

# *LES FILIÈRES LIN ET CHANVRE AU COEUR DES ENJEUX DES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS ÉMERGENTS*



Brigitte Chabbert



UMR Fractionnement des Agro-Ressources et Environnement, Reims

# Sommaire

## **1- Contexte**

### **2- Le lin et le chanvre:**

Cultures multi-usages, atouts agronomiques

Production en France

Culture

### **3- Les fibres de lin et de chanvre:**

Les fibres végétales

Les fibres de lin et de chanvre

Structure des parois, composition

### **4- Transformation des pailles: Rouissage**

Rouissage

Evolution des pailles

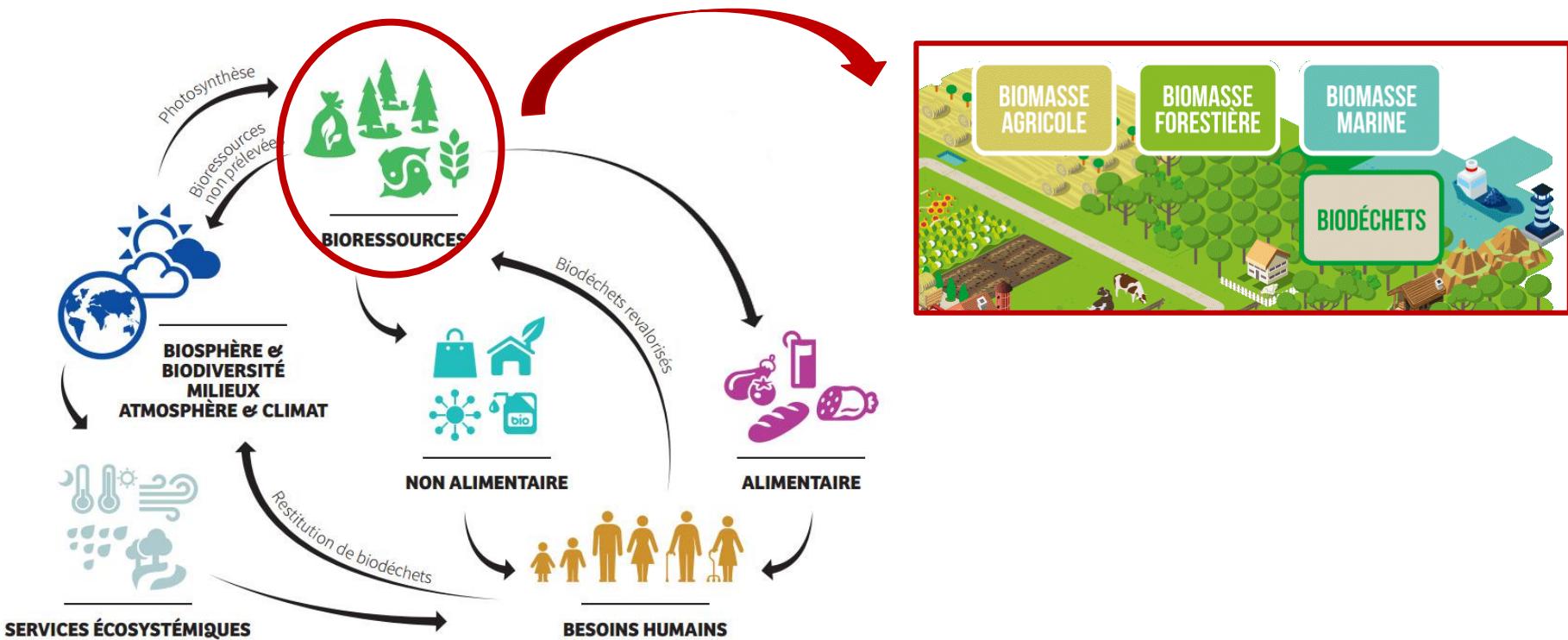
Modifications biochimiques

Propriétés physicochimiques

# 1 - Contexte

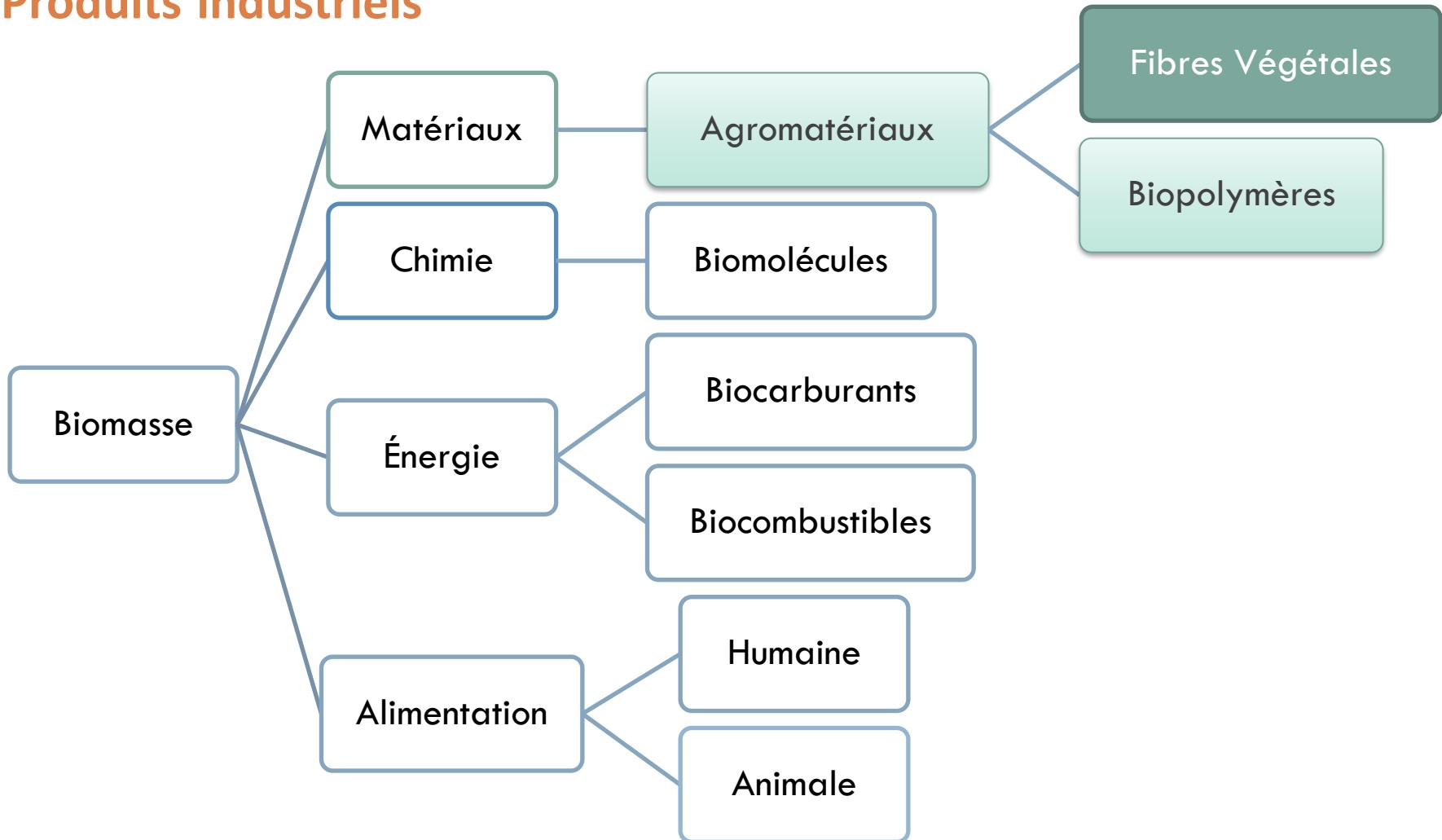
## La bioéconomie :

Activités liées à la production, à l'utilisation et à la transformation de bioressources, pour répondre de façon durable aux besoins alimentaires et à une partie des besoins matériels et énergétiques de la société, et à lui fournir des services écosystémiques



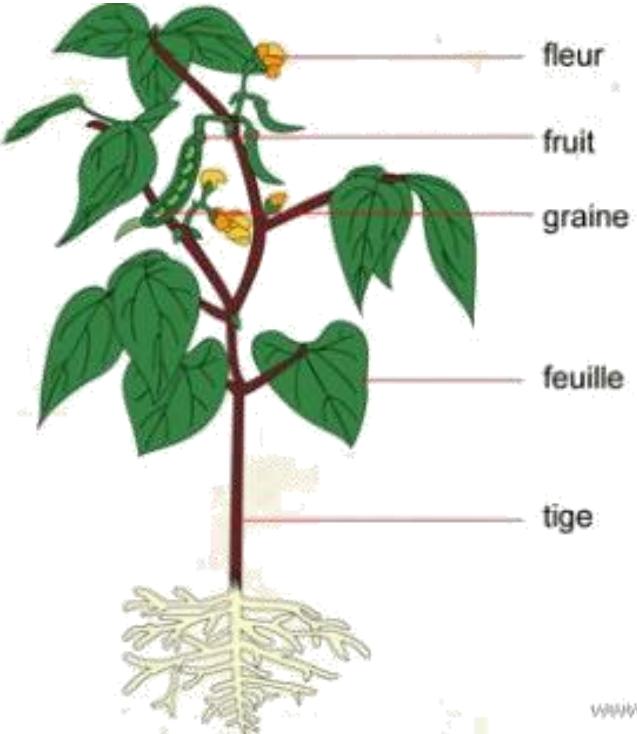
# 1- Contexte

## Produits industriels



# Les différentes fibres végétales (hors bois)

## Fibres végétales



### Dicotylédones

### Graine

Coton  
Kapok

Tige

Lin  
Chanvre  
Jute  
Kénaf  
Ramie  
Ortie

### Monocotylédones

Tige

Bambou

Fruit

Noix de coco

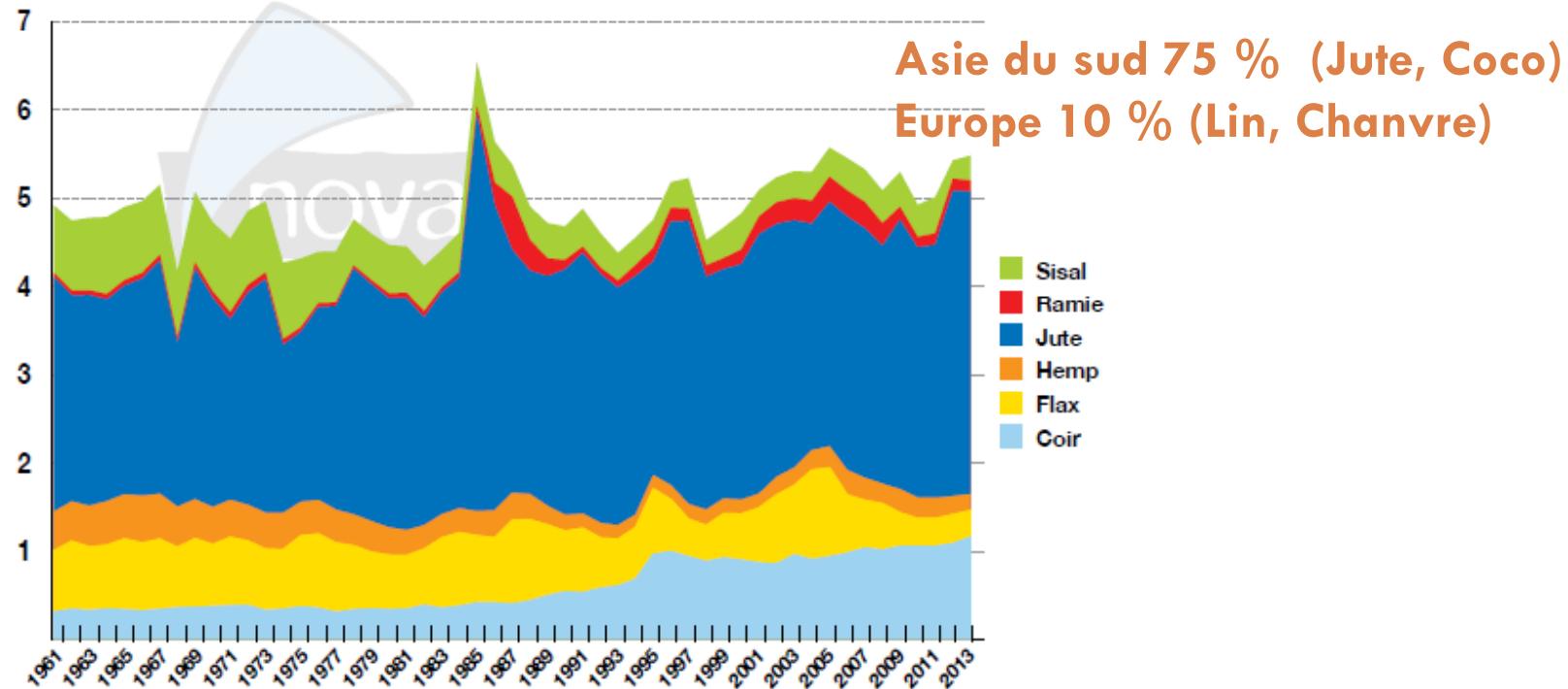
Feuille

Abaca

Sisal

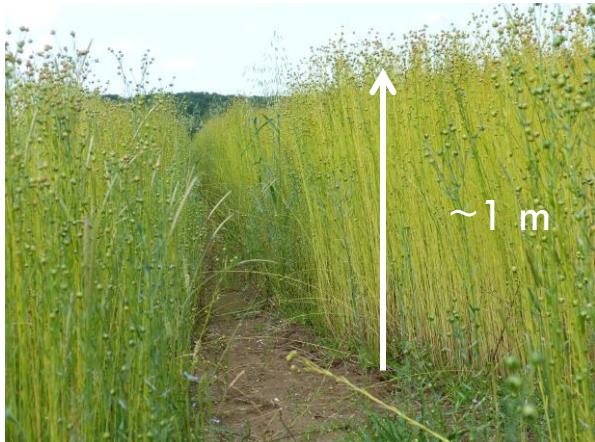
# Fibres végétales: production (hors bois et coton)

Worldwide production of natural fibres 1961–2013\*  
(in million tonnes)



## 2. Le lin et le chanvre

Principales cultures dédiées à la production de fibres végétales en France



Lin

*Linum usitatissimum*

Plantes herbacées annuelles (Angiospermes dicotylédones)



Chanvre

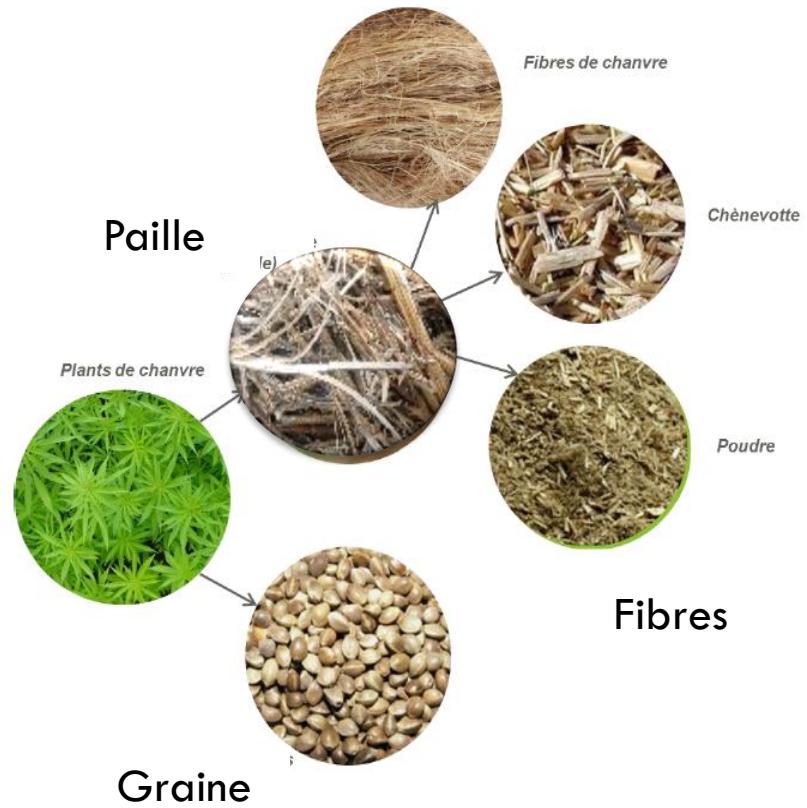
*Cannabis sativa L.*

# Lin et chanvre : cultures multi-usages

Lin



Chanvre



# Lin et chanvre : production en France

## La France : principal producteur européen de fibres de lin et de chanvre

(1er producteur mondial de fibres longues de lin, 2ème producteur de chanvre)

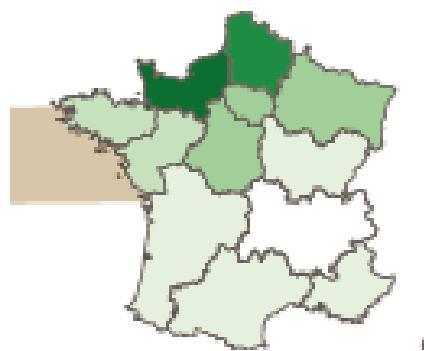
### Surfaces cultivées (ha) 2021-2023

Chanvre industriel

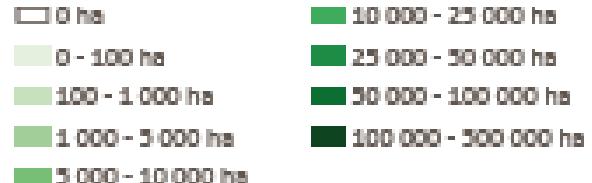


20 000 ha/an

Lin fibre



120 000 ha/an



### Rendement

paille théorique 7,1 t/ha

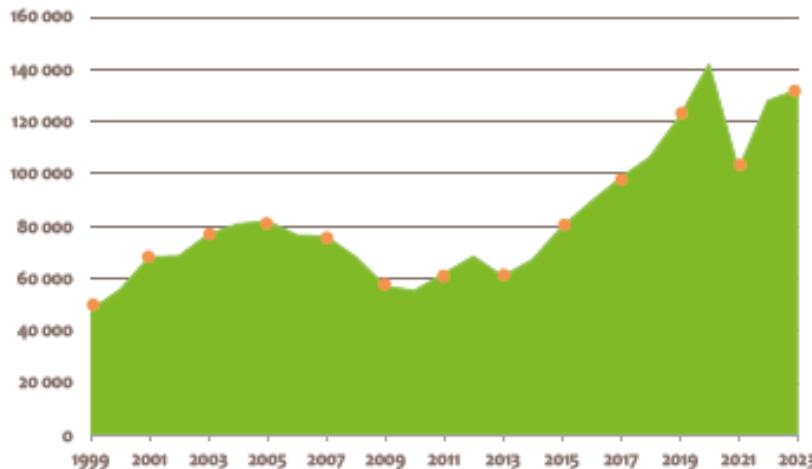
4,8 t/ha

# Lin et chanvre : production en France

**Surfaces cultivées lin fibre et chanvre = 0,4% surface agricole utile (SAU)**

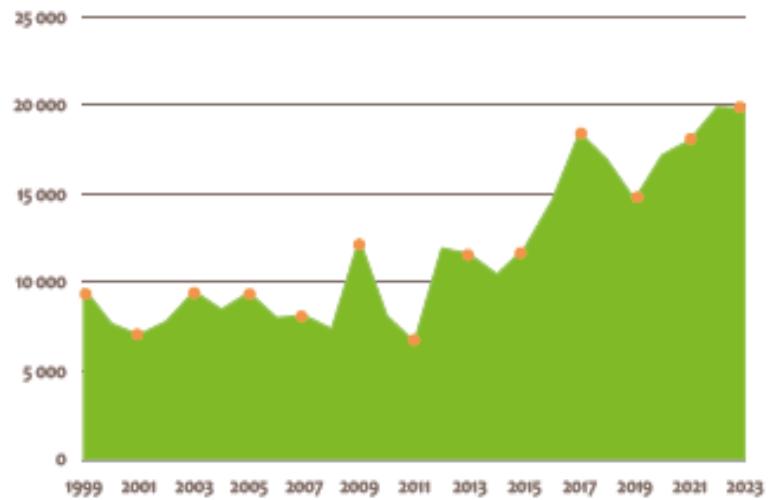
**Augmentation des surfaces cultivées en lin et chanvre**

**Lin**



Evolution des surfaces (ha) 1999 - 2023 (Source : Agreste)

**Chanvre**



Evolution des surfaces (ha) 1999 - 2023 (Source : Agreste)

# Culture des plantes à fibres - Lin et chanvre

## Cultures à croissance rapide



## Atouts agronomiques

- Un apport d'engrais limité
- Peu ou pas de produits phytosanitaires
- Des cultures économies en eau

# Culture des plantes à fibres - Lin et chanvre

## Récolte

**Lin:** Arrachage au stade formation de la graine (mi-Juillet)



## Chanvre

- Fauchage au stade pleine floraison pour la fibre (**mode non battu**)
- Fauchage à maturité de la graine pour les graines et les fibres (**mode battu**)



## Rouissage au champ

→ facilité séparation fibres/bois (2 semaines à 6 semaines)

**Enroulage:** pressage de la paille en balles (taux d'humidité < 15 %)



# 3- Les fibres de lin et de chanvre

## Fibres végétales

Définition (*botanique*) :

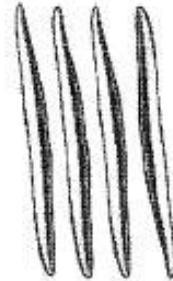
«**Une fibre végétale** est une **expansion morte** qui est principalement composée de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de pectine. Elle est soit **isolée** soit **regroupée** avec d'autres fibres pour former **un faisceau**.

**Fibre unitaire** = 1 cellule

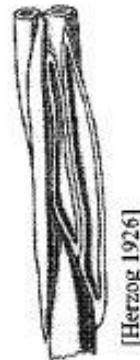
**Faisceau de fibres** = regroupement de cellules



Fibre  
unitaire

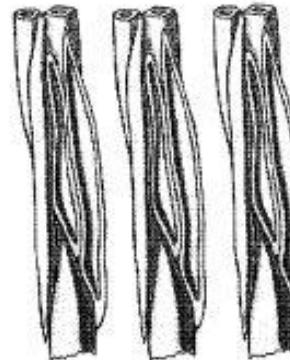


Regroupement  
de fibres  
unitaires



[Herzog 1926]

Faisceau de  
fibres

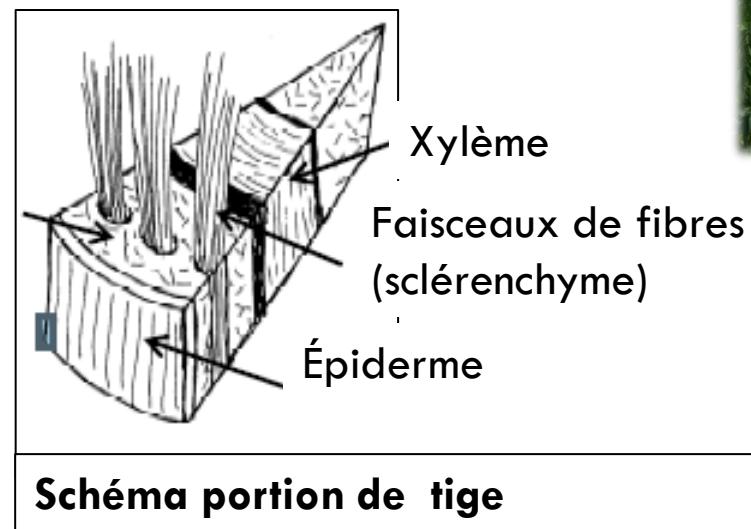
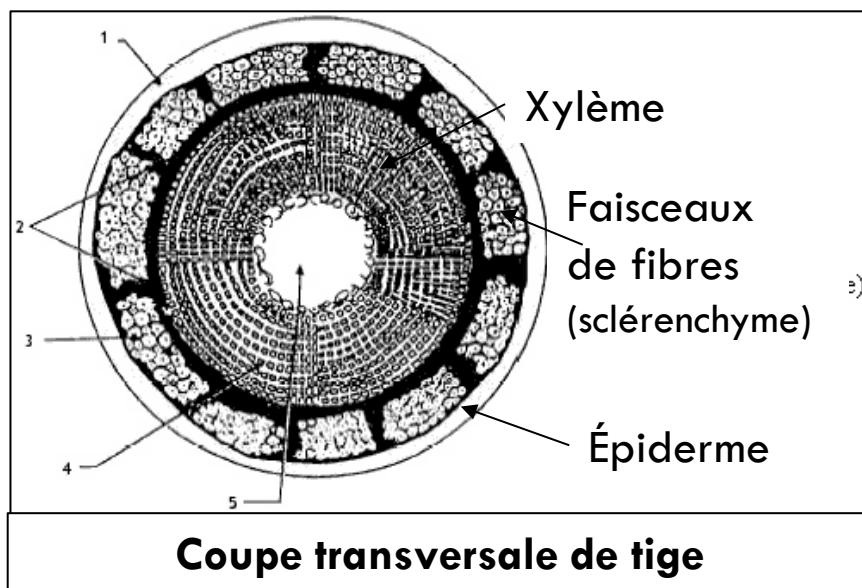


Regroupement  
de faisceaux de  
fibres

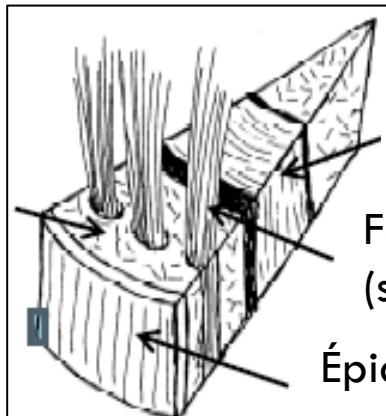
# Les fibres végétales de lin et de chanvre

La tige est constituée de 3 parties distinctes:

- L'épiderme (protection)
- Les fibres de sclérenchyme (soutien)
- Les tissus conducteurs (xylème, phloème)



# Fibres de lin et de chanvre



Xylème (partie interne: fibres courtes)

Faisceaux de fibres: fibres longues  
(sclérenchyme)

Épiderme, écorce

Schéma fraction de tige (lin , chanvre)

## Paille (tige)

- Fibres longues (partie externe)  
sclérenchyme

*Lin*

→ Fibres

*Chanvre*

Fibres

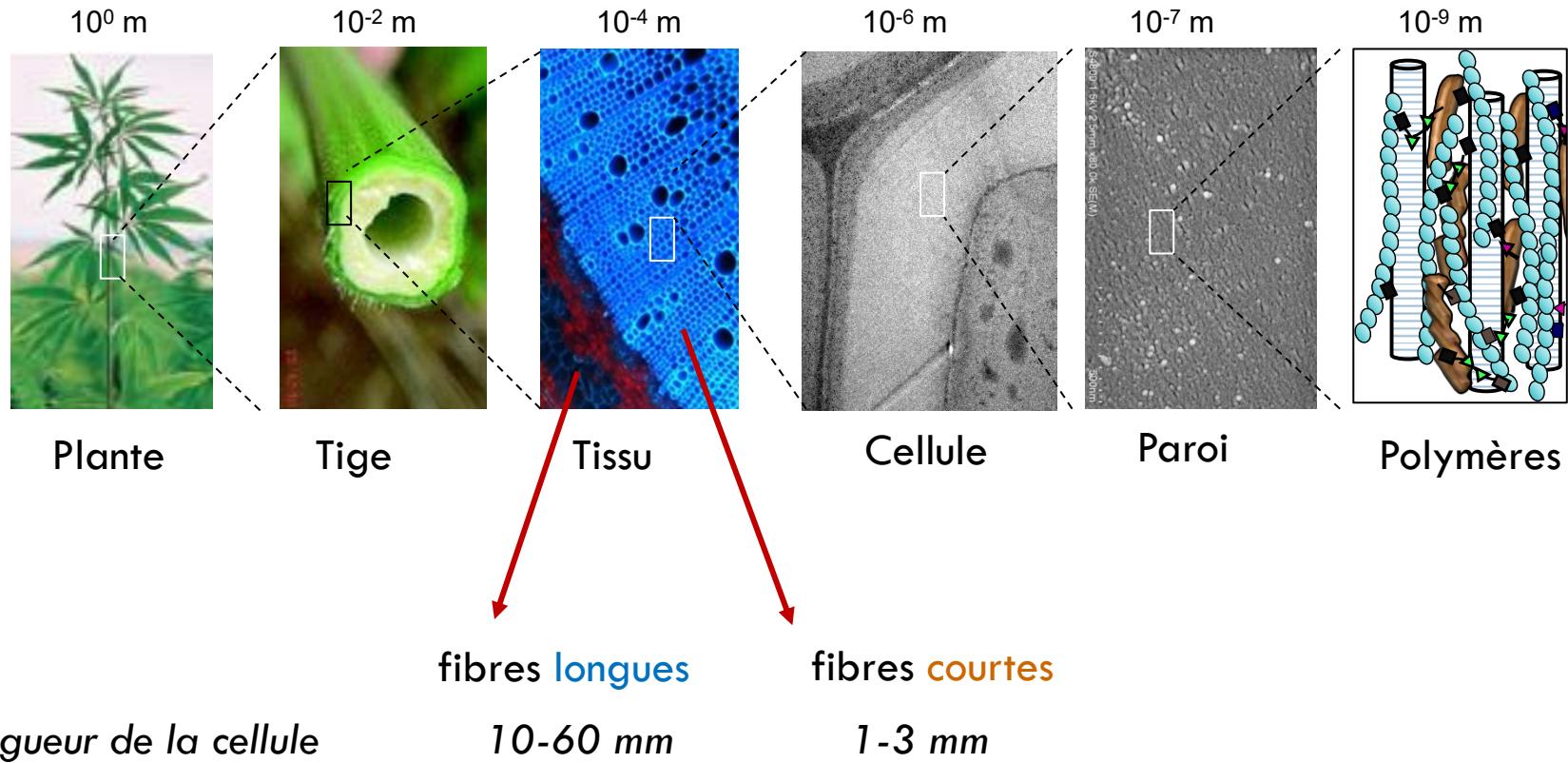
- Fibres courtes (partie interne)  
xylème

→ Anas

Chènevotte

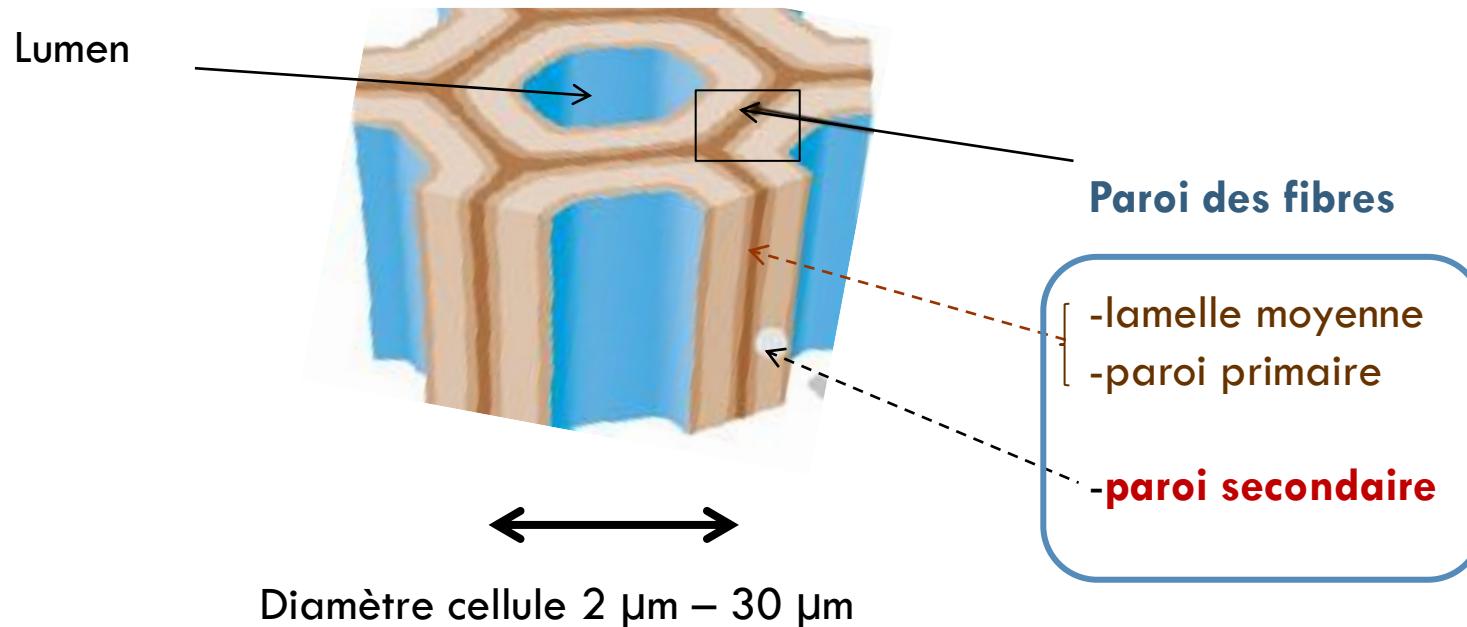
# Les fibres végétales

## De la plante à la structure des fibres : multiéchelles



# Structure des fibres végétales

Fibres végétales (sclérenchyme et xylème) = **Parois cellulaires**



**Les fibres végétales** sont principalement constituées de parois secondaires

# Constituants des fibres végétales

## *polymères majoritaires*

### Polysaccharides

Pectines  
Hémicellulose  
Cellulose  
Lignine

### Phénols

### Protéines

Prot. structurales  
Prot. enzymatiques

### Polyesters

Cutines  
Subérine

### Minéraux

calcium, silicium,...

### Eau



Caractéristiques communes

### MAIS

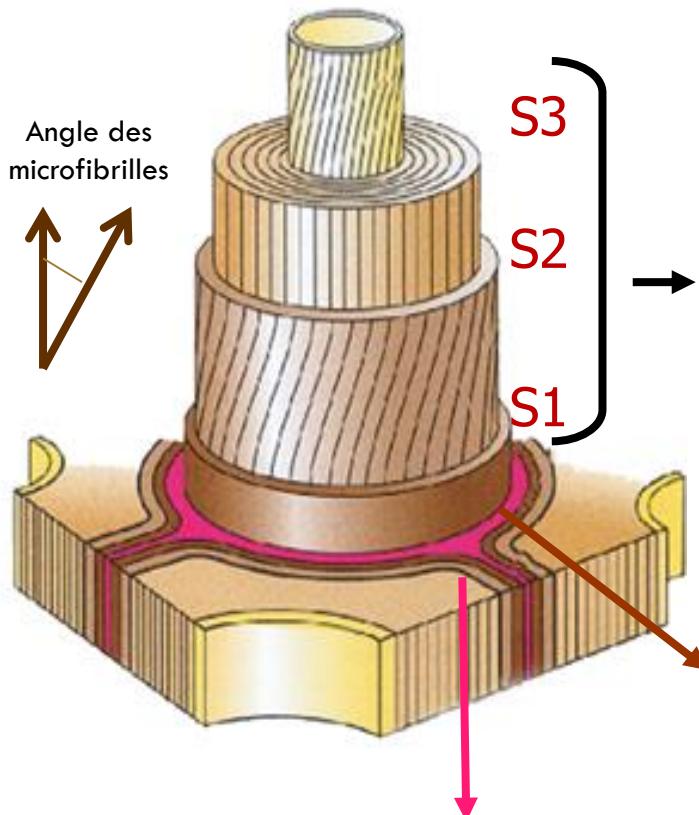
Teneur et composition très variable selon espèce botanique, type cellulaire, et physiologie



Polymères lipidiques associés à certaines cellules (épiderme) ou organe (racine)

# Architecture des fibres végétales

Fibres végétales = parois végétales : édifices pluristratifiés



**Armature cellulosique** (structure cristalline)

**Matrice de polymères amorphes**

pectine/hémicelluloses/lignine

**Paroi secondaire:**

- 3 sous-couches distinguées selon **orientation des microfibrilles de cellulose**
- Hémicelluloses -lignine

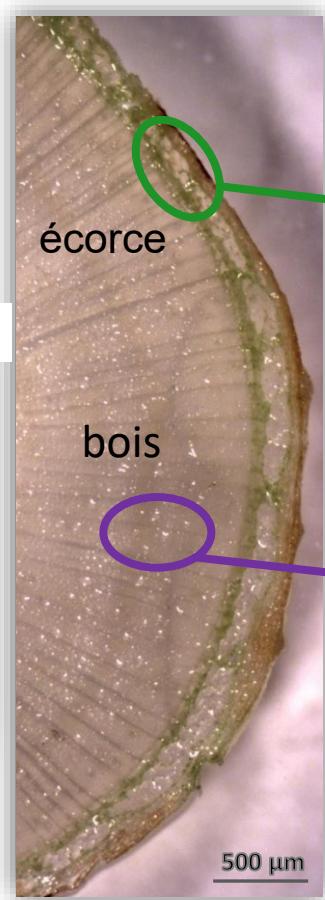
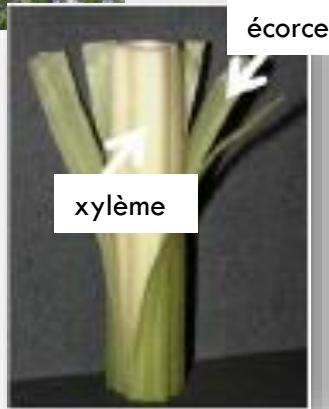
**Paroi primaire:**

Pectines – hémicelluloses - cellulose non orientée  
Lignines

Lamelle moyenne

- Pectines - lignines
- Responsable de la cohésion entre cellules

# Structure des fibres de lin et de chanvre

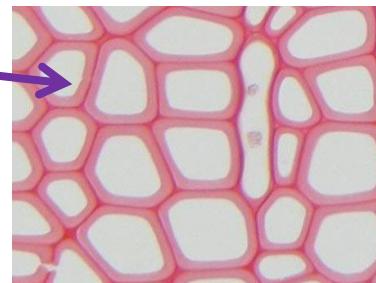


Deux types de fibres:



Sclérenchyme

Parois hypolignifiées  
Épaisseur (5-20µm)



Xylème

Parois lignifiées  
Épaisseur (1-2µm)

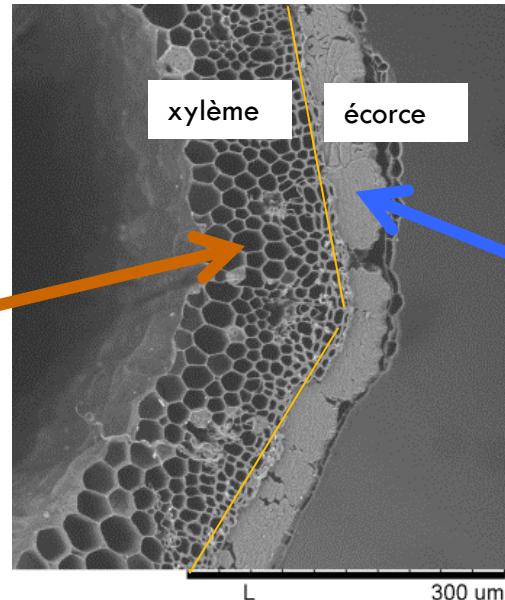
Coloration de la lignine  
au phloroglucinol/HCl (couleur rouge)

# Composition des fibres de lin et de chanvre

Deux types de fibres

Fibres du xylème

Fibres courtes  
lignifiées



Sclérenchyme

Fibres longues  
peu lignifiées



Exemple: Lin	Longueur des fibres (mm)	Epaisseur des Parois ( $\mu\text{m}$ )	Cellulose %	Lignine %	Polysaccharides non cellulosiques % (hémicelluloses, pectines)
sclérenchyme	10-60	5-10	80	2-3	10
xylème	1-3	1-2	40-50	20-25	25-35

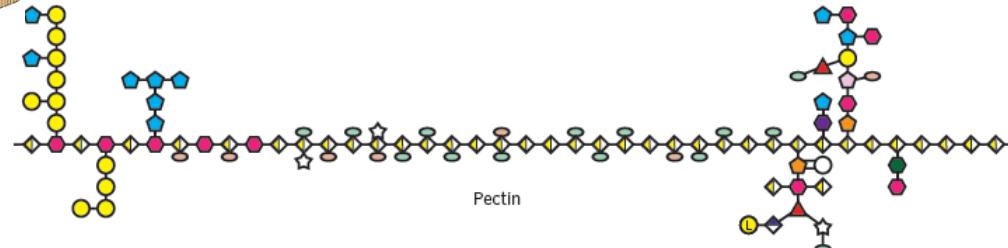
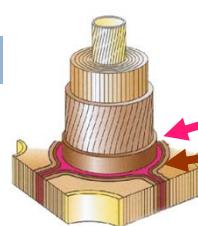
# Pectines: principal constituant du ciment interfibres

(→ lamelle moyenne/paroi primaire)

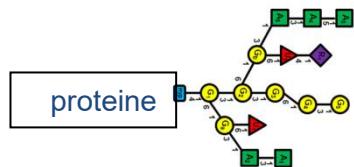
## Pectines

Homogalacturonanes

Rhamnogalacturonanes

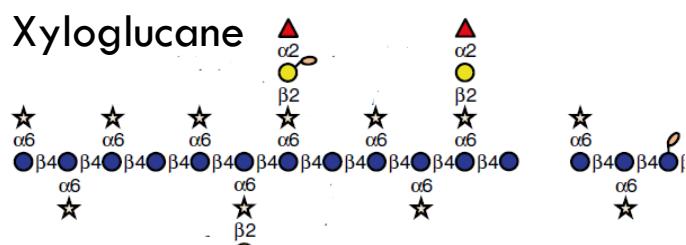


## Arabinogalactane protéines



## Hemicelluloses (paroi primaire)

### Xyloglucane



● D-Glucose (GlcP)

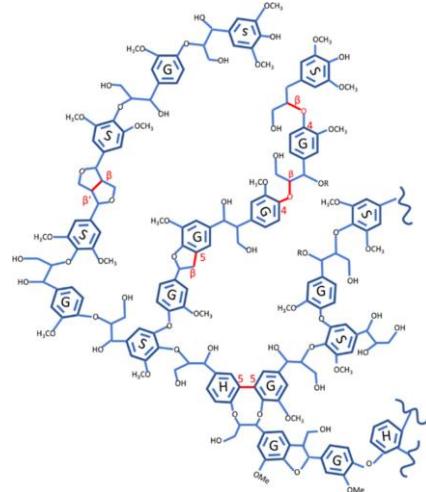
○ D-Galactose (GalP)

▲ L-Fucose (FucP)

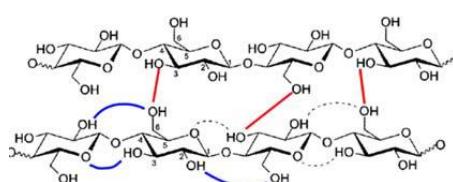
★

★ L-Arabinose (AraP)

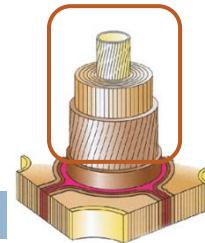
## Lignine (polymère phénolique)



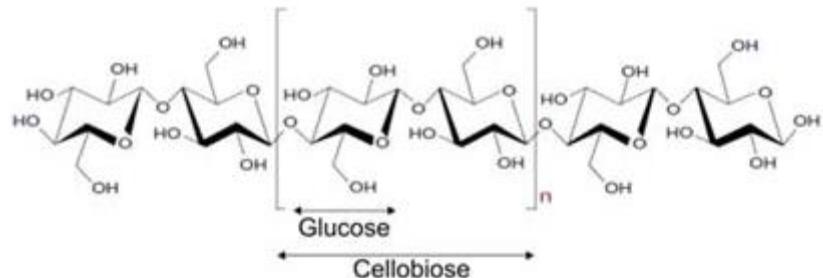
## Cellulose (paroi primaire)



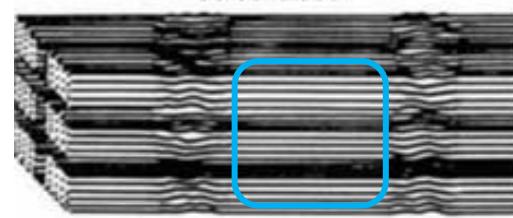
# Cellulose: principal constituant des fibres (→ paroi secondaire)



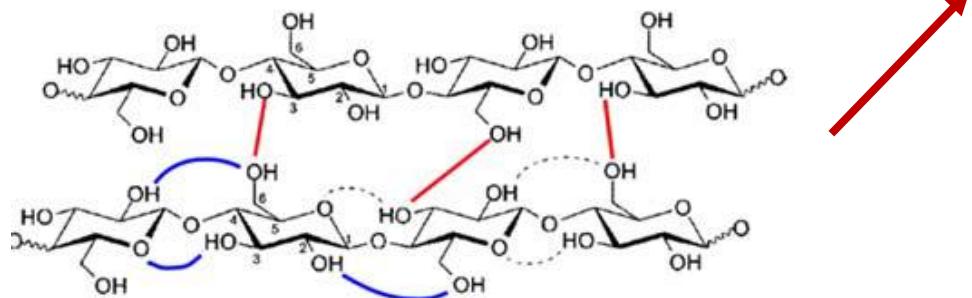
- Structure de la cellulose : polymère de glucose semi cristallin



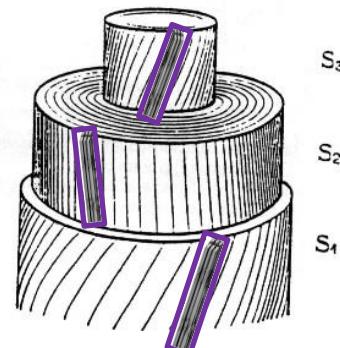
Microfibrilles de cellulose



Interactions non covalentes entre les chaînes



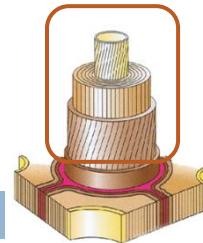
Structure cristalline



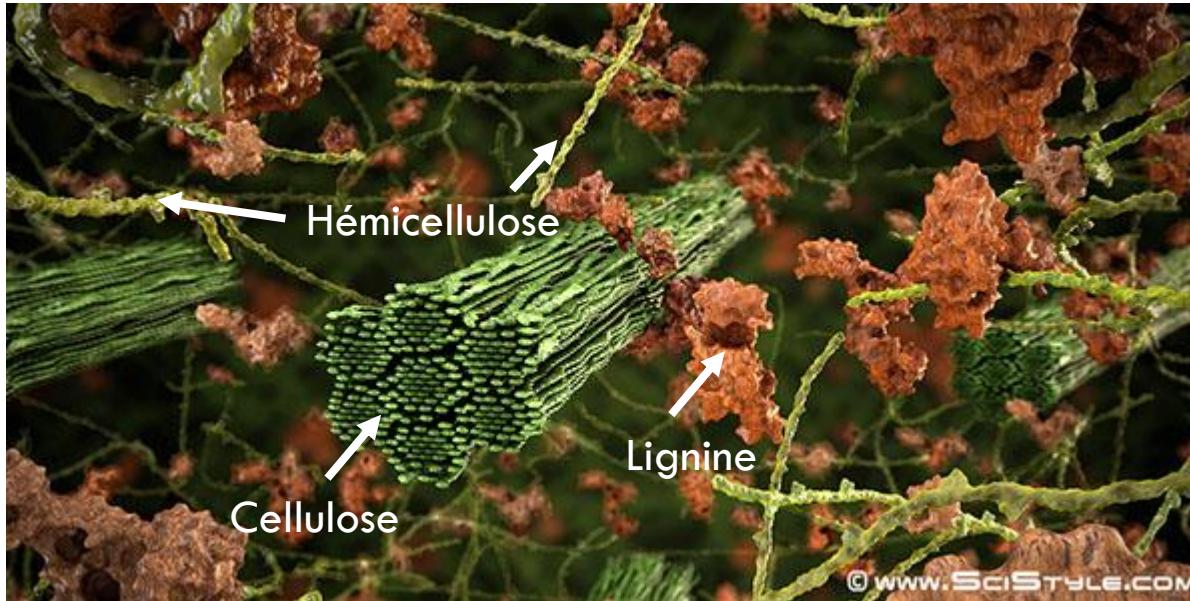
Paroi secondaire

- Variation structurale de la cellulose
- degré de cristallinité
  - degré de polymérisation
  - orientation des microfibrilles (angle des microfibrilles)

# Matrice de polymères amorphes (→ paroi secondaire)



- La cellulose est enrobée par une matrice de polymères amorphes

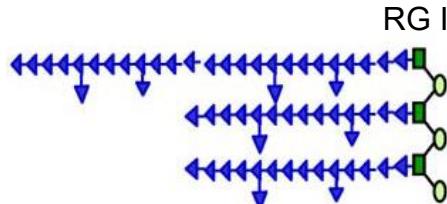


- La teneur et la structure des polymères amorphes varient selon le type tissulaire et cellulaire (sclérenchyme/xylème)

# Polymères amorphes

## Pectines

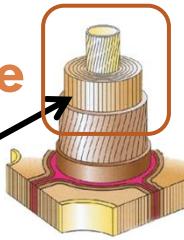
(Rhamnogalacturonanes substitués par des galactanes)



Parois secondaire  
sclérenchyme

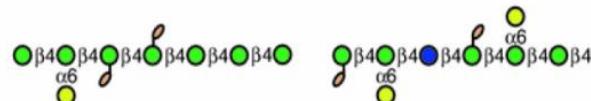
(fibres longues)

500 µm



## Hemicelluloses

### Mannane



- D-Glucose (GlcP)
- D-Galactose (GalP)
- D-Mannose (ManP)
- Acetate

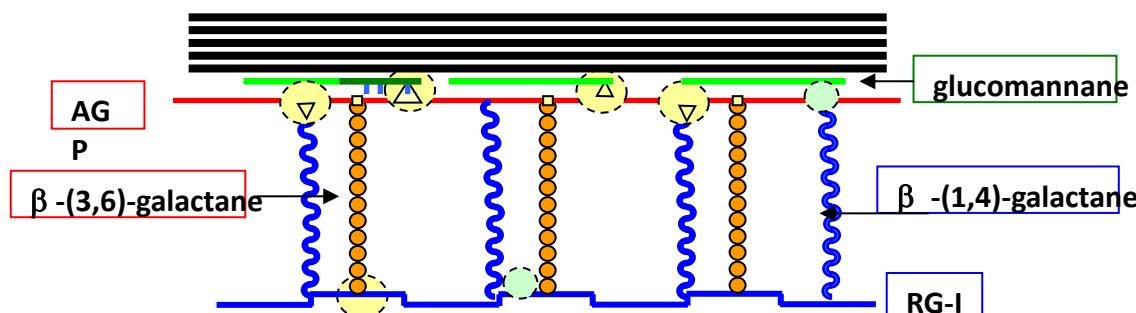
## Arabinogalactane protéines

Total polymères amorphes ~ 20%

## Interactions interpolymères

- Liaisons non covalentes  
cellulose/ galactane, mannane)

- Liaisons covalentes et non  
covalentes interactions entre  
polysaccharides non cellulosiques et  
lignines

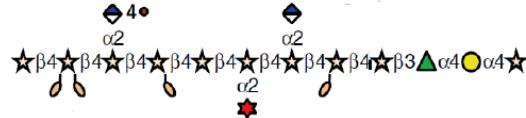


Morvan et al, 2004, Tan et al 2010; Mellerowitz and Gorshkova 2013

# Polymères amorphes

## Hemicelluloses

### Glucuronoxylane



★ D-Xylose (Xylp)

★ L-Arabinose (Araf)

Ferulic Acid

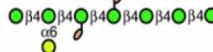
▲ L-Rhamnose (Rhap)

● Methyl

○ Acetate

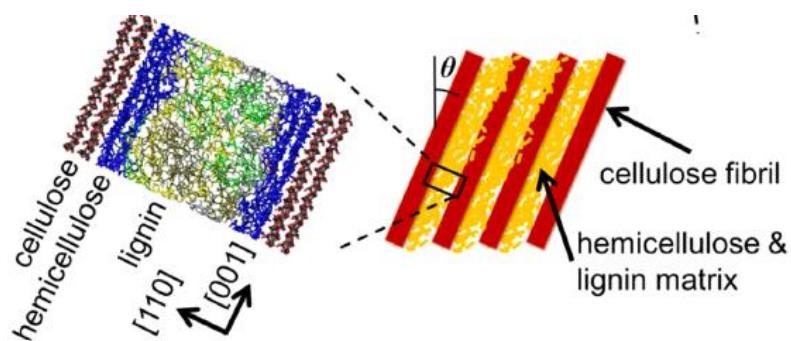
◆ D-Glucuronic Acid (GlcAp)

### Mannane



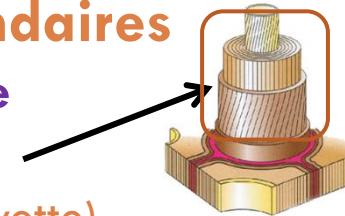
**Total polymères amorphes ~ 50%**

## Interactions interpolymères

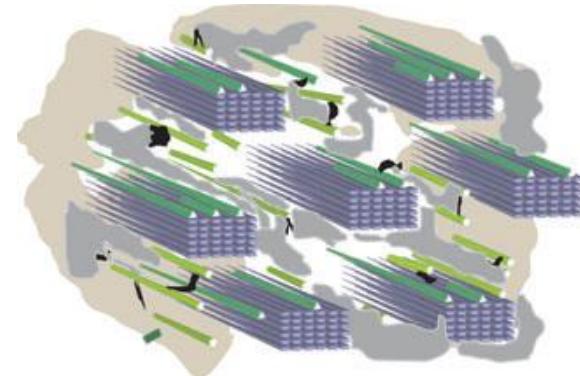
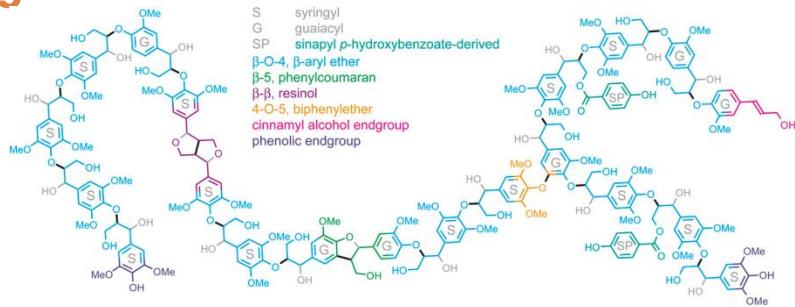


## Parois secondaires Xylème

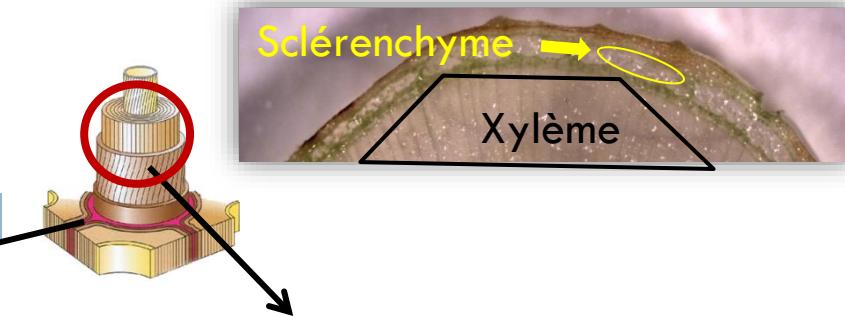
(anas, chénevotte)



## Lignine



# Polymères amorphes



## Parois primaires

### Xylème ET sclérenchyme

(Fibres courtes et fibres longues)

### Pectines

Homogalacturonanes

Rhamnogalacturonanes

### Proteines de structure

Arabinogalactane protéine

### Hemicellulose

Xyloglucane

### Lignine

Polymère phénolique

## Parois secondaires

### Xylème

Fibres courtes

### Sclérenchyme

Fibres longues

### Pectines

Rhamnogalacturonanes

### Proteines de structure

Arabinogalactane protéine

### Hemicellulose

Glucomannane

### Hemicellulose

Xylane

### Lignine

Polymère phénolique

# 4- Transformation des pailles



Récolte



Rouissage



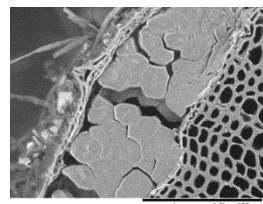
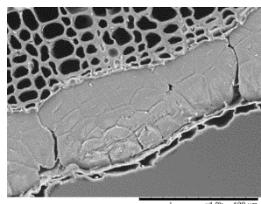
Stockage



Extraction



teillage



Fibres

Composite

Papier

Textile

## Rouissage

- Dissociation des tissus de la tige (écorce/bois)
- Facilite l'extraction mécanique des fibres longues



# Transformation des pailles: Rouissage

## Principales méthodes de rouissage

- **Rouissage en milieu aqueux**

Immersion des tiges dans l'eau (rivières, étangs ou des réservoirs)

Abandonné en Europe (Règlements environnementaux → contamination d'importants volumes d'eau)

Utilisation en Asie



- **Rouissage au champ (Europe)**



# Transformation des pailles: Rouissage

## Rouissage au champ

Après la récolte : Réalisation d'andain sur les terres de culture

Phénomène naturel: **Action combinée des microorganismes et des conditions climatiques** (ensoleillement, précipitations, rosée, ...)

**Retournements réguliers pour assurer l'homogénéité** et l'état d'avancement du processus



4-6 semaines

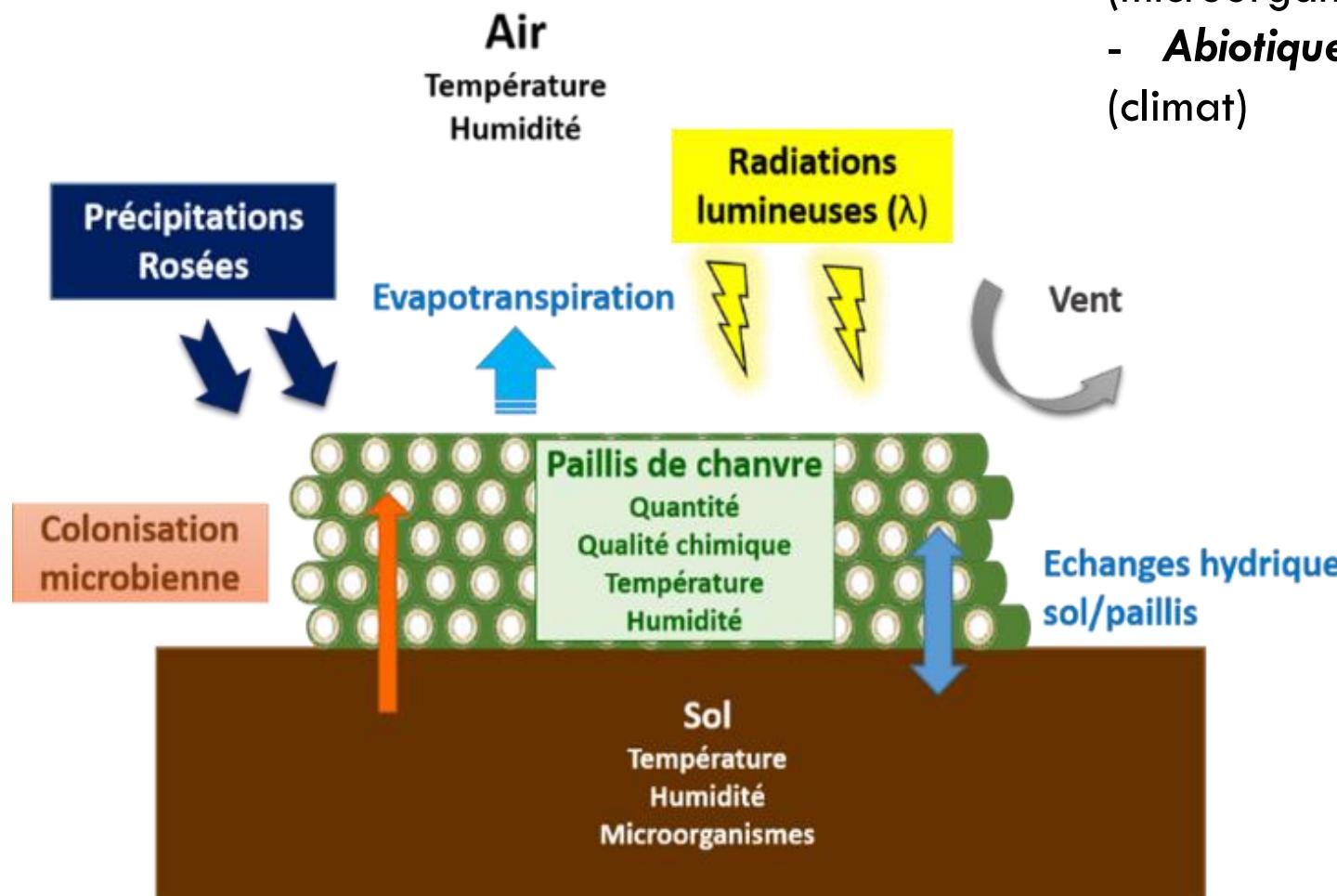


Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>Pas de besoins énergétiques externes (hors retournement)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Hétérogénéité de la qualité des fibres par rapport à d'autres types de rouissage</li><li>Phénomène difficilement maîtrisable car totalement climato-dépendant</li></ul>

# Transformation des pailles: Rouissage au champ

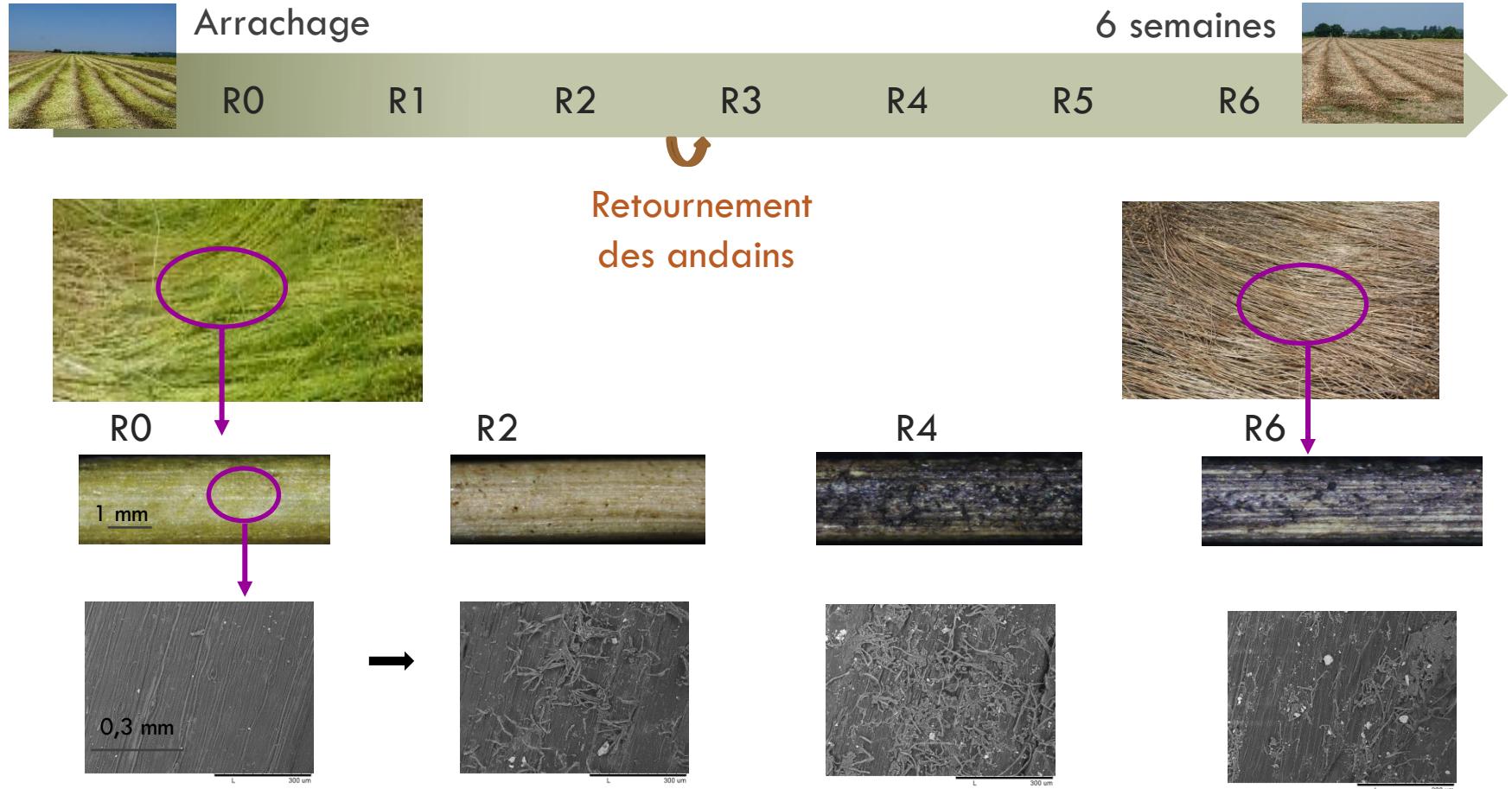
## Facteurs influençant le rouissage au champ

- **Biotiques**  
(microorganismes, plante)
- **Abiotiques**  
(climat)



# Transformation des pailles: Rouissage au champ

## Rouissage du lin

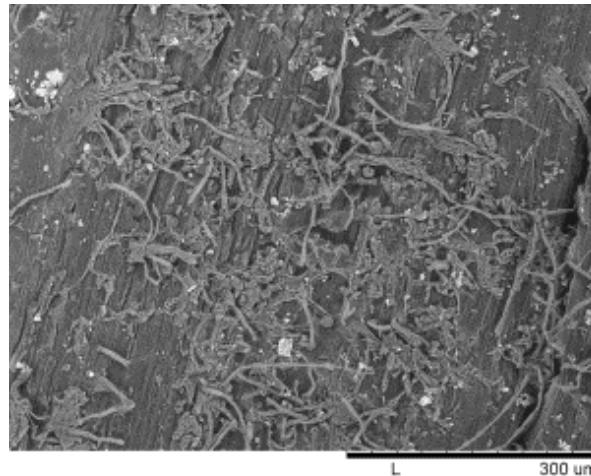


## Evolution des pailles de lin

changement de couleur, colonisation microbienne en surface des pailles

# Transformation des pailles: Rouissage au champ

## Microorganismes impliqués dans le rouissage au champ

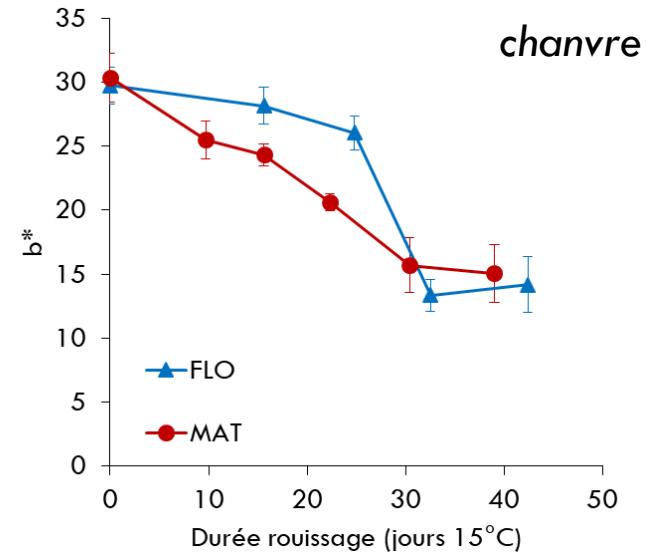
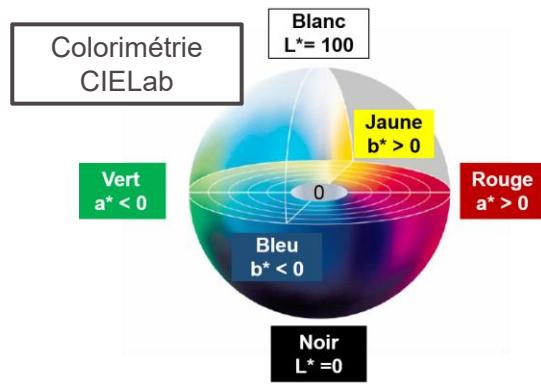


Observation de la surface des pailles rouies en microscopie électronique à balayage

- Microorganismes de la plante et surtout du sol (**aérobie/anaérobie**): Bactéries et Champignons
- Evolution de la diversité microbienne au cours du rouissage

# Transformation des pailles: Rouissage au champ

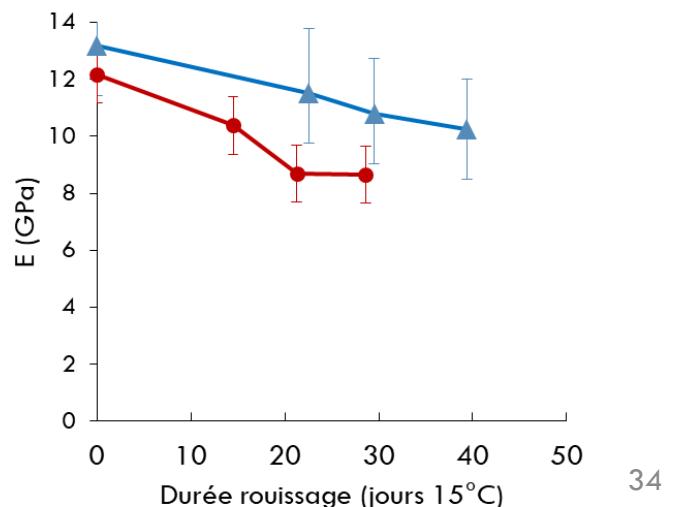
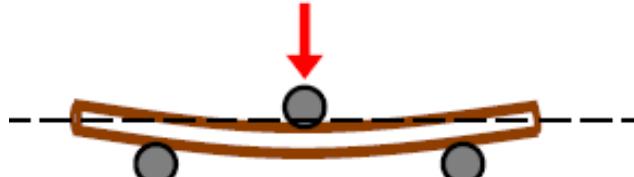
## ➤ Couleur des pailles



## ➤ Propriétés des pailles



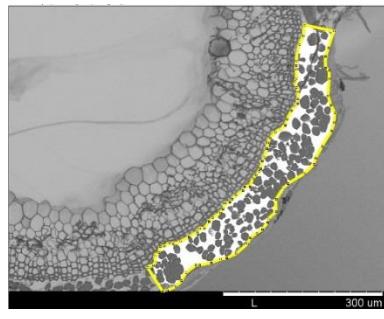
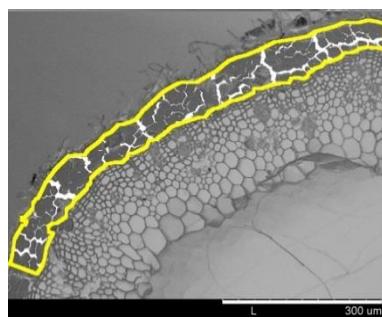
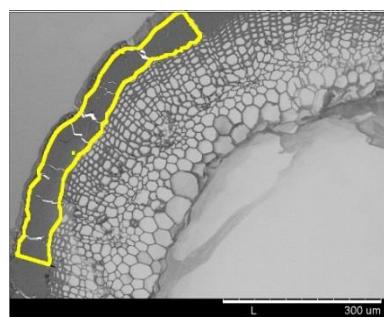
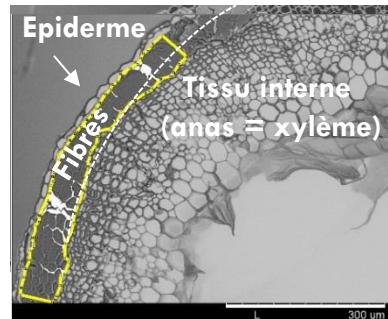
### Flexion 3-points



# Transformation des pailles: Rouissage au champ



Tige de lin  
Coupe transversale



Arrachage

2 semaines

4 semaines

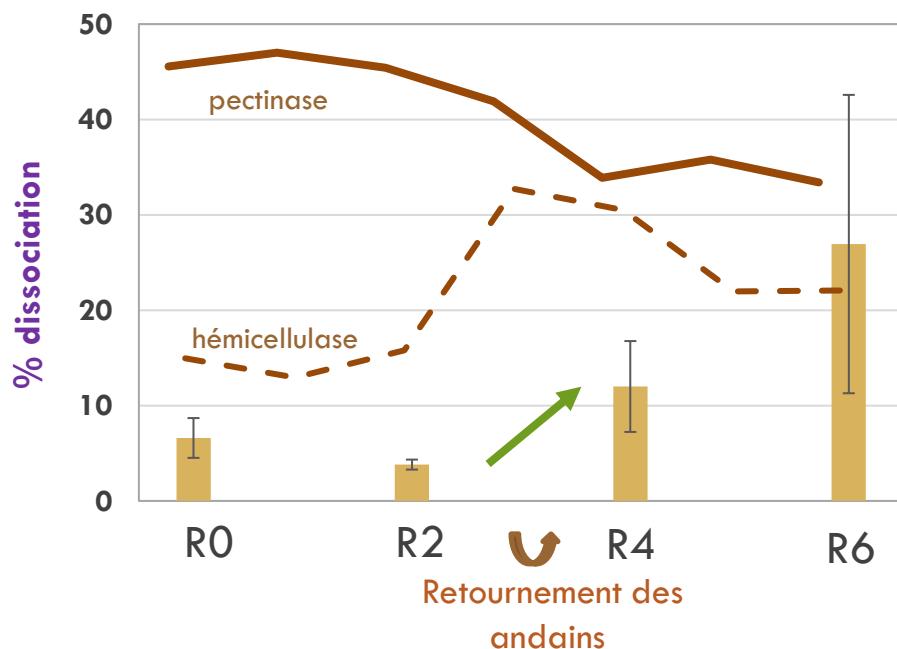
6 semaines

R0

R2

R4

R6



Pas de modification apparente du xylème

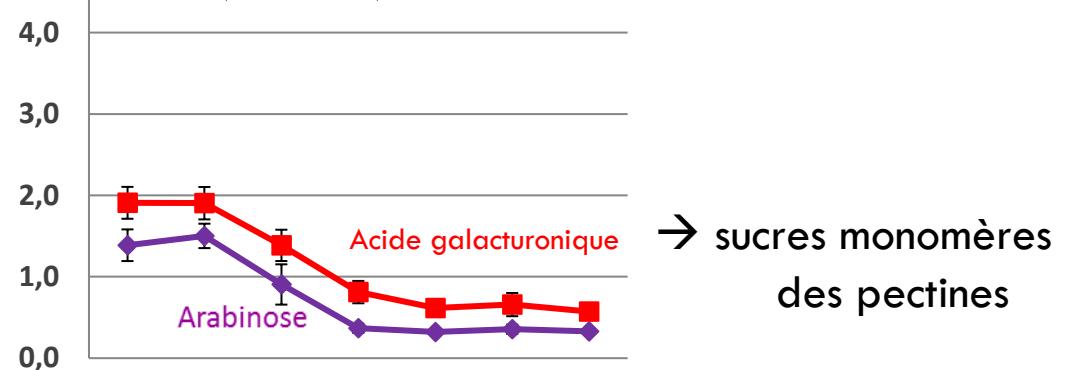
Dissociation des faisceaux de fibres après 4 semaines de rouissage

Succession des activités enzymatiques impliquées dans la dégradation des polysaccharides des parois

# Transformation des pailles: Rouissage au champ

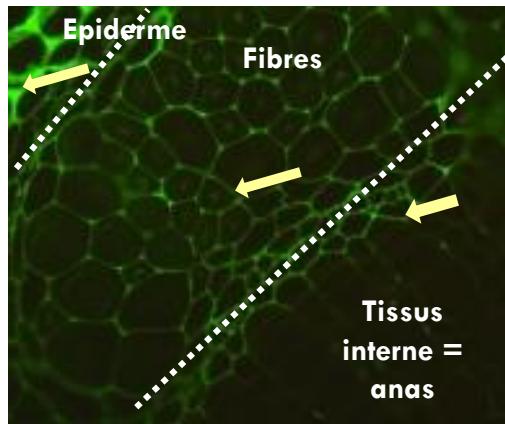
## Polysaccharides des tissus externes (écorce)

Composition en sucres monomères (% masse de paroi)

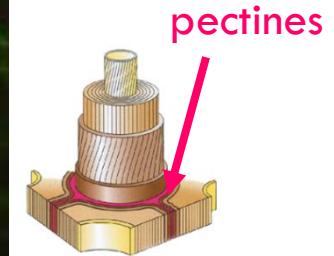
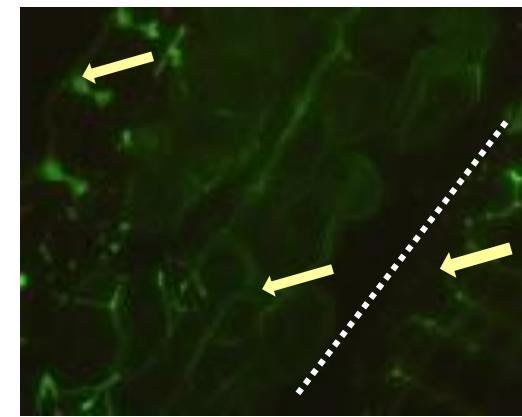


→ sucres monomères des pectines

## Immunomarquage des pectines (rhamnogalacturonanes)



2 semaines  
→

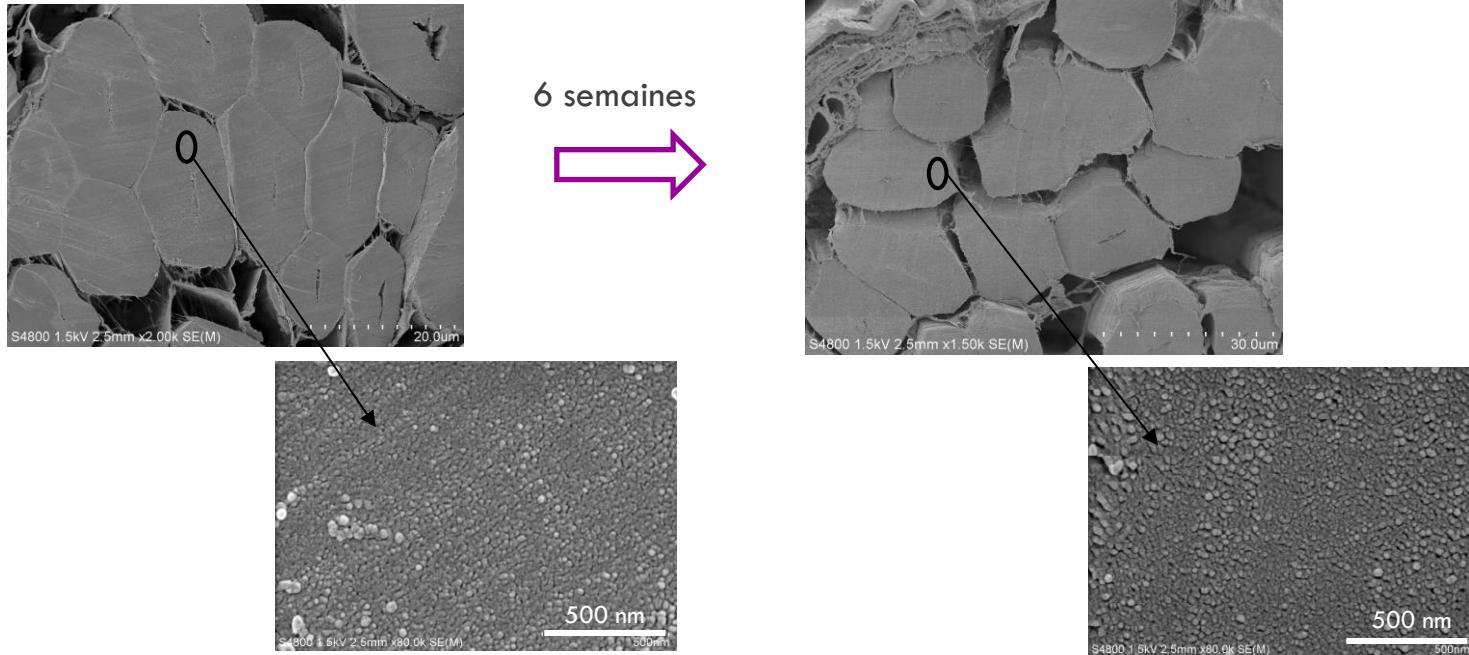


Les principales modifications chimiques sont attribuées aux **pectines** des parois primaire/lamelle moyenne:

Ciment inter fibres + cellules entourant les faisceaux (parenchyme)

# Transformation des pailles: Rouissage au champ

Préservation de l'ultrastructure des fibres longues (**parois secondaires**)



Observation des fibres longues en microscopie électronique à balayage

# Transformation des pailles: Rouissage au champ

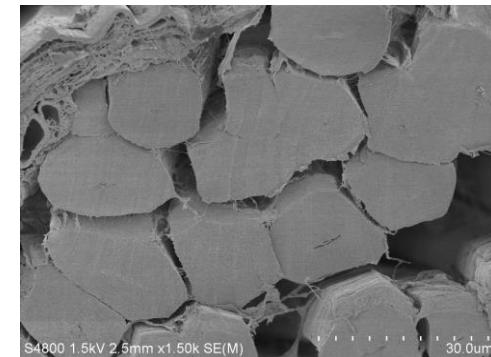
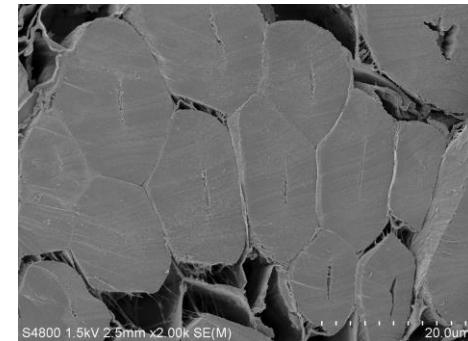
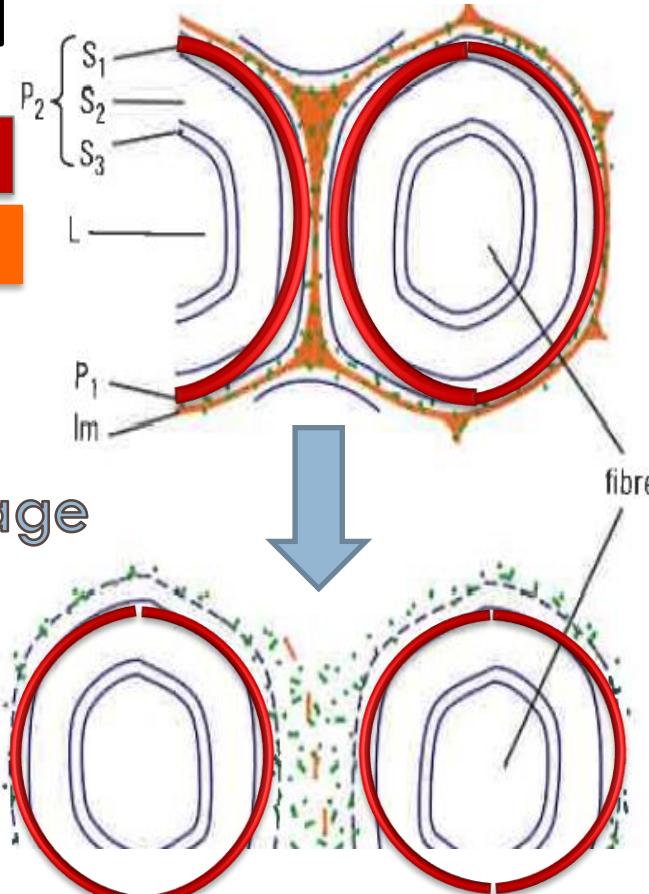
Paroi secondaire

Paroi primaire

Lamelle moyenne

Source : Le monde des fibres

Rouissage



## « Bon rouissage »

- Séparation des tissus de la tige (écorce/bois) dissociation inter et intrafaisceaux (dégradation paroi primaire/ lamelle moyenne: pectines/xyloglucanes)
- Préservation de la structure de la paroi secondaire des fibres longues
- Paille sèche au moment de la récolte

# Transformation des pailles: Rouissage au champ



Stockage



Extraction



Affinage

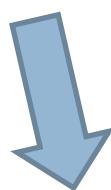
Fibres  
techniques



**Granulats**

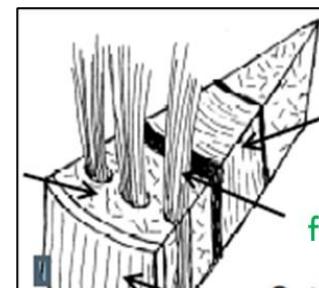
Lin: anas

Chanvre: chénevotte



**Fibres**

Fibres longues

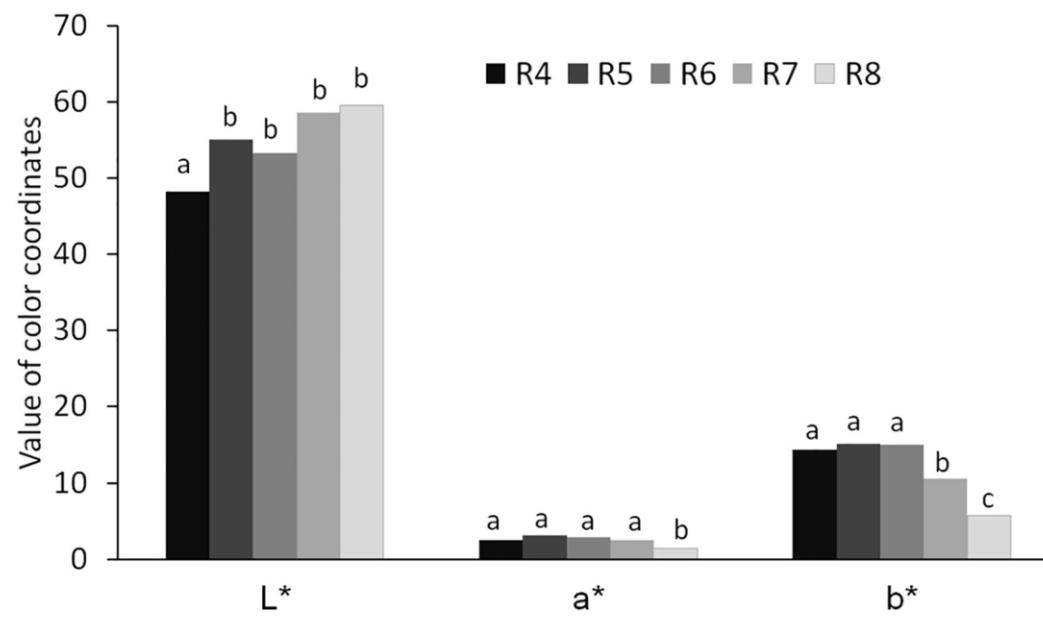
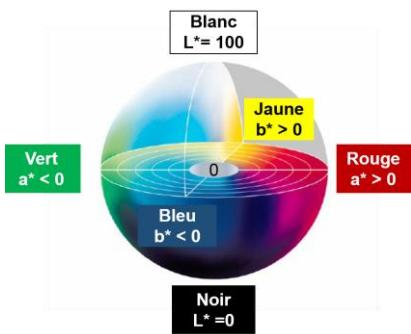


Anas , chénevotte  
(partie interne)

fibres: fibres longues

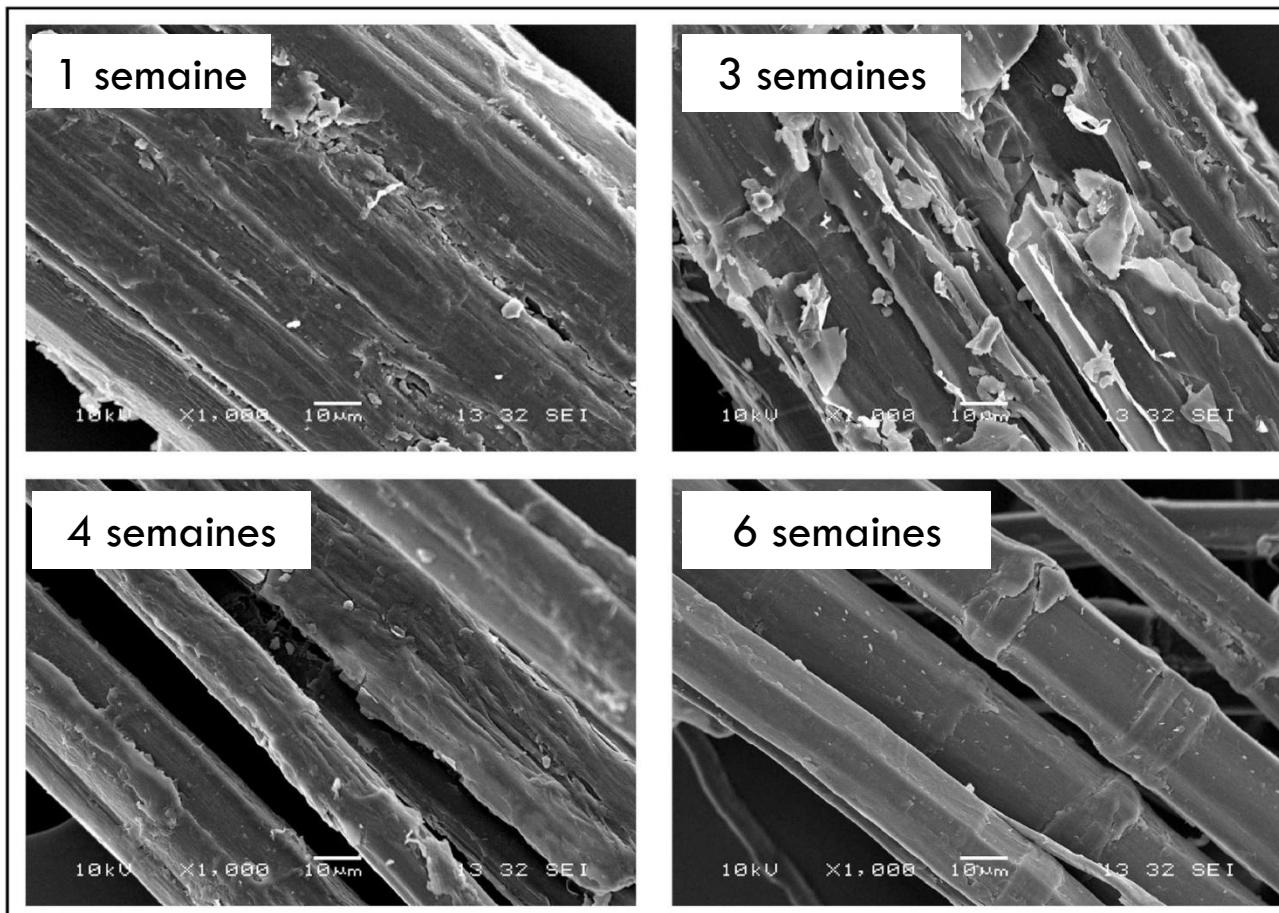
# Transformation des pailles: Rouissage au champ

## ➤ Couleur des fibres longues



# Transformation des pailles: Rouissage au champ

## ➤ Morphologie des fibres longues

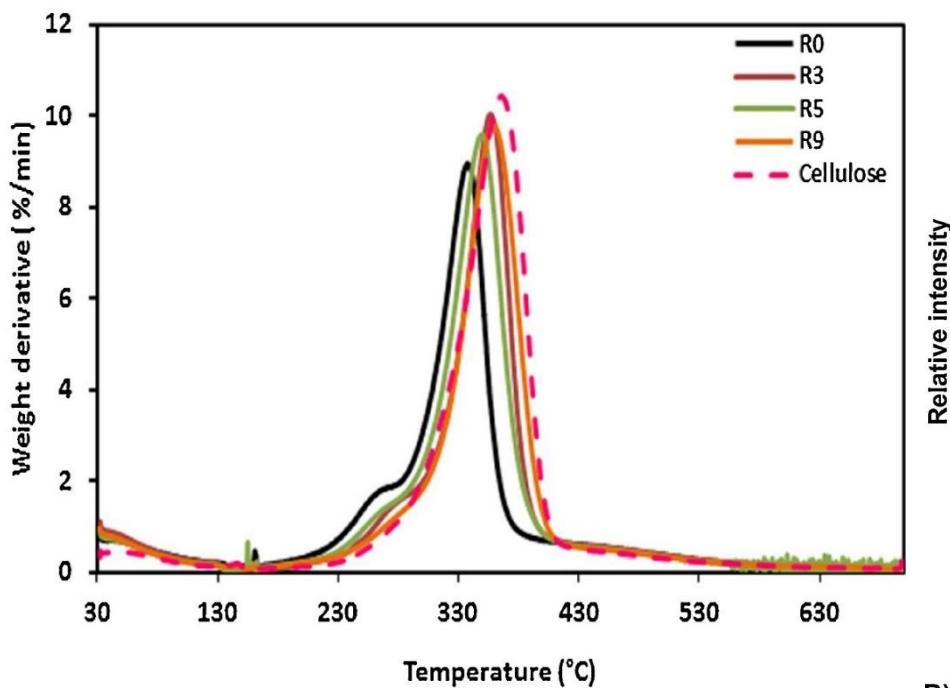


Observation des fibres longues de lin extraites après rouissage

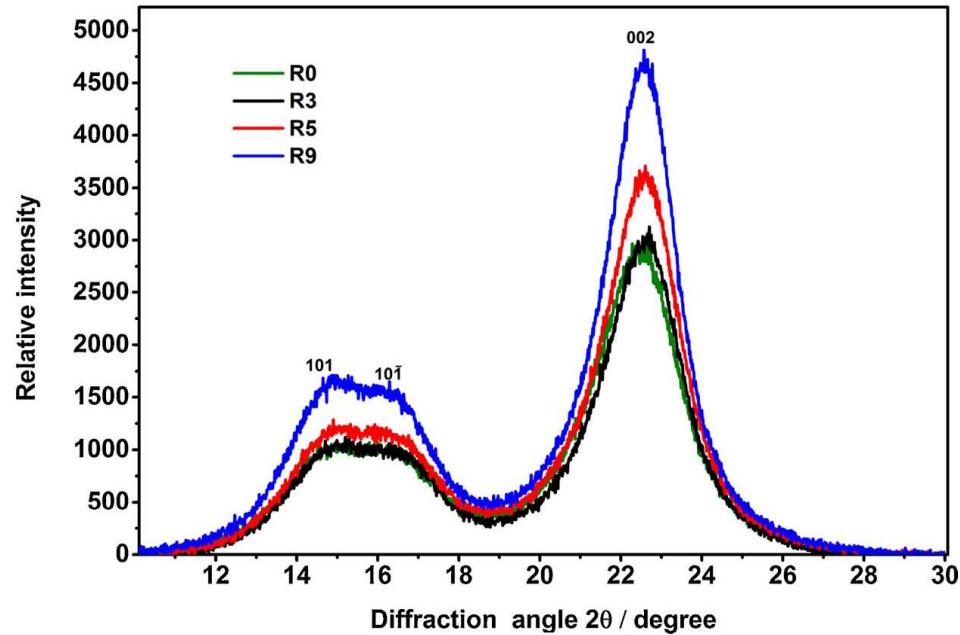
# Transformation des pailles: Rouissage au champ

## ➤ Propriétés des fibres longues

- Thermogravimétrie



- Cristallinité

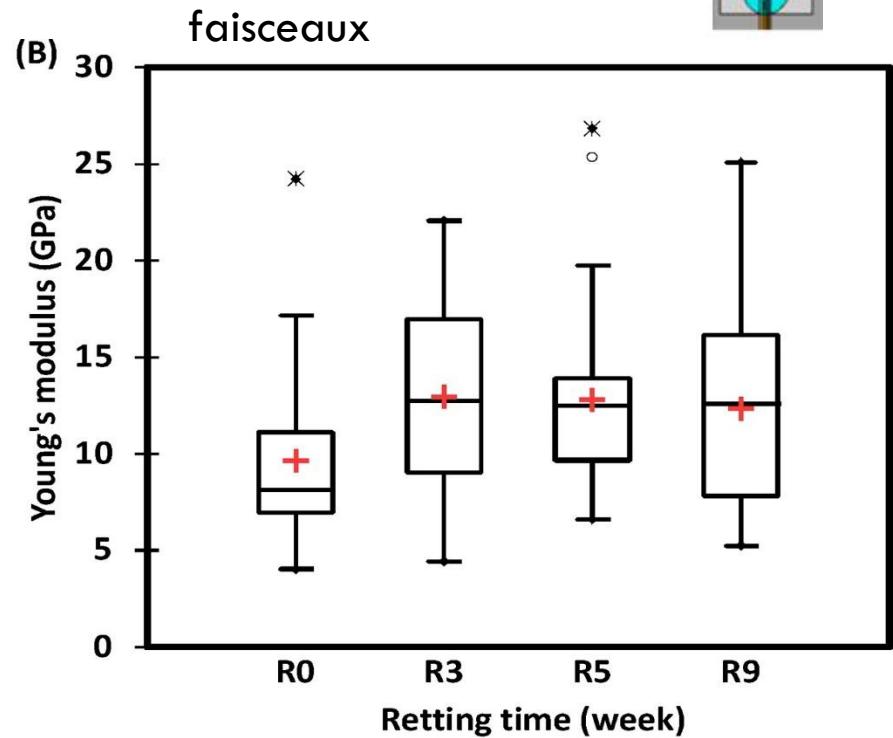
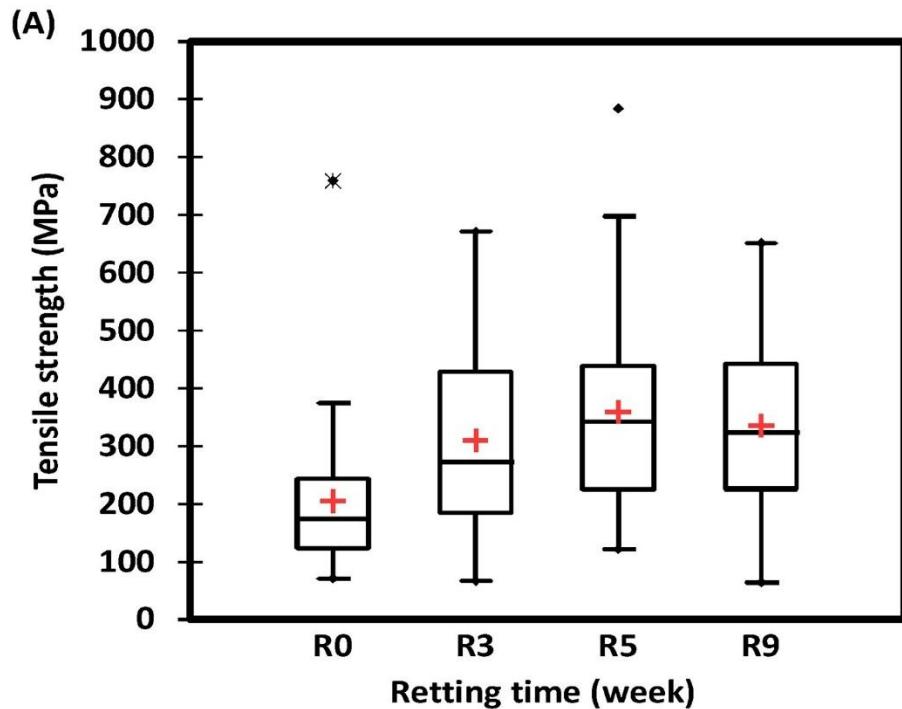
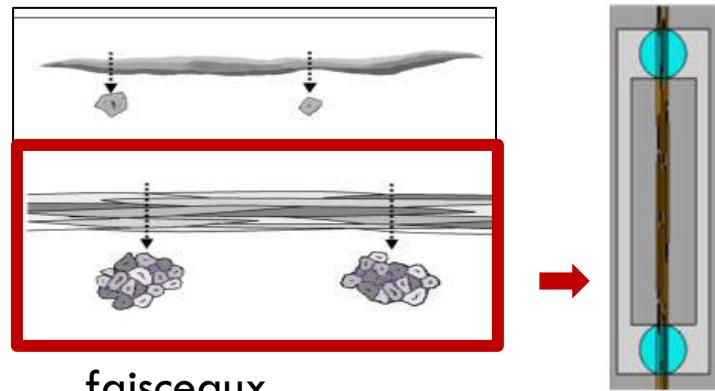


Mazian et al, 2018

# Transformation des pailles: Rouissage au champ

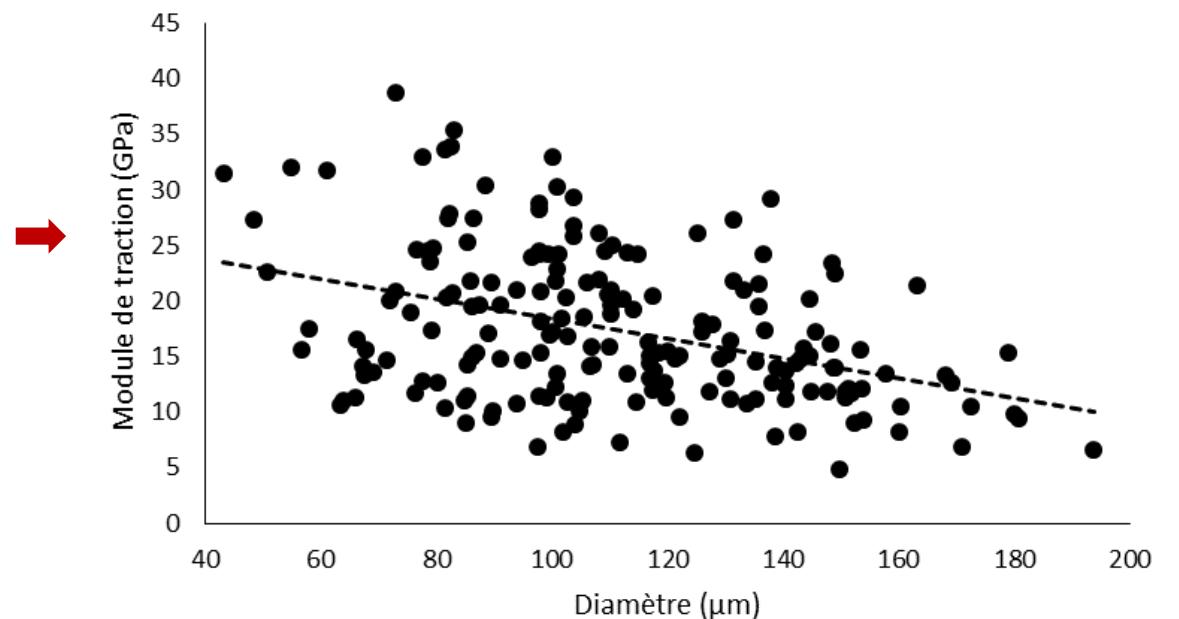
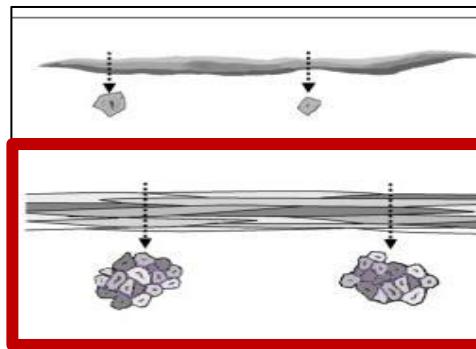
## ➤ Propriétés des fibres longues

- Propriétés mécaniques (traction)

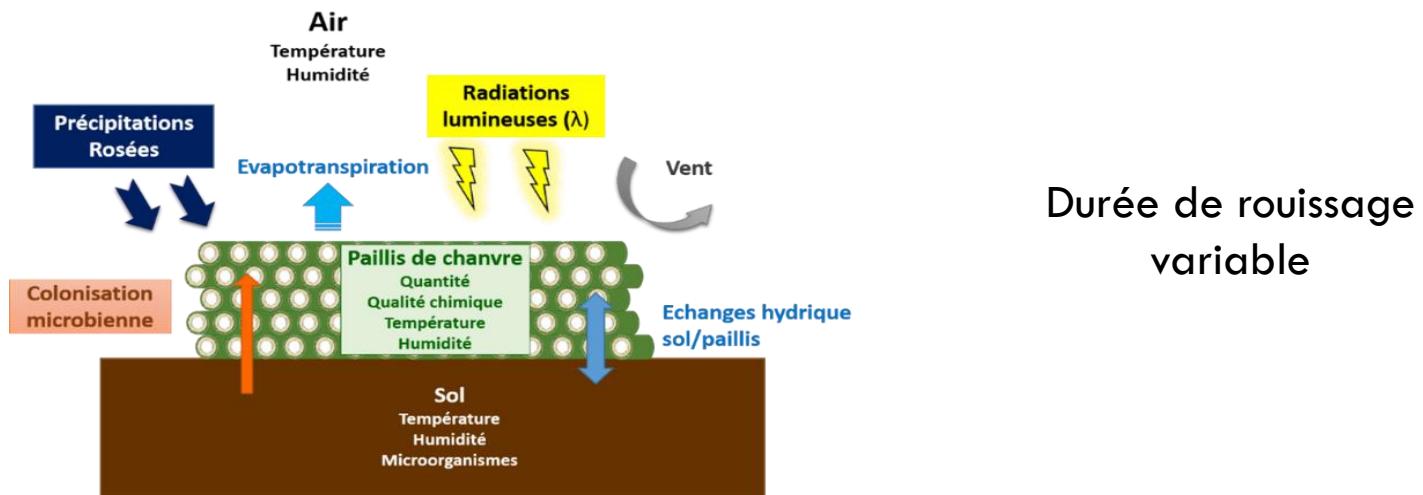


# Transformation des pailles: Rouissage au champ

## ➤ Propriétés mécaniques des fibres techniques



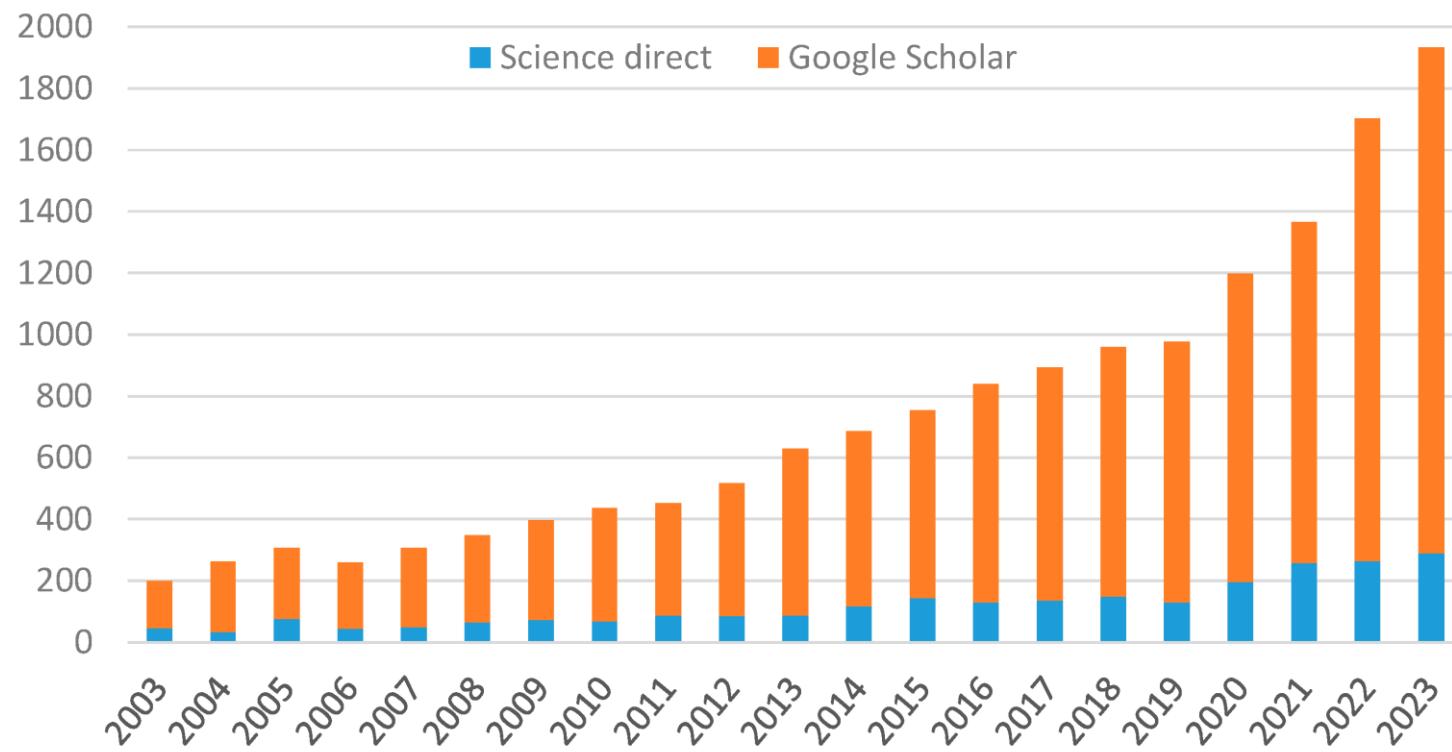
# Transformation des pailles: Rouissage au champ



**Evaluation du degré de rouissage? Lien avec applications des fibres?**

- **Tests empiriques**
  - Test manuel de séparation des tissus de la tige
  - Observation visuelle (couleur des pailles)
  - Aspect (douceur, brillance) et qualité des fibres après extraction mécanique (ténacité, homogénéité)
- **Tests objectifs de qualification des pailles et des fibres en développement**

## Number of published articles related to hemp and flax retting 2003–2023.



Angulu & Gusovius, 2024