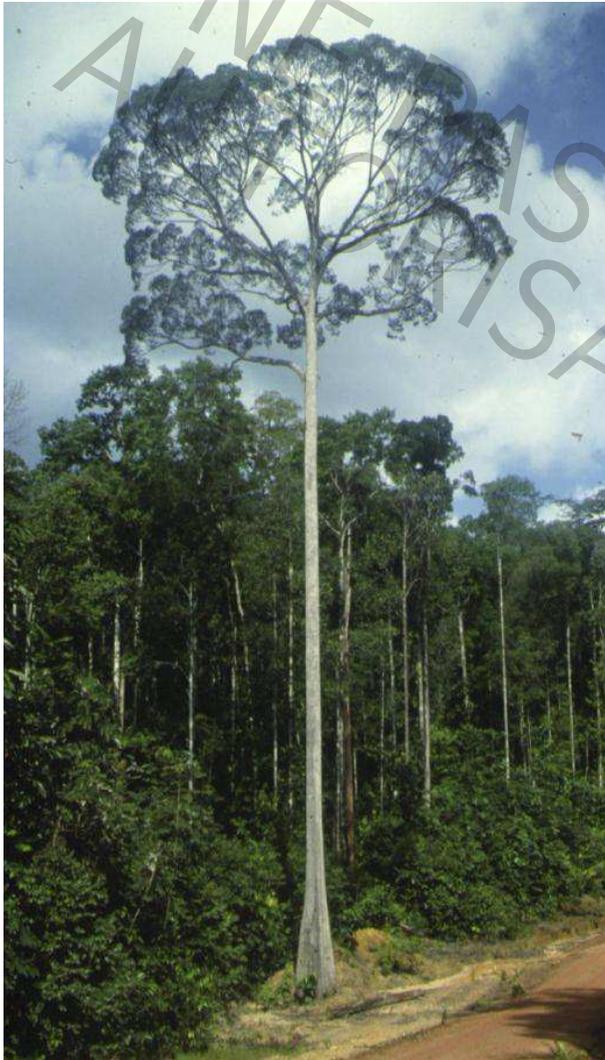


MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS "De l'extraction au recyclage, conséquences sur les propriétés effectives", AUSSOIS, du 20 au 24 janv. 2014



Construction de l'arbre



Déconstruction



Éléments bois

**CONSTRUCTION ET DÉCONSTRUCTION DE
L'ARBRE : VARIABILITÉ ET CASCADE D'USAGES DU
BOIS.**

Du bois de l'arbre au bois d'œuvre

(de la biomécanique à la mécanique)



Le bois de l'arbre: composant biologique, bâtisseur d'une structure vivante

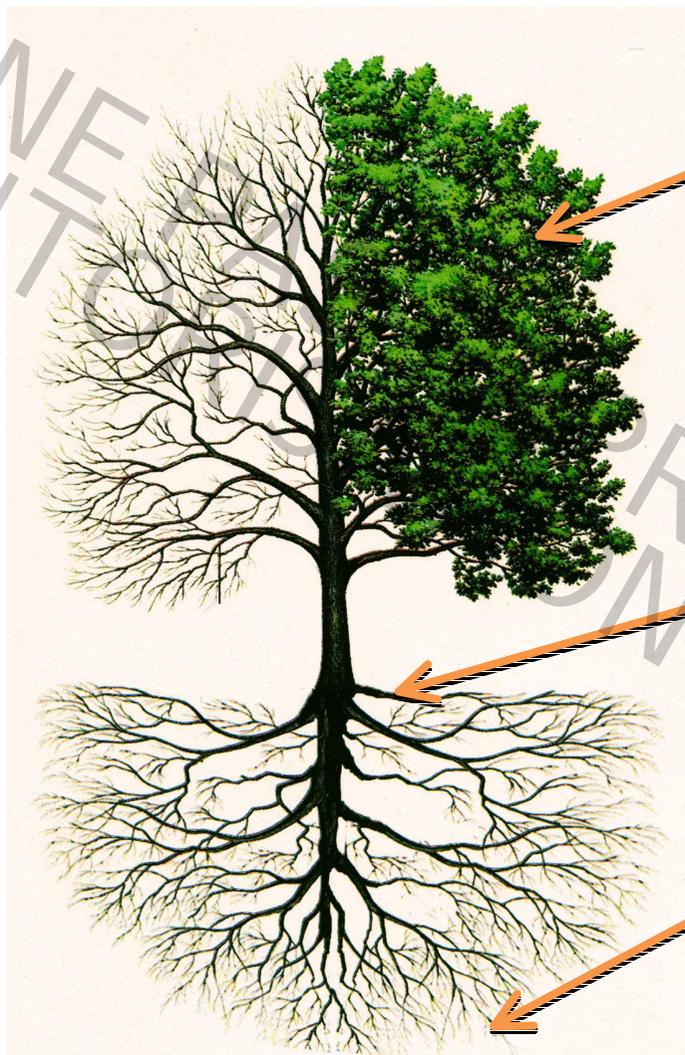
3 milliards de tonnes sur pied, 100 millions de tonnes par an de bois produits par la forêt française



Le bois d'œuvre: matériau d'ingénierie cellulaire, composite à fibre nano-structuré, dopé par des molécules bio-actives.

300 millions de tonnes par an (500 millions de m³) de profilés bois produits dans le monde

Le bois de l'arbre: géométrie et croissance



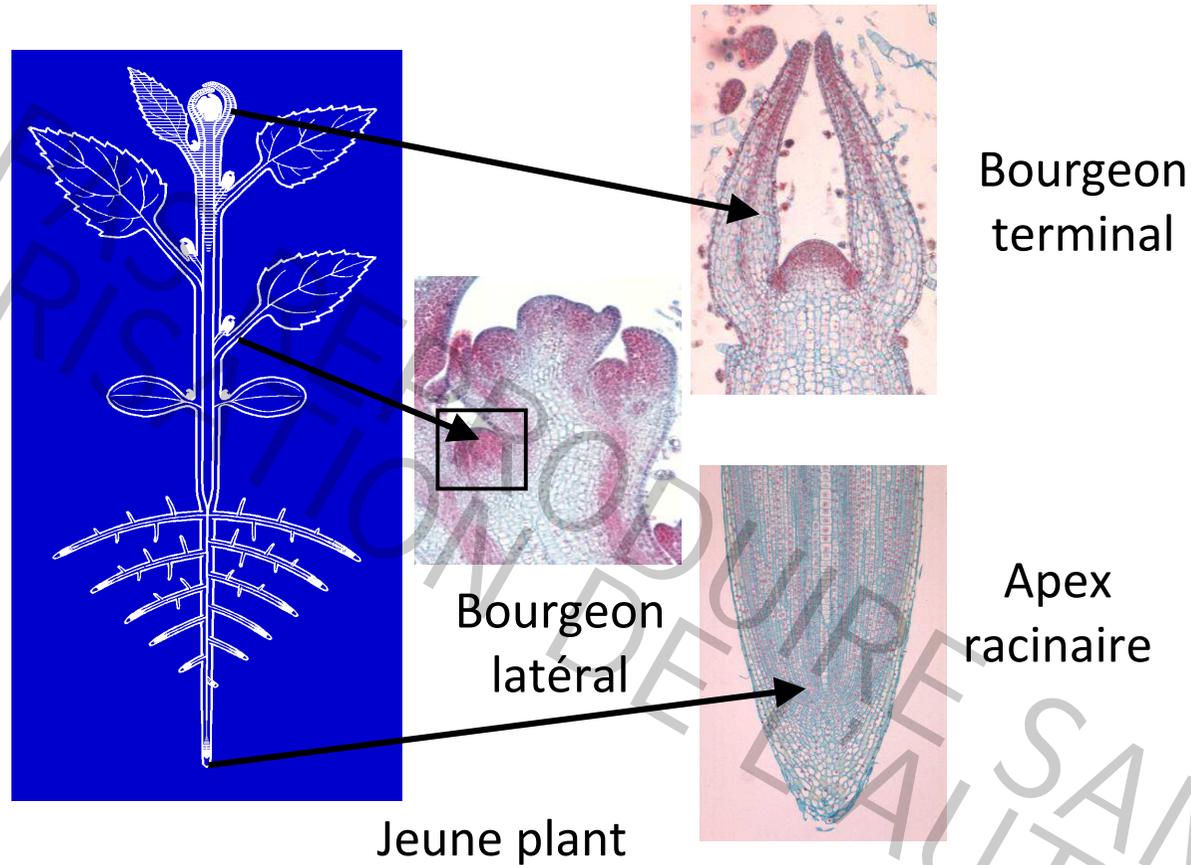
Les feuilles produisent la biomasse à partir de l'eau, du CO_2 et de l'énergie solaire

Le compartiment bois est la structure qui connecte les feuilles et les racinelles

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

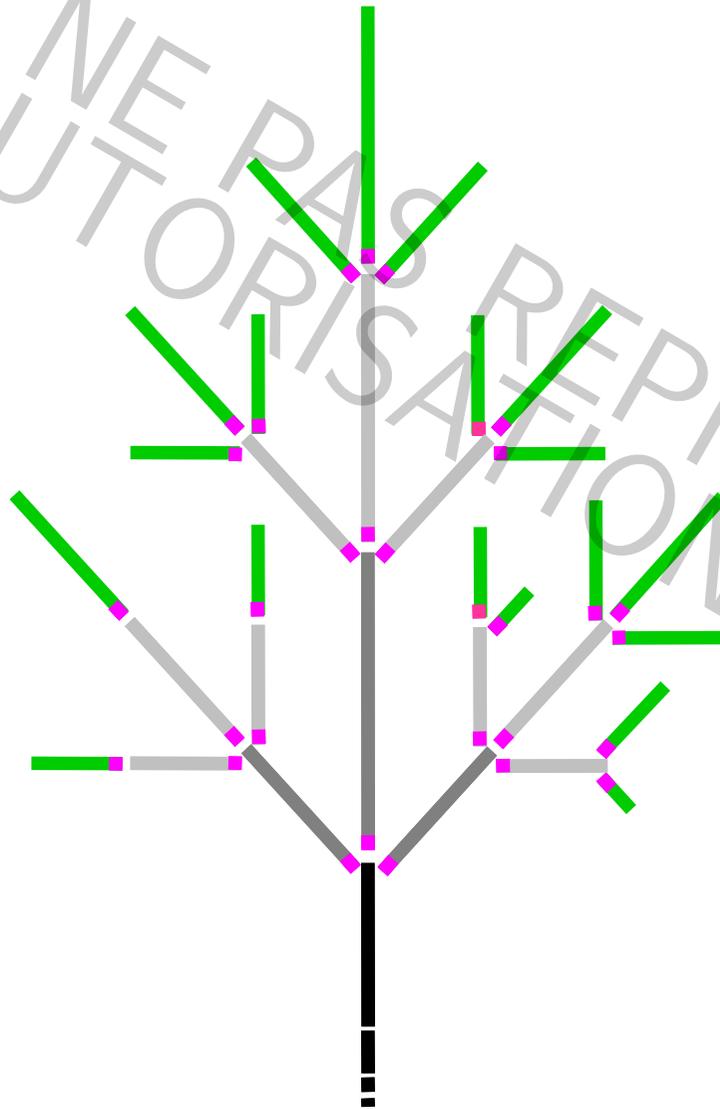
Le bois de l'arbre c'est tout ce qu'il y a entre le chevelu racinaire et le feuillage. C'est un ensemble ramifié de poutres très élancées semi-encastées. Il comporte des ensembles de cellules souches: les méristèmes.

La croissance primaire



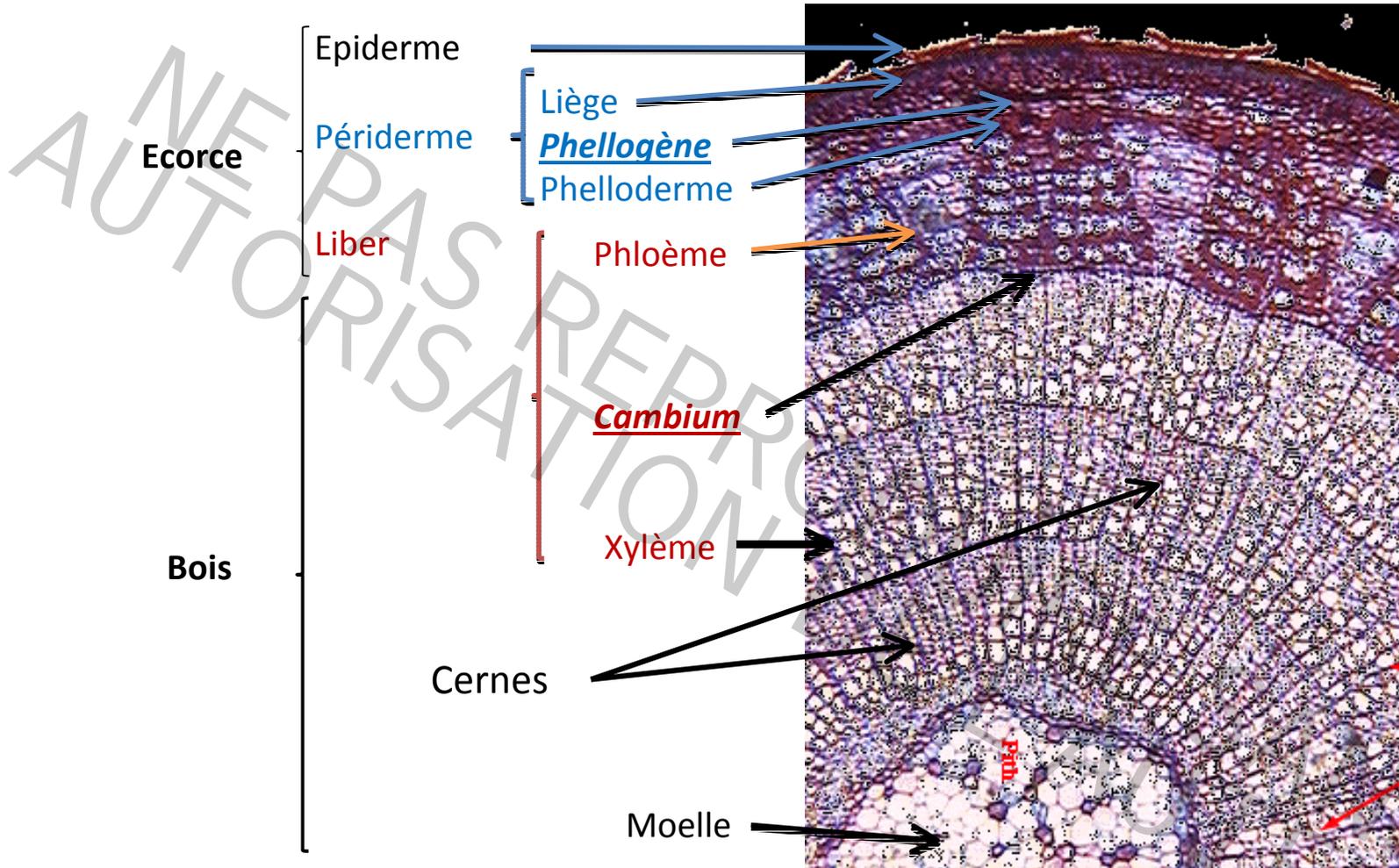
Les bourgeons sont les méristèmes primaires, leurs divisions cellulaires permettent la création de nouveaux rameaux et l'élongation des axes existants

Les unités de croissance



-  Année 4
-  Année 3
-  Année 2
-  Année 1
-  Bourgeon

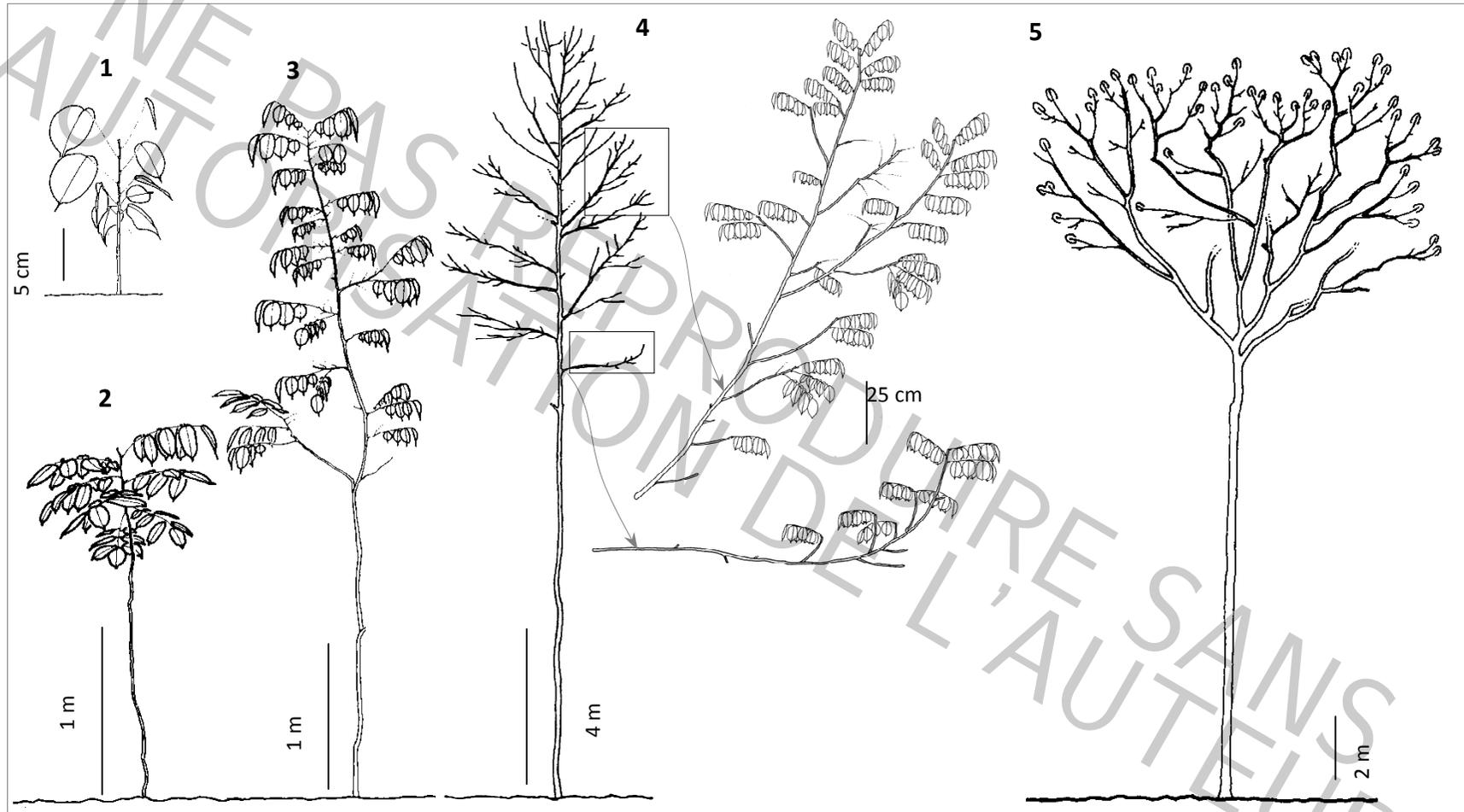
La croissance secondaire



***Le cambium et le phellogène 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***

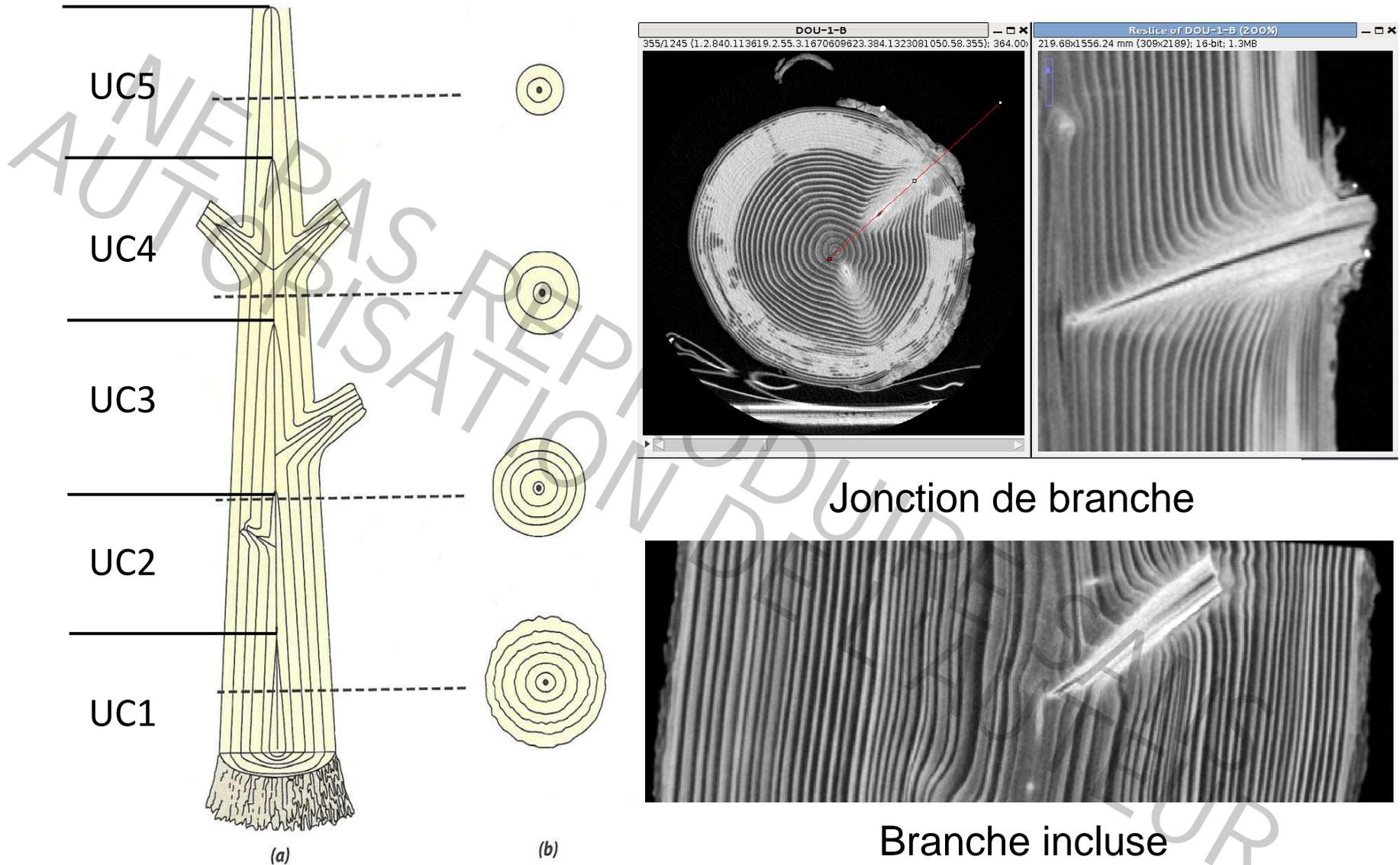
Le phellogène produit le périderme qui protège le bois de l'arbre par l'extérieur

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



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

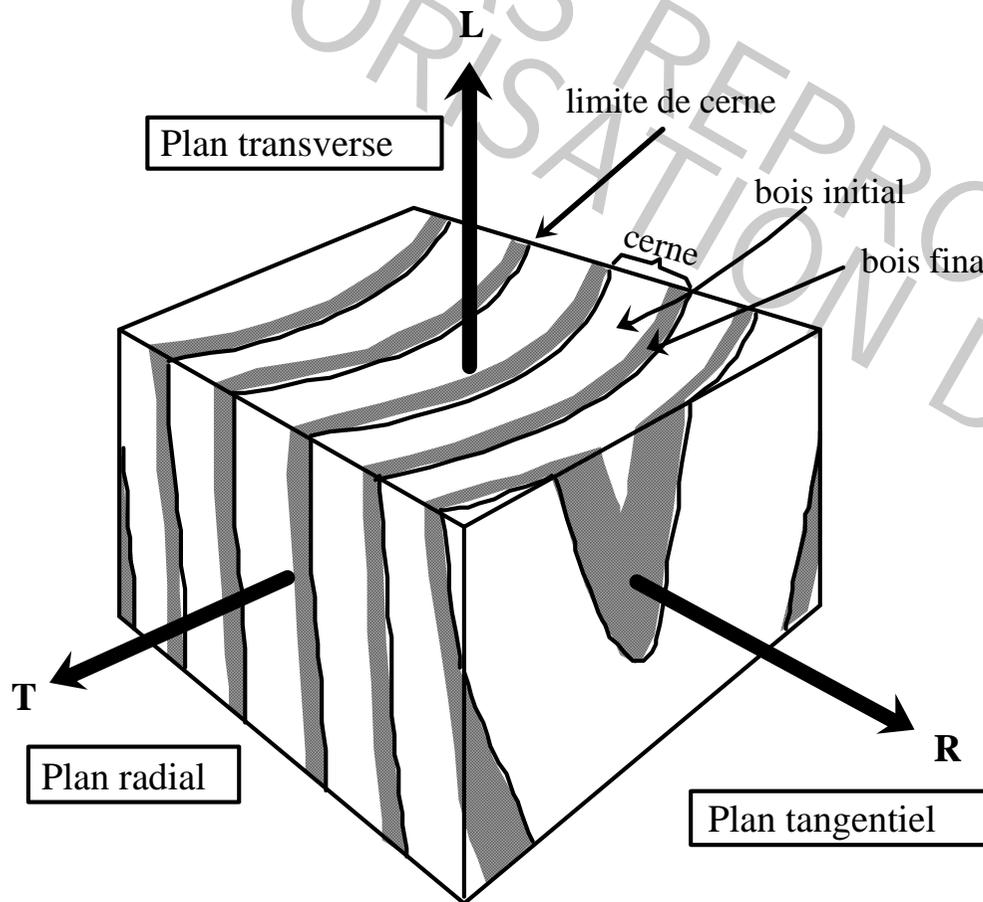
Géométrie interne: empilement 3D des cernes



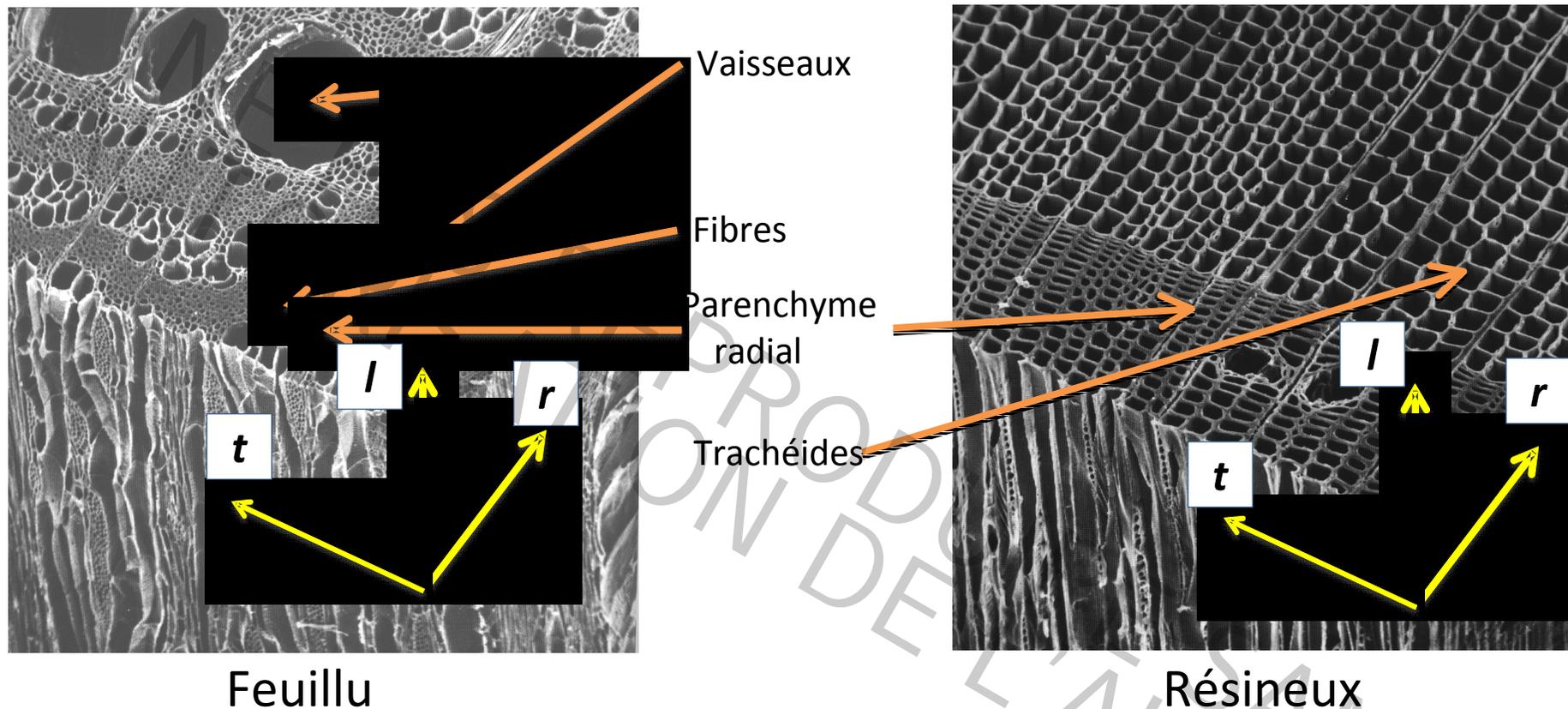
Une connexion cylindre/cylindre très résistante.
Un moyen de lire l'histoire dans le bois de l'arbre

Premier niveau d'anisotropie du bois

3 axes de référence: Longitudinal,
Radial et Tangentiel



Anatomie du xylème: un matériau cellulaire



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

La direction des fibres ou trachéides définit un nouveau repère d'anisotropie lrt dont la direction l fait avec la direction L de l'axe un **angle de fil** nul ou faible

Circulation des fluides dans le bois

Perforation

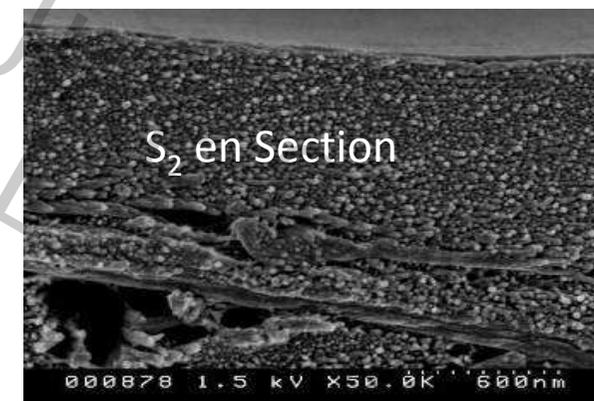
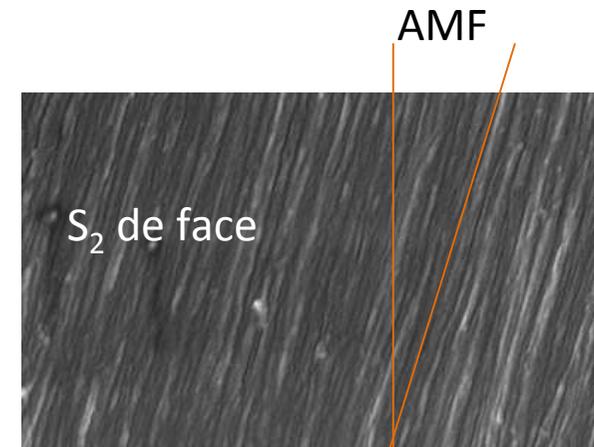
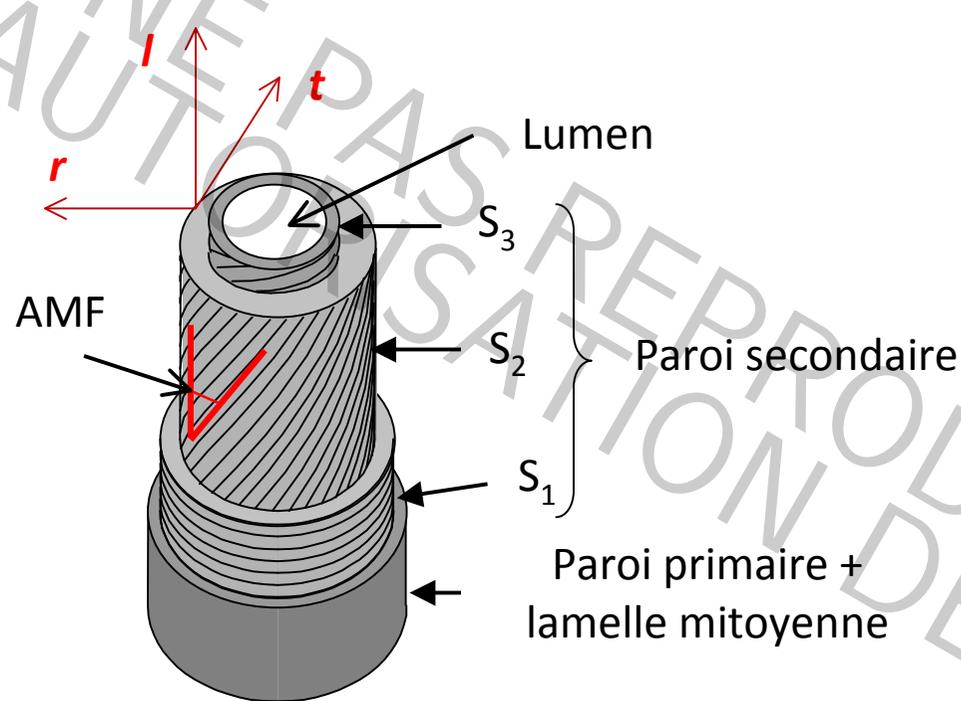


Ponctuation



Le plan ligneux, propre à l'espèce, est le schéma d'organisation 3D des cellules et de leurs communications. Il est piloté par le génome

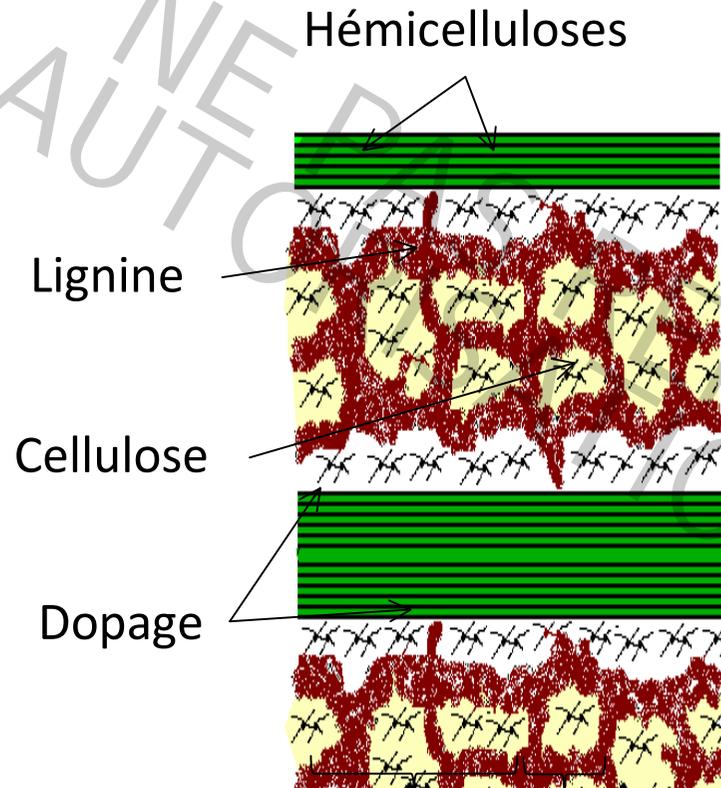
Ultrastructure de la paroi d'une fibre: un composite à fibre multicouche



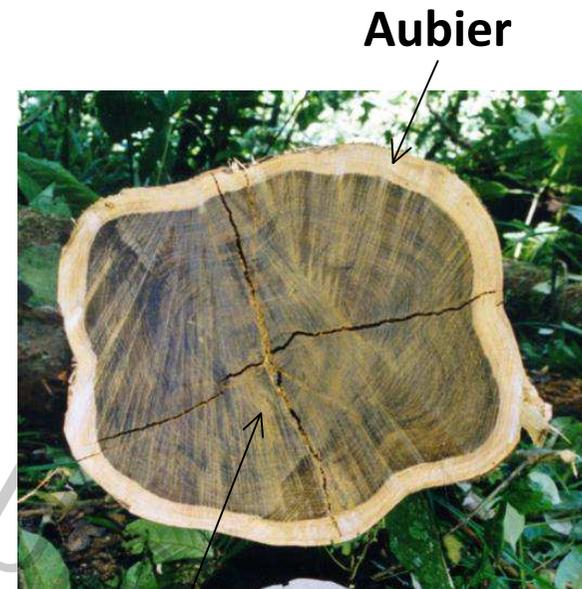
Organisation de la paroi de la fibre *La couche S₂ est la plus épaisse*

L'angle des nano fibres de cellulose de la couche S₂ avec la direction *l* de la fibre, appelé angle des micro fibrilles (AMF), caractérise un deuxième niveau d'anisotropie du xylème

Chimie de la paroi d'une fibre



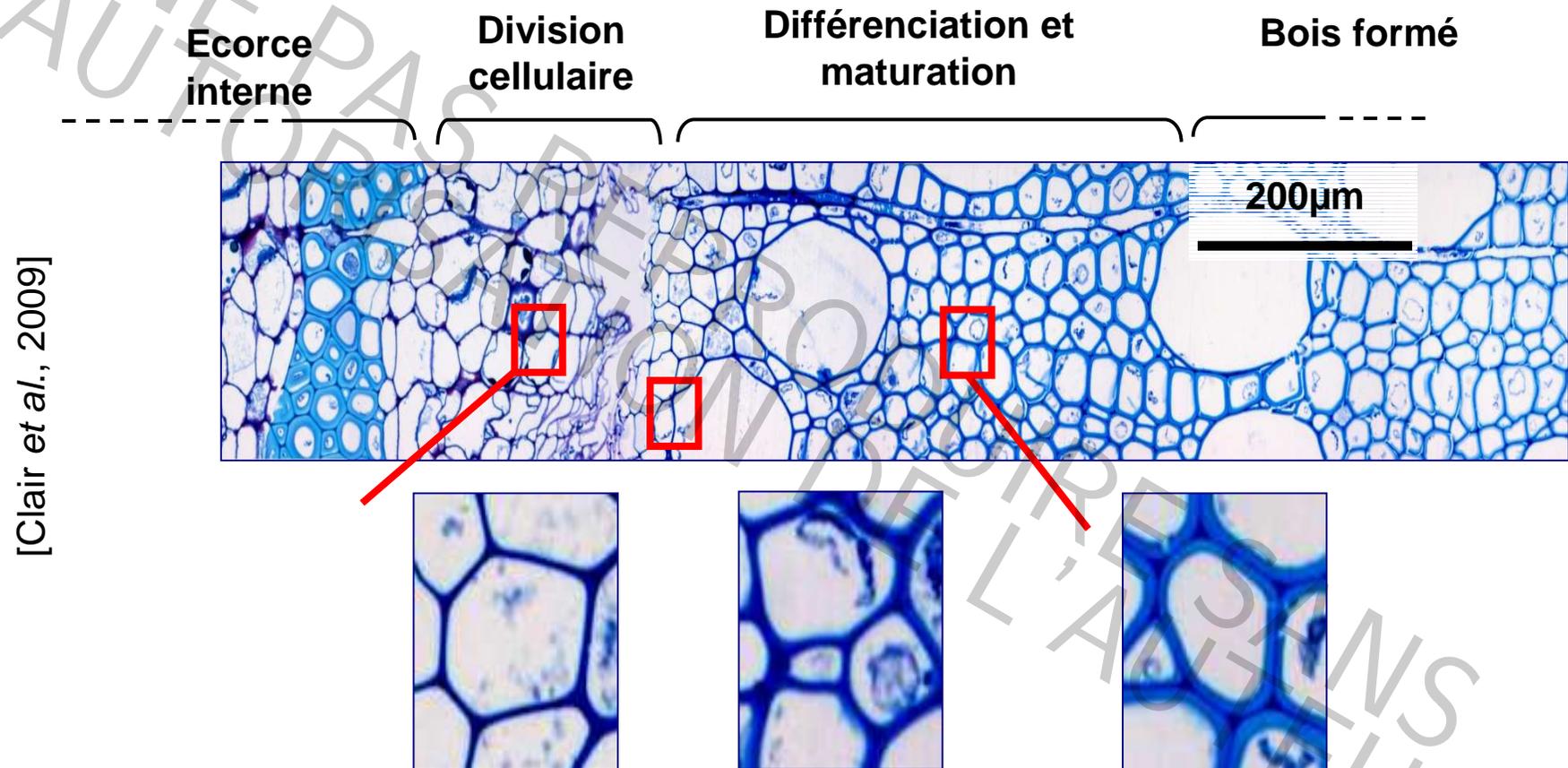
Matrice Fibre
Volume élémentaire de
la paroi d'une fibre



Bois de cœur
*Les petites molécules incrustées dans
la paroi, lors de la duraminisation,
dopent le bois de cœur et protègent
l'arbre par l'intérieur*

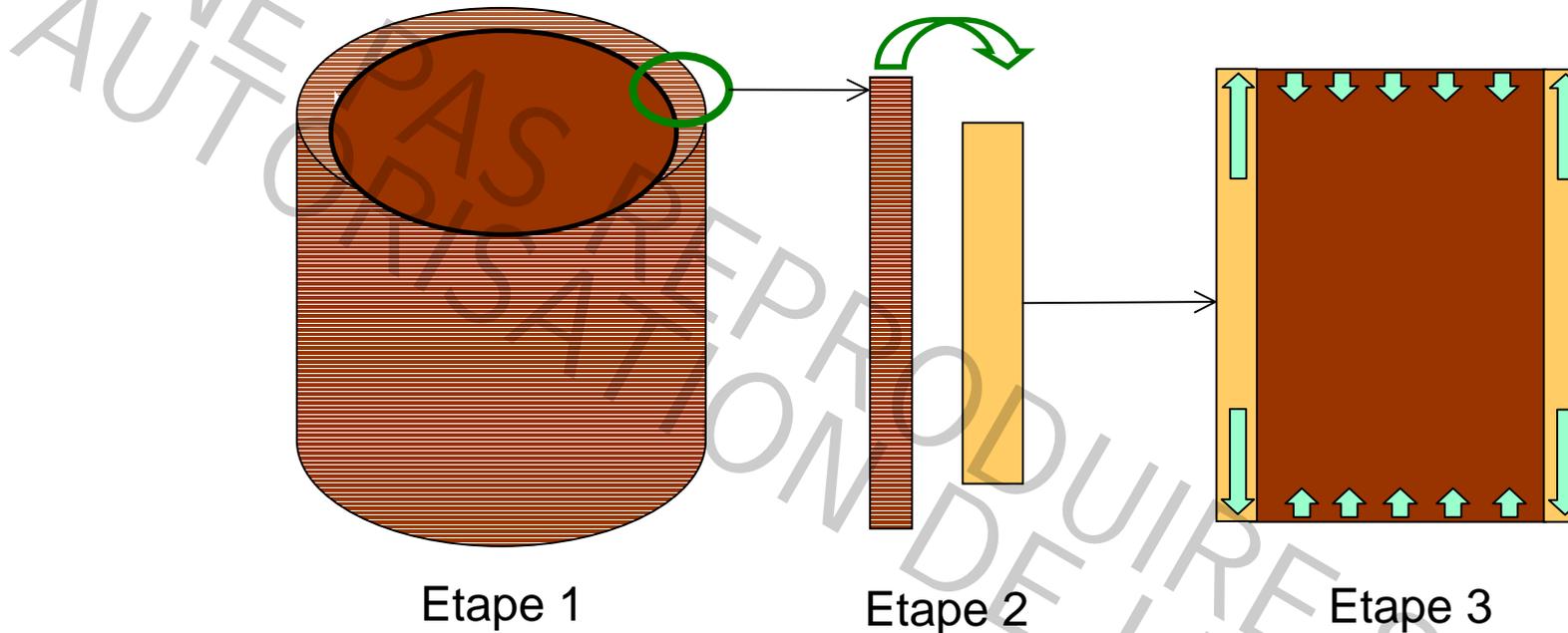
La signature chimique, ensemble des molécules bioactives du bois,
est propre à l'espèce.

Durant la maturation de la fibre sa paroi devient épaisse et très rigide



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

La maturation des fibres génère des forces dans une tige de bois (*cas standard pour toutes les espèces*)



Etape 1: Création d'une nouvelle couche de bois très molle (division cellulaire)
Etape 2: Cette couche se rigidifie et tend à se rétracter axialement
Etape 3: La déformation, bloquée par l'adhésion sur le bois ancien rigide, génère des forces de traction dans la couche rigidifiée qui sont compensées par une petite compression dans le bois ancien.

Régulation de la construction de l'arbre par la croissance du bois



Une solution primaire ...



et une solution combinée
primaire + secondaire en
réponse à un accident



Jouer sur les inerties et
les bras de levier par la
croissance en
épaisseur



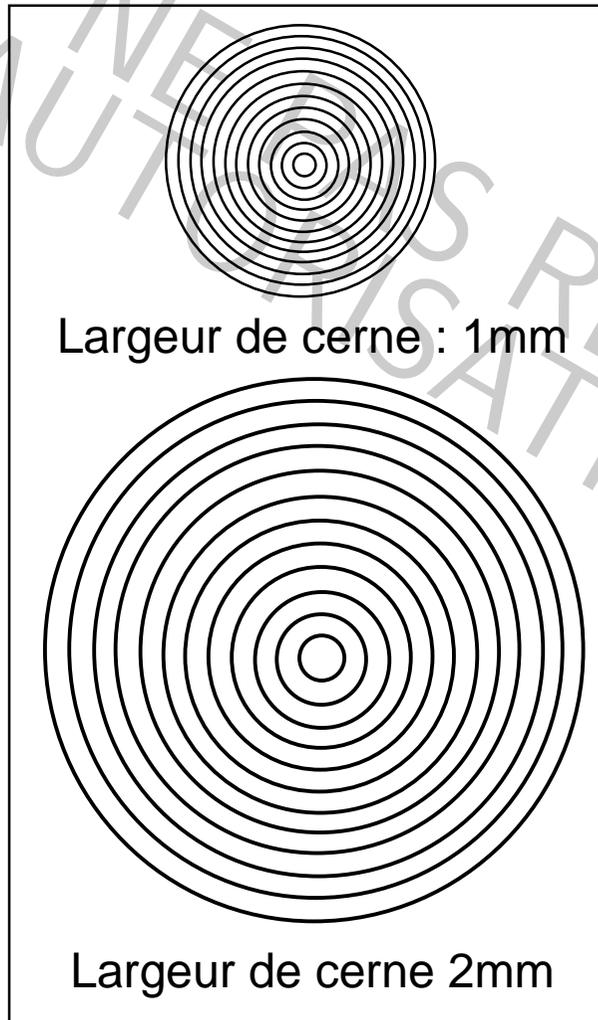
Les processus de régulation

- Seule la croissance du bois permet de moduler la construction et de réagir aux aléas
- Cette croissance se fait toujours dans un schéma spécifique fixé génétiquement (modèle architectural, plan ligneux, signature chimique)
- Chaque évènement de croissance (allongement, ramification, division cambiale, maturation cellulaire, duraminisation) peut être modulé en tout point du compartiment bois où se trouvent des cellules souches.
- Les modulations quantitatives dans un évènement de croissance permettent de moduler la géométrie de l'arbre et de ses axes, la structure et les propriétés mécaniques du xylème, la création de forces internes.

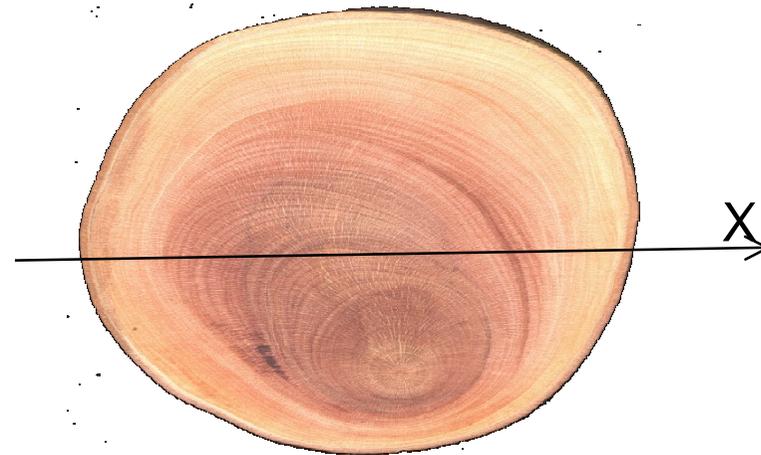
Réguler le moment fléchissant du au poids propre par la croissance primaire



Réguler l'inertie par la croissance secondaire



Moment d'inertie est 8 fois plus grand en croissance rapide

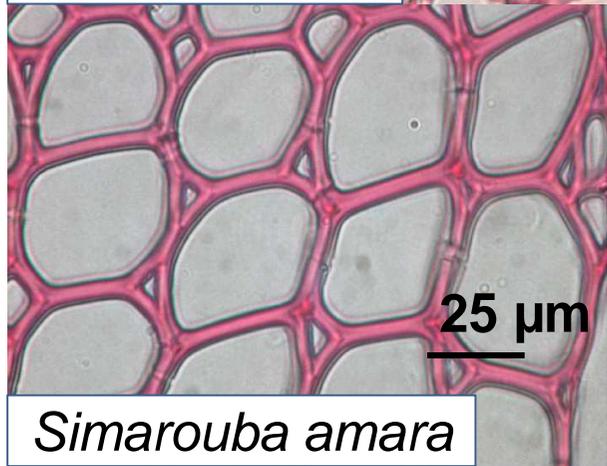
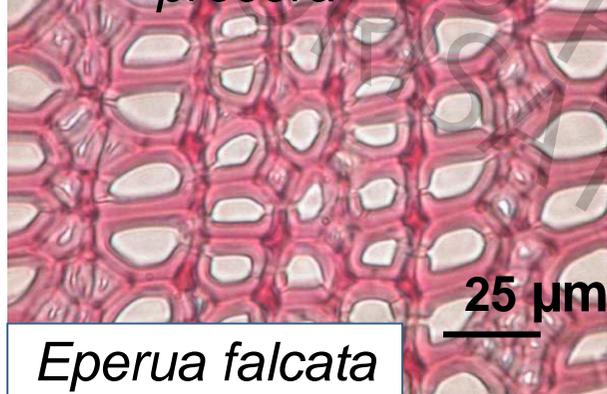
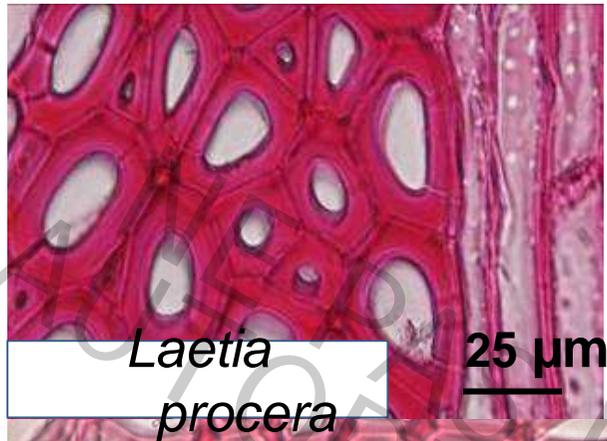


Inertie 2 fois plus grande en X



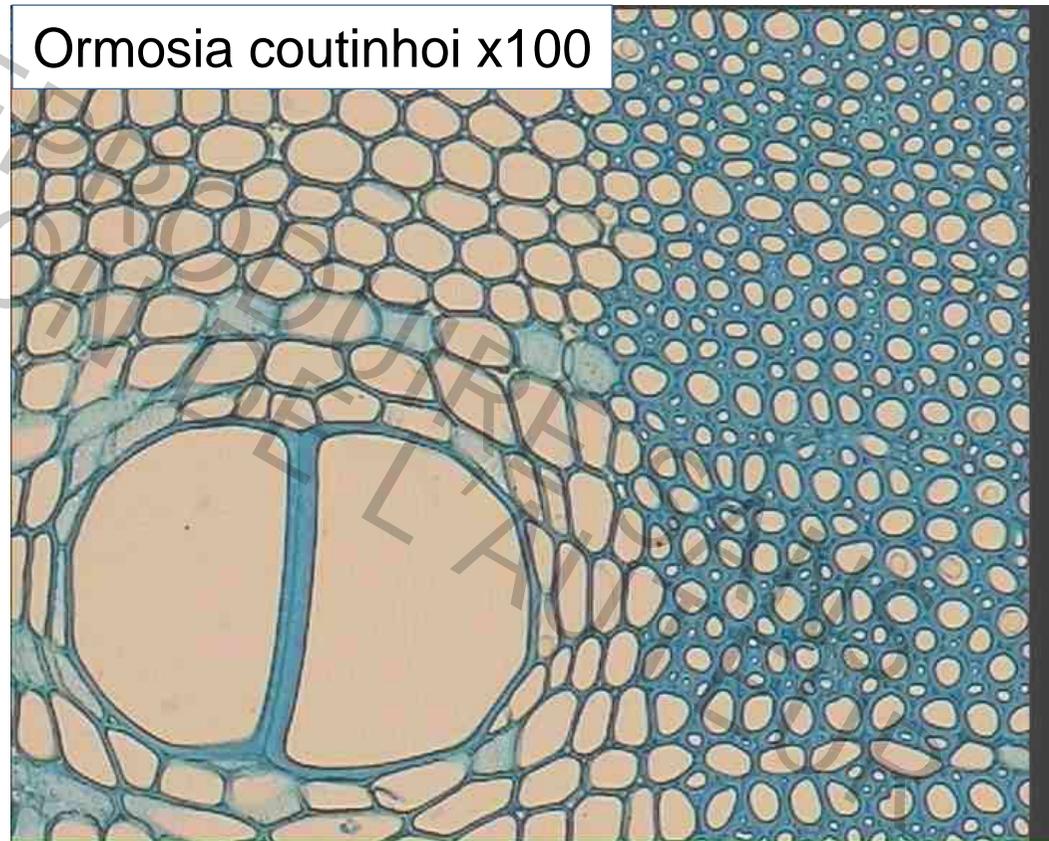
Une autre façon d'augmenter l'inertie à volume constant

Réguler la densité du xylème par l'épaisseur des parois des fibres



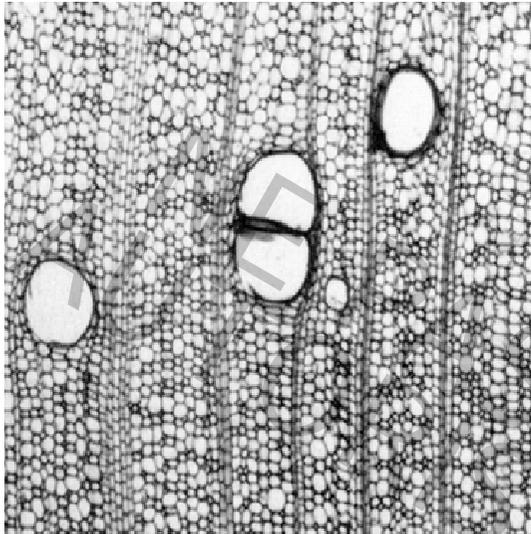
Entre espèces

Ormosia coutinhoi x100

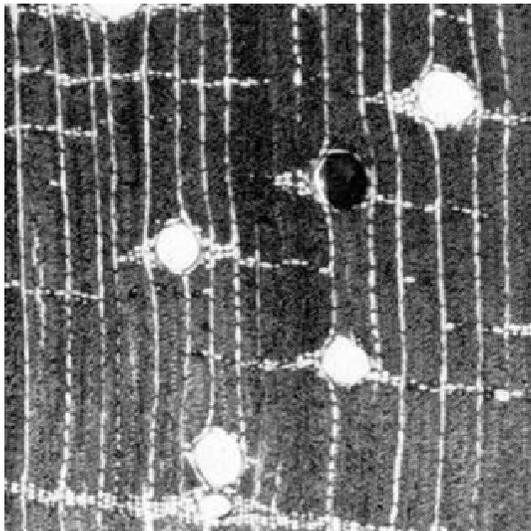


A l'intérieur d'un arbre

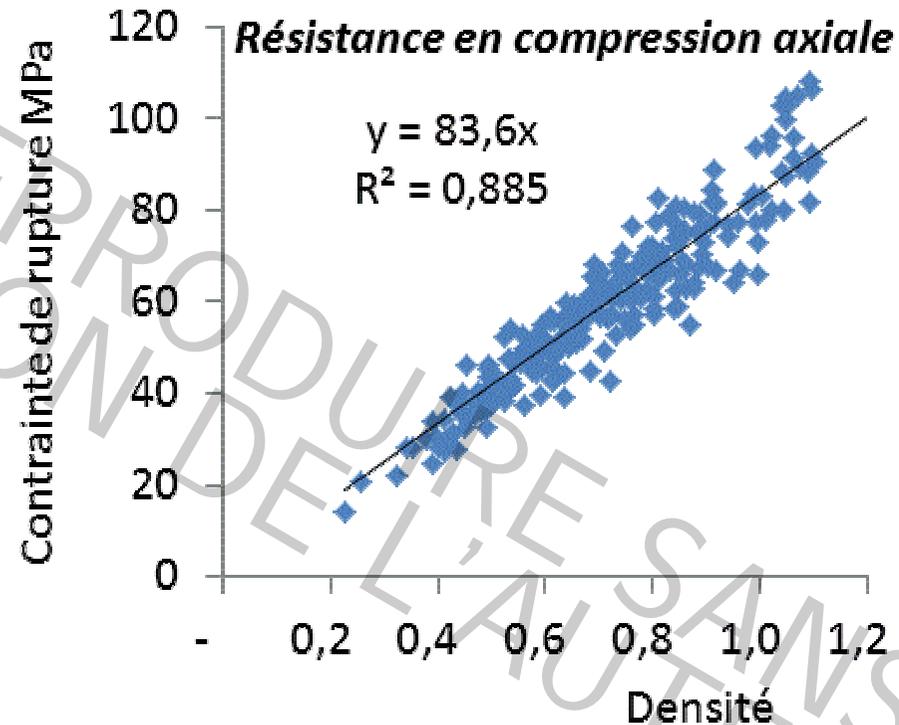
La densité est la première clé des propriétés mécaniques du xylème



**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.
La dureté de flanc varie comme le carré de la densité.**

Réduire le risque d'éclatement par des variations de l'angle de fil



Contrefil



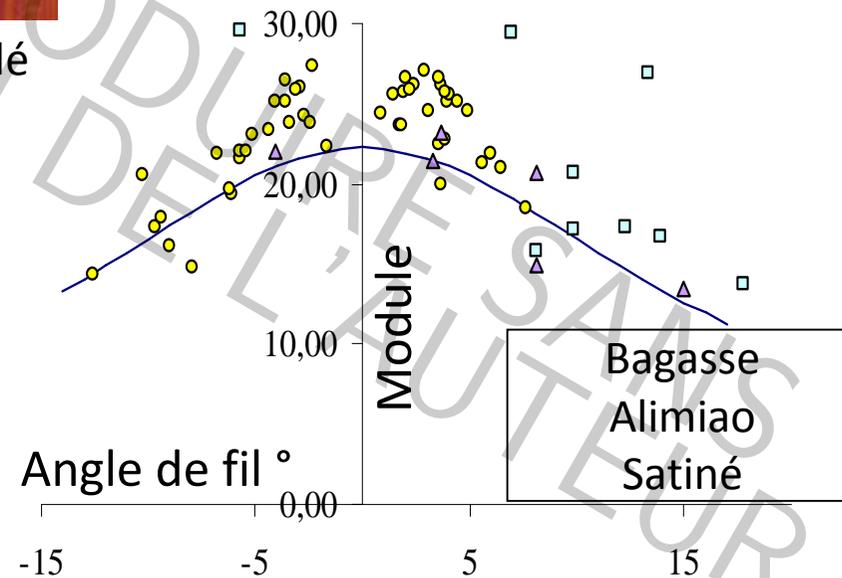
Padouk contrefilé



Contournement d'un nœud

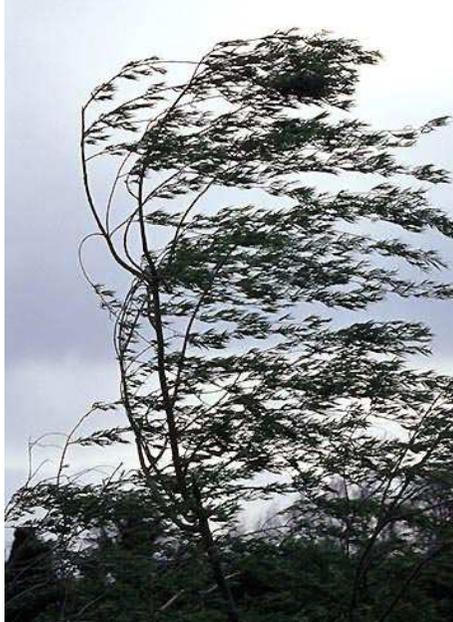
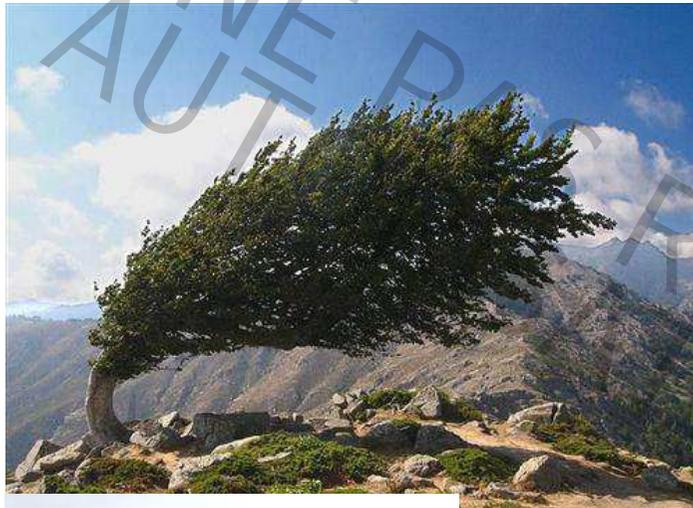


Fil tors

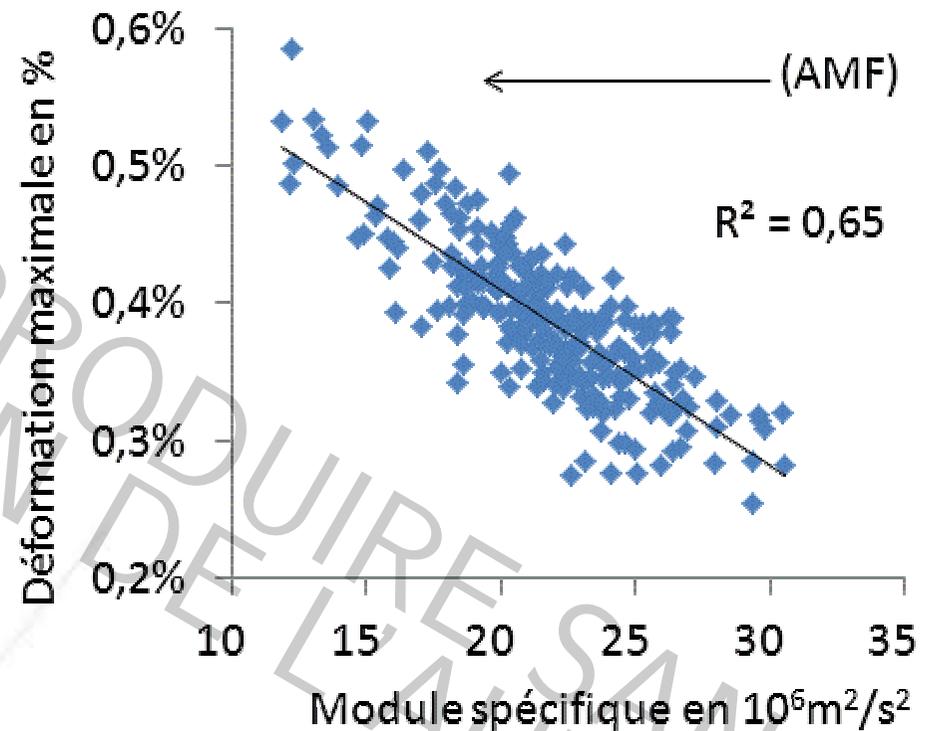


Les variations d'angle de fil réduisent le module macroscopique de l'axe ligneux

Réguler la flexibilité par l'orientation des nano-fibres de cellulose cristalline

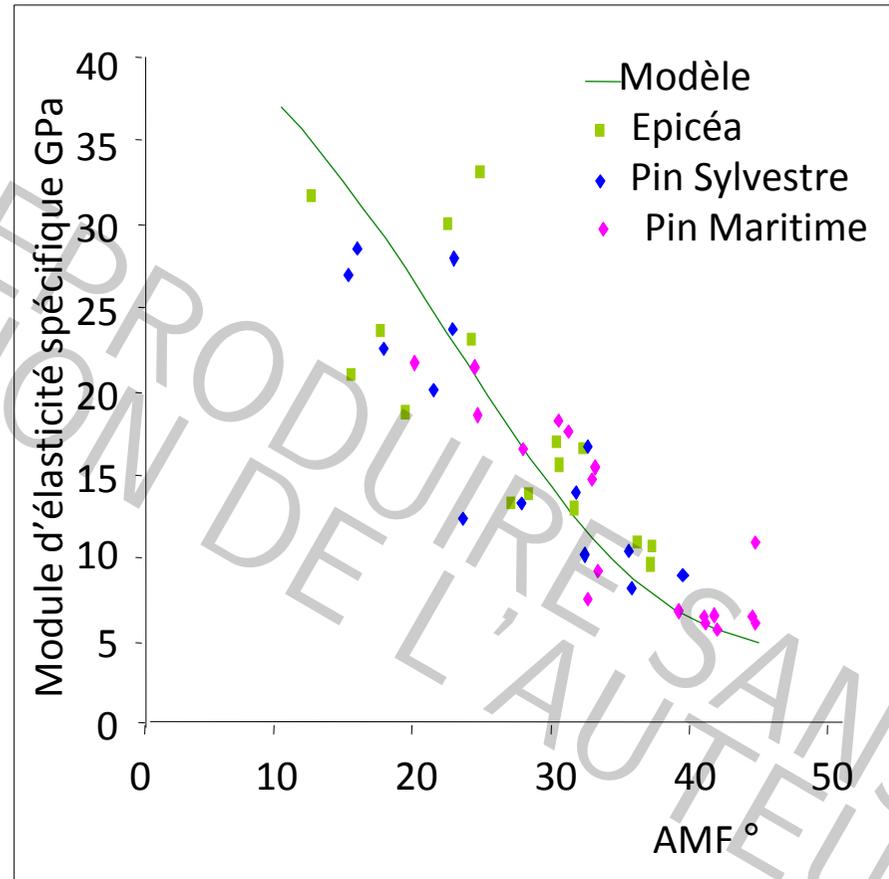
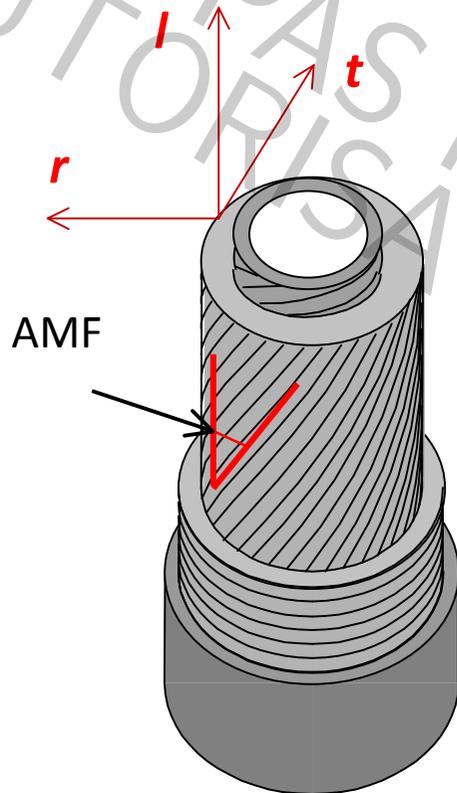


© Can Stock Photo - csp6094394



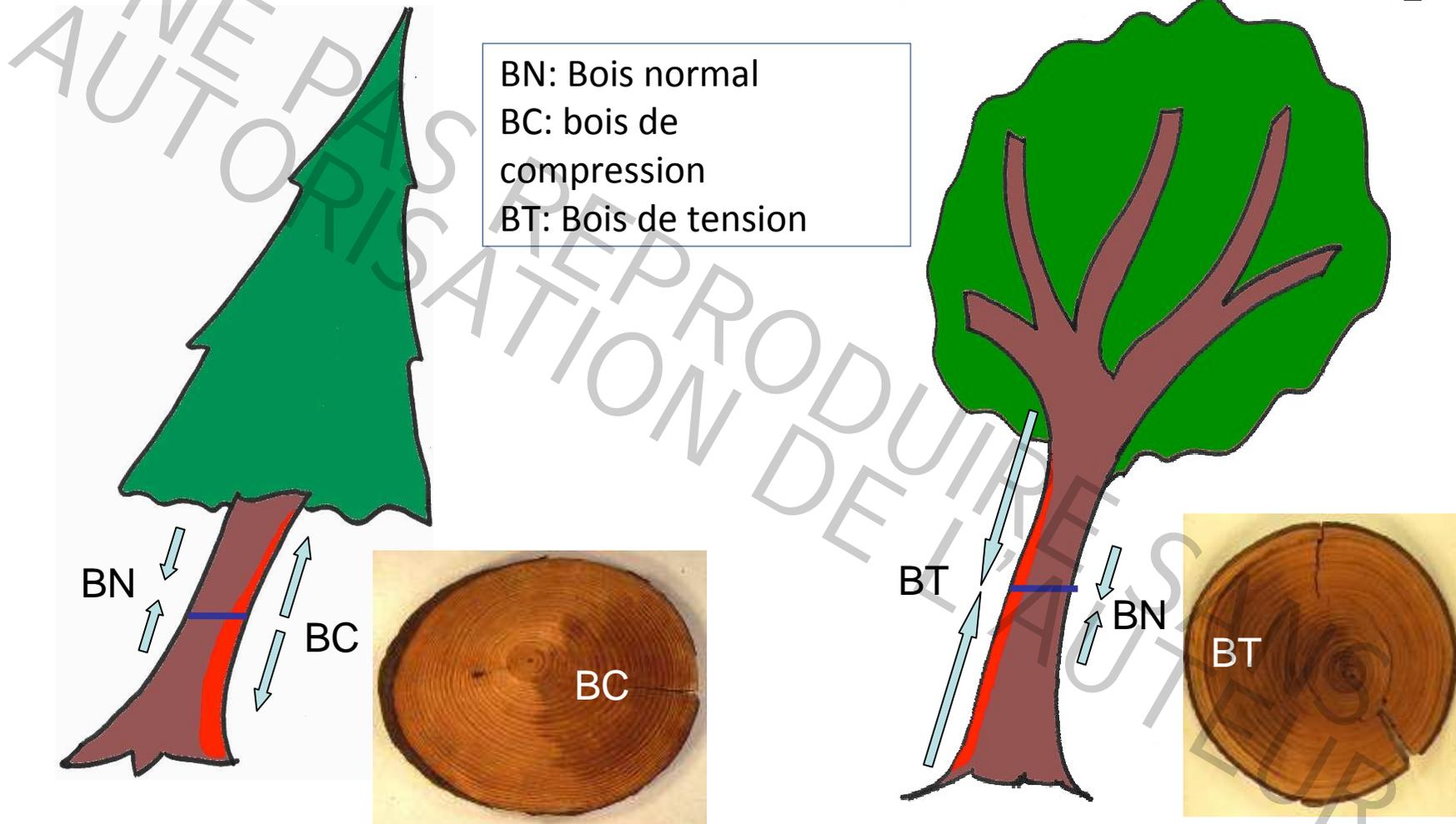
En augmentant l'AMF de 10° à 30° , on divise par 2 le module et on multiplie par 2 la déformation maximale; la flexibilité des axes ligneux est très fortement augmentée

L'angle des nano-fibres de cellulose est la deuxième clé des propriétés mécaniques du xylème



Le module spécifique: (Module d'élasticité longitudinal dans la direction du fil) / (Densité du xylème) est un bon indicateur du 2^{ème} niveau d'anisotropie

Réguler le moment fléchissant créé par le xylème par la chimie et l'organisation de la couche S_2

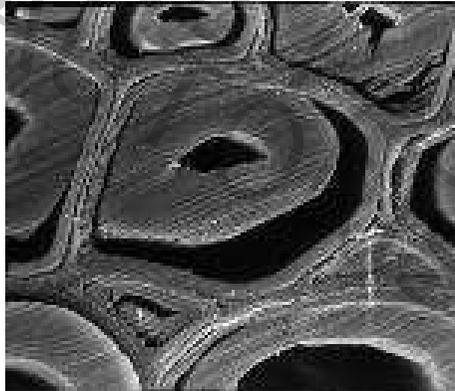


Le bois de compression des résineux crée des forces de compression

Le bois de tension des feuillus crée des forces de tension

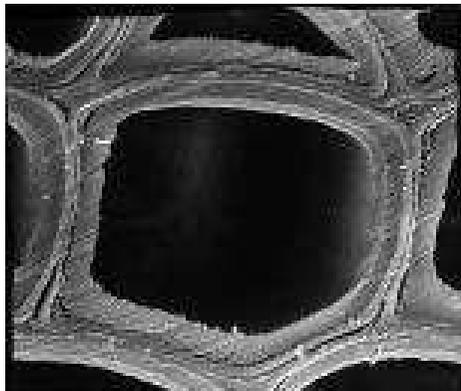
Bois de tension (feuillus) et bois de compression (résineux) des moteurs pour les cas extrêmes

Feuillu



Traction de 5 tonnes par cm^2 de bois

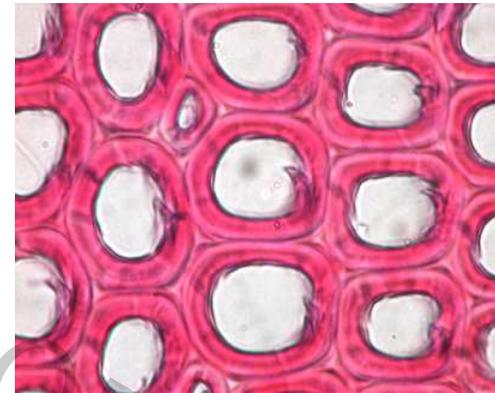
Bois de tension



Traction de 1 tonne par cm^2 de bois

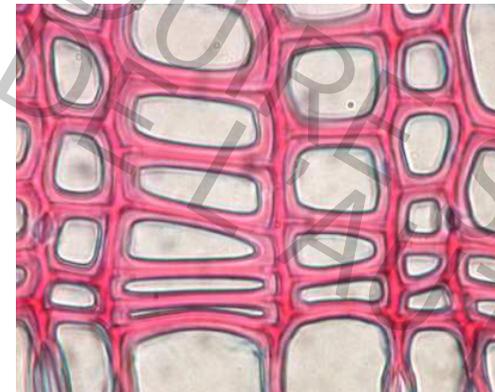
Bois normal

Résineux



Compression de 1 tonne par cm^2 de bois

Bois de compression



Traction de 1 tonne par cm^2 de bois

Bois normal

Dans les bois de réaction une modification de la chimie des macromolécules conduit à changement radical de mise en précontrainte de la couche de bois.

Cela permet aux arbres de se redresser après la tempête
et aux grosses branches de rester très inclinées



Bois canon à Kourou



Acajou à Cayenne

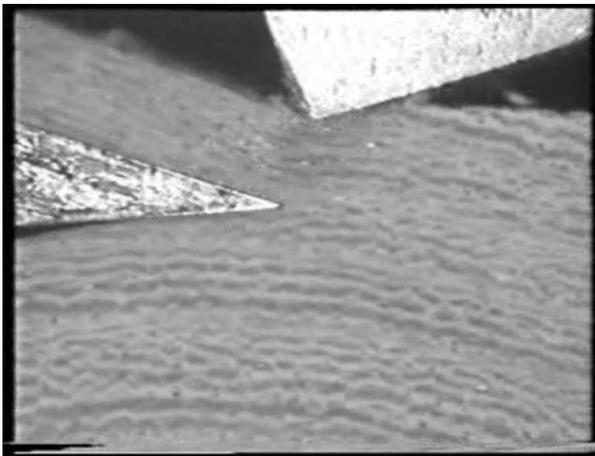
Première conclusion

- L'arbre est une structure complexe construite par la croissance du bois, compartiment vivant majeur des arbres
- Cette croissance résout aussi les problèmes mécaniques résultant des aléas de l'histoire
- La modulation de croissance en ramification, longueur et diamètre est possible en toute position des cellules souches existantes
- Les solutions mécaniques globales se révèlent toujours très pertinentes, c'est de la très bonne construction, quelle que soit l'espèce
- La réponse se fait toujours dans un schéma propre à l'espèce

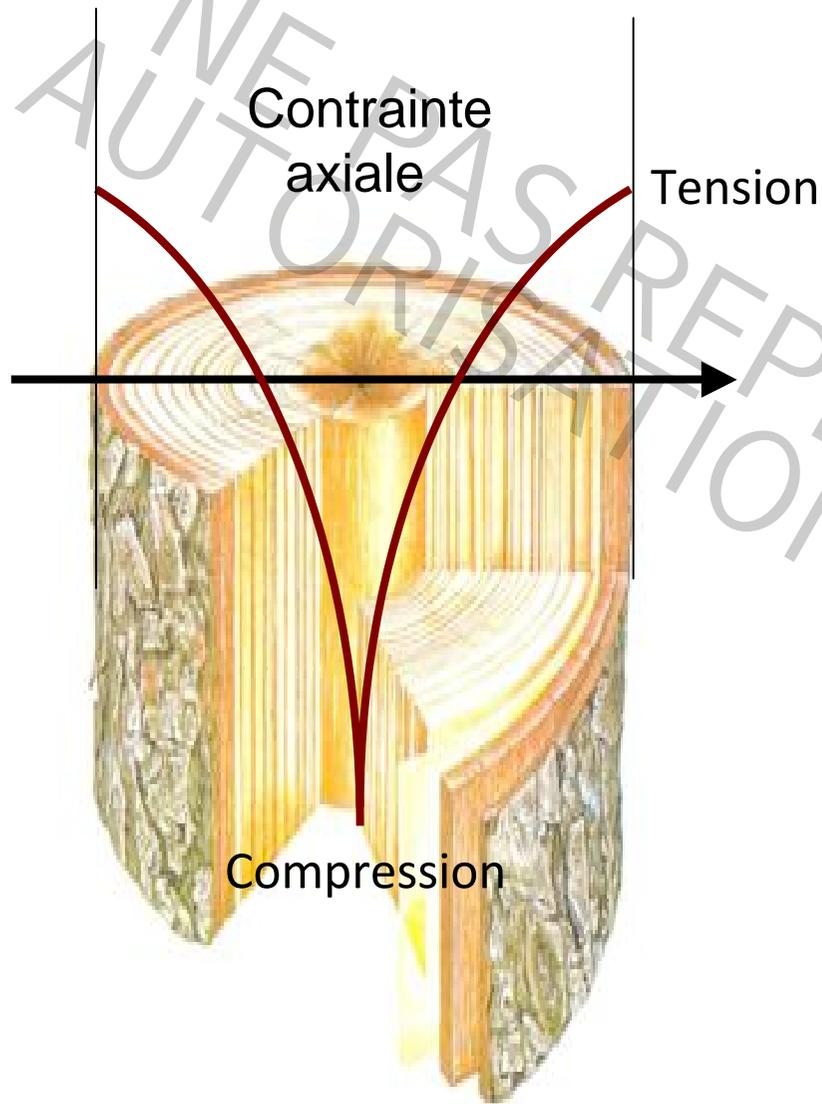
La déconstruction de l'arbre

- Avant toute chose il est bon de connaître l'état mécanique de la structure à déconstruire (risque d'éclatement)
- 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



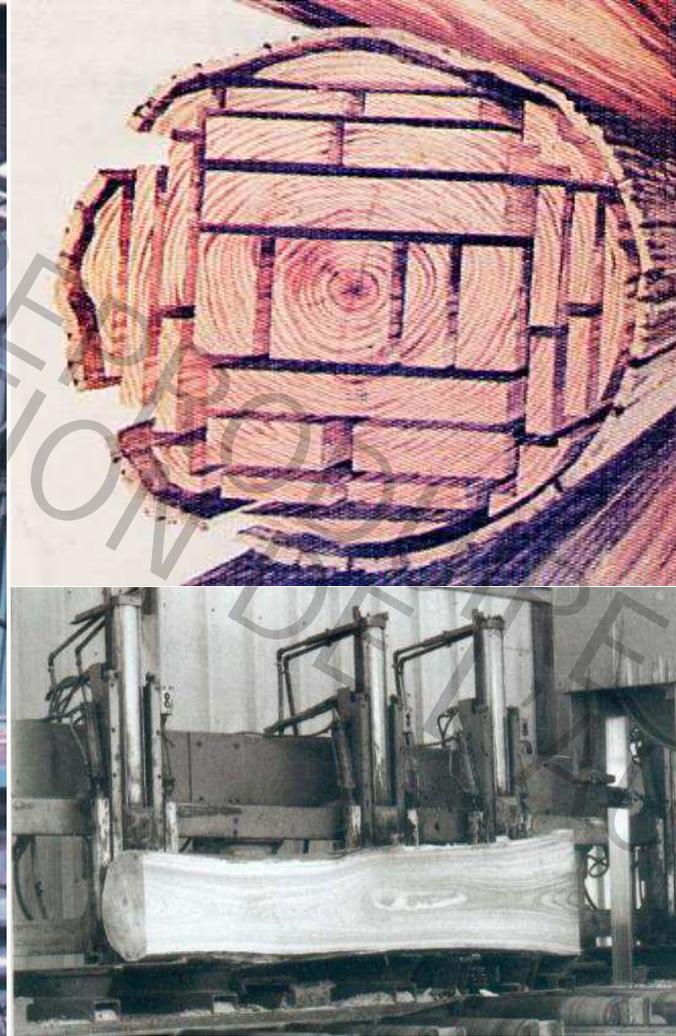
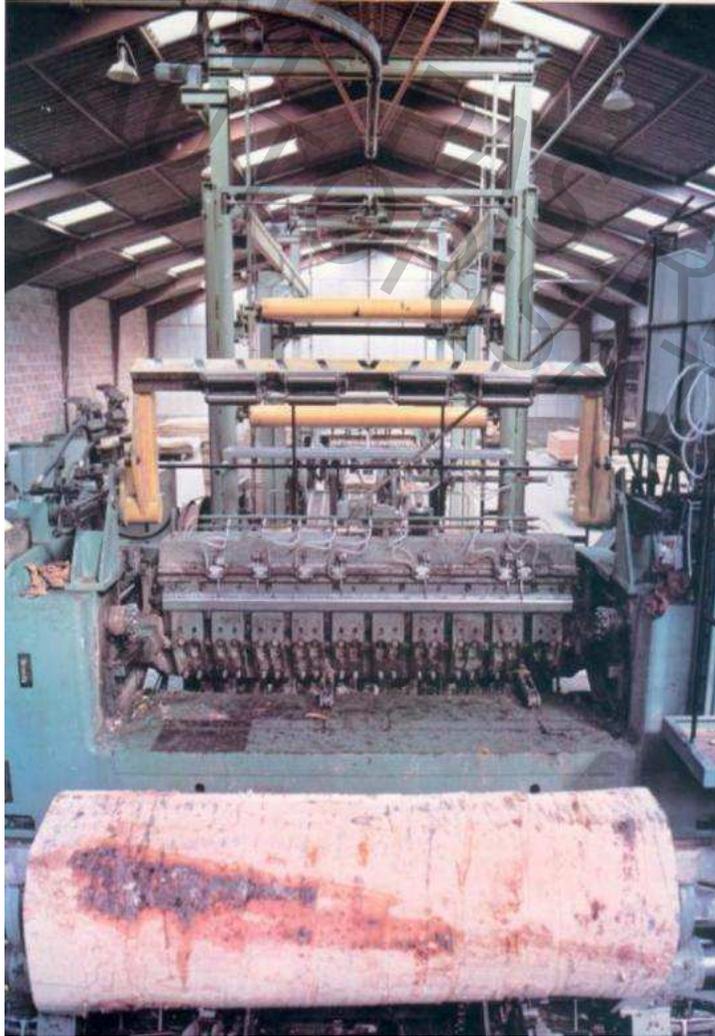
Energie élastique accumulée et tronçonnage



Eclatement à l'abattage d'une grume en raison des contraintes de croissance

Il est possible d'optimiser le débit par une modélisation du relâchement des contraintes pendant l'opération

Les étapes de la déconstruction du xylème



Tronçonnage:

grumes et billons

Sciage: profilés bois

Déroulage et

tranchage: feuilles
de bois

Bois d'œuvre

Fragmentation:

plaquettes

Défilage: fibres

Déconstruction de
la paroi: molécules

Bois d'industrie

On peut toujours utiliser les produits de déconstruction comme combustible

Les produits de la déconstruction du xylème



Bois rond



Poutres



Planches



Placages



Copeaux



Fibres

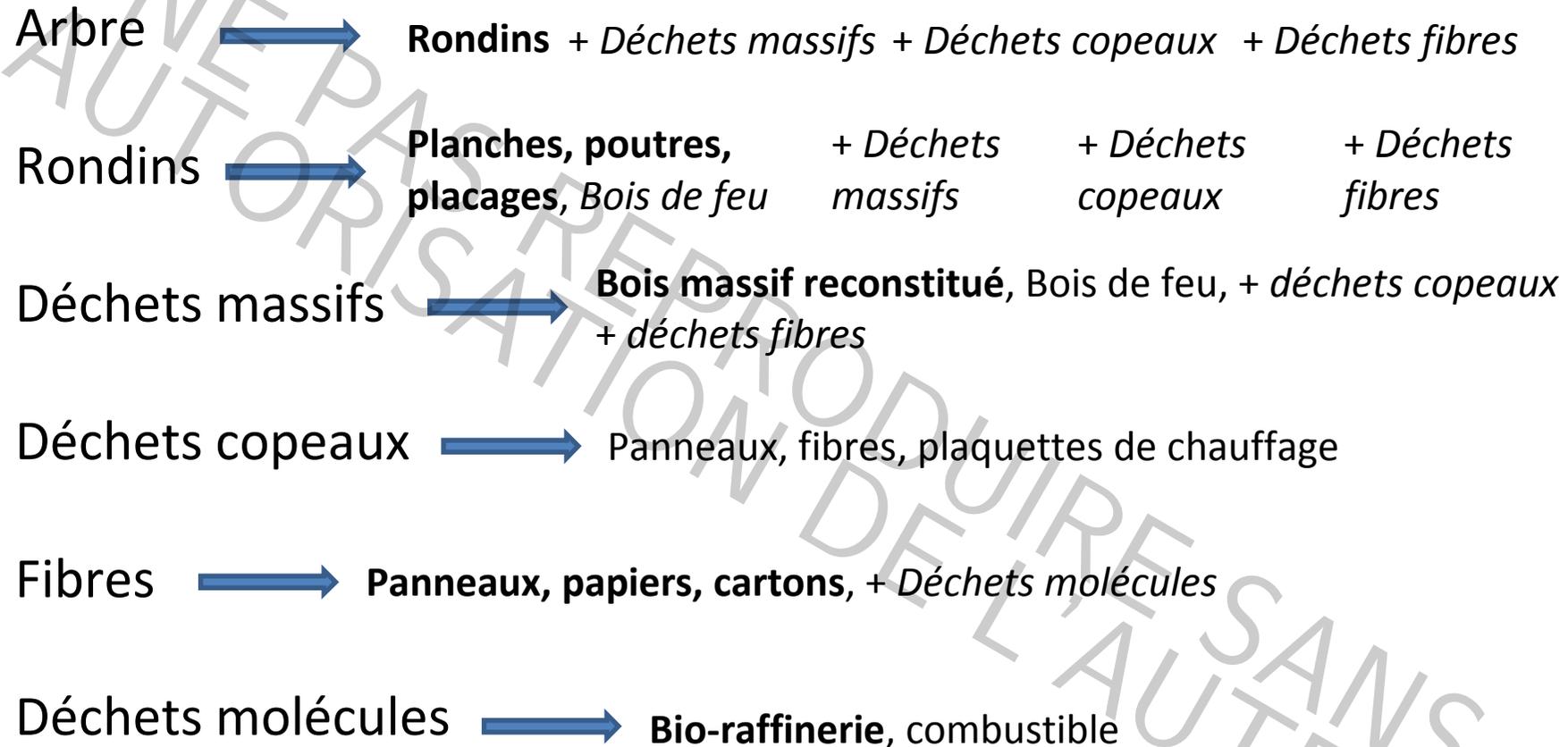


Nano-cellulose



Molécules pour la chimie

La cascade des usages du bois



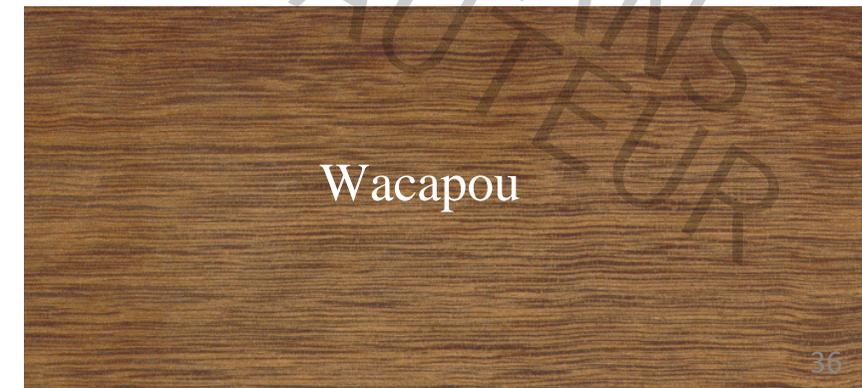
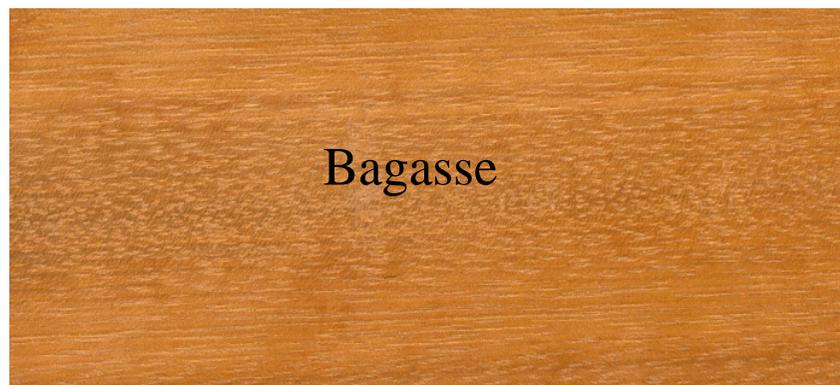
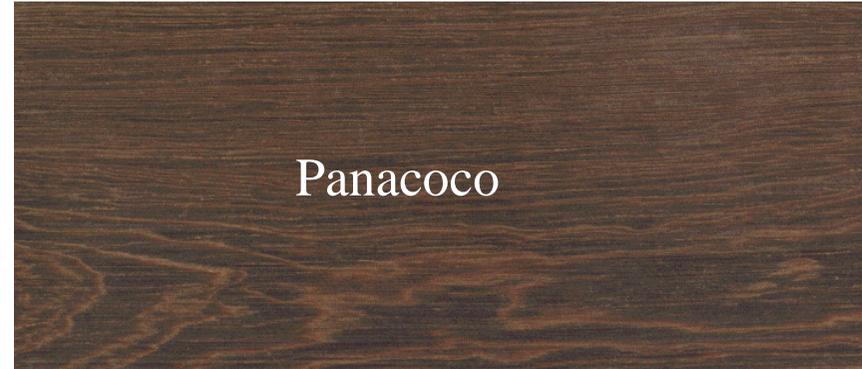
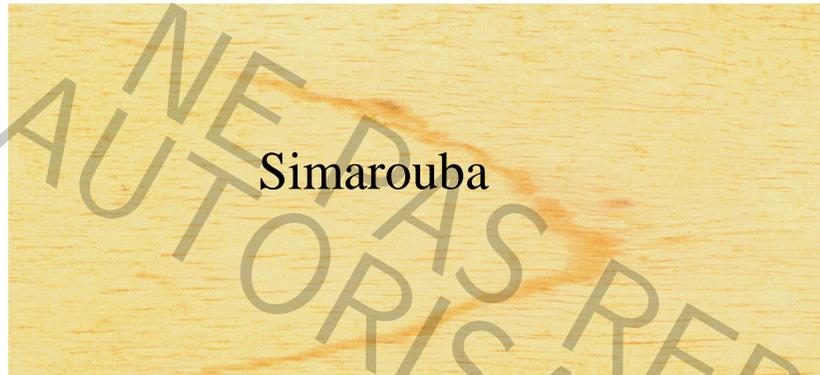
Utiliser toute la cascade maximise la valeur ajoutée, l'emploi, le stockage de carbone et l'économie d'énergie. Ajouter le recyclage dans l'usage améliore encore le résultat

La diversité du bois d'œuvre a une double
origine: génétique et historique

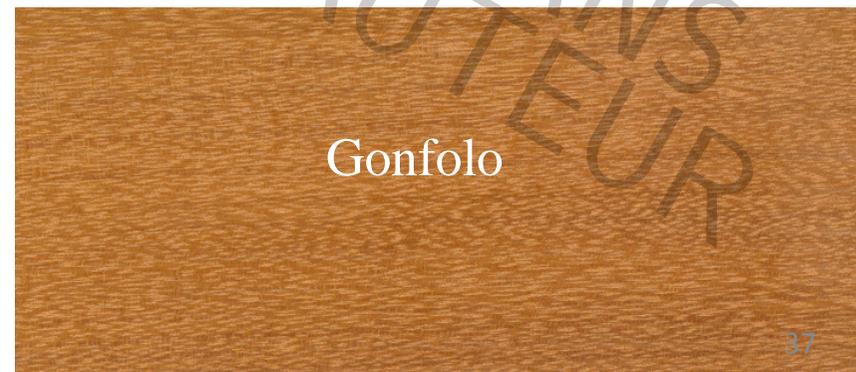
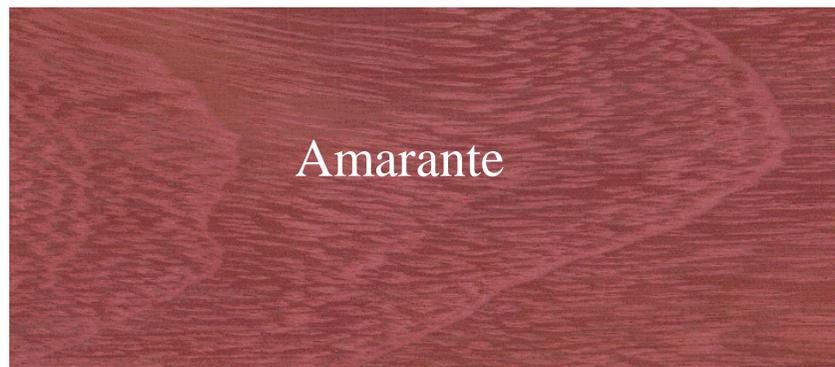
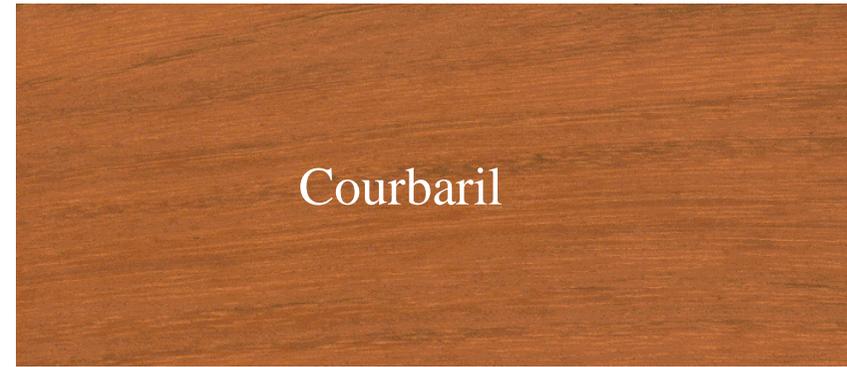
A la diversité des arbres en forêt répond la diversité de leurs bois (1700 espèces en forêt française)



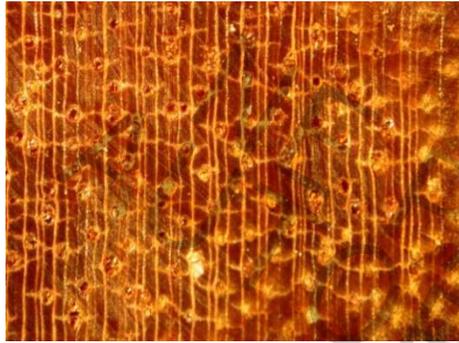
Diversité des aspects sur bois massif à l'œil nu



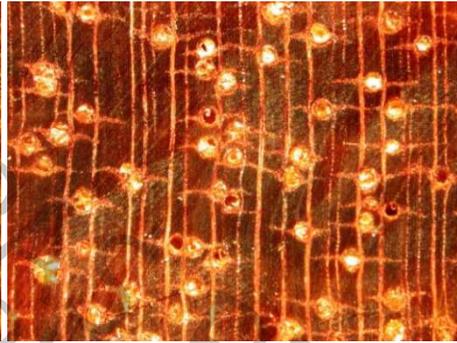
Diversité des aspects sur bois massif à l'œil nu



Diversité des anatomies sur bois massif à la loupe



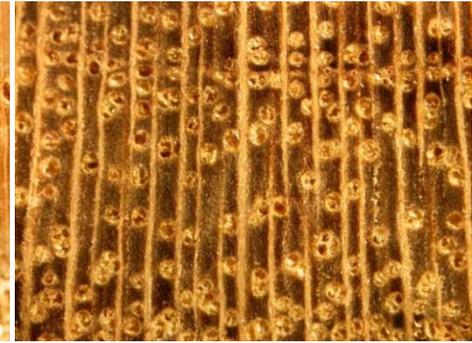
Brosimum guyanensis



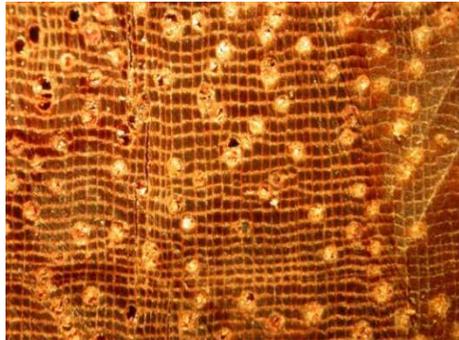
Brosimum rubescens



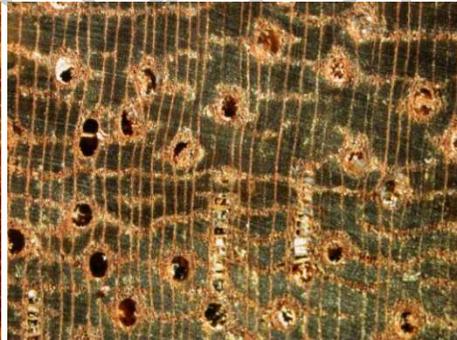
Cecropia obtusa



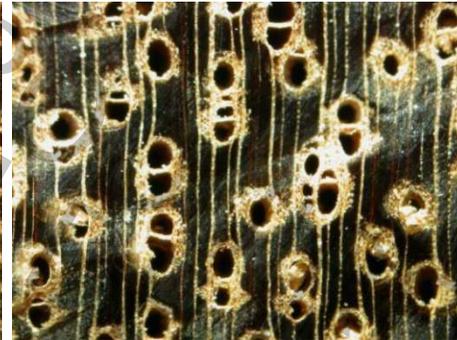
Cordia alliodora



Dialium guianensis



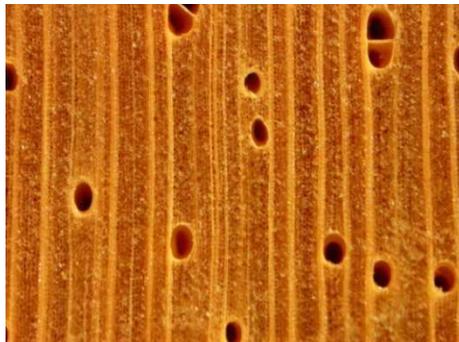
Dicorynia guianensis



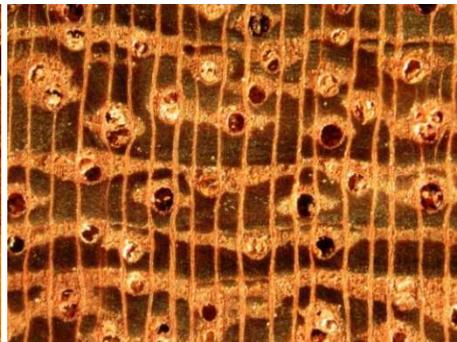
Diplotropis purpurea



Erisma uncinatum



Ochroma lagopus



Peltogyne venosa



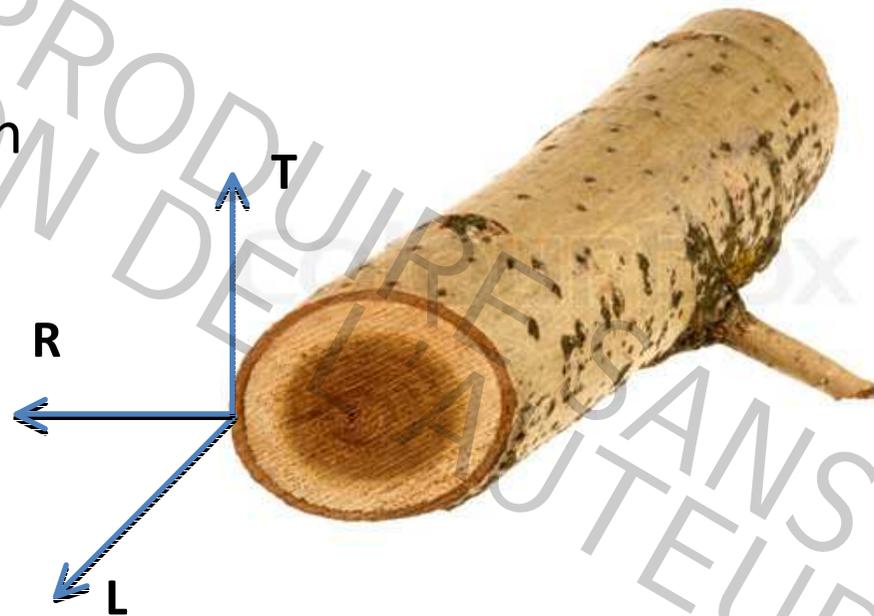
Roupala sp.



Simarouba amara

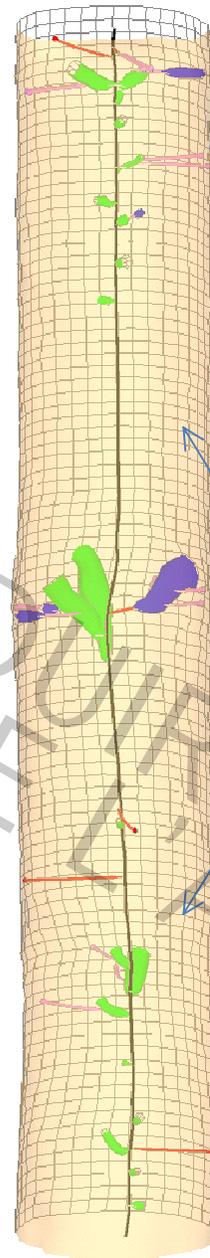
Diversité liée à l'histoire de la croissance de
chaque arbre

Un rondin est *structuré* selon
les 3 axes d'orthotropie
cylindrique: L, R et T



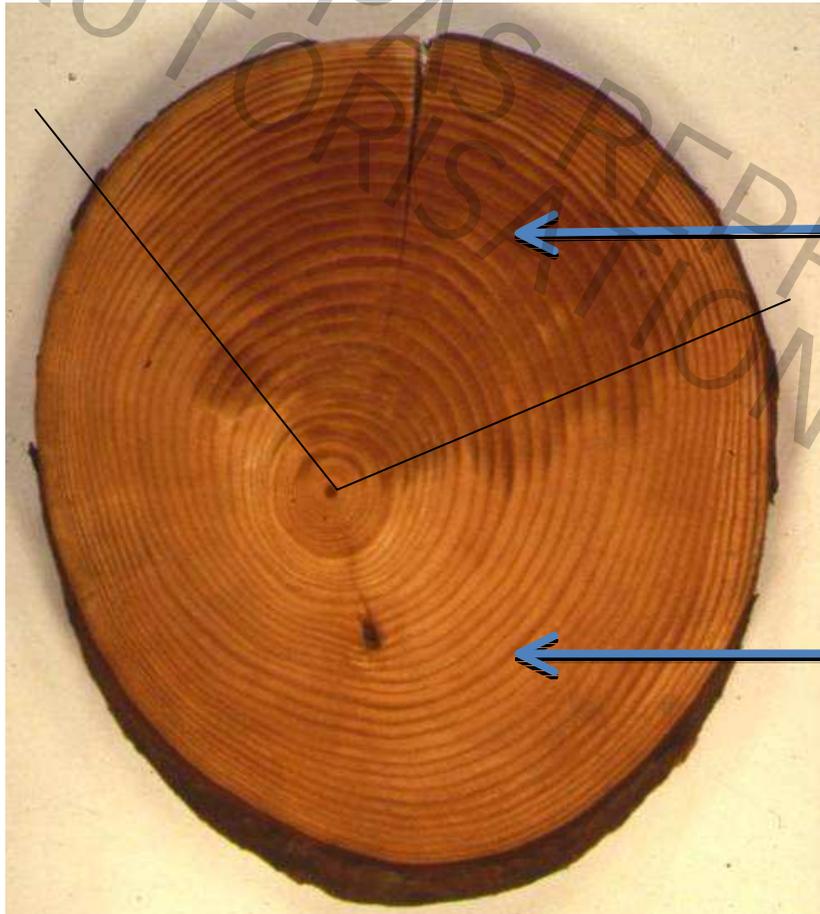
Structuration selon L

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



et
de portions
nettes de
jonctions
(clear wood)

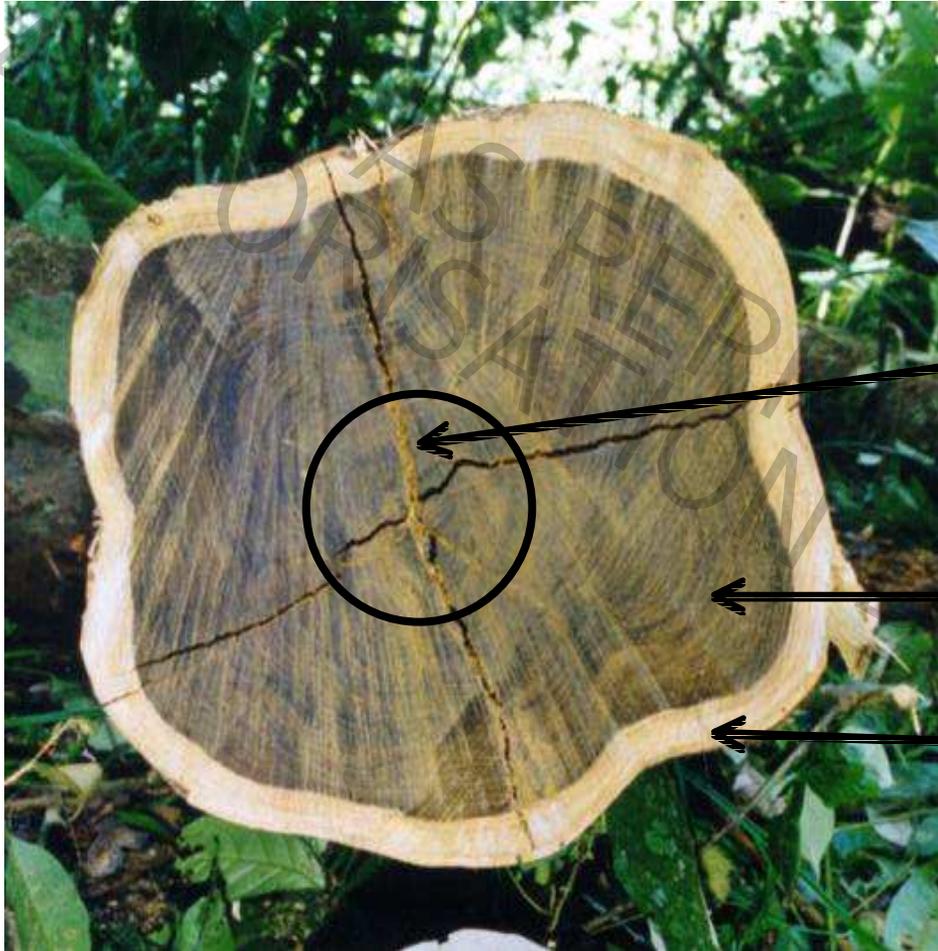
Structuration selon T



Succession du bois
de
compression

vers le bois
normal

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

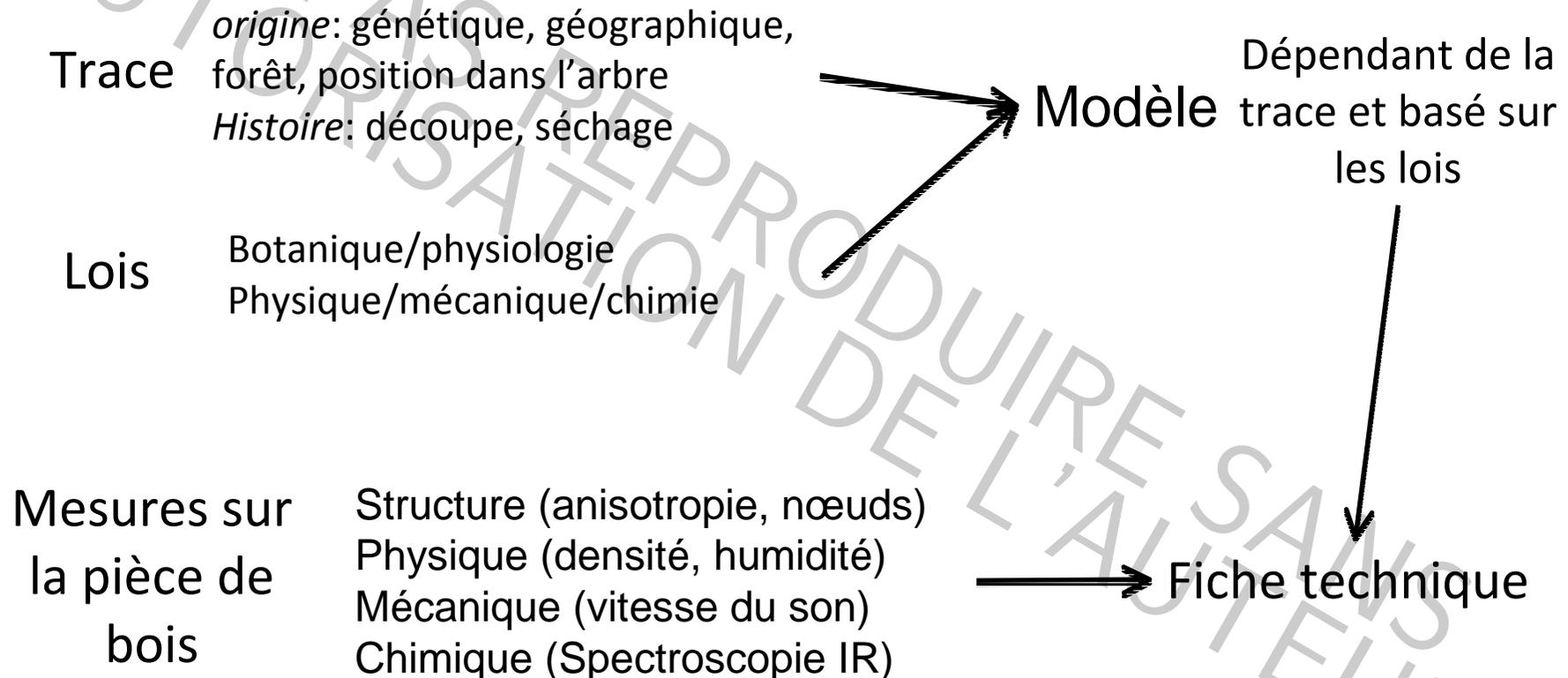
Typologie des profilés bois (rondins, poutres ou planches, feuilles)

- Bois avec jonctions (bois noueux) ou bois net de jonction (clear wood)
- Bois net hétérogène (aubier/duramen, bois de compression/bois normal)
- Bois net homogène



Rentrer dans le jeu de la sélection des matériaux pour la conception mécanique:

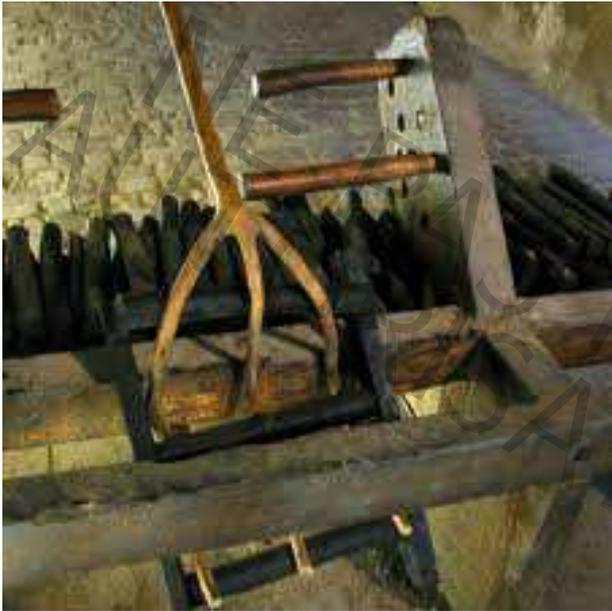
Une fiche technique pour une pièce de bois



La Traçabilité est fondamentale

Et si la diversité du bois d'œuvre
répondait à la diversité de ses usages

Usages de bois juste tronçonnés



Fourche en micocoulier



Sculpture dans les monts d'Arrée



Fronde



Poteaux bois

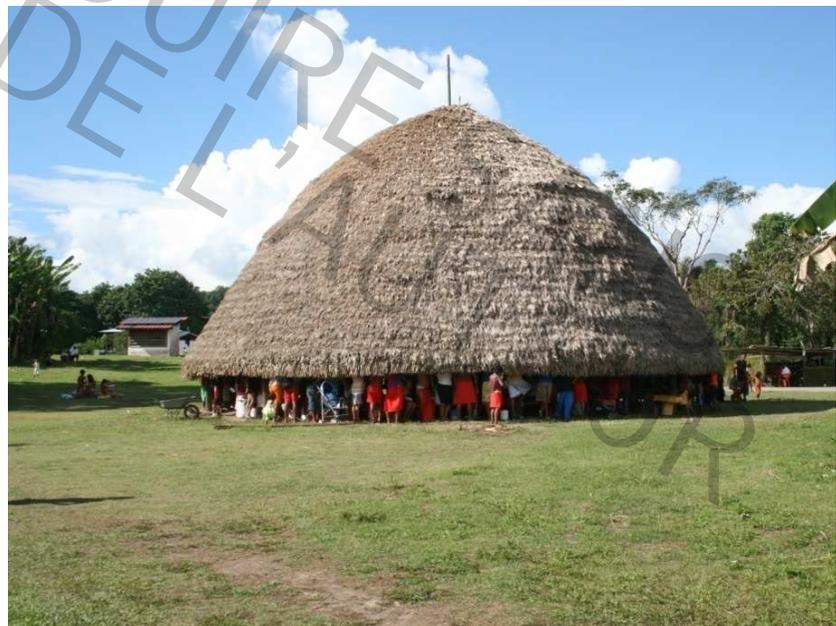


Piquets



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

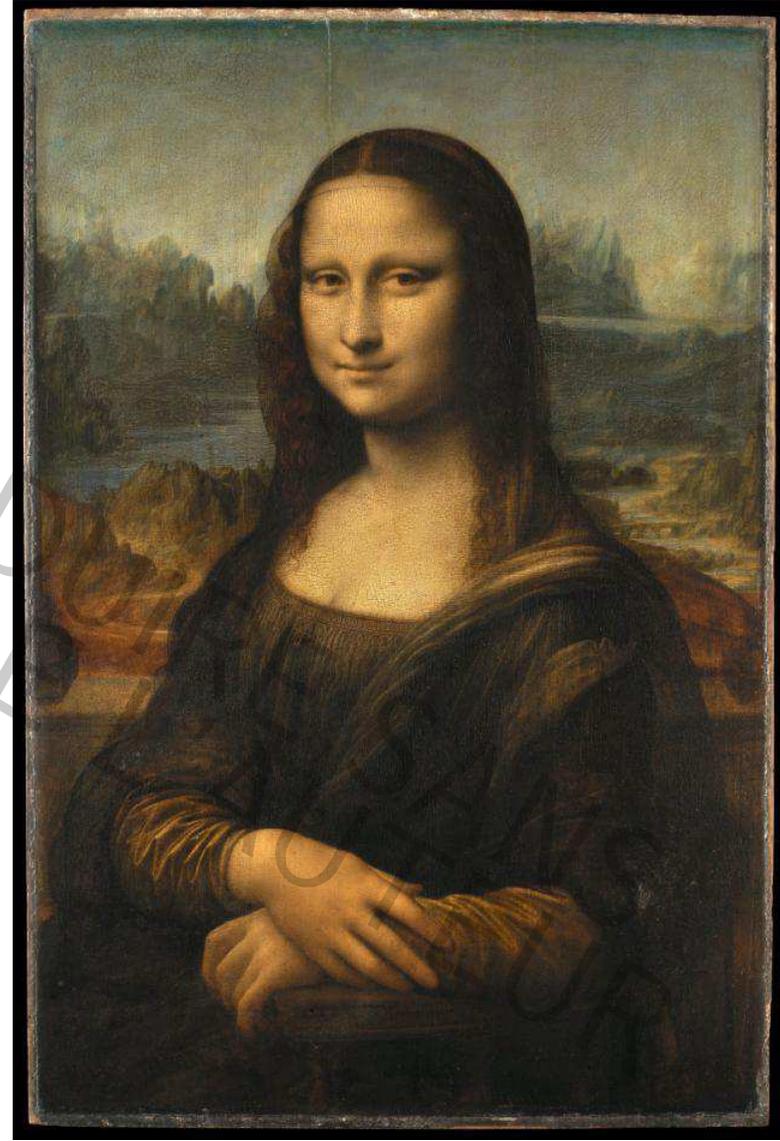
Usages des sciages de bois pour la construction et le génie civil



Usages du bois pour le transport et l'emballage



Usages du bois pour la culture



Conclusion générale

- Le bois vivant construit l'arbre sur un schéma prédéfini, en s'adaptant aux aléas de l'histoire
- Pour obtenir du bois matériau d'ingénierie, il faut d'abord déconstruire l'arbre: le débiter en profilés et les sécher
- Le bois d'œuvre est déjà un matériau performant, bio-sourcé, durable et biodégradable à la fois
- La variabilité des bois est le résultat d'une double diversité: génétique et historique, elle n'est pas aléatoire
- Il existe des outils pour qualifier un profilé de bois
- Il faut marier diversité des bois et diversité de leurs usages
- Les bois sont aussi source de fibres, de molécules ou d'énergie, mais il vaut mieux passer d'un état très ordonné à un état très désordonné le plus tard possible

Merci de votre attention

