

fête de la Science <sup>fr</sup>



LA RÉGION OCCITANIE  
Pyrénées-Méditerranée



Les bois: une grande classe de matériaux d'ingénierie

Bernard THIBAUT CNRS





# Les matériaux d'ingénierie



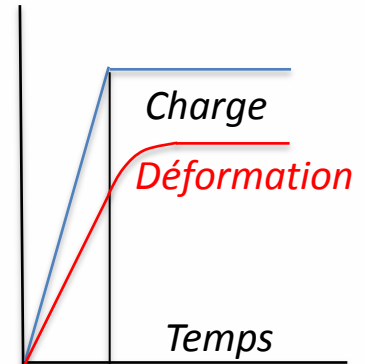
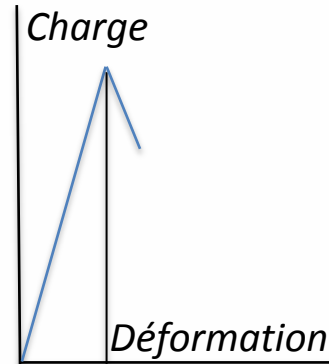
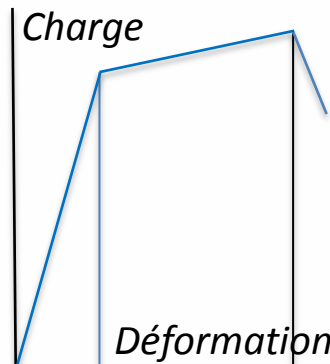
# Matériaux constructifs

- Un **matériau** désigne toute matière utilisée pour réaliser un objet
- Les **matériaux constructifs** permettent de résoudre les *problèmes mécaniques* de la fabrication et de l'usage futur de l'objet
- Ils sont fournis sous forme d'éléments de matériau:
  - **blocs** (briques) dont les 3 dimensions sont du même ordre de grandeur,
  - **profilés** (poutres) dont une dimension est bien plus grande que les deux autres
  - **plaques** dont une dimension est bien plus petite que les deux autres
- Les premiers matériaux de l'humanité étaient naturels:
  - Matériaux géologiques: pierres, argiles ...
  - Matériaux du vivant: os, arêtes, nacre, bois, liège, ivoire ...
- Puis des matériaux de synthèse sont apparus:
  - Céramiques dès la maîtrise du feu (cuisson des argiles)
  - Métaux après le contrôle des hautes températures (âge du bronze puis du fer)
  - Polymères (matières plastiques) à l'ère industrielle

# Grandes familles chimiques de matériaux

- Il existe trois grandes familles de nature chimique:
  - Les matériaux minéraux (verres, céramiques ...)
  - Les matériaux métalliques (métaux et alliages comme l'acier, le laiton, le dural ...)
  - Les matériaux organiques (polymères ...)

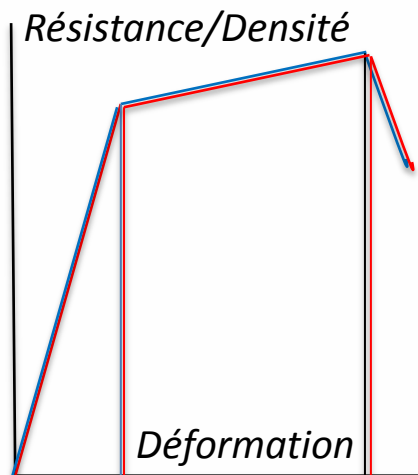
Propriété	Matériaux métalliques	Matériaux minéraux	Matériaux organiques
Densité en t/m <sup>3</sup>	3 à 22	2 à 3	1 à 2
Résistance à la chaleur	Forte	Très forte	Faible
Conduction thermique W/m/°K	20 à 400	1 à 3	0,1 à 1
Conduction électrique	Très conducteur	Très isolant	Très isolant
Amortissement	Très faible à faible	Très faible à faible	Fort
Résistance à la corrosion	Faible	Forte	Très forte
Expansion thermique	Forte	Faible	Très forte
Comportement mécanique	Elastique-plastique	Elastique-fragile	Visco-élastique



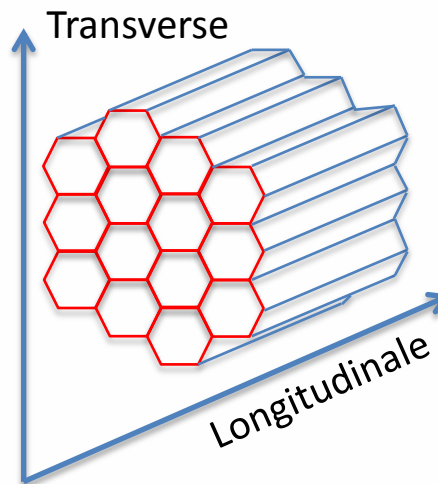
# Structure physique des matériaux

Il existe plusieurs grandes familles de structure physique:

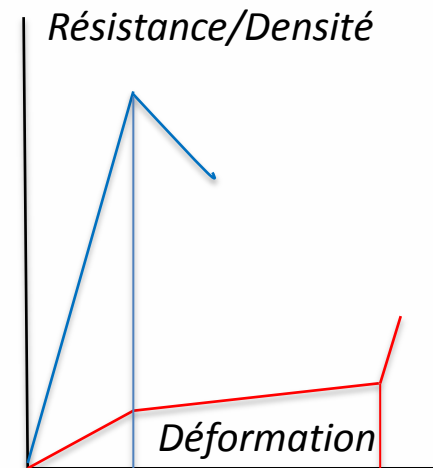
- Les matériaux homogènes isotropes
- Les matériaux cellulaires comme les mousses (isotrope) et les nids d'abeille (Nida anisotrope)
- Les matériaux composites isotropes (béton) ou anisotropes (béton armé)



Comportement d'un métal (isotrope) en compression



Deux directions contrastées du nid d'abeille



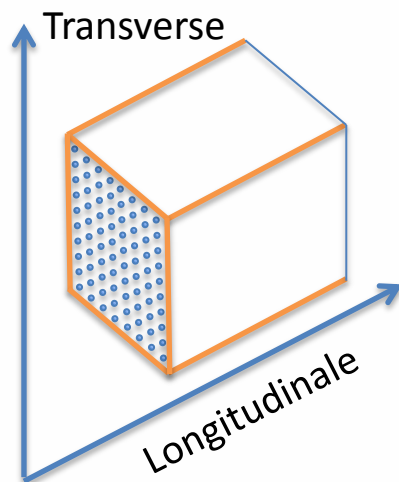
Comportement d'un Nida (anisotrope) en compression

En rouge: comportement dans la direction transverse  
En bleu: comportement dans la direction longitudinale

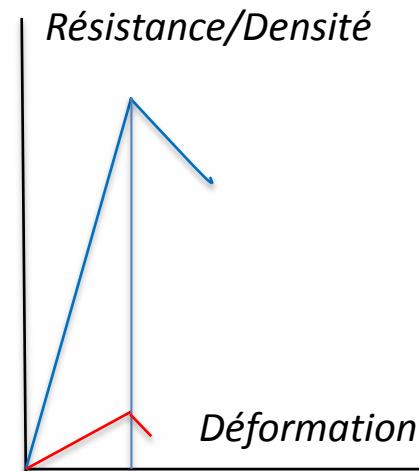
# Les matériaux composites

Les familles de composites:

- Composites à fibre (de verre, de carbone, de kevlar ...)
- Composites à agrégats (béton, panneaux de particules ...)
- Composites multicouches (isolation, emballage ...)



Deux directions  
contrastées du  
composite à fibre



Comportement d'un  
composite à fibre  
en traction

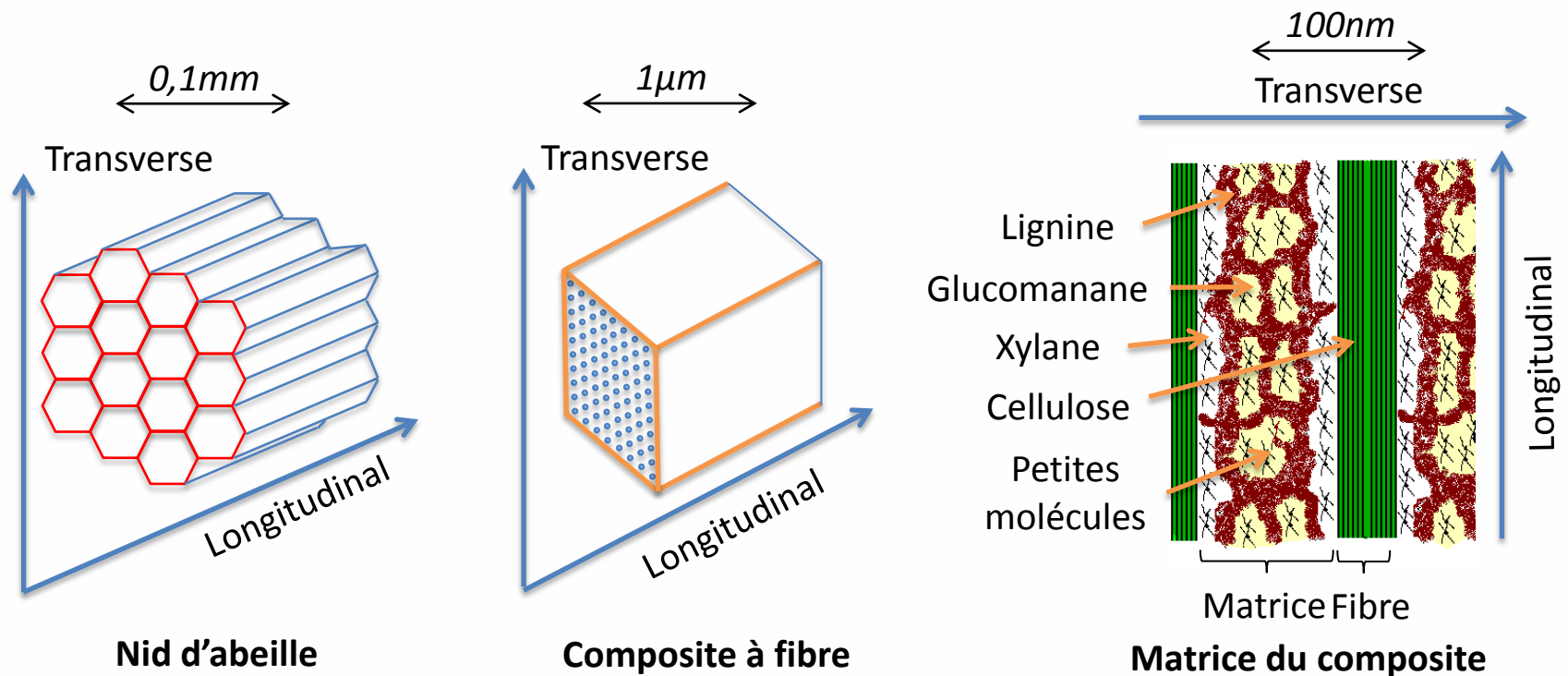
En rouge: comportement dans la direction transverse

En bleu: comportement dans la direction longitudinale

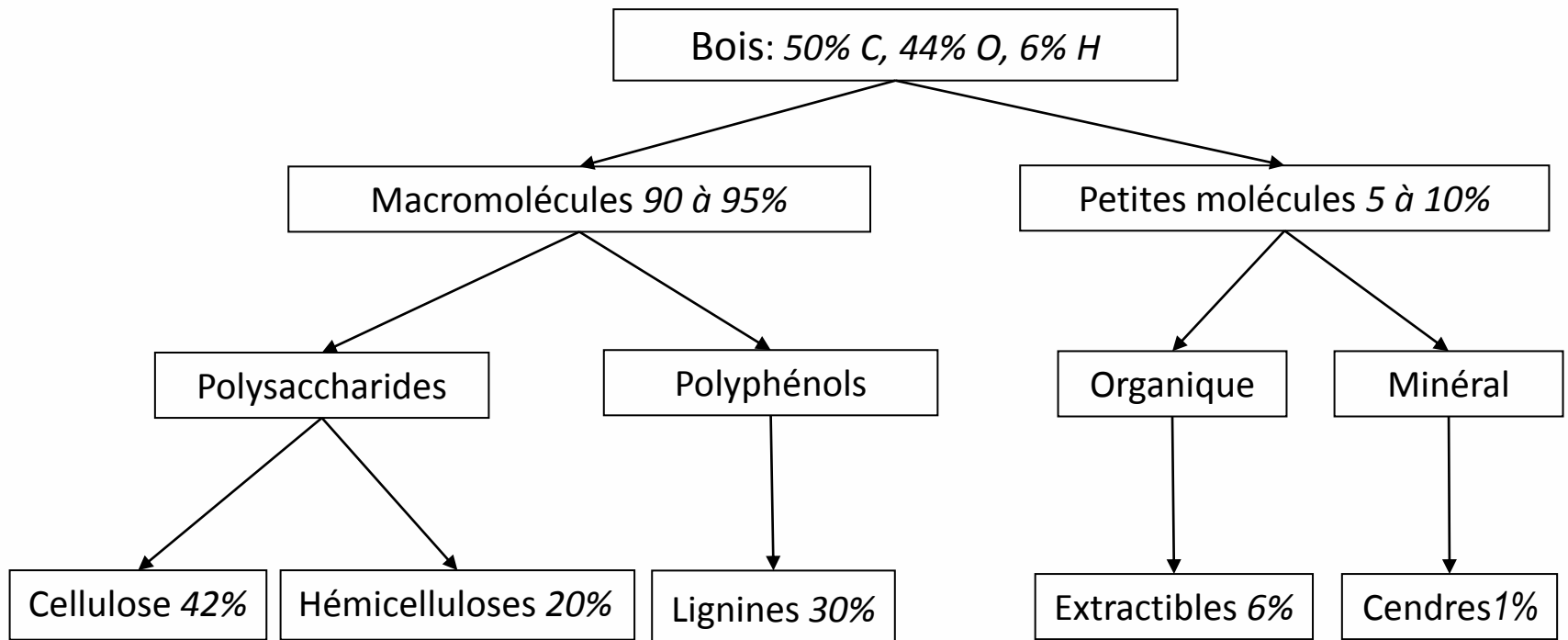
# Structure et composition chimique des bois

Un matériau cellulaire de type nid d'abeille

- La matière de base des parois cellulaires: composite à fibre
- La matrice du composite: mélange de polymères dopé



# Un matériau de la famille des polymères



Aubier

Les cellules d'aubier contiennent des nutriments comme des sucres ou de l'amidon

Bois de cœur

Le bois de cœur est imprégné par un cocktail de molécules bioactives qui le protègent

*Le cocktail d'extractibles (une centaine de molécules) est une signature de l'espèce*



# Des polymères particuliers

*Ce sont des aliments pour les êtres vivants*

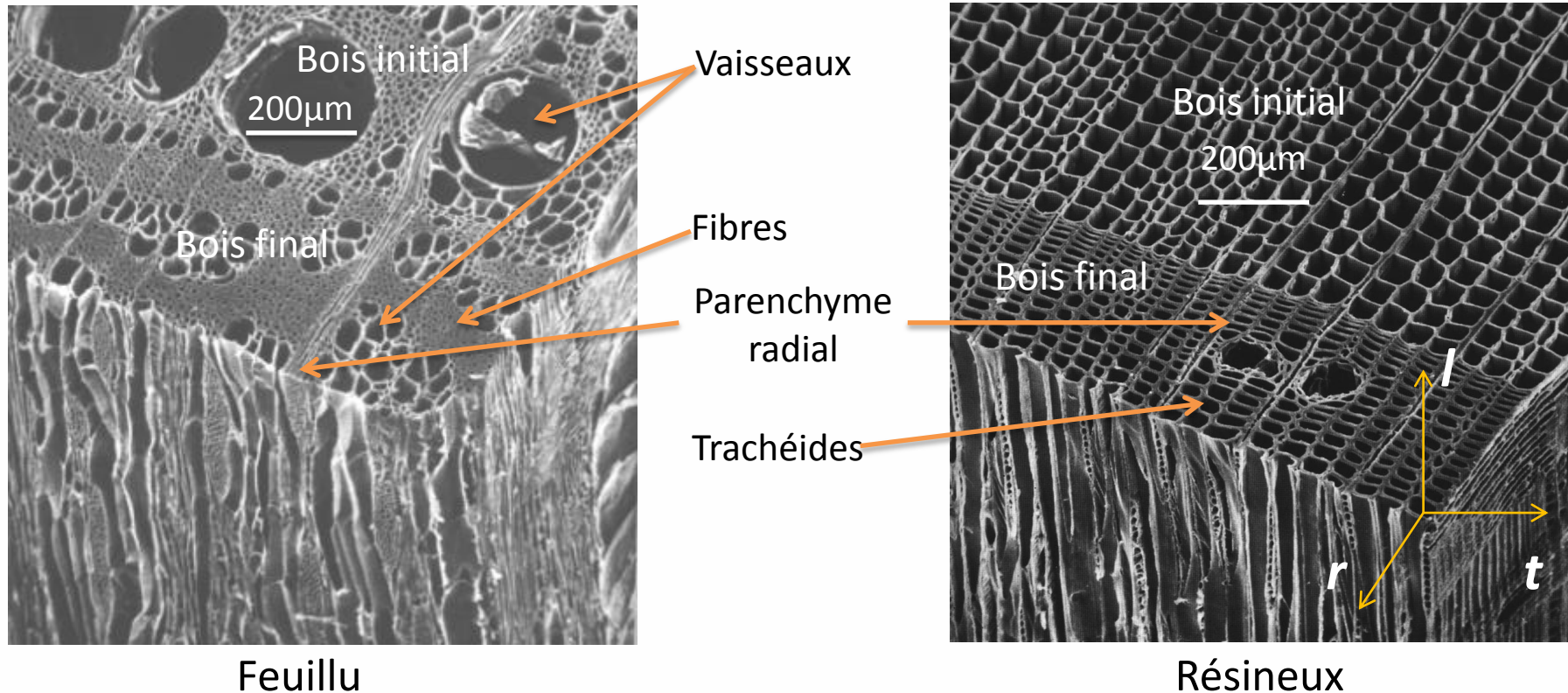
*Ce sont d'excellents combustibles*

*Ils sont sensibles au couple température –  
humidité du matériau*

- Humidité d'équilibre du matériau avec la température et l'humidité de l'air
- Variations dimensionnelles
- Couplage thermo-hygro-mécanique
- Variations des propriétés physiques avec l'humidité (densité, conductibilité ...)
- Seuils d'humidité pour l'action des micro-organismes



# Un matériau cellulaire orienté, multicouche

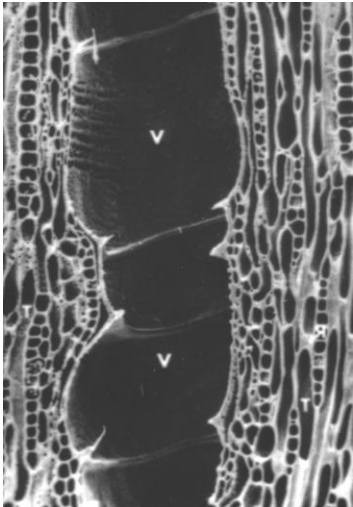
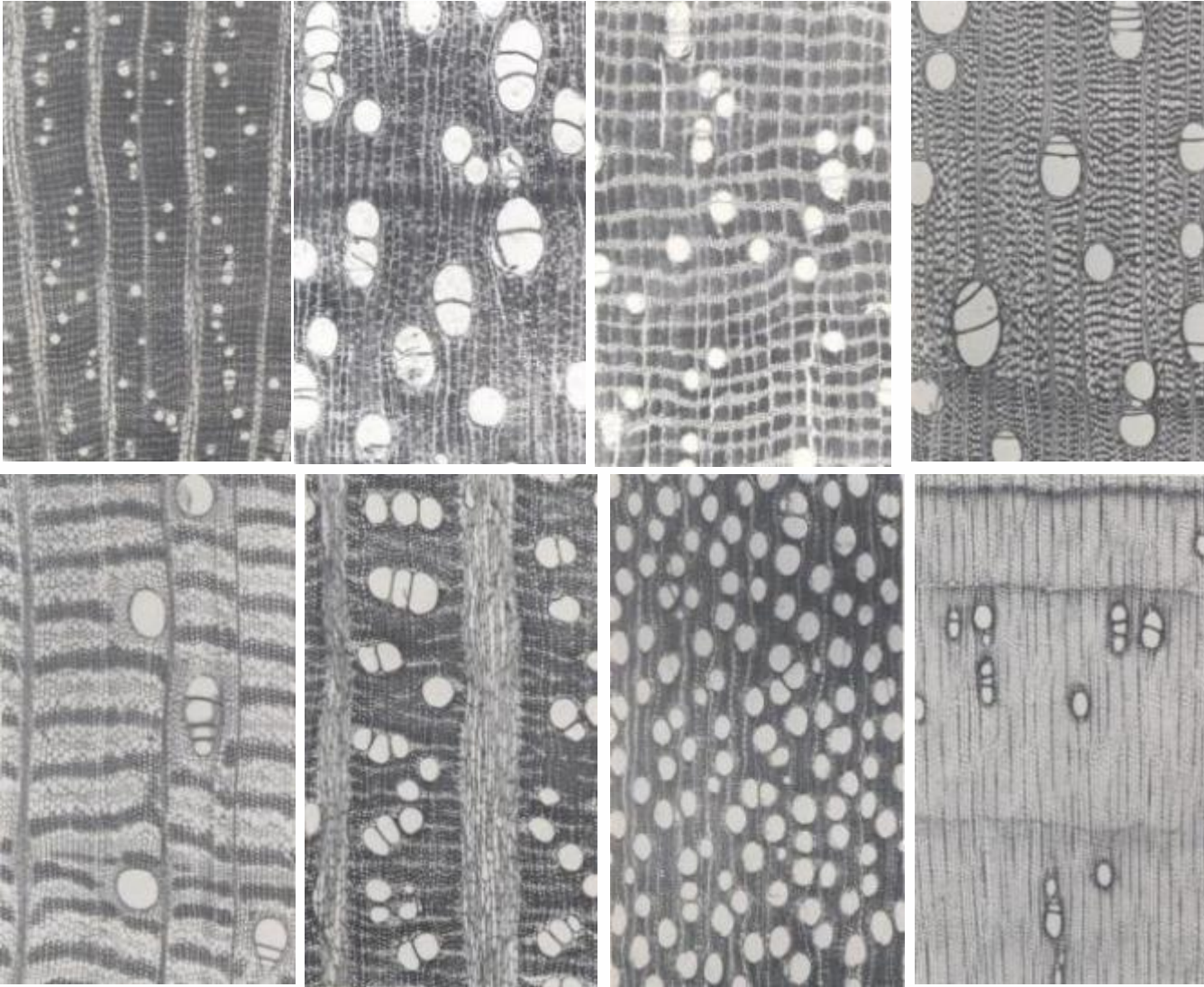


Le **cerne** est constitué d'une couche plus (bois initial) ou moins (bois final) poreuse. Les **fibres** et **trachéides** sont des cellules à paroi épaisse, très allongées (avec un élanement voisin de 100). Leur orientation est appelée **fil du bois**.

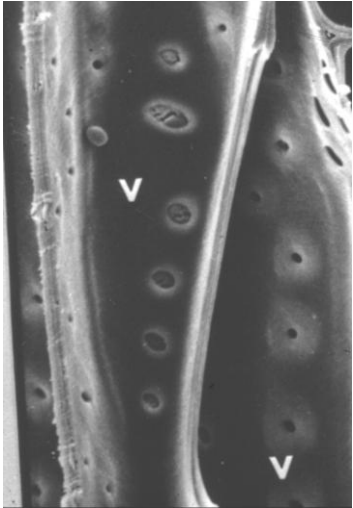
Les **vaisseaux** sont des tuyaux constitués de cellules aboutées de faible élanement.

Les **parenchymes** sont des cellules à paroi mince, orientées perpendiculairement (parenchyme radial) ou parallèlement (parenchyme axial) au fil du bois

# Le plan ligneux, organisation 3D des cellules du bois



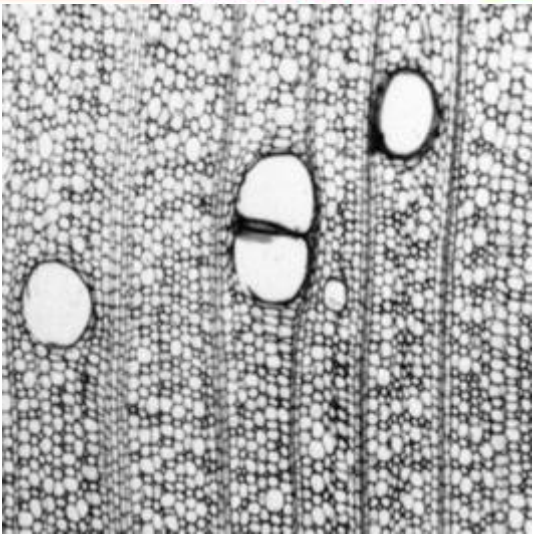
Vaisseau vue radiale



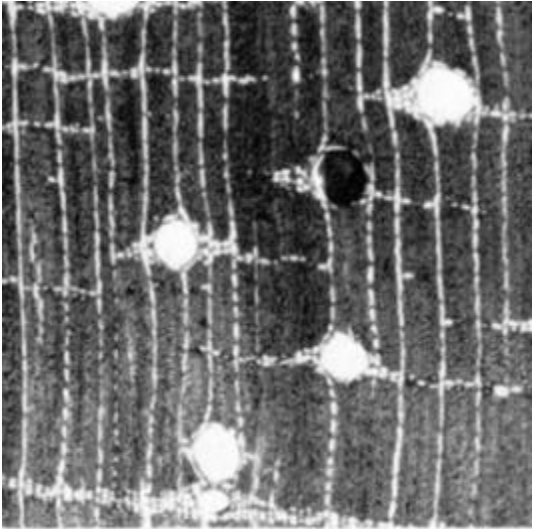
Vaisseau ponctuations

*Comme la signature chimique des extractibles, le plan ligneux caractérise l'espèce*

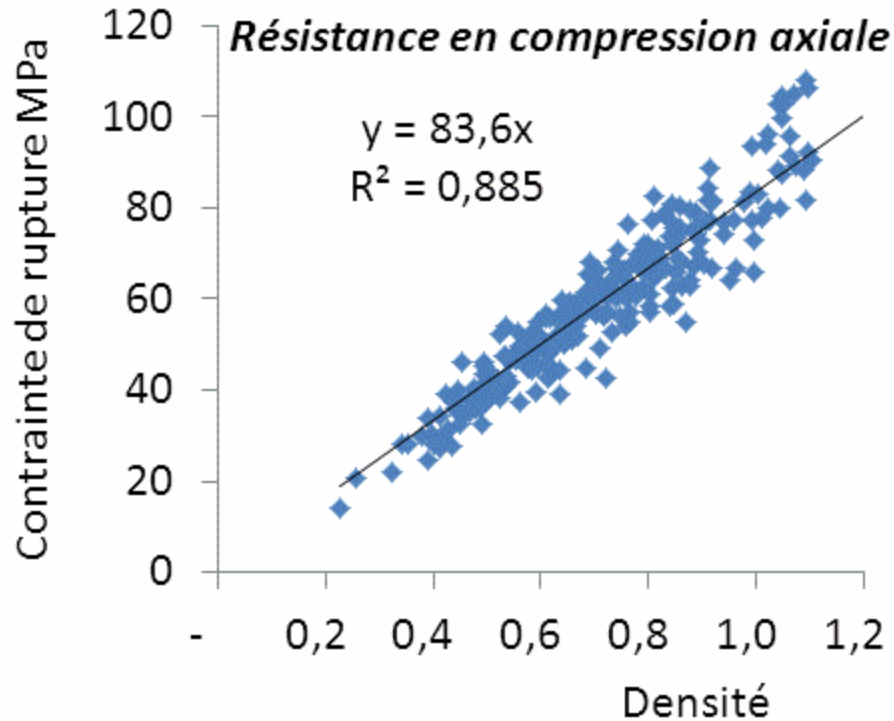
# La densité est la 1<sup>ère</sup> clé des propriétés mécaniques du bois



**Balsa** Densité = 0,15  
Porosité = 90%

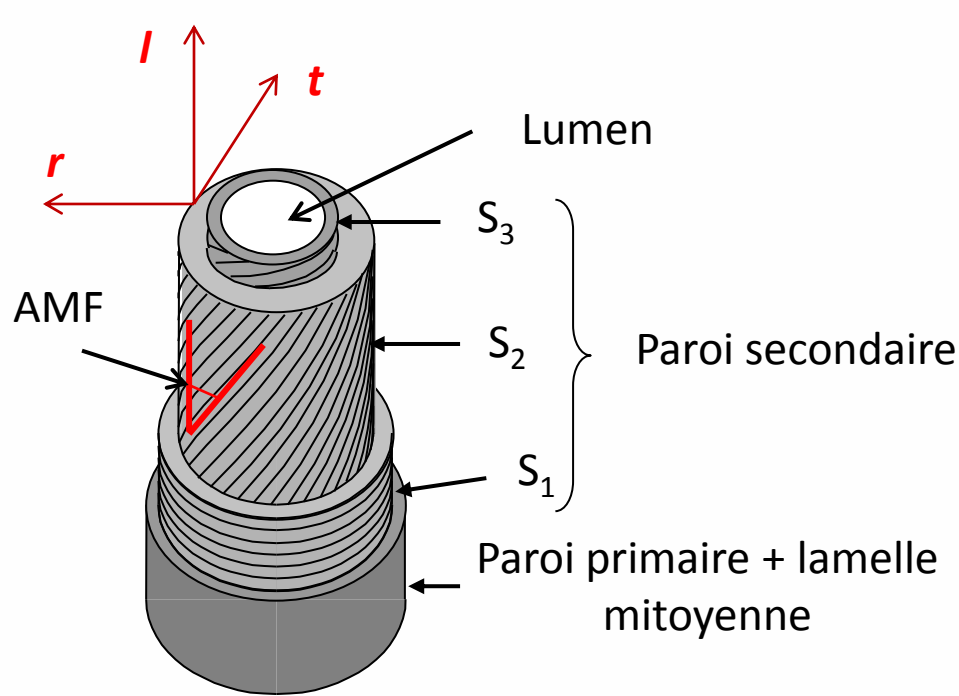


**Panacoco** Densité = 1,2  
Porosité = 20%

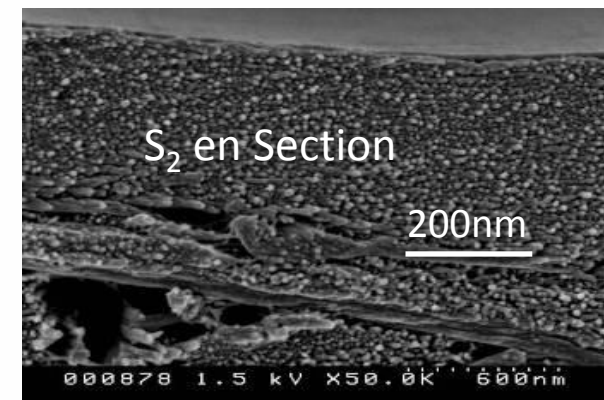
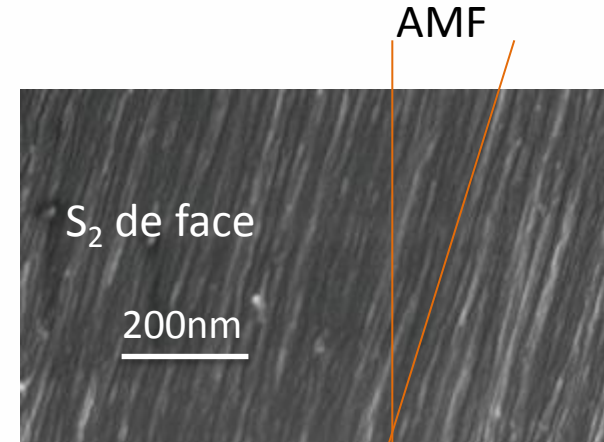


**La résistance mécanique du bois dans la direction du fil est proportionnelle à sa densité.**

# La paroi cellulaire, composite à fibre multicouche

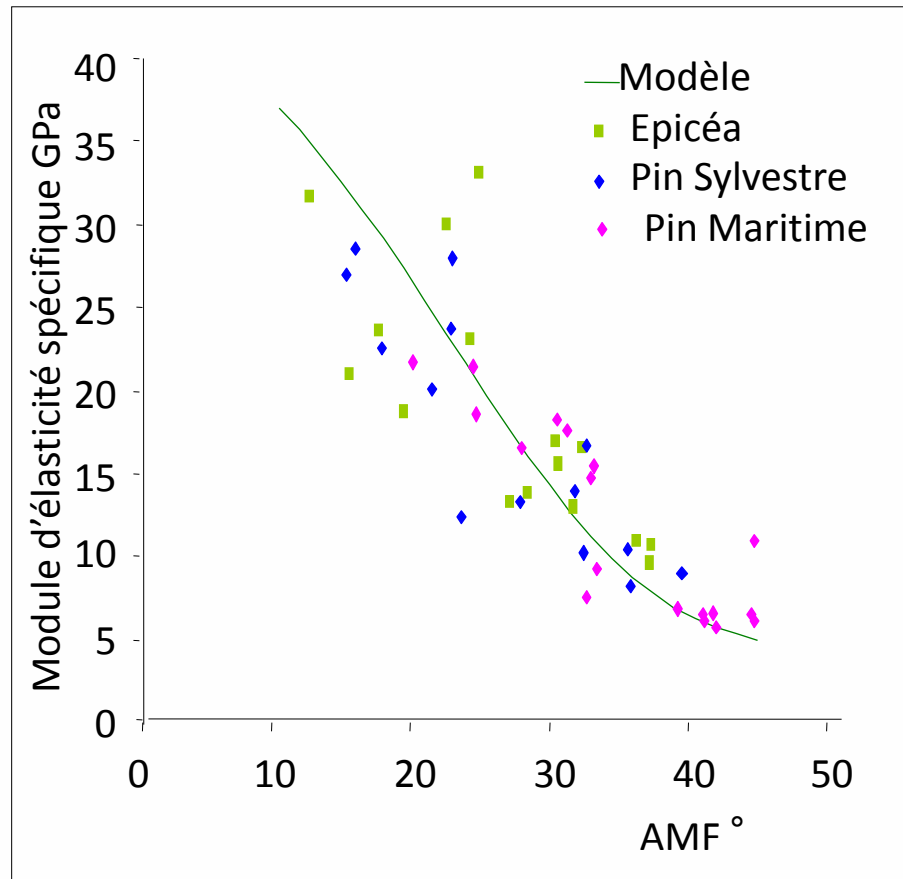
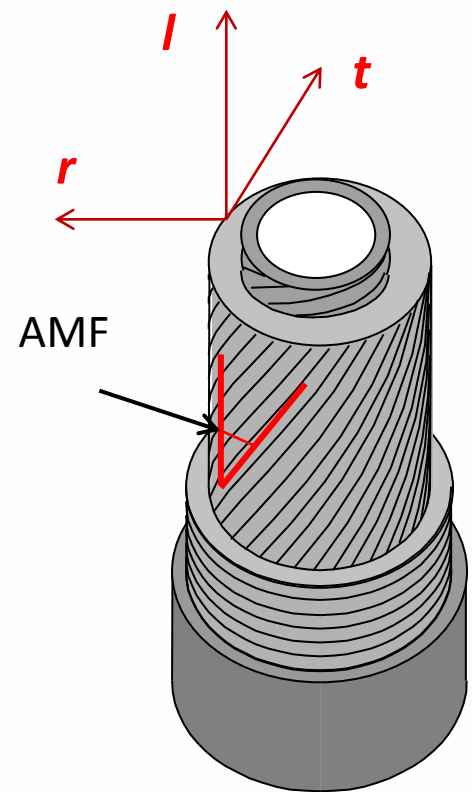


Organisation de la paroi de la fibre *La couche S<sub>2</sub> est la plus épaisse*



Chaque couche est un composite à fibres cristallines (nano-cellulose) dans une matrice amorphe

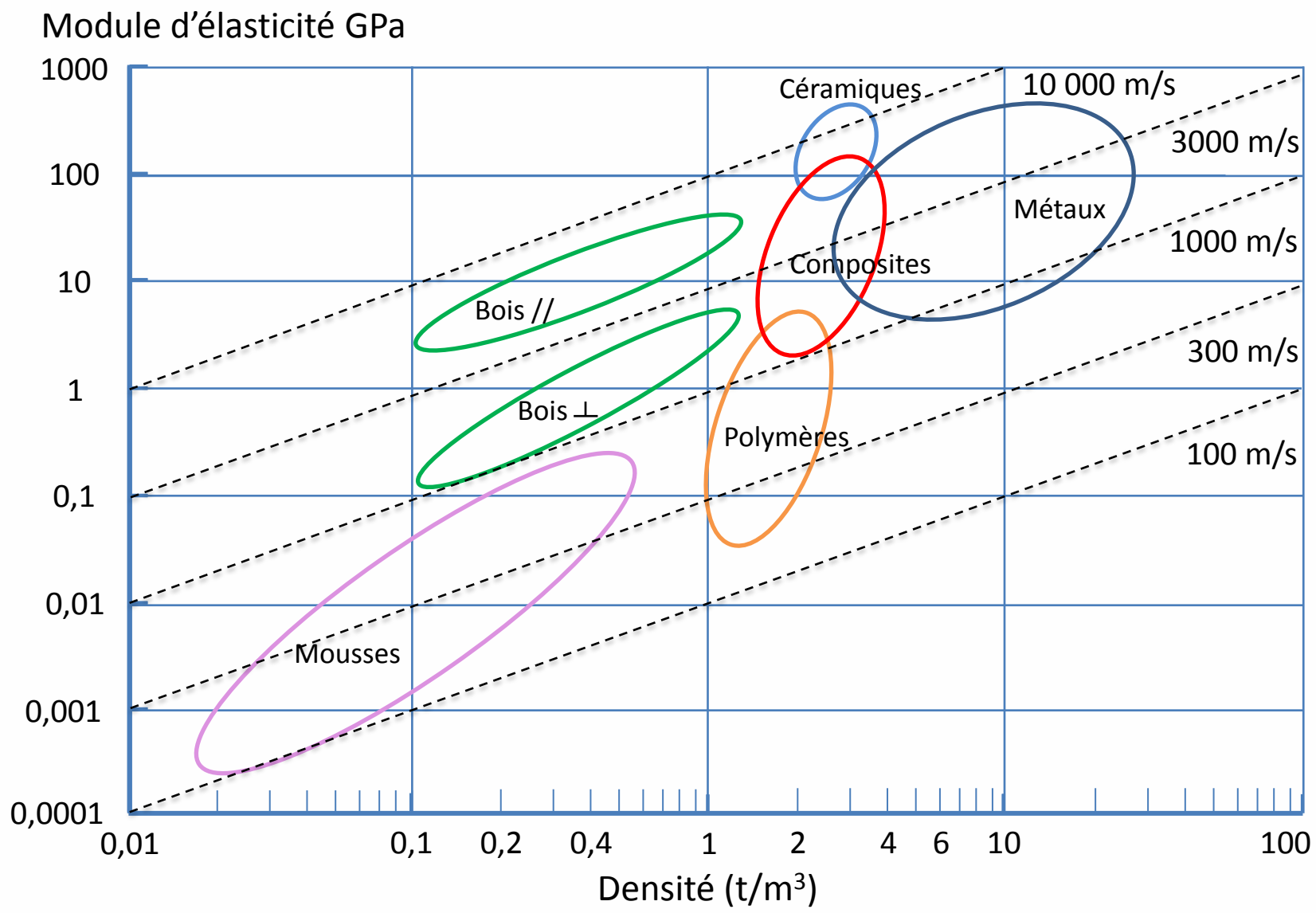
# L'angle des nano-fibres de cellulose est la 2<sup>ème</sup> clé des propriétés mécaniques du bois



Le module spécifique: (Module d'élasticité / (Densité)) est un bon indicateur de l'angle des micro fibrilles



# Les bois dans les grandes classes de matériaux





# Petite conclusion

Matériau de construction universel\* le plus léger

Très large palette de propriétés pouvant varier de 1 à 100

Propriétés sensorielles et de résistance aux dégradations pilotées par la chimie subtile du cocktail d'additifs spécifiques

Comportement à long terme piloté par la chimie des polymères de base

Résistance mécanique pilotée par une double structuration physique:

- Nid d'abeille à l'échelle du  $\mu\text{m}$  caractérisé par l'angle de fil, 1<sup>er</sup> niveau d'anisotropie
- Composite à fibre à l'échelle du nm caractérisé par l'angle des microfibrilles, 2<sup>ième</sup> niveau d'anisotropie

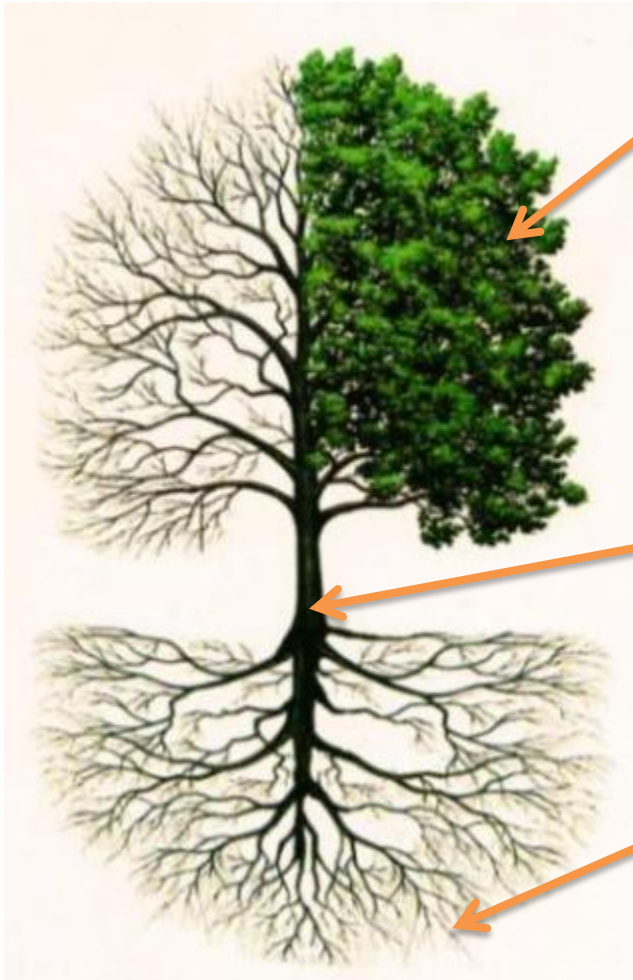
*Matériau de construction universel\**: matériau permettant de réaliser la quasi-totalité d'une structure complexe comme un bâtiment. C'est le cas, dans l'ordre croissant de densité des bois, des composites, du béton armé et de métaux comme l'acier



# Le bois de l'arbre



# Le compartiment ligneux de l'arbre

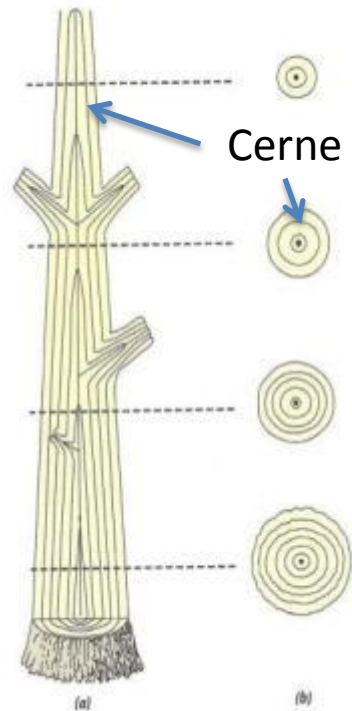
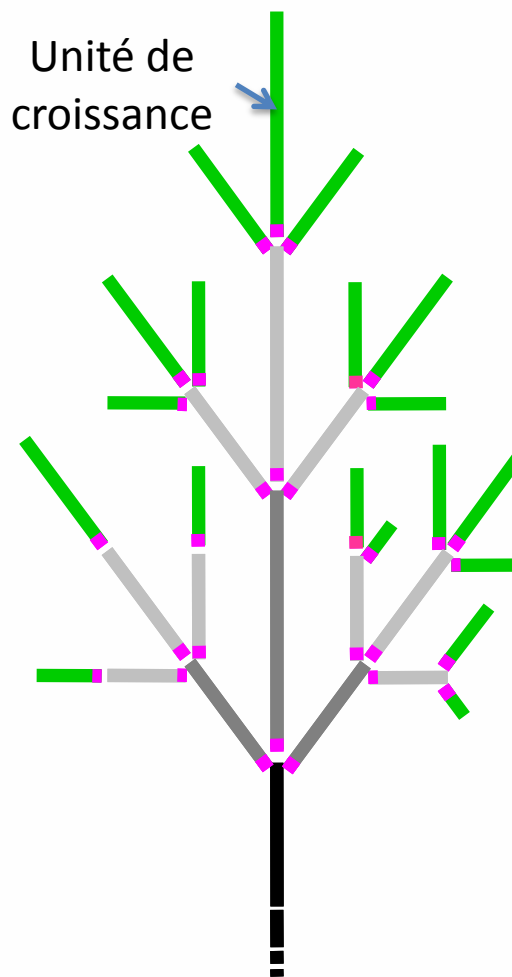


*Les feuilles produisent la biomasse à partir de l'eau, du  $\text{CO}^2$  et de l'énergie solaire*

***Le compartiment ligneux connecte les compartiments foliaires et racinaires.***

*Les racines extraient l'eau et les sels minéraux du sol*

# La structure arborée: une construction additive



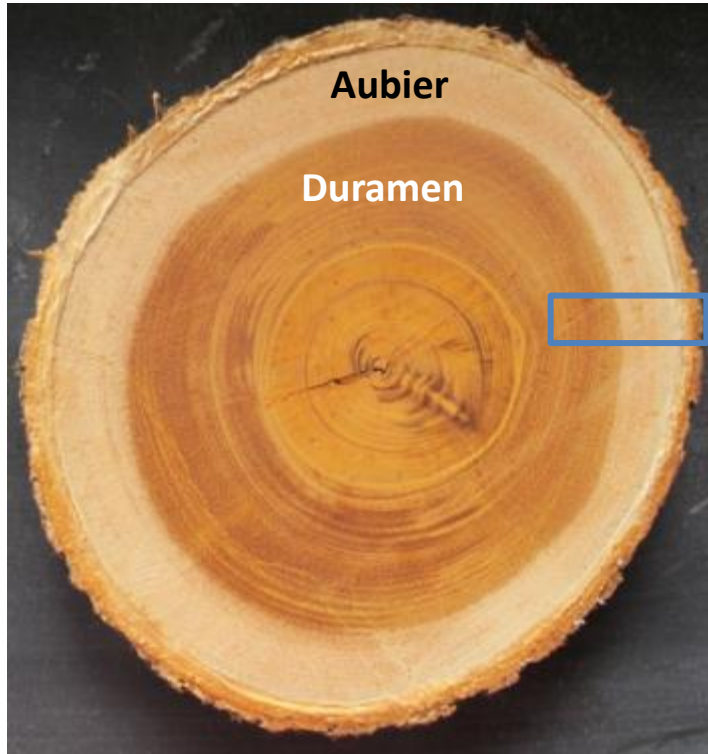
*Les bourgeons à bois (terminaux et latéraux) et le cambium (manchon continu sous l'écorce) sont les zones actives de la fabrication additive du compartiment ligneux de l'arbre*

*Le cambium fabrique le xylème actif vers l'intérieur et le phloème actif vers l'extérieur*

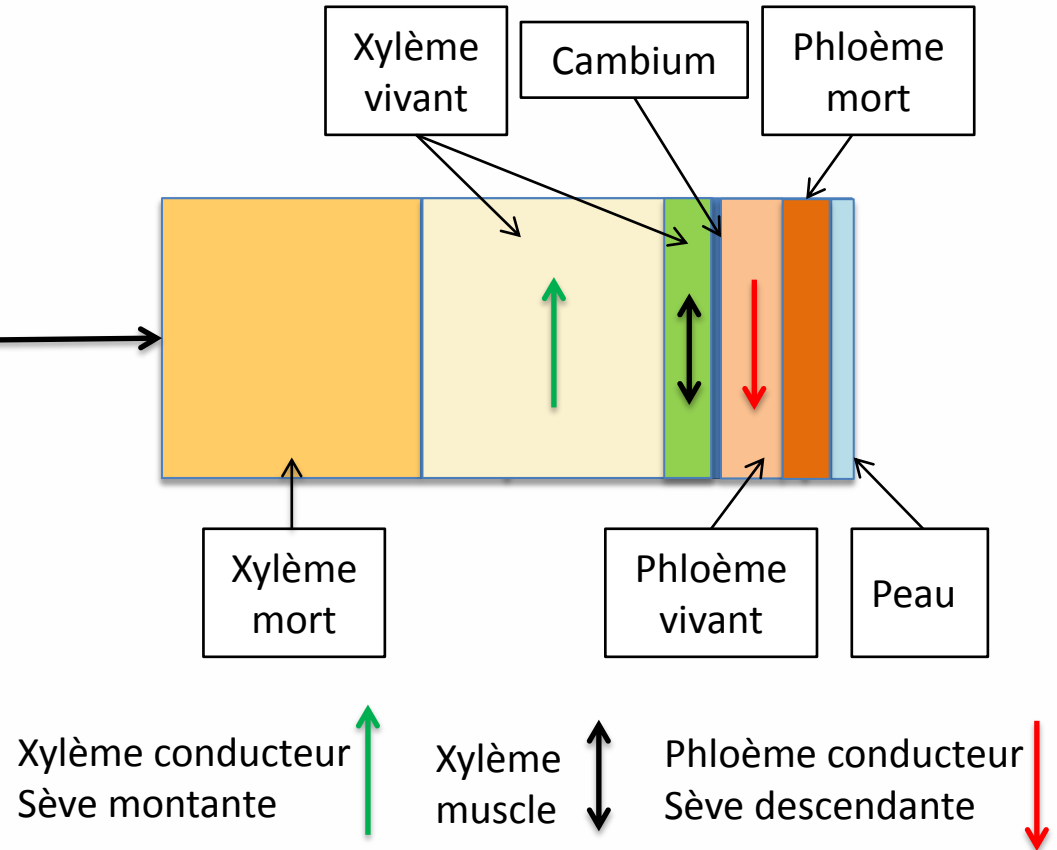
*Après leur mort programmée, le xylème et le phloème actifs sont intégrés respectivement dans le squelette et dans la protection extérieure*

**Fonctions principales du bois vivant: Fabrication de la structure + Stockage (eau et nutriments) + Conduction de la sève + Contrôle de la posture (action musculaire)**

# Le bois vivant de l'arbre



Section d'une tige de Bagasse



Xylème conducteur  
Sève montante ↑

Xylème muscle ↔

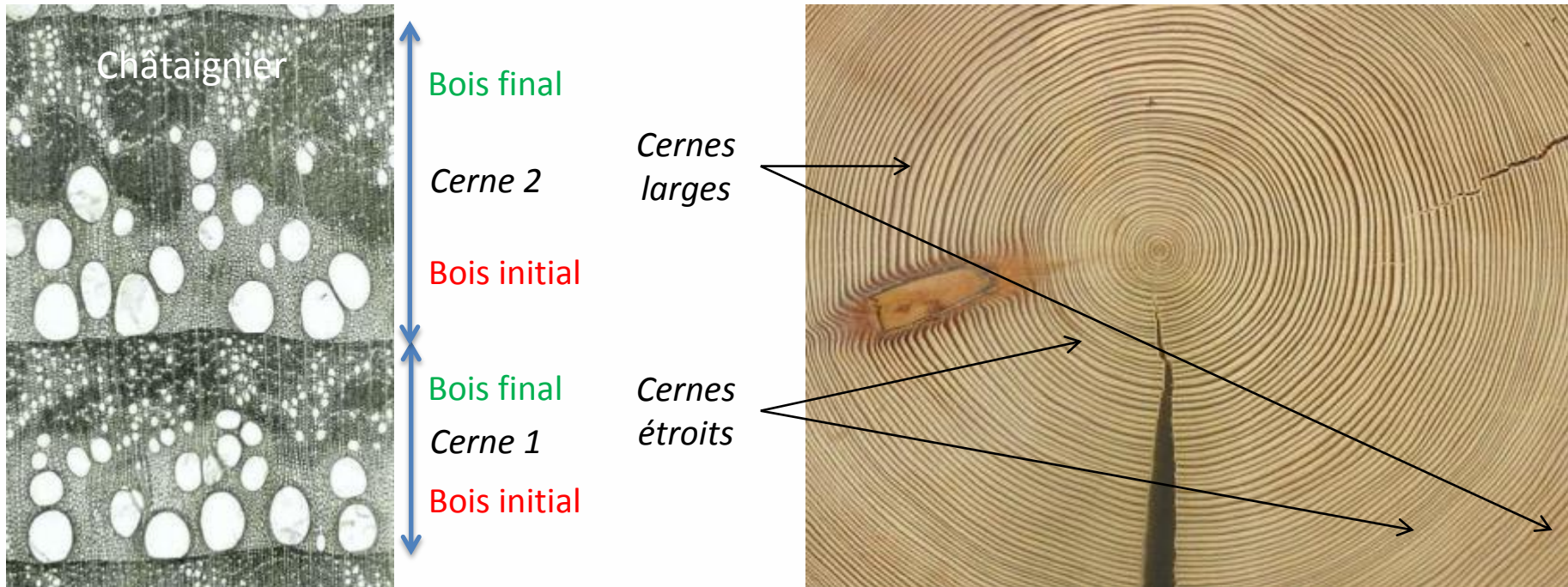
Phloème conducteur  
Sève descendante ↓

*Bois vivant de l'arbre = Xylème vivant + Cambium + Phloème vivant*

*Xylème vivant = zone musculaire (fibres vivantes) + zone conductrice (parenchymes vivants)*

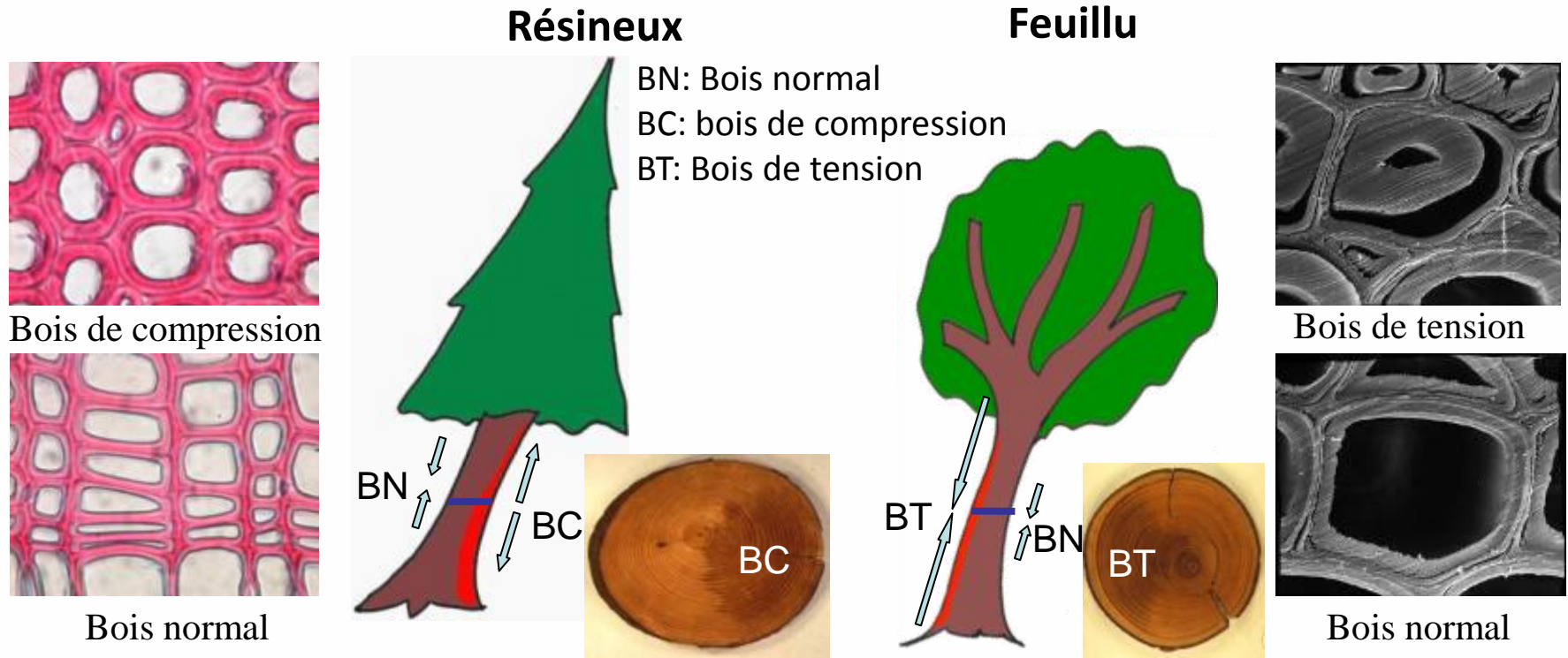
*Xylème mort = Bois uniquement squelette de l'arbre*

# Adaptation aux conditions hydriques



Le bois initial, plus conducteur, est ajouté en saison humide (printemps)  
Le bois final, moins conducteur, est ajouté en saison sèche (été)  
Les années défavorables, les cernes ajoutés sont plus étroits  
C'est un moyen de lire l'histoire du climat dans une pièce de bois

# Adaptation au contrôle de posture



*Bois de tension*: traction de 400 à 800 daN par cm<sup>2</sup> de bois ajouté

*Bois de compression*: pression de 100 à 200 daN par cm<sup>2</sup> de bois ajouté

*Bois normal*: traction de 50 à 200 daN par cm<sup>2</sup> de bois ajouté

Le bois normal seul régule la posture verticale en modifiant l'angle des nano-fibrilles

Les bois de réaction régulent la posture des branches étalées ou permettent des redressements en modifiant l'anatomie, l'angle des nano-fibrilles et la chimie de la matrice



## Petite conclusion

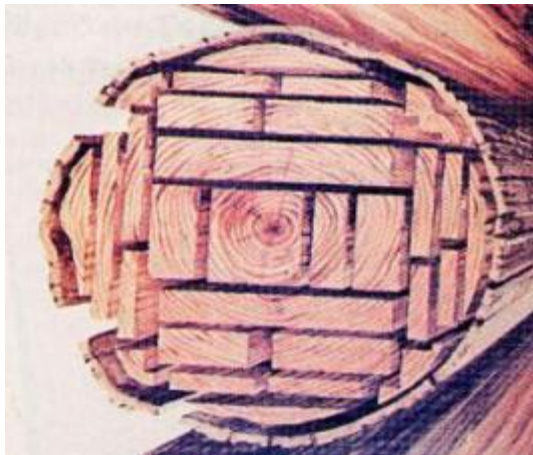
Chaque morceau de bois présent dans l'arbre est une signature unique des instants de vie de cet arbre dans son environnement et dans la grande histoire.

Au moment de sa mort, l'arbre est une structure complexe à démembrer, pas une collection de pièces de bois prêtes à l'emploi.

# La déconstruction de l'arbre

- La première étape est l'abattage de l'arbre et son tronçonnage en grumes et billons
- La deuxième étape est le débit en profilés divers: poutres, planches, placages

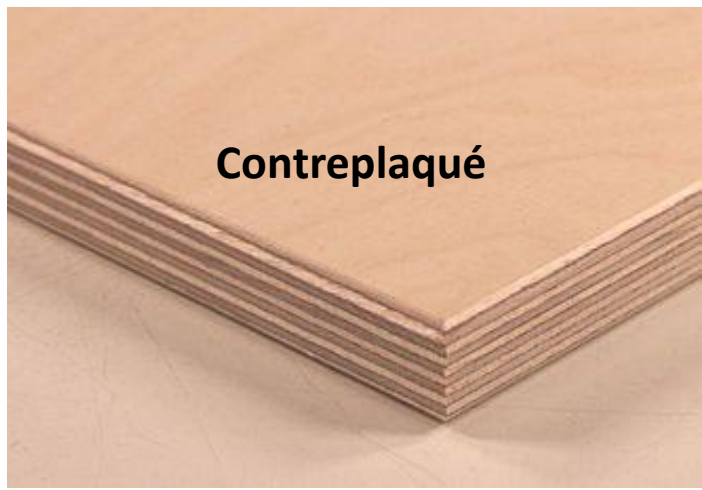
**Le bois d'œuvre commence sa vie après ces étapes de déconstruction de l'arbre**





# Bois massif reconstitué, poutres et panneaux

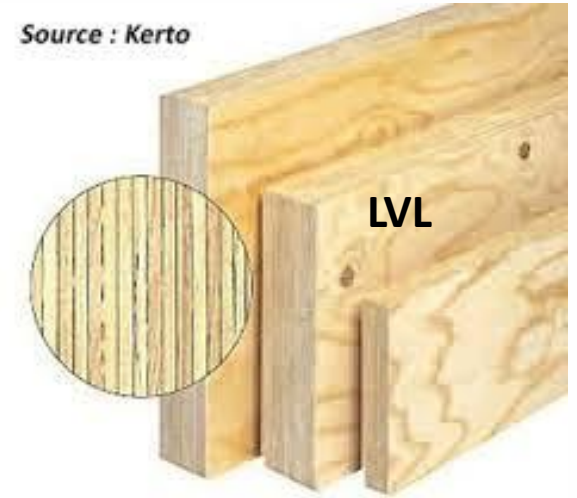
Collage croisé à 90°



**Contreplaqué**

Placages

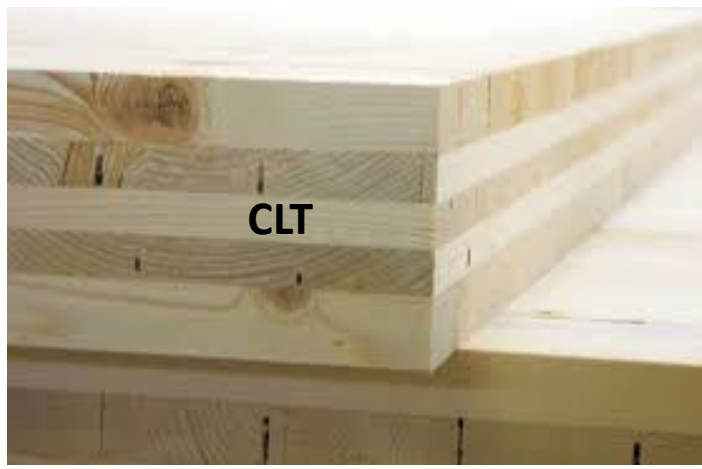
Collage parallèle



Source : Kerto

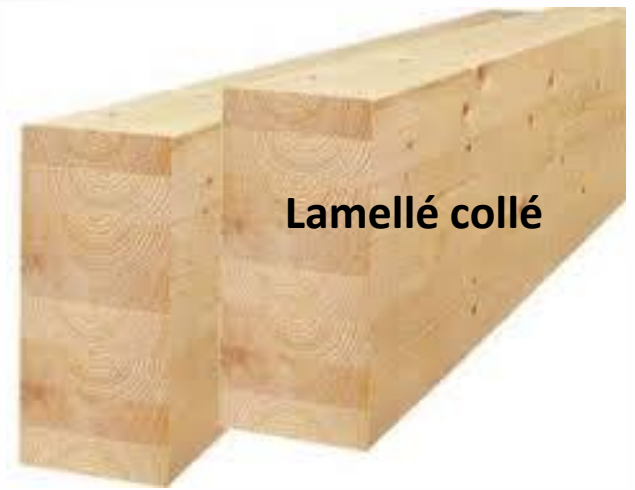
**LVL**

Planches



**CLT**

**Panneaux**



**Lamellé collé**

**Poutres**

# Bois en dimension d'emploi, bois sans défauts

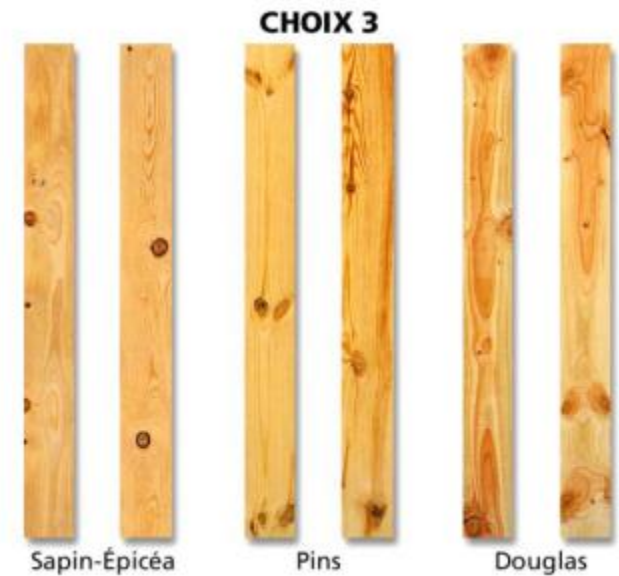
Dans un arbre il y a toujours des ramifications  
(branches)

La plupart des pièces de bois débitées dans l'arbre  
comportent des traces de ramification (bois avec  
jonctions ou avec nœuds) c'est le **bois en dimension  
d'emploi** (utilisé en construction tel quel)

On peut prélever des pièces de bois entre les  
ramifications, on a du **bois sans jonctions** (sans nœuds).

On peut ensuite débiter des pièces plus petites sans  
nœuds et avec le fil droit. On a du **bois sans défauts** (ni  
nœud, ni fil incliné).

*Pour le bois sans défauts on qualifie le matériau bois,  
Pour les pièces en dimension d'emploi on prend surtout  
en compte les nœuds et l'angle de fil*



Sciages résineux en dimension d'emploi



Bois de lutherie fendu sans défauts

# Usages des bois avec jonctions



Fourche en micocoulier



Sculpture dans les monts d'Arrée



Porte manteau



Fronde



Construction navale

# Usages des bois ronds



# Usages du bois de fente



Fente



Ganivelles



Gaulettes de Saül



Bardeaux de toiture



Tonneau en chêne



Panier en frêne

# Usages des sciages



# Usages des placages

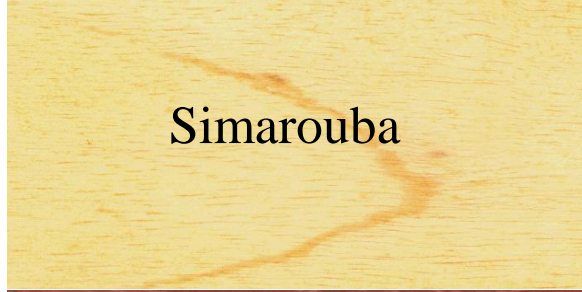
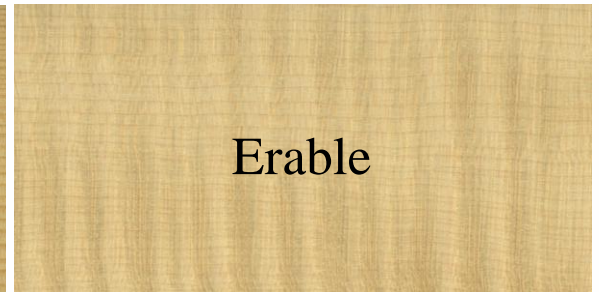


# Usages du bois pour la culture





# Diversité de la ressource





# Diversité et richesse de la forêt française

- 24 millions d'hectares au total
- 16 millions en France hexagonale, 8 millions en Guyane
- Une grande diversité: forêt tempérée, forêt méditerranéenne, forêt tropicale humide
- 1600 espèces différentes en Guyane et 140 dans les forêts hexagonales
- Un capital sur pied de 4 milliards de tonnes , moitié hexagone, moitié Guyane
- Une production biologique estimée à 50 millions de tonnes par an dans l'hexagone et autant en Guyane.
- Une récolte de 60% de la production dans l'hexagone, 0,5% en Guyane

# Origines de la diversité des bois

## Diversité génétique (génome)

- Spécifique, > 1500 espèces botaniques en France
- Provenance = généalogie locale (peuplement)

## Diversité ontogénique (vie de l'arbre)

- Age de l'arbre au moment de l'ajout de bois
- Adaptation aux conditions de vie au moment de l'ajout de bois

## Diversité technologique (déconstruction de l'arbre)

- Plan de débit
- Equilibre hydrique dans les conditions d'usage



***Fiche d'identité des pièces de bois traçant ces déterminants***  
(utile aussi pour le suivi écologique des bois)

# Mesures non destructives sur une pièce de bois

## **Bois sans défaut**

Humidité d'équilibre par mesure électrique

Dimensions par laser

Masse par pesée interfacée

Vitesse du son par vibrations ou ultrasons

Amortissement du son par vibrations

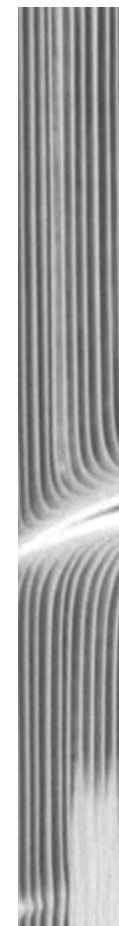
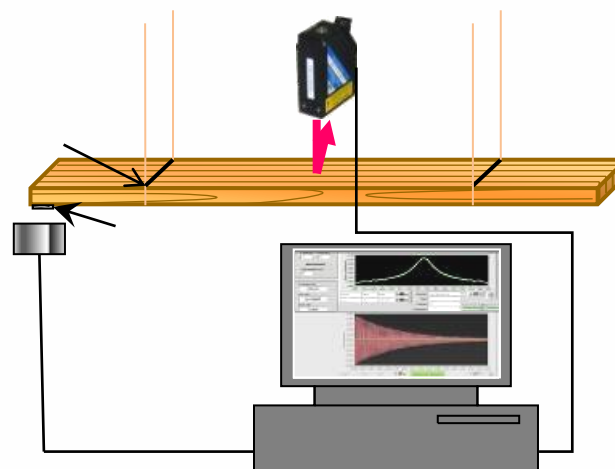
Couleur par spectro-colorimétrie

Signature chimique par spectrométrie proche infra-rouge (NIRS)

## **Bois en dimension d'emploi** (mesures à ajouter)

Description des nœuds par imagerie RX (tomographie)

Variations d'angle du fil par laser



***Fiche technique de la pièce de bois utilisant l'identité et les mesures via des logiciels de prédiction***

# Une nouvelle ère du bois

## des raisons pour encore progresser dans son utilisation

### Modernité de cette classe de matériaux

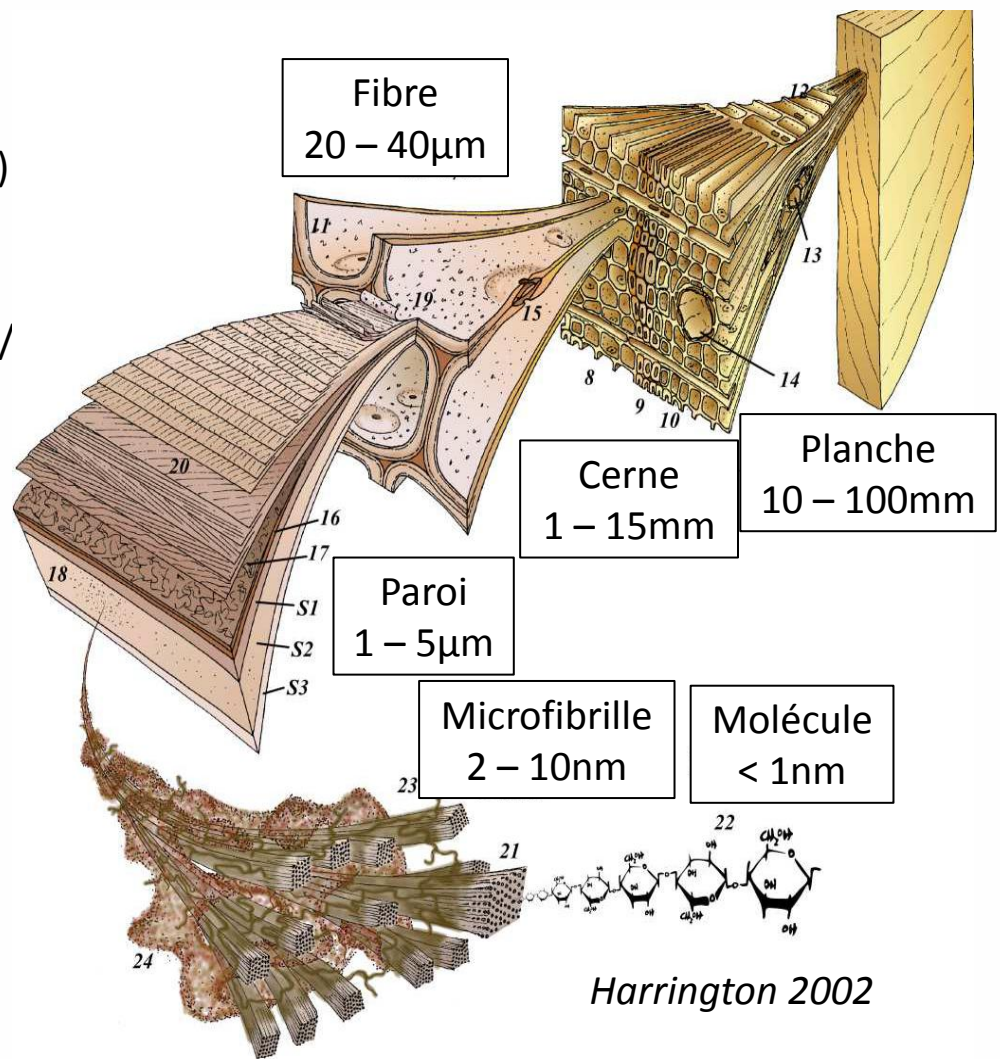
- Légèreté (matériau cellulaire)
- Performance mécanique (composite à fibre)
- Structuration aux petites échelles (micro et nano)
- Double fonctionnalité intégrée: résistance // et amortissement  $\perp$

### Enjeux environnementaux

- Restockage du CO<sup>2</sup> atmosphérique
- Faible coût énergétique
- Non polluant à la fabrication
- Biodégradable ou combustible en fin de vie

### Enjeux socio-économiques

- Abondance de la ressource renouvelable
- Faible prix de la matière première
- Emplois locaux valorisants





## Conclusion générale

Ce serait trop bête de se priver des opportunités infinies de coopération entre toutes les familles de matériaux pour aider à résoudre nombre de problèmes de nos sociétés.

Le bon matériau au bon endroit est une règle adoptée par toutes les cultures et nous avons des outils nouveaux pour appliquer ce vieux principe.

Il y a tant encore à découvrir et à comprendre dans le domaine du bois que les collaborations entre artisans, historiens et scientifiques des matériaux sont un enjeu passionnant pour ce 21<sup>ème</sup> siècle.

Merci de votre attention

