	Sukhbaatar	Bayandelger	3	female	1a
	Sukhbaatar	Bayandelger	3	male	1b
Ulgii Ulaan	Uvs	Omnogobi	3	female	2a
	Uvs	Omnogobi	3	male	2b
Buural	Zavkhan	Dorvoljin	3	female	3a
	Zavkhan	Dorvoljin	3	male	3b
Gobi Gurvan Saikhan	Omnogobi	Bulgan	3	female	4a
	Omnogobi	Bulgan	3	male	4b
Erchim	Khovsgol	Erchim	1	male	5b.1
	Khovsgol	Erchim	3	male	5b.3
	Khovsgol	Erchim	5	male	5b.5



Étude de la variabilité des propriétés physiques et mécaniques du poil de chinchilla

Objectifs: Etude des propriétés du poil de chinchilla (longueur, diamètre, résistance) selon l'espèce (claire/sombre), le sexe, l'âge, et la position anatomique (dos, côté, cou) + Évaluation du potentiel de cette fibre pour des applications textiles.



Force vs. Strain curves from the dark and clear specie, male and female young Chinchilla's side hair.

Caractéristiques physiques et mécaniques

Physiques

- la longueur
- la finesse (titrage ou diamètre)
- la maturité
- la densité (masse volumique)
- la frisure (crimp)
- la couleur
- le taux de reprise d'humidité (hygroscopicité)
- le comportement envers les agents chimiques
- l'affinité tinctoriale (aptitude à absorber les colorants), etc

Mécaniques

- la ténacité (force de rupture rapportée à la finesse, en cN/tex)
- l'allongement à la rupture (en %)
- la rigidité en flexion (module de Young)
- la limite élastique (yield point), etc

Ces propriétés permettent de comparer et d'orienter les fibres vers des usages techniques variés (textile, composite, médical, etc.).

Métrologie textile

Normalisation

- De nombreux instituts dans différents pays ont tenté d'imposer des méthodes pour la mesure de la qualité textile.
- Les normes AFNOR en FRANCE, DIN en ALLEMAGNE, UNI en Italie et ISO en normalisation internationale (etc.) sont souvent proches et parfois identiques.
- Le choix de la méthode de mesure est très important car il influencera, selon les cas, les résultats textiles.
- Toutes les méthodes de mesure ne font pas l'objet de NORMES.

Métrologie textile

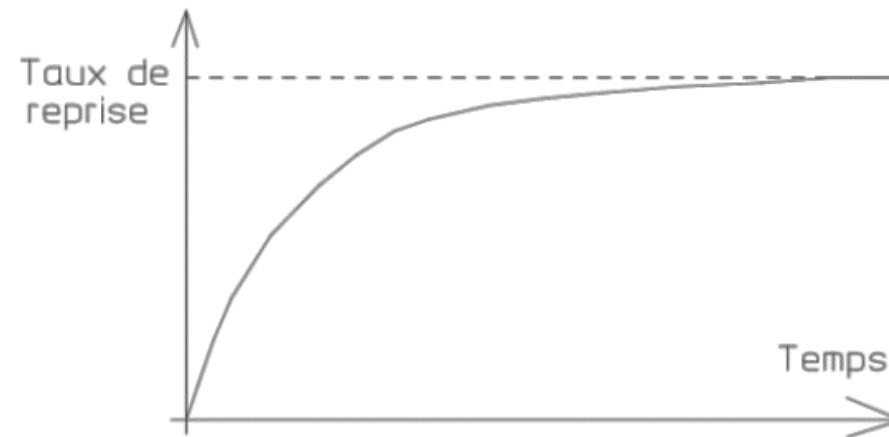
Statistiques

Symboles	Valeurs	Notions
n		Nombre de mesures
\bar{x}	$\sum n_i x_i / \sum n_i$	Estimateur sans biais de la moyenne de la population (ou espérance mathématique de la pop.)
σ_n^2	$\sum (x - \bar{x})^2 / n$	Variance échantillon
σ_n	$\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 / n}$	Ecart type échantillon
s^2	$\sum (x - \bar{x})^2 / (n - 1)$	Estimateur sans biais de la variance de la population
s	$\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 / (n - 1)}$	Estimateur de l'écart type de la population $\sigma_{n-1} = s = \sigma_n \sqrt{\frac{n}{n-1}}$
CV%	$100 \sigma_n / \bar{x} $	Coefficient de variation échantillon
LPE 95%	$t_s \text{ CV\%} / \sqrt{n-1}$	Limite pratique d'erreur au risque 5% (niveau de confiance 95%)
IC 95%	$(t_b / \sqrt{n}) \cdot s$	Intervalle de confiance bilatéral au risque 5% (niveau de confiance 95%)
LPE 95%	$(\text{IC}_{95\%} / \bar{x}) \cdot 100$	Limite pratique d'erreur au risque 5% (niveau de confiance 95%)

Métrologie textile

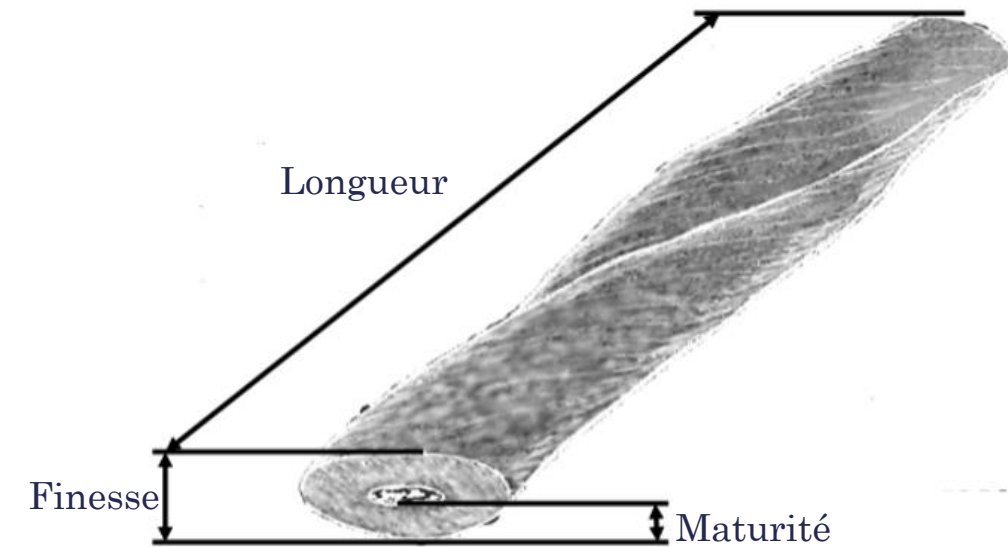
Hygroscopie

- Les fibres textiles sont, à des degrés différents, plus ou moins **hygroscopiques**, c'est-à-dire qu'elles sont capables d'absorber chacune une quantité d'eau différente.
- Le **taux de reprise** légal est le % d'eau qu'une fibre est capable d'absorber après une exposition prolongée dans une atmosphère conditionnée ($20 \pm 2^\circ$ Celsius et $65 \pm 2\%$ d'humidité relative de l'air ambiante).



Métrologie textile

Principales caractéristiques physiques



- Identifier la nature et la composition des fibres pour prévoir leur comportement lors de la transformation textile.
- Évaluer les caractéristiques influençant la qualité du produit finale.
- Adapter les procédés industriels (filage, teinture, traitement) en fonction des propriétés mesurées.
- Garantir la conformité aux normes, la régularité et la reproductibilité des lots.
- Optimiser la sélection des fibres selon les exigences techniques et fonctionnelles spécifiques.

Métrologie textile

Longueur

Par nature les fibres naturelles de même origine n'ont pas tous la même longueur.

Diverses expressions de longueur moyenne

- a) longueur moyenne arithmétique
- b) longueur moyenne pondérée à la section des fibres
- c) longueur moyenne pondérée au poids des fibres

Pour bien faire comprendre les différences qui existent entre eux, nous considérons un échantillon de trois fibres :

Les longueurs, sections et poids de chaque fibre sont désignés respectivement par :

l1 s1 w1

l2 s2 w2

l3 s3 w3



Métrologie textile

Diverses expressions de longueur moyenne

Longueur

a) longueur moyenne arithmétique

$$L_a = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{3}$$



- On voit immédiatement que l'on obtiendrait une autre valeur de 'La' si la fibre 2 , de grosse section, était considérée comme deux fibres fines juxtaposées.
- Ainsi, pour tenir compte de la section des fibres dans l'expression par la section, nous allons pondérer la longueur de chaque fibre par sa section ; on nous arrive à la notion de “**Hauteur**”.

Métrologie textile

Diverses expressions de longueur moyenne

Longueur

b) longueur moyenne pondérée à la section des fibres ou “Hauteur”

$$H = \frac{(l_1 \times s_1) + (l_2 \times s_2) + (l_3 \times s_3)}{s_1 + s_2 + s_3}$$

$$H = \frac{\sum l_i \times s_i}{\sum s_i}$$



Le poids d'une fibre vaut :

$$w_i = s_i \times l_i \times \delta$$

(où δ est la densité ou poids spécifique)

$$H = \frac{\sum w_i}{\sum s_i \delta} = \frac{\sum w_i}{\sum \frac{w_i}{l_i}}$$

Métrologie textile

Diverses expressions de longueur moyenne

Longueur

b) longueur moyenne pondérée au poids des fibres ou “**Barbe**”

$$B = \frac{l_1 \times w_1 + l_2 \times w_2 + l_3 \times w_3}{w_1 + w_2 + w_3}$$

$$B = \frac{\sum l_i \times w_i}{\sum w_i}$$



Le poids d'une fibre vaut :

$$w_i = s_i \times l_i \times \delta$$

(où δ est la densité ou poids spécifique)

$$B = \frac{\sum l_i^2 \times s_i}{\sum l_i \times s_i}$$

Métrologie textile

Longueur

Paramètres de dispersion : coefficients de variation

La dispersion de la distribution de longueurs des fibres peut être caractérisée par le coefficient de variation de Hauteur CV_H ou par le coefficient de variation de Barbe CV_B .

$$CV_H = \frac{\sigma_H}{H} \times 100$$

$$CV_B = \frac{\sigma_B}{B} \times 100$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_i (s_i (l_i - H)^2)}{\sum s_i}}$$

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{\sum_i w_i (l_i - B)^2}{\sum w_i}}$$

$$H = B \times (1 - CV_H^2)$$

Métrologie textile

Longueur

Classeur à peignes <ul style="list-style-type: none">• Zweigle• Schlumberger	Répartition des fibres par classes de longueur, estimation du pourcentage par classe distribution poids/longueur
Instruments individuels <ul style="list-style-type: none">• Almeter Peyer• Spinlab Fibrograph 930• Textechno Fibrotest	Longueur 50%/2.5%, Uniformité, SFC, SCI, Ténacité, Finesse, etc.
Chaînes instrumentales <ul style="list-style-type: none">• Uster HVI 1000/Spectrum• Mesdan CONTEST-F• AFIS (Advanced Fibre Information System)	Longueur, Uniformité, SFC, Ténacité, Micronaire, Neps, etc. Mesure longueur, répartition statistiques fines, etc.
Mesure optique <ul style="list-style-type: none">• Microscopie	Mesure manuelle sur images agrandies, moyennes statistiques

Métrologie textile

Classeurs à peignes

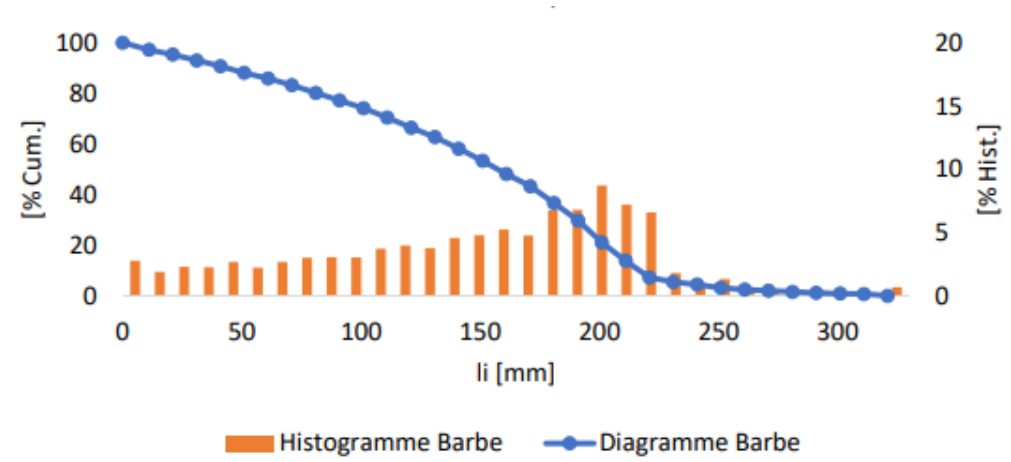
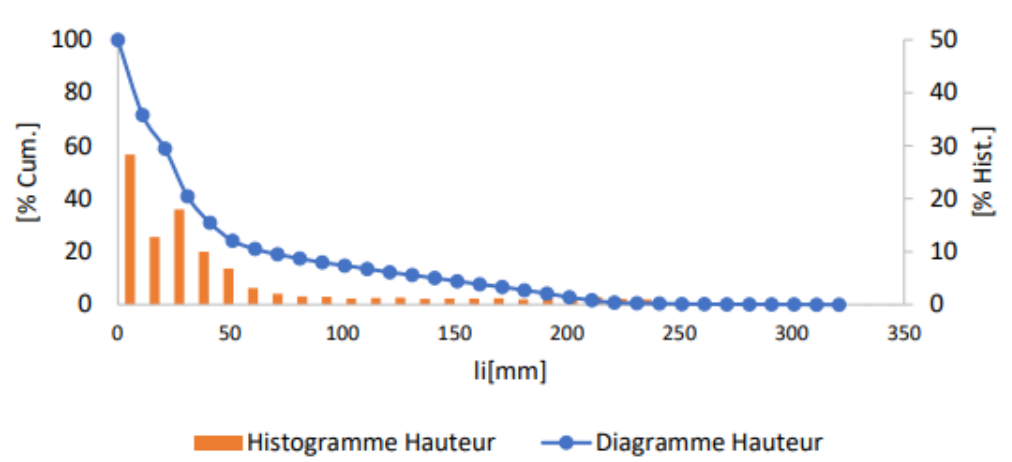
Longueur



Schlumberger



Zweigle



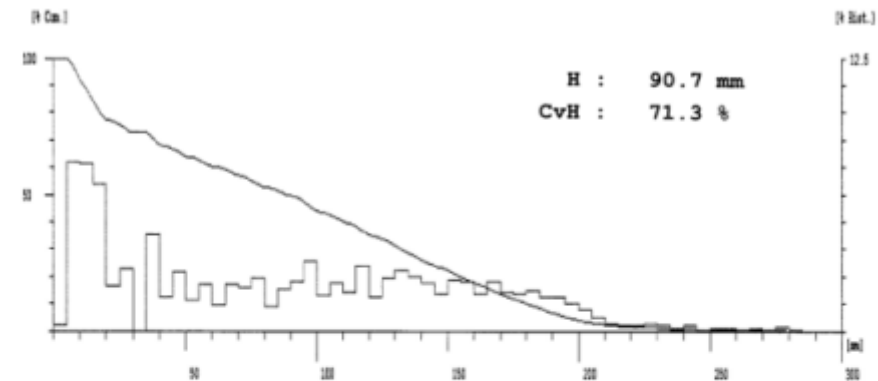
Métrologie textile

Almeter Peyer

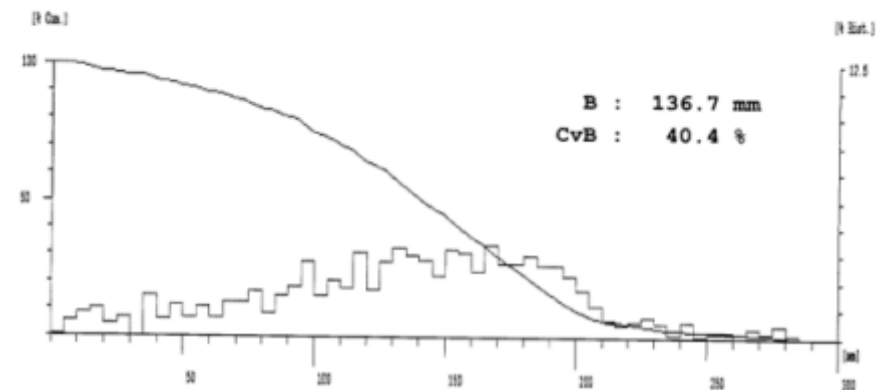
Longueur



[Long] **Hauteur** [Nb. Mesures=3]



[Long] **Barbe** [Nb. Mesures=3]



Métrologie textile

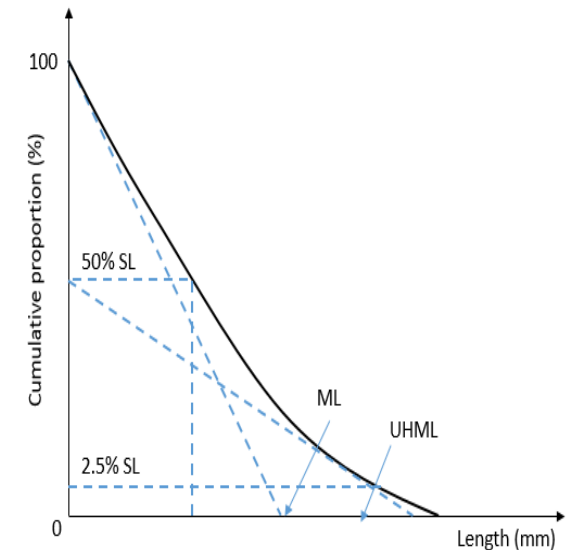
Almeter Peyer

Longueur

- Le **fibrogramme** (courbe de tuft) représente graphiquement la distribution des longueurs de fibres dans un échantillon.
- Plusieurs points clés du fibrogramme sont définis :
 - **ML (Mean Length)** : obtenue en traçant une tangente à la courbe au point 100 % de fibres.
 - **UHML (Upper Half Mean Length)** : tangente tracée depuis le point 50 % de fibres, elle représente la longueur moyenne de la moitié supérieure des fibres.
- L'uniformité des longueurs dans le lot est évaluée par l'indice

d'uniformité UI% :

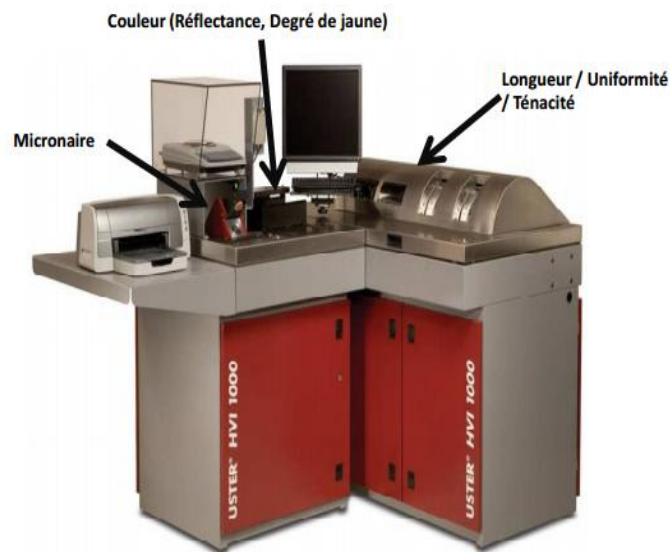
$$UI\% = 100 \times \frac{ML}{UHML}$$



Métrologie textile

High Volume Instrument ®; HVI

Longueur



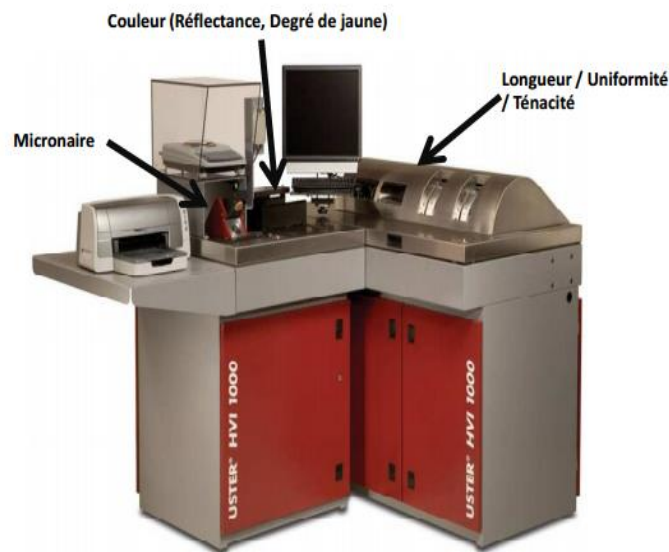
3 Modules principaux :

- Micronaire : mesure automatique de la finesse/maturité sur une masse prédéfinie de coton brut compressé.
- Longueur & résistance : mesure de la distribution des longueurs via un faisceau de fibres, résistance et allongement évalués par rupture sous tension.
- Couleur : mesure colorimétrique par réflexion pour déterminer teinte et pureté.

Métrologie textile

High Volume Instrument ®; HVI

Longueur

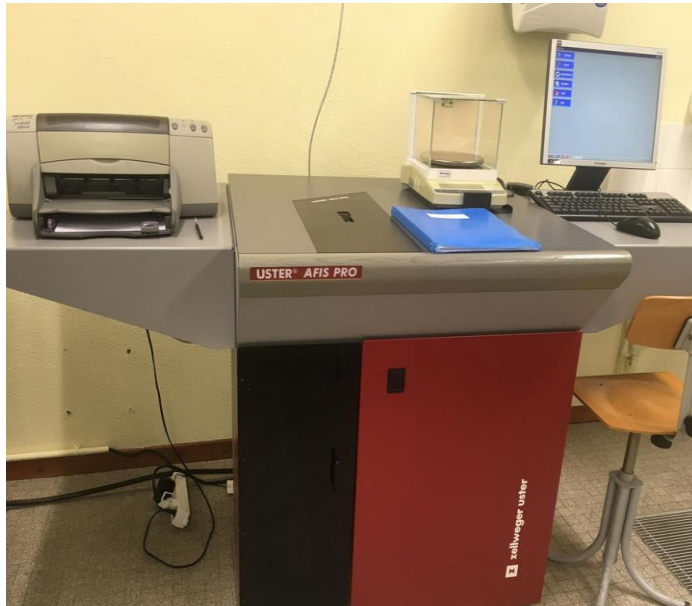


- **UHML (mm)** : Upper Half Mean Length: la longueur moyenne de la moitié supérieure des fibres ;
- **ML (mm)** : Mean Length ; la longueur moyenne des fibres ;
- **UI** : Uniformity Index ; est obtenu en prenant le rapport entre le ML et UHML et fournit une bonne indication de l'uniformité du coton ;
- **SFI** : Sort Fiber Index ; indice de fibre courte qui donne une indication du taux de fibres plus courtes que 12,5 mm ;
- **MR** : Maturity Ratio;
- **Ténacité (cN / tex)**: définie comme la résistance à la rupture exprimée en cN par rapport à la masse linéique du faisceau de fibres en tex ;
- **Allongement relatif (%)** ; l'allongement à la rupture des fibres ;
- **Rd** ; degré de réflectance. Cette valeur correspond à la réflectance (%) de la lumière réfléchiée par l'échantillon ;
- **+b**: degré de jaunissement.

Métrologie textile

Advanced Fiber Information System ®; AFIS

Longueur

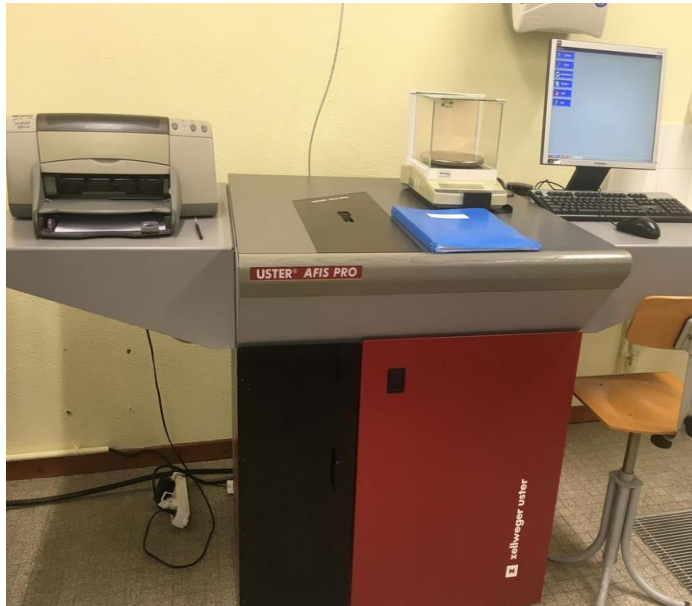


- Analyse individuelle des fibres sur un petit échantillon de nappe (0,4 à 0,6 g, ~30 cm).
- Séparation mécanique : briseur qui ouvre et aère les fibres, puis tri optique par capteur.
- Mesure de la longueur, du diamètre, du taux de fibres courtes, du taux de neps et d'impuretés, etc.
- Données traitées par ordinateur ; résultats fiables sur 3000 fibres/analyse, jusqu'à 10 000 pour meilleure statistique.
- Outil clé pour la recherche et les contrôles qualité avancés, complémentaire du HVI.

Métrologie textile

Advanced Fiber Information System ®; AFIS

Longueur



- **Neps en (Cnt/g)** : nombre des neps par gramme de matière;
- **Neps en (μm^2)** : taille moyenne des neps ;
- **SNC : Seed Coat Neps en (Cnt/g)** : nombre de débris de coque de graines enchevêtrés avec les fibres par gramme de matière;
- **L(w), L(n) en (mm)** : longueur moyenne des fibres pondérée par la masse (w : weight) et par le nombre (n : number) ;
- **L(w) %CV, L(n) %CV en (%)** : coefficient de variations des longueurs des fibres moyenne pondérée par la masse (w : weight) et par le nombre (n : number) ;
- **SFC(w), SFC(n) en (%)** : Short Fibre Content : pourcentage des fibres courtes de longueurs inférieure à 12,7mm, pondérée par la masse (w : weight) et par le nombre (n : number) ;
- **UQL(w) en (mm)** : Upper Quartile Length ; longueur dépassée seulement par 25% des fibres de la distribution cumulée pondérée par la masse ;
- **Fineness en (mtex)** : masse linéique ou titre des fibres;
- **MR : Maturity Ratio** : la maturité est définie par le rapport de la surface de section de la fibre à la surface de section d'une fibre cylindrique qui aurait un même périmètre de section ;
- **Mean Size en (μm^2)** : taille moyenne des impuretés ;
- **Dust en (Cnt/g)** : nombre des particules de poussières par gramme de matière (particules dont la taille est comprise entre 15 et 500 μm);
- **Trash en (Cnt/g)** : nombre des particules d'impuretés (particules dont la taille est supérieure à 500 μm).

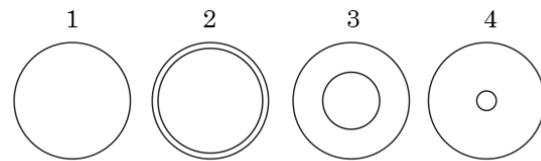
Métrologie textile

Maturité

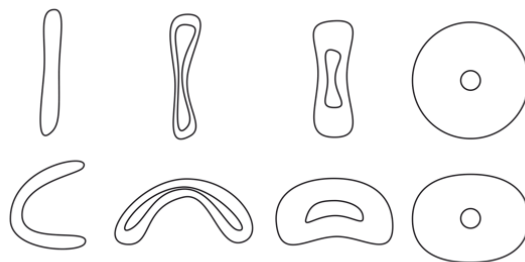
Cas du coton

La maturité (M) est un paramètre qui fait référence au développement de la paroi secondaire.

L'épaisseur de la paroi secondaire peut être indiquée par le degré d'épaississement (θ)



Dans la capsule fermée



Dans la capsule ouverte

- 1: Fibre morte
- 2: Fibre à paroi mince
- 3: Fibre mûre
- 4: Fibre très mûre

$$\theta = \frac{\text{aire réelle de la section droite de la fibre}}{\text{aire du cercle du même périmètre}} = \frac{S}{S_0} = \frac{4 \pi S}{p^2}$$



$\theta = 1$, la fibre est très mûre.

$\theta \sim 0,6$, la fibre est mûre.

$0,2 < \theta < 0,3$ la fibre immature.

Maturité

Métrologie textile

Finesse

Méthode vibroscopique

Méthode perméamétrique

Méthode optique

Méthode d'analyse d'image

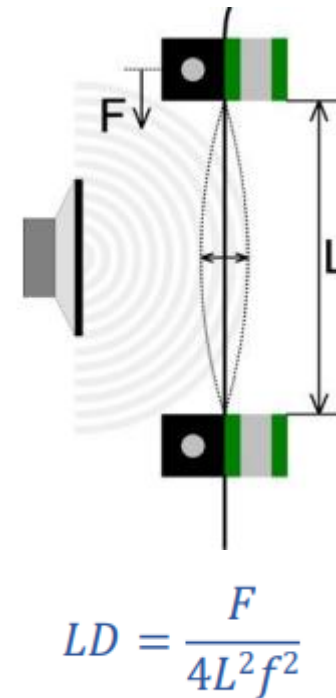
Métrologie textile

Méthode vibroscopique

Norme ASTM D1577 et ISO 1973

Finesse

- Utilisée pour les fibres lisses, et de section relativement constante.
- Principe : tension de la fibre entre une pince fixe et une masse calibrée, puis excitation par vibration transversale.
- Selon la loi des cordes vibrantes, la fibre présente une fréquence fondamentale de résonance qui correspond à la plus basse fréquence d'oscillation stable.
- La fréquence de résonance mesure la finesse (LD) de la fibre de manière non destructive.



Vibromat - Textechno

Métrologie textile

Méthode perméamétrique

Finesse

Norme NF G07-074

- La perméamétrie est une méthode de mesures indirectes de la finesse des fibres qui repose sur la relation de Carman-Kozeny mettant en liaison la surface spécifique A d'un tampon de fibres placé dans une chambre à volume constant au débit d'air traversant la chambre,

$$R = \frac{Q}{\Delta P} = \frac{S * \varepsilon^2}{K_0 * \eta * L * A^2 * (1 - \varepsilon^2)}$$

Avec

Q : Débit Volumique (cm³/s)

ΔP : Perte de charge (cN/cm²)

R : Résistance du tampon au débit de l'air (cm⁵/cN.s)

η : viscosité dynamique de l'air (cN.s/cm²)

S : Section du canal central du manchon (cm²)

L : Longueur du manchon (cm)

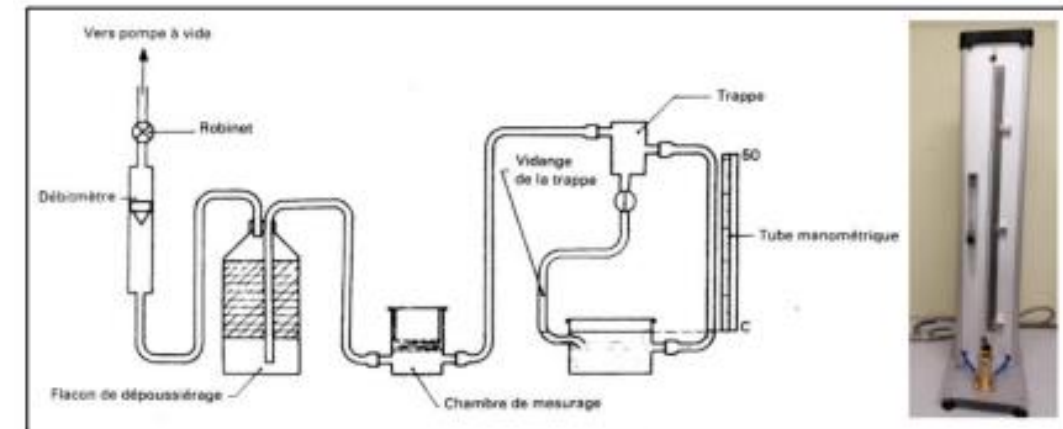
A : Surface spécifique du tampon (cm²/cm³)

K : Constante de Kozeny (sans dimension)

ε : Porosité du tampon fibreux (cm³/cm³) = $\frac{\text{Volume des vides du tampon fibreux}}{\text{Volume du canal central du manchon}} = 1 - \frac{m}{\rho.S.L}$

ρ : masse volumique de la matière (g/cm³)

m : la masse du tampon (g)



AIR FLOW

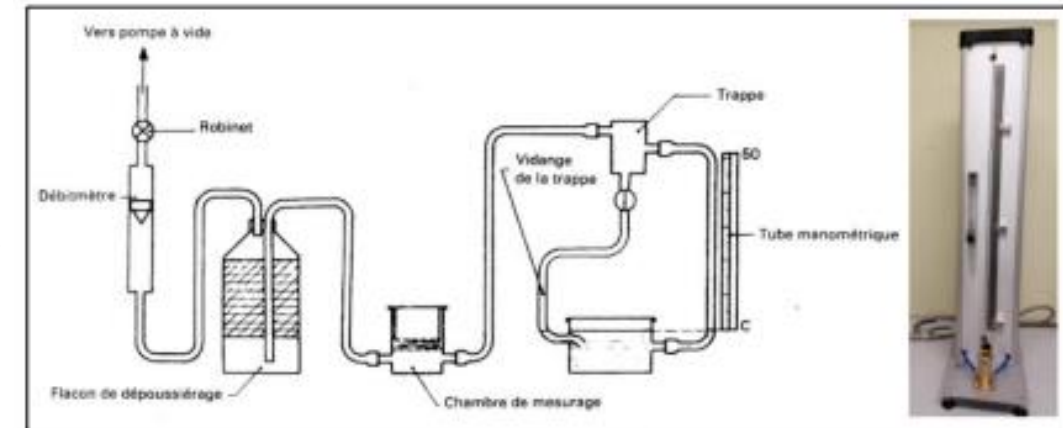
Métrologie textile

Méthode perméamétrique

Finesse

Norme NF G07-074

- On prélève un échantillon de masse déterminée au travers duquel on fera passer un flux d'air de débit ou de pression constant.
- Si les fibres sont grossières et donc lourdes, il y en aura moins pour le même poids et l'air pourra traverser le tampon de fibres plus facilement.
- On pourra ainsi, en fonction de la perte de charge provoquée par le tampon fibreux, différencier facilement des fibres de finesse différentes.
- La perte de charge est étalonnée et correspond à une finesse exprimée en microns ou en IFS (Indice de Finesse Standard).



AIR FLOW

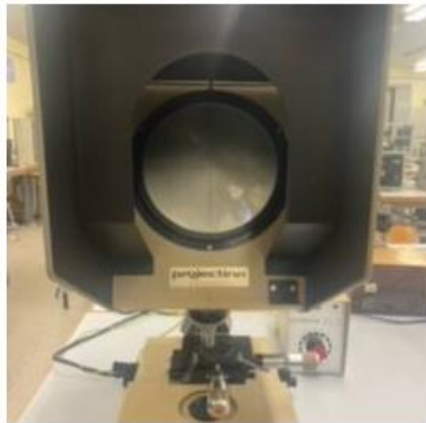
Métrologie textile

Méthode optique

Finesse

Norme ISO 17751-1:2016

- Mesure directe du diamètre apparent de la fibre à l'aide de la microscopie optique ou de la projection d'image.



Projectina



Profilometer

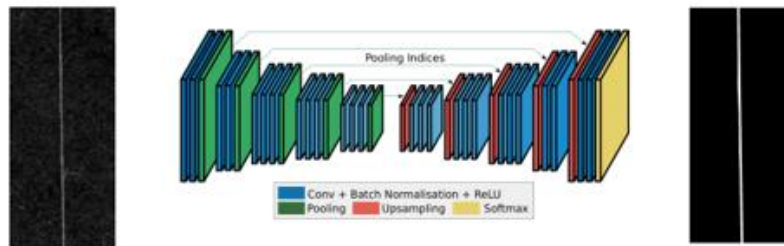


Image of 1 cm of the
technical flax fiber

Métrologie textile

Méthode d'analyse d'image

Finesse



```

model = smp.UnetPlusPlus(
    encoder_name = 'efficientnet-b0',
    encoder_weights = 'imagenet',
    in_channels = 1,
    classes = 1,
).to(device)

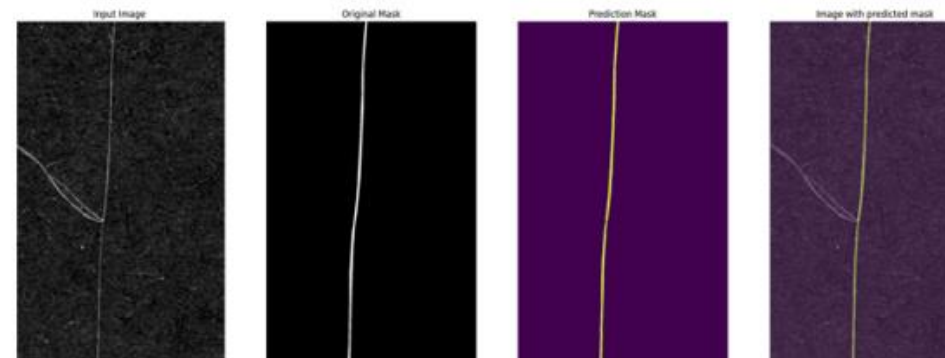
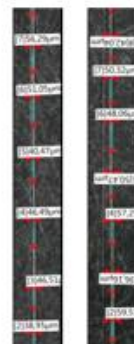
model_name = 'UNetEfficientnetB0'

criterion = DiceLoss(activation=F.sigmoid)
optimizer = torch.optim.Adam(model.parameters(), 1e-3)

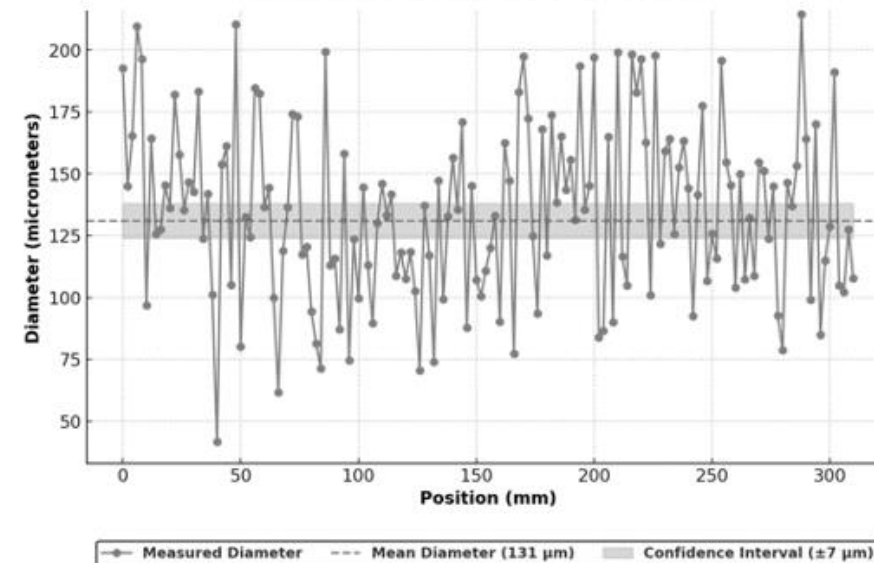
num_epoch = 10
  
```



config.json: 100%  106/106 [00:00:00:00, 13.5kB/s]



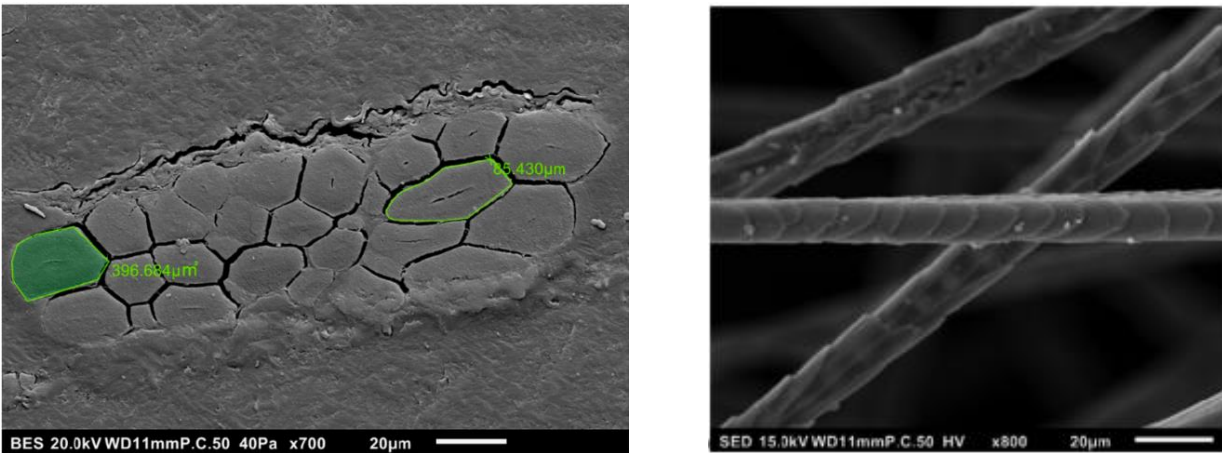
Variation du diamètre des faisceaux techniques de lin



Métrologie textile

Finesse

Microscope Electronique à Balayage

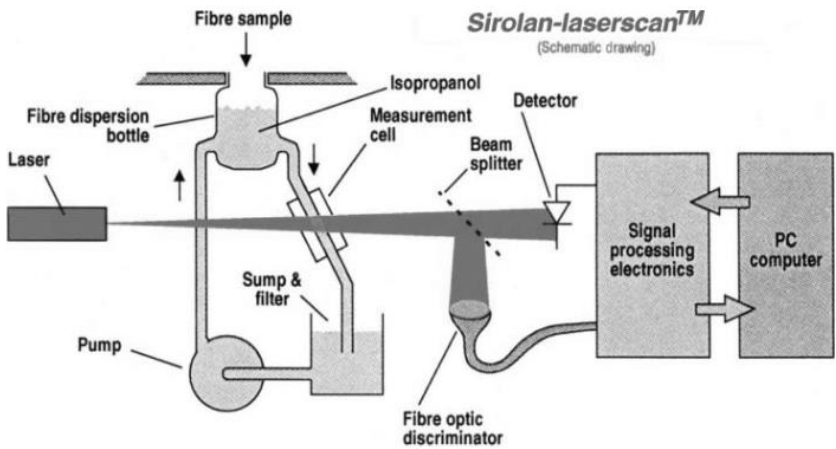


OFDA : Optical Fibre Diameter Analyzer

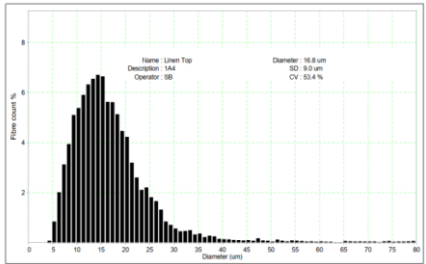
Système robotisé (digital video ou optique) qui analyse en continu les images de milliers de fibres sur une surface éclairée, déterminant diamètre moyen, homogénéité, longueur, courbure, etc

LASER SCAN

Un faisceau laser balaye l'échantillon de fibres, et un capteur analyse l'ombre portée ou la diffusion du signal pour mesurer avec précision le diamètre de chaque fibre.



Distribution de la finesse - OFDA



Sources:

- Mahjoub, W., & Harzallah, O. (2025). Physical and Mechanical Characterization of Flax Fibers: From Elementary Fiber to Yarn. *Fibers*, 13(7), 87.
- Mahjoub, W., Petrela, A., Drean, J. Y., & Harzallah, O. (2024). Study of the Variability of the Physical and Mechanical Properties of Chinchilla Hair. *Journal of Natural Fibers*, 21(1), 2390076.

Métrologie textile

Principales caractéristiques mécaniques

Pourquoi étudier
les propriétés
mécaniques ?

- Relier la structure à la performance
- Modéliser les mécanismes de déformation et de rupture
- Contrôler la qualité et la reproductibilité

Comment
mesurer ces
propriétés ?

- **Essais de traction**
→ Mesure de la résistance, de l'élasticité et de la ténacité
- **Essais de fluage et de relaxation**
→ Étude du comportement viscoélastique dans le temps
- **Essais cycliques (fatigue, déformation viscoélastique)**
→ Simulation de sollicitations répétées et analyse de la stabilité mécanique

Où ces
connaissances
sont-elles utiles ?

- Industrie textile
- Matériaux composites
- Recherche en biomatériaux
- Modélisation multi-échelle

Métrologie textile

Outils de mesure

- Les mesures peuvent être réalisées
 - Sur fibres individuelles
 - Sur faisceaux de fibres
- Principaux outils utilisés

Outil	Type d'échantillon
Stéломètre	Faisceau
Pressley	Faisceau
Favimat	Fibre individuelle
Dynamomètre MTS	Fibre / faisceau

Méetrologie textile

Outils de mesure

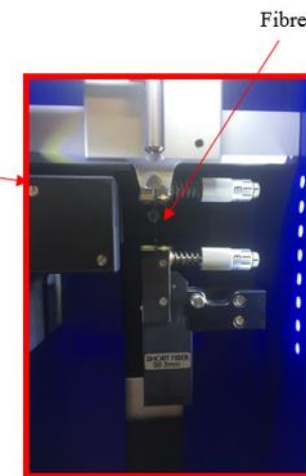
- Les mesures peuvent être réalisées
 - Sur fibres individuelles



Dynamomètre MTS



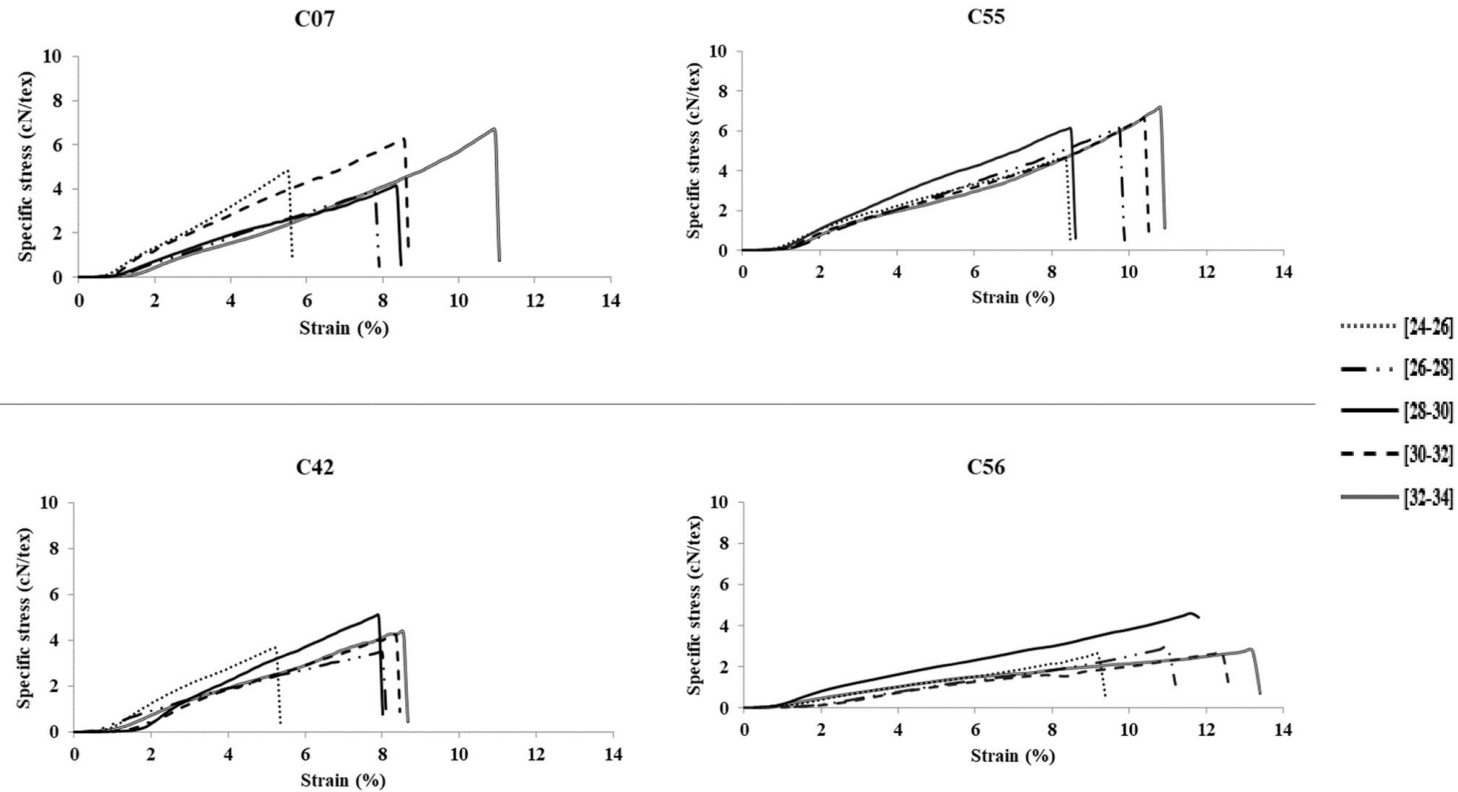
Favimat Textechno



Métrologie textile

Outils de mesure

- Les mesures peuvent être réalisées
 - Sur fibres individuelles



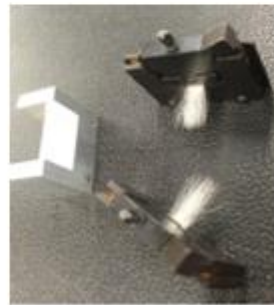
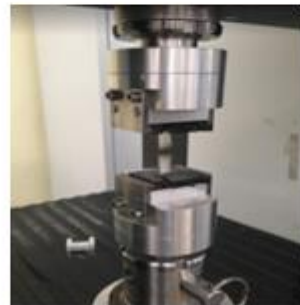
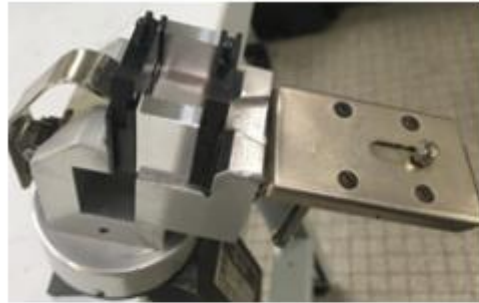
Métrologie textile

Outils de mesure

- Les mesures peuvent être réalisées
 - Sur faisceaux de fibres



Pinces Pressley



Dynamomètre MTS

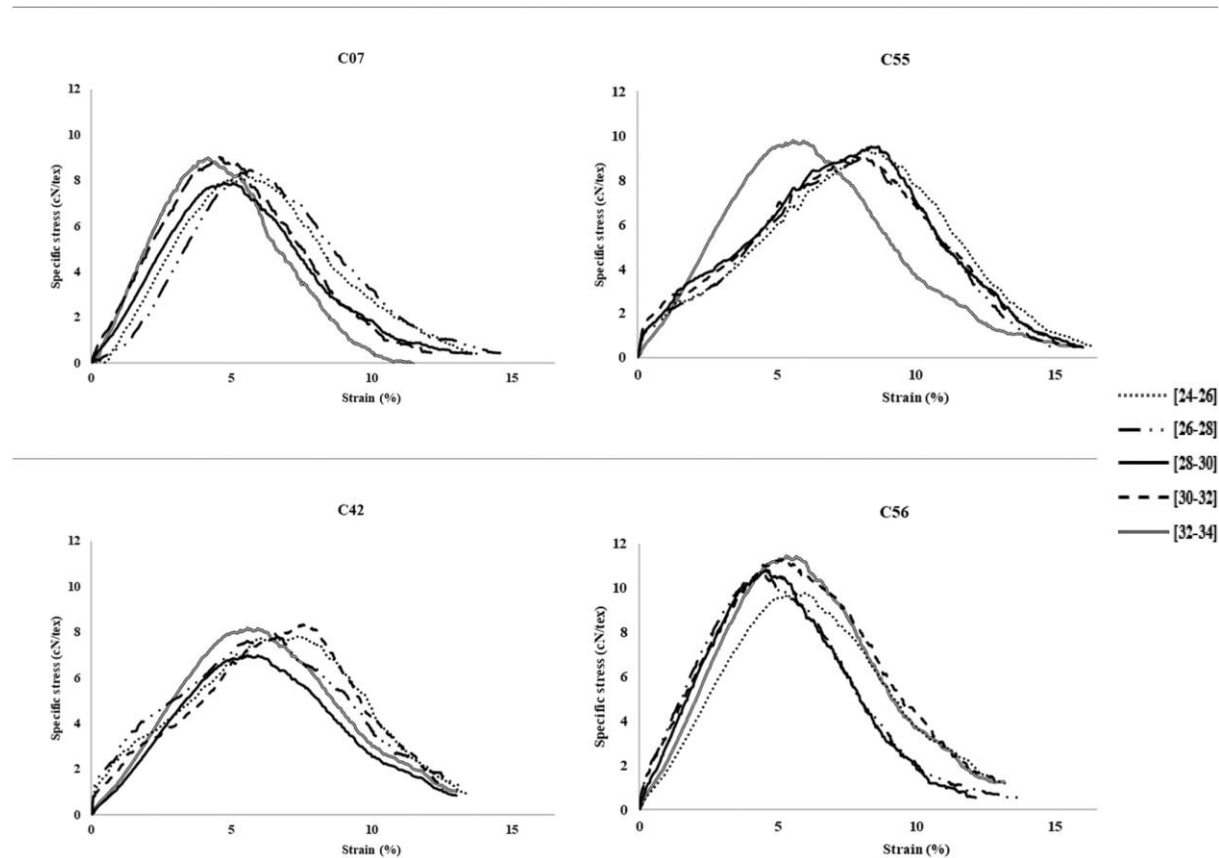


Stéломètre

Méetrologie textile

Outils de mesure

- Les mesures peuvent être réalisées
 - Sur faisceaux de fibres



Importance de la caractérisation physique et mécanique

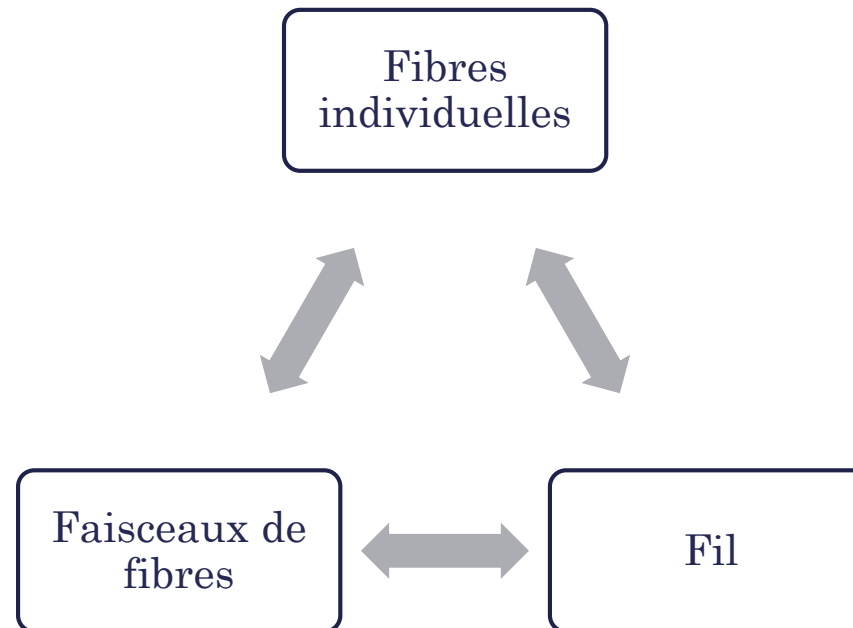
Thèse W. MAHJOUB (soutenue en 2020)

Caractérisation mécanique et modèles de comportement des fibres cellulosiques

Objectifs: Modéliser le comportement au fluage des fibres de coton (échelles fibres, faisceaux et fils) en analysant leurs propriétés physiques et mécaniques, afin d'identifier les corrélations et le modèle rhéologique le plus adapté,



Prédiction des propriétés du **fil** à partir des données des caractéristiques des **fibres individuelles**



Importance de la caractérisation physique et mécanique

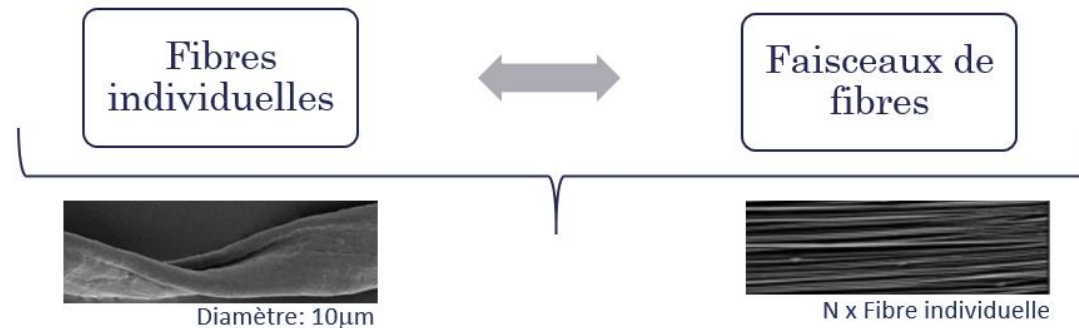
Thèse W. MAHJOUB (soutenue en 2020)

Caractérisation mécanique et modèles de comportement des fibres cellulosiques

Objectifs: Modéliser le comportement au fluage des fibres de coton (échelles fibres, faisceaux et fils) en analysant leurs propriétés physiques et mécaniques, afin d'identifier les corrélations et le modèle rhéologique le plus adapté,

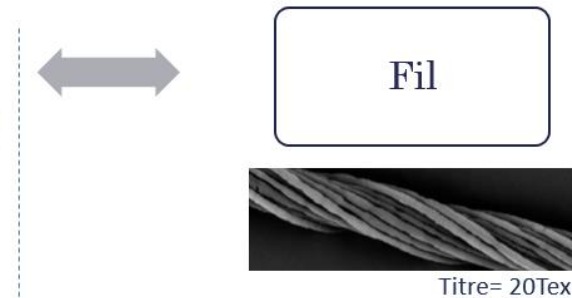
➡ Prédiction des propriétés du **fil** à partir des données des caractéristiques des **fibres individuelles**

Etape 1



→ Etude par classe de longueur et par variété

Etape 2



→ Etude par variété

Importance de la caractérisation physique et mécanique

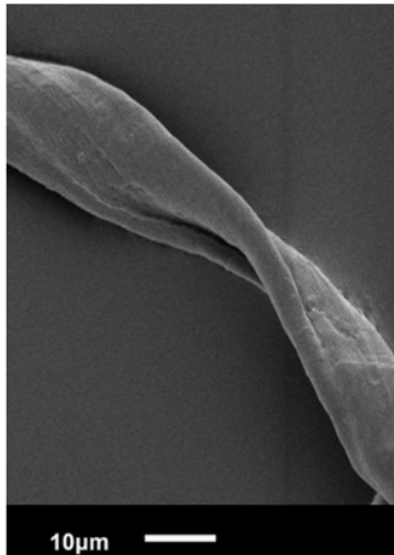
Thèse W. MAHJOUB (soutenue en 2020)

Caractérisation mécanique et modèles de comportement des fibres cellulosiques

Objectifs: Modéliser le comportement au fluage des fibres de coton (échelles fibres, faisceaux et fils) en analysant leurs propriétés physiques et mécaniques, afin d'identifier les corrélations et le modèle rhéologique le plus adapté,

Fibres de coton

Malvales → Malvacees → Hibiscees → Gossypium L.



- Gossypium herbaceum et Gossypium arboreum : fibres très courtes < à 25 mm (3 à 4% du coton cultivés).
- Gossypium barbadense : fibres longues à extra longues > à 33 mm (5 à 7% du coton cultivés).
- Gossypium hirsutum : fibres moyennes à longues (25 à 32 mm), environ 90% des fibres cultivées.

Masse linéique: 100 à 400 mTex

Diamètre équivalent de la fibre: 10 à 22 μm

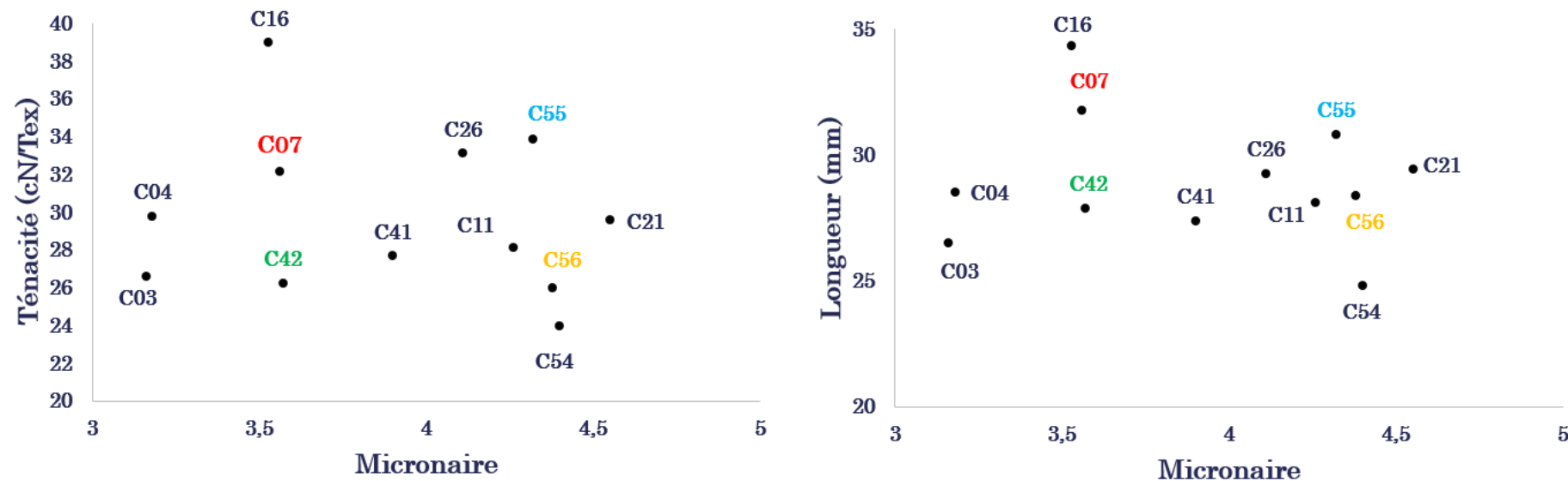
Densité du cellulose: 1,52

Importance de la caractérisation physique et mécanique

Thèse W. MAHJOUB (soutenue en 2020)

Caractérisation mécanique et modèles de comportement des fibres cellulosiques

Objectifs: Modéliser le comportement au fluage des fibres de coton (échelles fibres, faisceaux et fils) en analysant leurs propriétés physiques et mécaniques, afin d'identifier les corrélations et le modèle rhéologique le plus adapté,



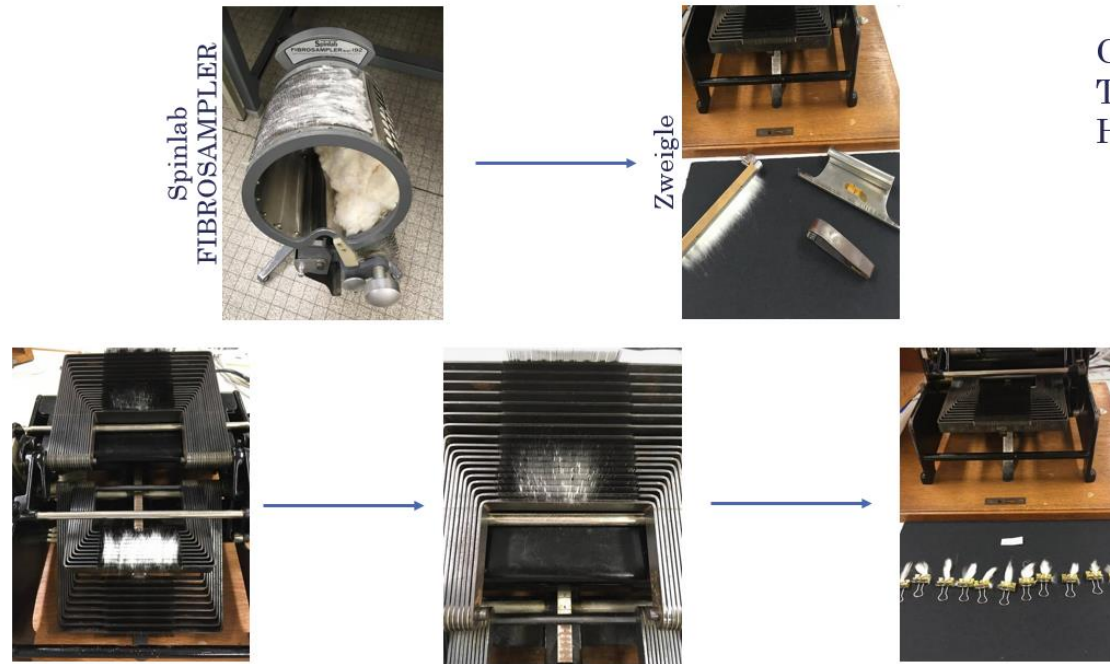
→ Quatre variétés de coton: C07, C42, C55 et C56

Importance de la caractérisation physique et mécanique

Thèse W. MAHJOUB (soutenue en 2020)

Caractérisation mécanique et modèles de comportement des fibres cellulosiques

Objectifs: Modéliser le comportement au fluage des fibres de coton (échelles fibres, faisceaux et fils) en analysant leurs propriétés physiques et mécaniques, afin d'identifier les corrélations et le modèle rhéologique le plus adapté,



Conditions:
T: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
HR: $65\% \pm 2\%$

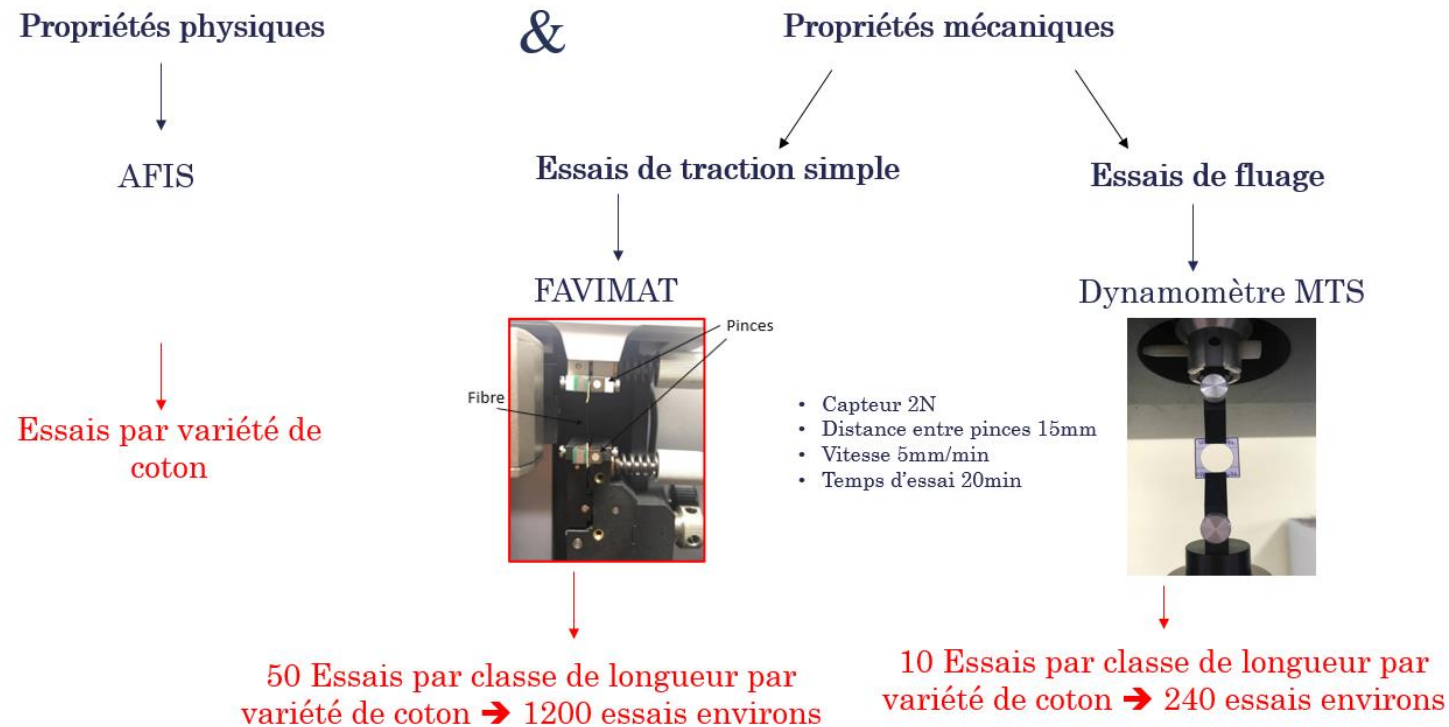
→ En moyenne 6 classes de longueur par variété de coton → environs 24 échantillons

Importance de la caractérisation physique et mécanique

Thèse W. MAHJOUB (soutenue en 2020)

Caractérisation mécanique et modèles de comportement des fibres cellulosiques

Objectifs: Modéliser le comportement au fluage des fibres de coton (échelles fibres, faisceaux et fils) en analysant leurs propriétés physiques et mécaniques, afin d'identifier les corrélations et le modèle rhéologique le plus adapté,

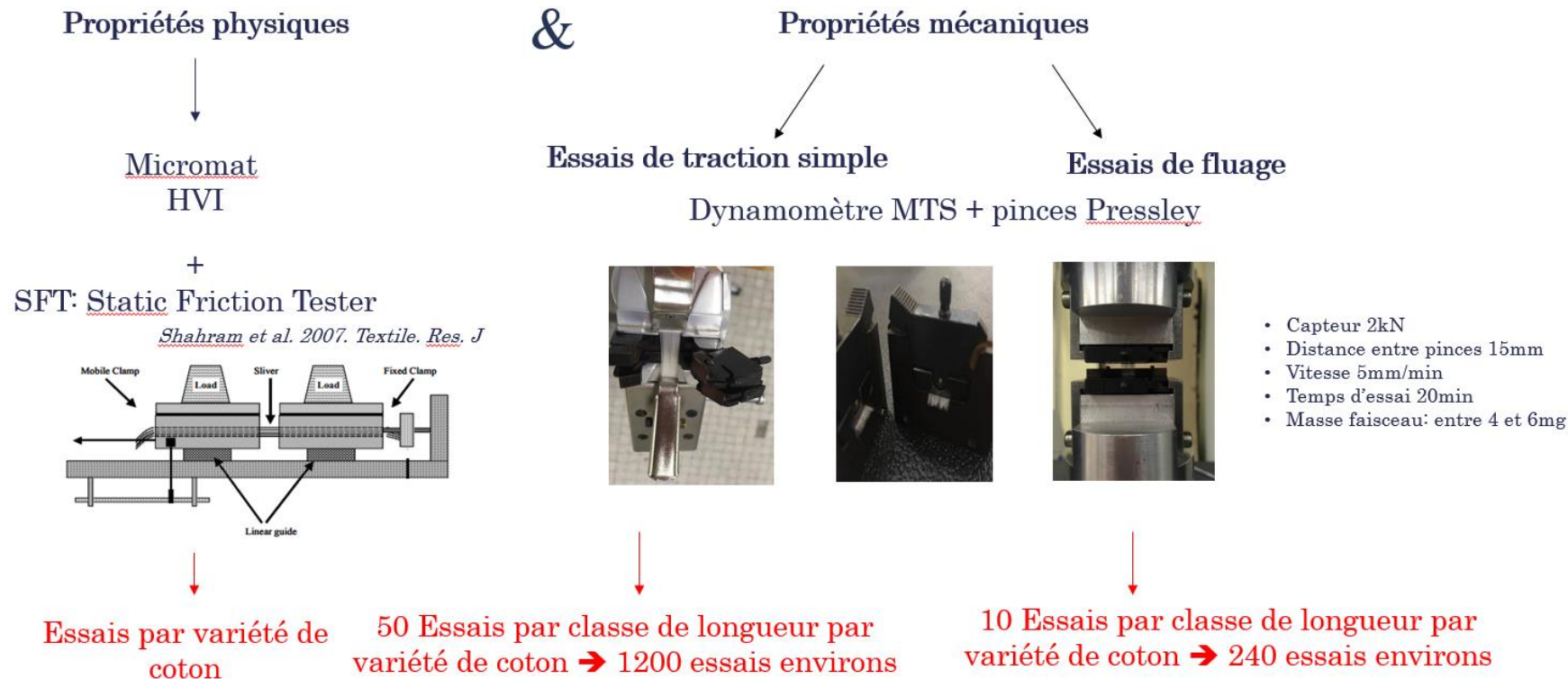


Importance de la caractérisation physique et mécanique

Thèse W. MAHJOUB (soutenue en 2020)

Caractérisation mécanique et modèles de comportement des fibres cellulosiques

Objectifs: Modéliser le comportement au fluage des fibres de coton (échelles fibres, faisceaux et fils) en analysant leurs propriétés physiques et mécaniques, afin d'identifier les corrélations et le modèle rhéologique le plus adapté,



Importance de la caractérisation physique et mécanique

Thèse W. MAHJOUB (soutenue en 2020)

Caractérisation mécanique et modèles de comportement des fibres cellulosiques

Objectifs: Modéliser le comportement au fluage des fibres de coton (échelles fibres, faisceaux et fils) en analysant leurs propriétés physiques et mécaniques, afin d'identifier les corrélations et le modèle rhéologique le plus adapté,

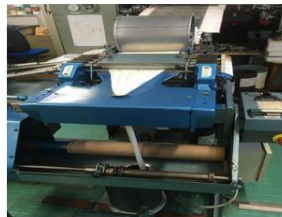
Filature et caractérisation des fils

Mini carde



Etirage

Banc d'étirage



Etirage + torsion

Continue à filer



Titre: 33 tex
4 variétés de coton
4 coefficients de torsions ($\alpha=90, 105, 125$ et 140)

Formule de Kœchlin

$$Torsion (t/m) = \frac{\alpha}{\sqrt{Titre(tex)}}$$



Propriétés mécaniques

Essais de traction simple

Essais de fluage

Dynamomètre MTS

- Capteur 100N
- Distance entre pinces 15mm
- Vitesse 5mm/min
- Temps d'essai 20min



10 Essais par test → 160 essais de traction et 160 essais de fluage

Importance de la caractérisation physique et mécanique

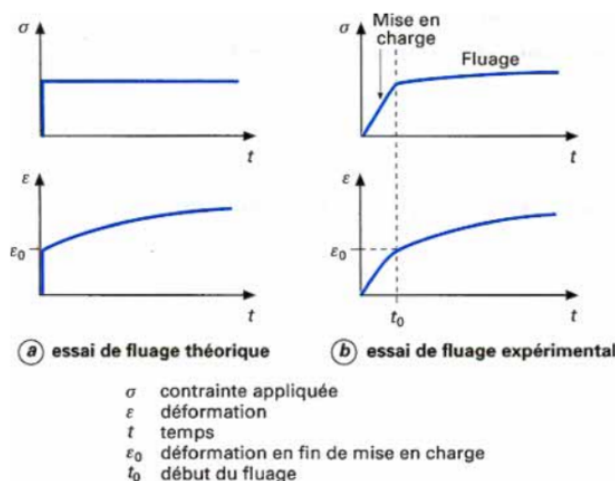
Thèse W. MAHJOUB (soutenue en 2020)

Caractérisation mécanique et modèles de comportement des fibres cellulosiques

Objectifs: Modéliser le comportement au fluage des fibres de coton (échelles fibres, faisceaux et fils) en analysant leurs propriétés physiques et mécaniques, afin d'identifier les corrélations et le modèle rhéologique le plus adapté,

- Le coton est viscoélastique
- Etude du comportement suite aux essais de fluage

Détermination des paramètres rhéologiques théoriques à partir des essais expérimentaux via un langage de programmation

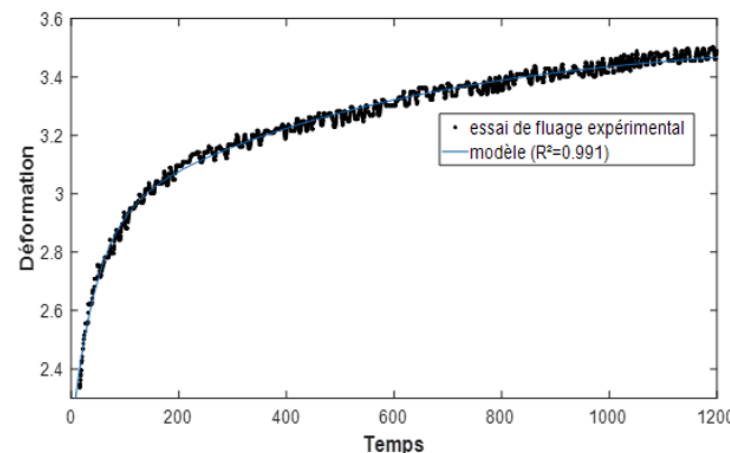


→ Essais dans la zone élastique à 2% de la force de rupture

Données expérimentales



Optimisation
Modèle
rhéologique



→ Identification des paramètres rhéologiques

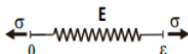
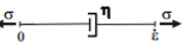
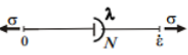
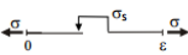
Importance de la caractérisation physique et mécanique

Thèse W. MAHJOUB (soutenue en 2020)

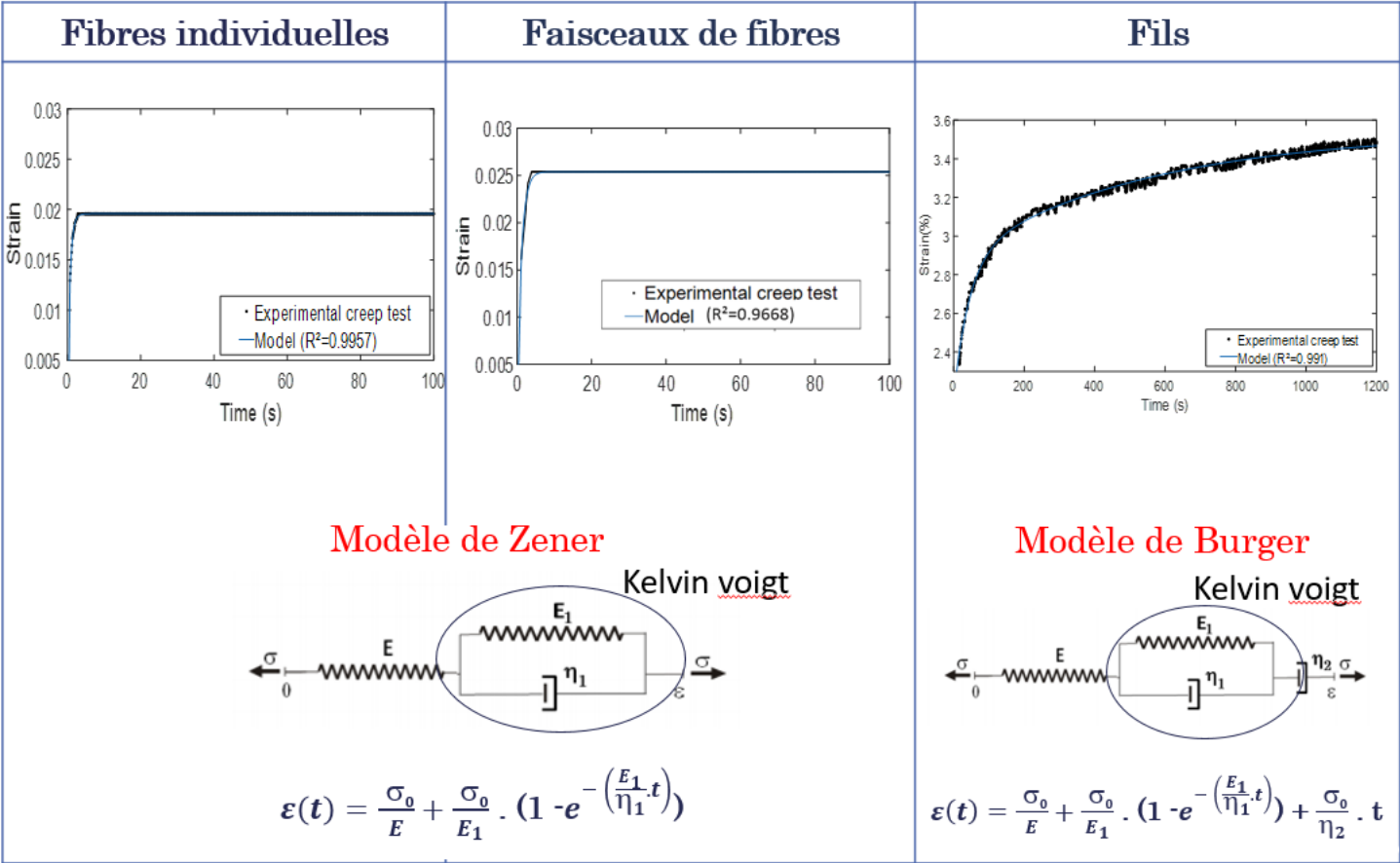
Caractérisation mécanique et modèles de comportement des fibres cellulosiques

Objectifs: Modéliser le comportement au fluage des fibres de coton (échelles fibres, faisceaux et fils) en analysant leurs propriétés physiques et mécaniques, afin d'identifier les corrélations et le modèle rhéologique le plus adapté,

→ Modèles analogiques

Modèle analogique	Equation	Elément mécanique	Signification
	$\sigma = E \epsilon$ Avec ; σ : Contrainte ; ϵ : Déformation ; E : Module d'Young.	Ressort	Elasticité linéaire, loi de Hooke
	$\sigma = \eta \dot{\epsilon}$ Avec ; $\dot{\epsilon}$: Vitesse de déformation ; η : Coefficient de viscosité.	Amortisseur	Viscosité linéaire, loi de Newton
	$\sigma = \lambda \dot{\epsilon}^{1/N}$ Avec ; λ et N : constantes.		Viscosité non linéaire
	$-\sigma_s < \sigma < \sigma_s$ Avec ; σ_s : Seuil de contrainte.	Patin	Plasticité

Source: Lemaitre et Chaboche, 2009. Mec. Mat. Sol



Importance de la caractérisation physique et mécanique

Thèse H. ZARROUK (en cours)

Optimisation du processus de filature de fibres de lin

Objectifs: améliorer la régularité et la qualité des fils produits à partir de fibres de lin, en particulier via la filature au sec.

➡ Etude et modélisation de la longueur au cours du processus

Lin teillé

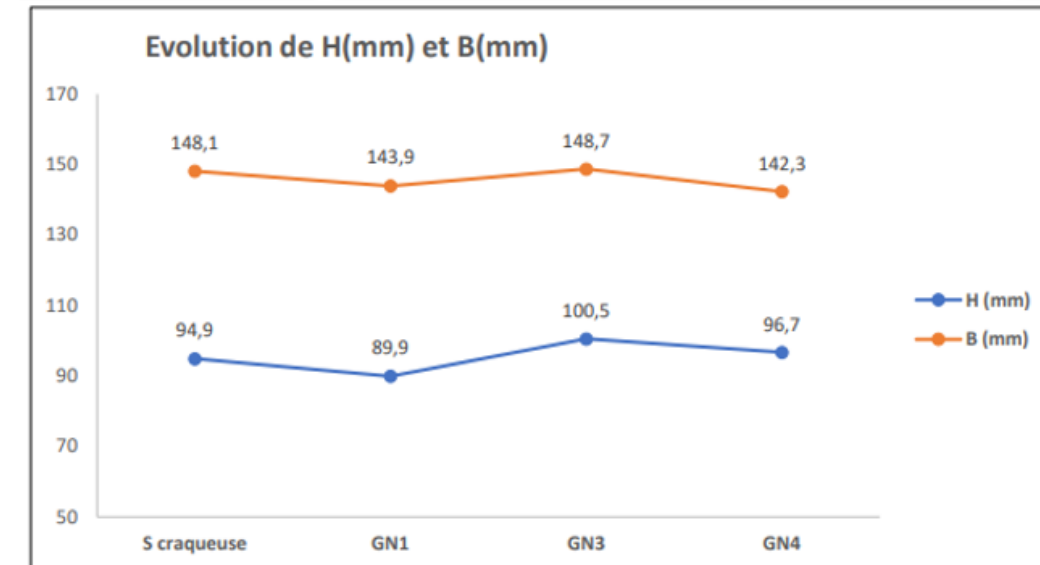
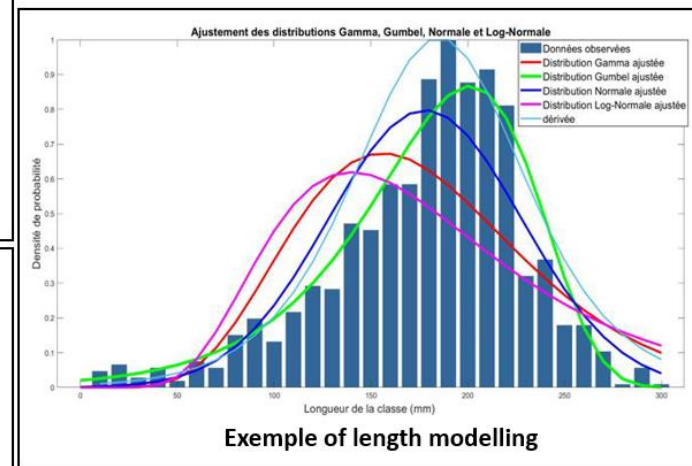
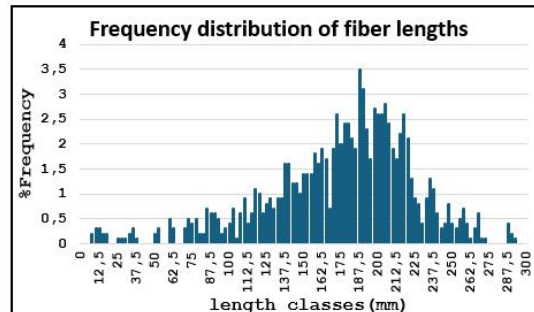
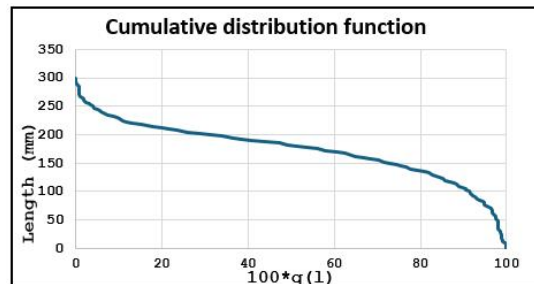
Craquage

Peignage

4

passages
d'étirage

Filature



Importance de la caractérisation physique et mécanique

Thèse H. ZARROUK (en cours)

Optimisation du processus de filature de fibres de lin

Objectifs: améliorer la régularité et la qualité des fils produits à partir de fibres de lin, en particulier via la filature au sec.

➡ Etude et modélisation de la longueur au cours du processus



	S Craq	GN1	GN2	GN3	GN4
ns	94	86	65	36	19
CV _t %	56,77	56,22	62,2	48,46	46,35
CV _{TLS} %	5,86	6,06	7,72	8,08	10,64
CV _{RS} %	19,09	15,02	11,2	17,61	13,78
I	3,26	2,48	1,45	2,15	1,30

ns : le nombre de fibres à la section d'un ruban

CV_t %: le coefficient de variation de titre

Coefficient de variation théorique limite à la sortie

$$CV_{TLS} = \sqrt{\frac{1 + CV_t^2}{ns}}$$

CVRs %: Coefficient de variation réel à la sortie

$$Indice\ d'irrégularité\ =\ I = \frac{CVRs}{CV_{TLS}}$$

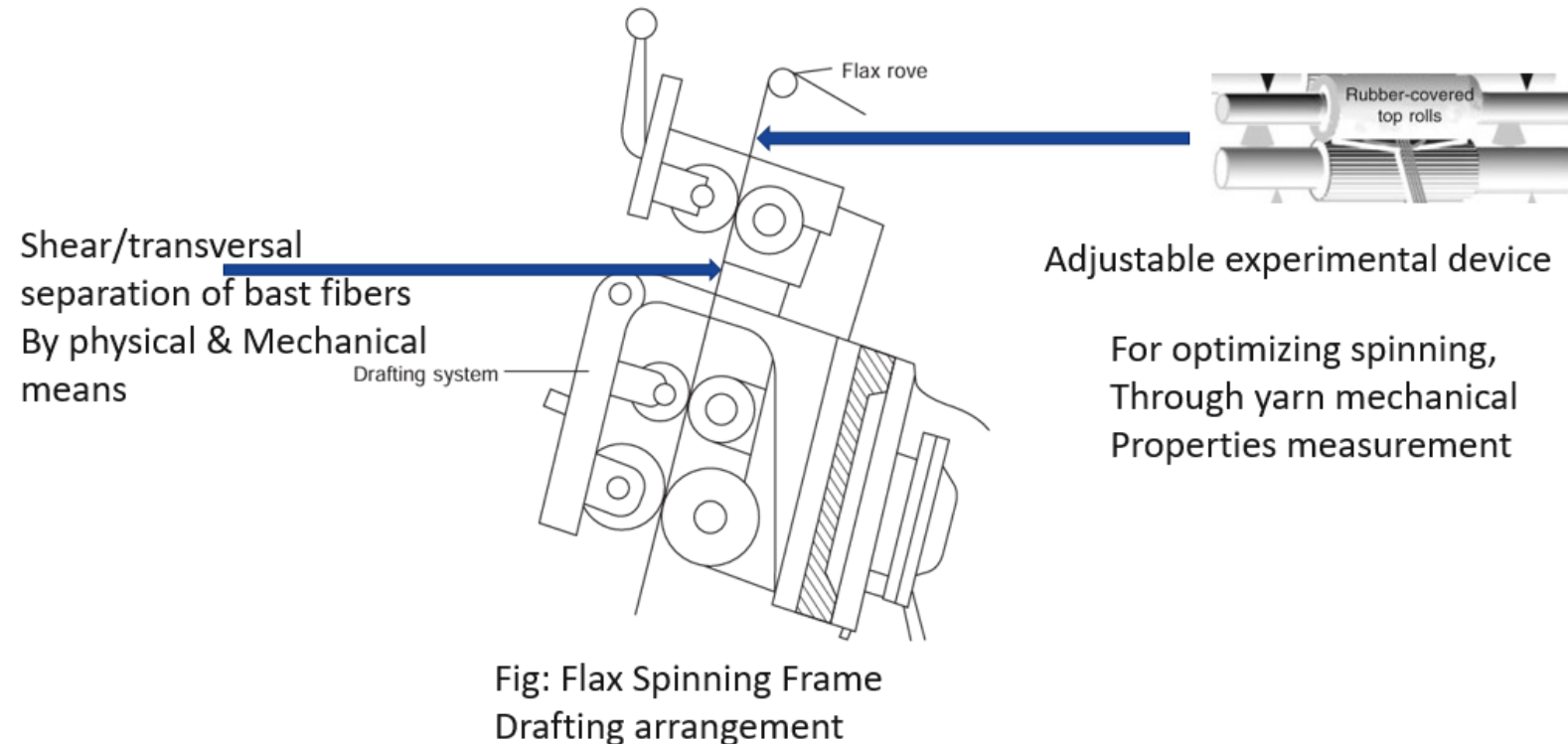
Importance de la caractérisation physique et mécanique

Thèse H. ZUBAIR (en cours)

Étude et modélisation des modifications des fibres libériennes lors des étirages

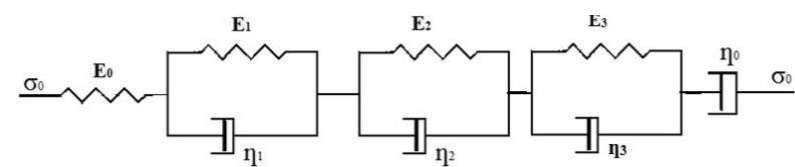
Objectifs: comprendre l'évolution morphologique des fibres lors des différentes étapes d'étirage, modélisation des phénomènes observés.

➡ Développement de cylindres spécifiques pour séparer les fibres

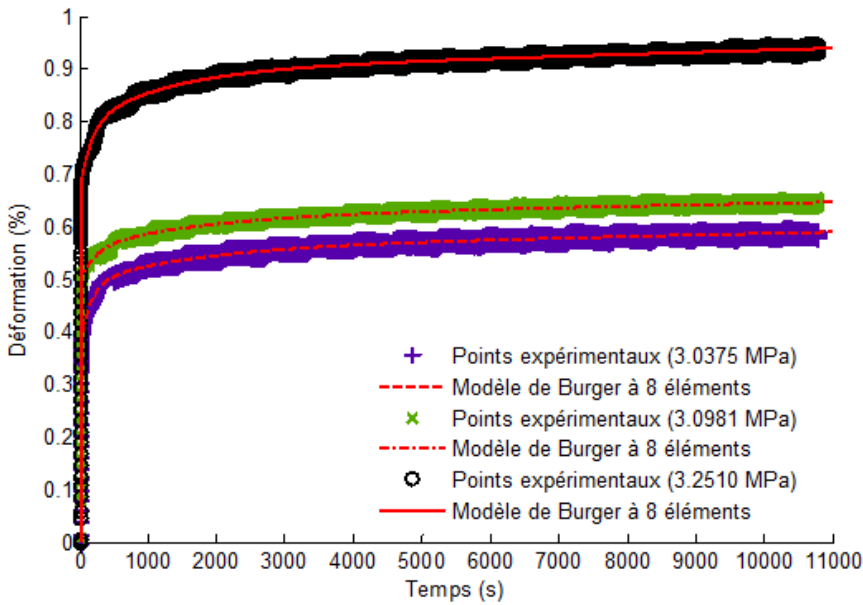


Importance de la caractérisation physique et mécanique

Modélisation du comportement des fibres de Raphia Vinifera L



$$a = \frac{\sigma}{E_0}, b = \frac{\sigma}{\eta_0}, c_i = \frac{\sigma}{E_i}, d_i = \frac{1}{\tau_i} \text{ et } \tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$$



Nom du modèle rhéologique	Expression du modèle	Références
Maxwell	$\varepsilon(t) = a + bt$	Morton et Hearle (2008)
Kelvin	$\varepsilon(t) = c_1(1 - e^{-d_1t})$	Morton et Hearle (2008)
Zener	$\varepsilon(t) = a + c_1(1 - e^{-d_1t})$	
Burger à 4 éléments	$\varepsilon(t) = a + bt + c_1(1 - e^{-d_1t})$	Yanjun <i>et al.</i> , (2011)
Burger à 6 éléments	$\varepsilon(t) = a + bt + c_1(1 - e^{-d_1t}) + c_2(1 - e^{-d_2t})$	Yanjun <i>et al.</i> , (2011)
Burger à 8 éléments	$\varepsilon(t) = a + bt + c_1(1 - e^{-d_1t}) + c_2(1 - e^{-d_2t}) + c_3(1 - e^{-d_3t})$	Yanjun <i>et al.</i> , (2011)
Loi de puissance	$\varepsilon(t) = mt^n$	Yanjun Xu <i>et al.</i> , 2010
Loi de puissance de Findley	$\varepsilon(t) = k + mt^n$	Yang <i>et al.</i> , 2006 ; Yanjun Xu <i>et al.</i> , 2010

Type de modèle	a	b	c ₁	d ₁	c ₂	d ₂	c ₃	d ₃	k	m	n	R ²
Maxwell	0,00544	1,7x10 ⁻⁵										0,695
Kelvin			0,00612	0,7203								0,1944
Zener	0,0046		0,00213	0,0546								0,9846
Loi de puissance										0,0045	0,093	0,9887
Loi de puissance de Findley									0,00065	0,00391	0,1021	0,9873
Burger à 4 éléments	0,0045	8,87x10 ⁻⁶	0,0017	0,0827								0,9903
Burger à 6 éléments	0,00445	1x10 ⁻⁵	0,00082	0,0931	0,00082	0,0931						0,9905
Burger à 8 éléments	0,00447	9,35x10 ⁻⁶	0,00056	0,088	0,00056	0,088	0,00056	0,088				0,991

**Caractériser, c'est comprendre la diversité du matériau.
Modéliser, c'est donner un sens à cette variabilité pour prédire et concevoir.**