



LE BOIS

«Plus fort que le béton, plus léger que l'acier» Science et Vie n°1196 Mai 2017



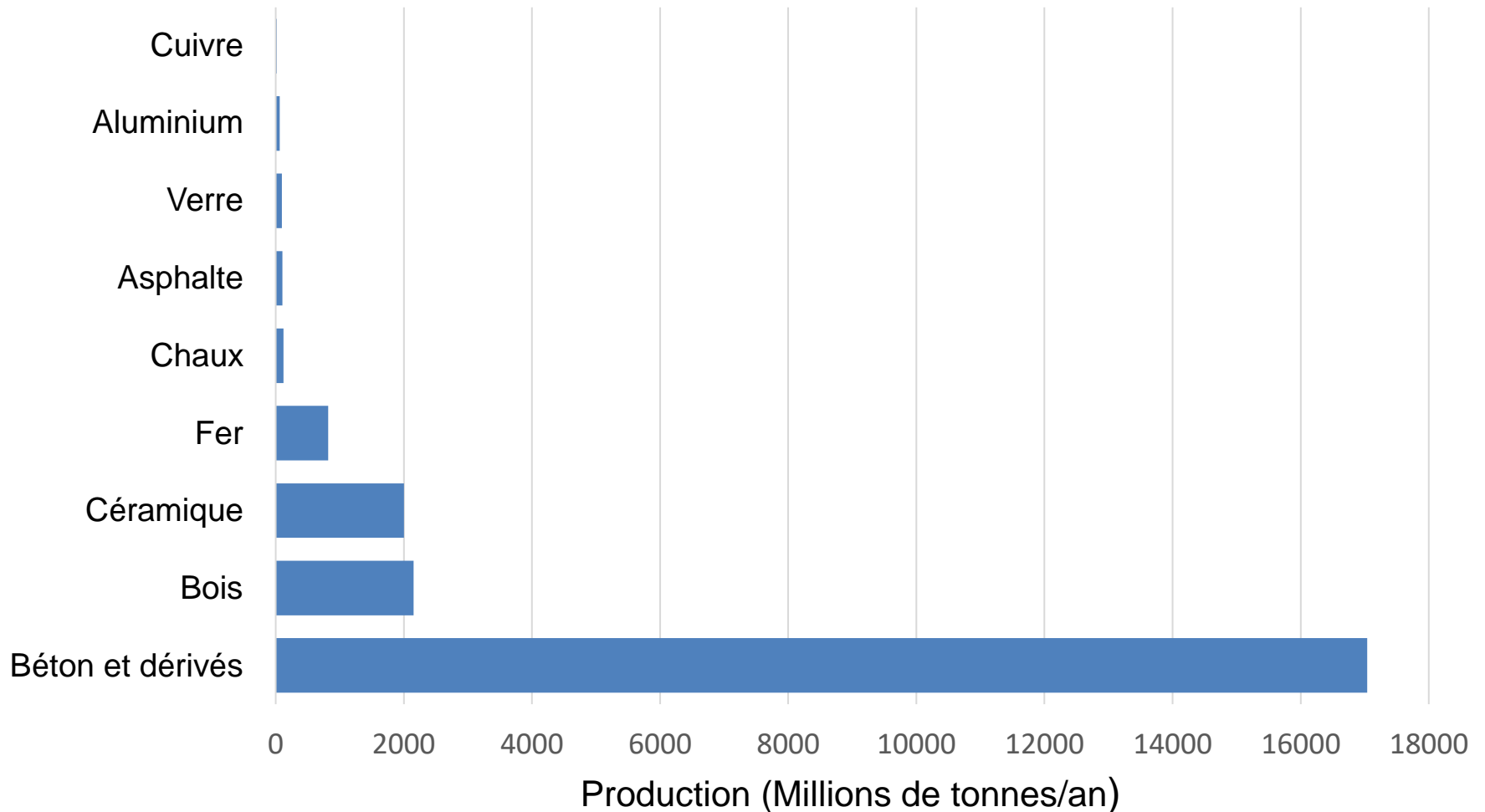
EPFL



LABORATORY OF
CONSTRUCTION
MATERIALS

Dr E. Boehm-Courjault
EPFL- LMC

Introduction



Introduction

Pourquoi construire en bois ?

- matériau abondant, peu coûteux, peu énergivore, biodégradable
- facile à travailler, léger, résistant, bon isolant
- sa production émet peu de CO₂
- multiples essences qui ont des propriétés différentes
- l'utilisation dans la construction dépend de la zone géographique

Pays	Population	Superficie de forêt (km ²) (Sup. totale)	Types de maisons individuelles
Inde	1.3 milliards	800'000 (3'287'000)	Peu de bois, beaucoup de briques de terre cuite et de béton
Suisse	8 millions	13'000 (41'000)	Le plus souvent en béton, mais développement constant des maisons à ossature bois
Suède	10 millions	220'000 (450'000)	> 90% maisons en bois : murs en bois massif (rondins), chapes et fondations en béton ou pierres

Introduction

Pourquoi construire en bois ?

→ bonne isolation thermique

Ex pour obtenir la même isolation, il faut :

- 88 cm de béton plein
- 52 cm de parpaing creux
- 28 cm de brique pleine
- 7.5 cm de bois (résineux)
- 2 cm de laine minérale (laine de verre, laine de roche...)



→ jusqu'à quelle hauteur ?

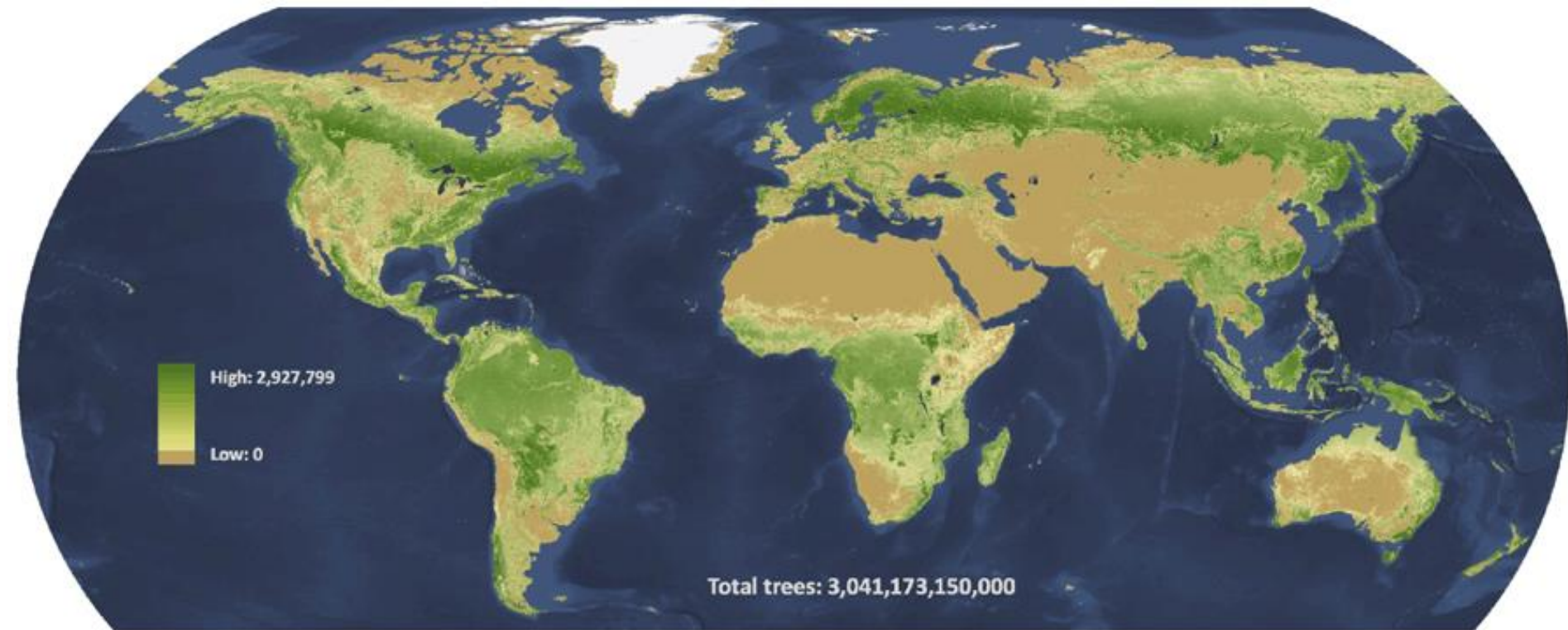


Norvège : 2019 – fin de construction d'une tour résidentielle en bois de 85 m – 18 étages (tour Mjøs, 100 km au nord d'Oslo)

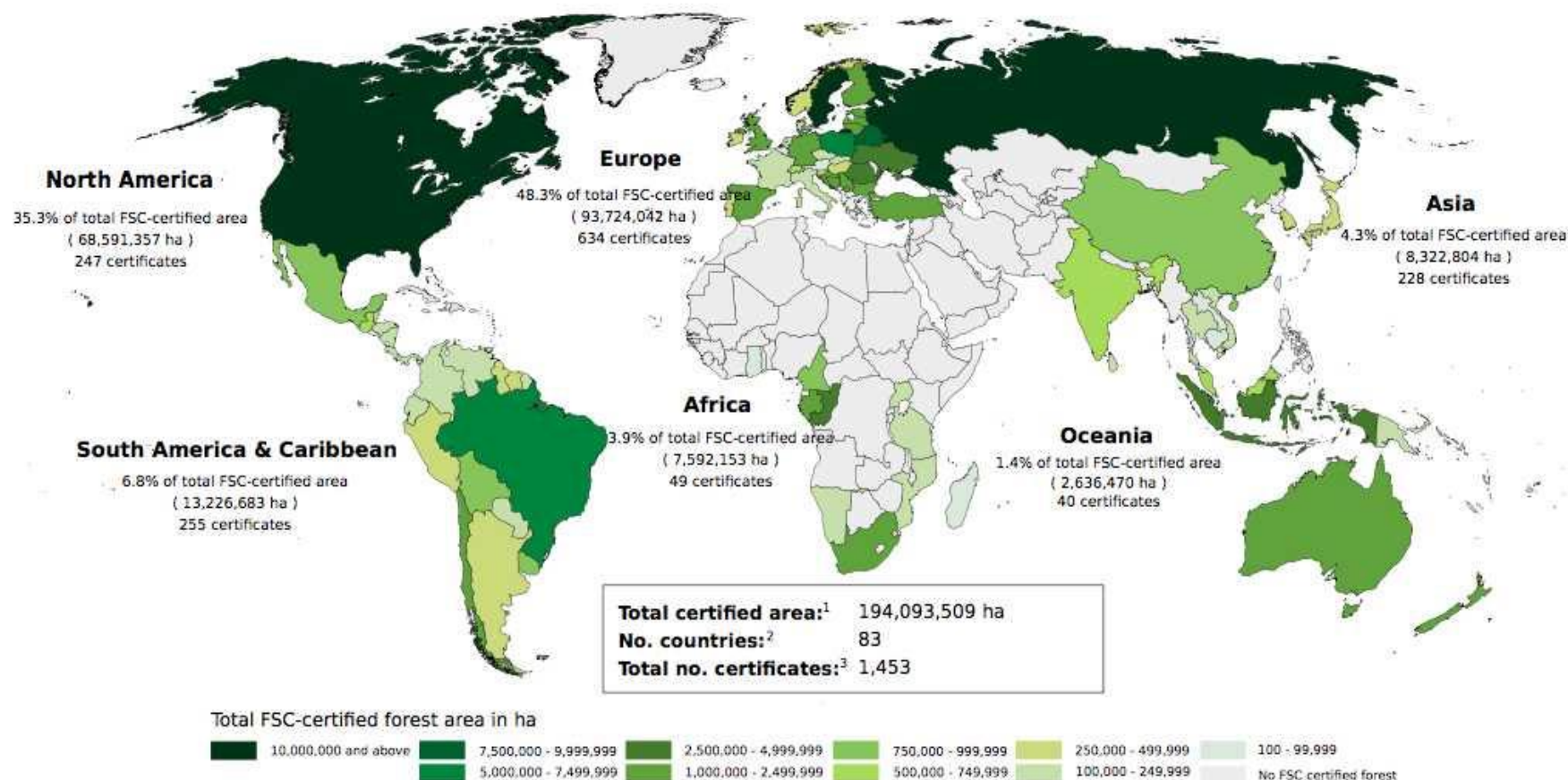
Suisse (Winterthur) : actuellement – construction d'une tour résidentielle en bois de 100 m – inauguration prévue en 2026



Introduction : ressources



Introduction : ressources



Based on numbers from FSC International
Created: 05.12.2016

Contenu

- 1. Produits du bois
- 2. Structure
- 3. Croissance annuelle
- 4. Classification des arbres
 - 4.1. Résineux ou conifères
 - 4.2. Feuillus
 - 4.2.1. Feuillus à zones poreuses
 - 4.2.2. Feuillus à pores diffus
- 5. Microstructure
 - 5.1. Microstructure des résineux
 - 5.2. Microstructure des feuillus
 - 5.3. Comparaison
 - 5.4. Ultra-structure
- 6. Constituants chimiques
- 7. Propriétés
 - 7.1. Propriétés physiques
 - 7.1.1. Densité
 - 7.1.2. Teneur en eau
 - 7.1.3. Adsorption
 - 7.1.4. Retrait/gonflement
 - 7.1.5. Propriétés thermiques
 - 7.2. Propriétés mécaniques
- 8. Produits dérivés (assemblages)

1. Les produits du bois

- BOIS MASSIF



Lamellé collé



Lamellé croisé

- Bois lamellé collé

- Bois lamellé croisé

- Panneaux de contreplaqué

- Panneaux de copeaux

- Panneaux de particules
(aggloméré)

- Panneaux de fibres

- (PAPIER)



Panneau de copeaux



Aggloméré



Panneau de fibres

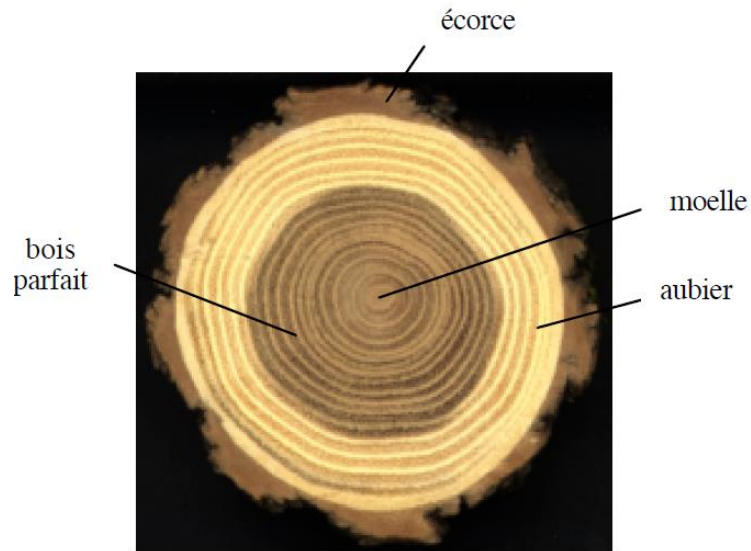


Contreplaqué

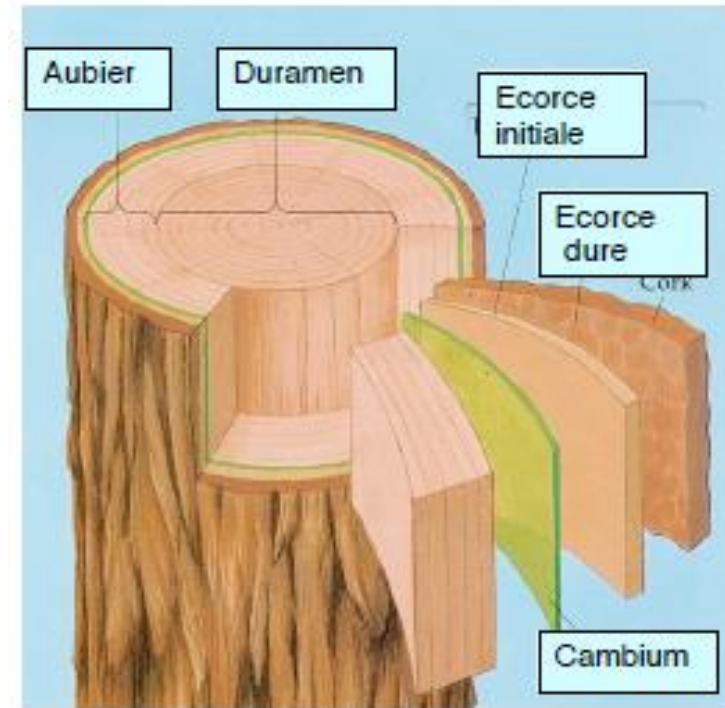
ASSEMBLAGES

2. La structure du bois

Niveau macroscopique



- Ecorce : interne (liber) et externe (suber)
- Cambium
- Aubier (bois vivant 10% à 40% env.)
- Cœur ou duramen (bois parfait, bois mort)
- Moelle
- Cernes annuels
- Rayons ligneux



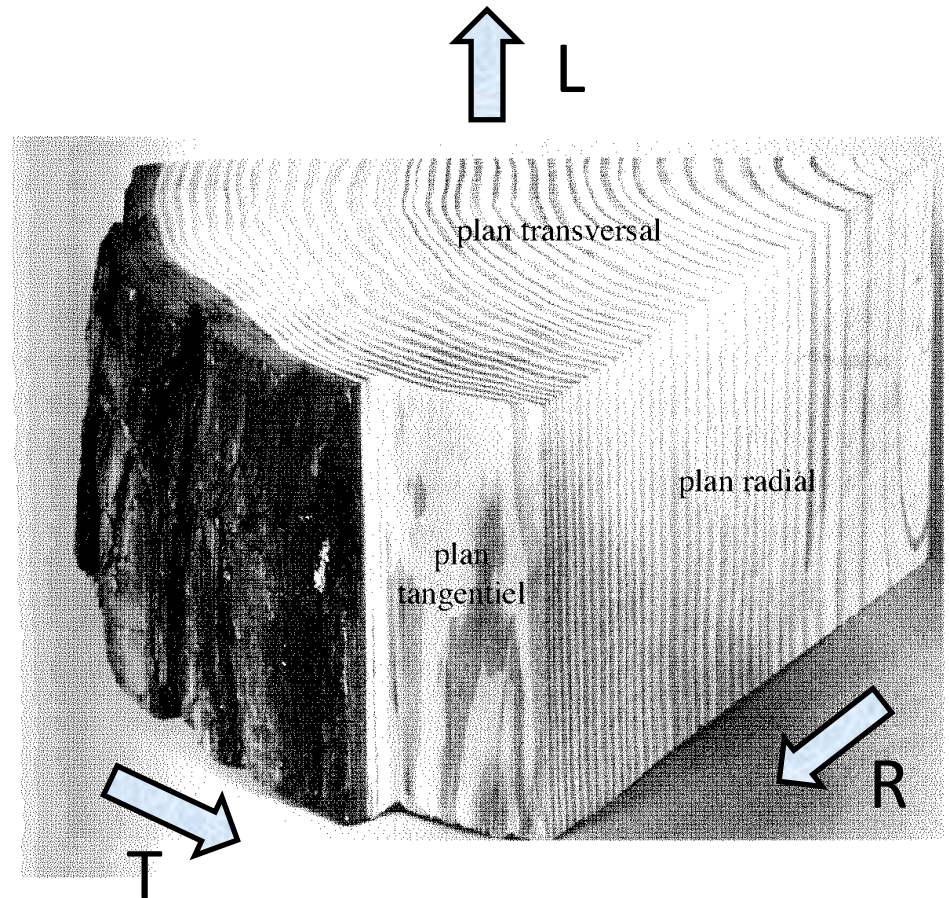
2. La structure du bois

Niveau macroscopique

- Matériau **anisotrope**, propriétés mécaniques, physiques et technologiques qui changent suivant la direction (L, R, T)
- Trois plans ligneux :

Plan transversal	: TR
Plan tangentiel	: LT
Plan radial	: LR

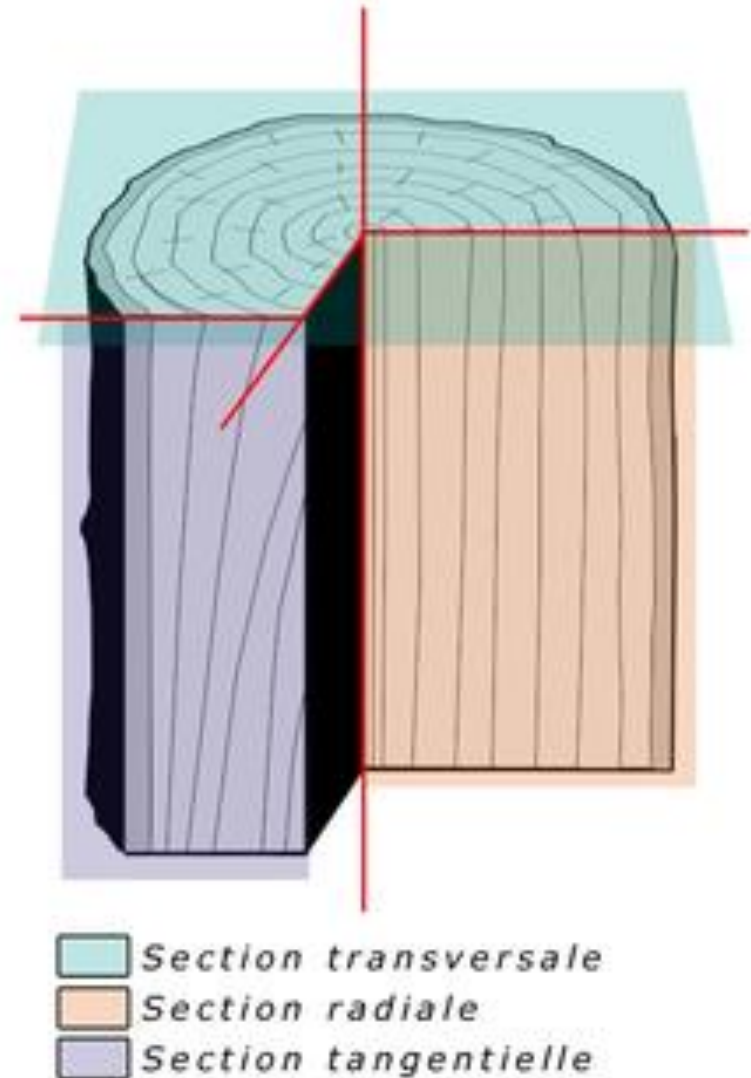
→ Symétrie cylindrique



2. La structure du bois

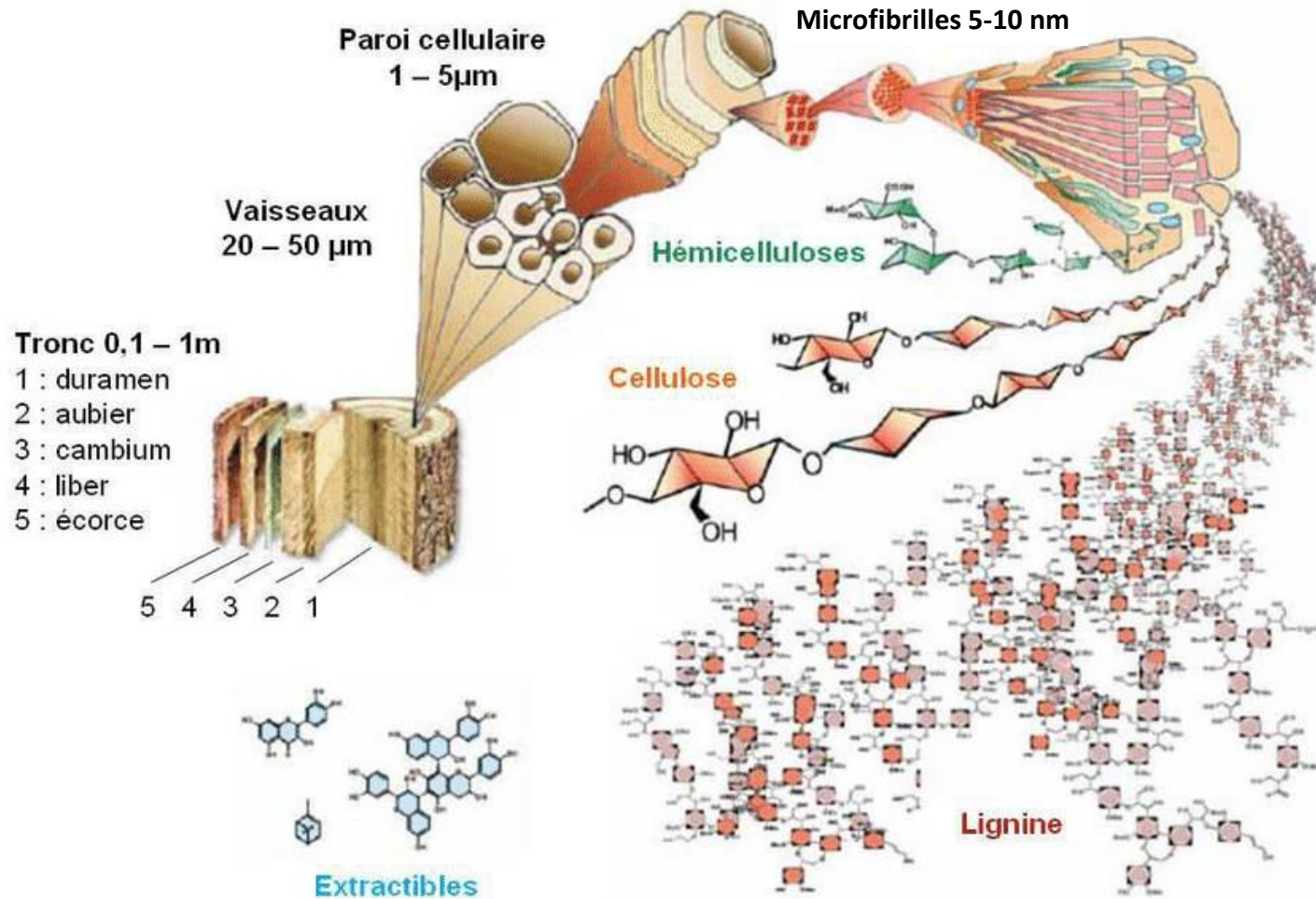
Niveau macroscopique

- Matériau **anisotrope**, propriétés mécaniques, physiques et technologiques qui changent suivant la direction (L, R, T)
 - Trois plans ligneux :
 - Plan transversal : TR
 - Plan tangentiel : LT
 - Plan radial : LR
- Symétrie cylindrique



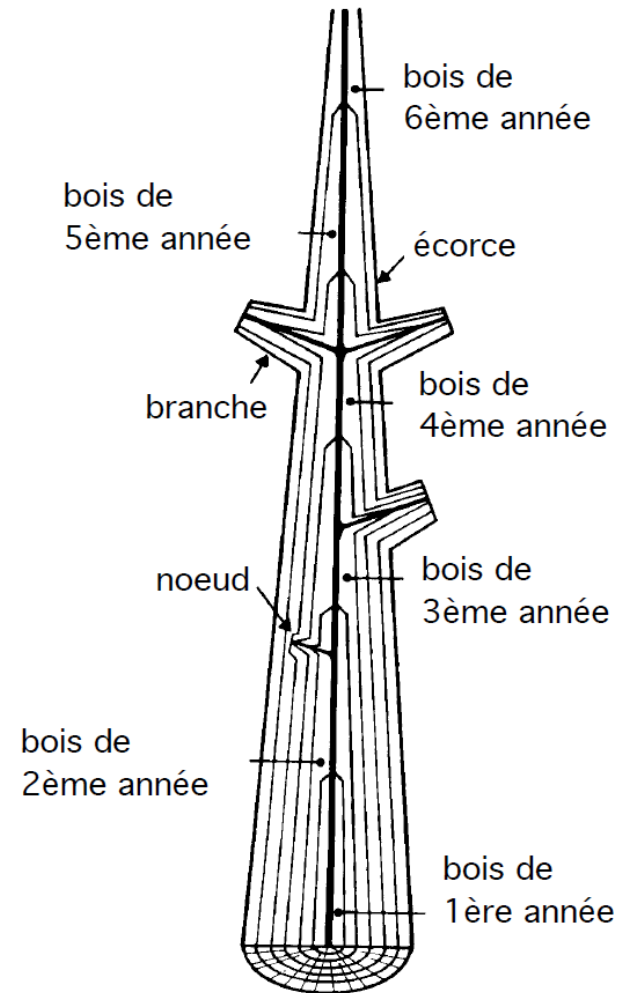
2. La structure du bois

Structure multiéchelle



3. La croissance annuelle

- **Croissance primaire** : assurée par le fonctionnement de méristèmes primaires (cellules souches) (ou méristèmes apicaux) situées à la tête ou au sommet du tronc, des branches et des racines.
- **Croissance secondaire** : est issue des tissus appelés « assise génératrice » libéro-ligneuse qui se trouvent entre le bois et l'écorce (méristèmes secondaires). Cette zone est désignée par la zone cambiale.



superposition successive des couches en forme de cônes 13

3. La croissance annuelle

Croissance secondaire

duramen = **bois parfait**

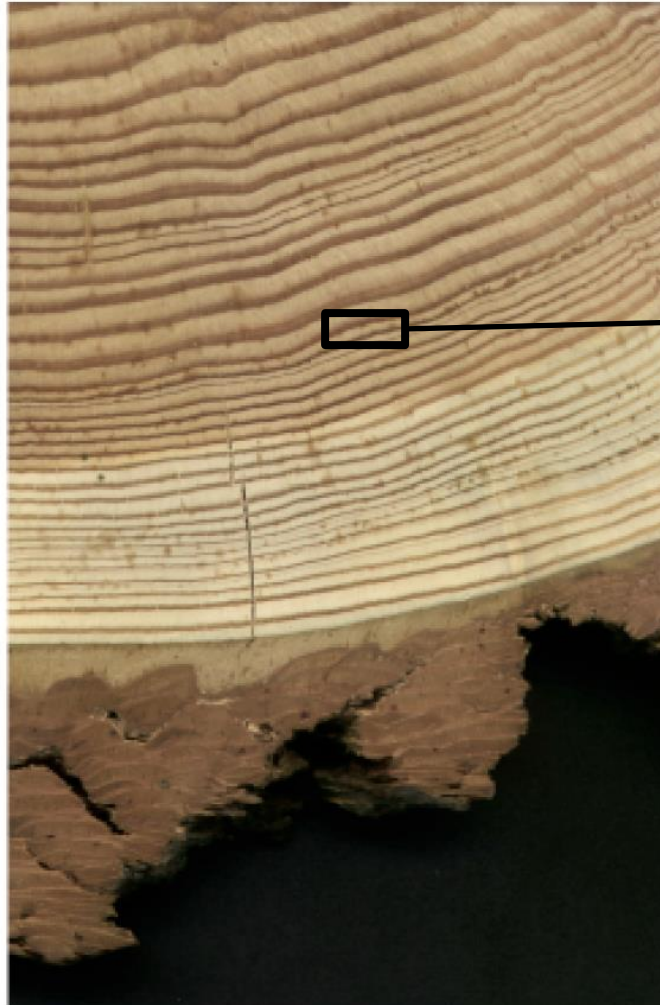
aubier (bois fonctionnel)

assise génératrice (libéro-
ligneuse) ou cambium
(non visible à l'œil nu)

liber = **écorce interne** (vivante)

liège ou

suber = **écorce externe** (inerte)



Un **cerne annuel** est composé de :

- 1 cercle clair = bois de printemps
- 1 cercle foncé = bois d'été

→ Un **cerne annuel** correspond à la croissance d'une année

3. La croissance annuelle - microstructure

Croissance secondaire

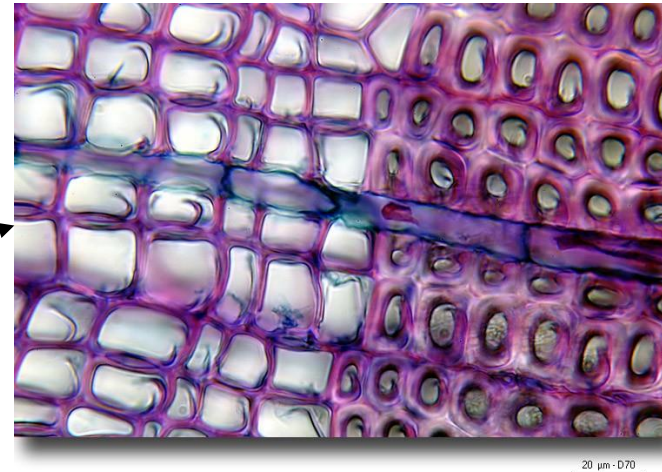
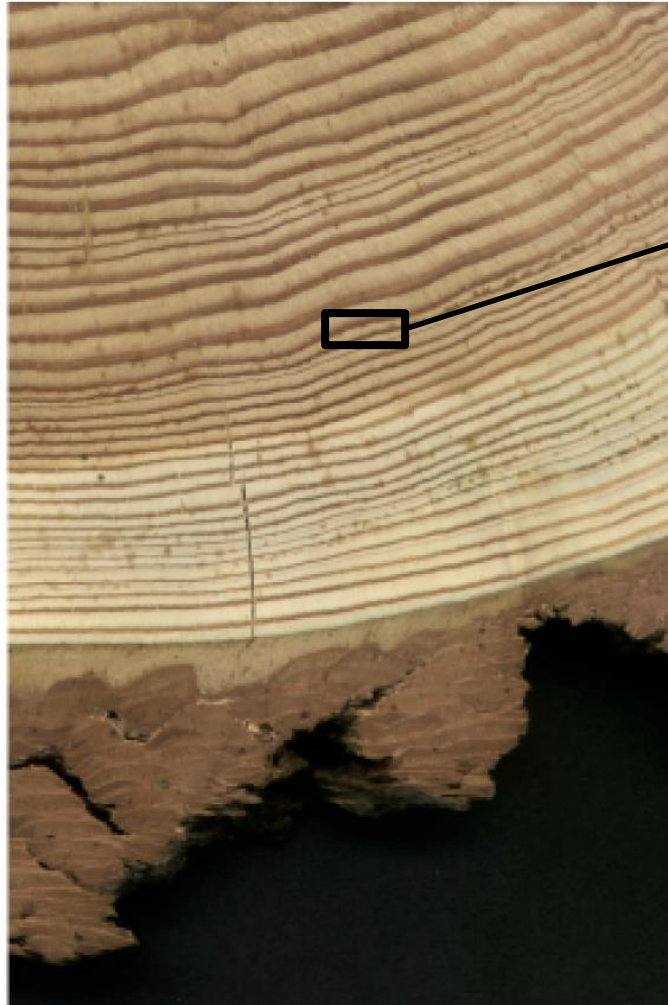
duramen = bois parfait

aubier (bois fonctionnel)

assise génératrice (libéro-
ligneuse) ou cambium
(non visible à l'œil nu)

liber = **écorce interne** (vivante)

liège ou
suber = **écorce externe** (inerte)



Printemps / Été

Un **cerne annuel** est
composé de :

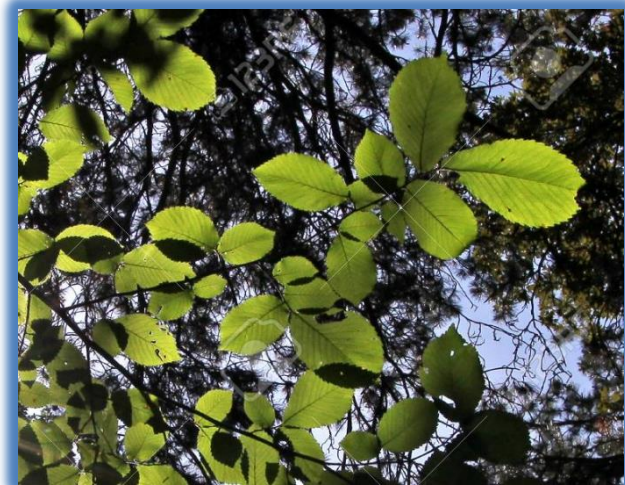
- Bois de printemps (initial)
- Bois d'été (final)

→ Transition de la densité

4. La classification des arbres

Dans les régions tempérées, on distingue **deux grandes classes** d'arbres :

- **résineux ou conifères**
- **feuillus**
 - ✓ à zones poreuses
 - ✓ à pores diffus



Les 3 fonctions assurées par les arbres

1. Soutien

L'arbre doit résister à son propre poids et aux conditions climatiques (vents etc...)

2. Conduction de la sève

Il faut des canaux pour transporter la sève des racines jusqu'aux branches

3. Stockage des éléments nutritifs

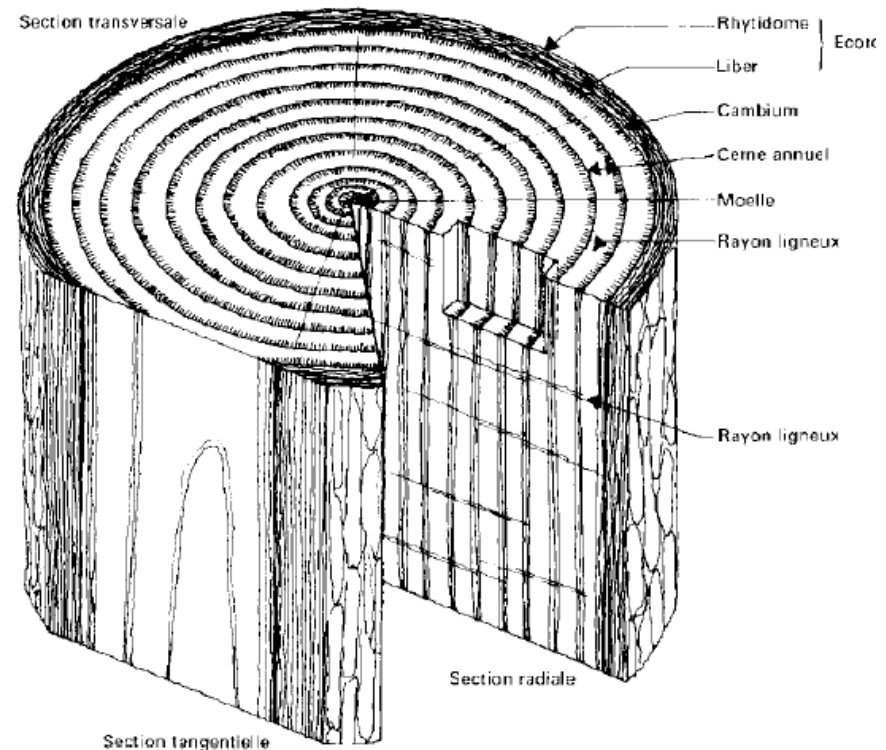
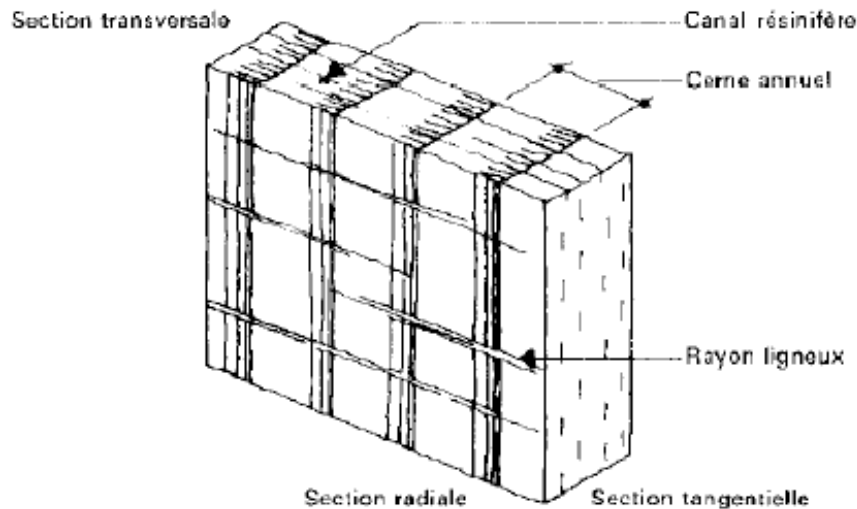
Il faut que le bois ait des réserves (notamment pour l'hiver).

Si ces 3 fonctions ne sont pas assurées, l'arbre meurt.

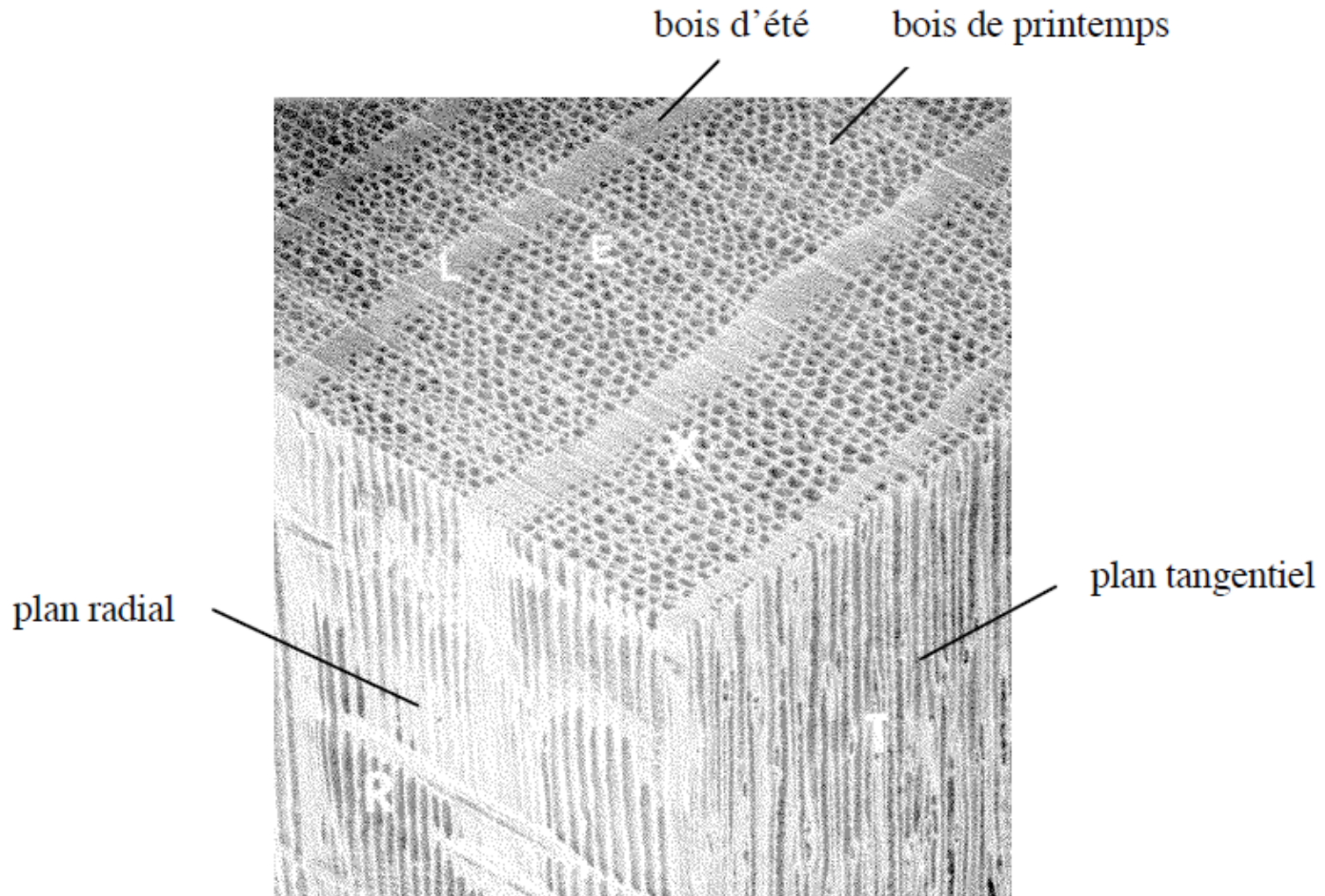
Différentes cellules assurent ces fonctions dans les arbres.

4.1. Les résineux ou conifères

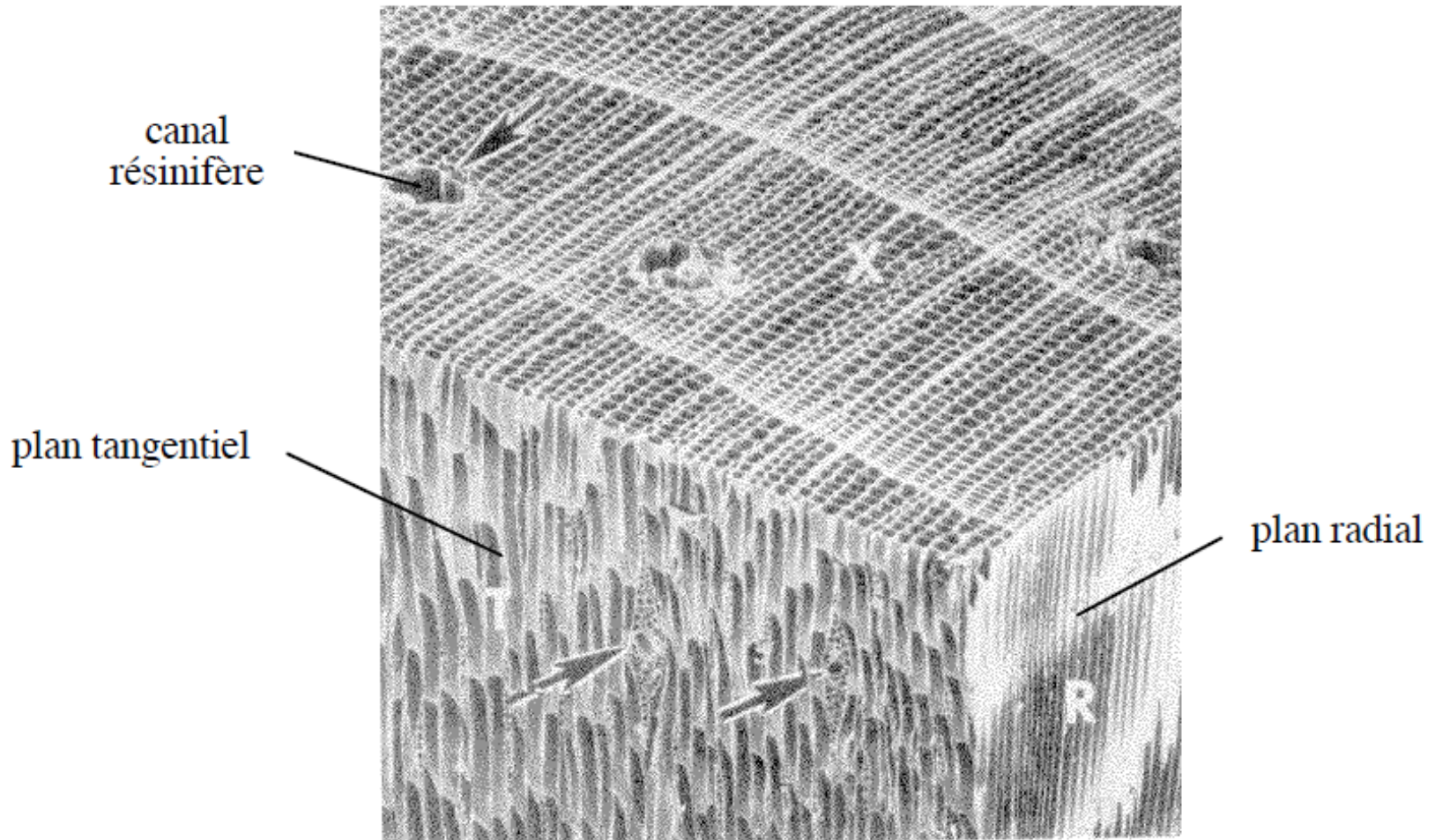
- Croissance annuelle facile à distinguer
- Conduction de la sève et soutien assurés par les cellules longitudinales (**trachéides**)
- Stockage assuré par les **cellules parenchymes** (dans les **rayons ligneux**)
- Ex : Pin, Sapin, Epicéa, Mélèze



4.1. Les résineux ou conifères

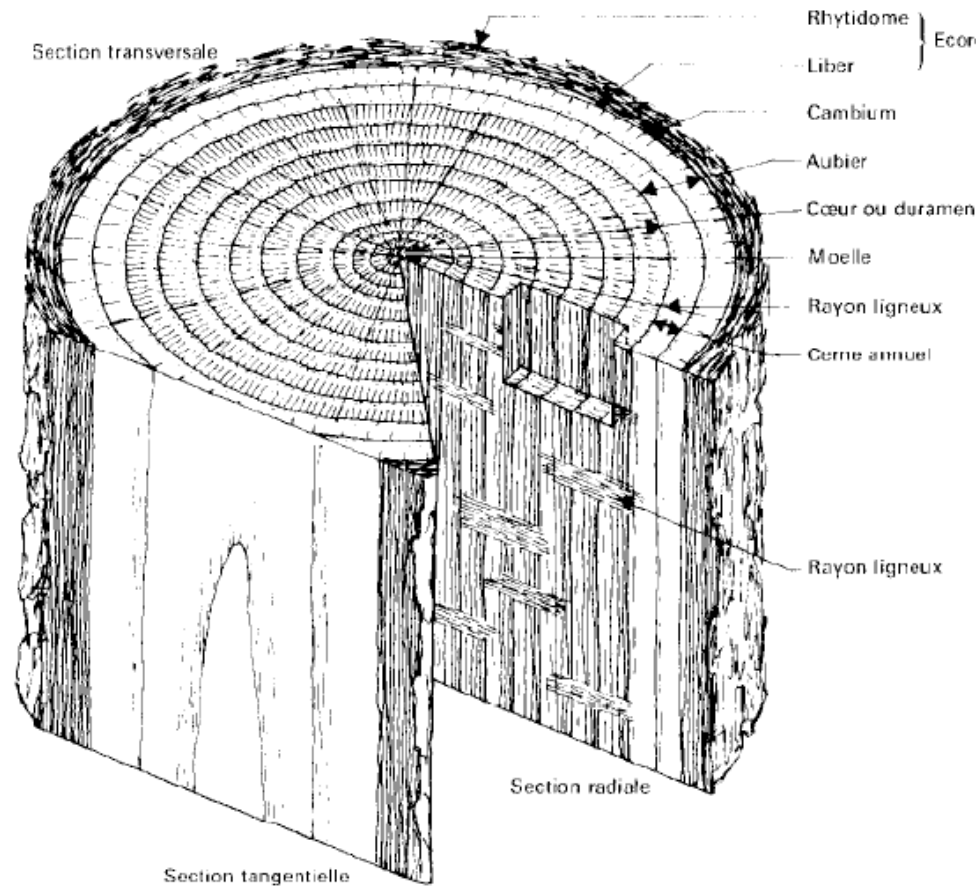
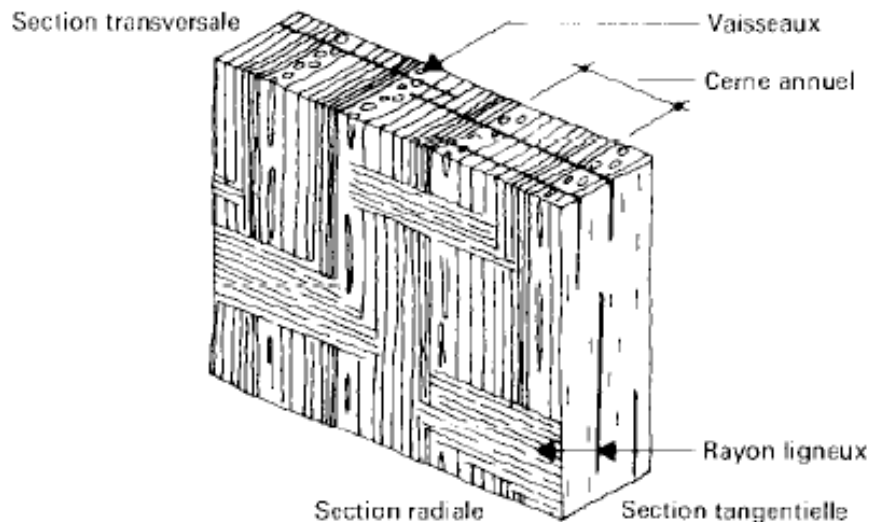


4.1. Les résineux ou conifères



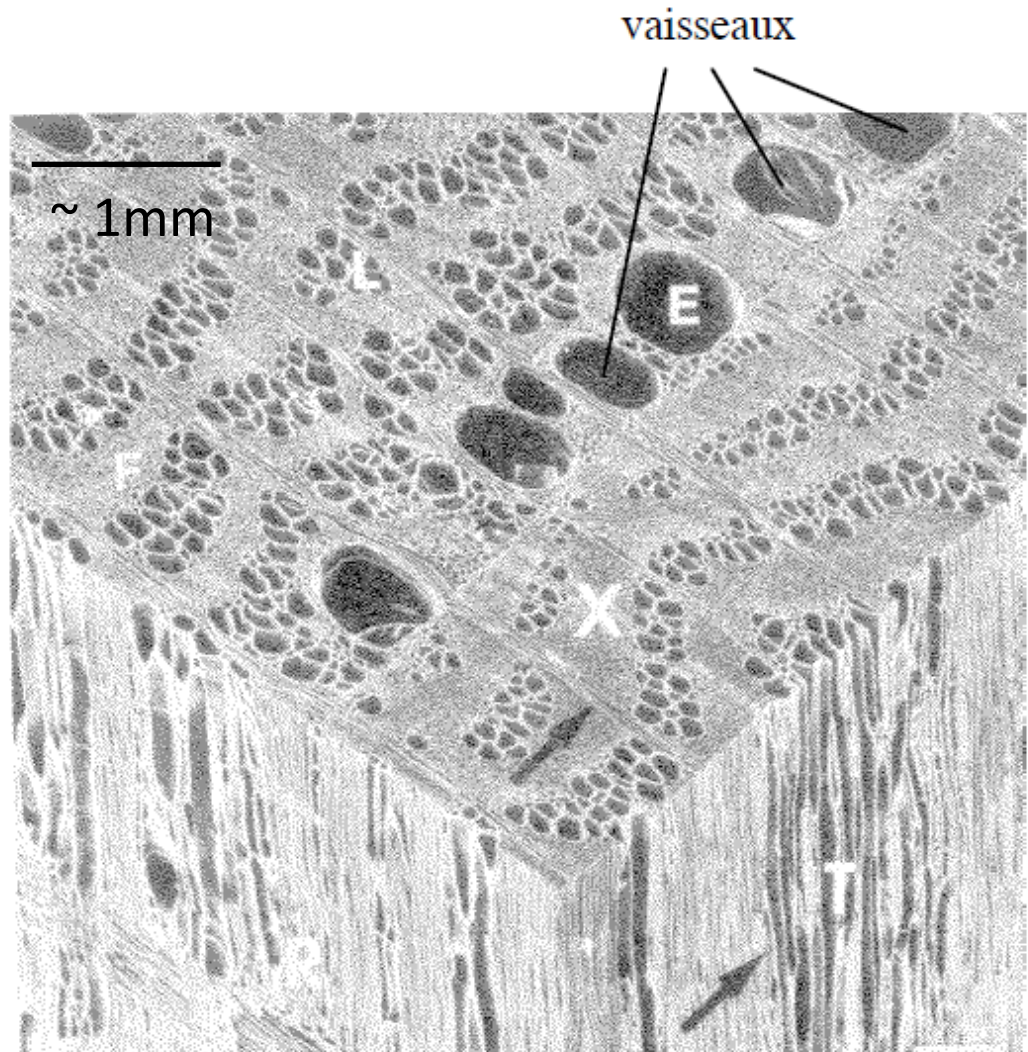
4.2. Les feuillus

- Croissance annuelle difficile à distinguer (chez les feuillus à pores diffus)
- Soutien : **fibres**
- Conduction de la sève : **vaisseaux**
- Stockage : **cellules parenchymes** (dans les **rayons ligneux**)
- Ex : hêtre, chêne, frêne, châtaignier, charme



4.2.1. Les feuillus à zones poreuses

Exemples :
chêne, frêne, châtaignier



Observation microscopique d'un feuillu à zones poreuses 22

4.2.2. Les feuillus à pores diffus

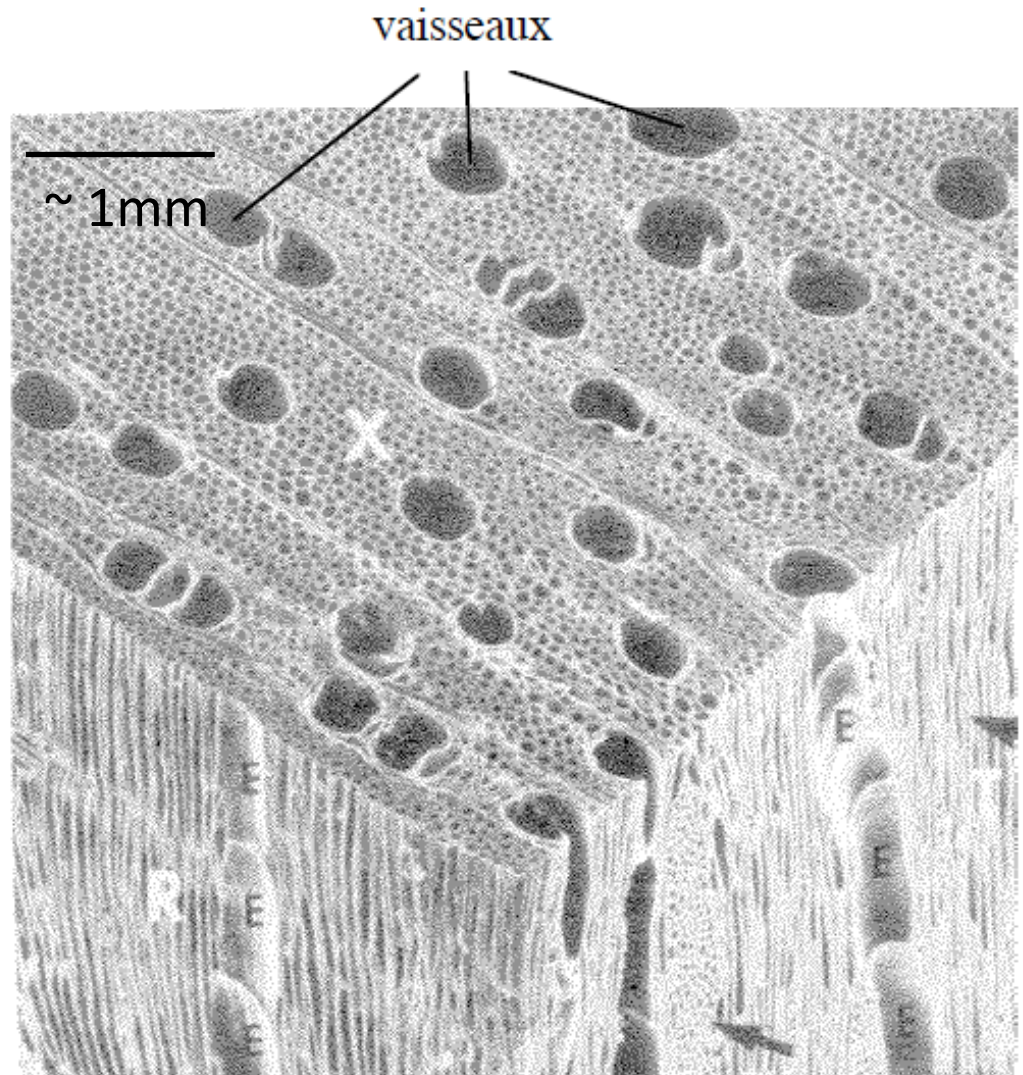
Exemples :

hêtre, peuplier,

bouleau, charme

Observation microscopique d'un feuillu à pores diffus.

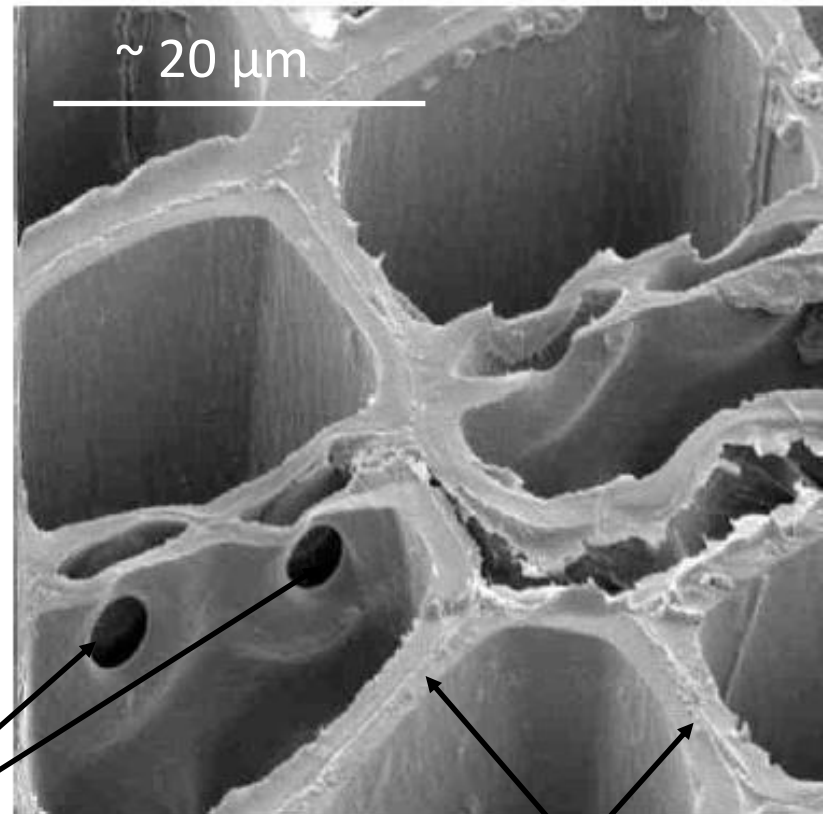
La distinction du cerne annuel est difficile à cause des pores



5. La microstructure du bois

Niveau microscopique

- cellule
- parois
- ponctuation
- vaisseaux
- rayons ligneux
- canaux résinifères



Ponctuations

Parois des cellules

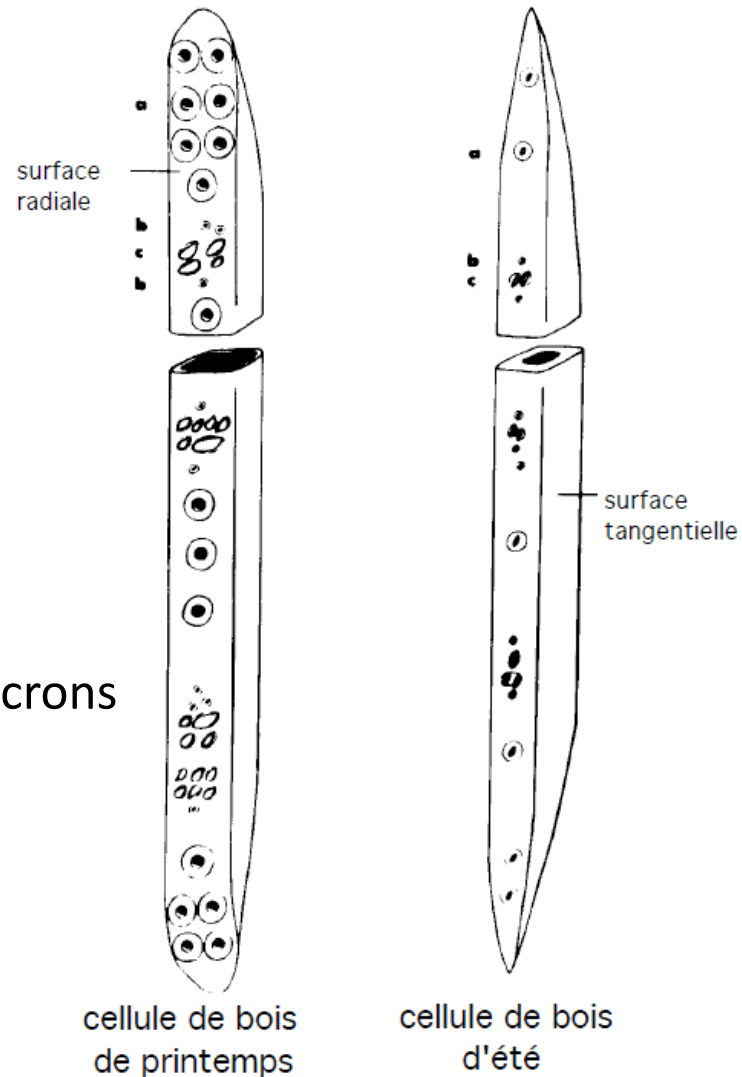
5.1. La microstructure des résineux

Les résineux sont constitués par :

- les **trachéides** (+ponctuations)
- les **rayons ligneux** (cellules **parenchymes**).

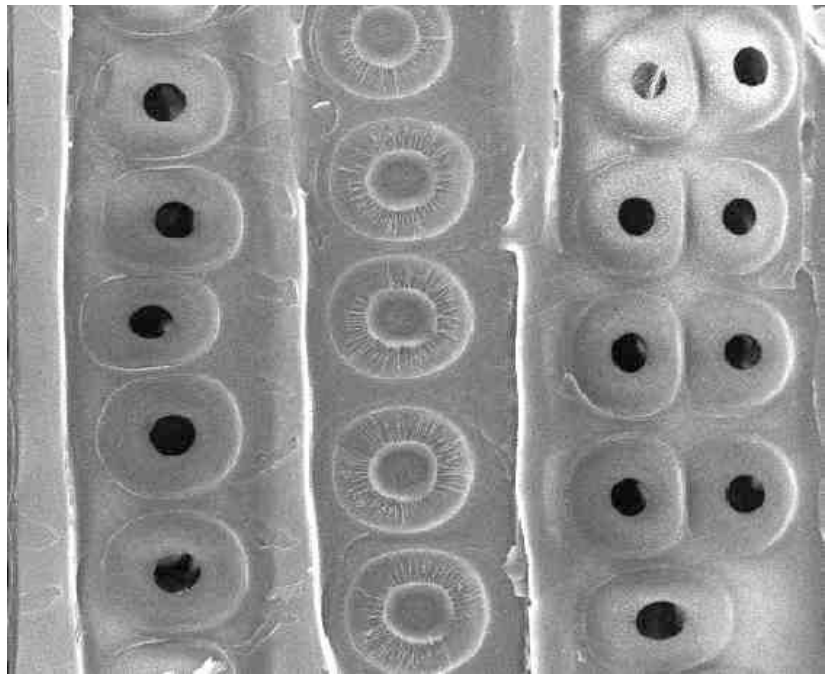
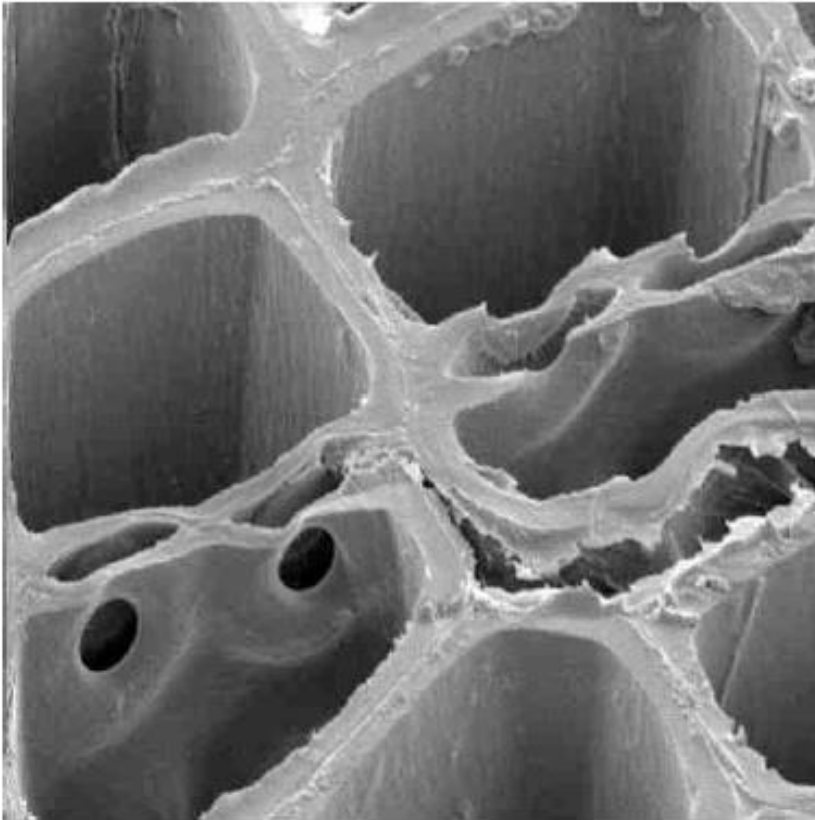
Les trachéides :

- 90% des cellules des bois résineux
- Conduction de la sève
- Soutien de l'arbre
- Longueur de 2 à 9 mm
- Section carrée ou rectangulaire de 15 à 35 microns
- Possèdent des ponctuations
- Direction longitudinale



5.1. La microstructure des résineux

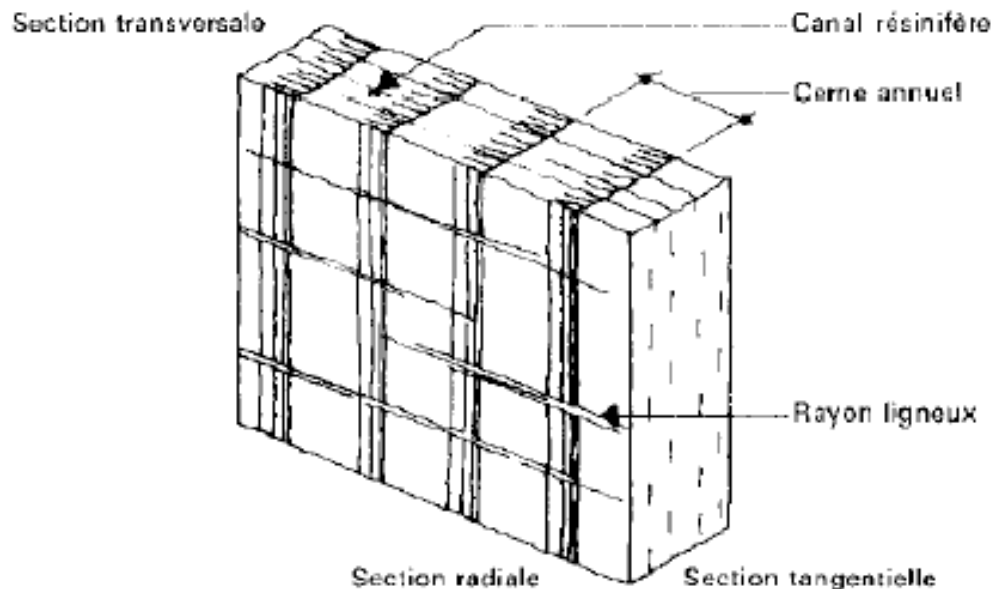
Les ponctuations



5.1. La microstructure des résineux

Les rayons ligneux

- Essentiellement constitués de cellules **parenchymes**
- (trachéides transversaux)
- (canaux résinifères)
- Rôle : conduction radiale, accumulation de réserves



5.2. La microstructure des feuillus

Les feuillus sont plus complexes que les résineux :

- **Vaisseaux**

- ✓ conduction de la sève
- ✓ Longueur : variable selon esp.
- ✓ Diamètre : de 20 à 300 μm

- **Fibres**

- ✓ Soutien de l'arbre
- ✓ Longueur : entre 0.8 et 2.3 mm

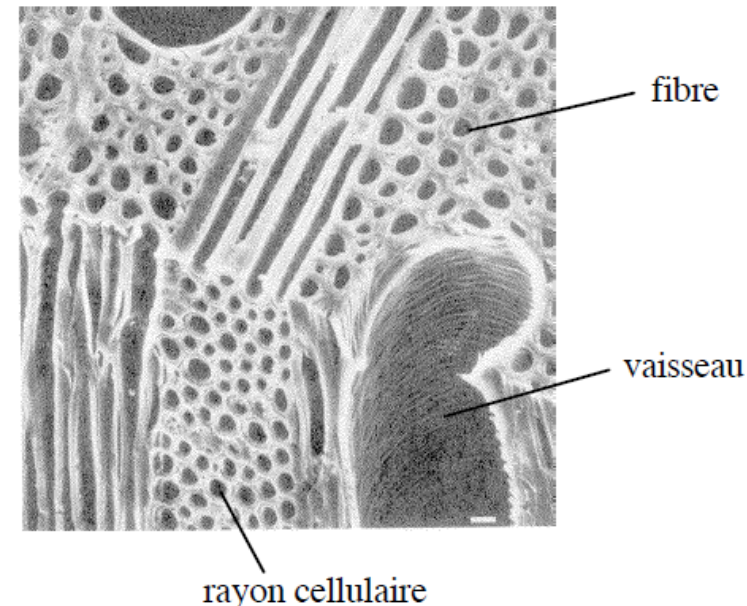
- **(Trachéides : soutien et conduction)**

- **Parenchymes longitudinaux :**

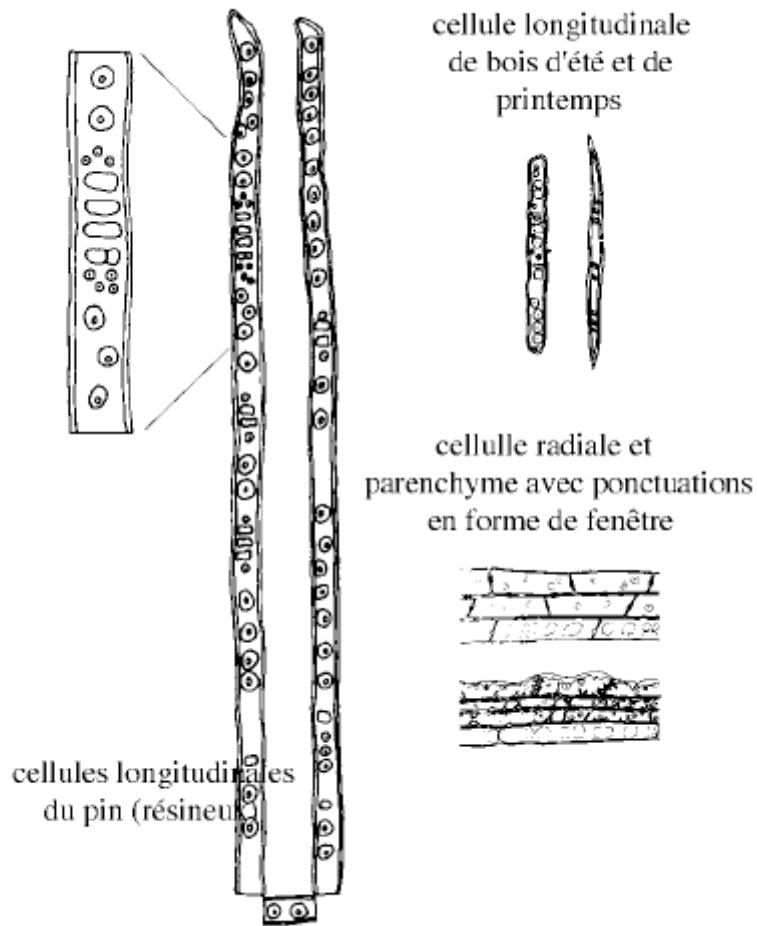
- ✓ Stockage, nutrition

- **Parenchymes transversaux (dans les rayons ligneux) :**

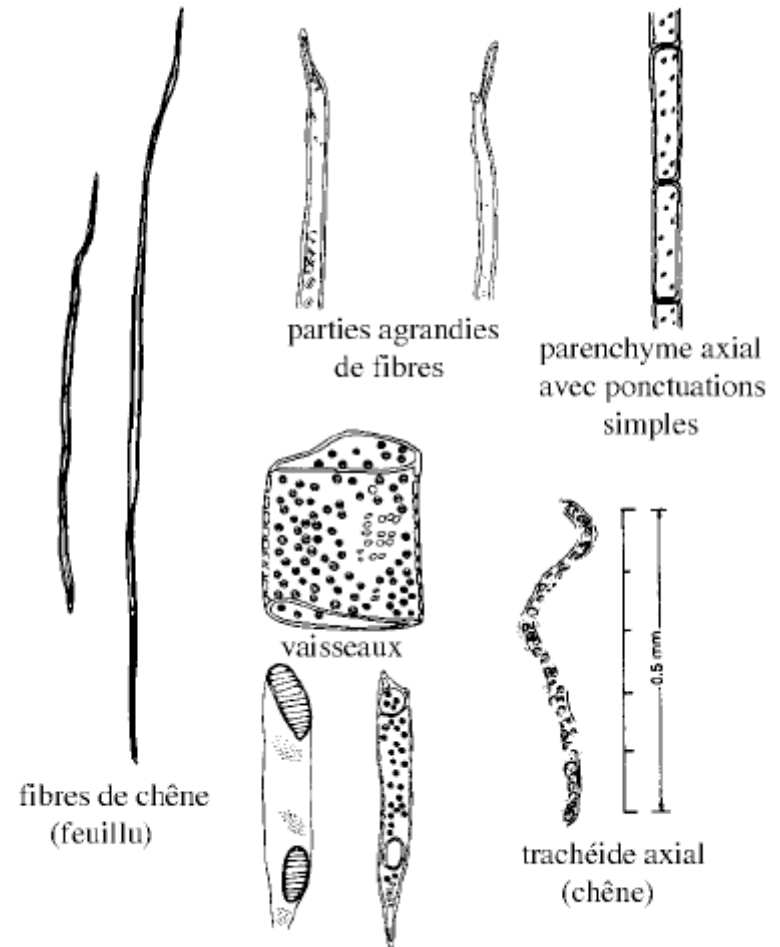
- ✓ Stockage, nutrition



5.3. Comparaison

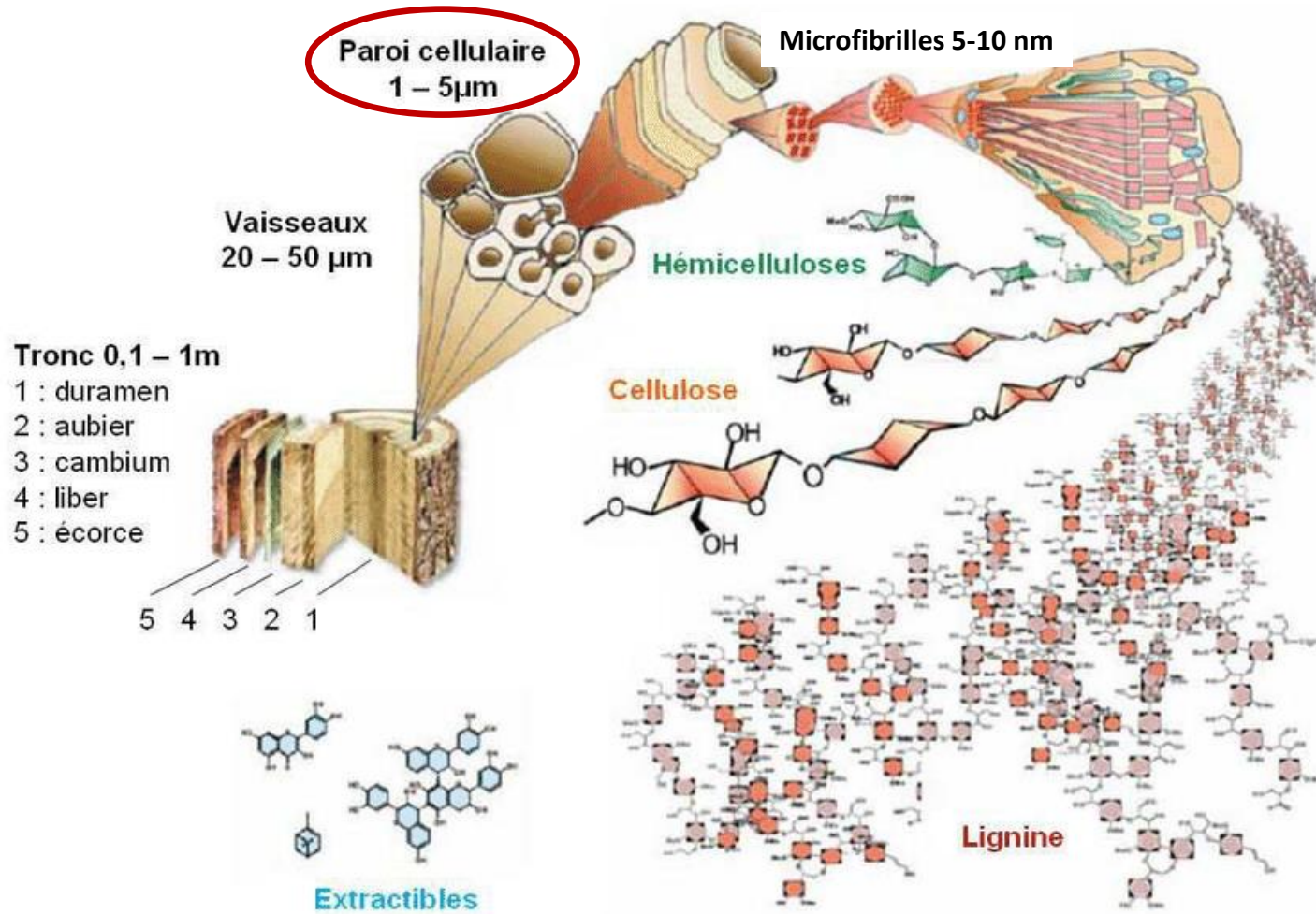


Cellules de résineux



Cellules de feuillus

5.4. Ultra-structure : la paroi cellulaire



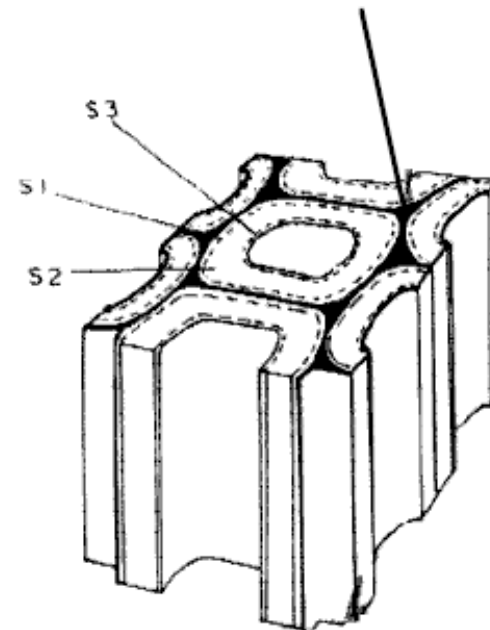
d'après © Per Hoffmann, Oskar Faix and Ralph Lehen

5.4. Ultra-structure : la paroi cellulaire

Les parois des cellules possèdent essentiellement :

- **Couche intercellulaire M**
de 0.5 à 1.5 μm
- **Paroi primaire P** : 0.1 μm env.
- **Paroi secondaire S** (S1, S2, S3)

Lamelle moyenne: paroi primaire et
couche intercellulaire

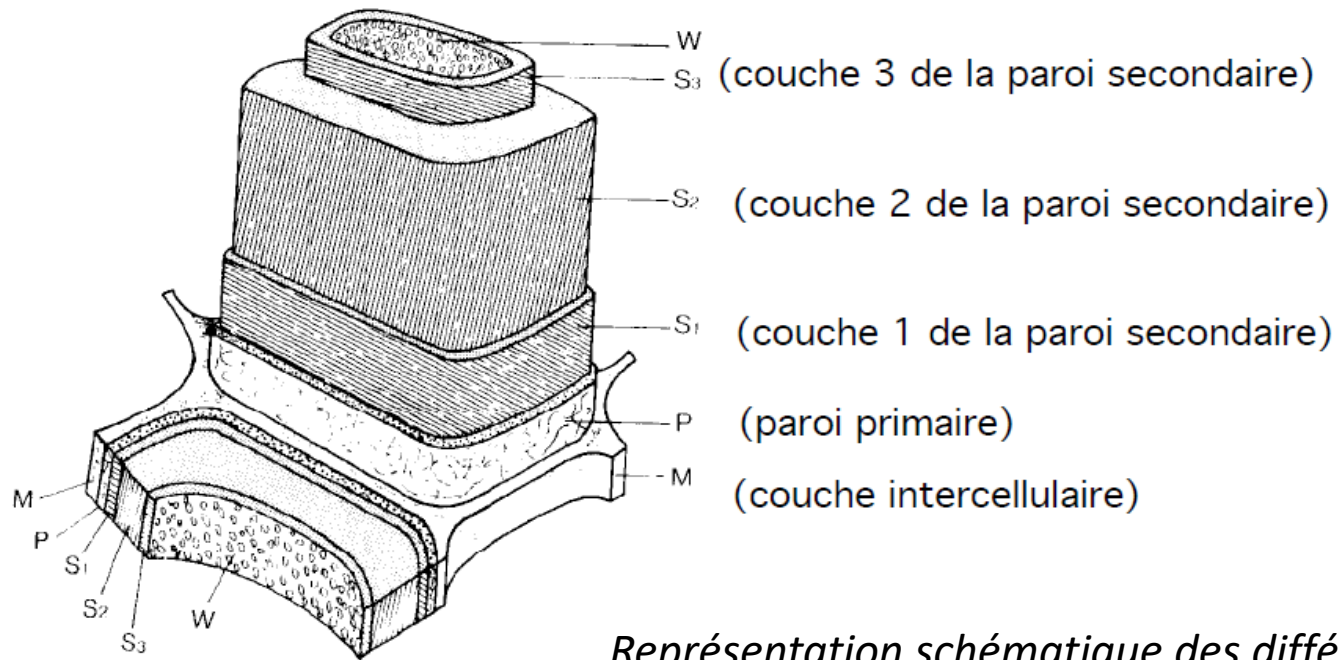


s_1 : Couche 1 de la paroi secondaire

s_2 : Couche 2 de la paroi secondaire

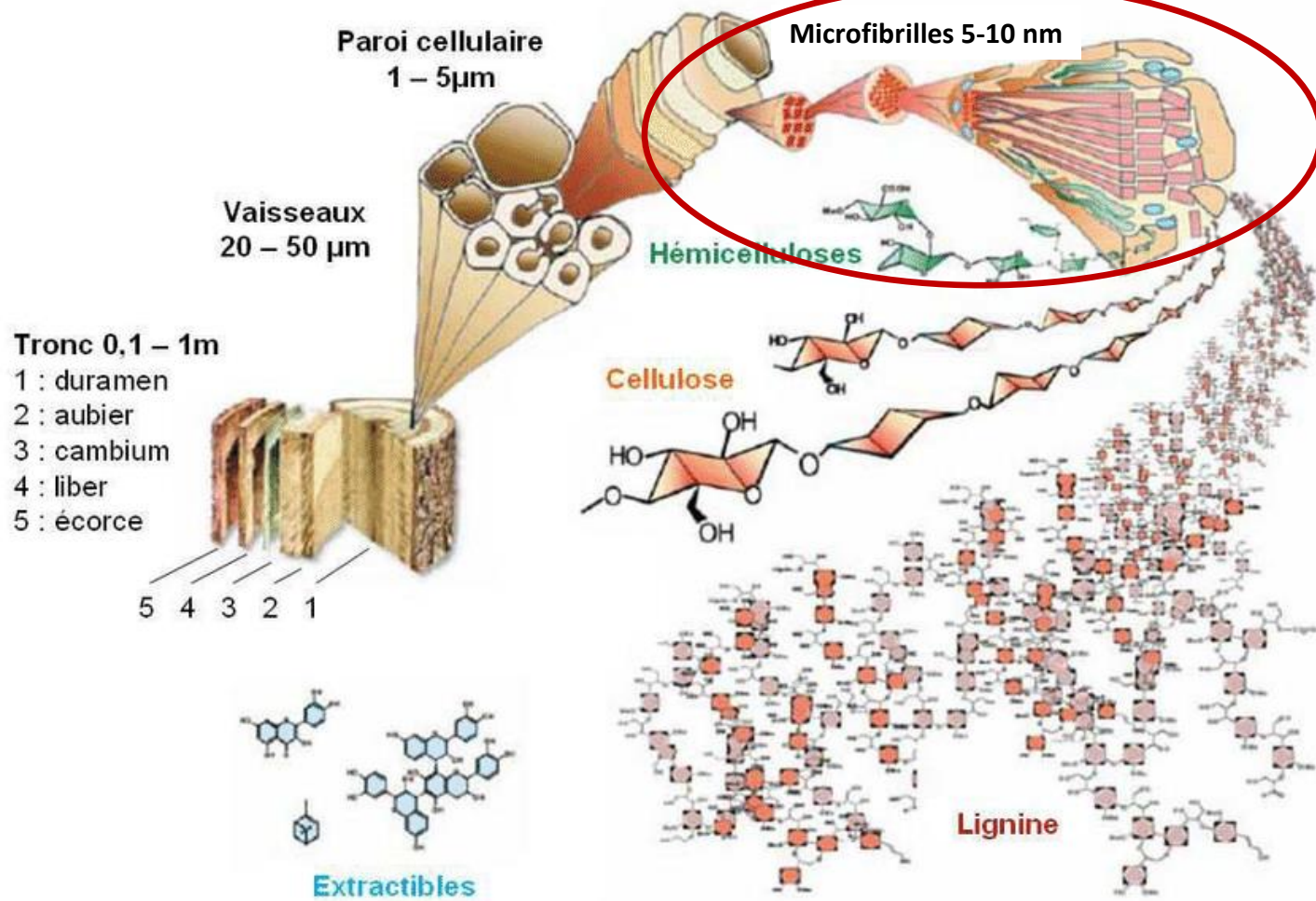
s_3 : Couche 3 de la paroi secondaire

5.4.1. Ultra-structure : la paroi cellulaire



Représentation schématique des différentes couches constituant la paroi cellulaire

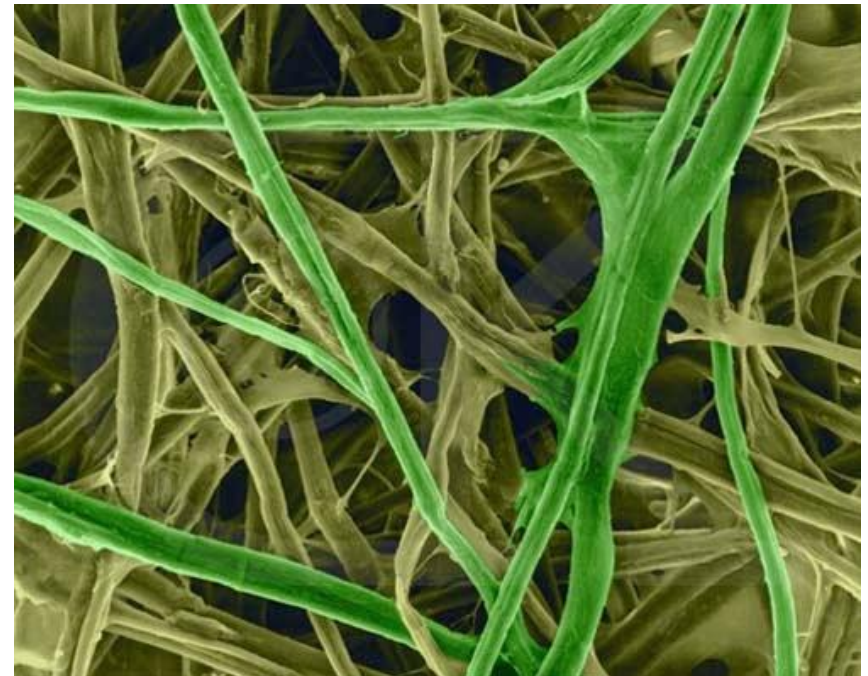
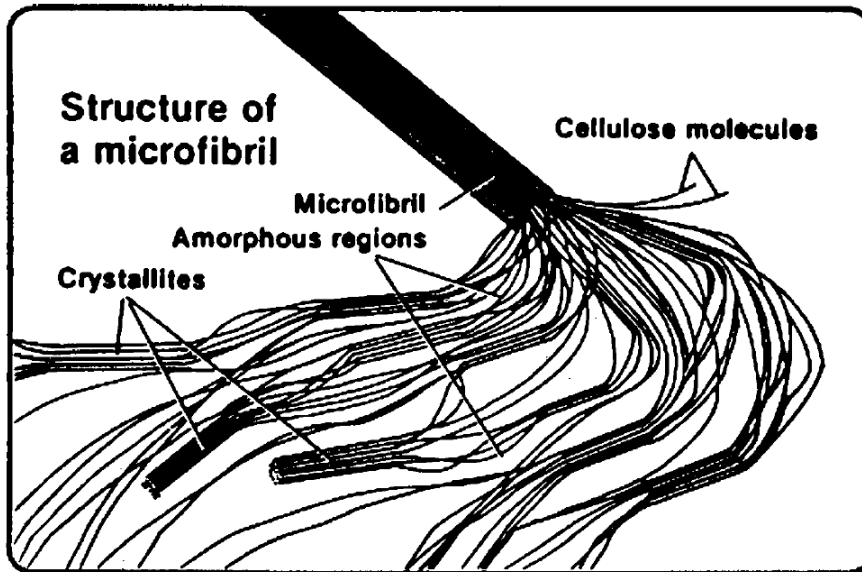
5.4. Ultra-structure : les microfibrilles



d'après © Per Hoffmann, Oskar Faix and Ralph Lehen

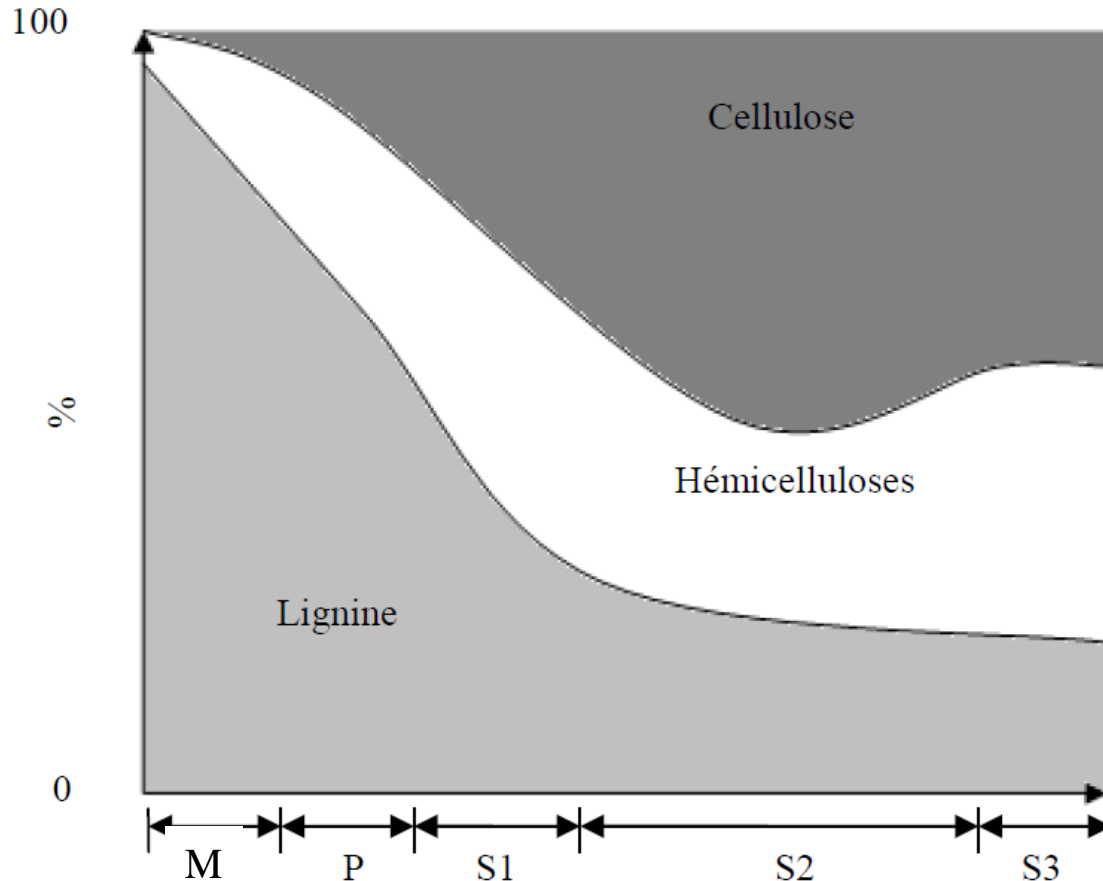
5.4. Ultra-structure : les microfibrilles

Les **microfibrilles** sont des filaments très minces qui sont entourés d'une matrice formant la paroi de la cellule.



Microfibrilles = très résistants

6. Les constituants chimiques du bois



- **Microfibrilles** = cellulose
Matrice = lignine + hémicellulose
- **Lignine** = polymère réticulé 3D
- **Cellulose** = polymère semi-cristallin
- **Hémicellulose** = polymère amorphe hydrophile

Distribution en % de la cellulose, la lignine et l'hémicellulose à l'intérieur de la paroi cellulaire en fonction des couches (M, P, S).

6. Les constituants chimiques du bois

Globalement :

Constituant chimique	%	Élément
Cellulose	45 - 50	Microfibrille
Hémicellulose	20 - 25	Matrice
Lignine	20 - 30	Matrice
(Extractif)	0 - 10	Élément de protection

7. Les propriétés du bois



7.1.1. Propriétés physiques : la densité

Essence	Densité anhydre moyenne (g.cm ⁻³)	Porosité (%)
Balsa	0.10	94
Epicéa	0.40	75
Hêtre	0.65	58
Amourette (acacia exotique)	1.30	17

7.1.2. Propriétés physiques : la teneur en eau

$$W(\text{teneur en eau}) = \frac{M_w - M_o}{M_o} \times 100$$

M_o : poids du bois sec
 M_w : poids du bois humide

Dénomination	Teneur en eau W
Bois anhydre	0 %
Bois desséché	$0 < W < 13 \%$
Bois sec à l'air	$13 < W < 18 \%$
Bois commercialement sec	$18 < W < 23 \%$
Bois mi-sec	$23 < W < 30 \%$
Bois vert	$> 30 \%$

**PSF : POINT DE SATURATION DES FIBRES
 $\approx 30 \%$ POUR TOUTES LES ESPÈCES**



saturation
complète



$W > 30\%$



saturation des
fibres



$0 < W < 30\%$

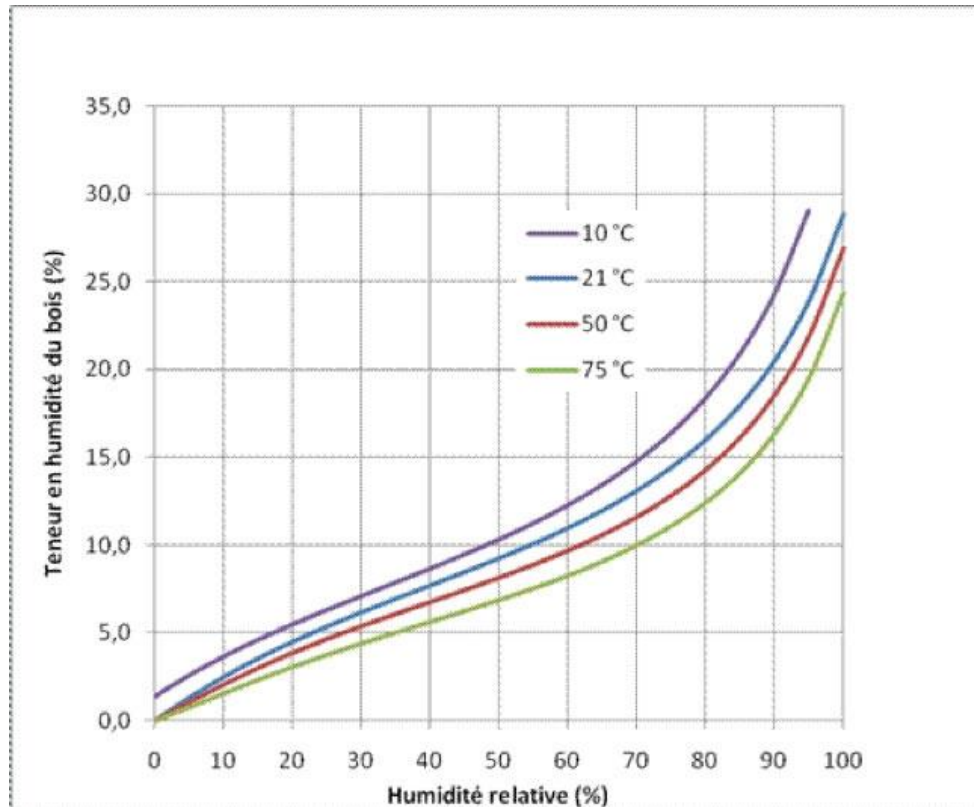


$W = 0\%$

Vides

7.1.3. Propriétés physiques : l'adsorption

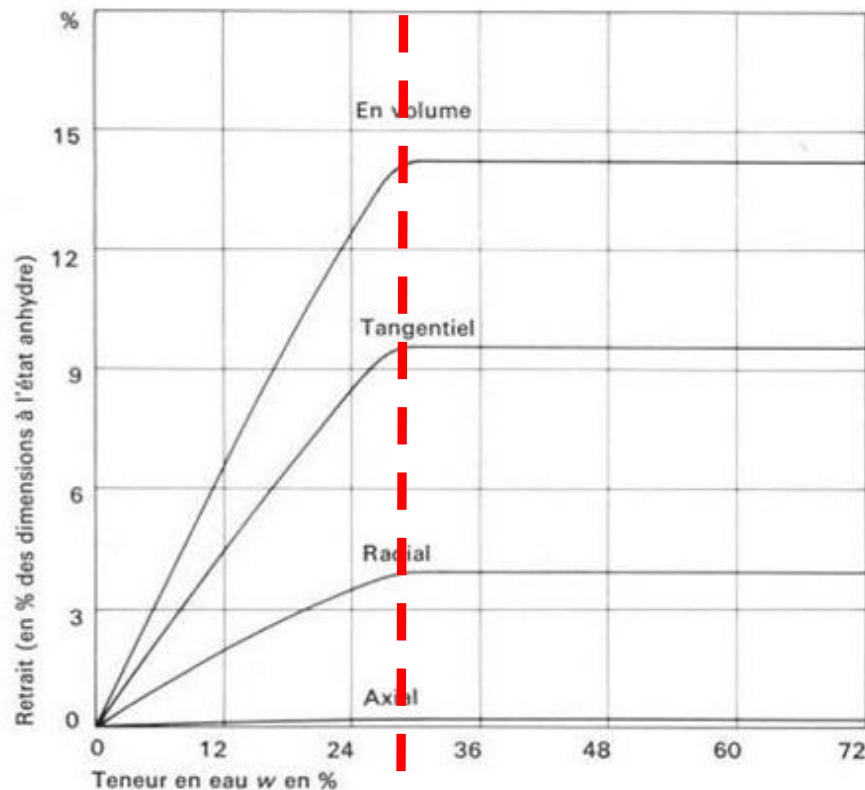
Isotherme d'adsorption : courbe reliant la teneur en humidité d'équilibre et l'humidité relative de l'air ambiant pour une température constante



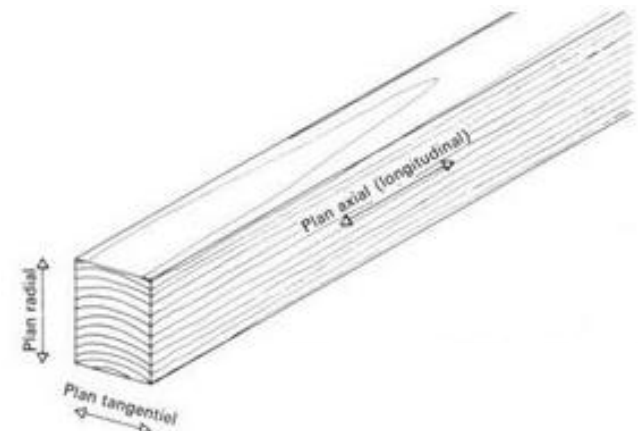
Source : <http://www.cecobois.com>

7.1.4. Propriétés physiques : retrait/gonflement

- Forte déformation
- Anisotropie
- Importance du PSF (point de saturation des fibres)



PSF



7.1.5. Propriétés thermiques

Dilatation thermique (Anisotropie)

$$\Delta l/l = \alpha \cdot \Delta T$$

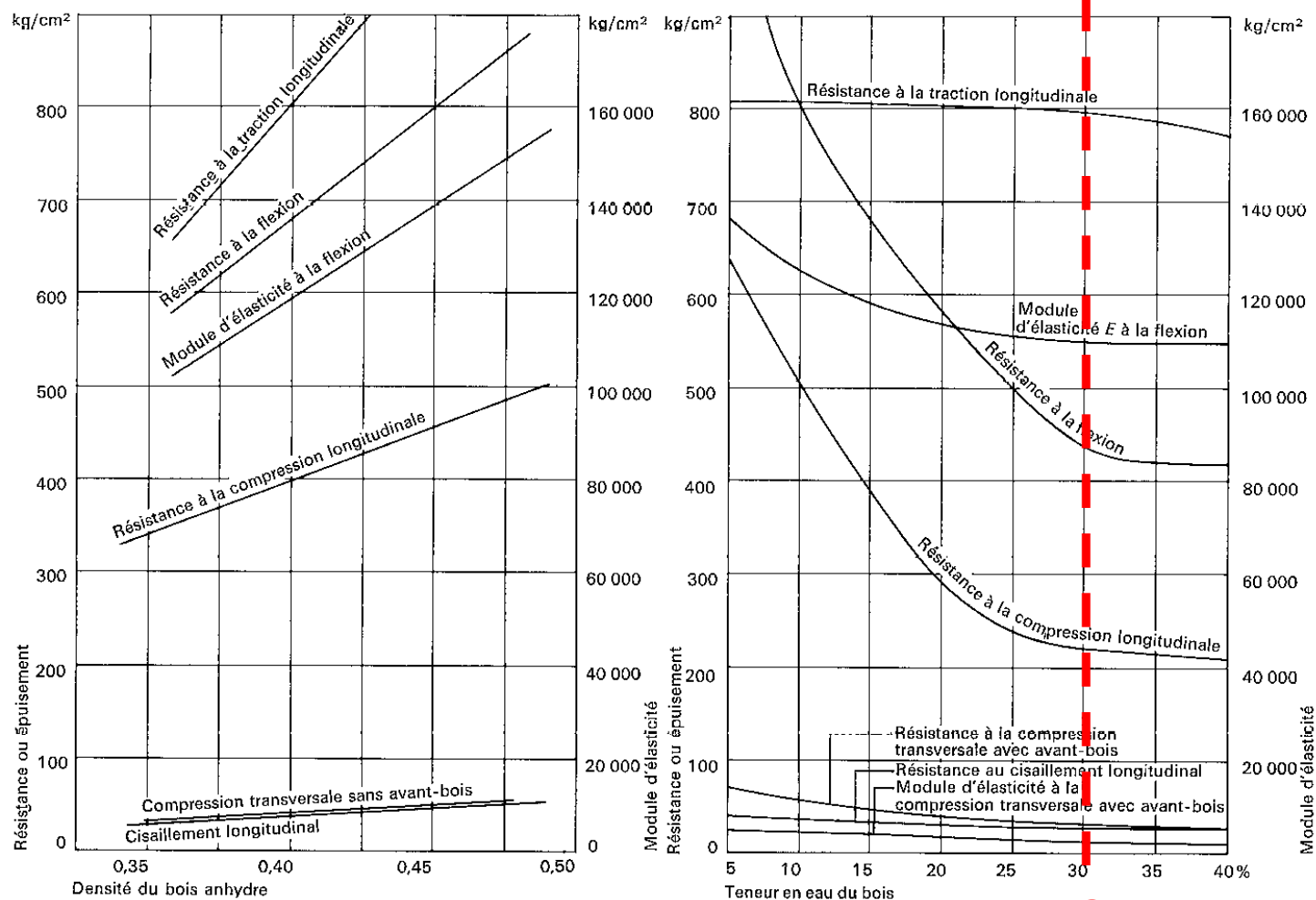
Coefficient de dilatation thermique α	Bois (K ⁻¹)	Béton ordinaire (K ⁻¹)
$\alpha_{\text{tangential}}$	25.10 ⁻⁶ - 50.10 ⁻⁶	10.10 ⁻⁶
α_{radial}	15.10 ⁻⁶ - 35.10 ⁻⁶	Acier (K ⁻¹)
$\alpha_{\text{longitudinal}}$	3.10 ⁻⁶ - 6.10 ⁻⁶	11.10 ⁻⁶

Conductivité thermique (Anisotropie, Isolant)

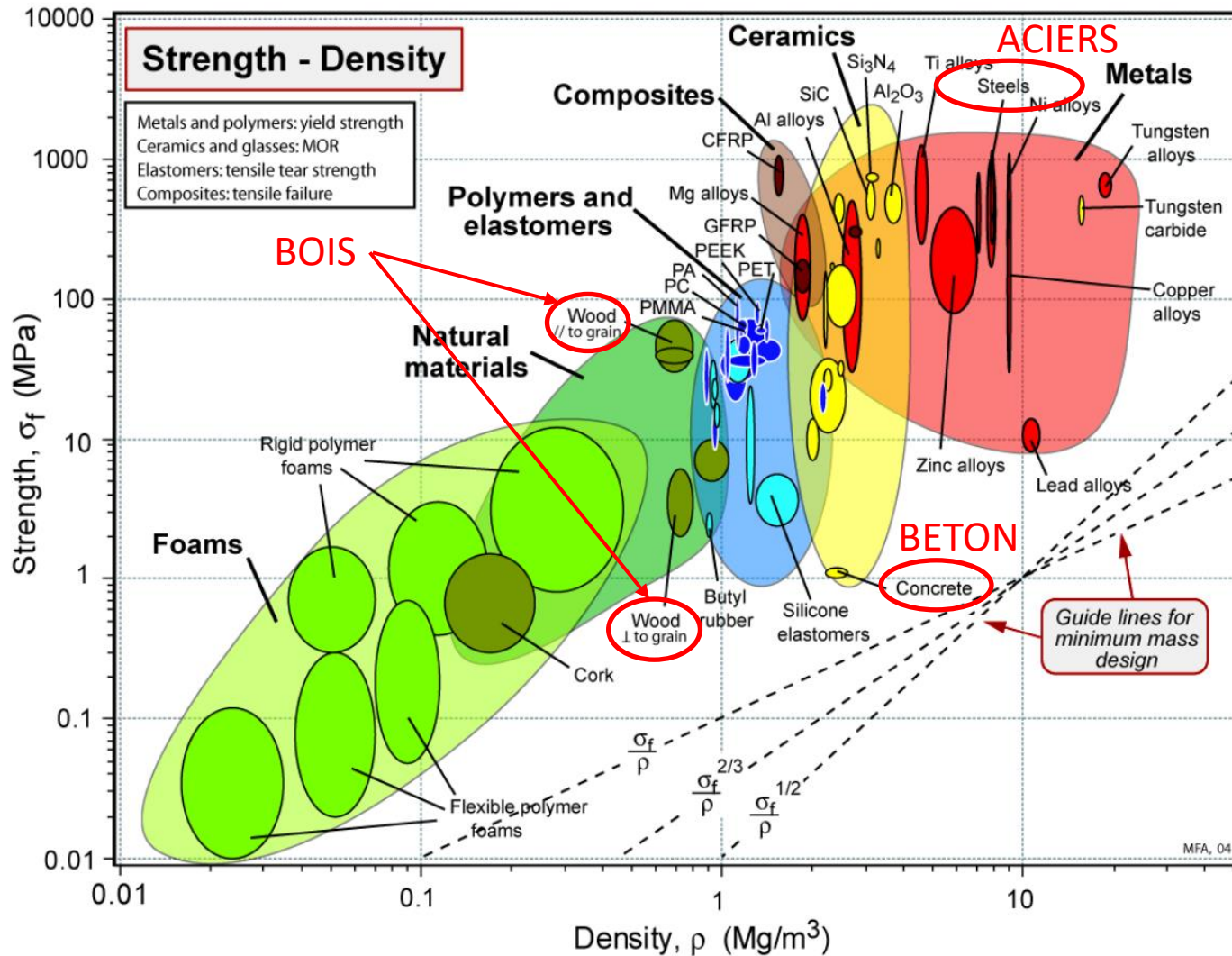
	Epicéa $\rho = 0.4 \text{ g.cm}^{-3}$		Chêne $\rho = 0.65 \text{ g.cm}^{-3}$		Béton ordinaire $\rho = 2.4 \text{ g.cm}^{-3}$
Teneur en eau	Sec à l'air (W = 15 %)	Humide (W = 35 %)	Sec à l'air (W = 15 %)	Humide (W = 35 %)	1.75
λ_{radial} (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.10	0.12	0.14	0.16	Acier $\rho = 7.8 \text{ g.cm}^{-3}$
$\lambda_{\text{tangential}}$ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.22	0.25	0.30	0.34	50

7.2. Propriétés mécaniques

Résistance et module d'élasticité



7.2. Propriétés mécaniques



7.2. Propriétés mécaniques

Résistance et module d'élasticité : quelques valeurs

Type	Essence	Masse volumique ρ (g.cm ⁻³)	Module d'élasticité en flexion $E_{//}$ (MPa)	Résistance à la compression $\sigma_{c//}$ (GPa)	Résistance à la traction $\sigma_{t//}$ (GPa)	Résistance à la flexion σ_f (GPa)
Feuillus	Bouleau	0.52 – 0.73	13.3 – 16.2	42 – 60	130 – 140	120 – 144
	Cerisier	0.55 – 0.61	9.5 – 11	44 – 55	98	83 – 110
	Châtaignier	0.55 – 0.74	8.2 – 8.8	40 – 52	115 – 142	63 – 79
	Chêne	0.98	10.5 – 14.5	52 – 64	88 – 110	86 – 108
Résineux	Epicéa	0.38 – 0.48	10 – 12	40 – 50	80 – 90	65 – 77
	Mélèze	0.54 – 0.63	10.6 – 14.5	45 – 62	92 – 110	88 – 99
	Pin sylvestre	0.53	10.8 – 13	45 – 55	99 – 105	79 – 100
	Sapin blanc	0.45	10 – 14.5	40 – 52	80 – 93	62 – 74

Source: Sell et Kropf, Propriétés et caractéristiques des essences de bois (1990)



8. Les produits dérivés



8. Produits dérivés (assemblages)

Quels sont les avantages / inconvénients des assemblages de bois ?

La plupart des produits dérivés du bois contiennent de la colle → les propriétés (notamment mécaniques) vont dépendre de la colle utilisée.

Avantages:

- Utilisation d'arbres de petites sections, déchets, morceaux de bois, chutes
- Produits de grandes tailles
- Elimination des défauts (nœuds par exemple)

Inconvénients:

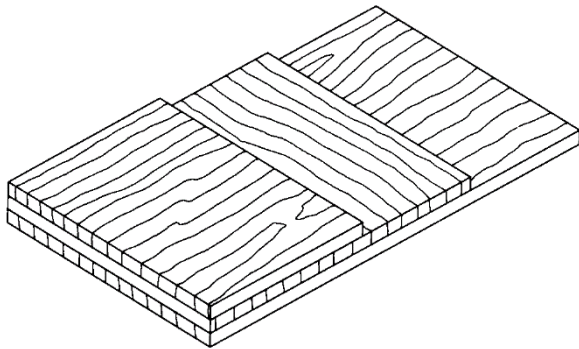
- Caractéristiques dépendantes de la qualité de la colle
- Les colles peuvent abîmer les outils de coupe et d'usinage
- Les colles ont un impact environnemental négatif

8.1. Contreplaqué

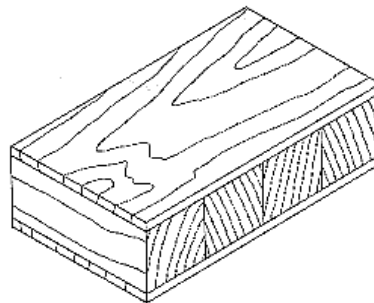
Panneaux constitués au moins de trois couches de bois, collées entre elles à fils croisés.

Deux types de panneaux :

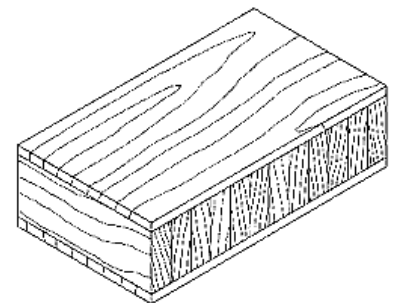
- panneaux à plis
- panneaux forts



Panneaux à
plis



Panneaux forts
à âme lattée



Panneaux forts
à âme lamellée

8.2. Panneaux de copeaux/fibres/particules

Composés de fibres de bois ou de faisceaux de fibres dont les propriétés physiques et mécaniques dépendent de l'adjonction de colle et de produits d'imprégnation. Peuvent être pressés à chaud.

Propriétés :

- propriétés identiques en longueur et largeur
- grandes dimensions
- absorption d'humidité plus faible
- retrait et gonflement plus faible

Durabilité :

Ne doivent pas être exposés directement aux intempéries, ni être soumis à une humidité trop élevée



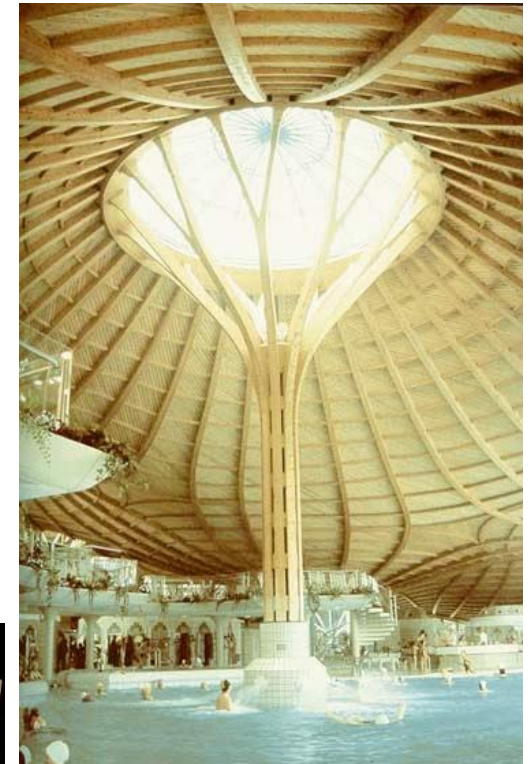
8.3. Lamellé-collé

Assemblage par collage des pièces de dimensions relativement grandes de pièces avec même sens des fibres

- Pièces de grande longueur (jusqu'à 30 m)
- Résistances mécaniques supérieures à celle du béton traditionnel
- Bonne résistance au feu et à la chaleur
- Excellent isolant thermique et sonore
- Pas de déformation au cours du temps

Inconvénients :

- Si les lamelles sont mal collées entre elles, une invasion d'insectes et de champignons peut survenir.
- Contrairement à une construction en bois massif, l'eau a tendance à s'infiltrer facilement dans une structure en lamellé-collé.



8.4. Lamellé-croisé ou CLT

En Europe, ce produit est largement utilisé dans la construction résidentielle et la construction non-résidentielle de bâtiments multi-étagés de plus de 4 étages (avec chapes en béton).

Assemblage de pièces avec fibres à 90° d'une couche à l'autre

Propriétés :

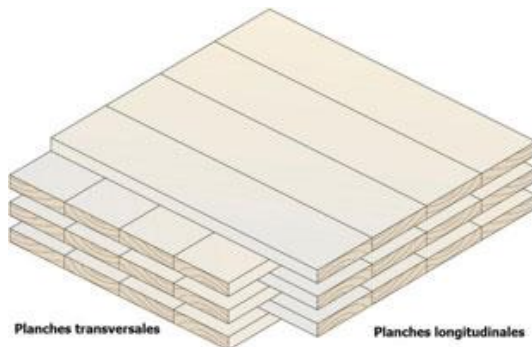
- Fortes résistances structurales
- Temps de construction faible, montage des pièces faciles
- Grandes performances thermiques et acoustiques
- Excellent comportement en situation d'incendie



Immeuble Stadthaus, Londres



<https://balteschwiler.ch/fr/>



<https://www.cecobois.com/bois-lamelle-croise-clt>

Pour aller plus loin...

- www.cecobois.com
- <https://avenue.argusdatainsights.ch/kundenartikel/2019-02/1086739/72489307.pdf>
- <https://www.futura-sciences.com/maison/actualites/architecture-norvege-plus-haute-tour-bois-monde-bientot-achevee-72715/>

Conclusions : mind map

Structure

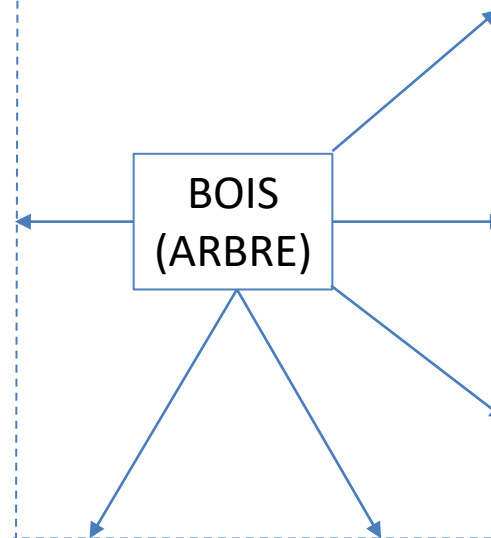
Matériau

Produits

*Nanoscopique
(échelle du nm)*

*Microscopique
(échelle du μm -mm)*

*Macroscopique
(échelle du cm-m)*



Types d'arbres

Ce que je retiens de ce cours

- J'ai compris comment le bois est organisé d'un point de vue macro/micro/nanostructural (structure multiéchelle), la différence entre un résineux et un feuillu notamment en terme de types de cellules et leur organisation.
- Je sais ce que sont l'aubier, le duramen, le cambium, l'écorce, les localiser sur une coupe et leur fonction. Je sais ce que sont le bois de printemps, le bois d'été et les cernes annuels.
- J'ai compris les différentes fonctions que doivent remplir les cellules d'un arbre et je suis capable d'expliquer quelles cellules remplissent quelles fonctions selon résineux/feuillu.
- J'ai compris de quoi se compose le bois d'un point de vue chimique (polymères), l'importance de l'hydrophobie/hydrophilie de chacun, leur influence sur les propriétés.
- J'ai compris d'où vient l'anisotropie du bois, l'importance de la porosité, de la teneur en eau, du PSF et de l'influence de tous ces paramètres sur les propriétés.
- Je connais les produits dérivés du bois, les avantages/inconvénients à utiliser des assemblages.
- *Je suis capable de comparer les matériaux en terme de propriétés (thermiques, mécaniques etc...), mais aussi d'utilisations (**en lien avec tous les autres cours du semestre**).*