

Fibres Végétales : les bases de la composition/l'ultrastructure et l'interrelation avec les procédés; les caractères variables et génériques



Johnny Beaugrand,
CR INRA, UMR 614, INRA-URCA, REIMS

Plan

- I. Description du monde des fibres végétales
 - 1.1 Définition générale
 - 1.2 Champs disciplinaires concernés par les fibres végétales
 - 1.3 Origine botanique
 - Des gisements d'origines anatomiques diversifiées
 - Classification des fibres issues des plantes et productions estimées
 - 1.4 Origines des particularités typologiques : génétiques et fonctionnelles
 - Développement des tissus
 - Zoom sur le développement radial
- II. Structure et composition des parois des fibres
 - 2.1 Structure des Parois des fibres
 - Types I aire et II aire
 - Paroi = Une construction hiérarchique multi-échelle, composite
 - 2.2 Composition des Parois des fibres
 - Illustrations de quelques structures moléculaires
 - Des typologies biochimiques
 - Relations structure moléculaires et propriétés aux échelles supérieures
 - Caractéristiques élastiques des polymères pariétaux
 - 2.3 Biosynthèse et ultra structure des Parois
 - Focus sur l'usine cellulaire
 - Focus sur la formation d'un réseau pariétal via des liaisons faibles et covalentes
 - 2.4 Ultra structure des Parois et gradient biochimique
 - Distribution hétérogène des constituants
 - Distribution hétérogène, un réseau interconnecté: effet de sa déstructuration
 - Typologies ultra structure-composition de fibres
 - 2.5 Ultra structure des Parois et propriétés locales
- III. Propriétés des fibres
 - 3.1 Propriétés multi échelles
 - 3.2 Hiérarchie des facteurs ultra structuraux sur les propriétés des fibres
 - Focus sur les zones de faiblesse ou concentration de contraintes
 - Création de défauts: les procédés
 - Microstructure: changement locaux et brusques de l'orientation des MFA
 - 3.3 Variation dimensionnelles/géométriques le long d'une fibre et d'un faisceau
 - 3.4 Facteurs de forme des fibres végétales des fibres
 - Longueurs et facteur de forme pour des applications de renfort
 - 3.5 Evolution des propriétés élastiques en fonction des caractéristiques des fibres
 - Les diamètres, densités, dispersion des performances
 - Emergence de traits explicatifs
 - 3.6 Comparaison avec les fibres synthétiques
 - 3.7 Variation des propriétés en fonction des conditions d'environnement: H2O
 - Module Elastique, résistance, fracture
 - 3.8 Réponse mécanique et structural de fibre de bois sous contrainte
- IV. Intérêts et perspectives industriels pour les fibres végétales
- V. Quelques conclusions

1.1. Définition générale

Fibre végétale = plus petit élément intact délimité par une paroi

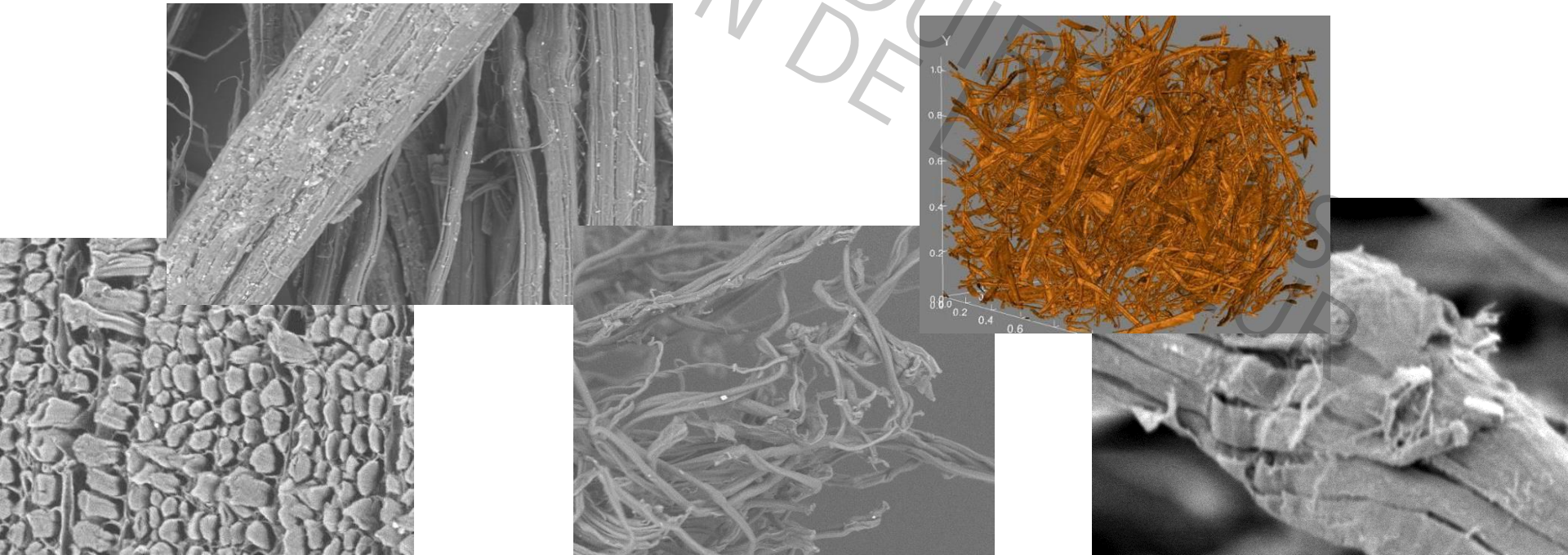
C'est une cellule (active-sénescence)

Généralement de forme allongée, creuse et fermée à ses extrémités (± 'paille')

Attention à la terminologie, généralement les fibres sont associées en faisceaux

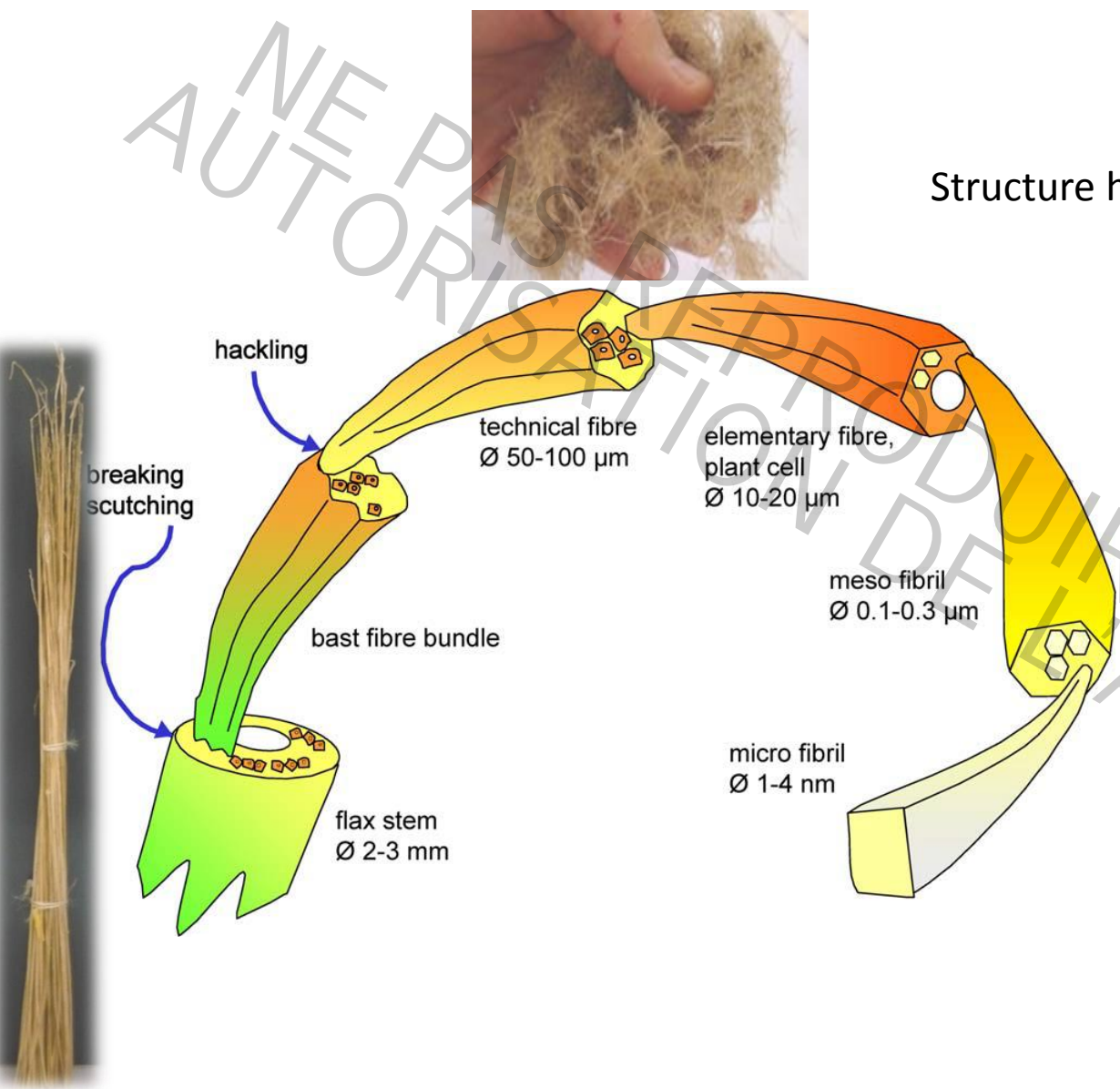
= composite créé par la Nature

(Vincent, 2000, Appl. Compos. Mater.)

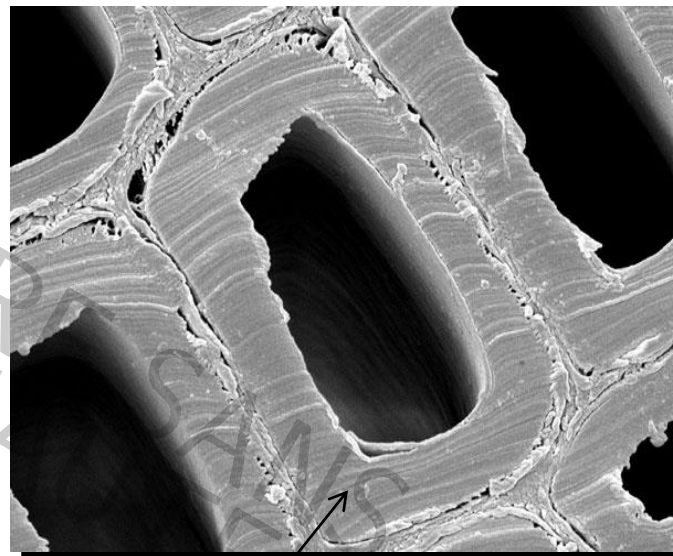


1.1. Définition générale

Plante-fibre, une structure organisée multi-échelle



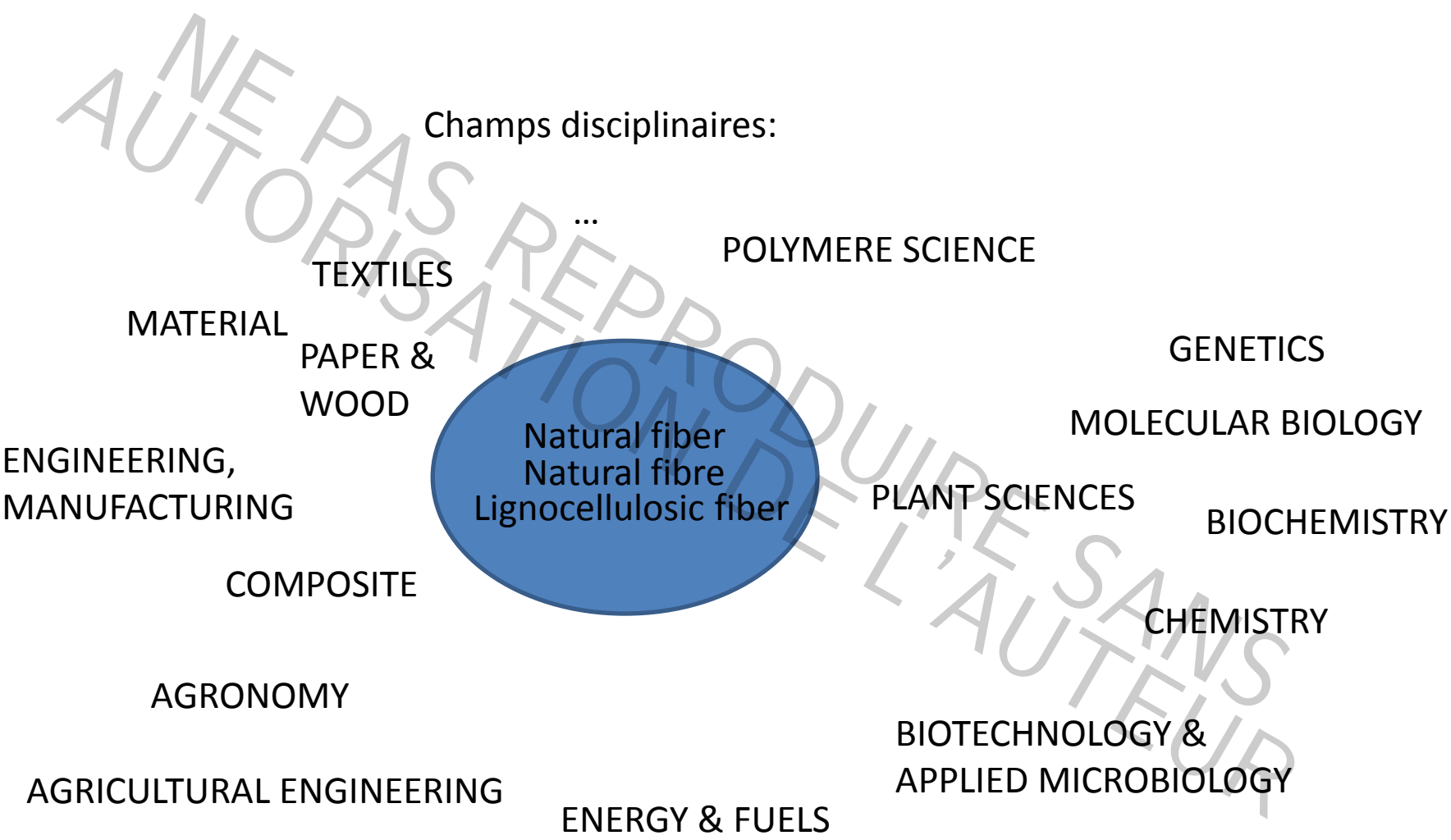
Structure hiérachique



Une paroi végétale
= le squelette d'une cellule
= une forme allongée avec
des extrémités bouchées

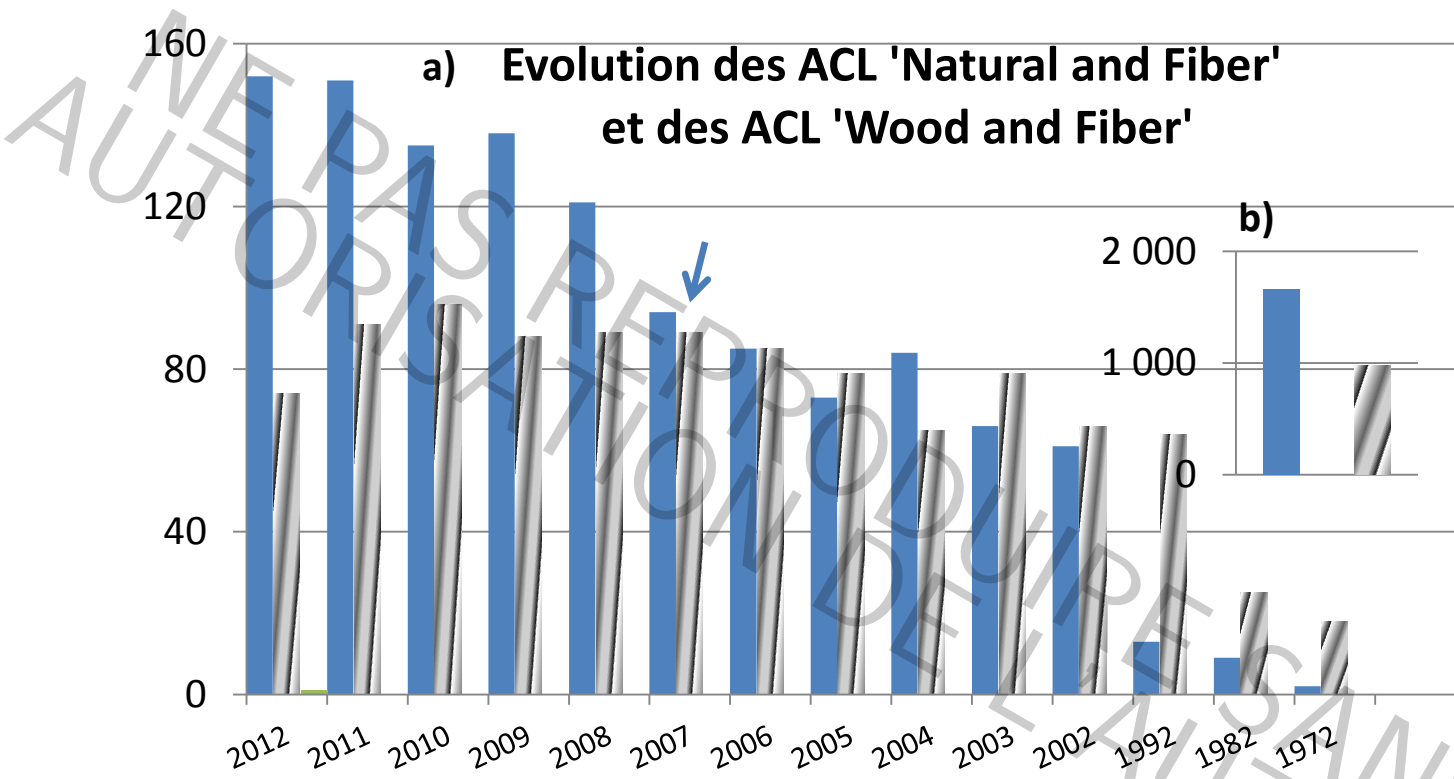
1.2 Champs disciplinaires concernés par les fibres végétales

Qui les étudie?



1.2 Champs disciplinaires concernés par les fibres végétales

Les tendances de la recherche



Inversion du nombre d'ACL, les fibres longues (tiges/feuilles) 'dépassent' les fibres courtes (bois)

car 'crise' des secteurs bois/papier
et les composites fibrosourcés investissent des secteurs économiques
traditionnellement utilisateurs de 'synthétique'
+ performances /demande sociétale / normes...

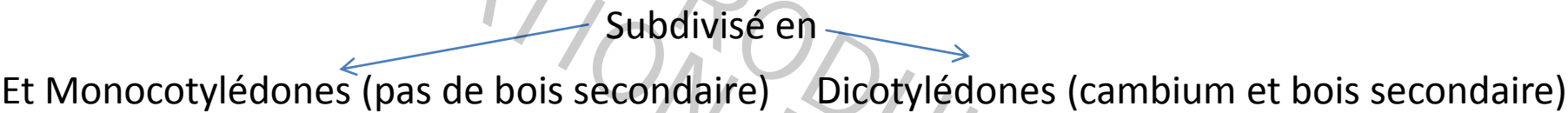
1.3 Origine botanique

Règne des Plantae

-Gymnosperms (bois 'softwood'), et angiosperms (bois 'hardwood' et plantes annuelles)

*Gymnosperm*os signifiant 'semence nue', 20 000 espèces, bois conifères (sapin), thuyas, épicéa...

Angiosperme signifie 'graine dans un récipient', 250 000 à 300 000 espèces, bois feuillus (chêne)



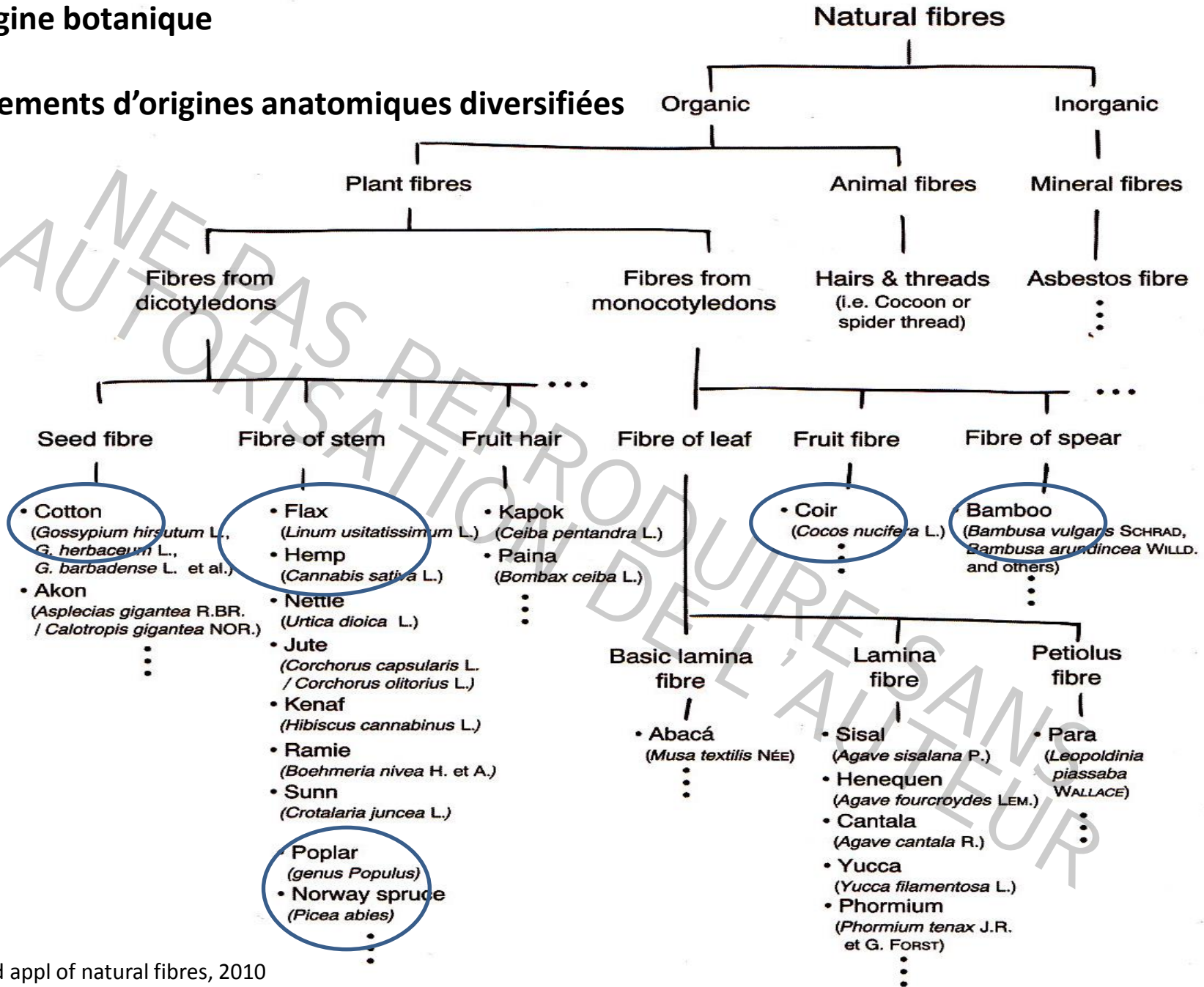
Bois
(gymno/angio)

Plantes annuelles
(angio mono ou dicotyledones)

Des organismes et génomes très différents = contribution à des fibres de typologies contrastées

1.3 Origine botanique

Des gisements d'origines anatomiques diversifiées



Müssig, Ind appl of natural fibres, 2010

Des fonctions différentes = contribution à des fibres de typologies contrastées

1.3 Origine botanique

Des gisements d'origines anatomiques diversifiées



Hemp



Bamboo

Cecilia Nam's Weblog

Abaca



© W.P. Armstrong 2000



Coir



Miscanthus



Sisal



Cotton

Fibres végétales = un monde hétérogène:
formes/dimensions/compositions/localisations géographiques /disponibilités...

1.3 Origine botanique

Classification des fibres issues des plantes et productions estimées

Table 2 Classification of plant fibres

Bast	Leaf	Seed					Grass/reed	Other
		Fibres	Pod	Husk	Fruit	Hulls		
Flax (622)	Sisal (361)	Cotton 23295)					Wheat	Wood
Jute (3056)	Pineapple		Kapok (99)				Corn	Roots
Hemp (214)	Agave (34)			Coir (1058)			Rice	
Kenaf (500)	Banana				Oil palm		Bamboo (30000)	
Ramie(118)	Abaca(95)					Rice	Bagasse (75000)	
(5000)	(600)	(25000)					(>1000000)	(>100000)

If data was available from the FAO database [34], the global production estimates (10³ tonnes) for 2010 are given in brackets. The bottom-most row gives the estimated total global production quantity (10³ tonnes; from [11, 34]) for each category

Des volumes et des zones climatique de culture contrastés

1.4 Origines des particularités typologiques : génétiques et fonctionnelles

Les structures/compositions sont liées **aux rôles** occupés des fibres **dans la plante**:
(de là les usages logiques conçus par l'Homme)

- adaptation aux contraintes mécaniques (port dressé, environnement etc...)
- conduction (sève primaire ou élaborée) et soutien,
- stockage de réserve,
- protection et
- transport des graines (poils)

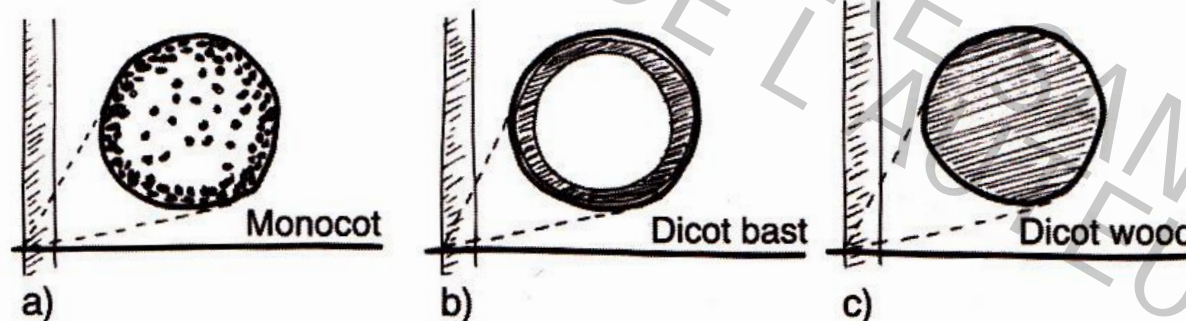
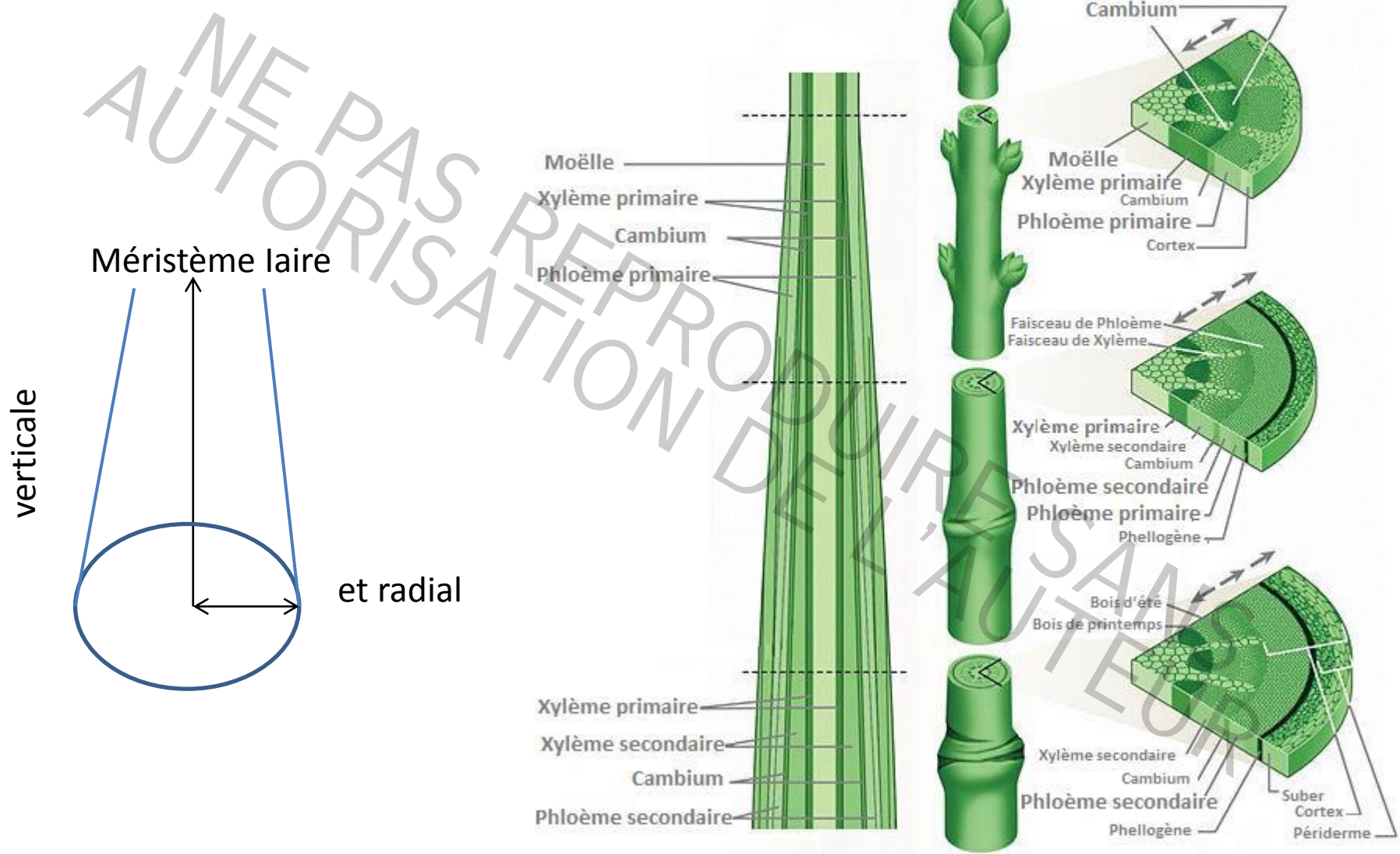


Figure 2.2.1 Schematic drawing showing possible locations of fibres within stems of monocotyledonous and dicotyledonous plants and trees (both dicotyledonous and gymnosperm trees).

1.4 Origines des particularités typologiques : génétiques et fonctionnelles

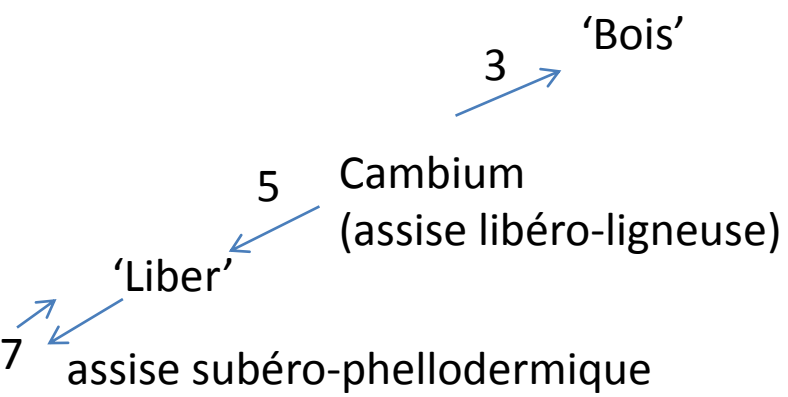
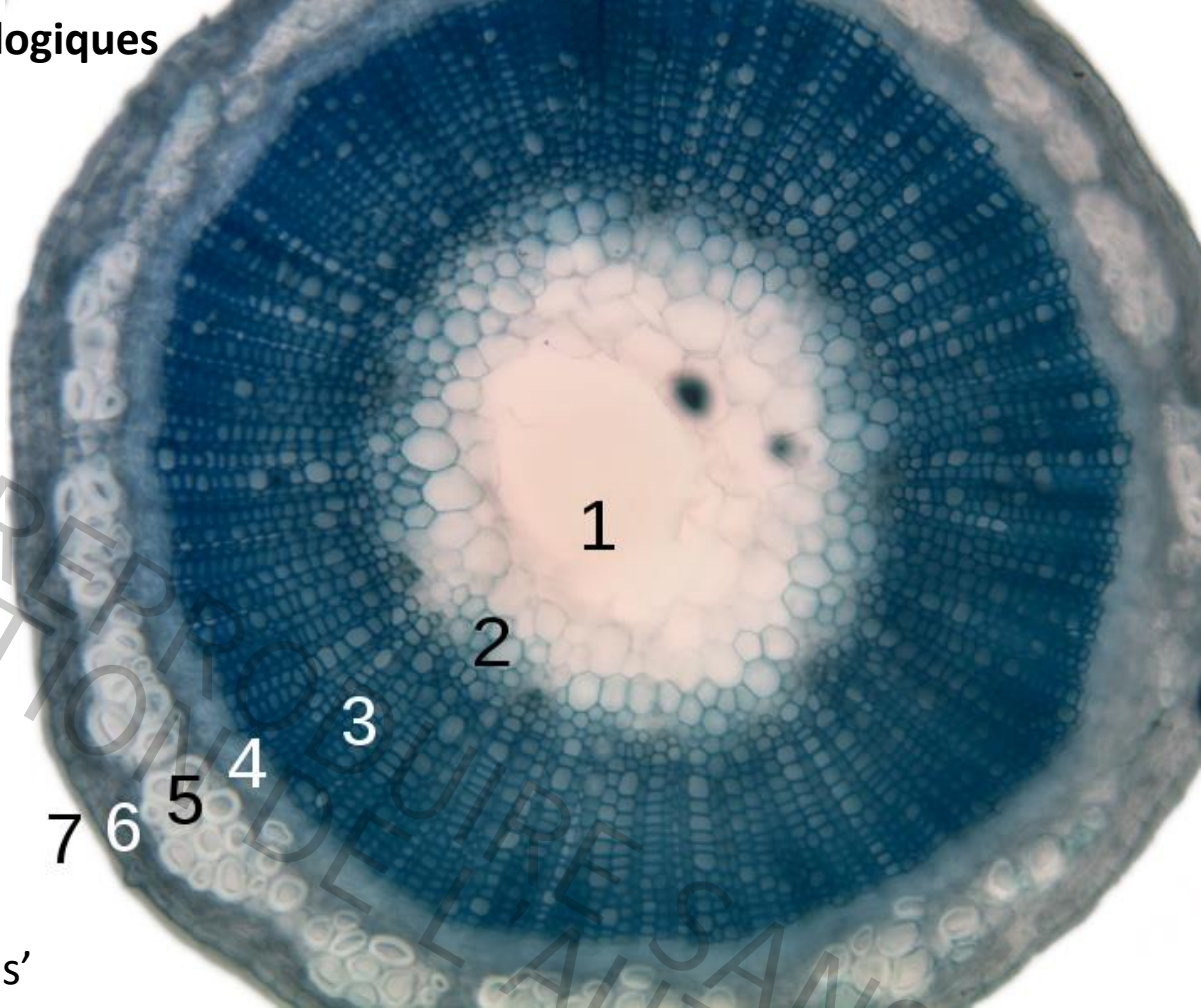
Développement des tissus:



1.4 Origines des particularités typologiques

Zoom sur le développement radial

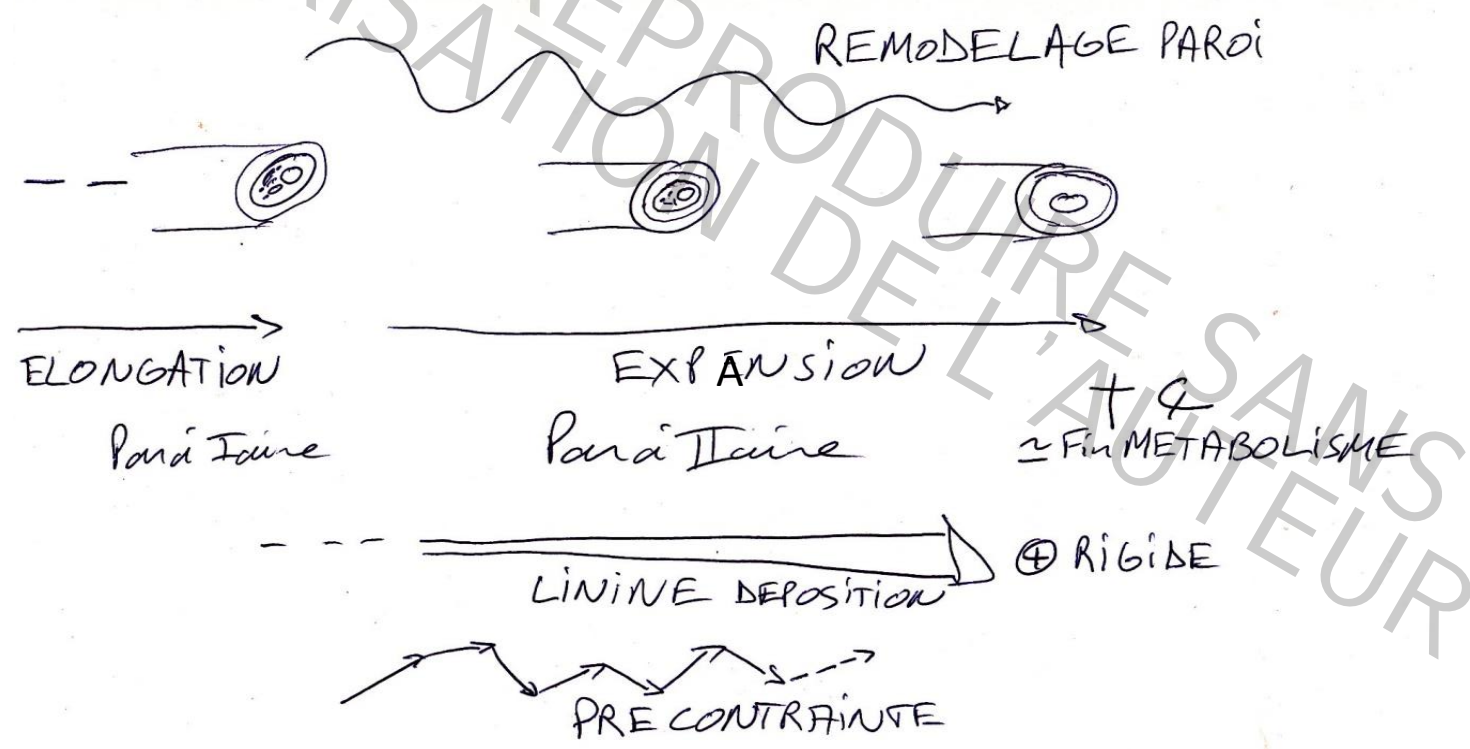
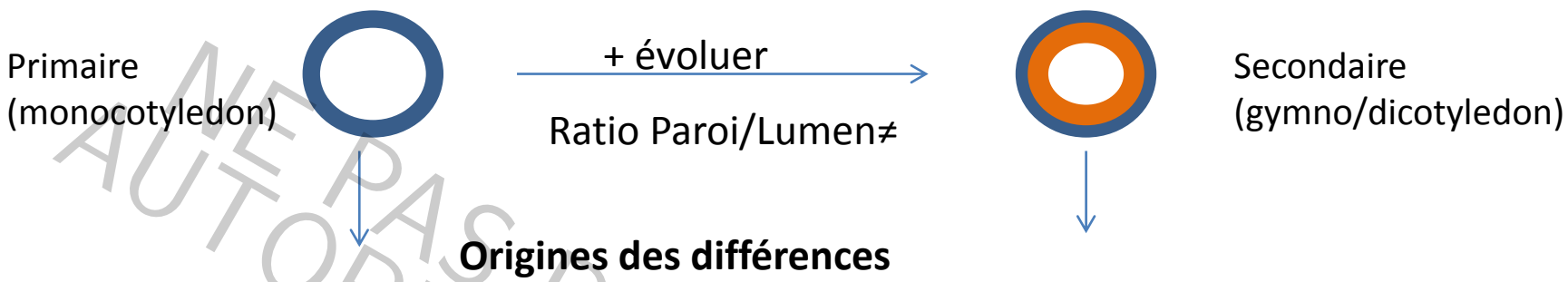
- 1. [Pith](#),
- 2. [Protoxylem](#),
- 3. [Xylem](#) I,
- 4. [Phloem](#) I,
- 5. [Sclerenchyma](#) ([bast fibre](#)),
- 6. [Cortex](#),
- 7. [Epidermis](#)



Coupe transversal d'une tige

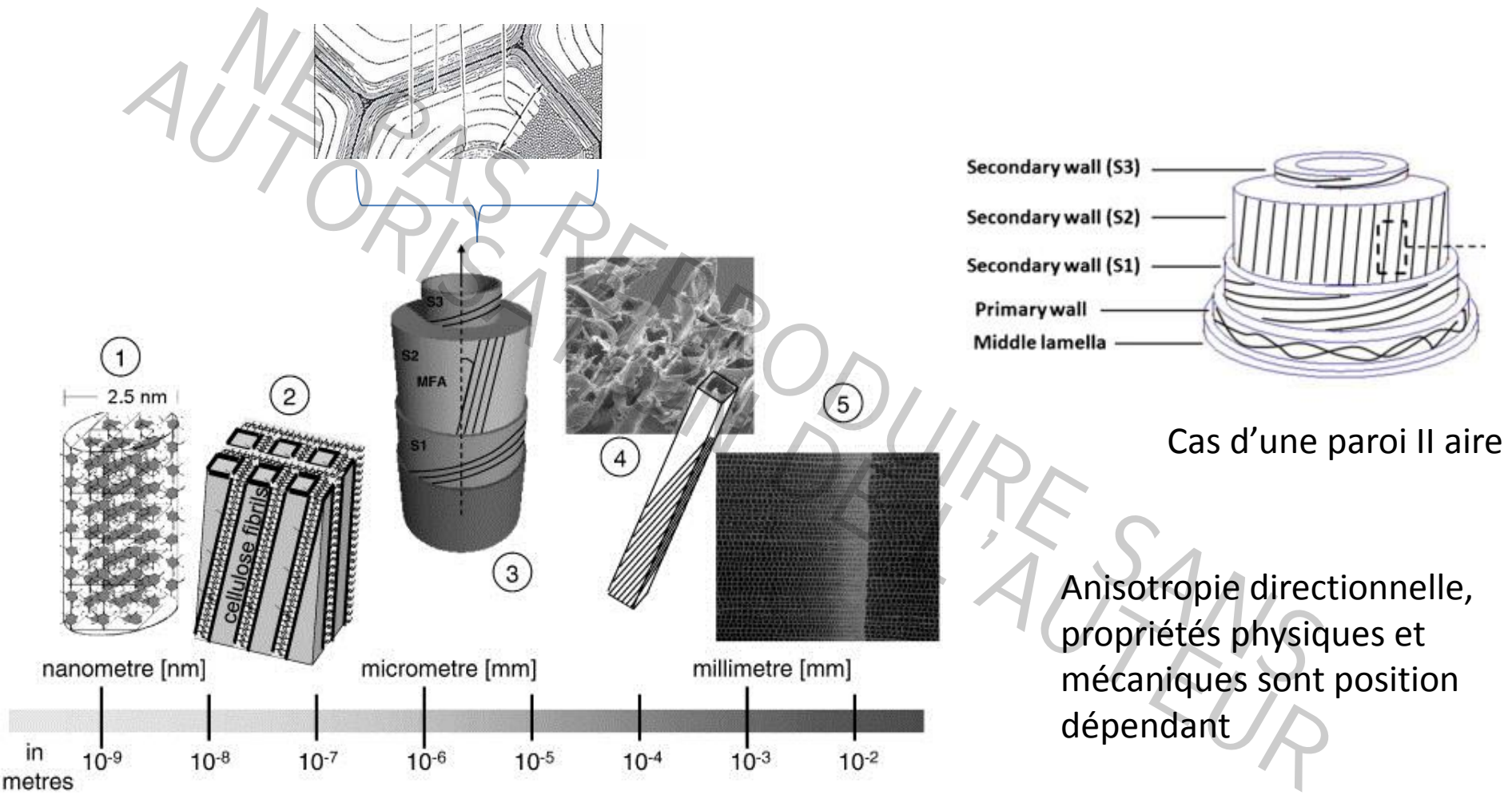
II. Structure et composition des parois des fibres

2.1 Structure des Parois des Fibres

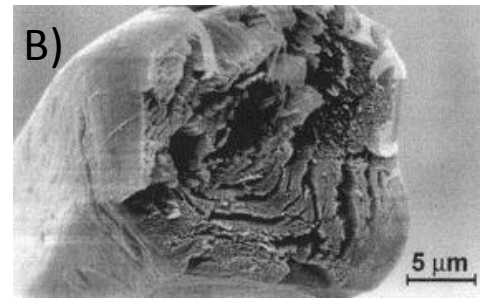
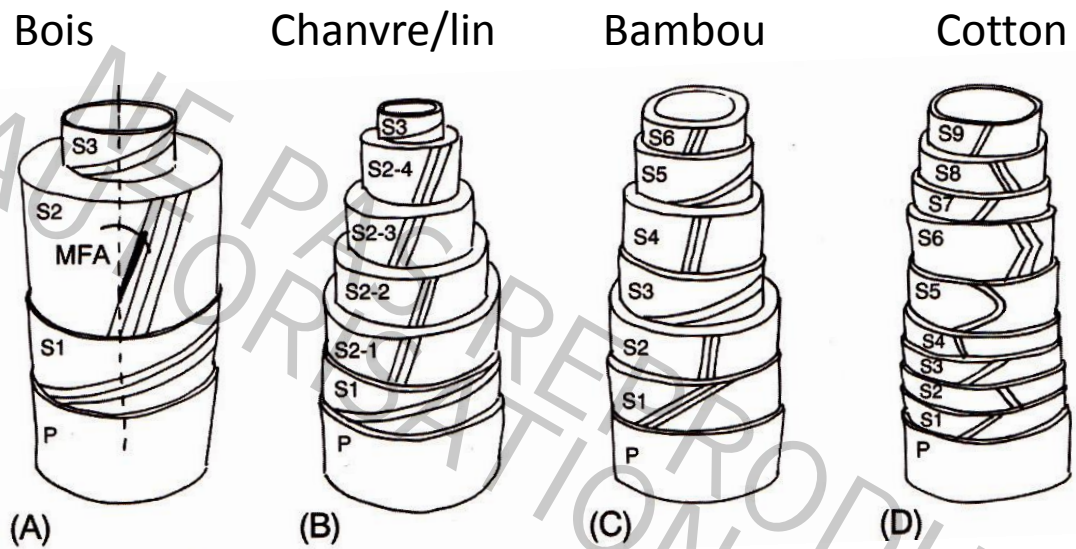


2.1 Structure des Parois des fibres

Paroi = Une construction hiérarchique multi-échelle, composite



2.1 Structure des Parois des fibres



Lin, fracture, (Romhany JAPS 2003)

Pourquoi des épaisseurs de parois II aires differentes?



Durée de vie cellulaire/activités enzymatiques plus étendues (de quelques jours à plusieurs mois)



Attention, **structures modèles**...encore des **controverses** (cas B)
Des auteurs rapportent aussi des zones de transitions (MFA) à l'intérieur des sous couches

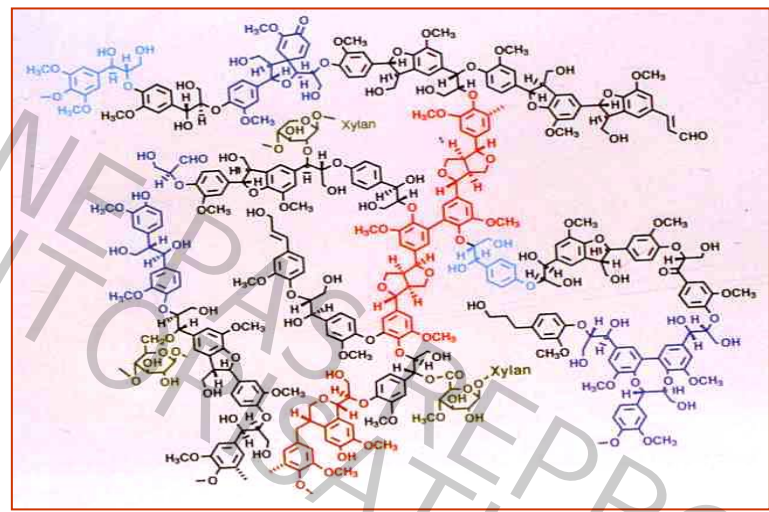
2.2 Composition des Parois des fibres

Famille	% massique (indicatif)	Fonctions connues/supposées
(Poly)saccharides	de 50 à 98 % cellulose; hémicellulose et substances pectiques	Structure/signalisation etc...
Lignine et assimilés imperméabilisant/protection...	de 2 à 30% phenylpropanoïde, acides hydroxycinnamique etc...	Structure (rigidification)/
Lipides, cires et dérivés cutine hydroxyacides, cires esters d'acide gras et d'alcool, subérine (cutine et Triglyrecides)	de traces à 1%	Protection/signalisation
Protéines remodelage parois)	traces à 10 % Extansines (<i>Hydroxyprolin Rich Glyco Protein</i>) et stress relaxation, Arabino Galactan Protein (AGP)	Structure/ défense/catalyse (biosynthèse et
Extractibles metabolisme...	de 1 à 5% Ca ²⁺ (HG), oligosaccharide,famille 'fourre-tout'	Signalisation, structure, plastifiant, vestiges du
Eau	de quelques % à '30%'	prop. viscoelastoplastique, catalyse...

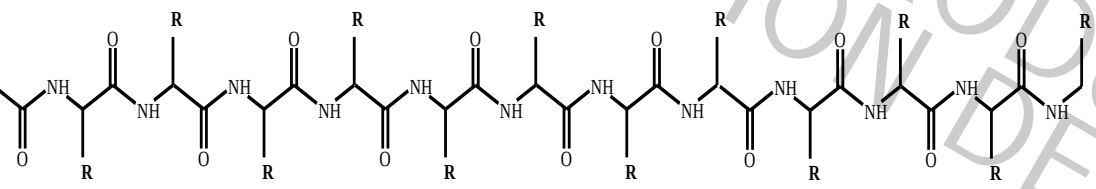
2.2 Composition des Parois des fibres

Illustrations de quelques structures moléculaires

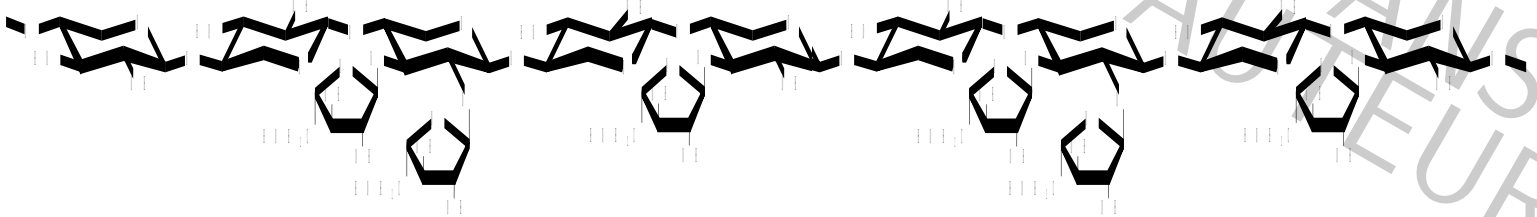
Lignines
3 monomères



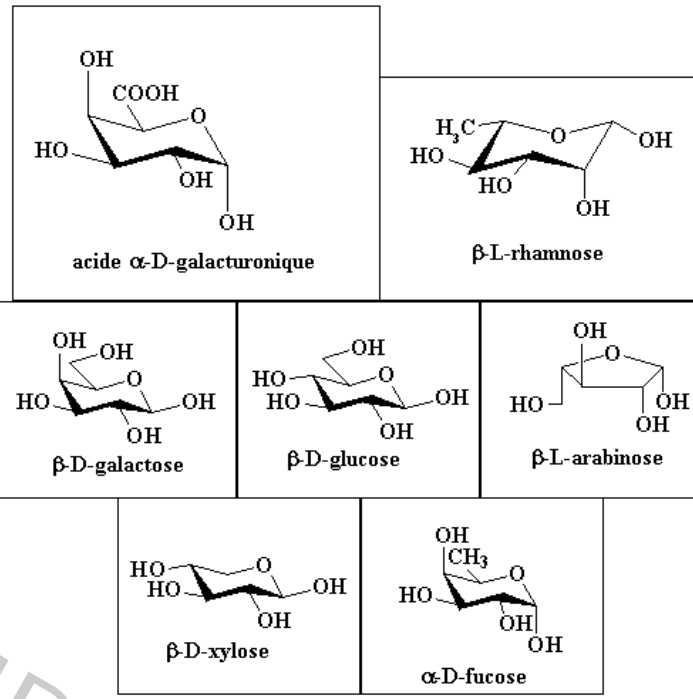
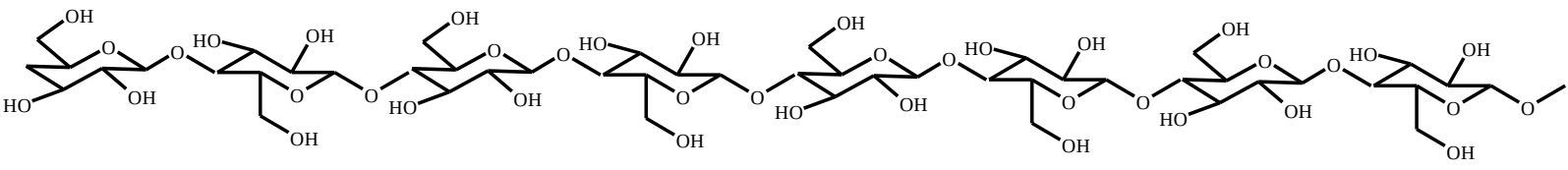
Protéines (20 monomères)



Hémicelluloses/substances pectiques



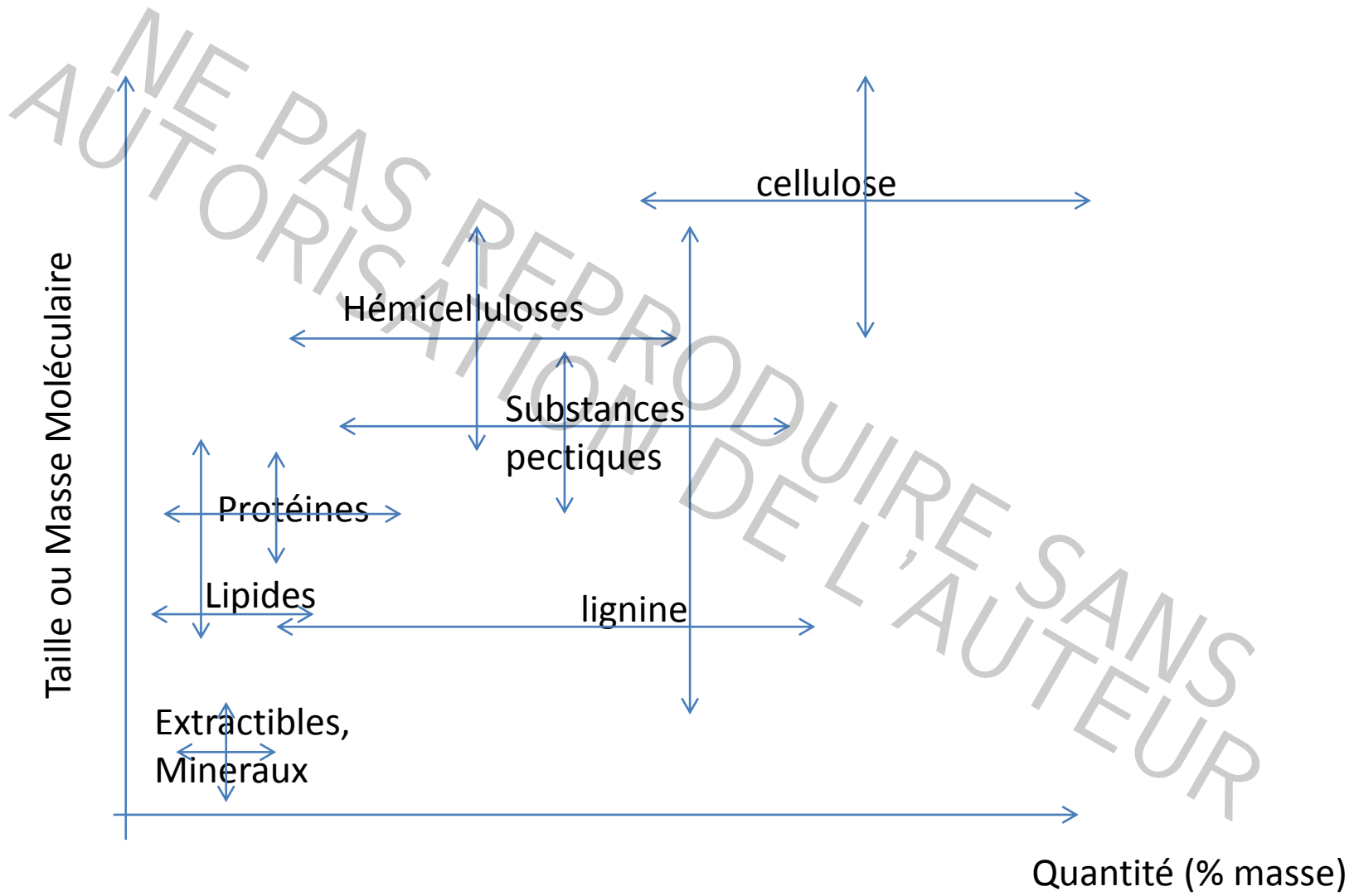
Cellulose (1 monomère) n jusqu'à 10 000



Quelque uns des monosaccharides
(oses) des parois

2.2 Composition des Parois des fibres

Représentation simplifiée et non exhaustive des quantités et longueurs moléculaires des composés pariétaux



2.2 Composition des Parois des fibres

Des typologies biochimiques

TABLE 1: Chemical composition and ultrastructure of wood and plant fibers.

	Chemical composition			Reference
	Cellulose (% w/w)	Hemicellulose (% w/w)	Lignin (% w/w)	
Wood fibers	-	+	+	
Spruce	49	20	29	[25]
Pine	42	29	28	[26]
Pine (kraft pulp)	76			[27]
Cedar	44	21	30	[28]
Balsa	48	28	22	[26]
Birch	41	32	22	[26]
Poplar	39	28	30	[28]
Soft wood				[12]
Plant fibers	+	-	-	
Hemp	63	10	6	[25]
Hemp	64	14	3	[29]
Hemp (retted)	74	12	5	[20]
Hemp (scutched)	66	15	5	[29]
Flax (cottonized)	76	14	2	[29]
Hemp (textile)	91	7	2	[14]
Hemp and flax				[13]

Fibres ‘Bois’ moins cellulosiques que fibres ‘longues’

Des exceptions...Exemple les fibres des ‘bois de réaction’

2.2 Composition des Parois des fibres

Relation structure moléculaire et propriétés aux échelles supérieures

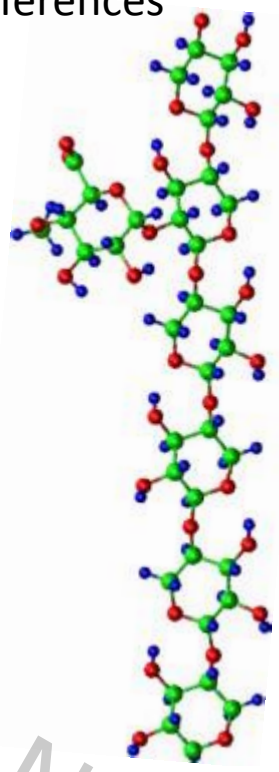
Facteurs à considérer, à l'échelle de la molécule, pour expliquer les différences de propriétés conférées aux fibres (hors paramètres structuraux)

Propriétés intrinsèque de la molécule:

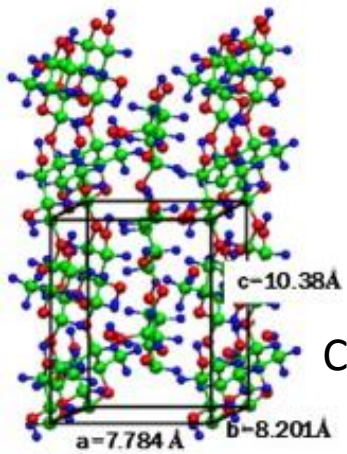
Force des liaisons qui la compose (hexose $\neq$ pentose) et donc la nature atomique

Géométrie de la molécule, nature linéaire (cellulose) ou ramifiée (hemicellulose, lignines) soit rigidité E , σ etc... si polymère, sa T_g

Capacité à créer dans son environnement des liaisons faibles (cellulose; hydrogène, Van der Waals) ou fortes (lignine; covalentes)



4-O-methylglucuronoxylan



Cristal de cellulose

Liaisons eV/atome	Ionique -Covalente	hydrogène -Van der Waals
	10	0,1

2.2 Composition des Parois des fibres

Caractéristiques élastiques des polymères pariétaux familles

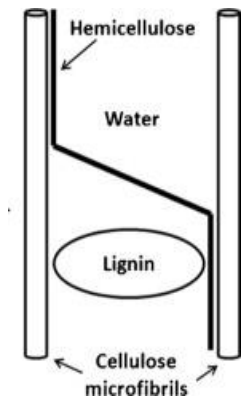
Table 5 Typical chemical composition of flax fibre, alongside the density and tensile stiffness of the various constituents

	Crystalline cellulose	Amorphous cellulose	Hemicellulose	Lignin	Pectin
Content in dry flax (wt%)	30–50	20–30	14–18	2–3	2–3
Density (g cm ^{−3})	1.6	1.42	1.4	1.4	–
Tensile modulus (GPa)	74–168	8–11	7–8	2–4	–

Table 3 Typical properties of the component materials in plant fibres

Material	Young's modulus (GPa)	Source	Reference
Amorphous cellulose	8.45	Experiment	Mark [18]
Amorphous cellulose	10.42 ± 1.08	Constant strain minimisation model	Chen et al. [19]
Dry hemicellulose	8.0	Indentation	Cousins [20]
Lignin at 3.6% moisture	6.7		Cousins [21]
Pectin hydrogels	~0.001–0.010	Fischer scientific P2	Liu et al. [34]
Pectin fibrils	0.003–0.114	Commercial citrus pectin	Lampitt et al. [35]

Comment les lignines de si faible E
‘rigidifient’ les parois?



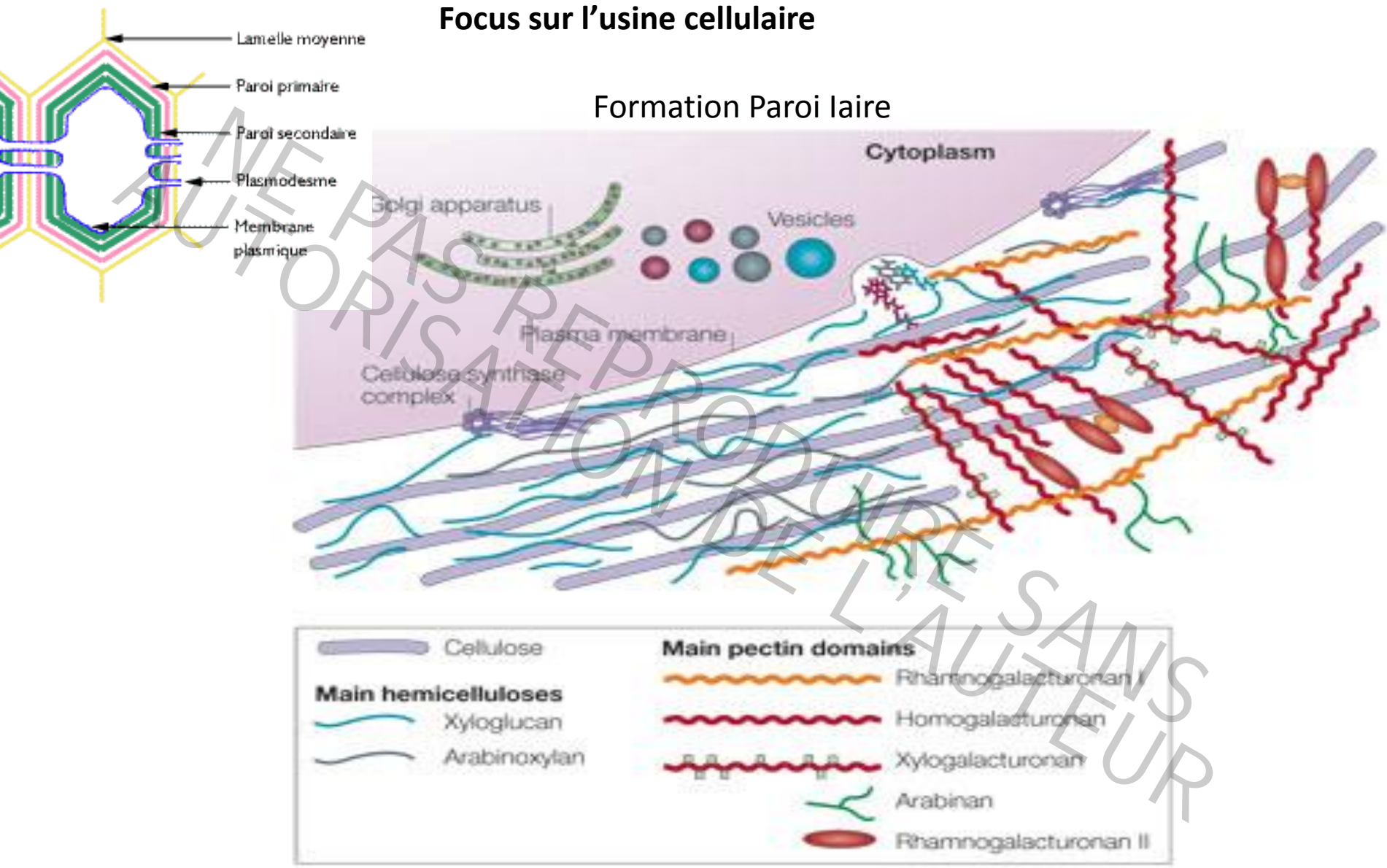
Changement de l’ultrastructure

‘théorie unifiée’
Yamamoto1998 Wood Sci Technol

2.3 Biosynthèse et ultra structure des Parois

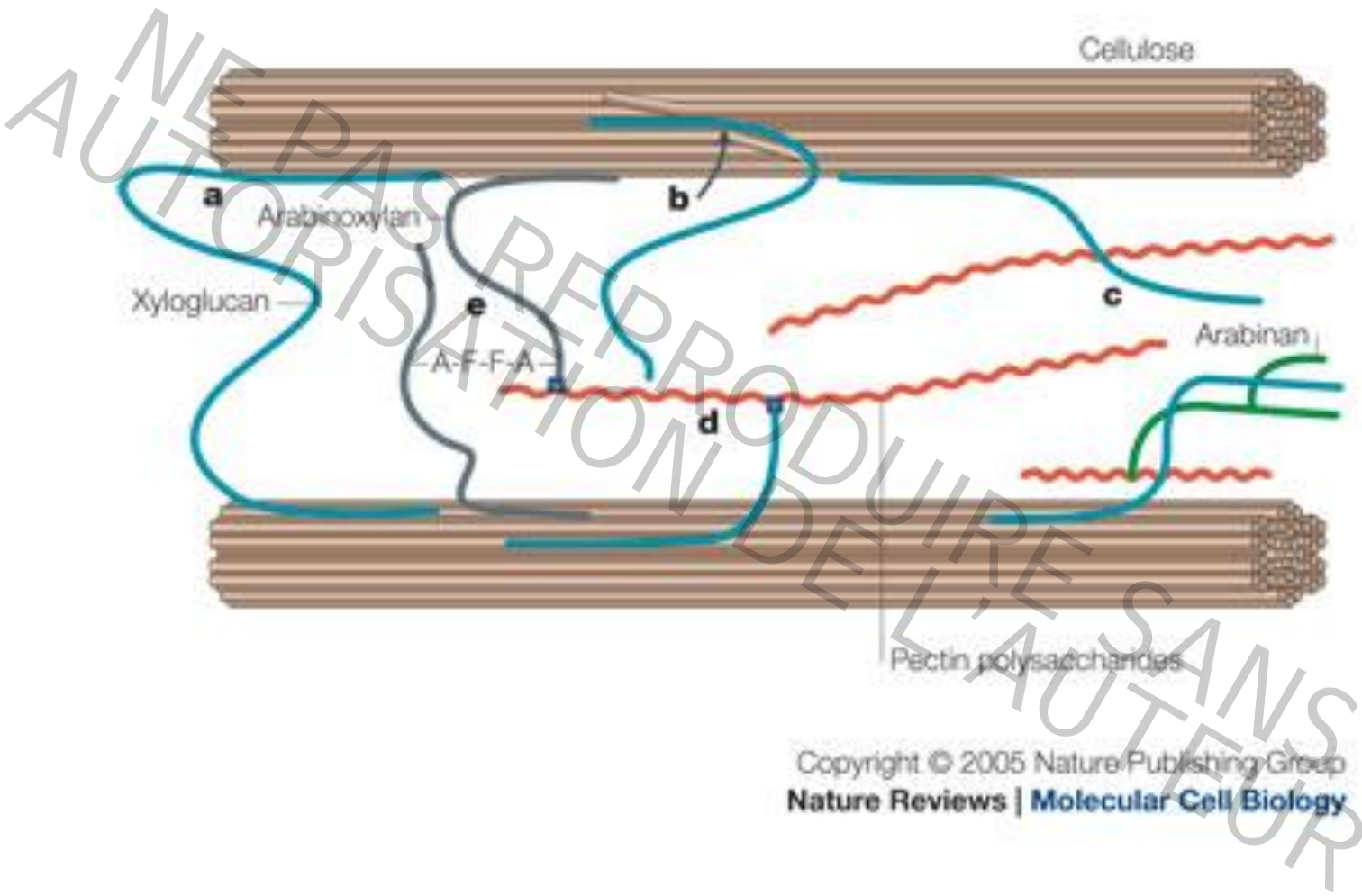
Focus sur l'usine cellulaire

Formation Paroi laire



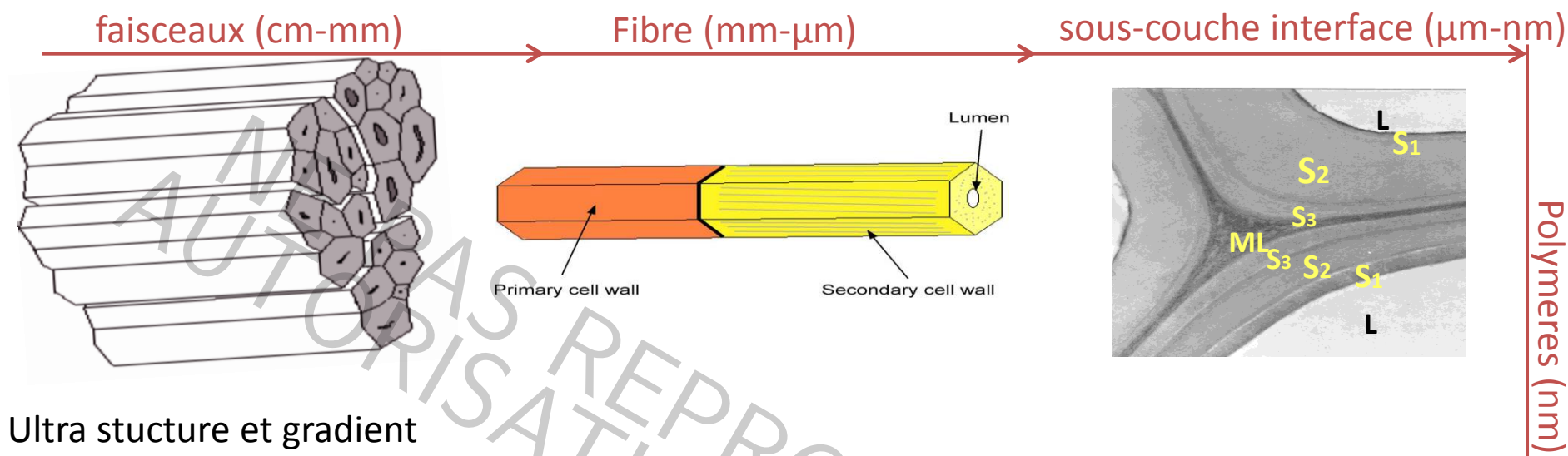
2.3 Biosynthèse et ultra structure des Parois

Focus sur la formation d'un réseau pariétal via des liaisons faibles et covalentes

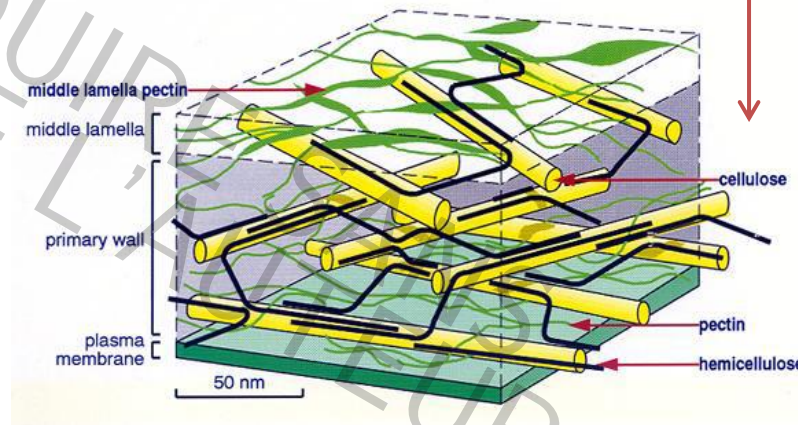
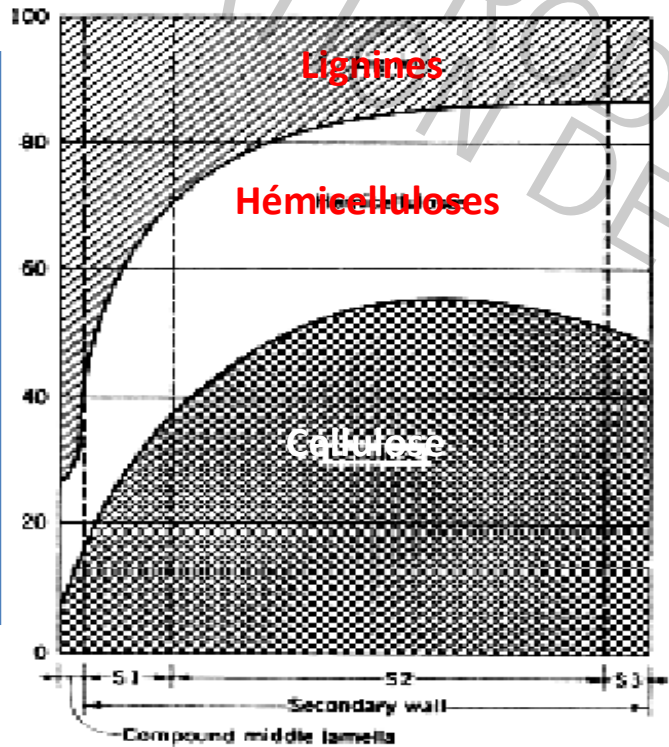
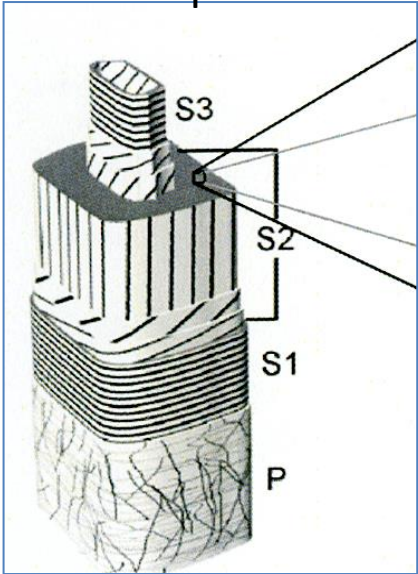


Attention, un modèle structural parmi d'autres

2.4 Ultra structure des Parois et gradient biochimique



Ultra structure et gradient biochimique



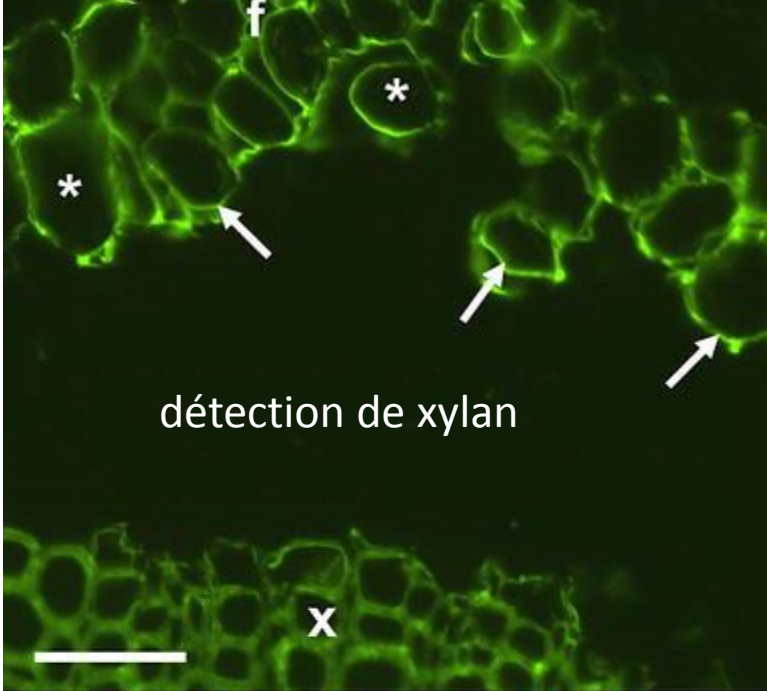
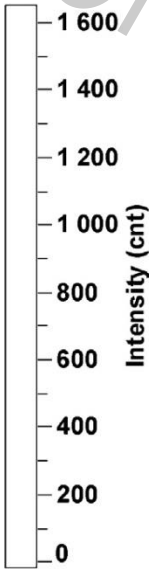
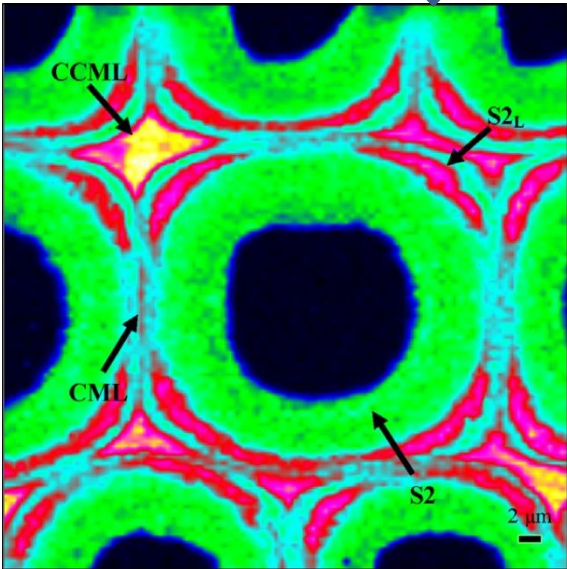
Un gradient de composition,
Une distribution des propriétés

2.4 Ultra structure des Parois et gradient biochimique

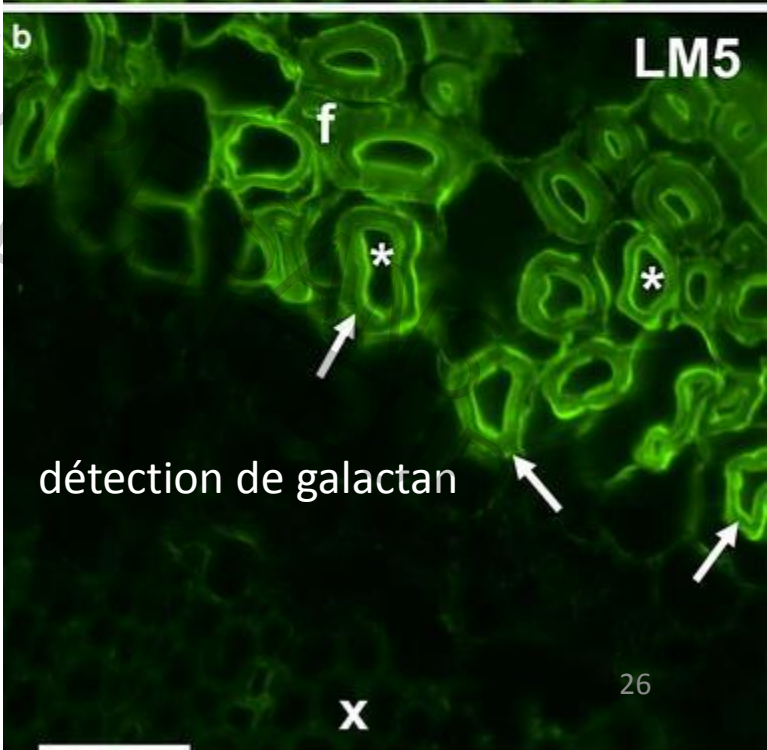
Distribution hétérogène des constituants

Immunolocalisation par fluorescence de classes d'hemicellulose sur une coupe de tige de lin ➡

Détection des lignines par Raman sur coupe de trachéites ➡



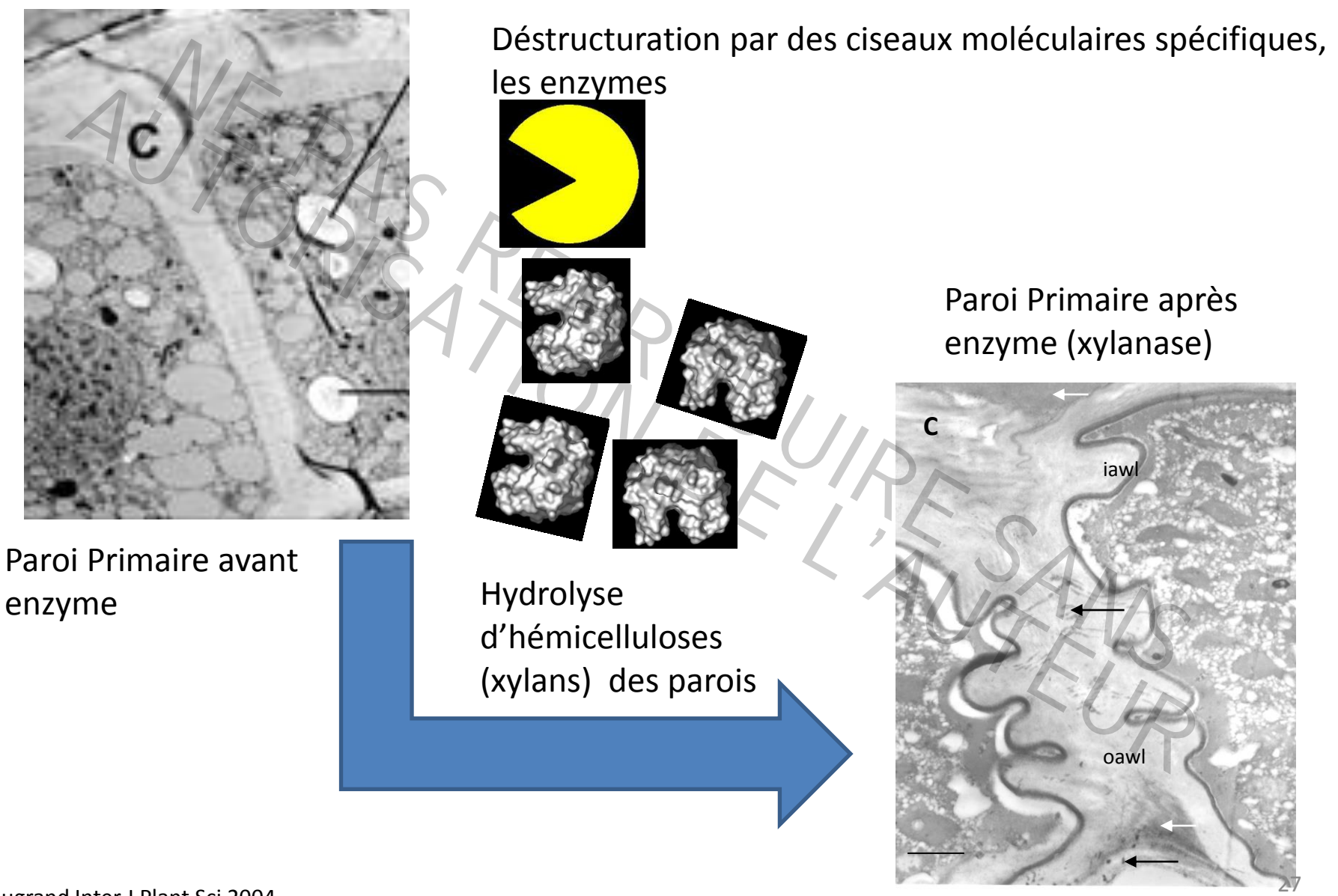
détection de xylan



détection de galactan

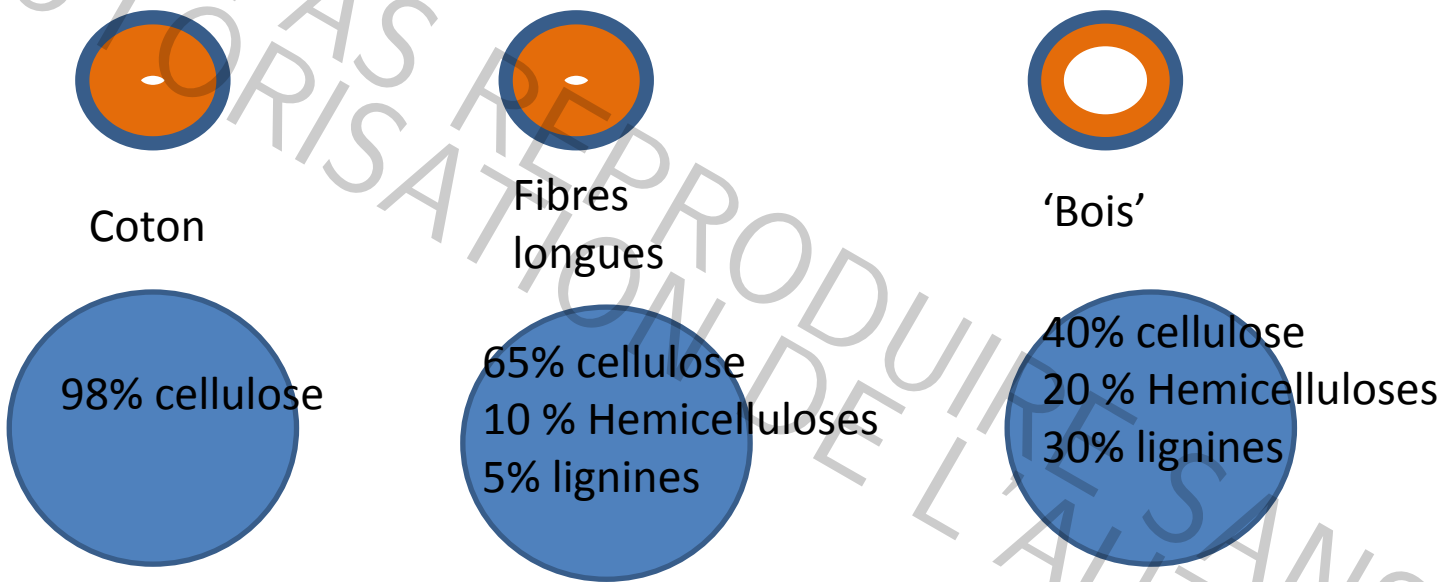
2.4 Ultra structure des Parois et gradient biochimique

Distribution hétérogène, un réseau interconnecté: effet de sa déstructuration



2.4 Ultra structure des Parois et gradient biochimique

Typologies ultra structure-composition de fibres :



2.5 Ultra structure des Parois et propriétés locales

Importance de la sous couche S2

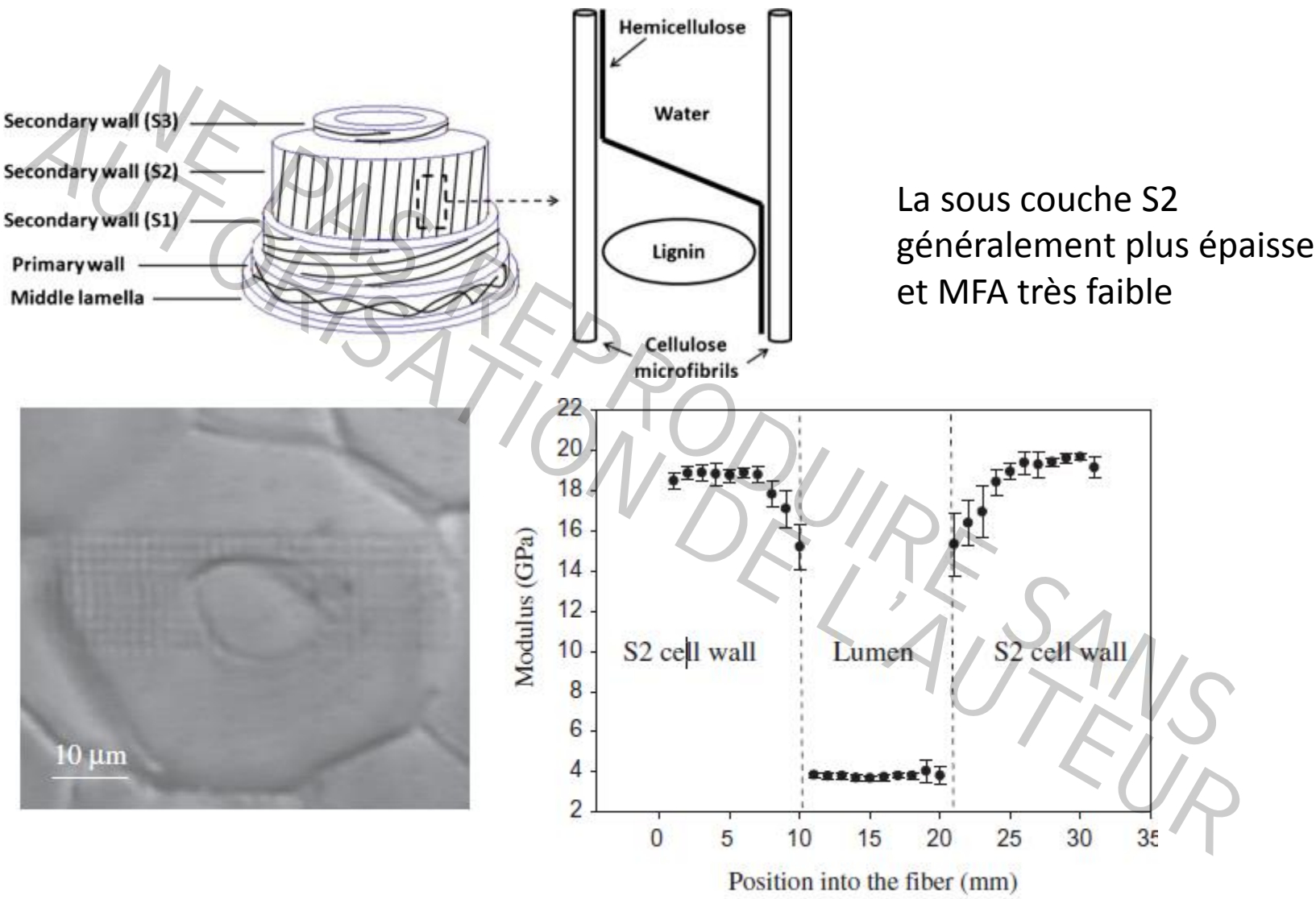


Fig. 4. Indents lines performed through an Oliver fiber section and profile of Young's modulus averaged values.

III. Structure et composition des parois des fibres

3.1 Propriétés multi-échelles

Exemple du bois

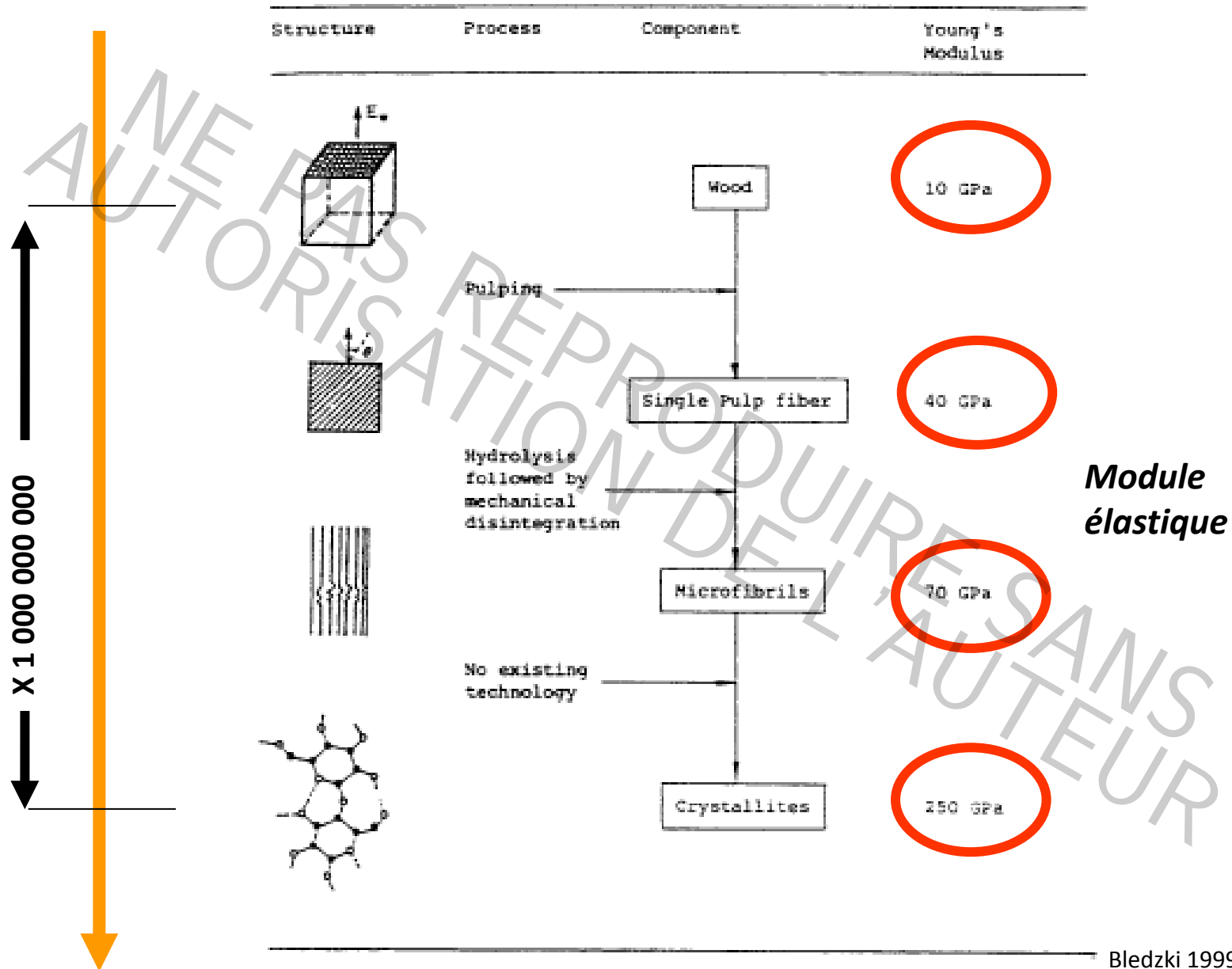


Fig. 1. Correlation between structure, who to process, resulting component, and modulus [12].

3.2 Hiérarchie des facteurs ultra structuraux sur les propriétés des fibres

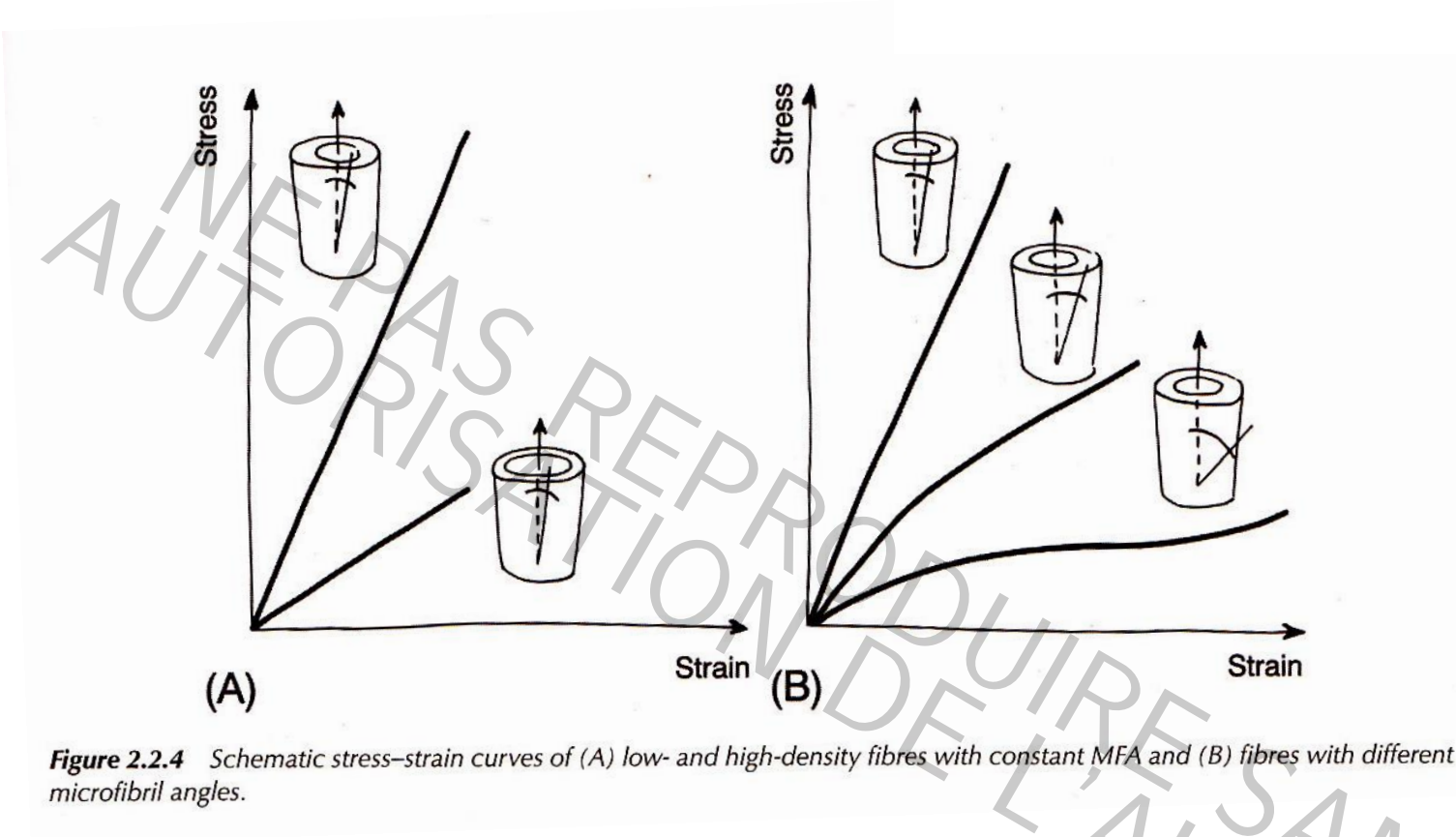


Figure 2.2.4 Schematic stress–strain curves of (A) low- and high-density fibres with constant MFA and (B) fibres with different microfibril angles.

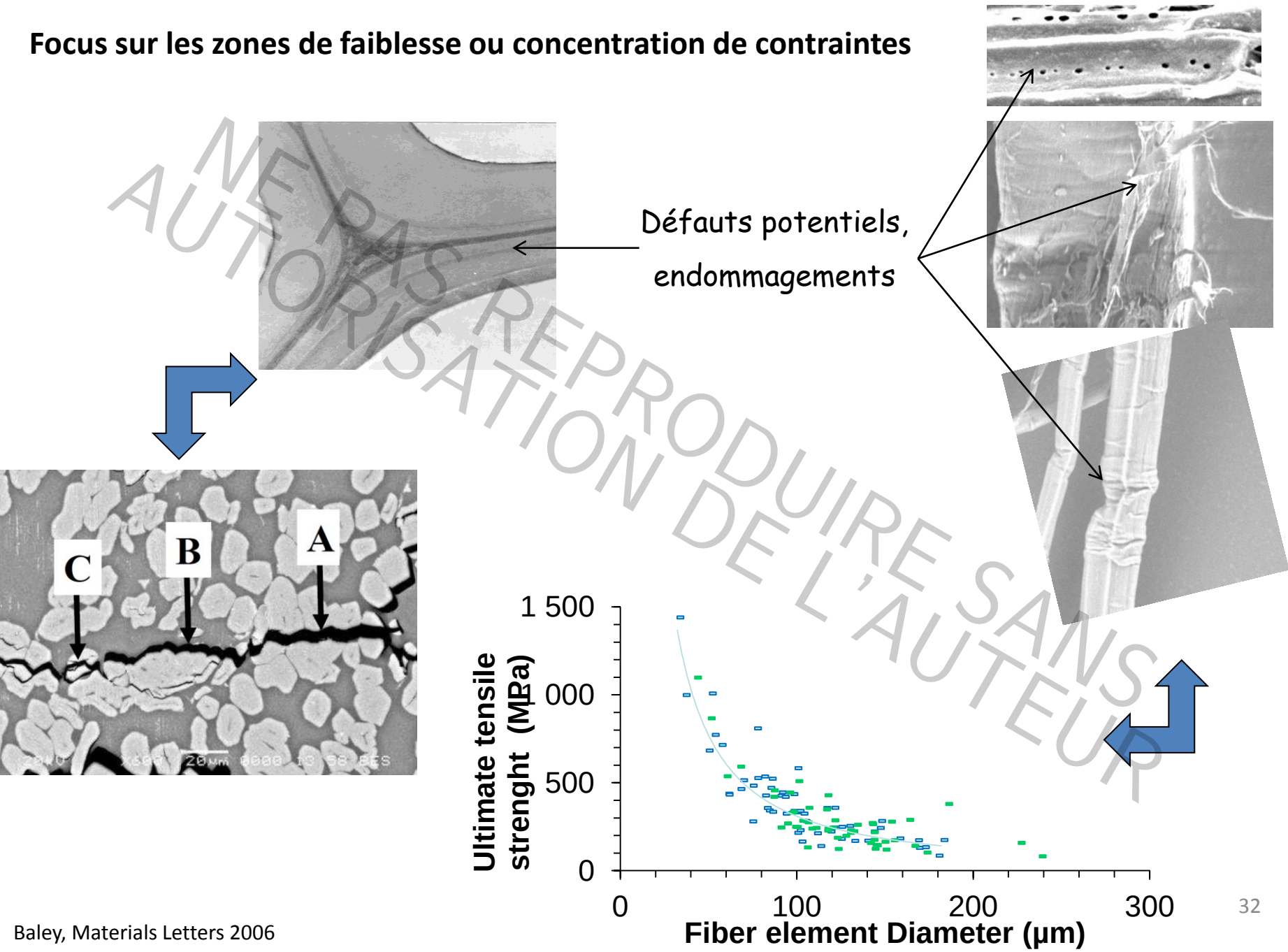
- 1) L'épaisseur de la paroi ou le ratio Paroi/lumen
- 2) Le MFA de la cellulose (et le taux de cristallinité)
- 3) Si MFA grand, alors influence des teneurs en hémicellulose et lignines perceptible

Pas sur les graphiques:

- 4) Défauts structuraux (dislocations, initiales ou induites par procédés)

3.2 Hiérarchie des facteurs ultra structuraux sur les propriétés des fibres

Focus sur les zones de faiblesse ou concentration de contraintes



3.2 Hiérarchie des facteurs ultra structuraux sur les propriétés des fibres

Création de défauts: les procédés

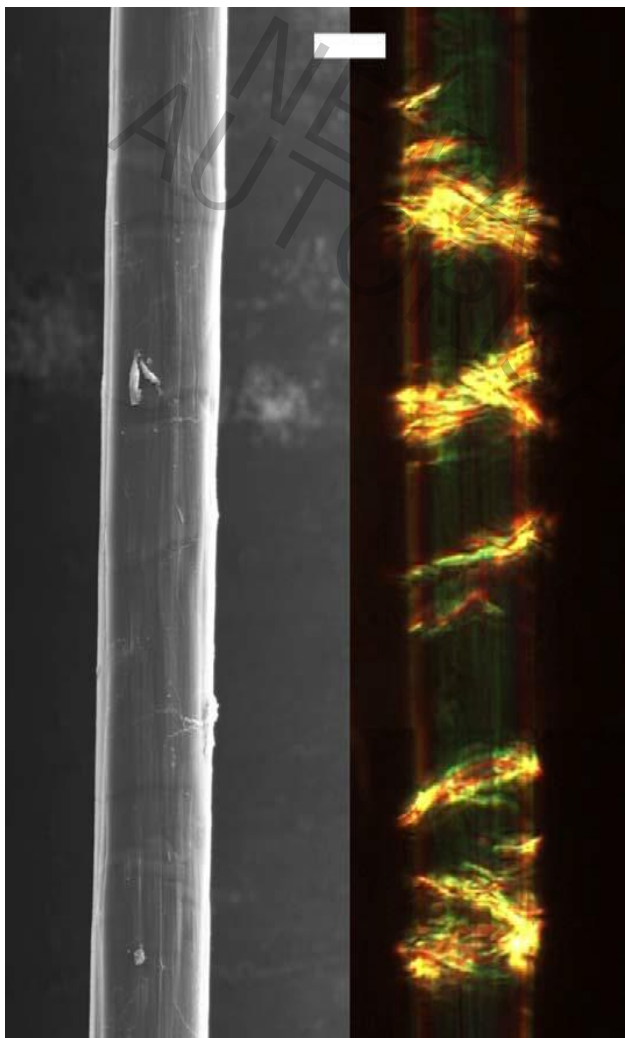


Illustration avec du chanvre de défilage primaire :
décortication, sortie des fibres de la tige

Les transformations secondaires (extrusion/injection etc...) impactent
également les fibres

3.2 Hiérarchie des facteurs ultra structuraux sur les propriétés des fibres

Microstructure: changements locaux et brusques de l'orientation des MFA



Nœud intrafibre (fibernode) ou dislocations, compression (genoux etc...) révélées en lumière polarisée

Origine externe (vent...) et biologique (adaptation, réorientation croissance)



Hypothèse: analogie avec pare-chocs, une zone de déformation qui amorti et absorbe des contraintes



Pas de consensus sur la relation entre leur présence et rigidité/résistance des fibres
(ex. réalignement des MFA pendant les essais)

Mais ce sont des points d'entrée aux traitements chimiques/enzymatiques

Une fibre de chanvre

3.3 Variations dimensionnelles/géométriques le long d'une fibre et d'un faisceau

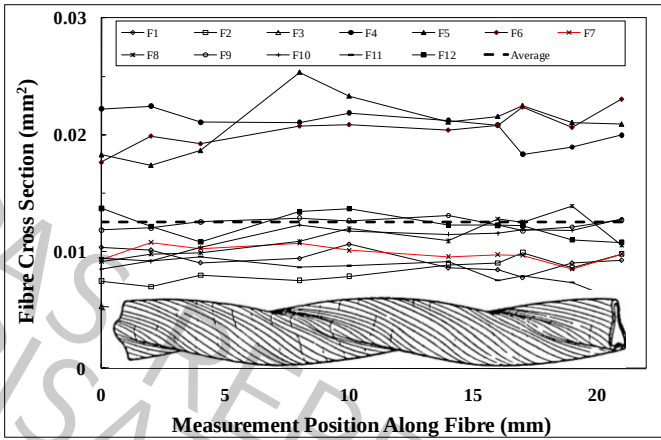
1) structure

Hélicoïdale, rectiligne, ruban...



Ex: Fibre trachéide

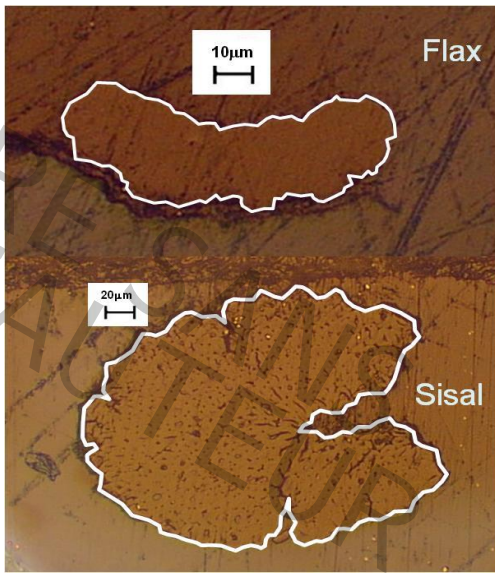
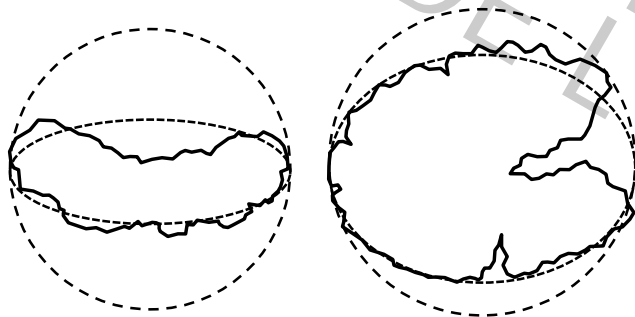
2) Les dimensions sont elles constantes le long d'une fibres?



- Non, dispersion importante
- Et variations inter espèces (Ex: Sisal > Lin)

3) Calcul de la section...

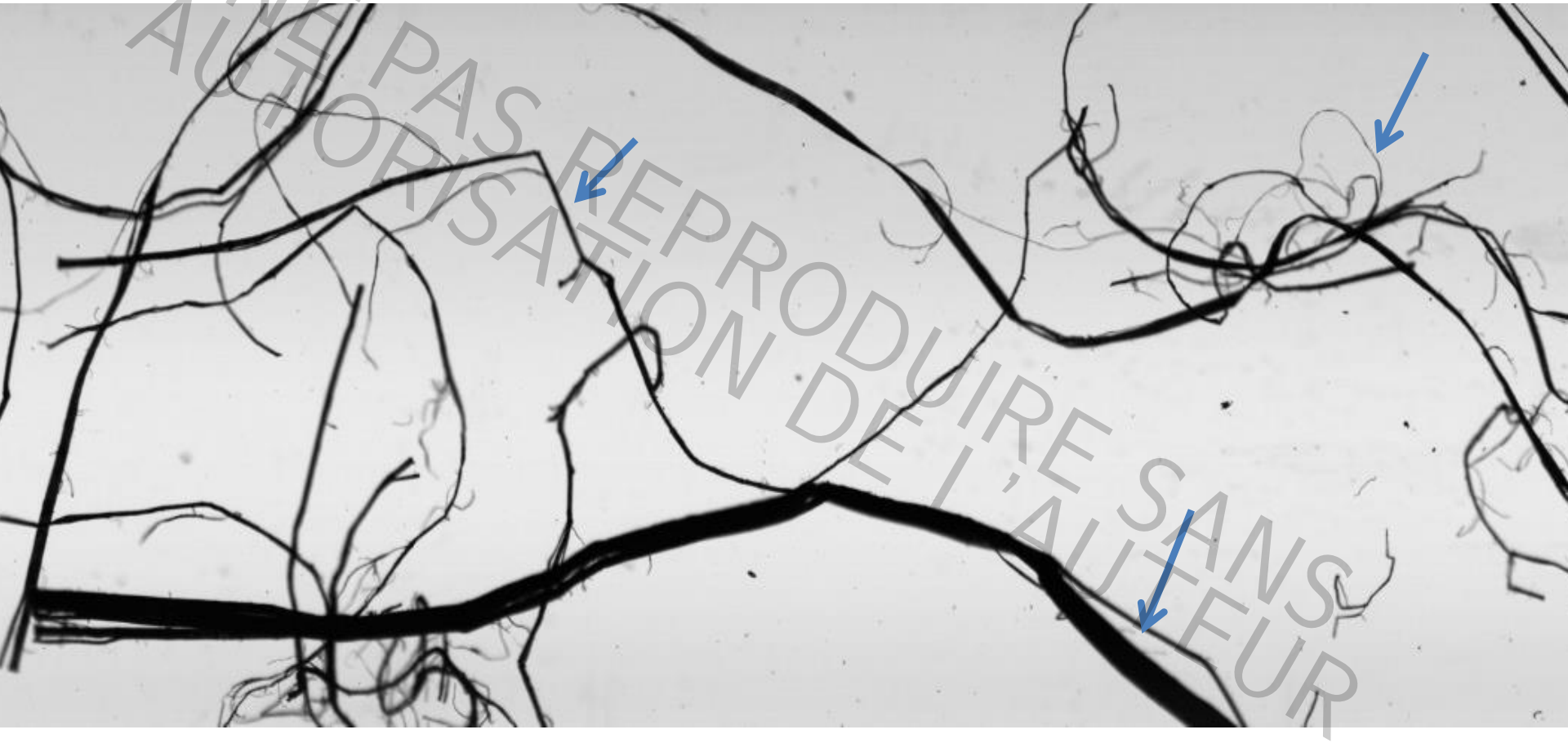
Modèle? cercle - ellipse



**Difficultés expérimentales
et des questions sur la représentativité des valeurs**

3.4 Facteurs de forme des fibres végétales des fibres

A une échelle d'organisation intermédiaire, faisceaux et fibres unitaires, une réelle difficulté est de définir les objets de façon statistique



Exemple de fibres de chanvre

3.4 Facteurs de forme des fibres végétales des fibres

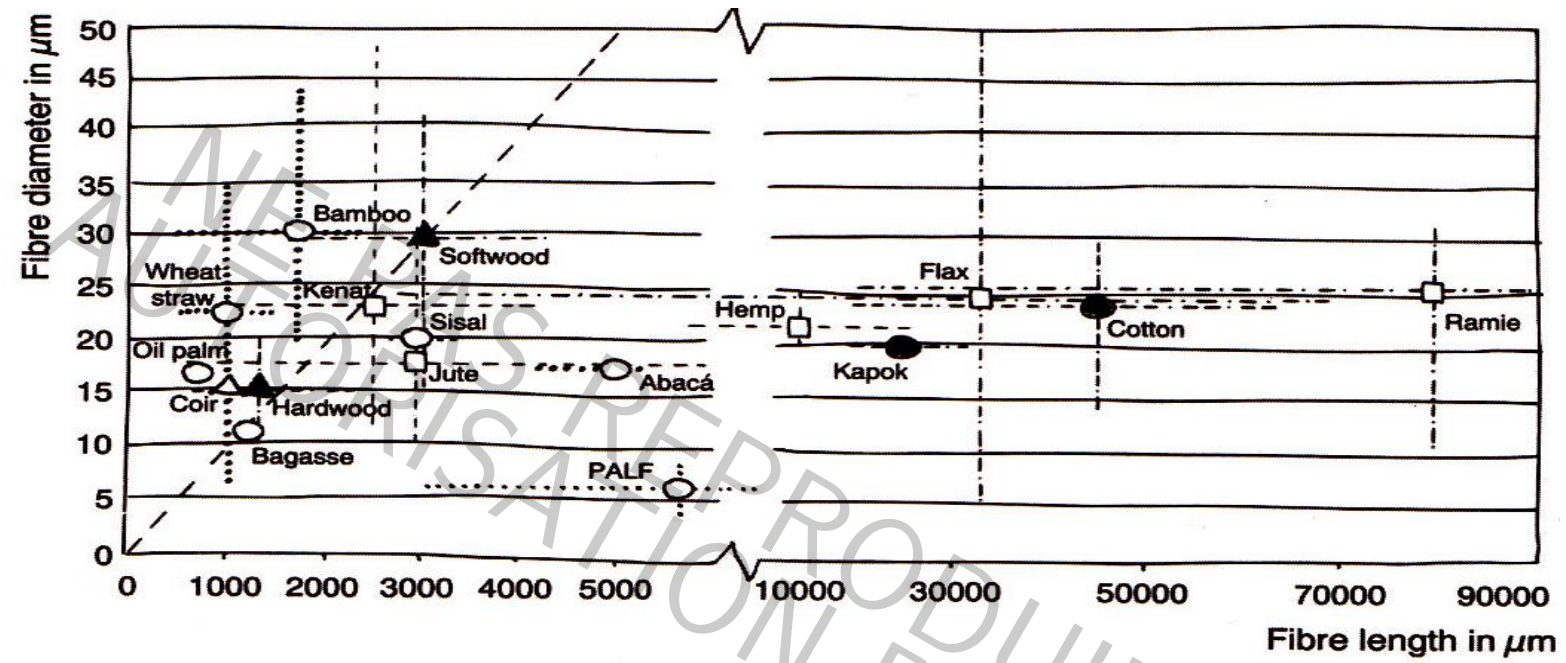
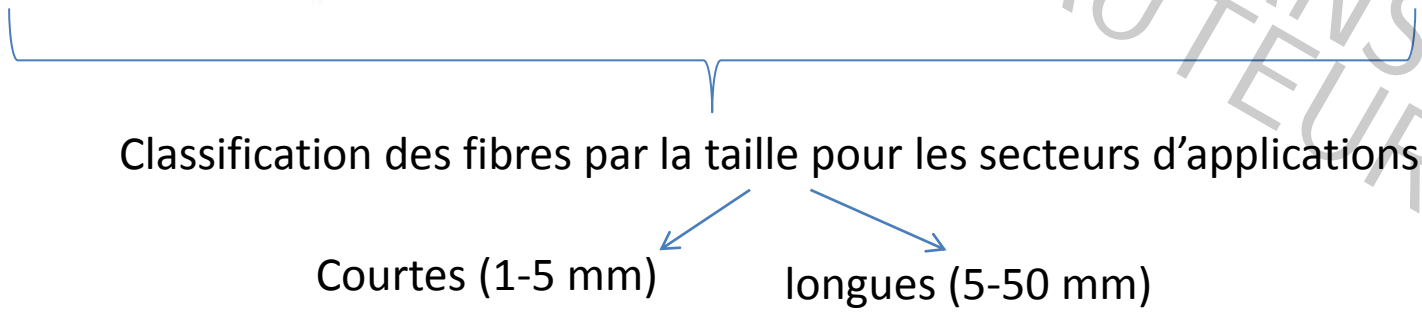


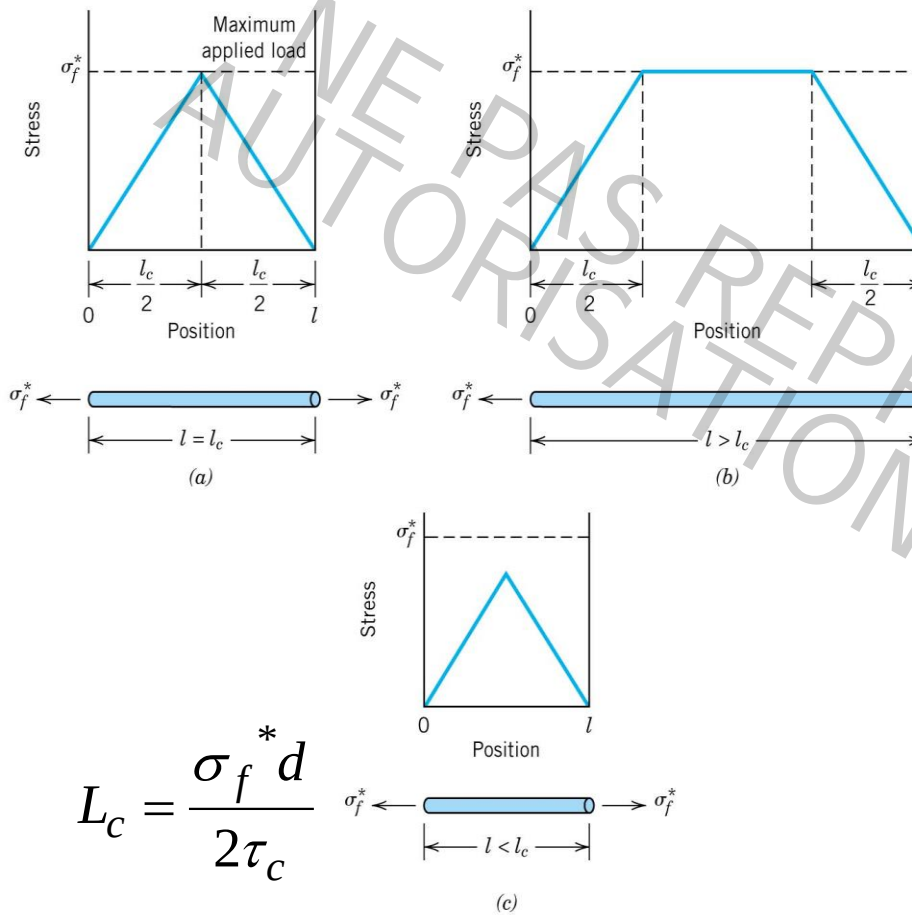
Figure 2.2.2 Fibre diameters and lengths. Symbols (black triangles – wood fibres; white triangle – mesocarp fibres; black circles – seed hairs; white circles – fibres of monocots; white rectangles – bast fibres) represent estimated mean values, and the dotted lines show ranges of literature data. The linear curve represents an aspect ratio of 100. Data were taken from Ageeva et al. (2005), Aldaba (1927), Angelini et al. (2000), Ashori et al. (2006), Baley (2002), Jarman and Laws (1965), Khalil et al. (2008), Kozłowski et al. (2005), Kundu (1956), Leupin (2001), McDougall et al. (1993), Morvan et al. (2003), Mukherjee and Satyanarayana (1986) and Ruys et al. (2002).



3.4 Facteurs de forme des fibres végétales

Longueurs et facteur de forme pour des applications de renfort

Longueur des fibres et charge



Relation longueur et facteur de forme

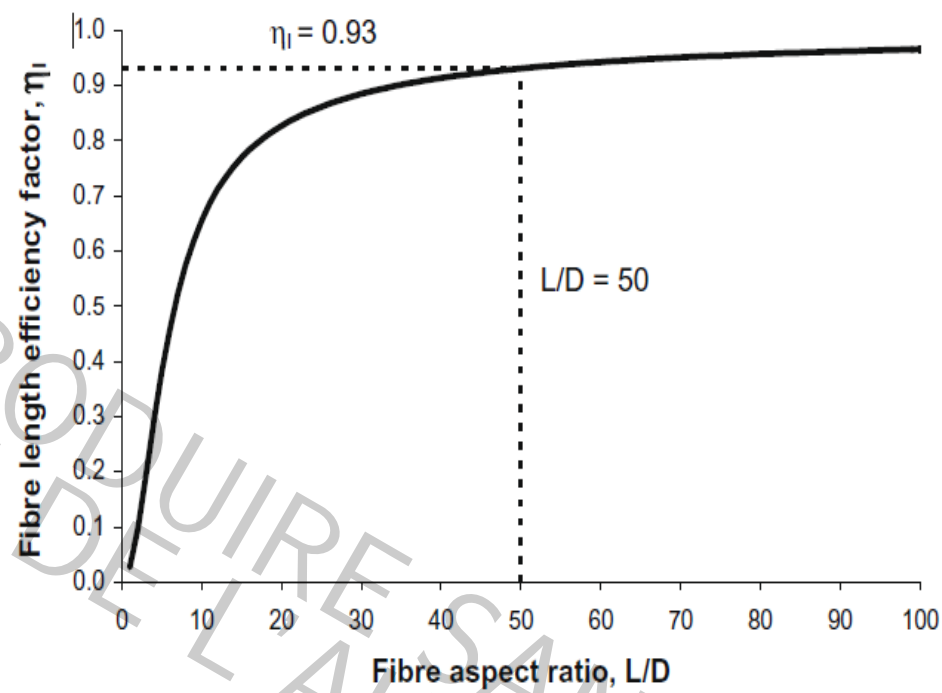
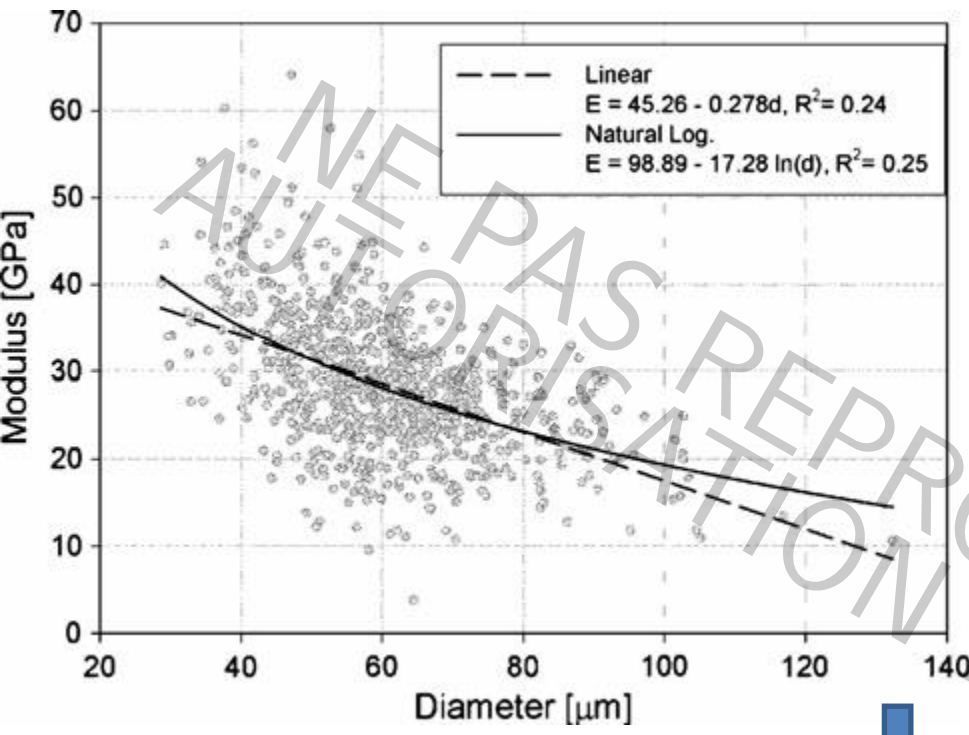


Fig. 1. Shear lag model predictions of the fibre length efficiency factor as a function of the fibre aspect ratio. Typical values for plant fibre composites are used in the calculations: $E_f = 50$ GPa, $G_m = 1$ GPa, $\kappa = 0.785$, $V_f = 0.30$.

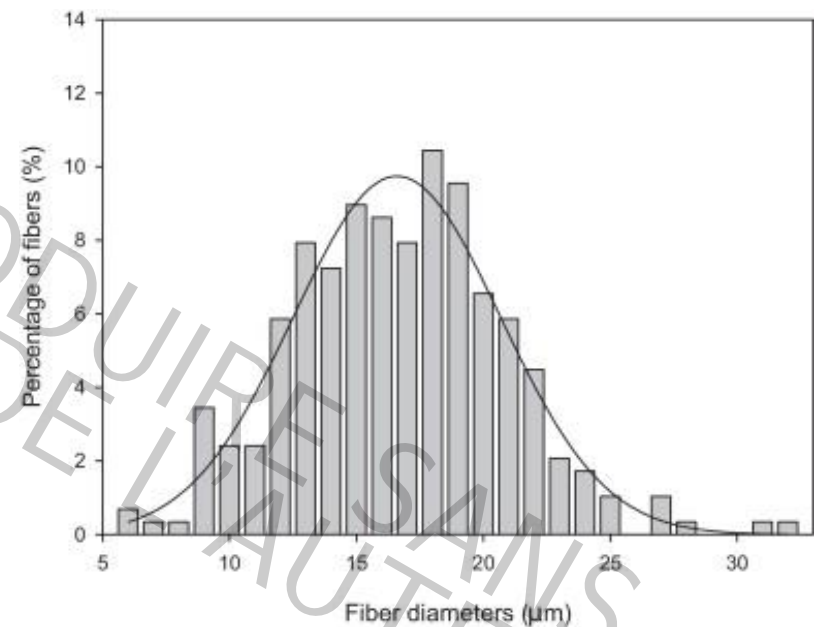
Une longueur optimale serait d'environ $30 \times L_c$ (rarement atteint dans les composites)
Idem avec L/D de 50

3.5 Evolution des propriétés élastiques en fonction des caractéristiques des fibres

Effet du diamètre



Propriétés dispersées et dépendantes de la morphométrie

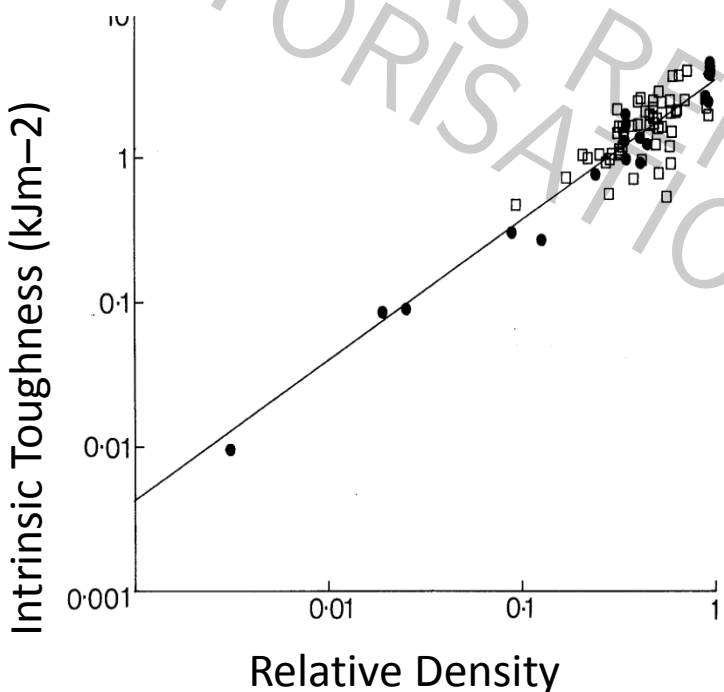


Généralement, une distribution des diamètres de ce type

Gestion de la variabilité

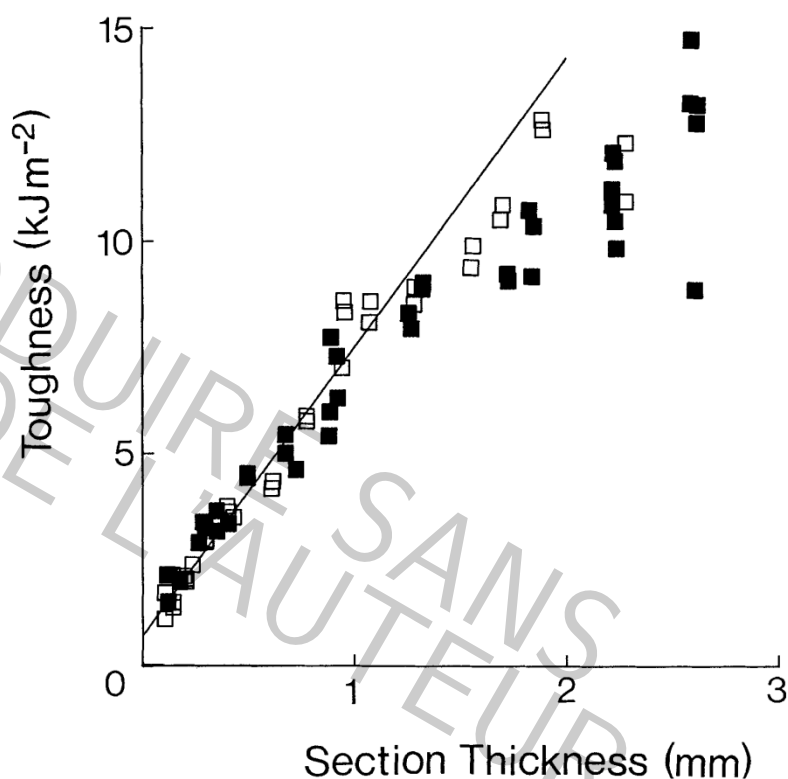
3.5 Evolution des propriétés élastiques en fonction des caractéristiques des fibres

Influence de la densité de fibres de bois sur la ténacité



+ dense + tenace

Relation entre section de fibre de bois et ténacité



+ épais + tenace

3.5 Evolution des propriétés élastiques en fonction des caractéristiques des fibres

Revue des caractéristiques

Fiber cell wall mechanical properties of different materials.

Species	Elastic modulus (GPa)	Hardness (GPa)
Crops		
Cotton stalk	16.3 (12.4)	0.85 (11.7)
Cassava stalk	19.0 (10.0)	0.52 (8.26)
Soybean stalk	16.3 (12.2)	0.48 (8.59)
Rice straw	19.4 (7.69)	0.50 (13.2)
Wheat straw	20.8 (11.6)	0.65 (9.19)
Hemp stalk	12.3 (32.7)	0.41 (24.3)
Hardwood		
- → Poplar	16.9 (11.1)	0.49 (9.54)
Iroko	22.9 (10.8)	0.51 (7.67)
Alder birch	18.5 (10.1)	0.49 (6.21)
Manchurian ash	17.5 (11.8)	0.48 (10.1)
Asian white birch	19.7 (5.69)	0.45 (7.31)
Red oak	22.6 (6.39)	0.55 (6.83)
White oak	19.5 (8.03)	0.49 (6.02)
Monglian oak	18.4 (10.7)	0.44 (10.6)
Kwila	21.2 (6.92)	0.54 (4.03)
+ → Keranji	24.6 (8.14)	0.56 (5.62)
Softwood		
Loblolly pine	14.2–17.6 (1–7)	0.43–0.53 (2–7)
Spruce	15.0–18.0 (10–15)	0.34 (7)

Des variations
majeures

De nombreuses
études

Note: The coefficient of variation (CV, in bracket; units in percentage) represents the variability of the elastic modulus and hardness (Data for crops except for hemp stalk from Wu et al., 2010; Data for hardwood from Wu et al., 2009; Data for Loblolly pine from Tze et al., 2007 and for spruce from Gindl et al., 2004b).

3.5 Evolution des propriétés élastiques en fonction des caractéristiques des fibres

Emergence de traits explicatifs

	Chemical composition			Ultrastructure		Reference
	Cellulose (% w/w)	Hemicellulose (% w/w)	Lignin (% w/w)	Microfibril angle (degrees)	Cellulose crystallinity (% w/w)	
Wood fibers						
Spruce	49	20	29	3-50	67	[25]
Pine	42	29	28		57	[26]
Pine (kraft pulp)	76				68	[27]
Cedar	44	21	30		57	[28]
Balsa	48	28	22		56	[26]
Birch	41	32	22		54	[26]
Poplar	39	28	30		54	[28]
Soft wood						[12]
Plant fibers						
Hemp	63	10	6	6-10	96	[25]
Hemp	64	14	3		94	[29]
Hemp (retted)	74	12	5		92	[20]
Hemp (scutched)	66	15	5		98	[29]
Flax (cottonized)	76	14	2		88	[29]
Hemp (textile)	91	7	2			[14]
						[13]

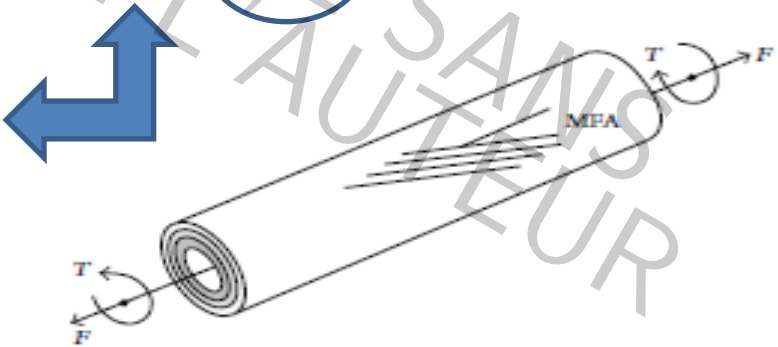
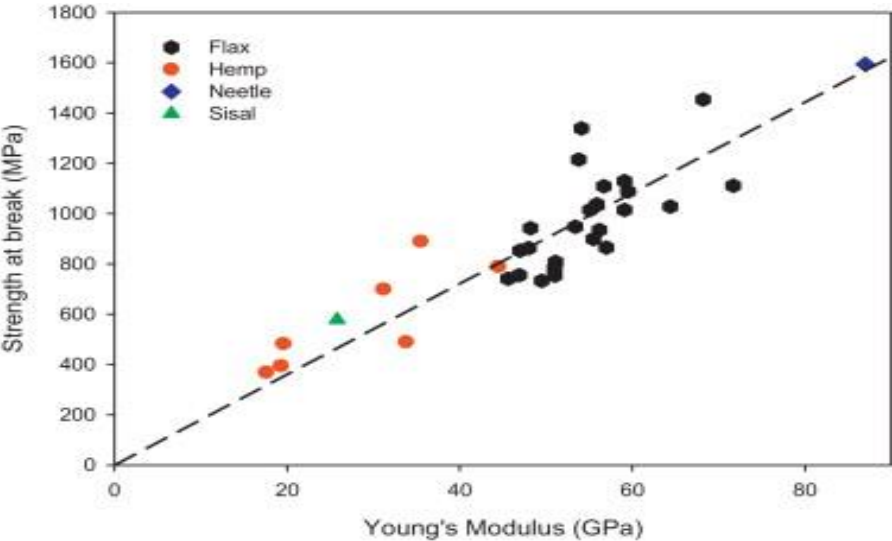


FIGURE 1: Idealized fiber geometry used in micromechanical modeling. MFA is the microfibril angle.

3.6 Comparaison avec les fibres synthétiques

Dispersion des performances

Mechanical properties of natural fibres as compared to conventional reinforcing fibres

Fibre	Density (g/cm ³)	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Cotton	1.5–1.6	7.0–8.0	287–597	5.5–12.6
Jute	1.3	1.5–1.8	393–773	26.5
Flax	1.5	2.7–3.2	345–1035	27.6
Hemp	1.5	1.6	690	—
Ramie	—	3.6–3.8	400–938	61.4–128
Sisal	1.5	2.0–2.5	511–635	9.4–22.0
Coir	1.2	30.0	175	4.0–6.0
Viscose (cord)	—	11.4	593	11.0
Soft wood kraft	1.5	—	1000	40.0
E-glass	2.5	2.5	2000–3500	70.0

Module Spécifique

Fibres de verre et de lin sont proches

3.6 Comparaison avec les fibres synthétiques

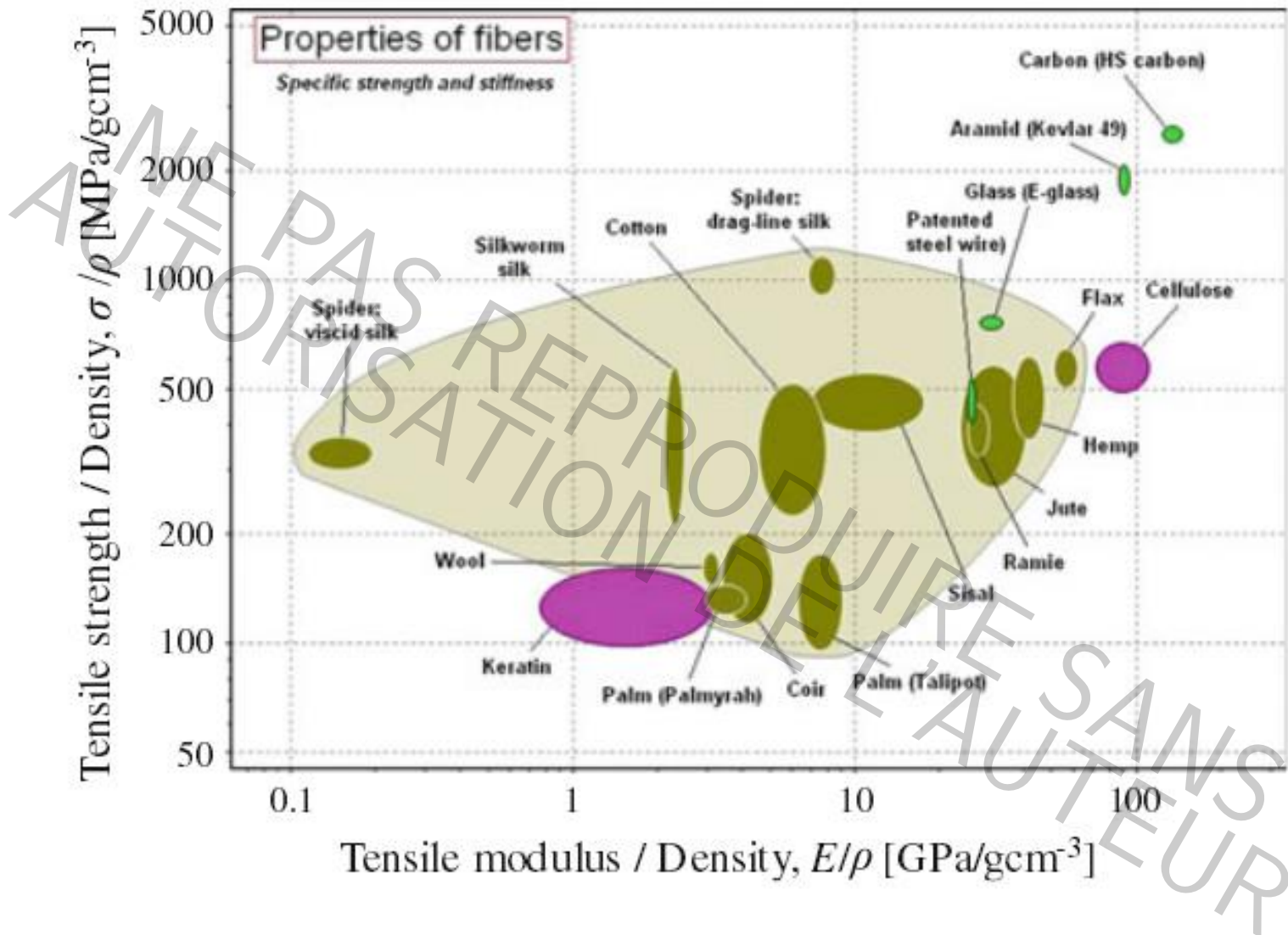


Fig. 2 Ashby plot comparing the position of natural fibres against the synthetic fibres with respect to specific tensile properties (from [70])

3.6 Comparaison avec les fibres synthétiques

Revue des caractéristiques et Comparatif

Table 1 Comparison between plant and synthetic fibres [29] (and references therein)

Properties	Plant fibres ^a	Glass fibres ^b	Carbon fibres ^c
Economy			
Annual global production of fibres (tonnes) ^d	31000000	4000000	55000
Distribution of fibres for FRPs in EU (tonnes) ^d	Moderate (~60000)	Wide (600000)	Low (15000)
Cost of raw fibre (£/kg)	Low (~0.5–1.5)	Low (~1.3–20.0)	High (>12.0)
Technical			
Density (gcm ⁻³)	Low (~1.35–1.55)	High (2.50–2.70)	Low (1.70–2.20)
Tensile stiffness (GPa)	Moderate (~30–80)	Moderate (70–85)	High (150–500)
Tensile strength (GPa)	Low (~0.4–1.5)	Moderate (2.0–3.7)	High (1.3–6.3)
Tensile failure strain (%)	Low (~1.4–3.2)	High (2.5–5.3)	Low (0.3–2.2)
Specific tensile stiffness (GPa/gcm ⁻³)	Moderate (~20–60)	Low (27–34)	High (68–290)
Specific tensile strength (GPa/gcm ⁻³)	Moderate (~0.3–1.1)	Moderate (0.7–1.5)	High (0.6–3.7)
Abrasive to machines	No	Yes	Yes
Ecological			
Energy consumption/kg of raw fibre (MJ)	Low (4–15) ^e	Moderate (30–50)	High (>130)
Renewable source	Yes	No	No ^f
Recyclable	Yes	Partly	Partly
Biodegradable	Yes	No	No
Hazardous/toxic (upon inhalation)	No	Yes	Yes

^a Includes bast, leaf and seed fibres, but does not include wood and grass/reed fibres

^b Includes E- and S-glass fibres

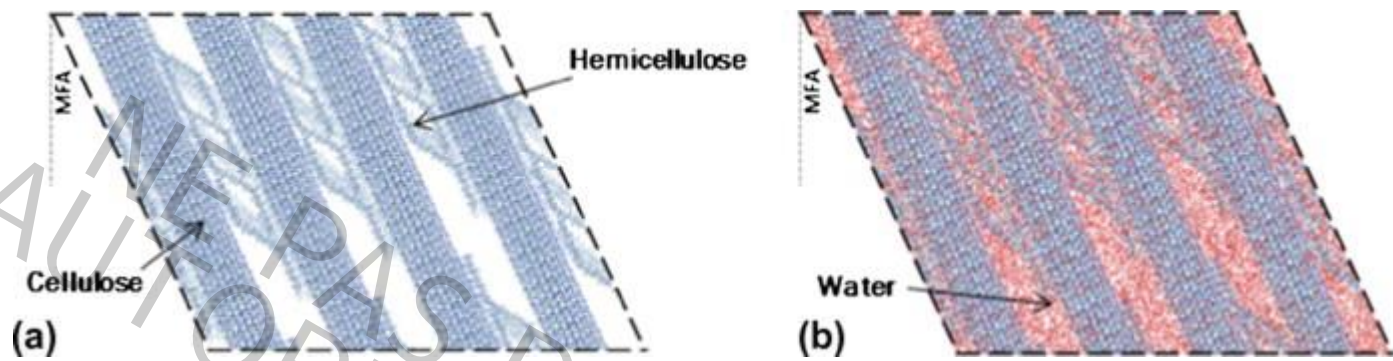
^c Includes PAN- and pitch-based carbon fibres

^d Estimated values for the year 2010, from [34] for global fibre production values and from [32, 33, 35] for values on the distribution of fibres for FRPs in EU

^e While the energy required in the cultivation of plant fibres is low (4–15 MJ/kg), further processing steps (e.g. retting and spinning) can significantly increase the cumulative energy demand, for instance, to up to 146 MJ/kg for flax yarn [20]. This is discussed further in “Plant growth and fibre extraction” section

^f Carbon fibres based on cellulosic precursors currently account for only 1–2 % of the total carbon fibre market [36]

3.7 Variation des propriétés en fonction des conditions d'environnement: H₂O

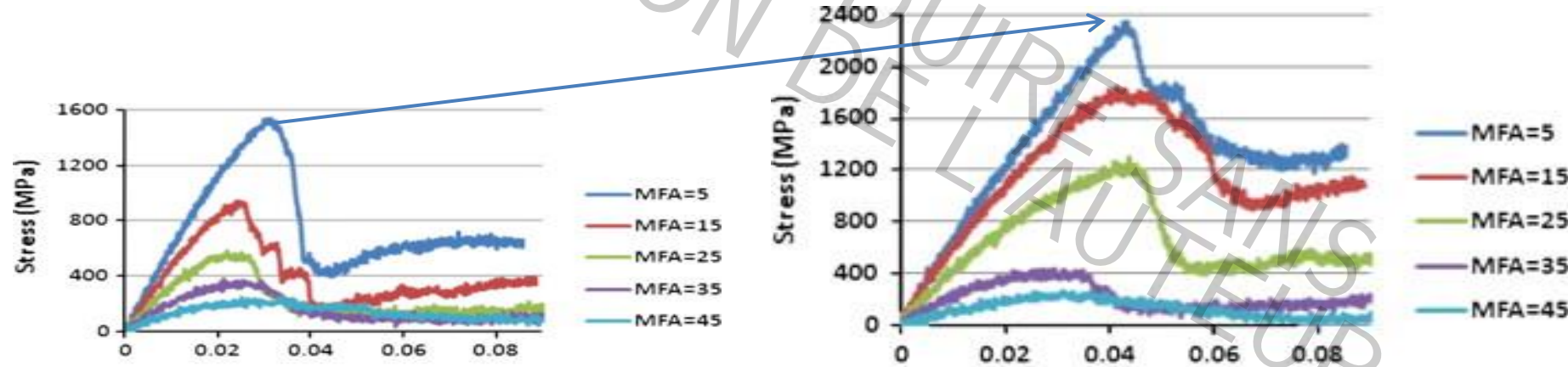


Periodic simulation boxes (a) sans H₂O

and (b) avec H₂O;

Modèle déshydraté

Modèle hydraté

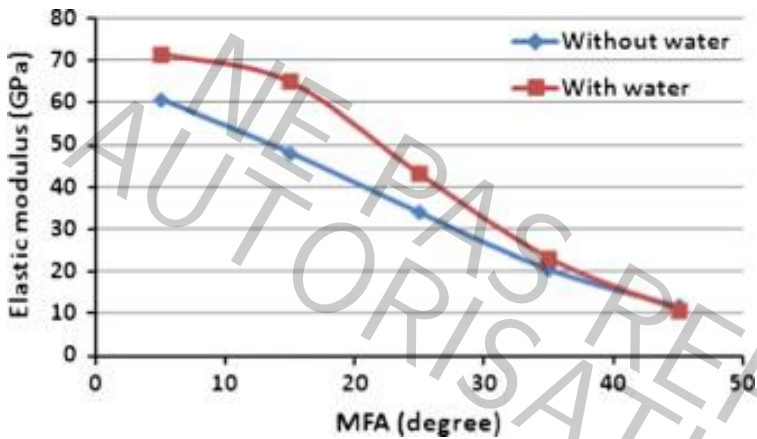


Courbes contrainte–déformation (compression) selon les MFA

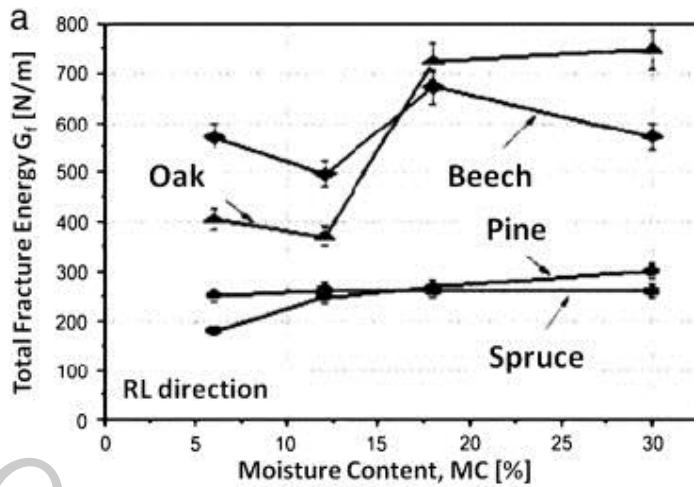
Forte influence des MFA... et de la présence de molécule d'eau (pontage/mobilité moléculaire)

3.7 Variation des propriétés en fonction des conditions d'environnement: H₂O

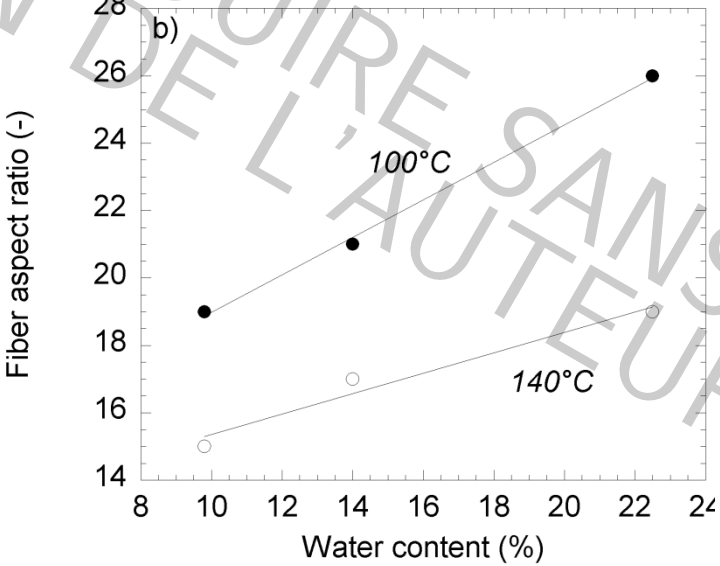
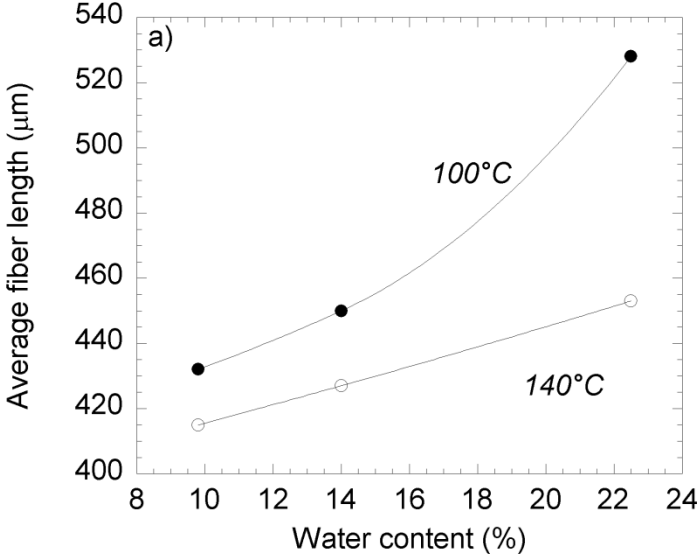
Module Élastique (compression, modèles)



Augmentation de l'énergie de rupture en présence d'eau

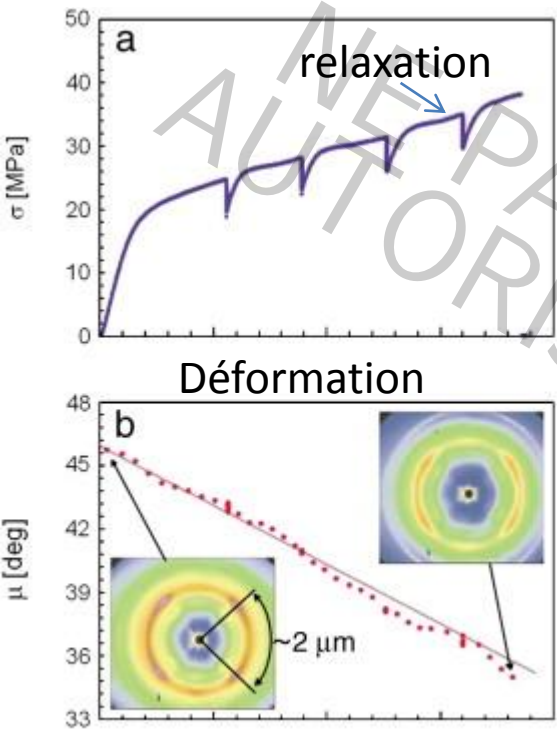


Influence de la teneur initiale en eau (chanvre) sur les longueurs et facteurs de formes pdt extrusion (Bivis)



3.8 Réponse mécanique et structural de fibre de bois sous contrainte

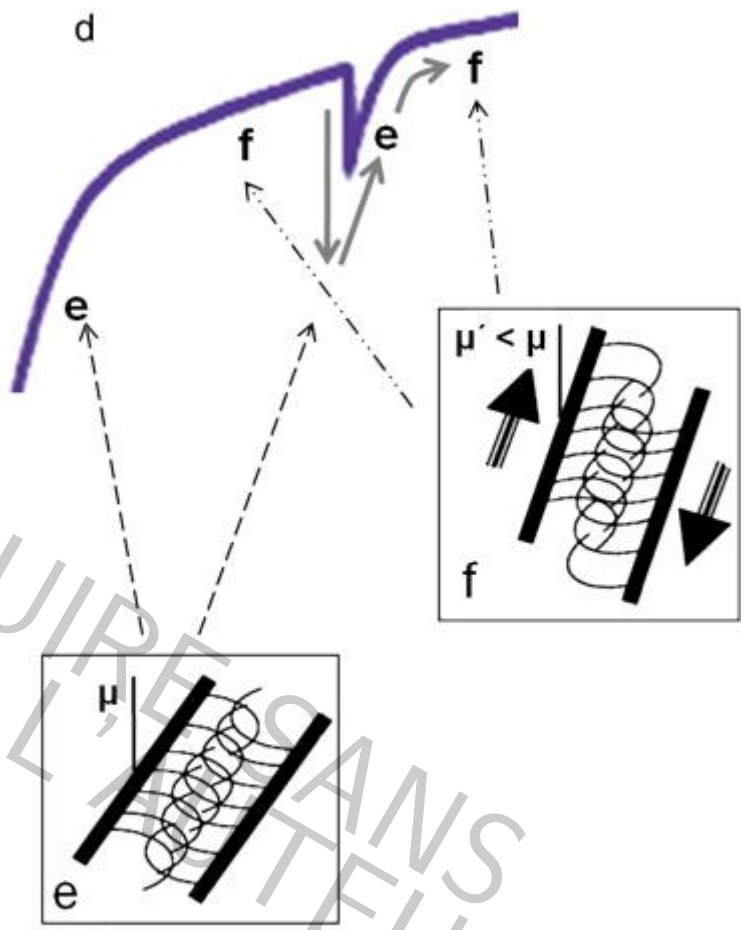
Essai *in situ* traction-synchrotron



MFA décroît avec allongement

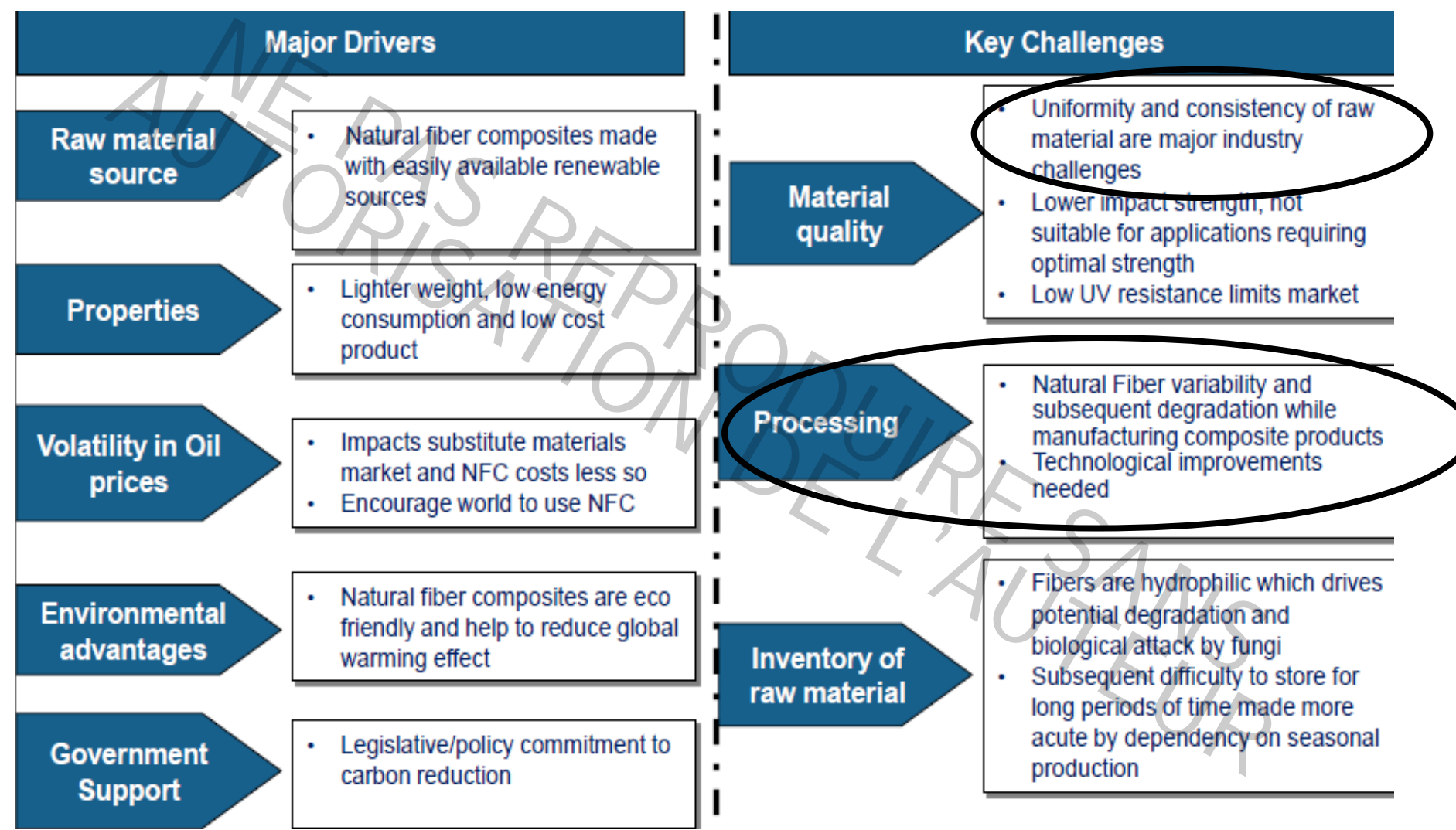
Réorientation
Glissement

Modele conceptuel



Liaisons intermoléculaires
rompues puis ré-établies

IV. Intérêts et perspectives industriels pour les fibres végétales

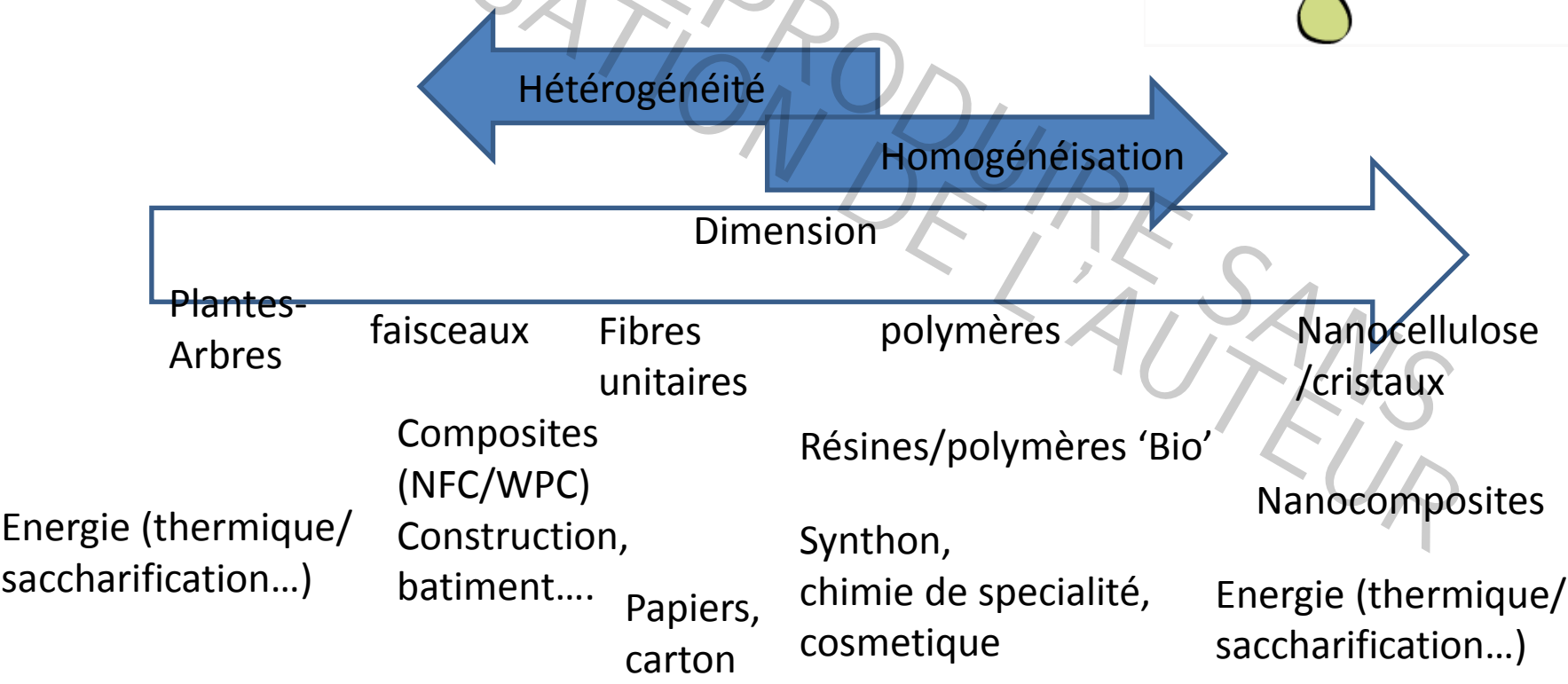
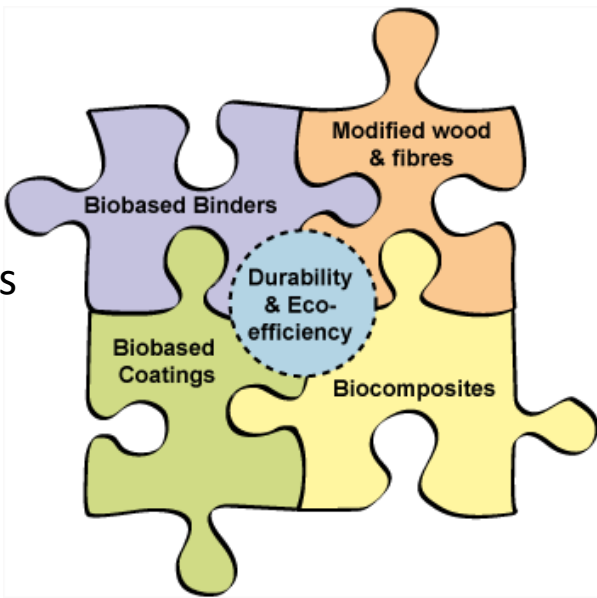


IV. Intérêts et perspectives industriels pour les fibres végétales

Fibres courtes (bois)
-bioraffinerie, energie, papier
carton, WPC...

Les fibres longues
-composites/textile/UD etc...

Concept de la Bioraffinerie des
fibres naturelles



V. Quelques conclusions

Une variabilité des propriétés des fibres qu'il est difficile de gérer

Elle s'explique par ses caractéristiques morphologiques (épaisseur paroi, porosité, facteur de forme, tortuosité...), compositionnelles (teneur en cellulose cristalline, en matrice amorphe...) et surtout microstructurales (taux de cristallinité de la cellulose, MFA, quantité et nature des liaisons du réseau pariétal...)

Des typologies fonctionnelles peuvent être distinguées, en fonction du degré d'évolution de l'espèce végétale concernée: par exemple des fibres spécialisées dans le renfort existent chez certaines dicotylédones, pas chez les monocotylédones, organismes 'moins évolués'. Ces typologies reflètent l'adaptation de ces fibres à des fonctions *in planta*

Du point de vue 'technologique', on distingue les fibres longues très cellulosiques (pour textiles, préformes, composites structuraux etc...), des courtes (papier, énergie, bioraffinerie...) généralement plus lignifiées

La variabilité des fibres peut s'expliquer par le degré de maturation (l'âge) de la fibre, par exemple des fibres de bois juvénile possède un MFA plus grand (plus souple, s'aligne à la direction du vent) que des fibres de bois mature (moins grand), qui résiste au vent (Lindstrom 1998)

Dans le cas des fibres possédant une paroi llaire, les propriétés vont aussi dépendre de la lignification plus ou moins avancée selon le degré de maturité, et dont l'influence sera d'autant prononcée que le MFA sera grand (Fratzl, 2004).

En plus des points ci-dessus, il existe des organisations spécifiques propres à chaque fibre. C'est l'exemple des variations locales de texture (MFA, cristallinité, lignine...) (Nyholm 2001), souvent considérées comme des défauts structuraux ou des dislocations. Egalement il existe des ponctuations naturelles dans certaines fibres (dans le parenchyme...)

Cette présentation fait référence ou utilise des travaux des auteurs suivants :

- Ander, proceeding of the 5th Plant Biomechanics Conference, Stockholm 2006
- Beaugrand Inter J Plant Sci 2004
- Beaugrand JAPS 2013
- Blake et al 2008 planta
- Baley, Materials Letters 2006
- Baley techniques de l'ingenieur 2010
- Bledzki 1999 prog polym Sci
- Boerjan annu Rev plant Biol 2003
- Bourmaud Composites PartB 2012
- Chabbert, communication personnelle
- Charlet 2007 composites PartA
- Cosgrove 2005 Nat. Rev. Molec. Cell. Biol
- Deng Computational materials science 2012
- Evert, Esau's Plant anatomy, 2006
- Fratzl et al 2004 Zeitschrift Fur Metallkunde
- Hamdi, Delisee, Malvestio, 2013, Defibrex (ANRISI Web of Knowledge)
- Hobson 2001 J Agric Engng Res
- Gorshkova indu crops products, 2003
- Jeronimidis Georges , 1993 et communication personnelle
- Ji 2013 planta
- Legland 2013 Indus Crops Products
- Le Moigne 2011 Composites Part A
- Li 2013, International Crops products Lucas 1997 Phil Trans R Soc Lond
- Lindstrom 1998 Holzforschung
- Lucintel/ JEC Paris 2011
- Madsen 2009 Composites Science
- Madsen, Advances in Materials Science and Engineering 2013
- Marrot 2013 IJCP
- Müssig, Industrial Applications of natural Fibres, Wiley series in Renewable resources, 2010
- Nyholm 2001 Nordic pulp Paper Res.
- Patrice Dole, CTCPA
- Placet Composites PartA 2009
- Placet 2012 Composites Part A
- Romhany JAPS 2003
- Salmen, 1982, thesis
- Shah J Mater Sci, 2013
- Sofiane Guessasma, INRA Nantes
- Stanzl-Tscheeg 2011 Materials Science Engineering
- Summerscales J mater Sci 2011
- Thomason 2012 J Biobased Mat Bioenergy
- Thygesen Indu Crpos Prod 2006
- Thygesen Indu Crpos Prod 2007
- University of Connecticut website
- Vincent, 2000, Appl. Compos. Mater
- Wasteneys Annual Rev plant Biol, 2003
- Weinkamer 2012 Materials Science and Engineering
- Wikipedia