

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

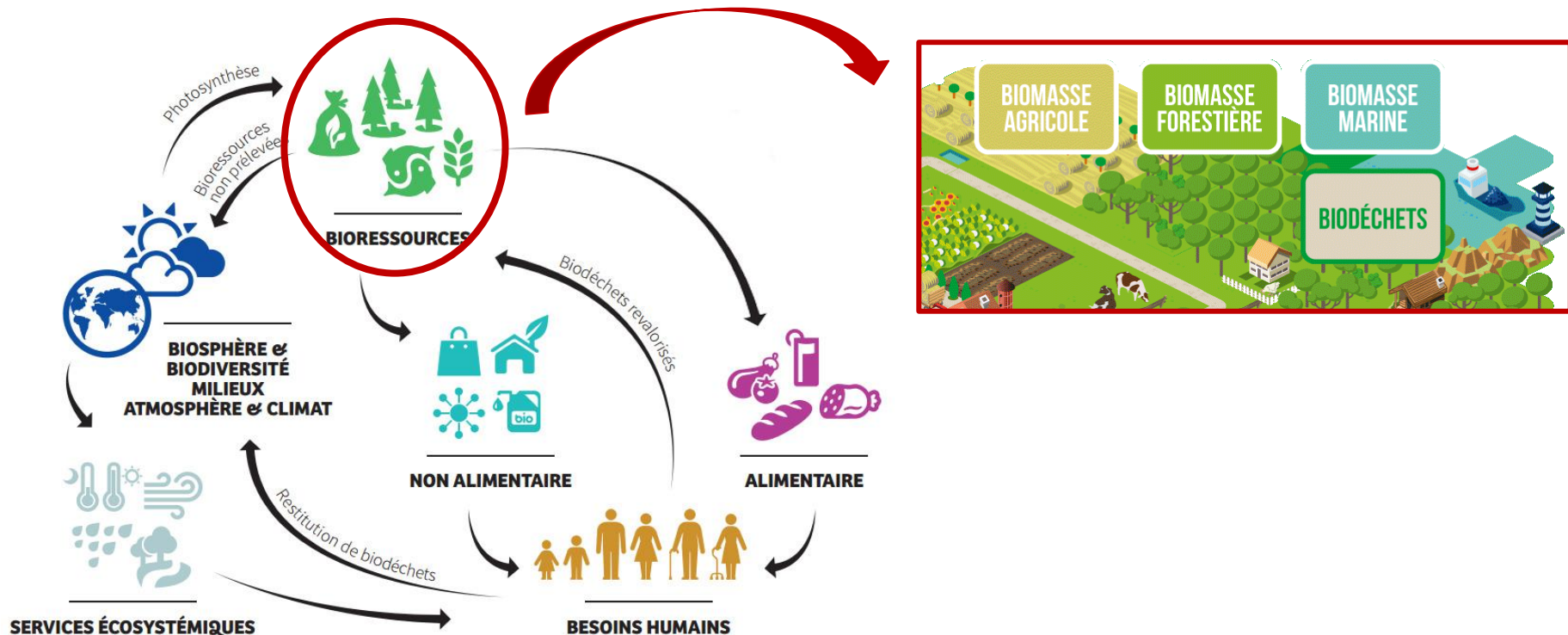
- Modifications biochimiques

- Propriétés physicochimiques

1 - Contexte

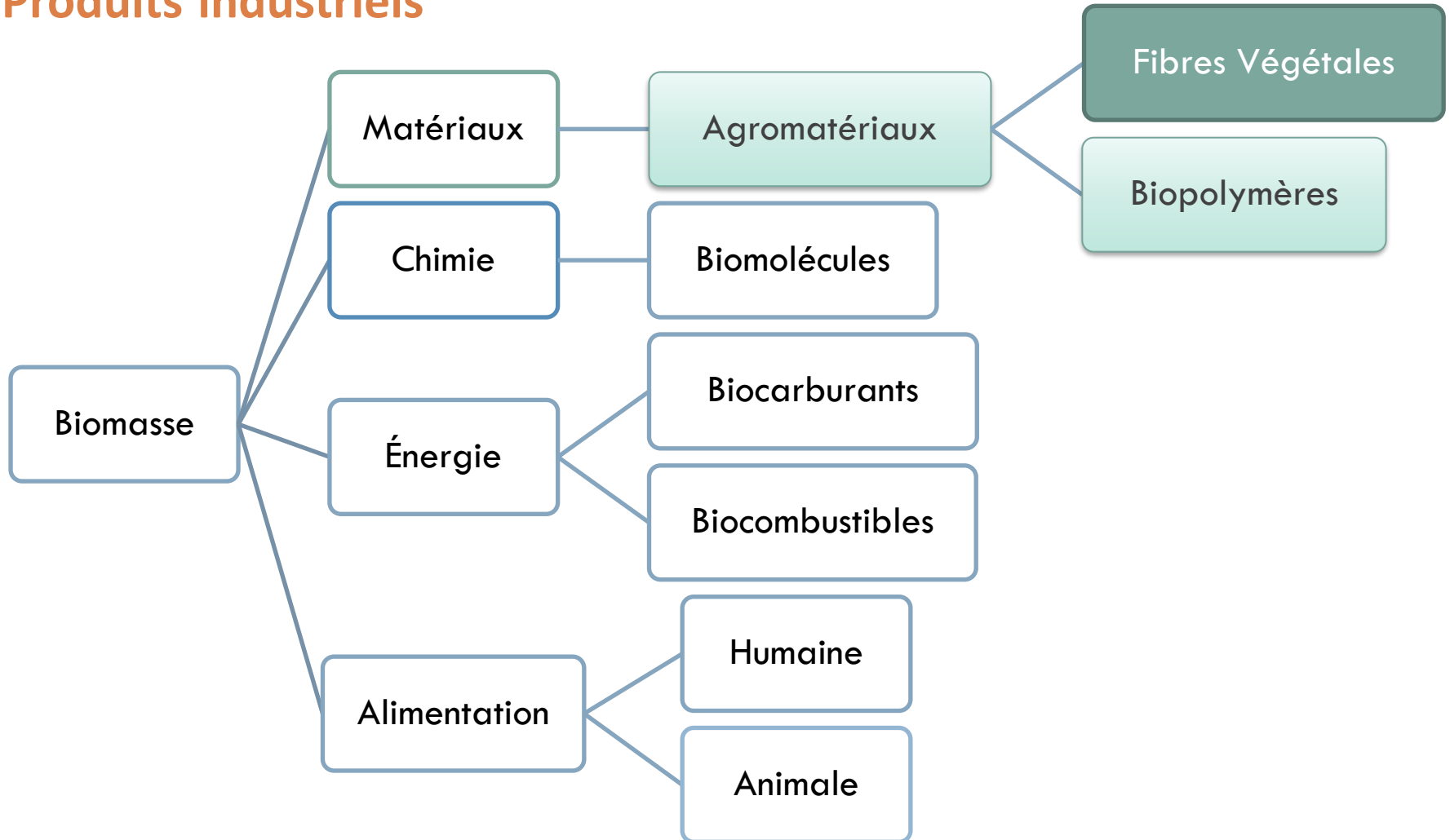
La bioéconomie :

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 matériaux 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

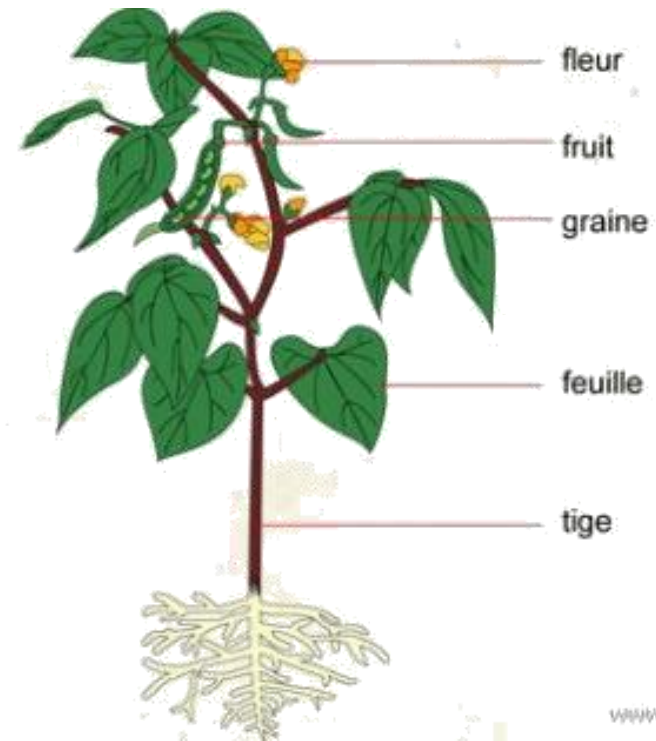
Fruit

Noix de coco

Feuille

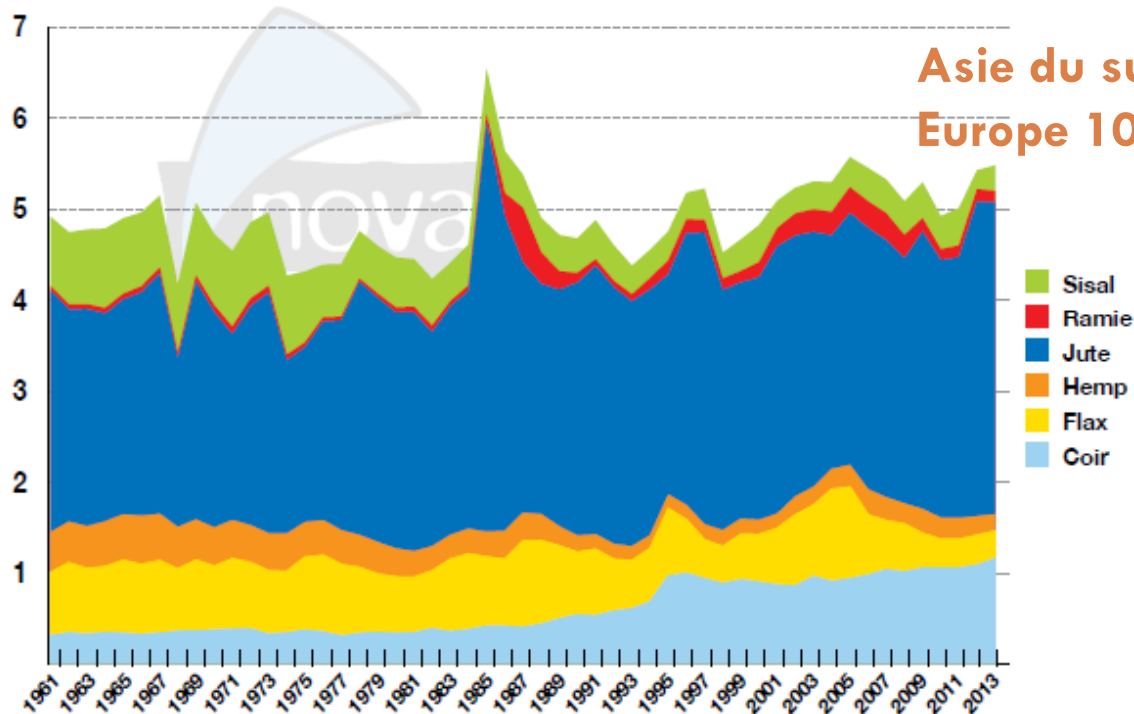
Abaca

Sisal



Fibres végétales: production (hors bois et coton)

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

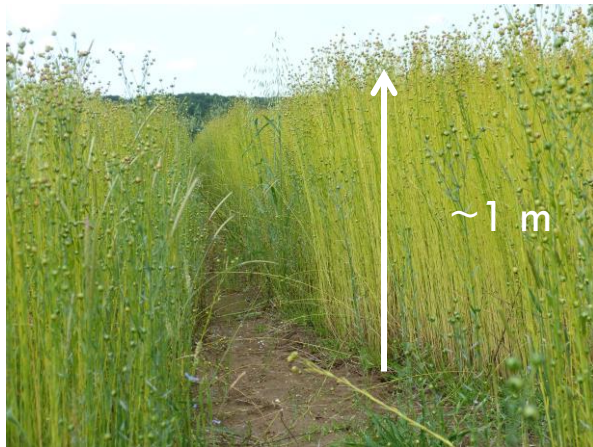


Asie du sud 75 % (Jute, Coco)
Europe 10 % (Lin, Chanvre)

La France est le principal producteur européen de fibres de lin et de chanvre
(1er producteur mondial de fibres longues de lin, 2ème producteur de chanvre)

2. Le lin et le chanvre

Principales cultures dédiées à la production de fibres végétales en France



Lin

Linum usitatissimum



Chanvre

Cannabis sativa L.

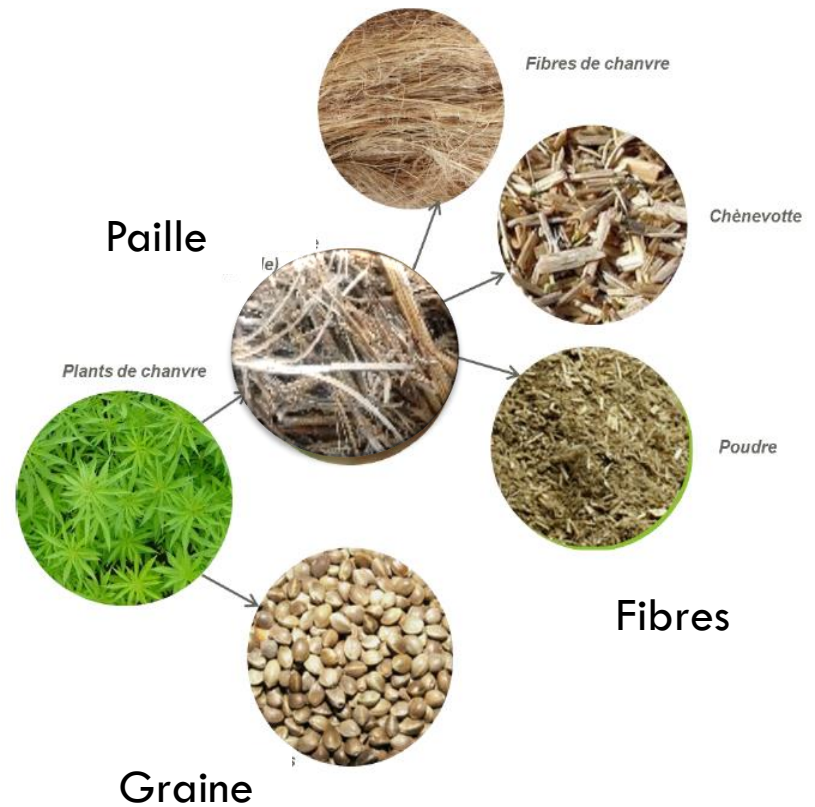
Plantes herbacées annuelles (Angiospermes dicotyledones)

Lin et chanvre : cultures multi-usages

Lin



Chanvre



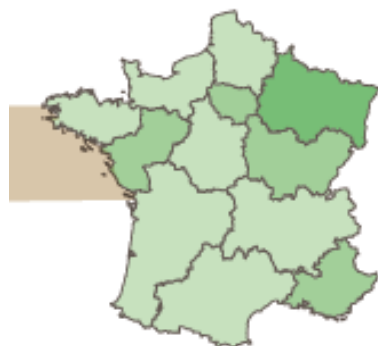
Lin et chanvre : production en France

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

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

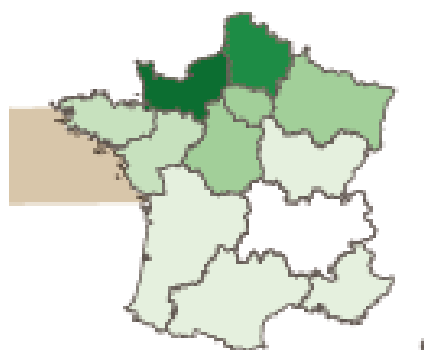
Surfaces cultivées (ha) 2021-2023

Chanvre industriel

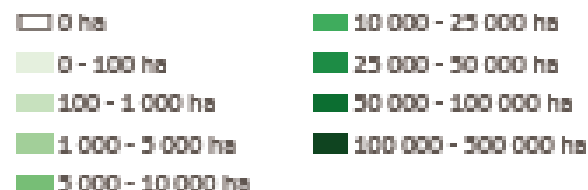


20 000 ha/an

Lin fibre



120 000 ha/an



Rendement
paille
théorique

7,1 t/ha

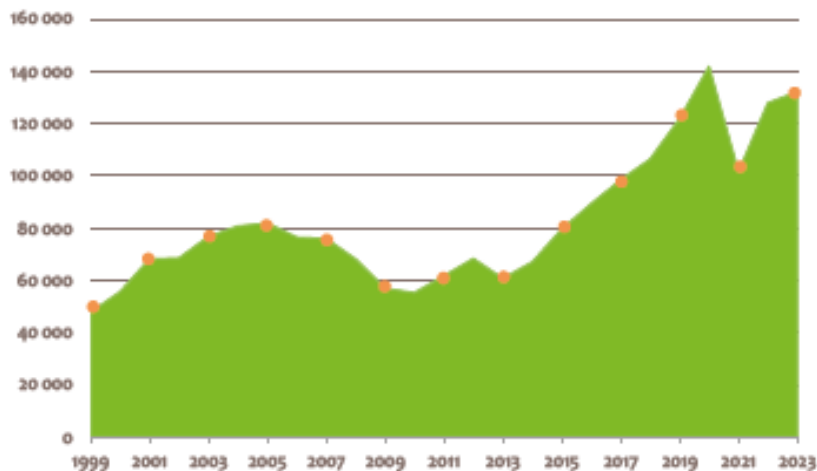
4,8 t/ha

Lin et chanvre : production en France

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

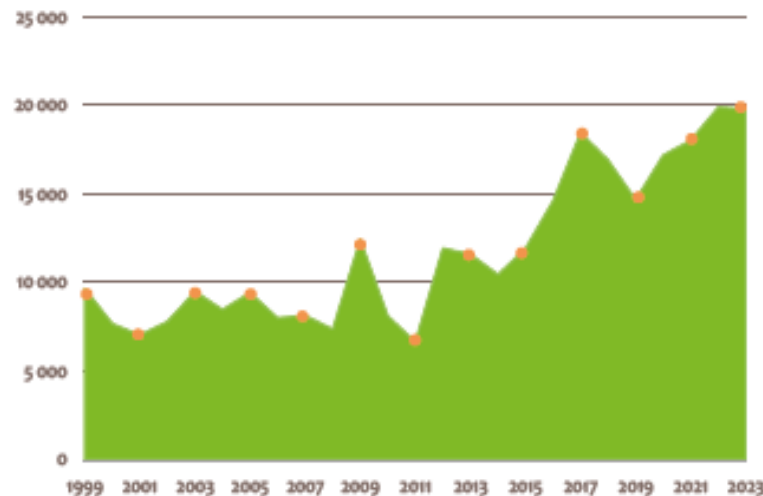
Augmentation des surfaces cultivées en lin et chanvre

Lin



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

Chanvre

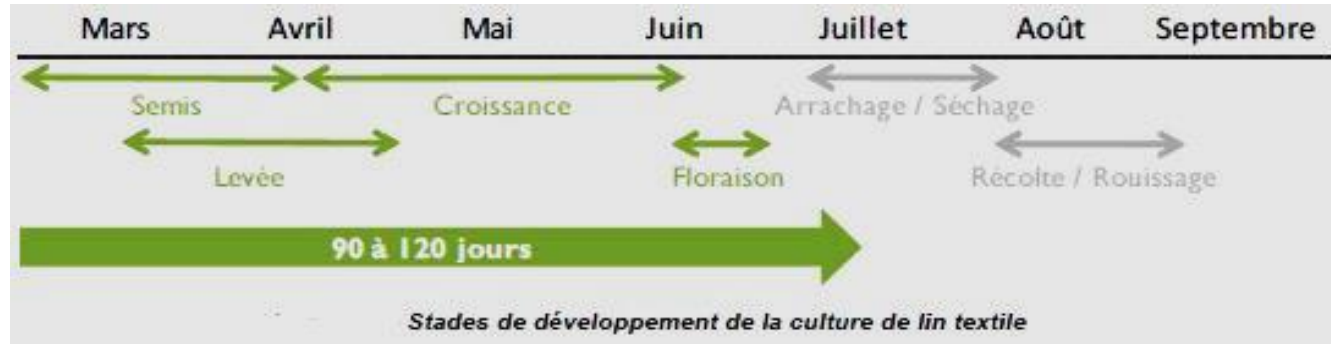


Evolution des surfaces (ha) 1999 - 2023 (Source : Agreste)

Culture des plantes à fibres - Lin et chanvre

Cultures à croissance rapide

Lin



Chanvre



Atouts agronomiques

- Un apport d'engrais limité
- Peu ou pas de produits phytosanitaires
- Des cultures économes 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

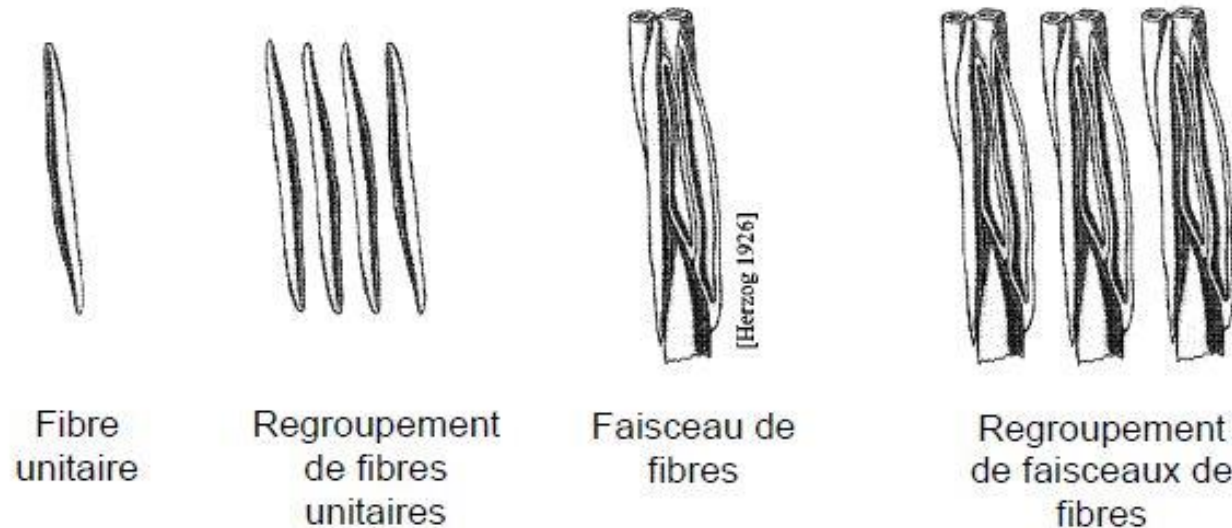
Fibres végétales

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

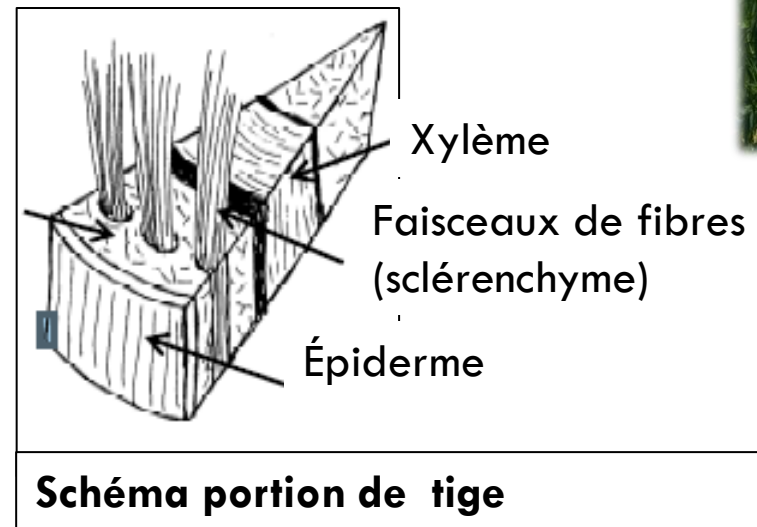
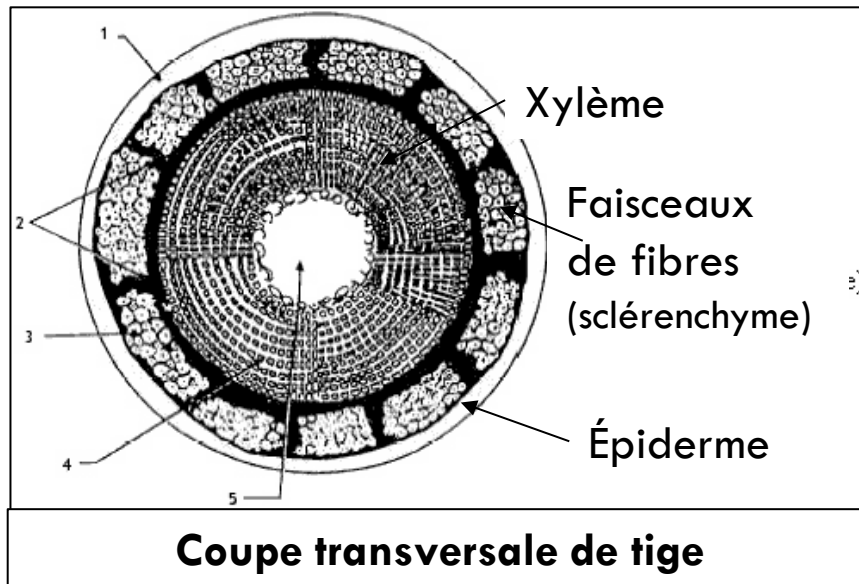
Faisceau de fibres = regroupement de cellules



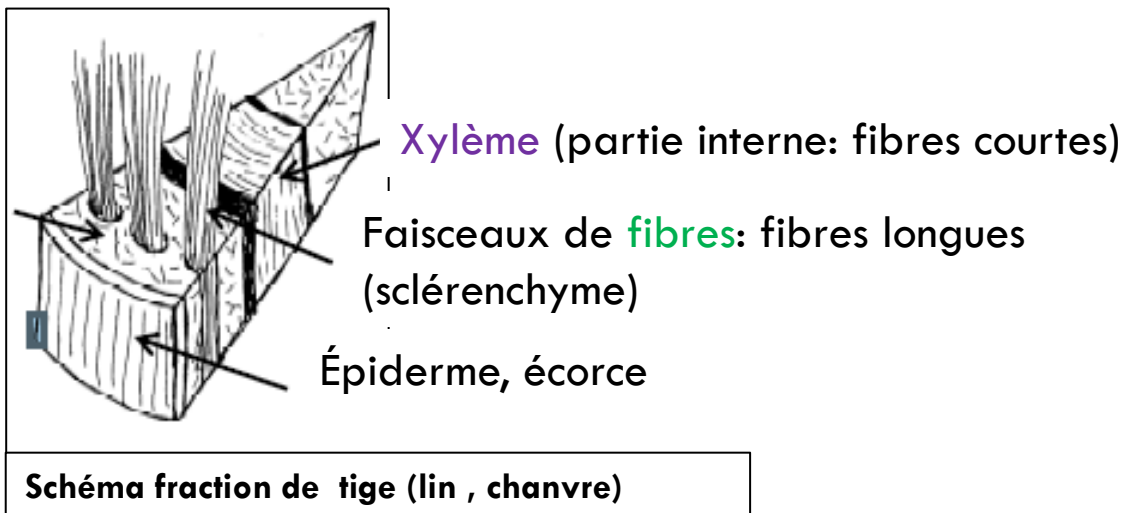
Les fibres végétales de lin et de chanvre

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



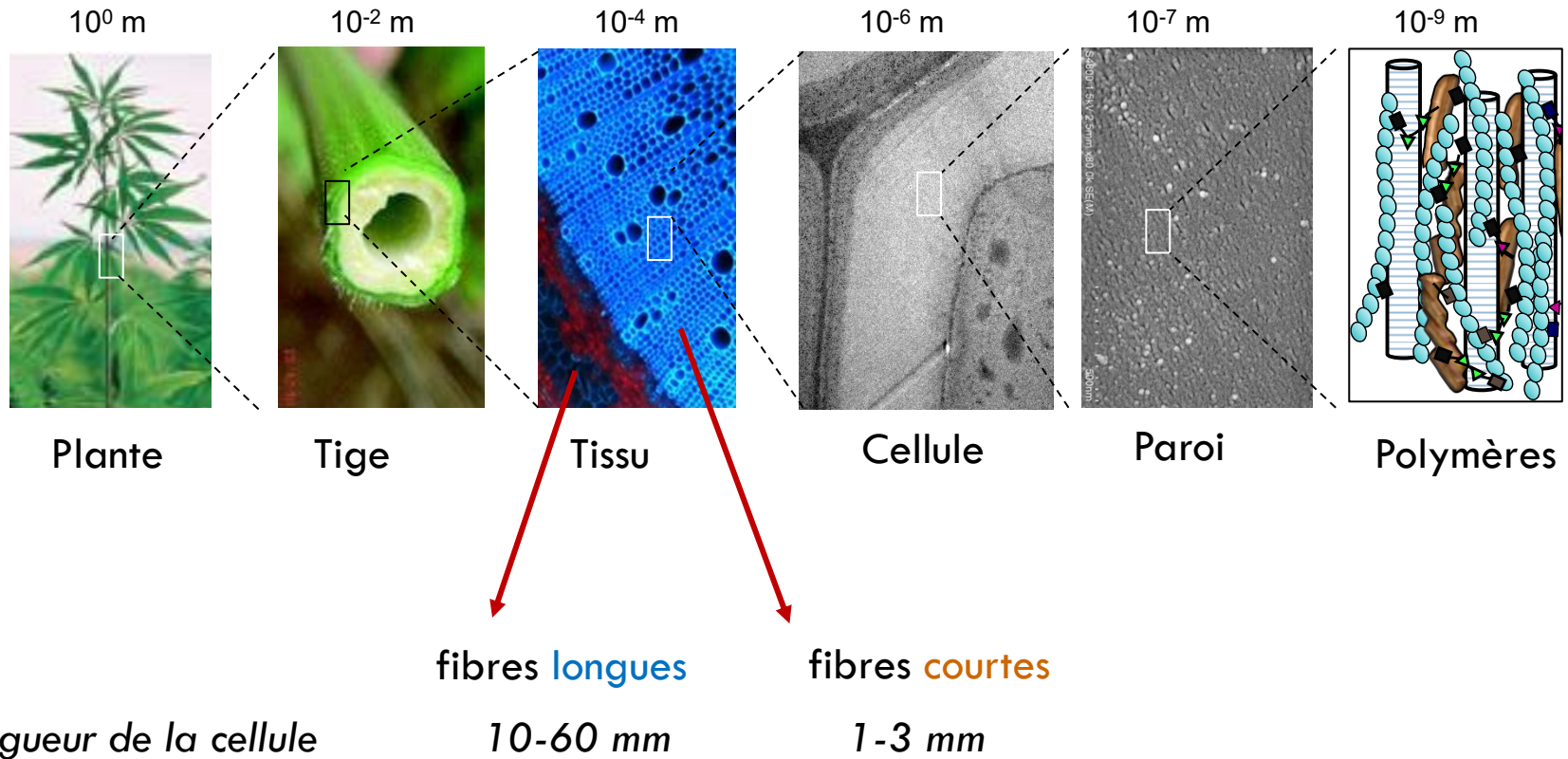
Paille (tige)

- Fibres **longues** (partie **externe**)
sclérenchyme
- Fibres **courtes** (partie **interne**)
xylème

	Lin	Chanvre
→	Fibres	Fibres
→	Anas	Chènevotte

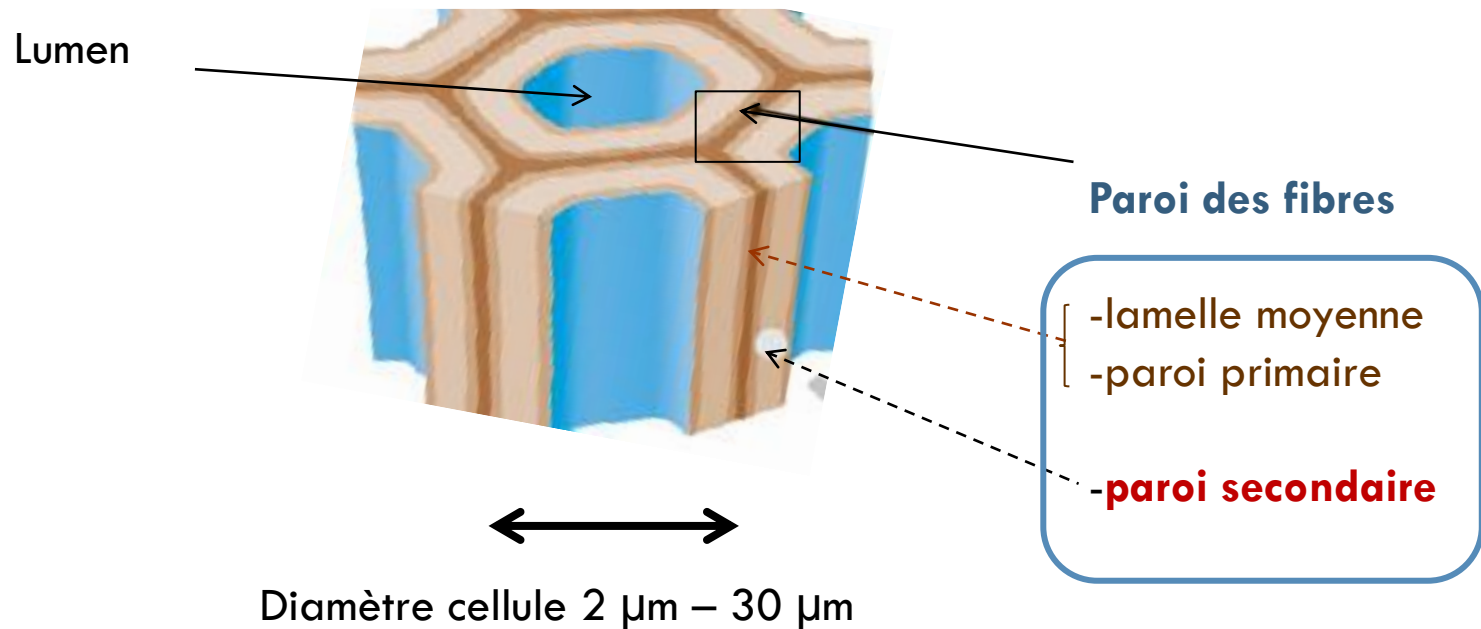
Les fibres végétales

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

Phénols

Lignine

Protéines

Prot. structurales

Prot. enzymatiques

Polyesters

Cutines

Subérine

Minéraux

calcium, silicium,...

Eau

Caractéristiques communes

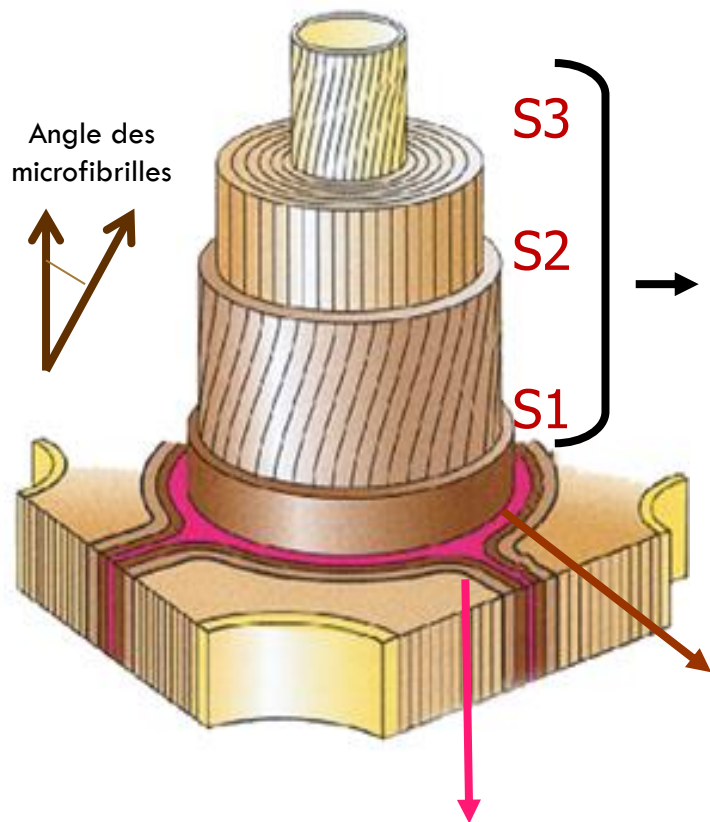
MAIS

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

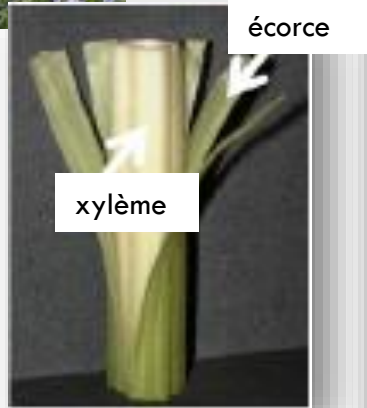
Paroi primaire:

- Pectines – hémicelluloses - cellulose non orientée
- Lignines

Lamelle moyenne

- Pectines - lignines
- Responsable de la cohésion entre cellules

Structure des fibres de lin et de chanvre

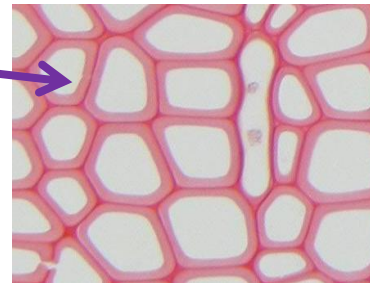


Deux types de fibres:



Parois hypolignifiées
Épaisseur (5-20µm)

Sclérenchyme



Parois lignifiées
Épaisseur (1-2µm)

Xylème

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

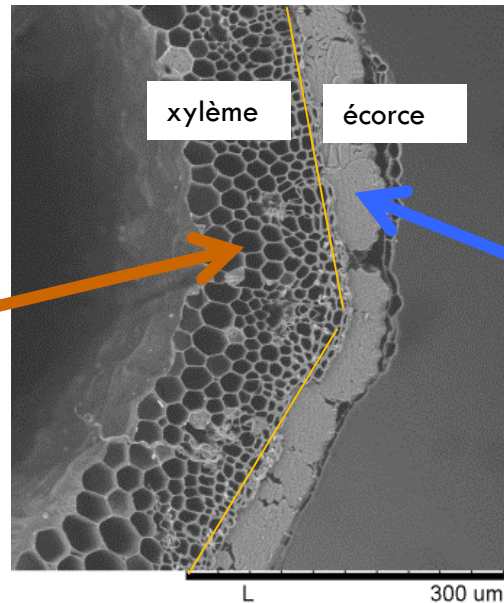
Composition des fibres de lin et de chanvre

Deux types de fibres

Fibres du xylème

Fibres courtes

lignifiées



Sclérenchyme

Fibres longues

peu lignifiées



Exemple: Lin	Longueur des fibres (mm)	Epaisseur des Parois (µm)	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

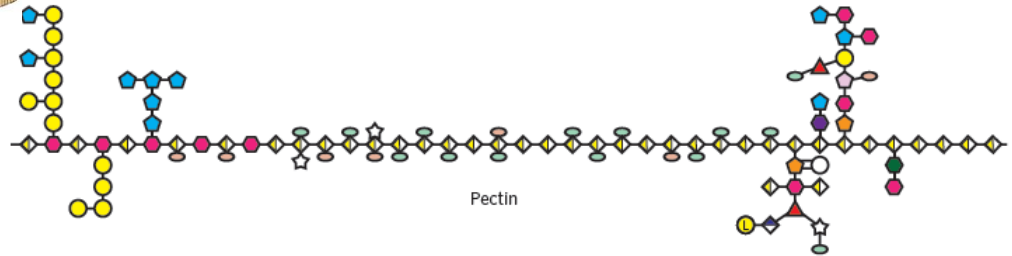
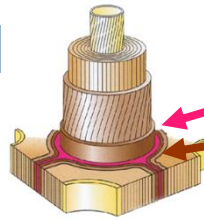
Pectines: principal constituant du ciment interfibres

(→ lamelle moyenne/paroi primaire)

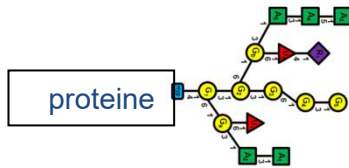
Pectines

Homogalacturonanes

Rhamnogalacturonanes

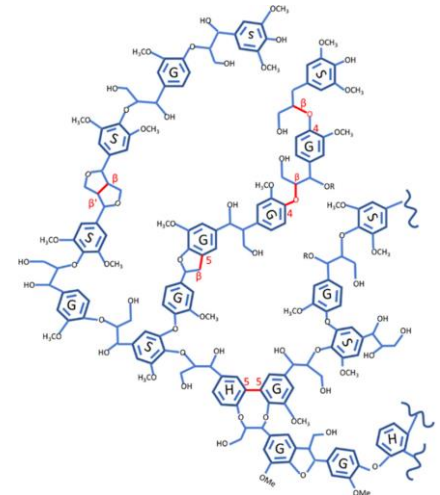


Arabinogalactane proteines



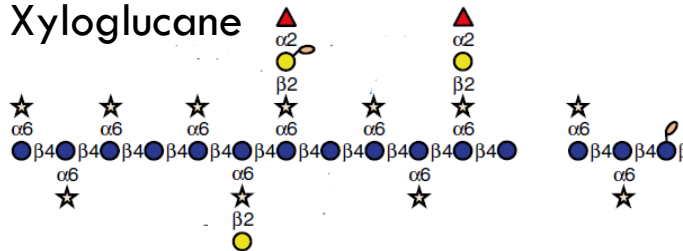
Lignine

(polymère phénolique)

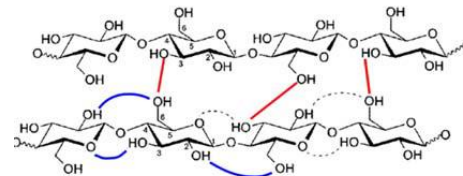


Hemicelluloses (paroi primaire)

Xyloglucane

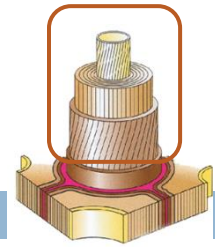


Cellulose (paroi primaire)

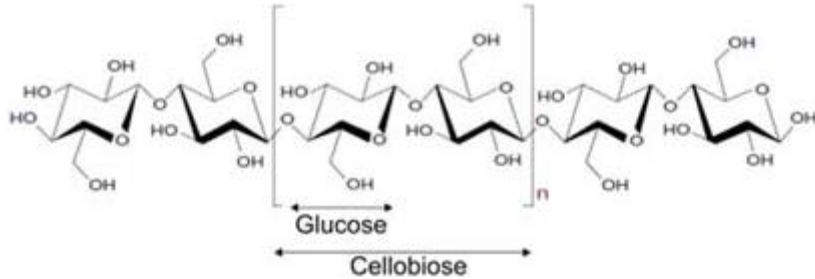


Cellulose: principal constituant des fibres

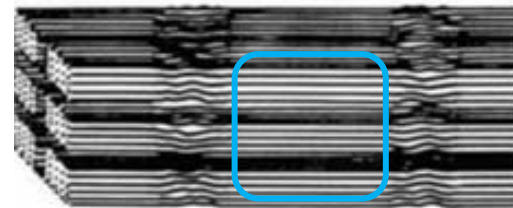
(→ paroi secondaire)



➤ Structure de la cellulose : polymère de glucose semi cristallin

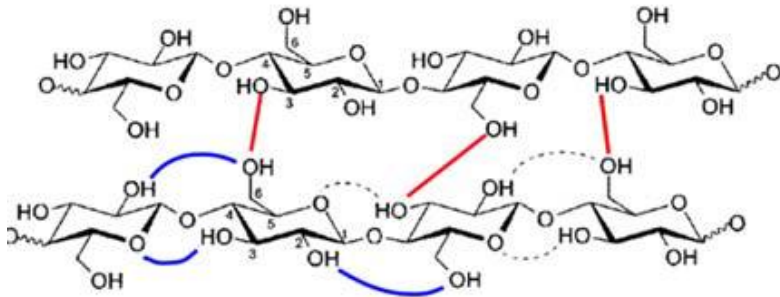


Microfibrilles de cellulose



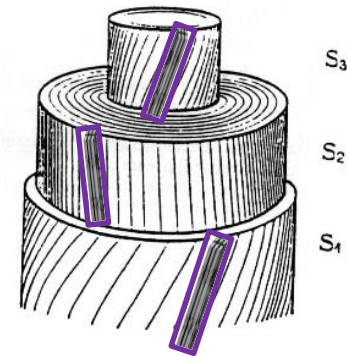
Structure cristalline

Interactions non covalentes entre les chaînes



➤ Variation structurale de la cellulose

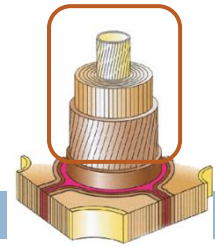
- degré de cristallinité
- degré de polymérisation
- orientation des microfibrilles (angle des microfibrilles)



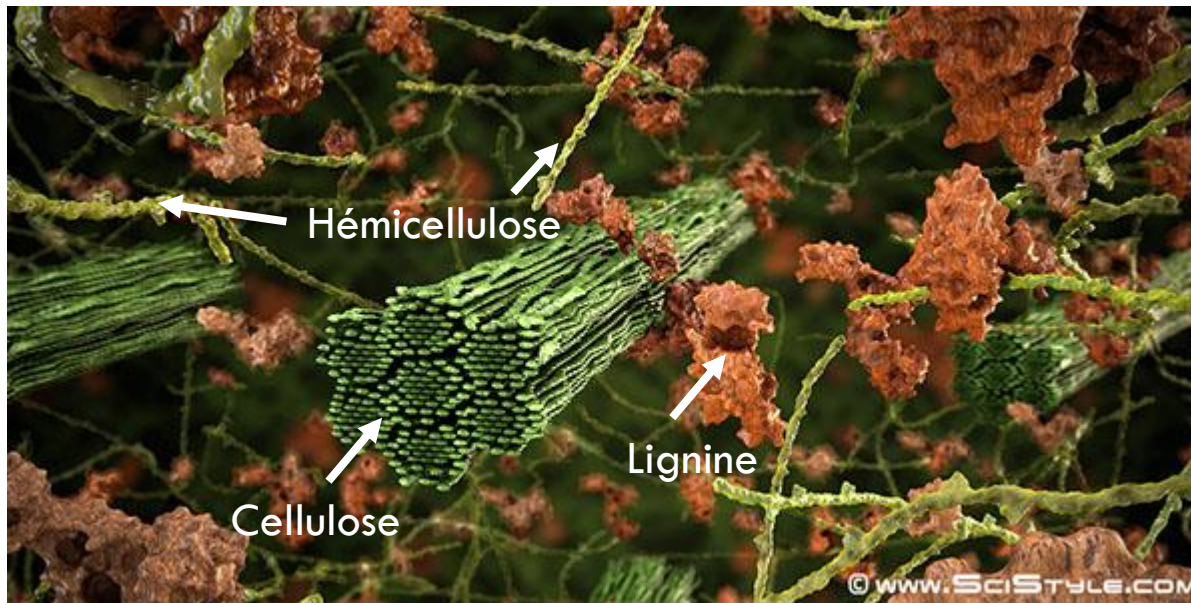
Paroi secondaire

Matrice de polymères amorphes

(→ paroi secondaire)



- La cellulose est enrobée par une matrice de polymères amorphes

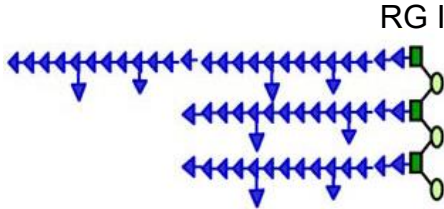


- La teneur et la structure des polymères amorphes varient selon le type tissulaire et cellulaire (sclérenchyme/xylème)

Polymères amorphes

Pectines

(Rhamnogalacturonanes substitués par des galactanes)



Arabinogalactane proteines

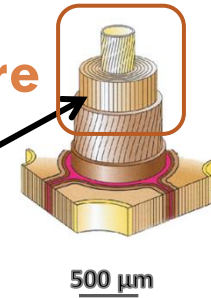
Total polymères amorphes ~ 20%

Interactions interpolymères

- Liaisons non covalentes cellulose/ galactane, mannane)
- Liaisons covalentes et non covalentes interactions entre polysaccharides non cellulosiques et lignines

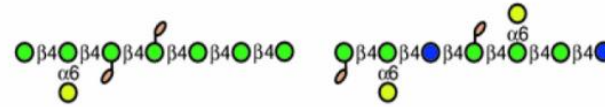
Parois secondaire sclérenchyme

(fibres longues)

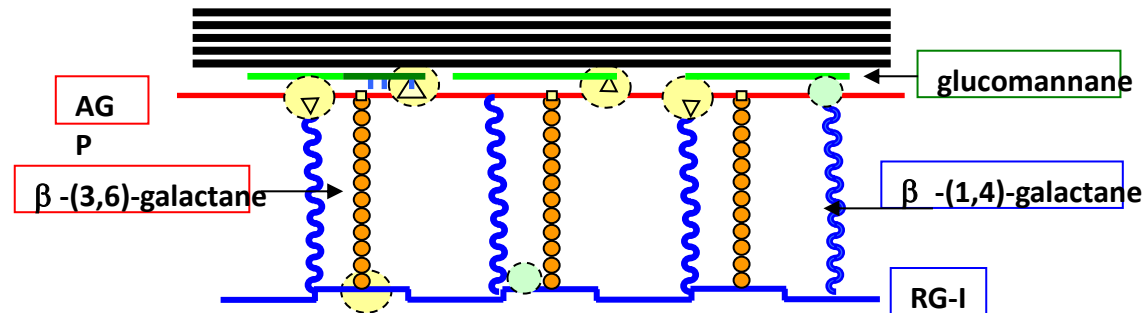


Hemicelluloses

Mannane



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

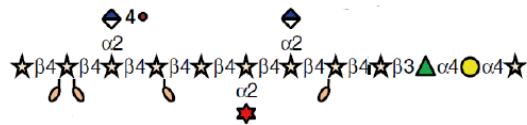


Morvan et al, 2004, Tan et al 2010; Mellerowitz and Gorshkova 2013

Polymères amorphes

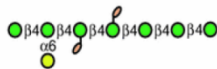
Hemicelluloses

Glucuronoxylane



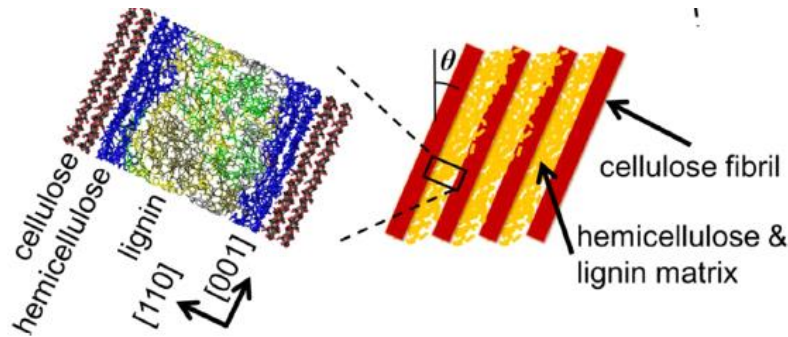
- ★ D-Xylose (Xylp)
- ★ L-Arabinose (Araf)
- ★ Ferulic Acid
- ▲ L-Rhamnose (Rhap)
- Methyl
- ρ Acetate
- ◆ D-Glucuronic Acid (GlcAp)

Mannane



Total polymères amorphes ~ 50%

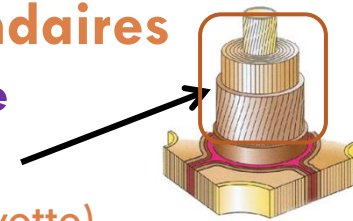
Interactions interpolymères



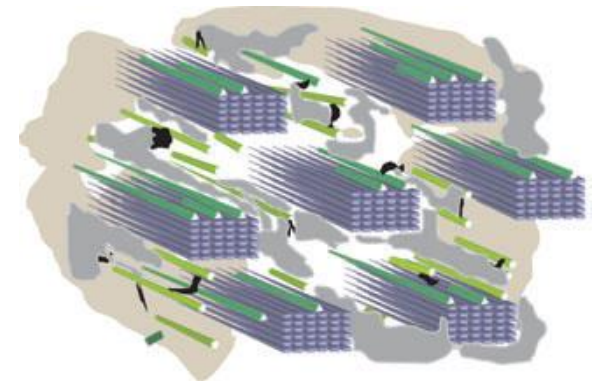
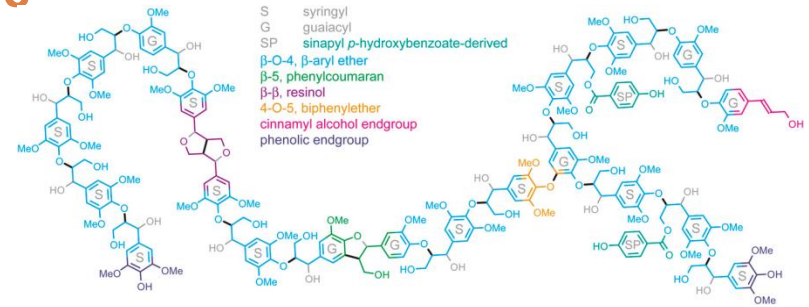
Parois secondaires

Xylème

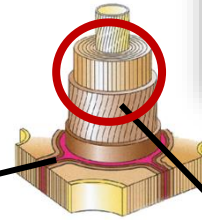
(anas, chénevette)



Lignine



Polymères amorphes



Parois primaires

Xylème ET sclérenchyme

(Fibres courtes et fibres longues)

Pectines

Homogalacturonanes
Rhamnogalacturonanes

Protéines de structure

Arabinogalactane protéine

Hemicellulose

Xyloglucane

Lignine

Polymère phénolique

Parois secondaires

Xylème

Fibres courtes

Hemicellulose

Xylane

Lignine

Polymère phénolique

Sclérenchyme

Fibres longues

Pectines

Rhamnogalacturonanes

Protéines de structure

Arabinogalactane protéine

Hemicellulose

Glucomannane

4- Transformation des pailles



Récolte



Rouissage



Stockage

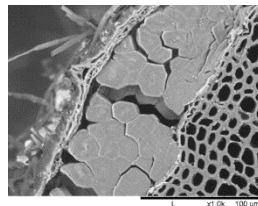
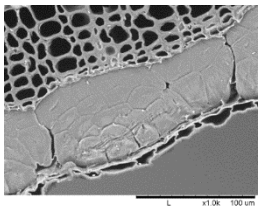


Extraction



Affinage

teillage



Rouissage

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

Fibres

Composite

Papier

Textile



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

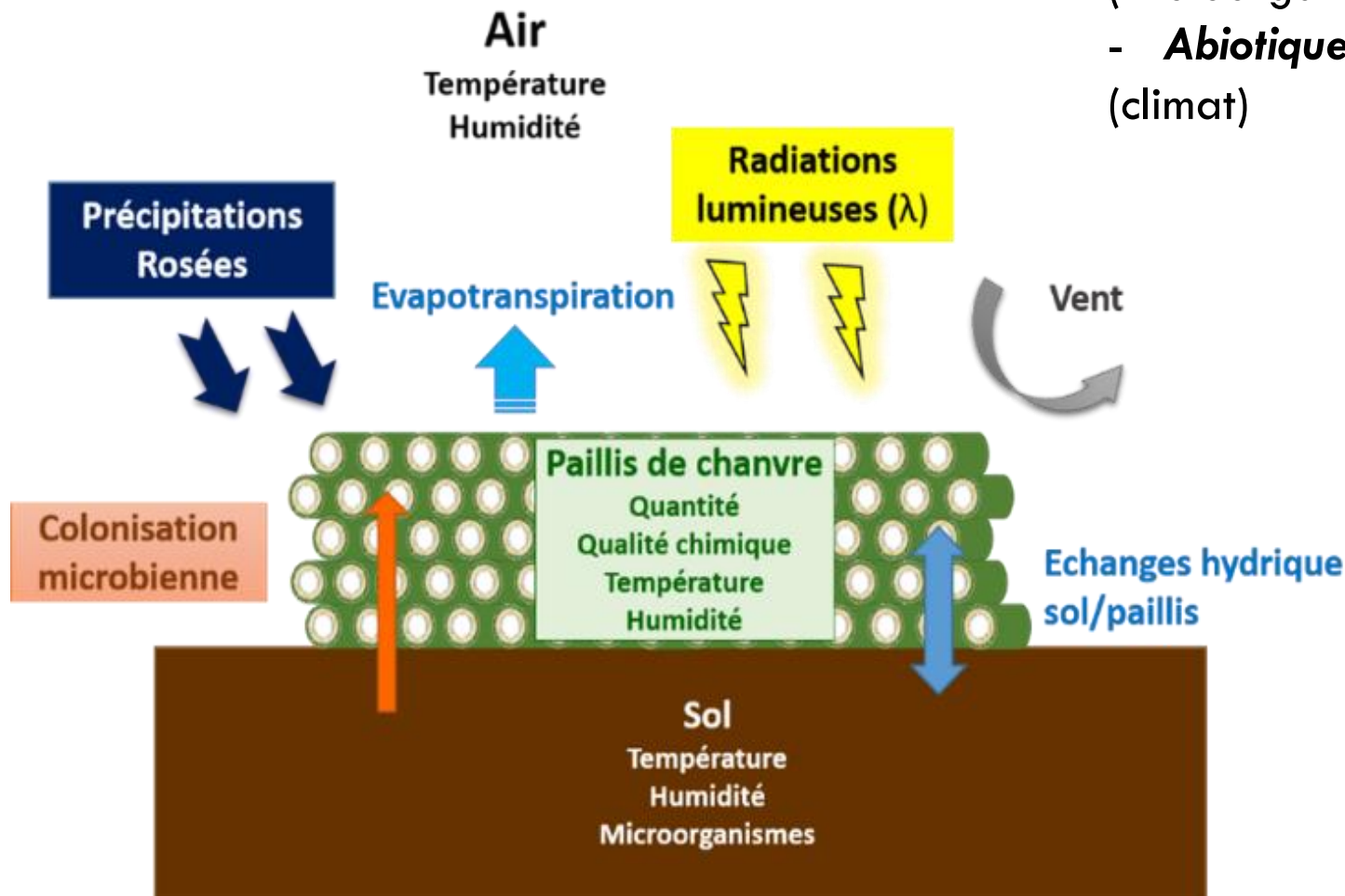


Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">■ Pas de besoins énergétiques externes (hors retournement)	<ul style="list-style-type: none">■ Hétérogénéité de la qualité des fibres par rapport à d'autres types de rouissage■ Phénomène difficilement maîtrisable car totalement climato-dépendant

Transformation des pailles: Rouissage au champ

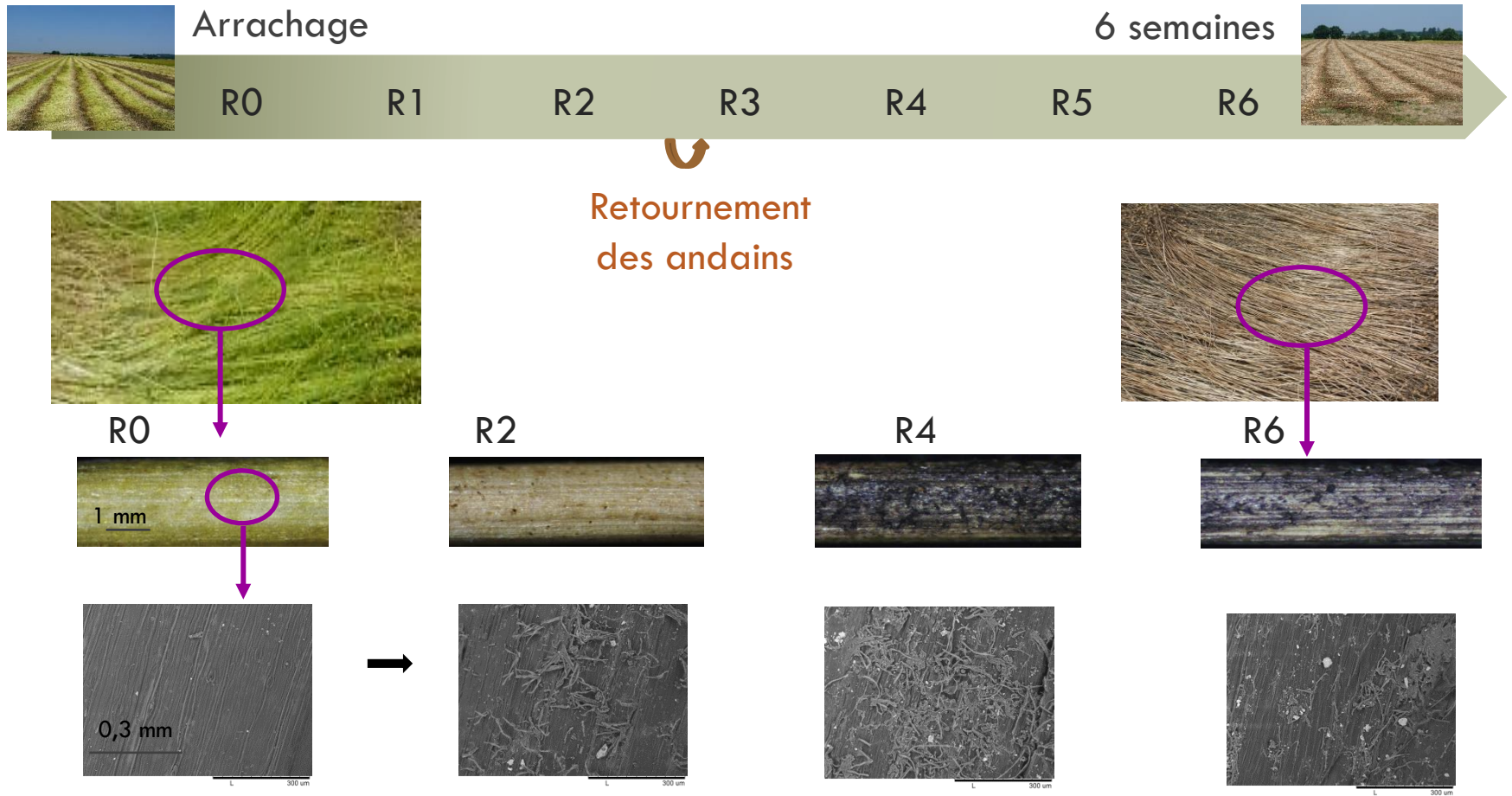
Facteurs influençant le rouissage au champ

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



Transformation des pailles: Rouissage au champ

Rouissage du lin

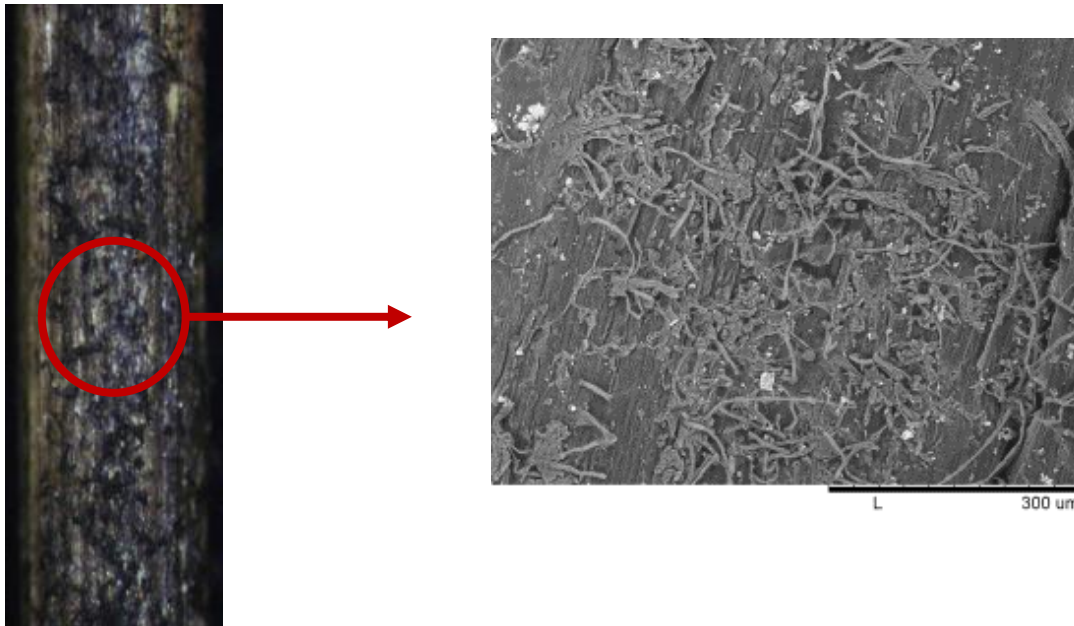


Evolution des pailles de lin

changement de couleur, colonisation microbienne en surface des pailles

Transformation des pailles: Rouissage au champ

Microorganismes impliqués dans le rouissage au champ

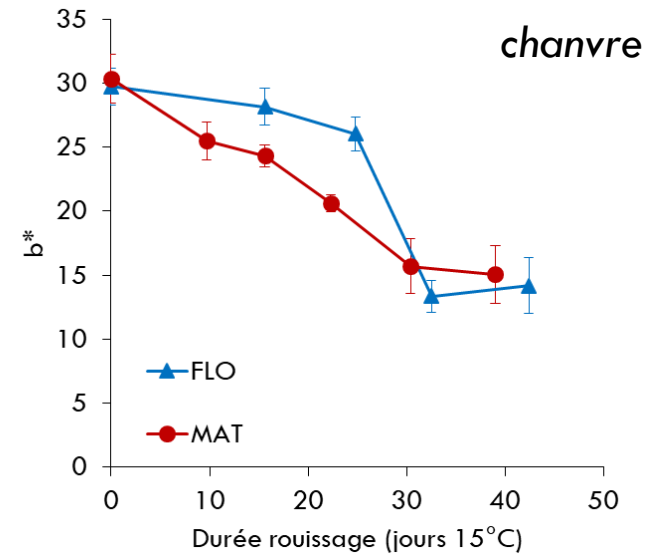
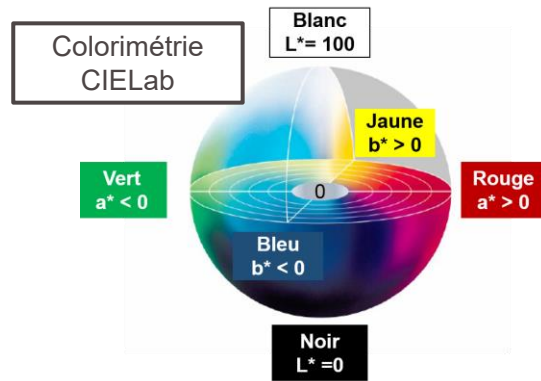


Observation de la
surface des pailles rouies
en microscopie
électronique à balayage

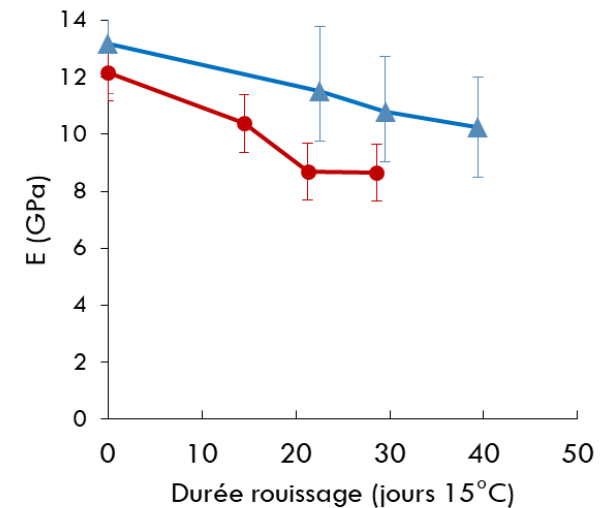
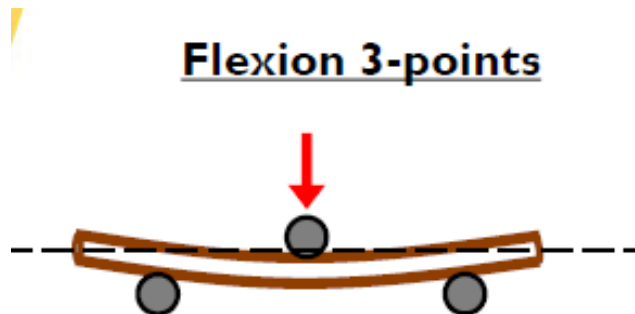
- Microorganismes de la plante et surtout du sol (**aérob**ie/anaérob
- Bactéries et Champignons
- Evolution de la diversité microbienne au cours du rouissage

Transformation des pailles: Rouissage au champ

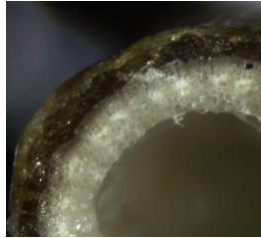
➤ Couleur des pailles



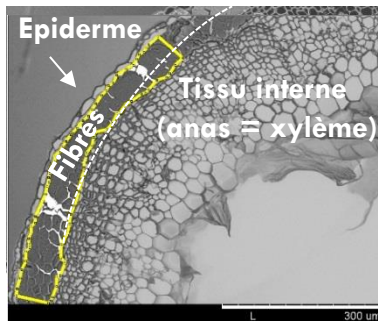
➤ Propriétés des pailles



Transformation des pailles: Rouissage au champ

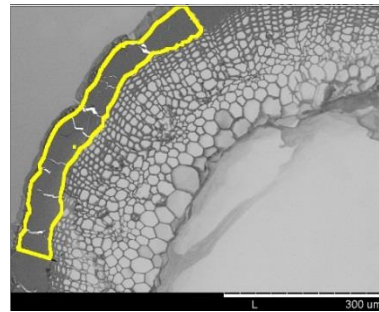


Tige de lin
Coupe
transversale



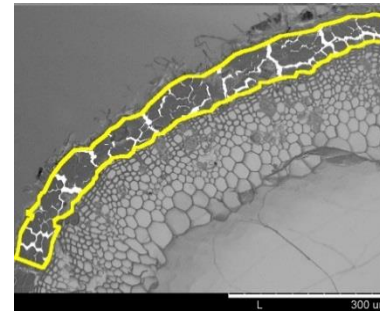
Arrachage

R0



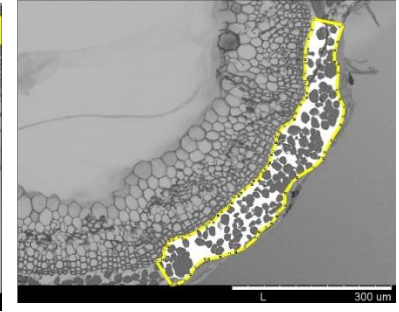
2 semaines

R2



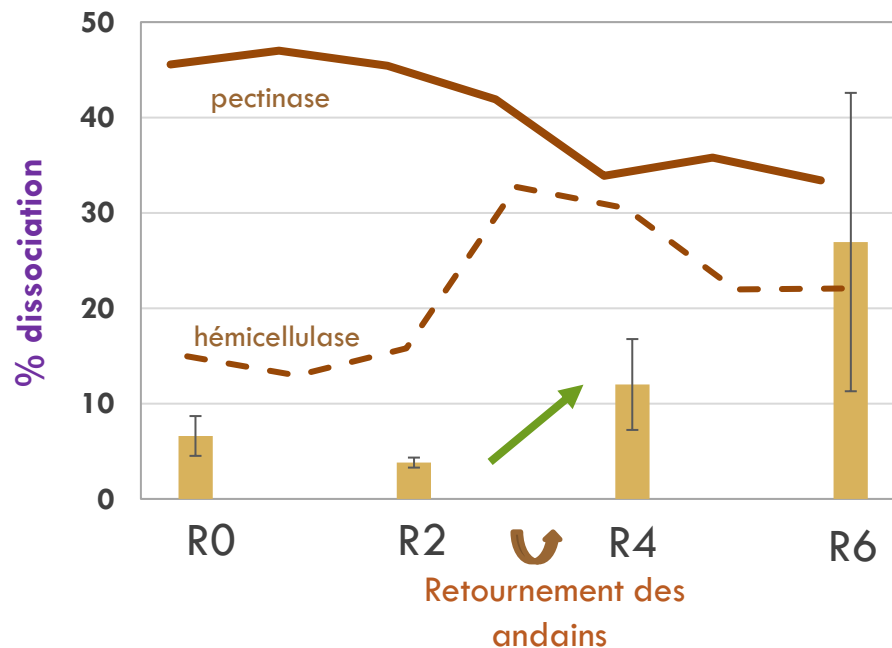
4 semaines

R4



6 semaines

R6



Pas de modification apparente du xylème

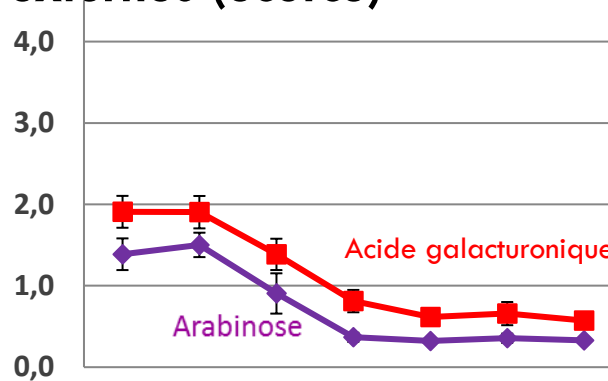
Dissociation des faisceaux de fibres après 4 semaines de rouissage

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

Transformation des pailles: Rouissage au champ

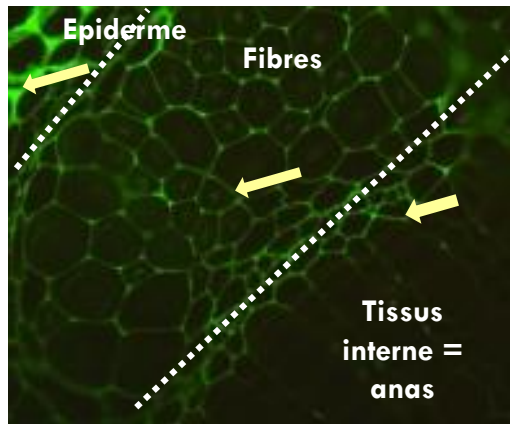
Polysaccharides des tissus externes (écorce)

Composition en sucres
monomères
(% masse de paroi)

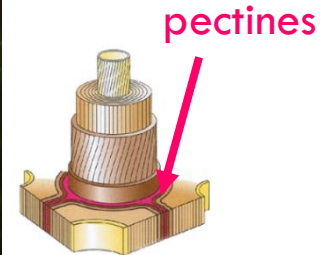
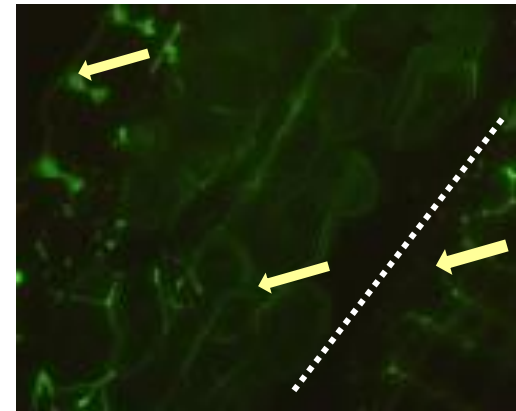


→ sucres monomères
des pectines

Immunomarquage des pectines (rhamnogalacturonanes)



2 semaines

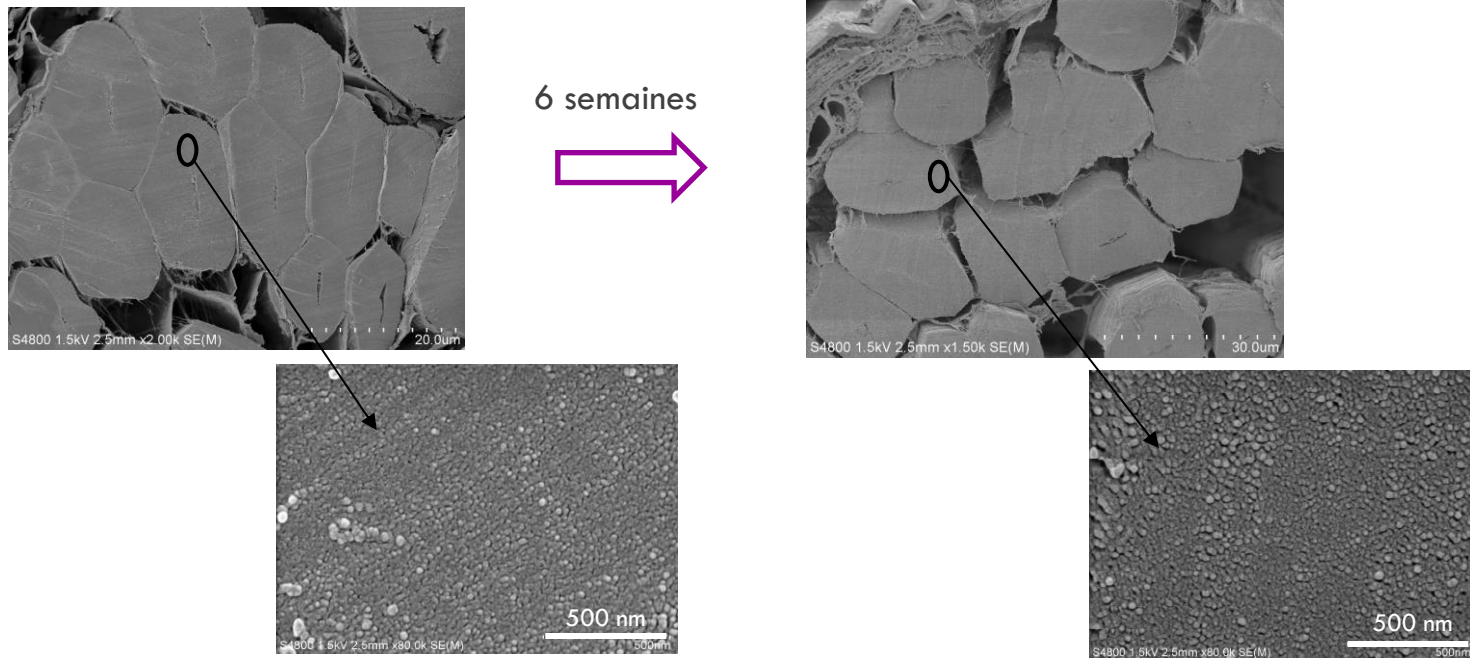


Les principales modifications chimiques sont attribuées aux **pectines** des **parois primaire/lamelle moyenne**:

Ciment inter fibres + cellules entourant les faisceaux (parenchyme)

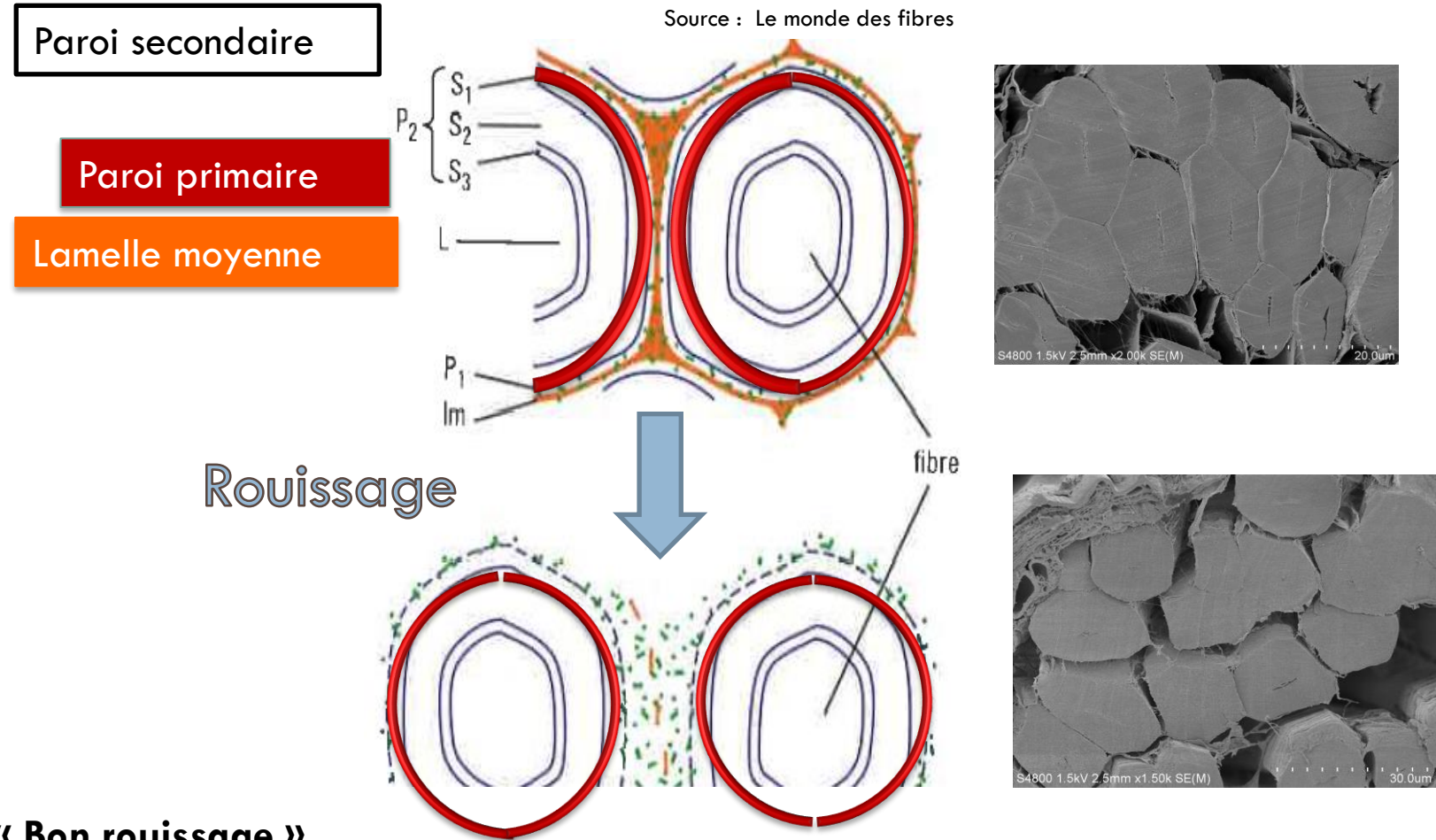
Transformation des pailles: Rouissage au champ

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



Observation des fibres longues en microscopie électronique à balayage

Transformation des pailles: Rouissage au champ



« 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



Granulats

Lin: anas

Chanvre: chénevote



Fibres

Fibres longues



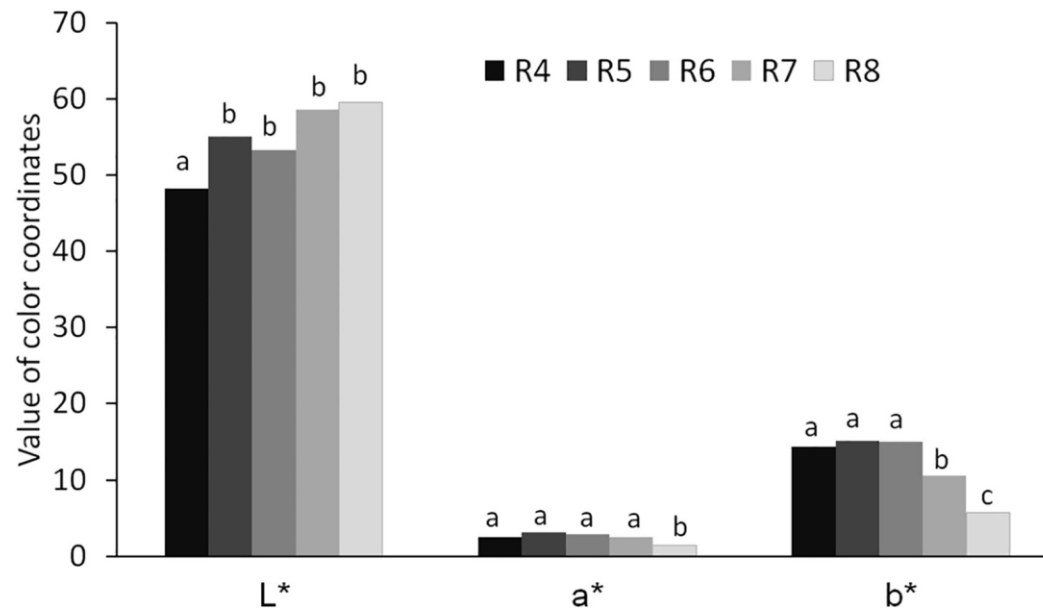
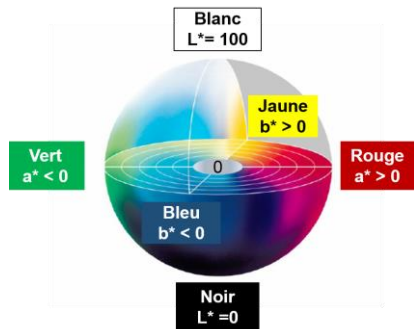
Anas, chénevote
(partie interne)

fibres: fibres longues

Fibres
techniques

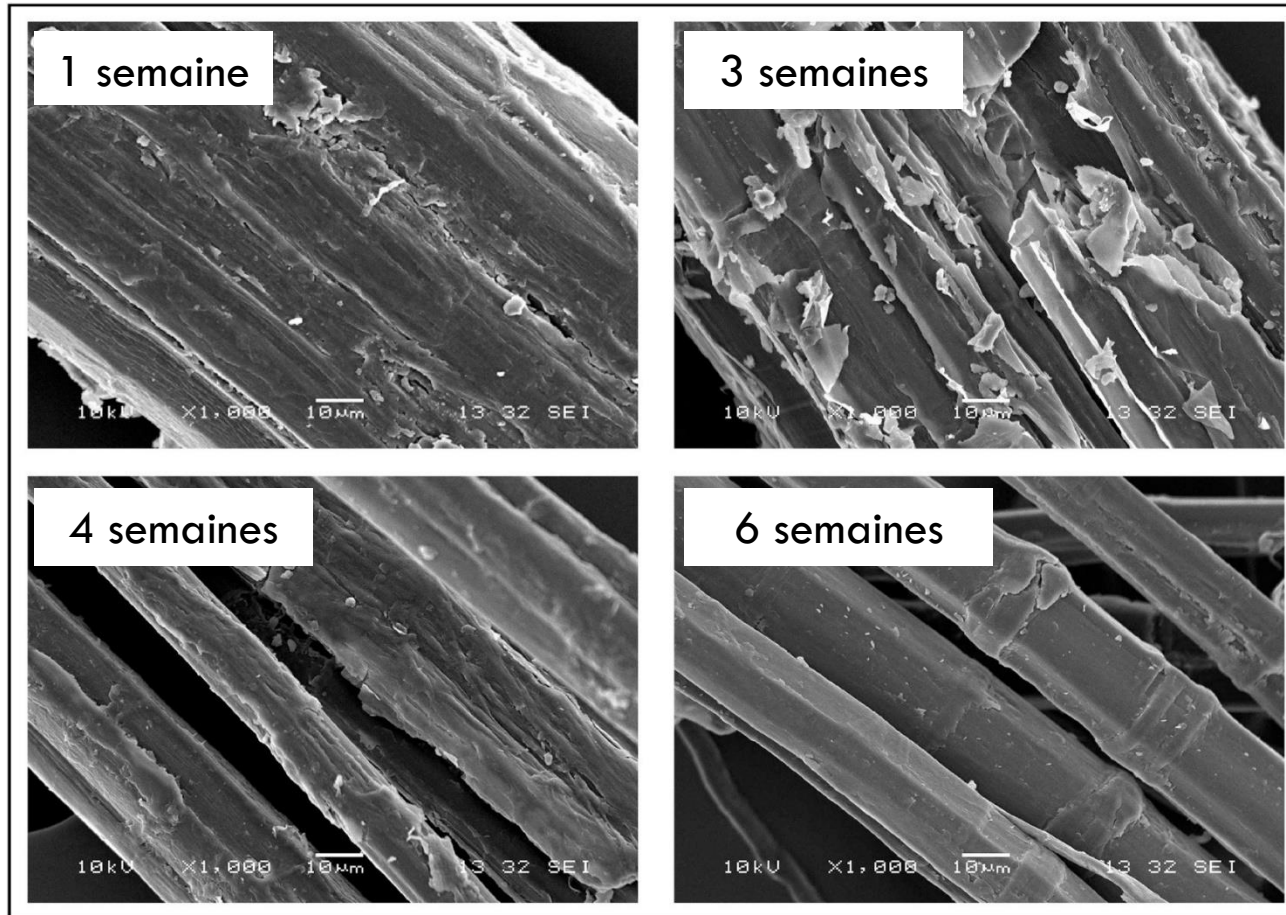
Transformation des pailles: Rouissage au champ

➤ Couleur des fibres longues



Transformation des pailles: Rouissage au champ

➤ Morphologie des fibres longues

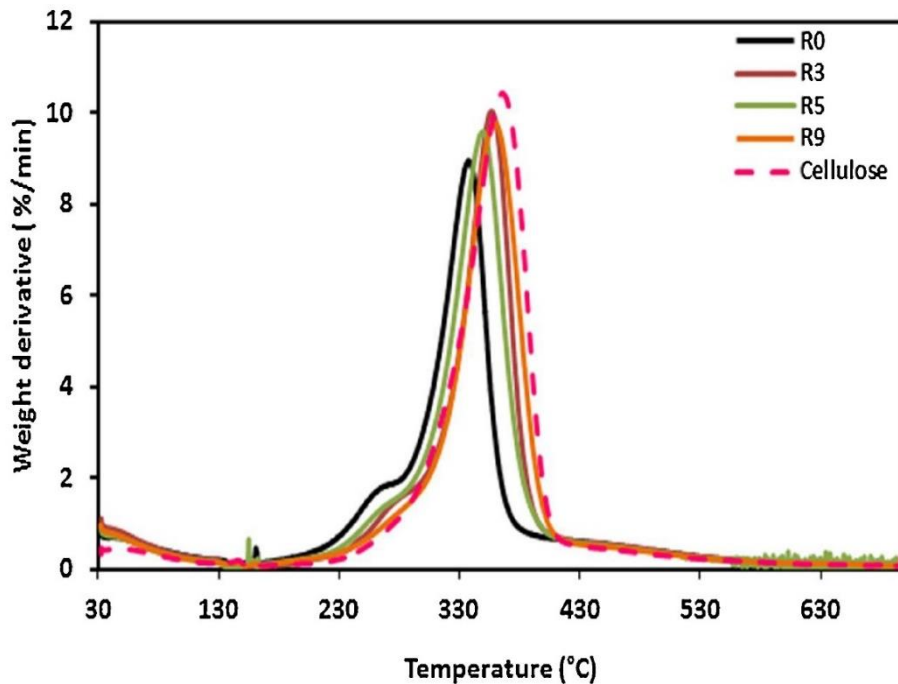


Observation des fibres longues de lin extraites après rouissage

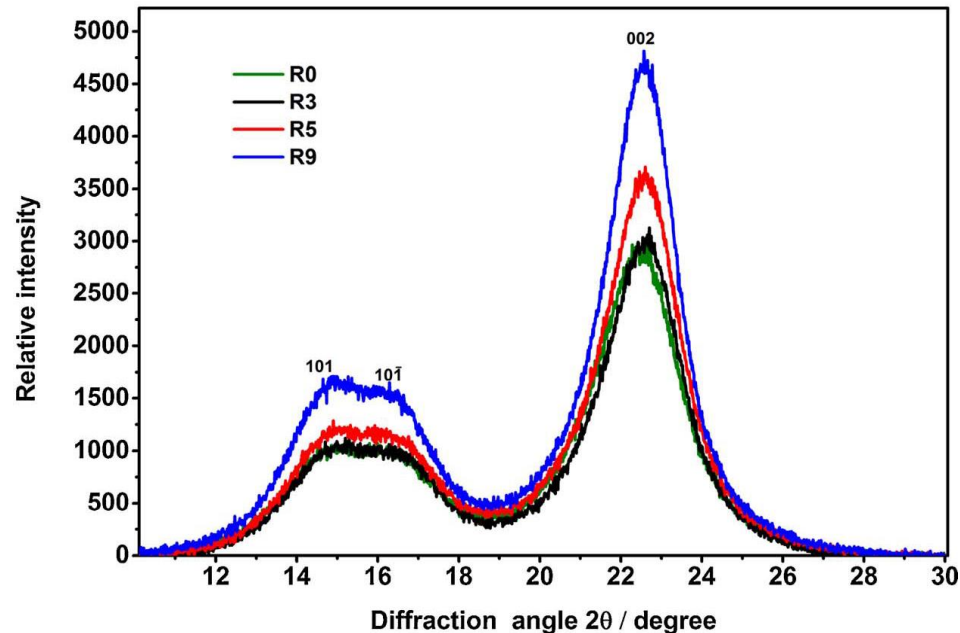
Transformation des pailles: Rouissage au champ

➤ Propriétés des fibres longues

- Thermogravimétrie



- Cristallinité

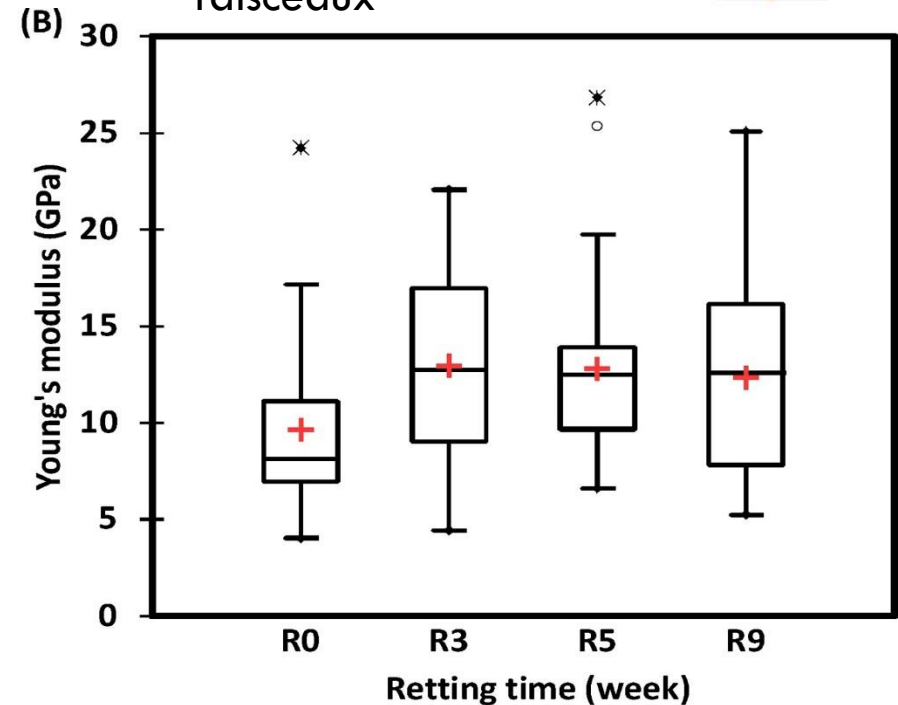
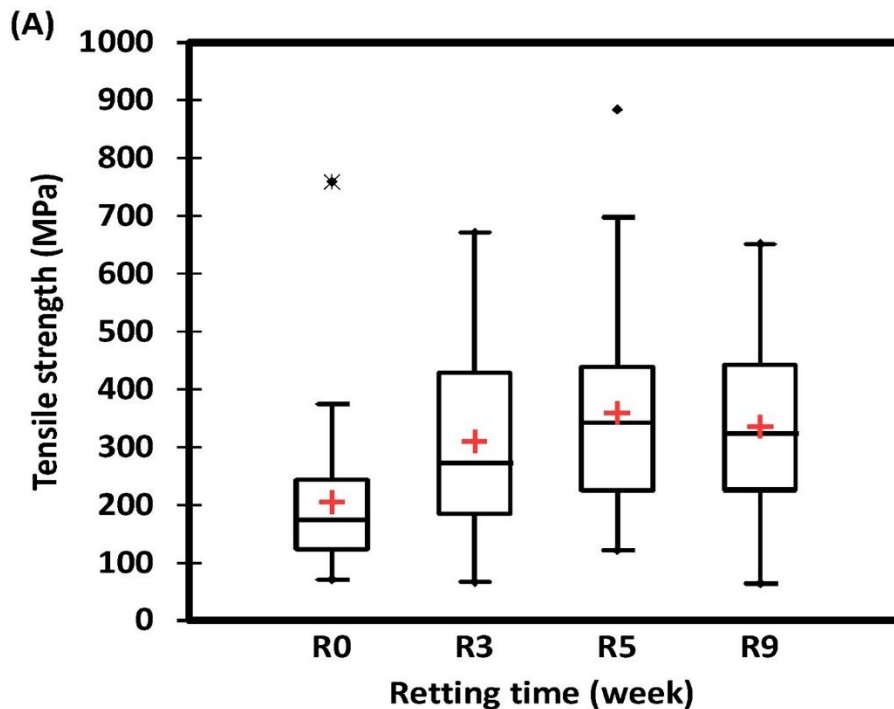
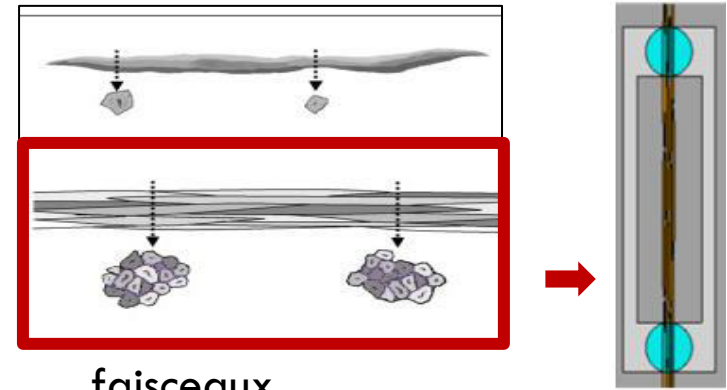


Mazian et al, 2018

Transformation des pailles: Rouissage au champ

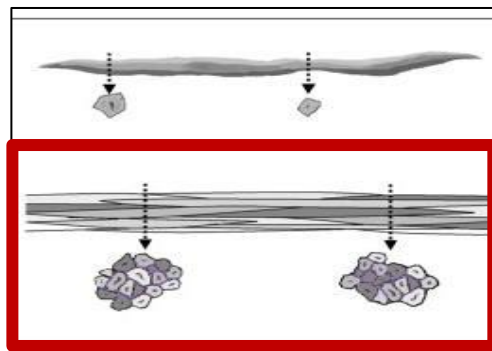
➤ Propriétés des fibres longues

- Propriétés mécaniques (traction)

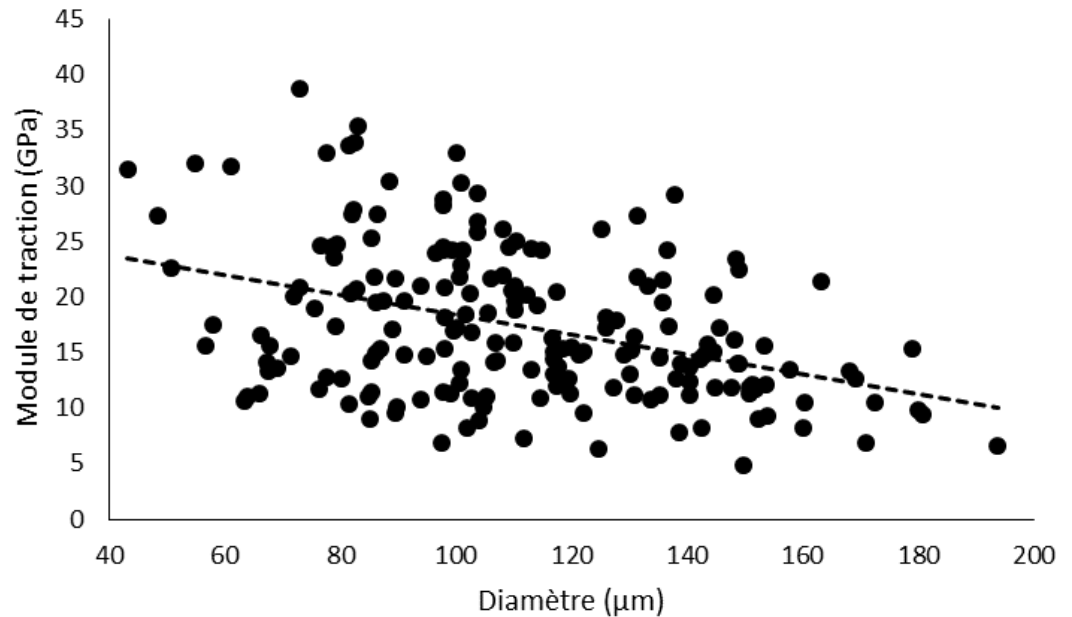


Transformation des pailles: Rouissage au champ

➤ Propriétés mécaniques des fibres techniques

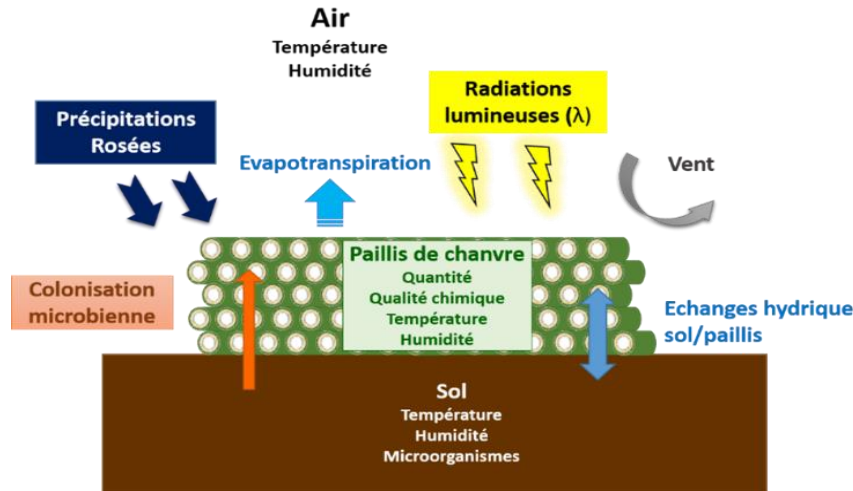


faisceaux



Peyrache, 2024

Transformation des pailles: Rouissage au champ



Durée de rouissage variable

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

- **Tests empiriques**

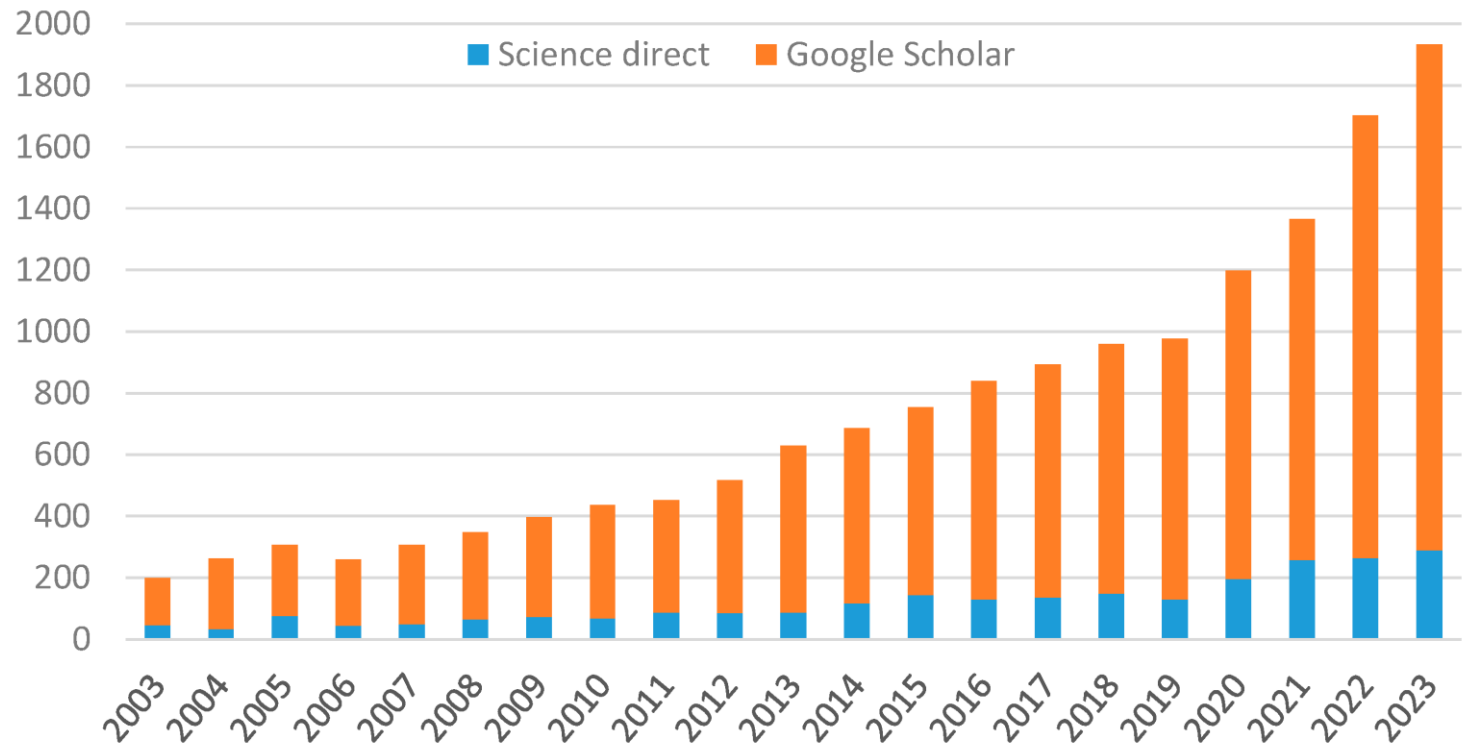
- Test manuel de séparation des tissus de la tige

- 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