

Séminaire de l'équipe GReNES, Nice, 11 décembre 2014
Le bois et ses usages depuis la préhistoire



Le bois de l'arbre:
composant biologique



Le bois d'œuvre: matériau d'ingénierie.

Du compartiment ligneux de l'arbre, au bois d'œuvre:
paramètres biologiques et physiques de la variabilité

Bernard THIBAUT, CNRS - LMGC

L'ambiguïté du mot bois



Une forêt: le bois de Huelgoat ...



Un arbre: le bois canon ...



Des tiges: Le bois de l'année, le vieux bois ...



Une ressource: le bois mort



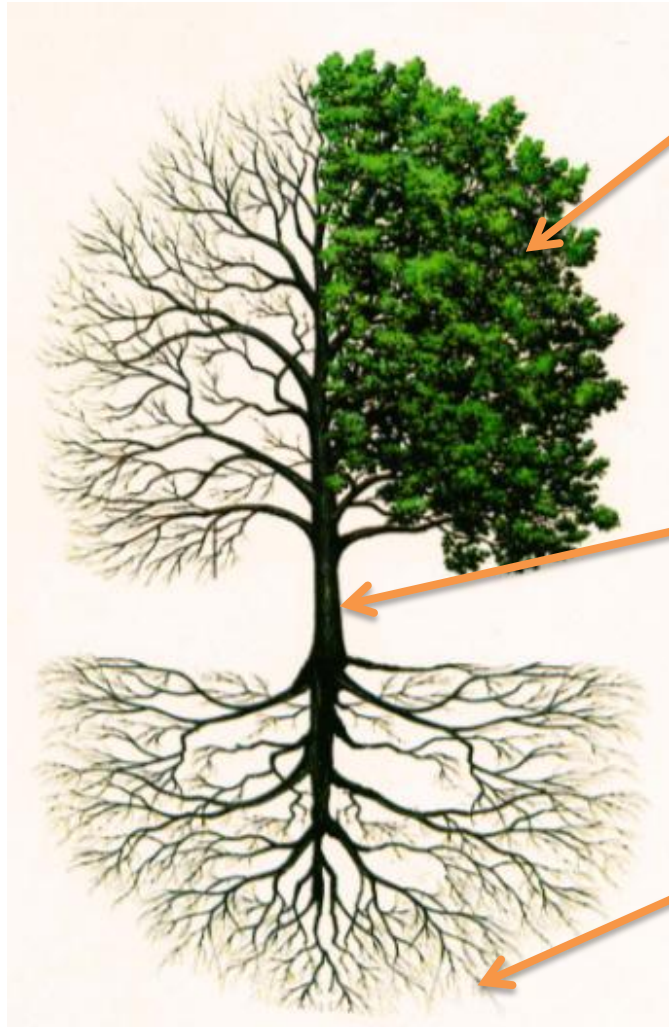
Un combustible: Le bois de chauffage



Un matériau: Le bois d'œuvre

Le bois de l'arbre

Les fonctions du bois de l'arbre



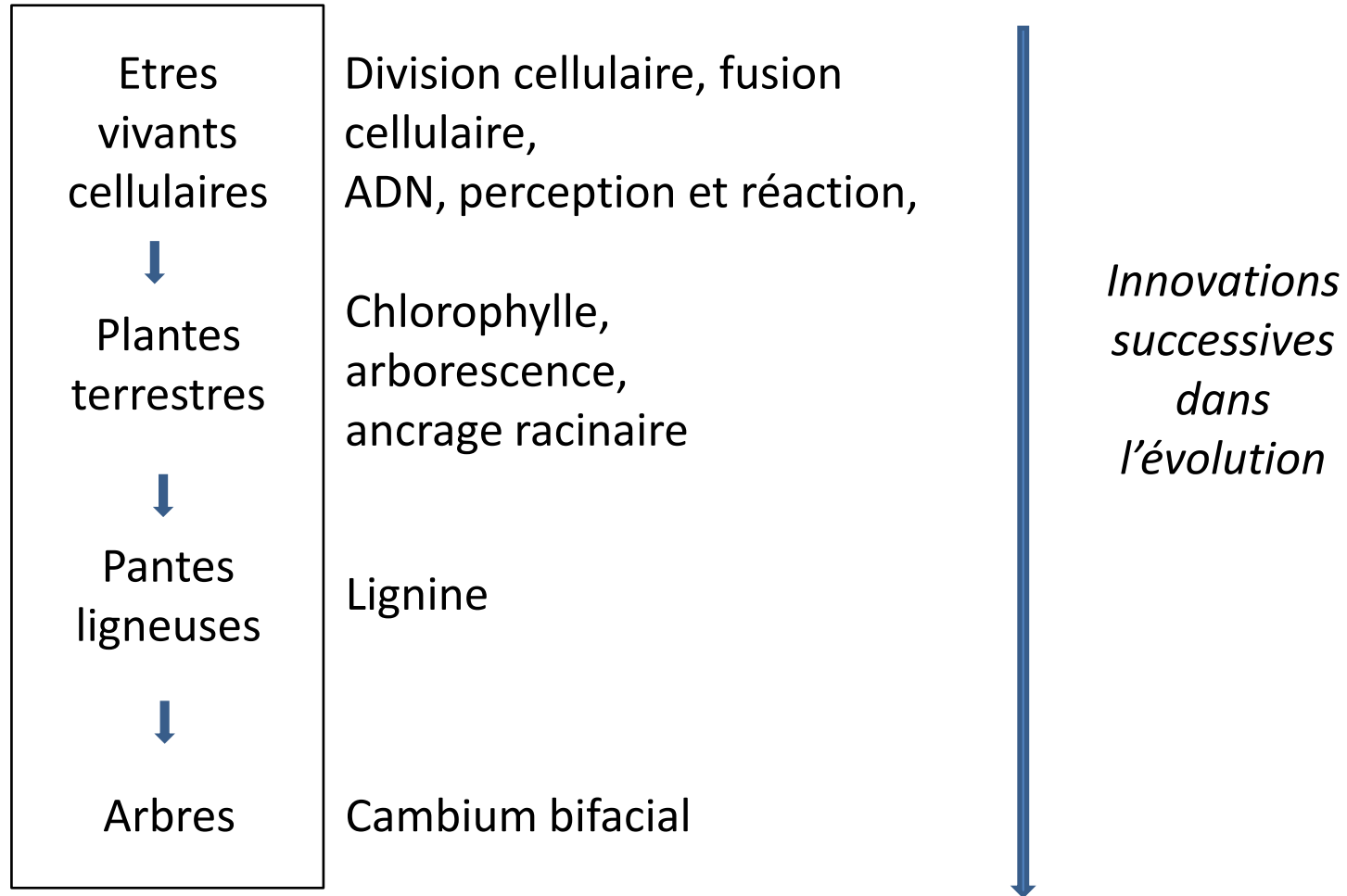
Les feuilles produisent la biomasse à partir de l'eau, du CO^2 et de l'énergie solaire

Le compartiment ligneux est la structure qui connecte les feuilles et les racinelles.

La croissance du bois construit l'arbre et le bois a une fonction mécanique, hydraulique et de stockage

Les poils racinaires extraient l'eau et les sels minéraux du sol

L'arbre dans l'évolution



Trois niveaux de description des structures et de la croissance de l'arbre

<i>Macroscopique</i>	Modèle architectural	et	empilement des cernes
<i>Microscopique</i>	Plan ligneux	et	structure de la paroi
<i>Moléculaire</i>	Extractibles	et	composition chimique
	↑		↑
	Signature génétique		Réponse à l'environnement

L'arbre: une croissance indéfinie grâce à des groupements de **cellules souches**:
les **bourgeons** (croissance en longueur et ramifications des axes ligneux)
et les **assises cambiales** (croissance en section des axes ligneux)
Un axe ligneux peut servir à cloner un arbre

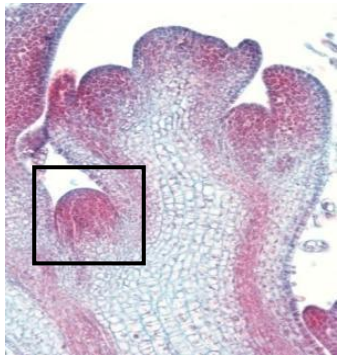
C'est la croissance du bois qui construit l'arbre

Niveau macroscopique

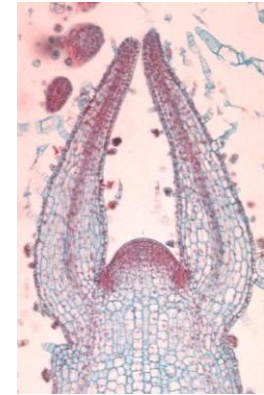
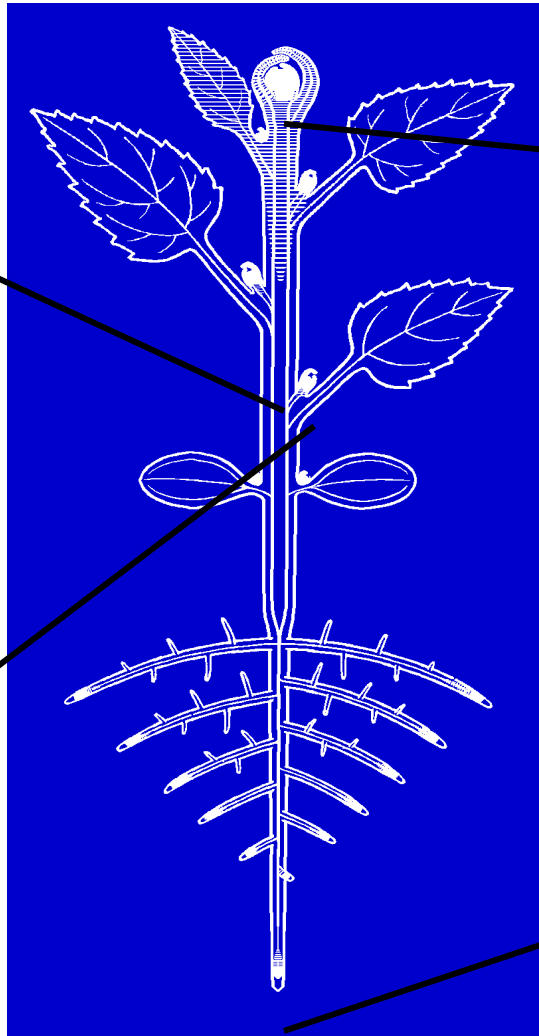
La croissance primaire



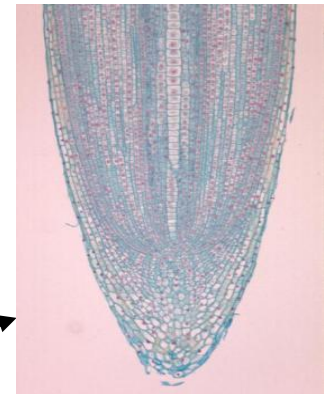
Tige avec
moelle



Bourgeon
latéral



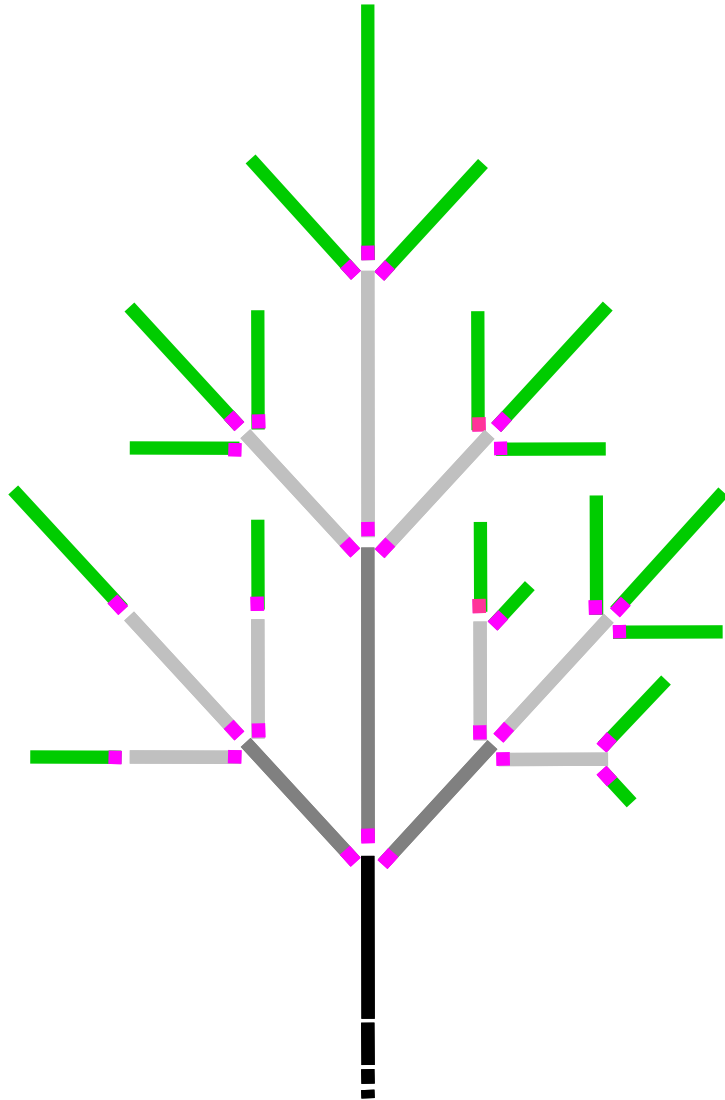
Bourgeon
terminal



Coiffe
racinaire

Les bourgeons sont les méristèmes primaires, leurs divisions cellulaires permettent la création de nouveaux rameaux et l'élongation des axes existants

Les étapes de la croissance primaire: les unités de croissance



Année 4

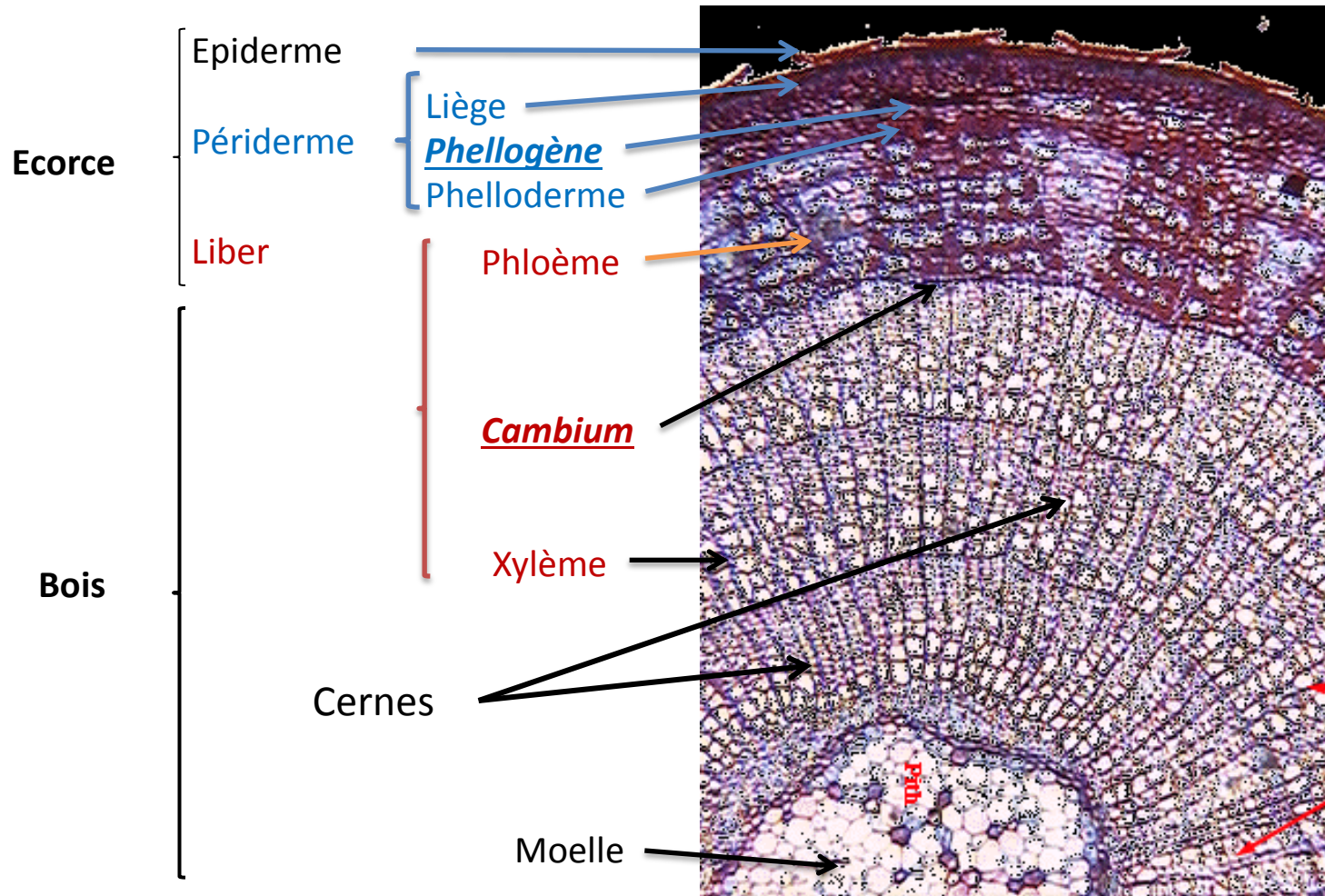
Année 3

Année 2

Année 1

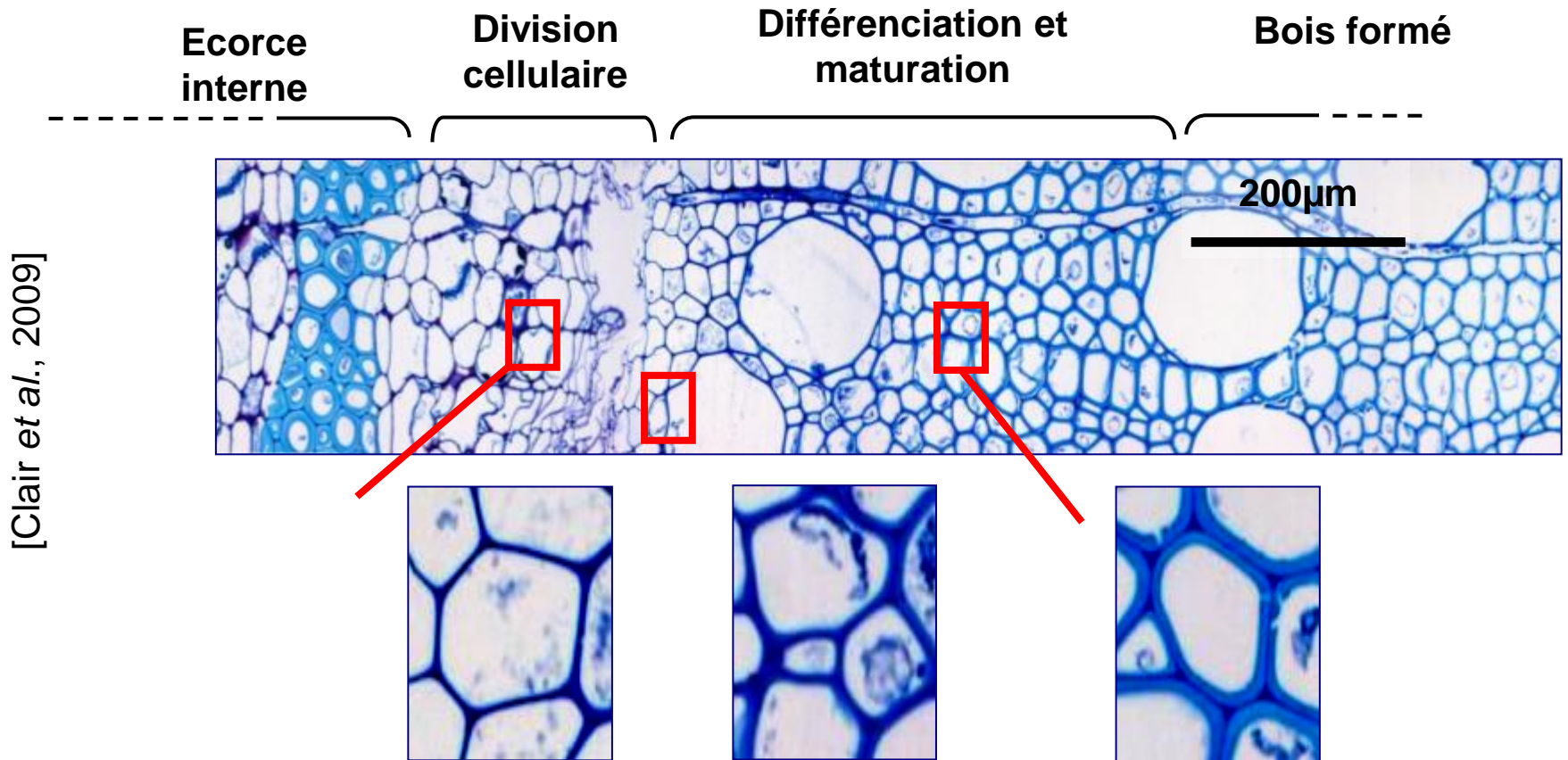
Bourgeon

La croissance secondaire



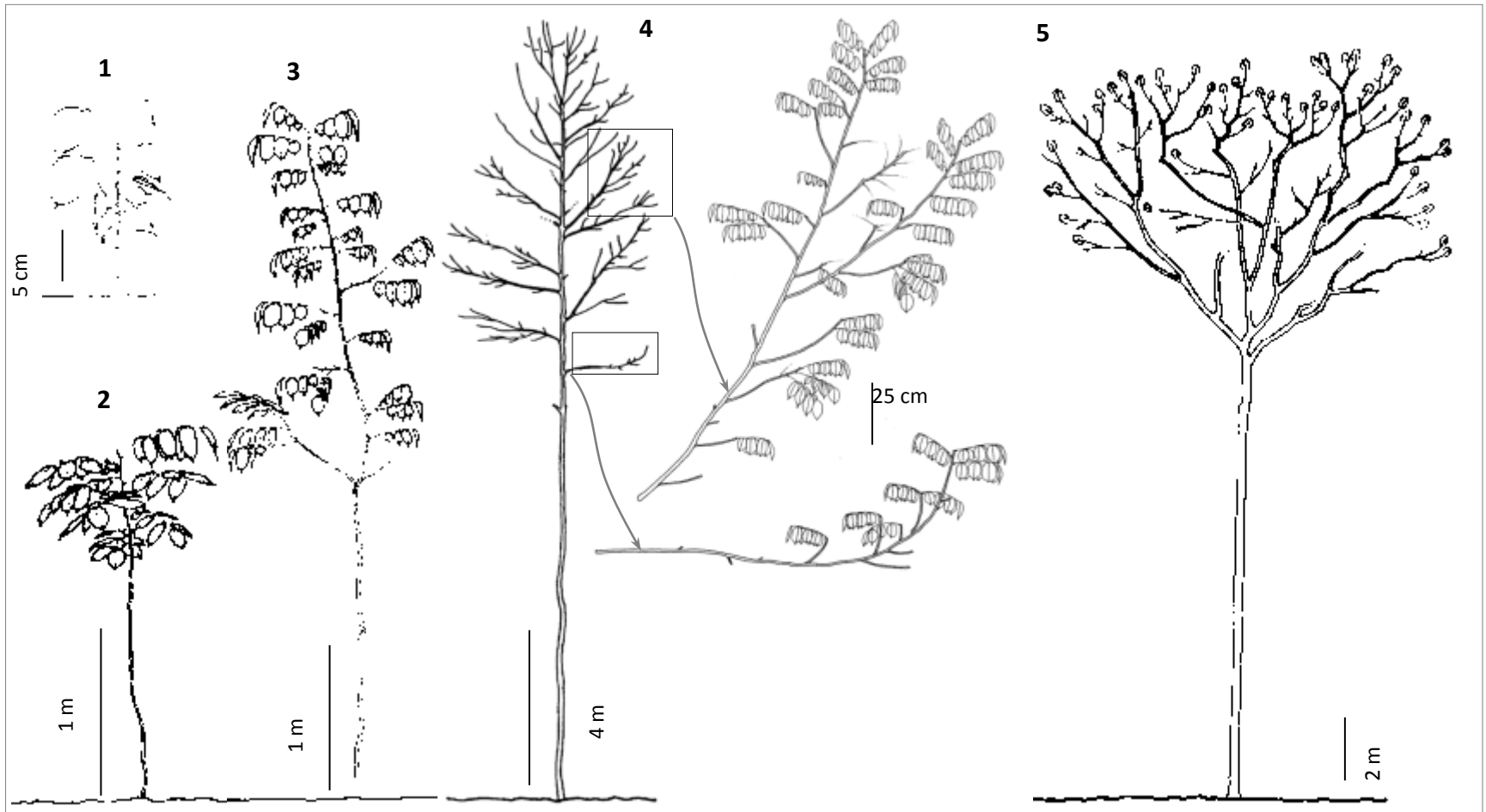
***Le cambium et le phelloène sont des méristèmes en constante division cellulaire.
Le cambium produit le phloème et xylème qui gèrent la conduction de la sève, la construction et la régulation mécanique de l'arbre
Le phelloène produit le péricorde qui protège le bois de l'arbre par l'extérieur***

Les étapes de la croissance secondaire



Durant la maturation la paroi s'épaissit par l'intérieur par dépôt et polymérisation des couches successives de composite à fibre

Géométrie externe du compartiment bois: l'architecture de l'arbre



***Le modèle architectural est le schéma de construction propre à l'espèce,
il est piloté par le génome***

L'élanacement H/D, rapport entre croissance primaire et croissance secondaire



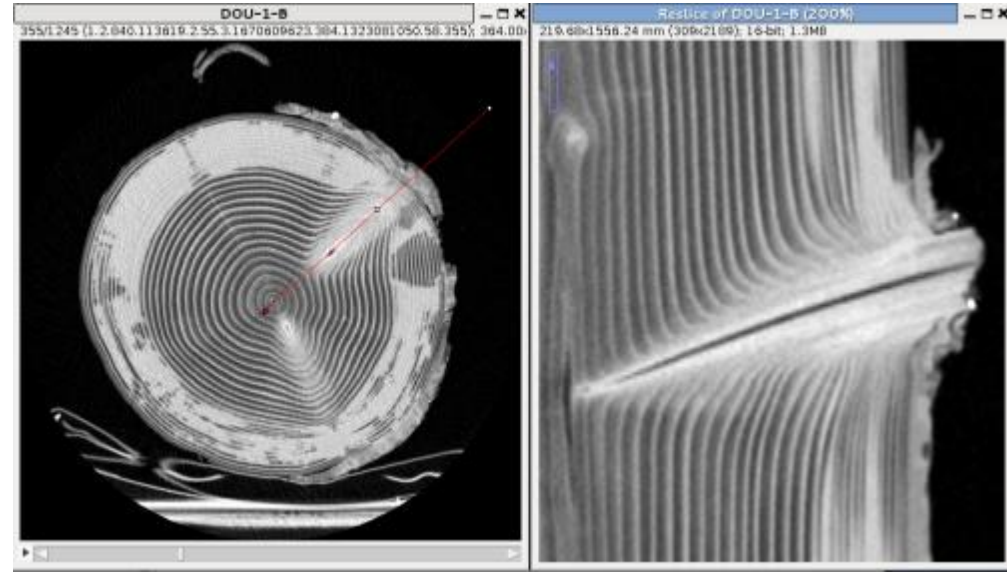
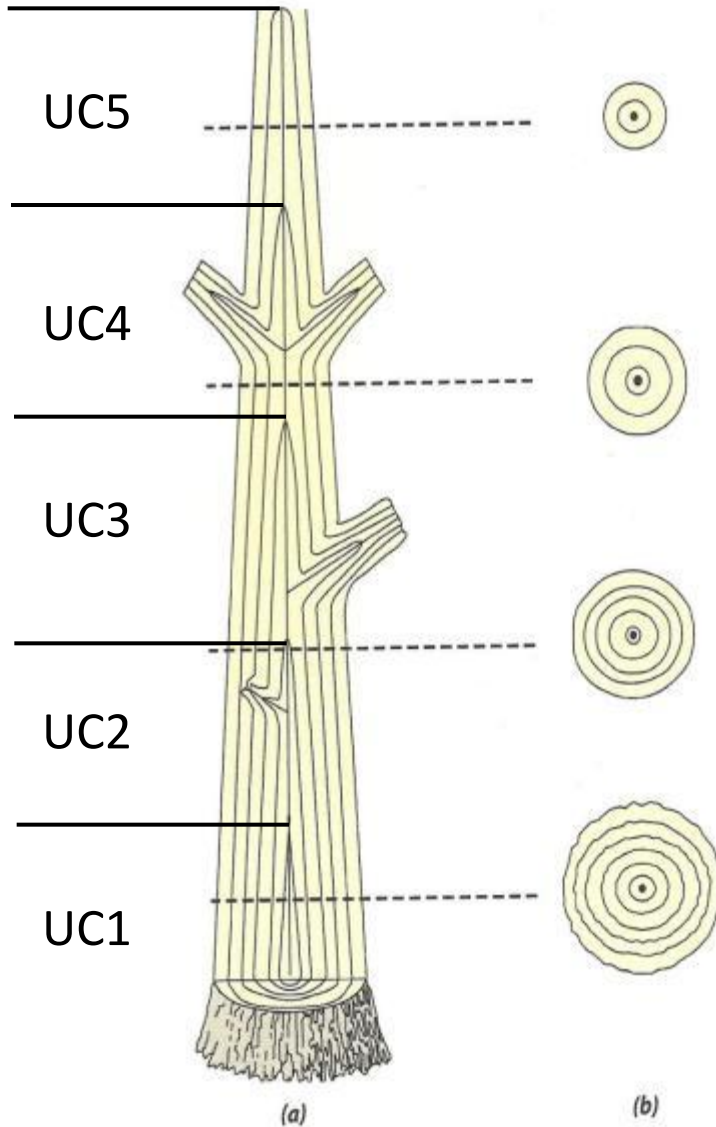
Un port trapu pour résister au vent



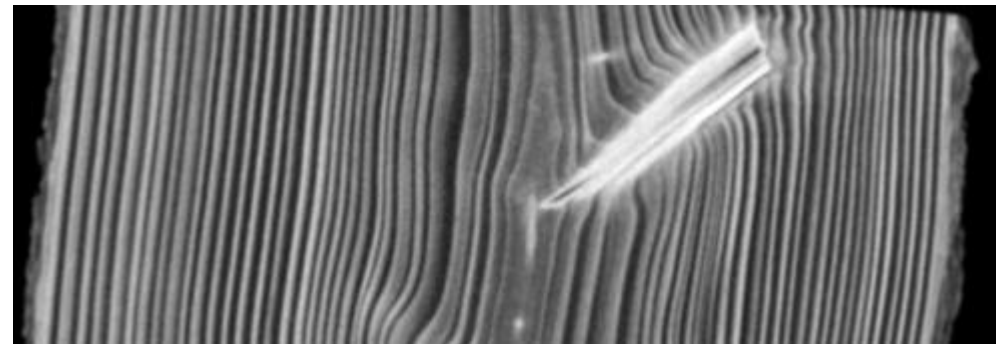
Un élanacement risqué pour atteindre vite la canopée

L'élanacement est une variable d'ajustement aux conditions de milieu

Géométrie interne: empilement 3D des cernes et nodosité



Jonction de branche

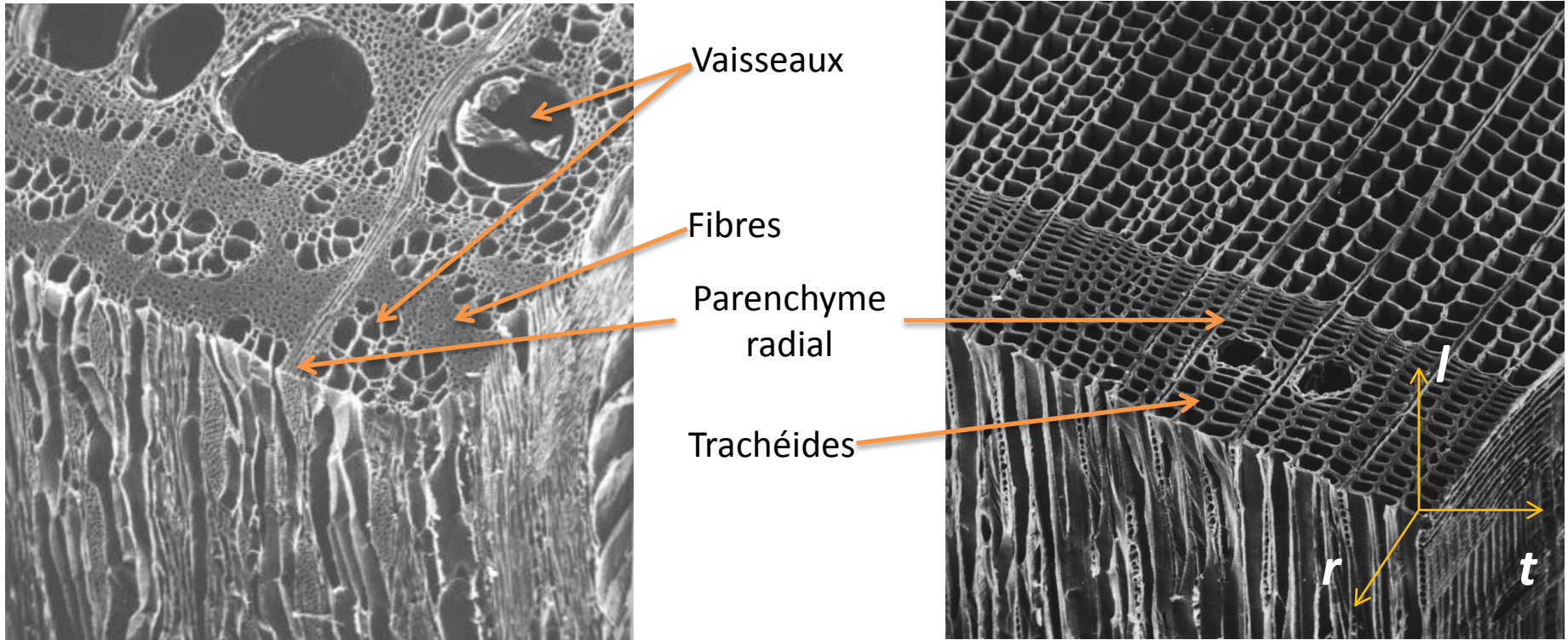


Branche incluse

La largeur des cernes dépend de l'histoire de l'arbre et de son environnement
C'est un moyen de lire l'histoire dans le bois

Niveau microscopique

Anatomie du xylème



Feuillu

Résineux

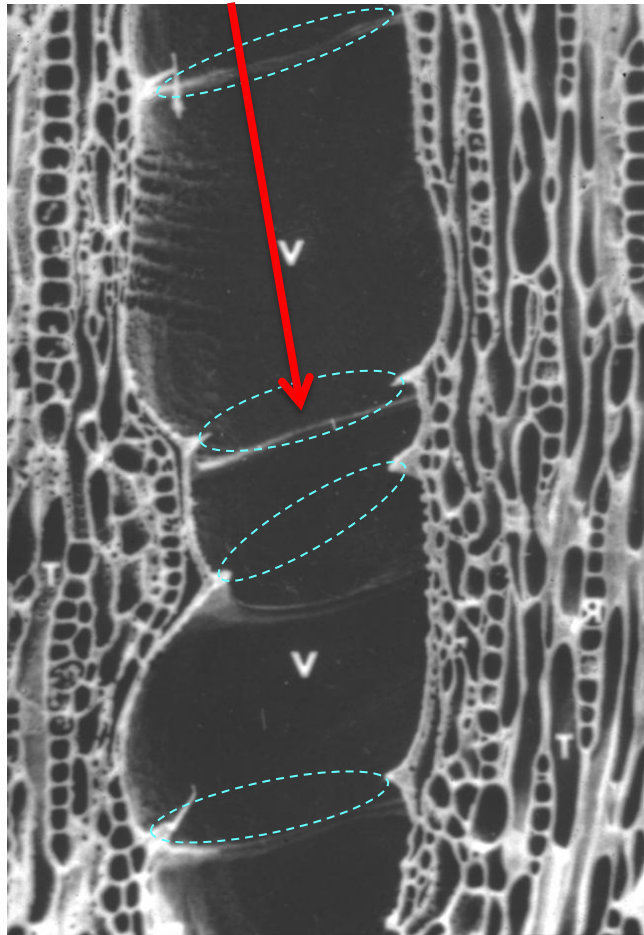
Les fibres et trachéides ont un rôle mécanique de soutien

Les vaisseaux et les trachéides ont un rôle de conduction hydraulique

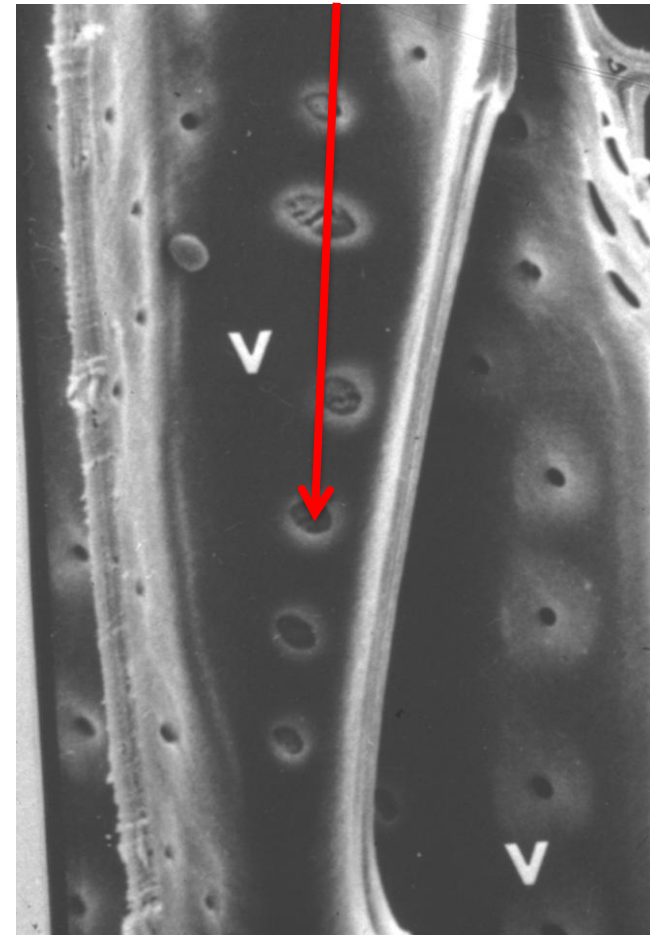
Les parenchymes ont un rôle de biosynthèse et de stockage de nutriments

Circulation des fluides dans le xylème cas d'un feuillu

Perforation



Ponctuation

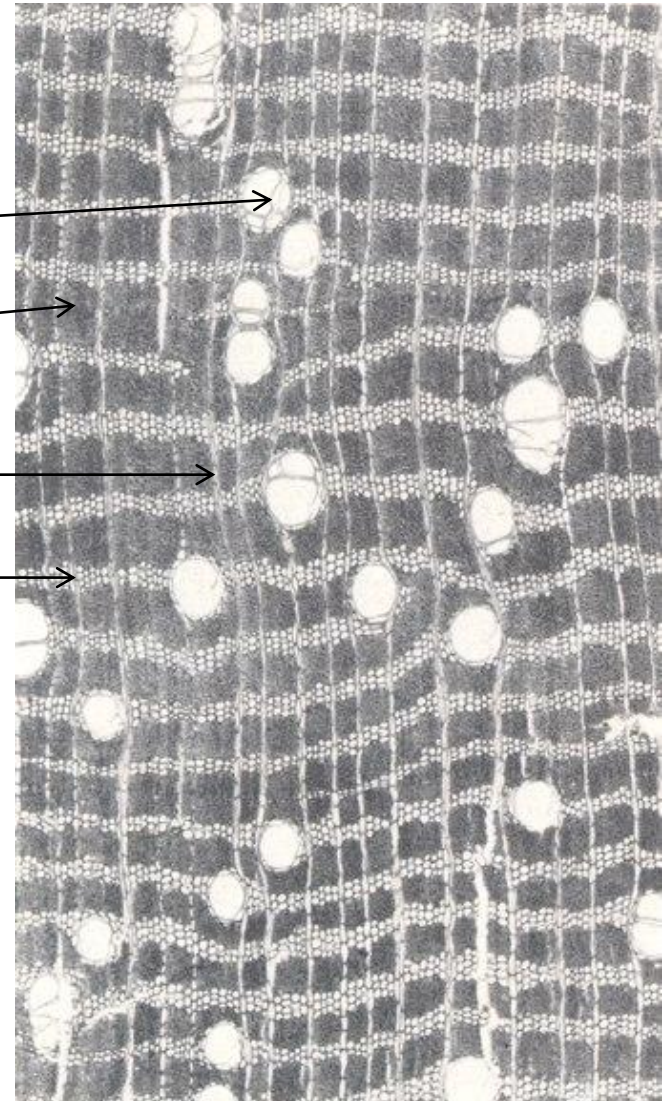


Anatomie et reconnaissance des bois

Éléments d'identification:

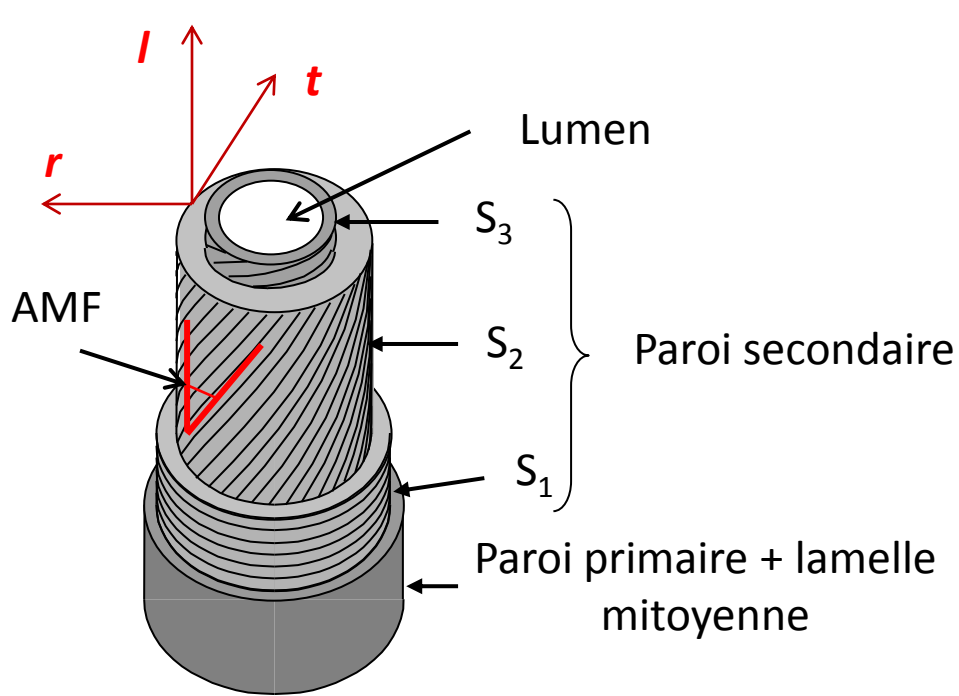
- Vaisseaux
- Fibres
- Rayons médullaires
- Parenchyme axial

Le plan ligneux, caractéristique d'une espèce est le schéma d'organisation 3D des différents éléments cellulaires du xylème.

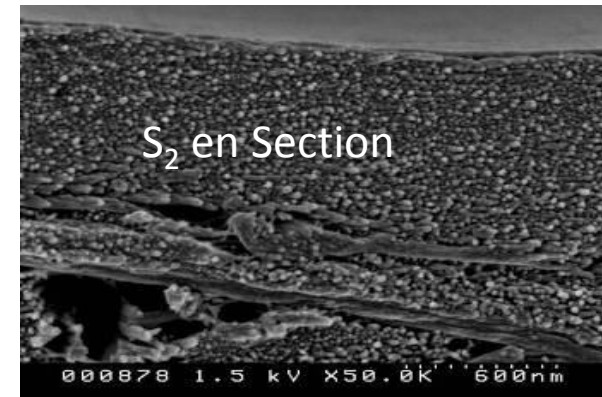
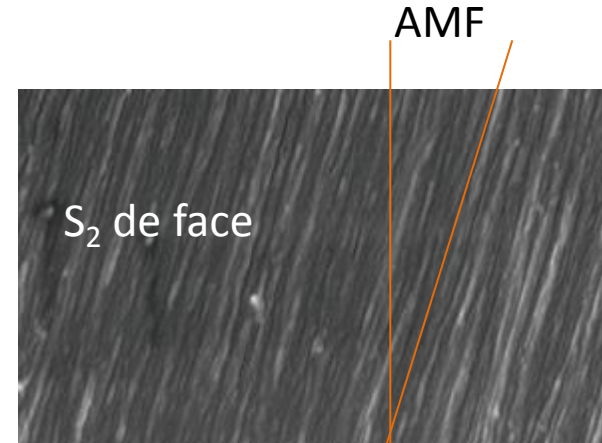


Crudia aromatica CAE.

Ultrastructure de la paroi d'une fibre

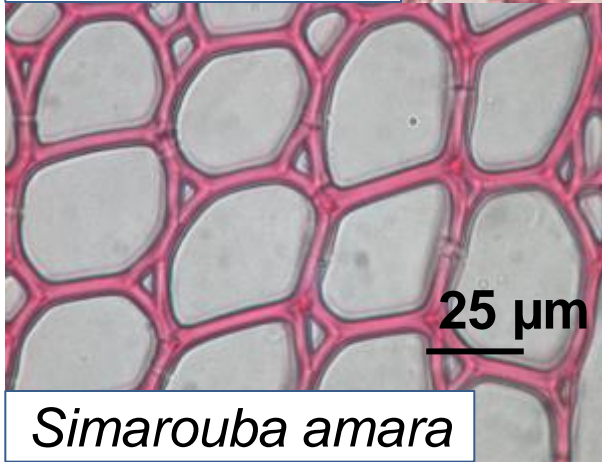
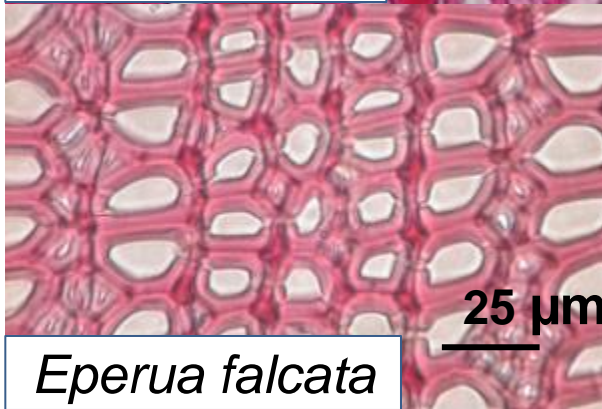
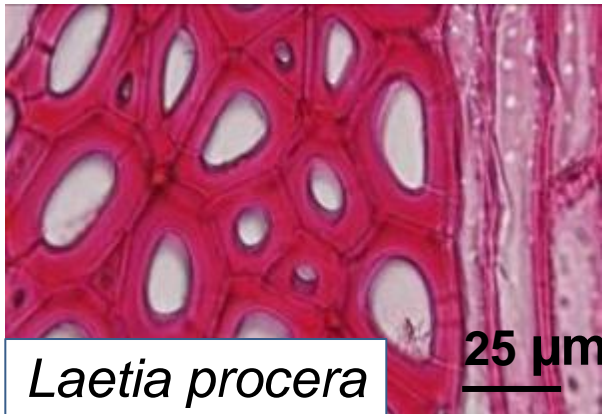


Organisation de la paroi de la fibre **La couche S₂ est la plus épaisse**

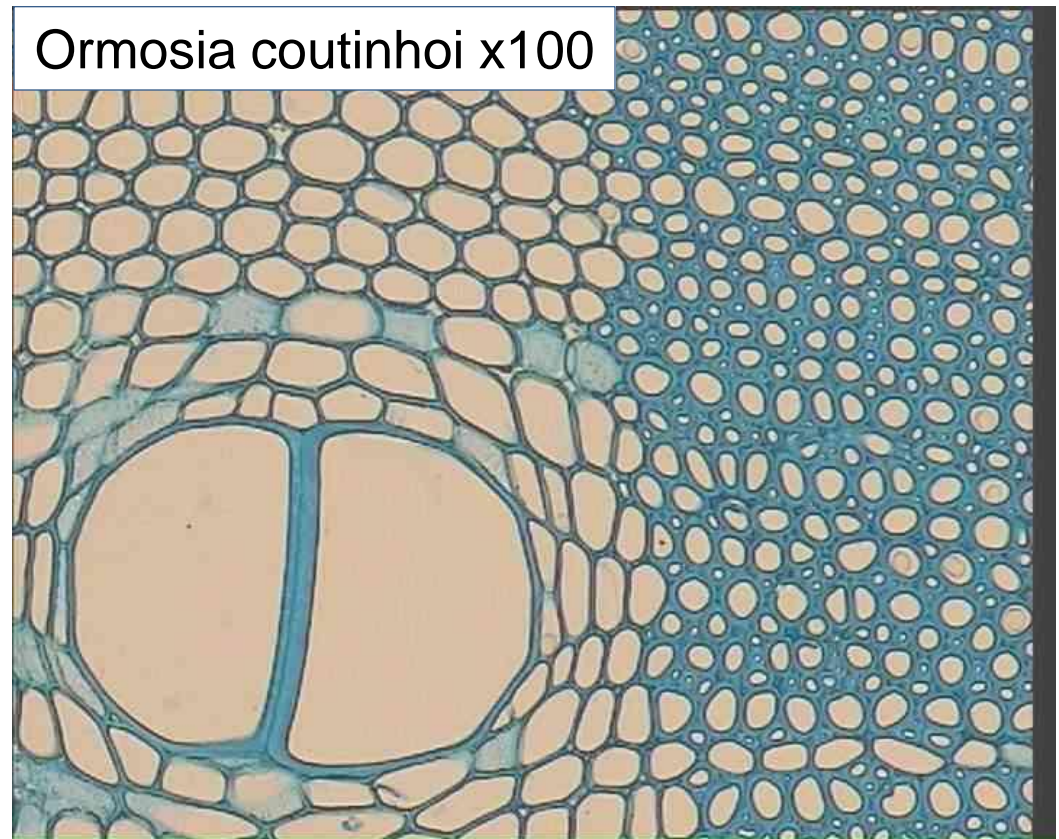


Chaque couche est un composite à fibres cristallines dans une matrice amorphe

La densité du xylème dépend de l'épaisseur des parois, elle est régulée par l'environnement

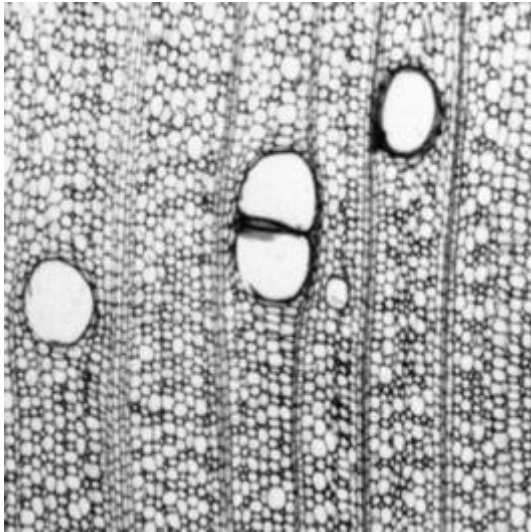


Entre espèces

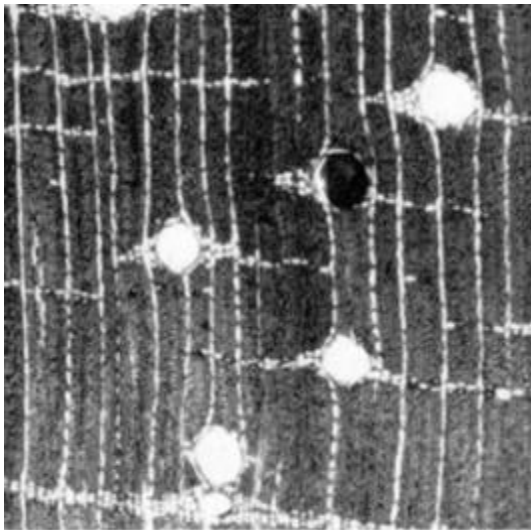


A l'intérieur d'un arbre

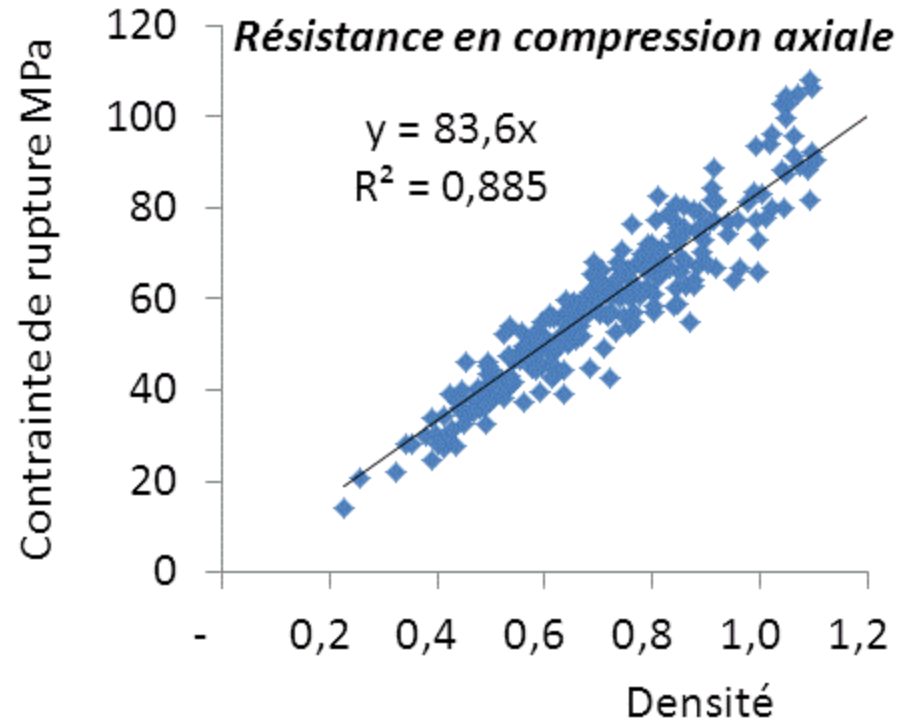
La densité est la 1^{ère} clé des propriétés mécaniques du xylème



Balsa Densité = 0,15
Porosité = 90%



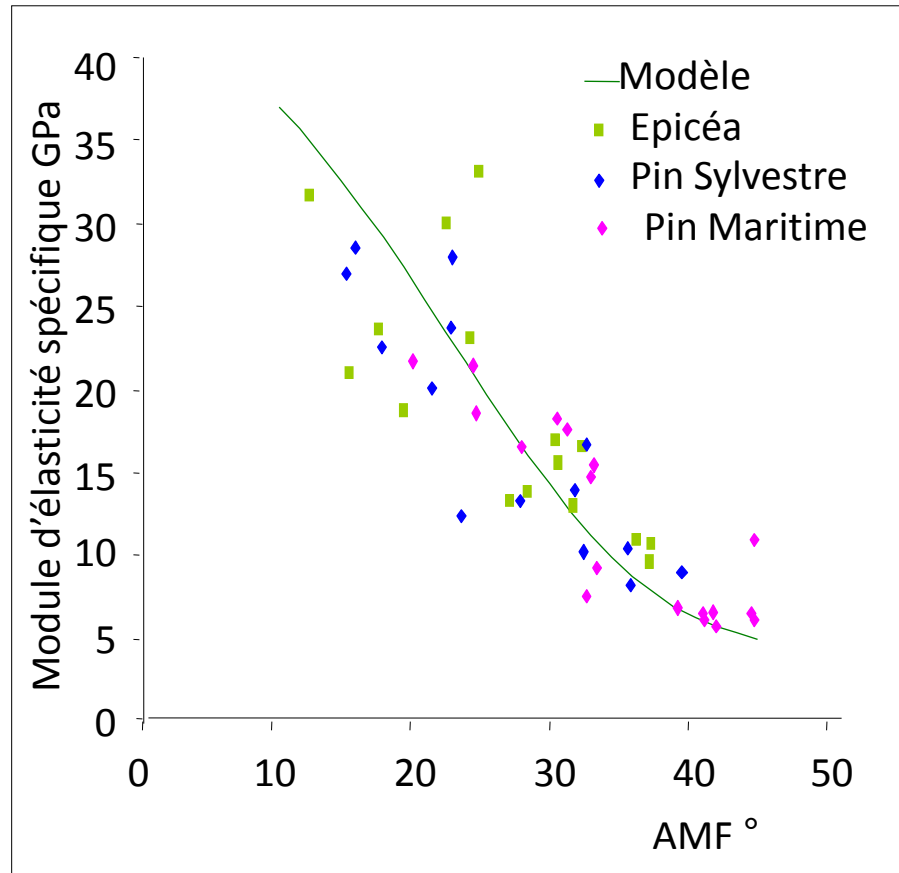
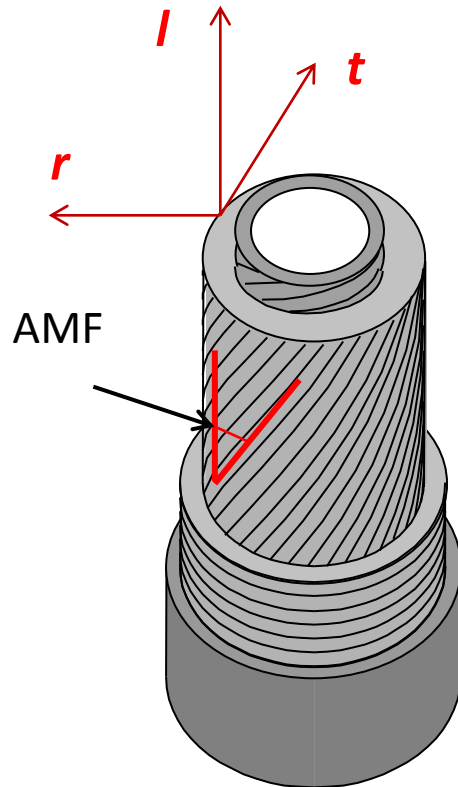
Panacoco Densité = 1,2
Porosité = 20%



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

L'angle des nano-fibres de cellulose est la 2^{ème} clé des propriétés mécaniques du xylème

Il est aussi régulé par l'environnement

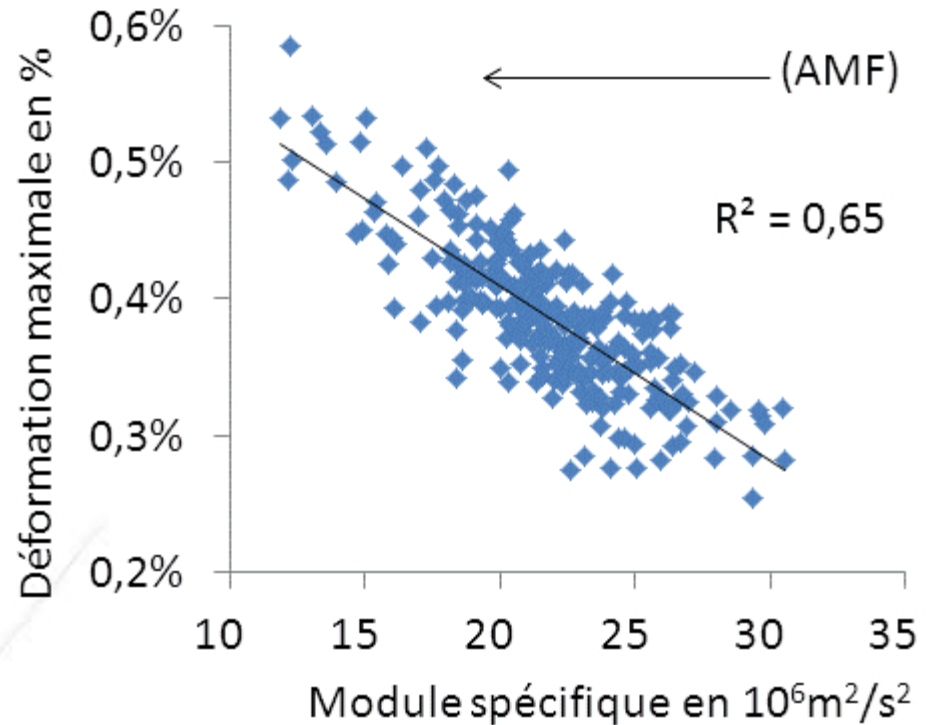


Le module spécifique: (Module d'élasticité / (Densité)) est un bon indicateur de l'angle des micro fibrilles

L'angle des microfibrilles pilote la flexibilité de l'arbre



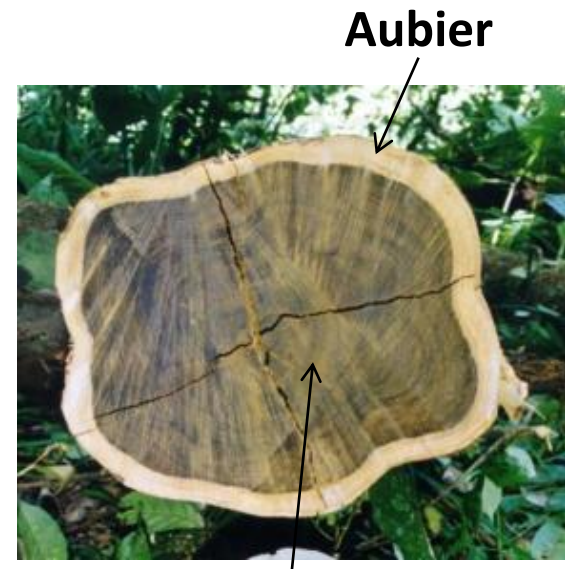
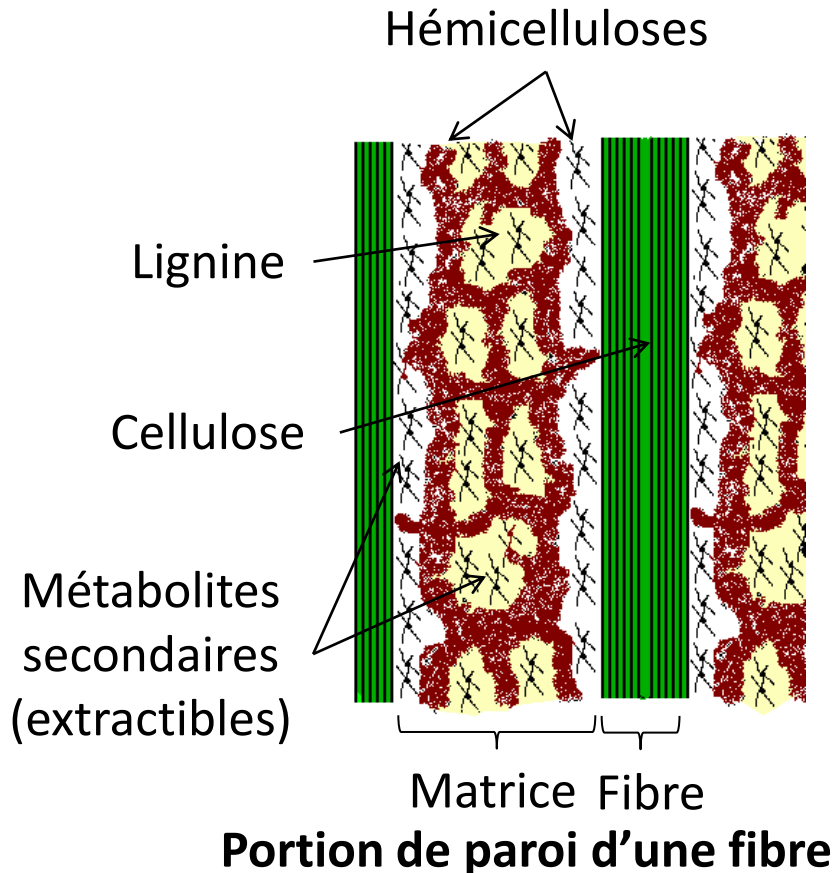
© Can Stock Photo - csp6094394



En augmentant l'AMF de 10° à 30° , on divise par 2 le module et on multiplie par 2 la déformation maximale; la flexibilité des axes ligneux est très fortement augmentée

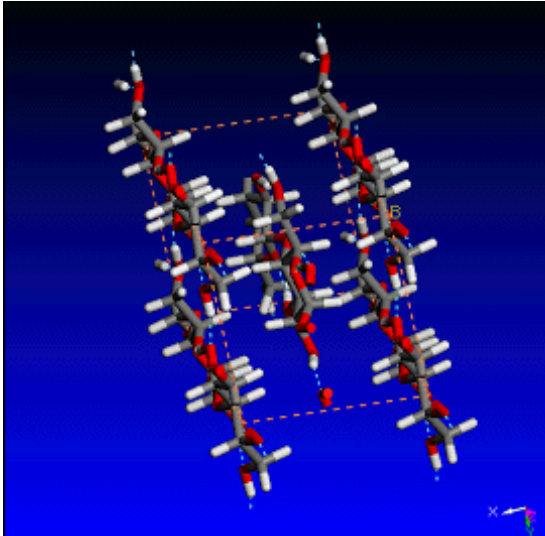
Niveau moléculaire

Chimie de la paroi et duraminisation

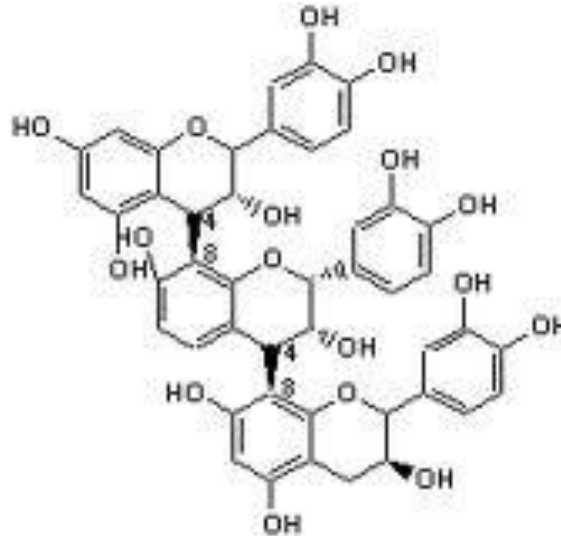


Bois de cœur (duramen)
Lors de la mort programmée des parenchymes, il y a synthèse de petites molécules qui protègent l'arbre par l'intérieur: les extractibles

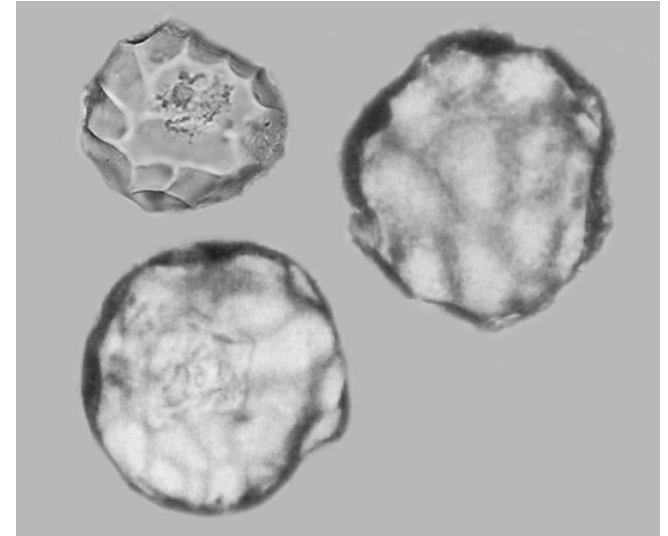
Composition chimique de la paroi: macromolécules, métabolites et minéraux



Cristal de cellulose



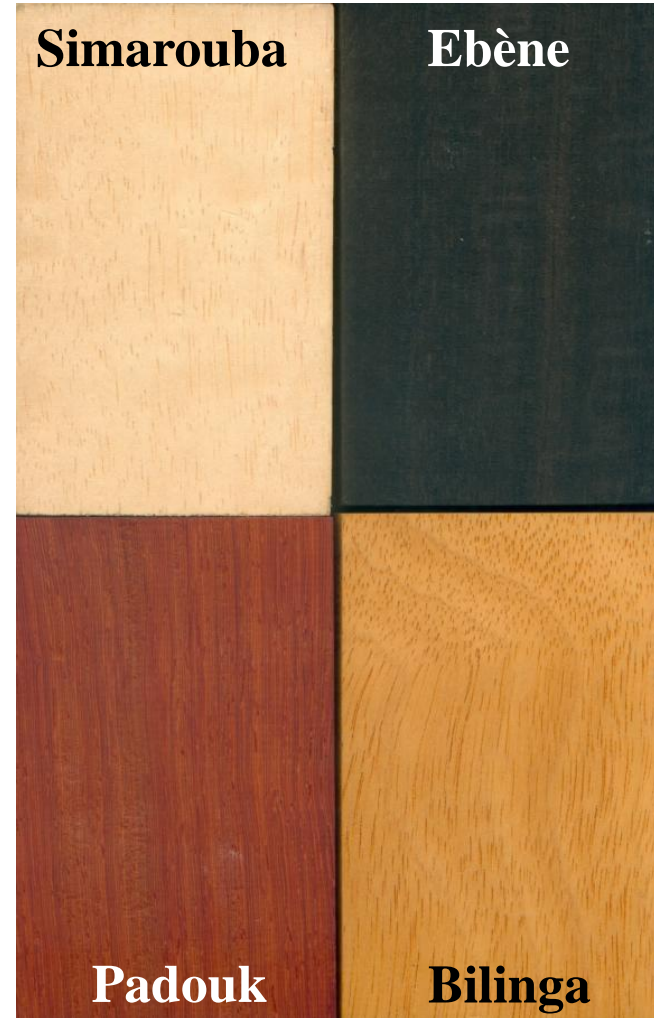
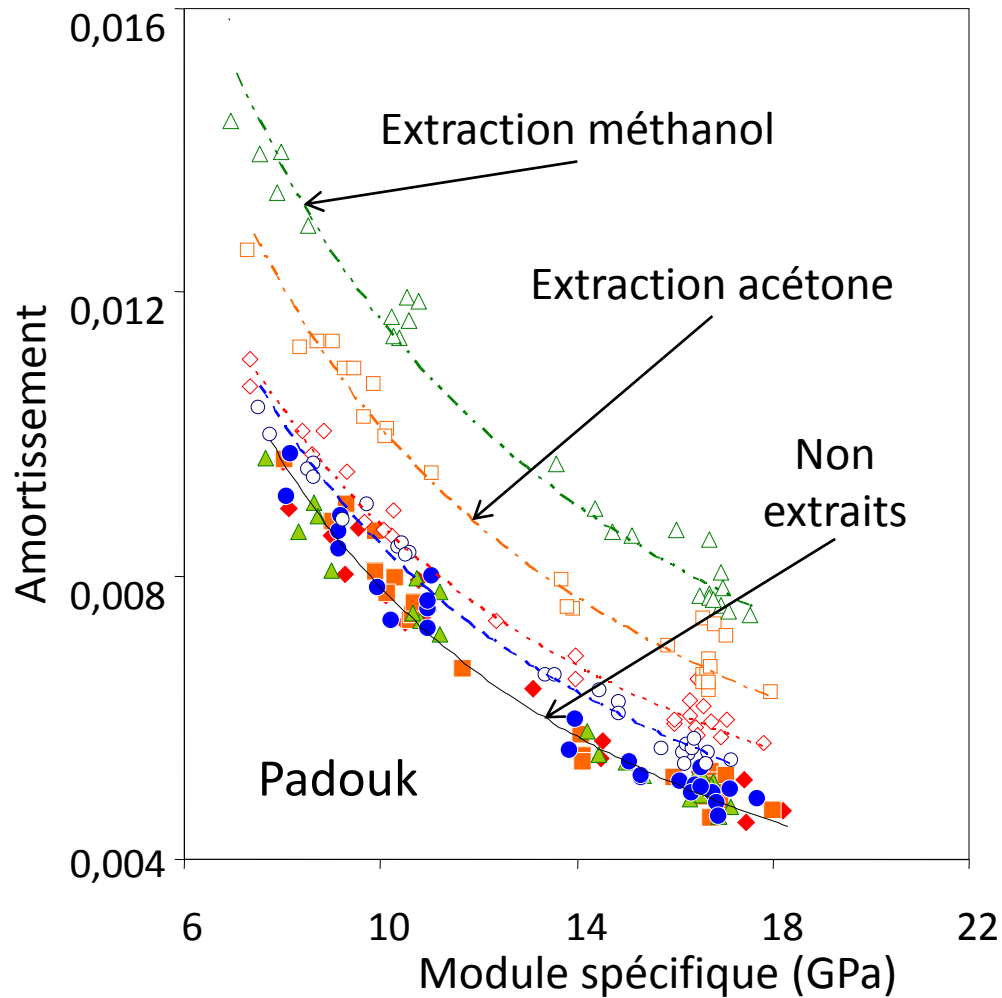
Tanin



Cristaux de silice

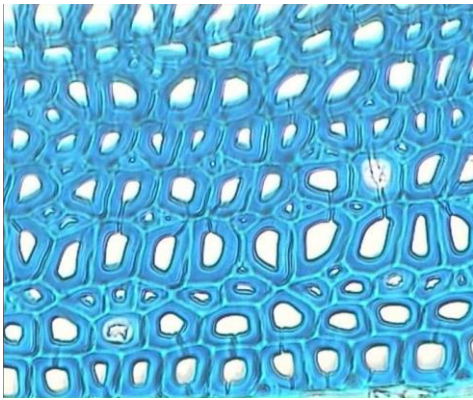
La signature chimique, propre à l'espèce, traduit la stratégie de défense du xylème, elle est pilotée par le génome

Les extractibles ont aussi un impact fort sur le comportement viscoélastique et la couleur



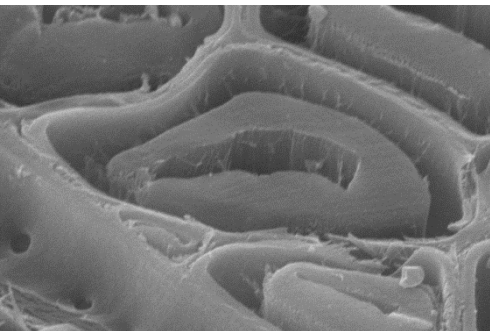
La fonction musculaire du xylème

Mécanique, hydraulique, défense, stockage: fonctions du xylème



Soutien
(gravité, vent...)

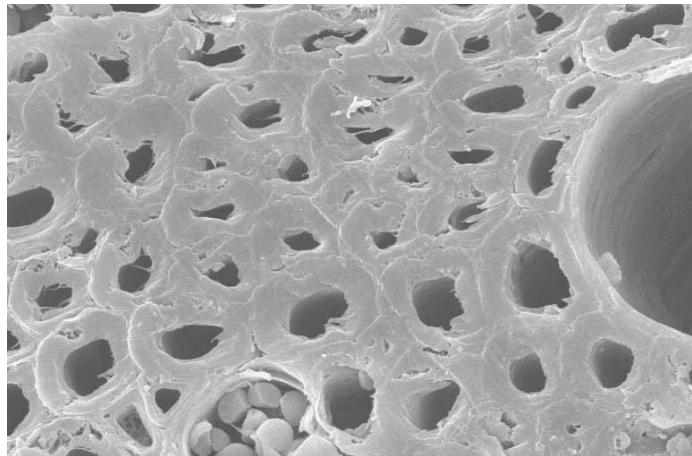
Système musculaire



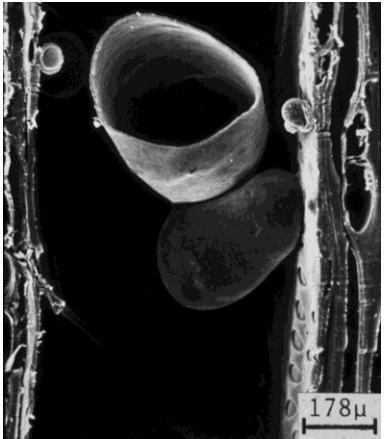
Contrôle de la posture
(redressements)

fonctions du xylème

Système squelettique

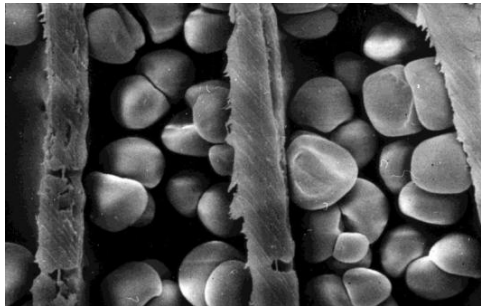


Système de biosynthèses



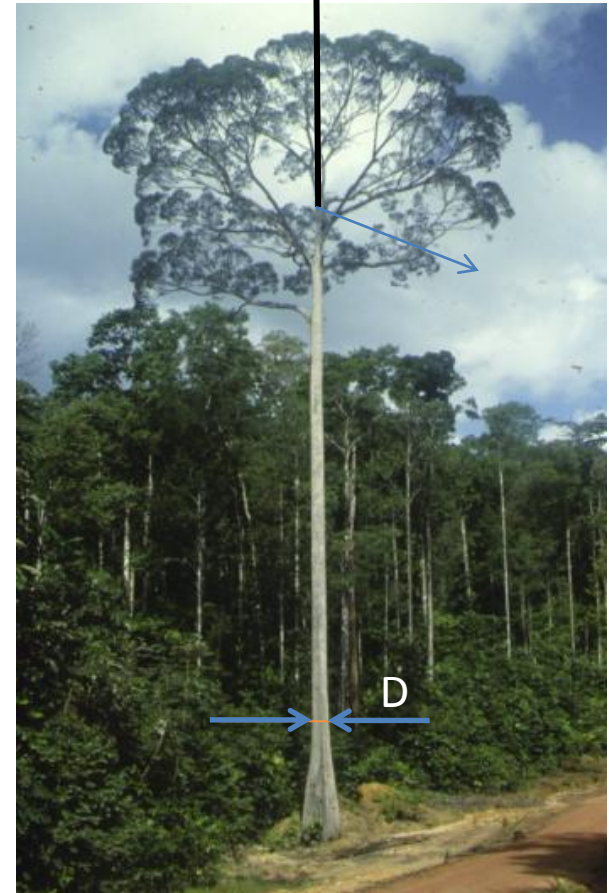
Circulation
(eau, minéraux)

Système vasculaire



Pérennité
(réserves, défenses)

Le contrôle de la posture

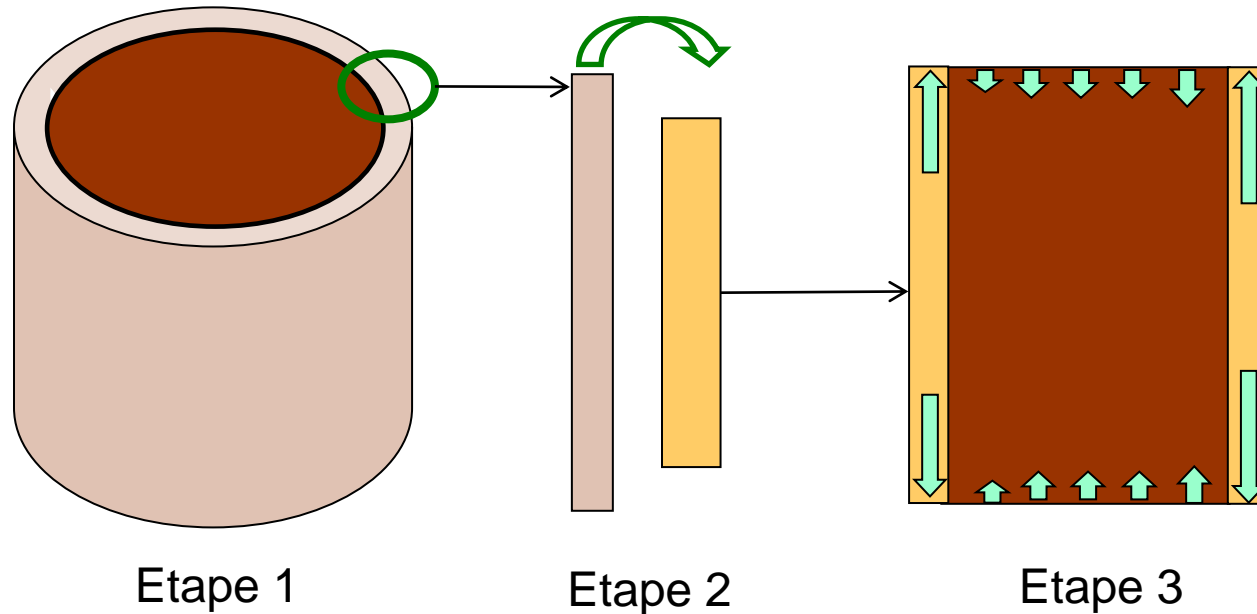


Le squelette peut résister aux forces extérieures mais il ne peut pas contrôler la posture et maintenir une position verticale, instable par nature

Les muscles sont nécessaires pour créer les forces de régulation

Un arbre ne peut pas tenir debout ni étaler ses branches sans « muscles »

La maturation des fibres génère des forces dans une tige de bois c'est le « muscle » des arbres



Etape 1

Etape 2

Etape 3

Etape 1: Création d'une nouvelle couche de xylème très molle (division cellulaire)

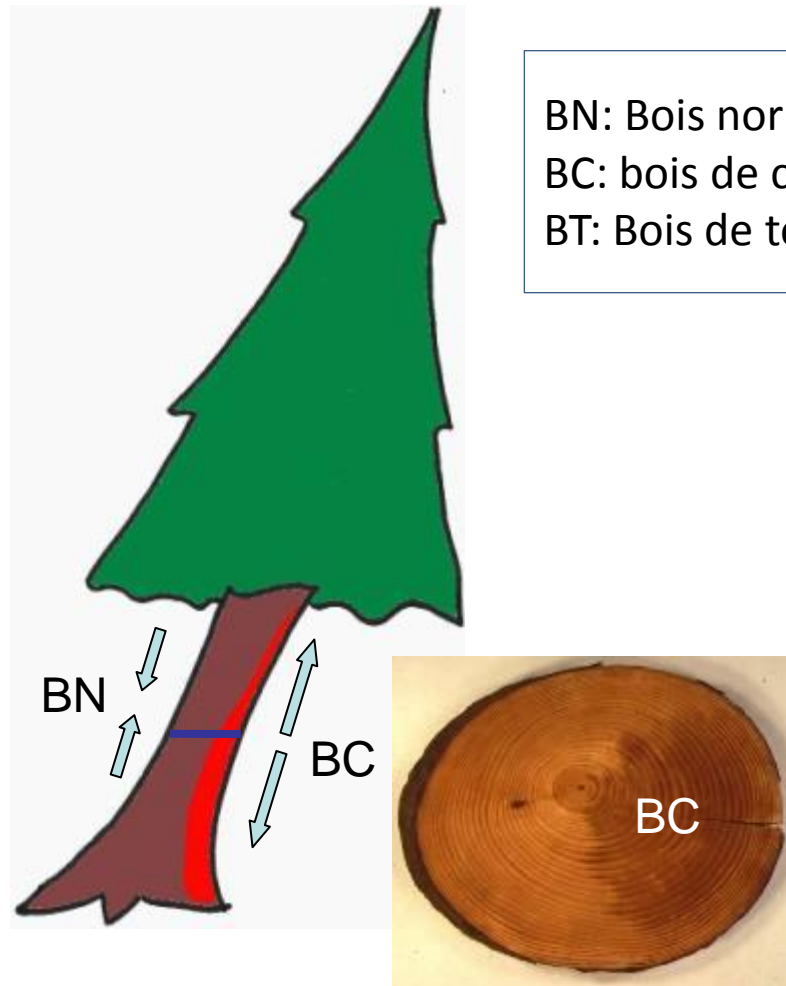
Etape 2: Cette couche se rigidifie et tend à se rétracter axialement

Etape 3: Ce retrait, bloqué par l'adhésion sur le noyau dur, crée des forces de traction dans le « muscle » et une petite compression dans le « squelette » (noyau).

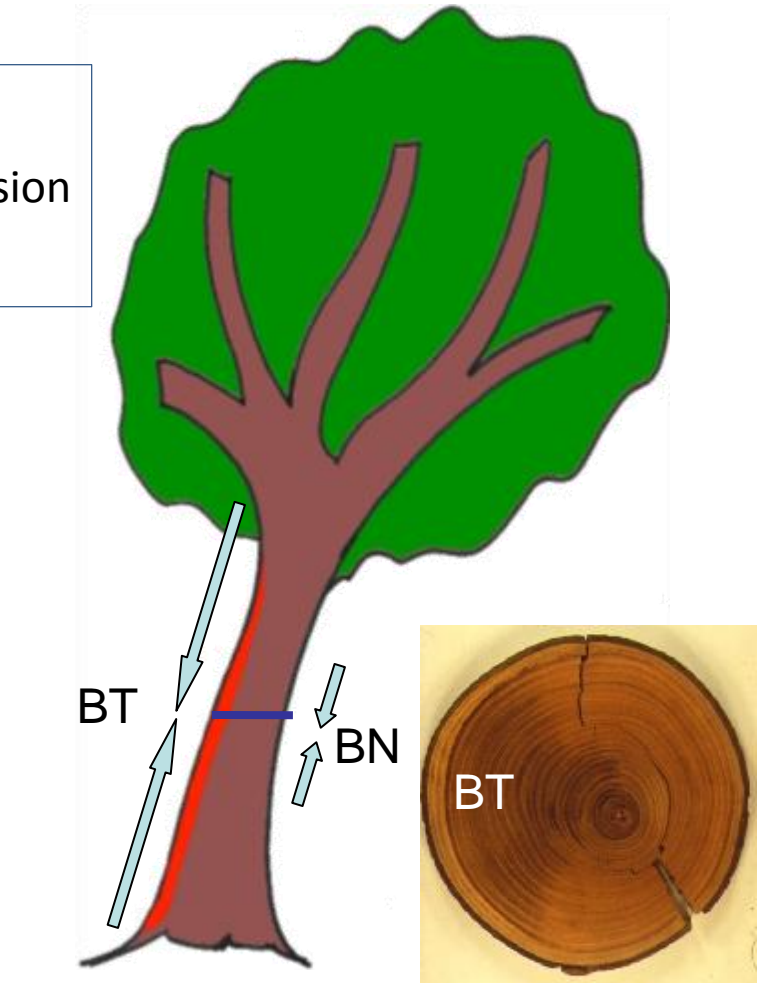
En jouant sur l'AMF, le xylème peut moduler la force le long de la nouvelle couche pour réguler le port vertical du tronc ou le port incliné de la branche.

Le xylème est à la fois « muscle » et « squelette »

Bois de tension (feuillus) et bois de compression (résineux) des moteurs pour les cas extrêmes



BN: Bois normal
BC: bois de compression
BT: Bois de tension

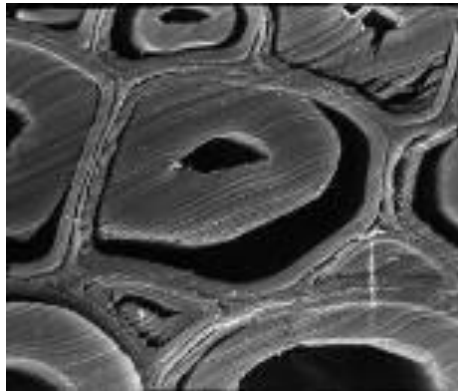


Le bois de compression des résineux crée des forces de compression

Le bois de tension des feuillus crée de très grandes forces de tension

Bois de tension et bois de compression: des types de xylème très différents du bois normal

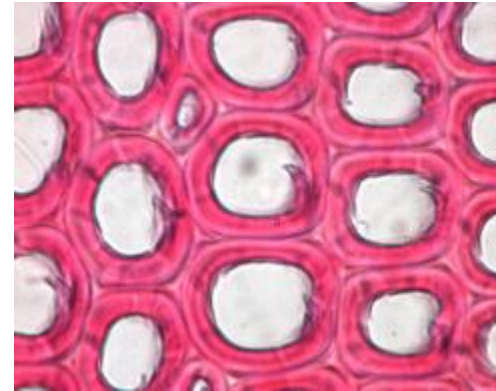
Feuillu



AMF = 0°
Traction de
5 tonnes par
cm² de bois

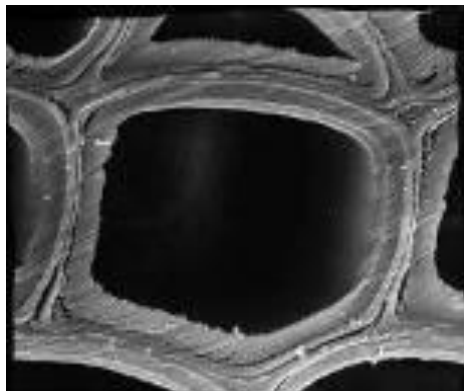
Bois de tension

Résineux



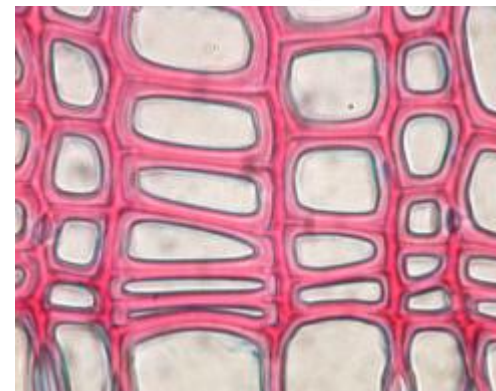
AMF = 45°
Compression
de 1 tonne par
cm² de bois

Bois de compression



AMF = 15°
Traction de
1 tonne par
cm² de bois

Bois normal



AMF = 15°
Traction de
1 tonne par
cm² de bois

Bois normal

Dans les bois de réaction une modification de la chimie des macromolécules, associée au réglage de l'angle des microfibrilles, conduit à un changement radical de mise en précontrainte de la couche de bois.

Cela permet aux arbres de se redresser après la tempête



Bois canon à Kourou



Pins des landes

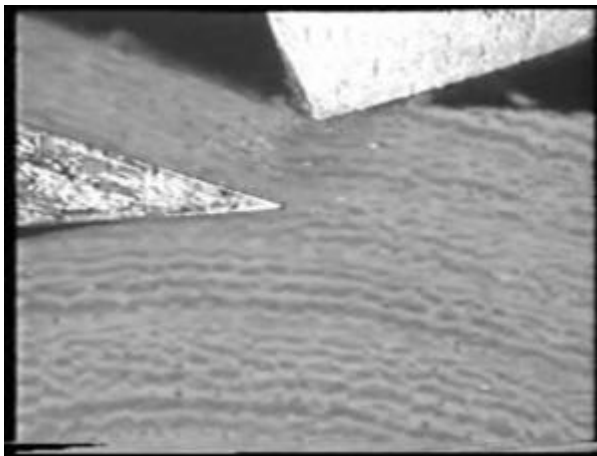
Mais une énorme énergie élastique est bloquée dans chaque arbre dont les « muscles » sont tendus à l'extérieur et le « squelette » comprimé à l'intérieur

La déconstruction de l'arbre:
vers le bois d'œuvre

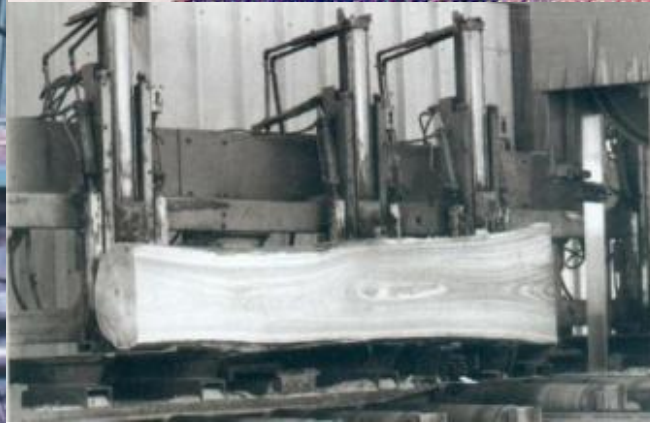
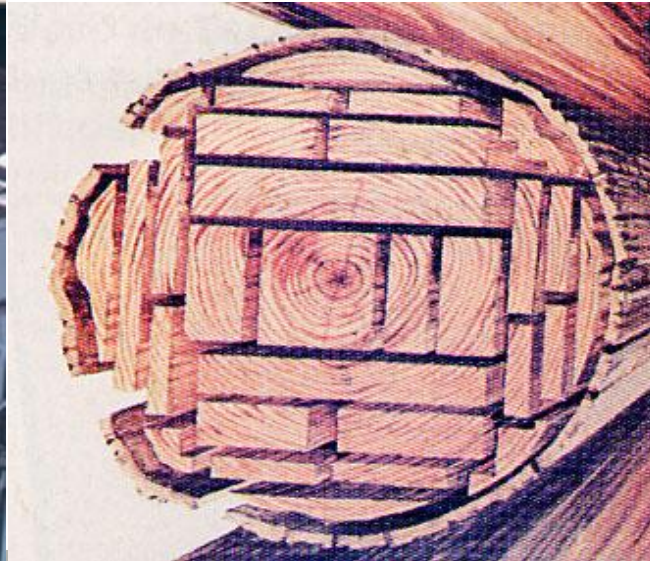
Les étapes de la déconstruction de l'arbre

- La première étape est l'abattage de l'arbre et son tronçonnage en grumes et billons
- La deuxième étape est le débit en profilés
- La troisième étape est le séchage de ces éléments

Le bois d'œuvre (matériau pour nous) commence sa vie après ces étapes de déconstruction de l'arbre, il ne concerne que le xylème des axes ligneux



Différents modes de débit du xylème



Bois d'œuvre

Tronçonnage:

grumes et billons

Fendage et sciage:

profilés bois

Déroutage et tranchage:

feuilles de bois

Bois d'industrie

Fragmentation:

plaquettes

Défibrage:

fibres

Déconstruction de la paroi:

molécules

Variabilité et diversité

Une double origine: génétique et historique

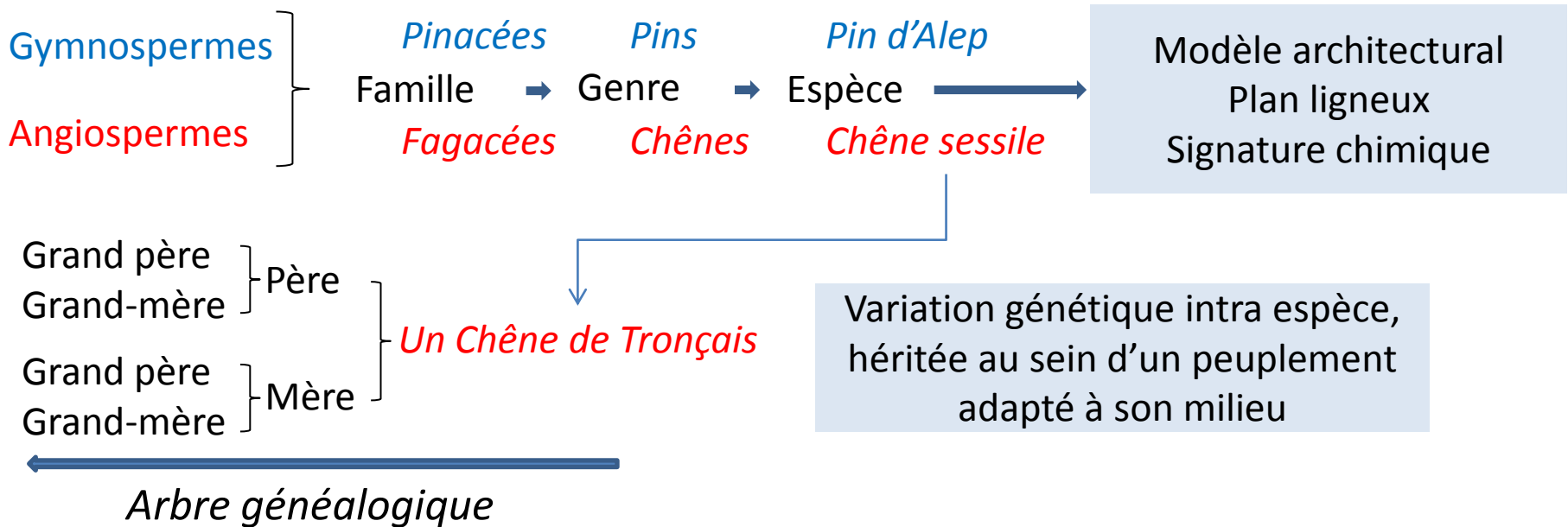
Diversité de la forêt française
24 millions d'hectares dont:

13 millions d'hectares de forêt tempérée
(66 espèces d'arbres)

8 million d'hectares de forêt tropicale amazonienne
(1712 espèces d'arbres)

3 millions d'hectares de forêt méditerranéenne
(18 espèces spécifiques)

Origine génétique: le temps très long



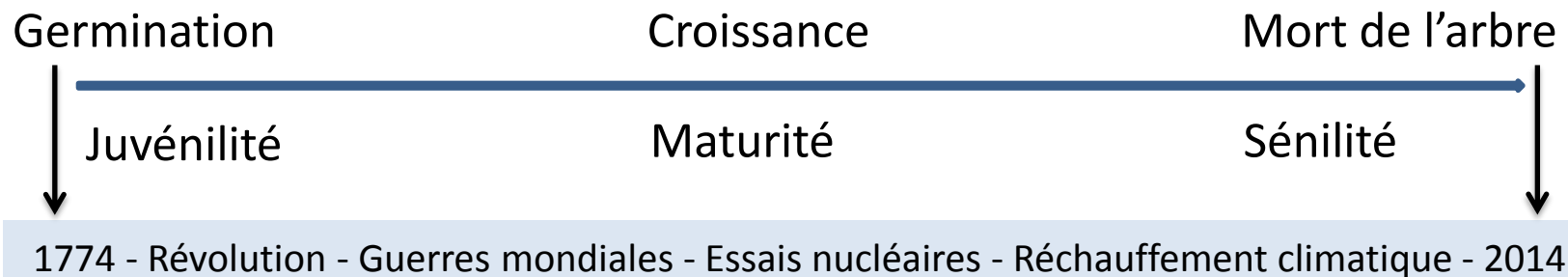
L'espèce botanique est la clé principale. Le génome pilote le modèle architectural, le plan ligneux et la signature chimique du bois de l'arbre

Un simple prélèvement à l'emporte pièce au pied du tronc permet de décrire l'ADN (cambium), le plan ligneux (xylème) et la signature chimique de l'écorce (phloème et phelloderme)

*Une date d'abattage et le point GPS de la zone de prélèvement donne l'origine de l'arbre
C'est une carte d'identité qui permet la traçabilité du bois extrait de l'arbre*

Histoire de l'arbre, histoire du bois d'œuvre

Histoire du chêne de Tronçais



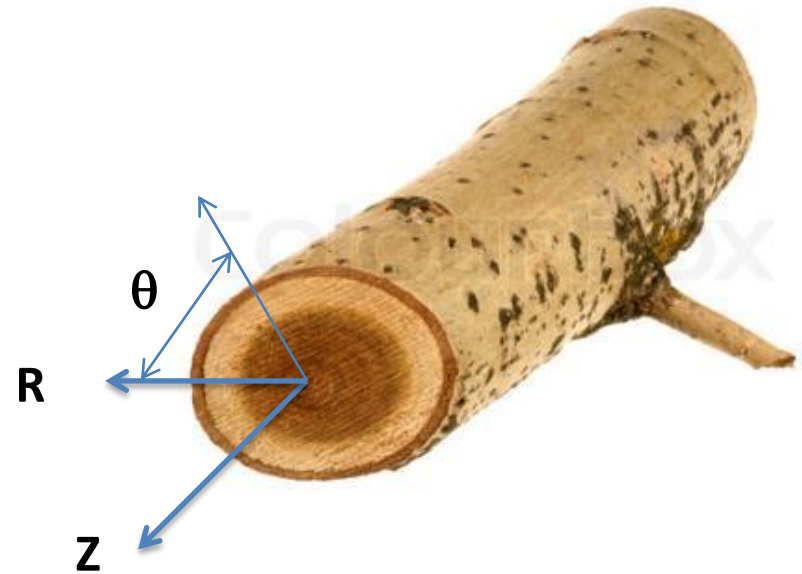
*Les évènements de l'histoire de l'arbre sont inscrits dans le xylème de ses axes
Chaque couche de bois correspond à une année du calendrier qui dit l'âge de l'arbre quand elle a été mise en place par le cambium (ontogénie)
Cette couche a répondu aux problèmes hydrauliques et mécaniques de l'arbre à cette date
Elle a duraminisé 10 à 20 ans plus tard et les molécules bioactives qui la protègent commencent à vieillir à partir de là
Le cœur du tronc est à la fois du bois juvénile et du vieux duramen*

Histoire du bois d'œuvre

*Débit – séchage - stockage - usinage des pièces – montage – usage - rebut
La durée d'usage du bois d'œuvre peut être plus longue que la durée de vie de l'arbre (bâtiments historiques, meubles, tableaux, violons ...)
Son vieillissement peut être de nature chimique, physique ou mécanique*

Structuration géométrique de la diversité au sein d'une portion d'axe ligneux

Un rondin est *structuré* selon les 3 axes de coordonnées cylindriques: **R**, θ et **L**



Structuration selon R



Succession

du noyau

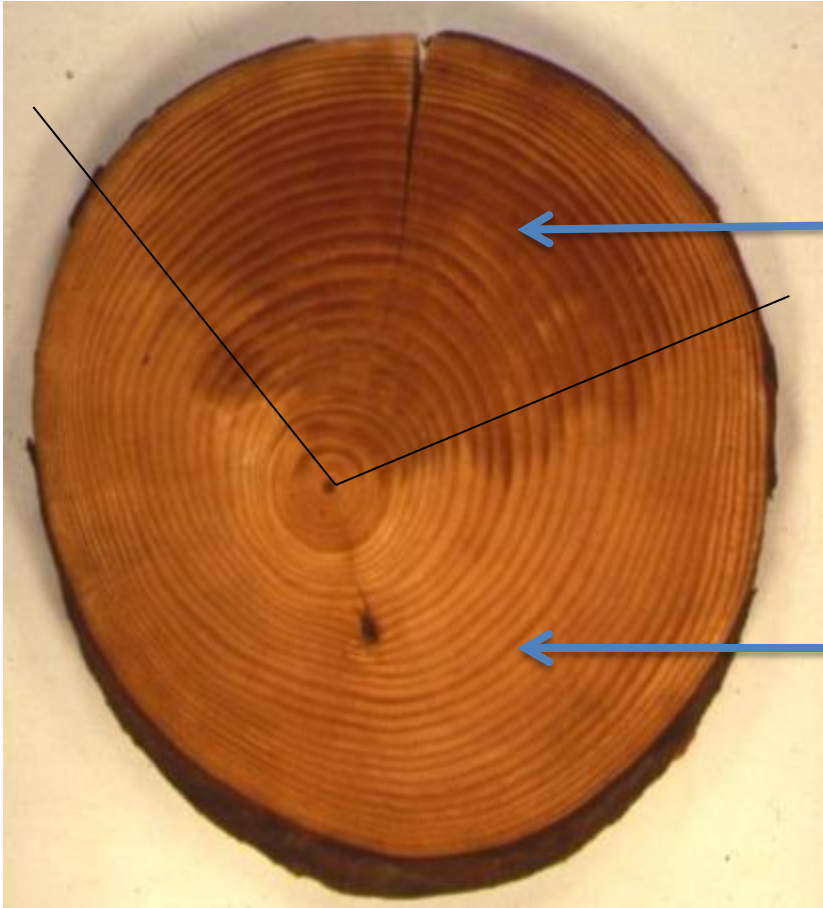
(à la fois bois juvénile et
vieux duramen)

du duramen externe

de l'aubier

de la moelle vers l'écorce

Structuration selon θ

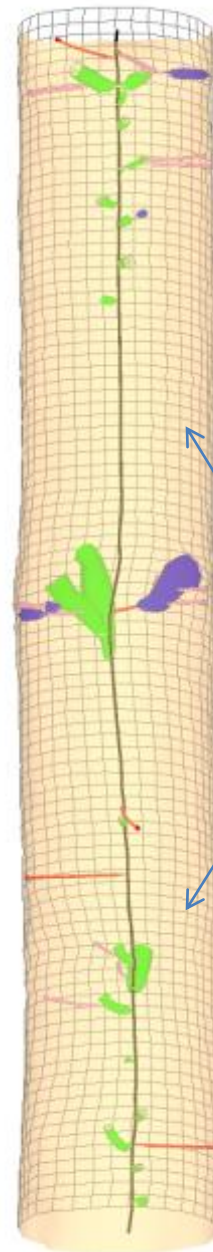


Succession du bois
de
compression

vers le bois
normal

Structuration selon L

Succession de
jonctions d'axes
constituant des
nœuds allant de la
moelle vers l'écorce



et
de portions
nettes de
jonctions
(clear wood)

La qualification d'une pièce de bois nette de nœuds et sans défauts

- L'espèce détermine un schéma probable de comportements
- Le pilotage pour adapter la couche de bois aux problèmes rencontrés lors de sa formation, se fait selon 3 grands axes:
 - *La porosité traduite par la densité*
 - *L'anisotropie (AMF) traduite par le module spécifique*
 - *La chimie de la matrice et des extractibles*
- Des moyens de mesure non destructifs adaptés à ces 3 axes
 - *Tomographie par rayons X permettant d'accéder aux profils de densité*
 - *Mesure vibratoire (fréquences) ou ultrasonore (vitesse du son) pour obtenir le module spécifique*
 - *Spectroscopie de surface (spectro-colorimétrie ou spectroscopie proche infra-rouge) pour quantifier la composition chimique*
- Bâtir des modèles dépendant de l'espèce permettant de prédire les propriétés technologiques de base à partir des indicateurs mesurés

La diversité des usages du bois d'œuvre
répond à la diversité du bois de l'arbre et aux
techniques de déconstruction de cet arbre

Usages de bois juste tronçonnés



Fourche en micocoulier



Sculpture dans les monts d'Arrée



Fronde



Poteaux bois



Piquets



Porte
manteau

Bois rond pour la construction en Guyane



Usages du bois de fente



Fente



Ganivelles



Gaulettes de Saül



Bardeaux de toiture



Tonneau en chêne



Panier en frêne

Usages des sciages de bois pour la construction et le génie civil



Usages du bois pour le transport et l'emballage



Usages du bois pour la culture



Conclusion

- Le bois vivant construit l'arbre sur un schéma prédéfini, en s'adaptant aux aléas de l'histoire
- Pour obtenir du bois d'œuvre, il faut d'abord déconstruire l'arbre: le débiter en profilés et les sécher
- La variabilité des bois est le résultat d'une double diversité: génétique et historique (vie de l'arbre et durée d'usage du bois d'œuvre)
- Le mariage de la diversité des bois, des techniques de débit et de construction d'objets donne la diversité de leurs usages

Merci de votre attention

