



Variabilité des propriétés du bois Origine et observations (de l'arbre aux produits)

Meriem FOURNIER, SILVA - AgroParisTech, INRAE, Université de Lorraine

Tancrede ALMERAS, LMGC – CNRS, Université de Montpellier

Comment participer ?



1 Allez sur wooclap.com

2 Entrez le code de l'événement dans le bandeau supérieur

Code d'événement

MASTERCLASSBOIS

Cliquez sur l'écran projeté pour lancer la question



1 Envoyez **@MASTERCLASSBOIS** au **06 44 60 96 62**

2 Vous pouvez participer

Désactiver les réponses par SMS





Le bois

matière première
pour l'homme

depuis toujours

Archéodrome de Beaune, Merceuil, Bourgogne,
FRANCE. Vue de l'intérieur d'une habitation
gauloise reconstituée.
WIKIMEDIA Commons Auteur Christophe Finot



Le bois

Indispensable pour la vie des arbres

Un seul tissu (matériau), 5 fonctions :

« **Squelette** »

Rigidité et résistance mécanique

« **Muscle** »

Contrôle
de la posture



Réserves d'amidon

Nutrition

Défenses contre les xylophages

**Systeme
immunitaire**

Allez sur wooclap.com et utilisez le code **MASTERCLASSBOIS**



Quelle est la fonction qui manque ?



① Echanges gazeux avec l'atmosphère, captage du CO2

0% 0



② Conduction de la sève brute

0% 0



③ Conduction de la sève élaborée

0% 0





Le bois

Indispensable pour la vie des arbres

Un seul tissu (matériau), 5 fonctions :

« **Squelette** »

Rigidité et résistance mécanique

« **Muscle** »

Contrôle
de la posture

Transport
de la sève brute

**Système
vasculaire**

Réserves d'amidon

Nutrition

Défenses contre les xylophages

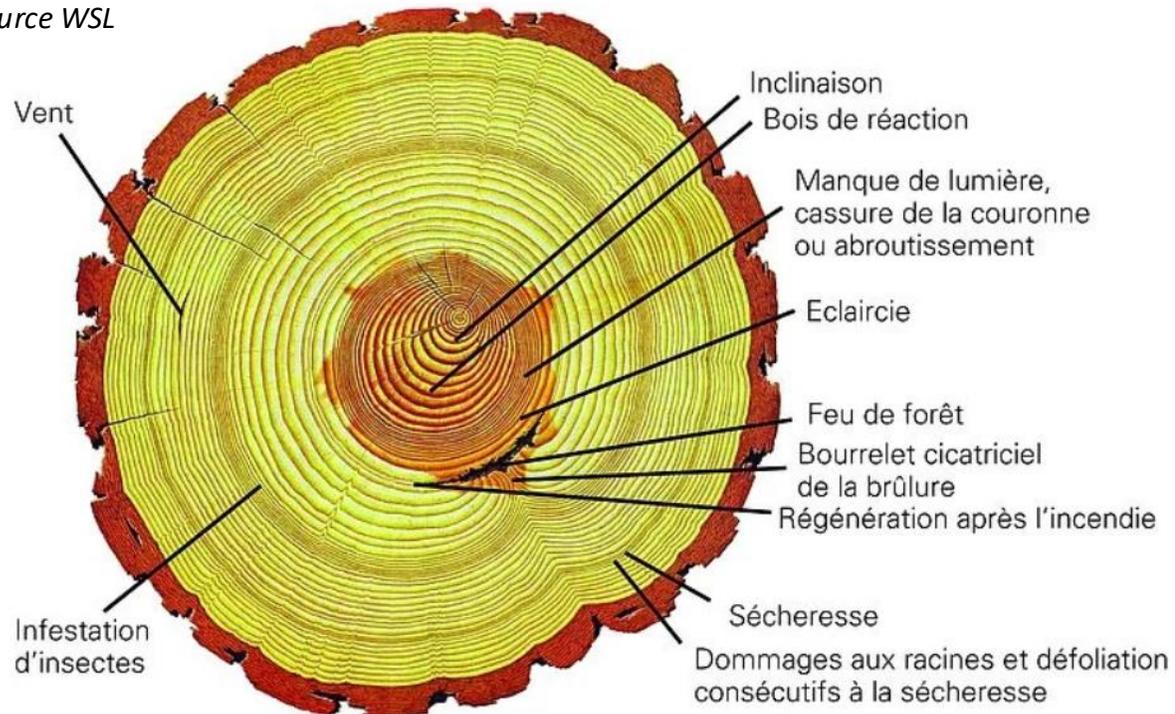
**Système
immunitaire**

Origine des variations de propriétés du bois tissu de l'arbre



- Il faut des propriétés particulières au bois tissu de l'arbre pour bien réaliser ces fonctions.

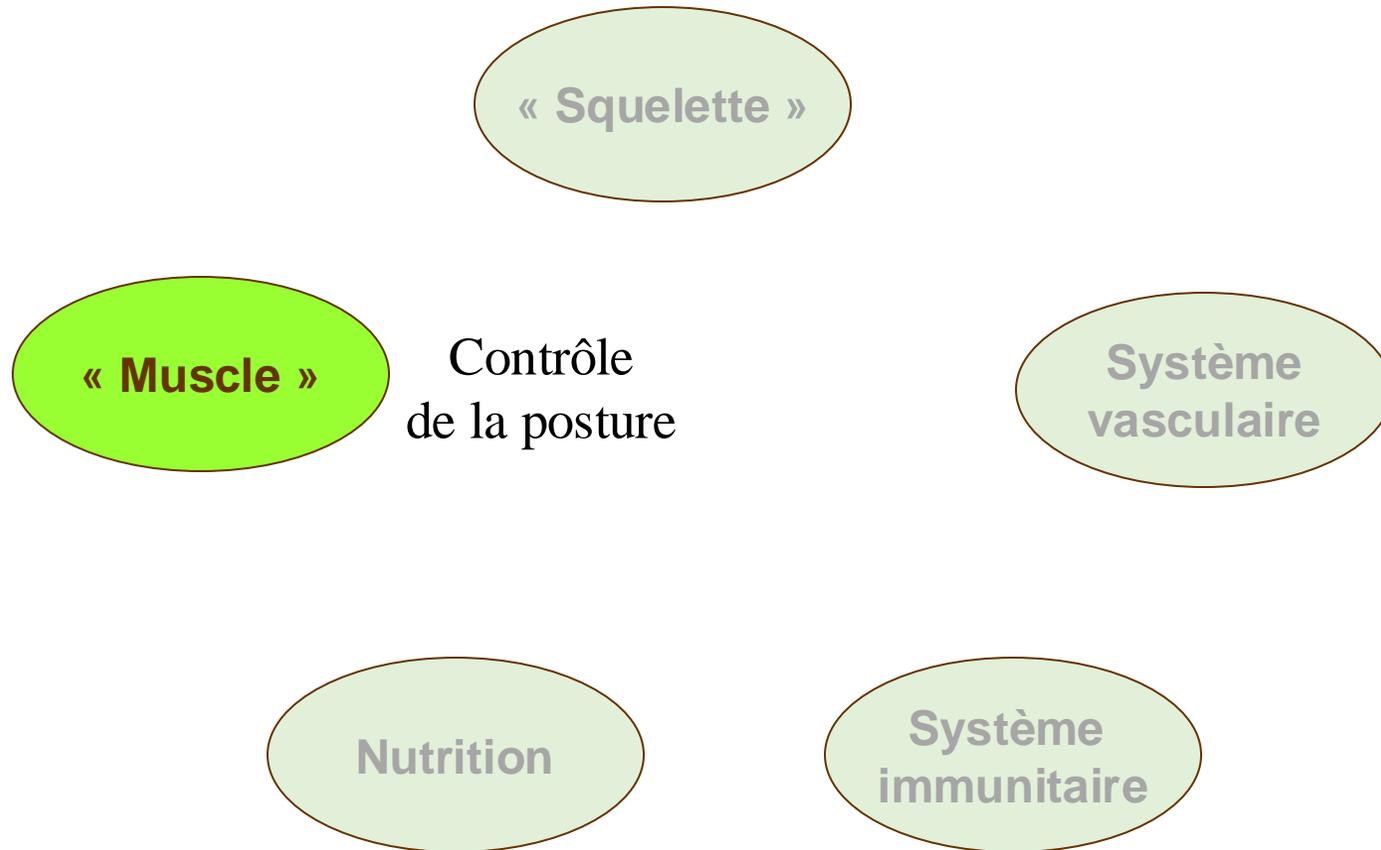
Source WSL



- Comme l'environnement et les besoins varient, ces propriétés du bois ne sont pas fixées une fois pour toute par le génotype (par exemple l'espèce)
- Elles varient avec l'environnement et la croissance, parfois « pour » permettre le bon fonctionnement de l'arbre

Un exemple de variation dirigée des propriétés du bois pour répondre à un besoin fonctionnel de l'arbre :

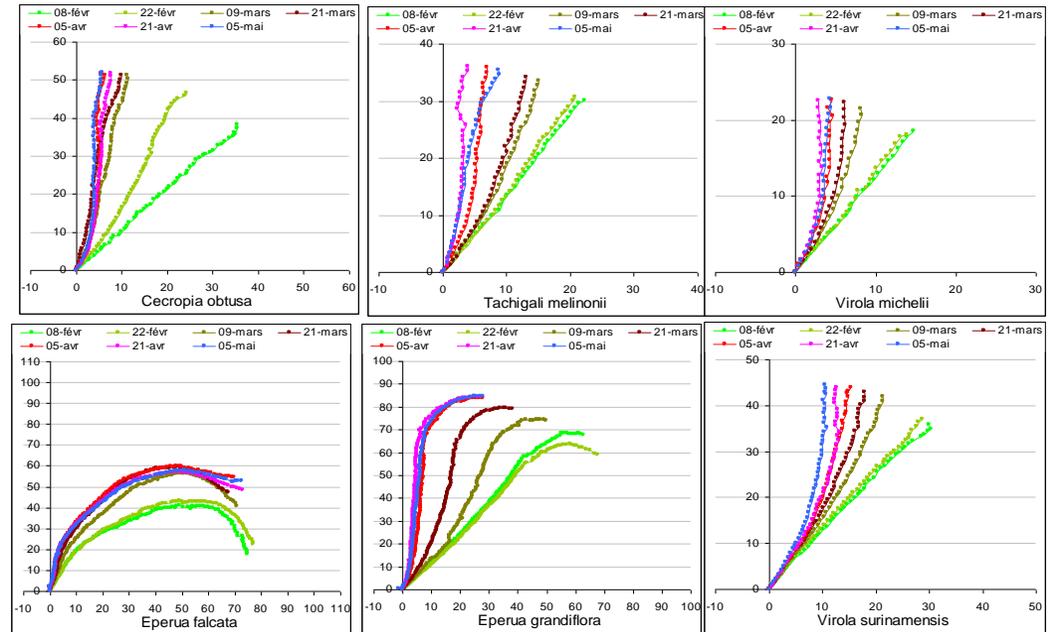
le bois de réaction



Le bois de réaction : moteur du gravitropisme chez les arbres

Le gravitropisme

Gravitropisme = orientation de la croissance par rapport à la gravité

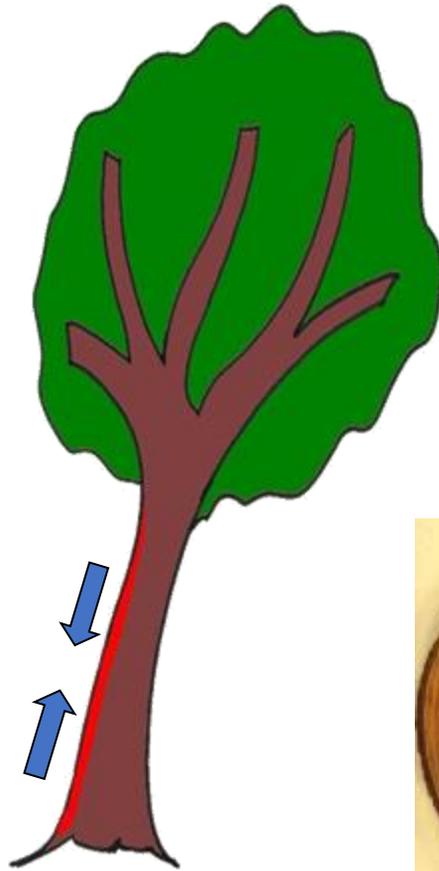


Un petit arbre incliné est capable de se redresser en quelques semaines

Comment ça marche ?

Le bois de réaction : moteur du gravitropisme chez les arbres

Feuillus



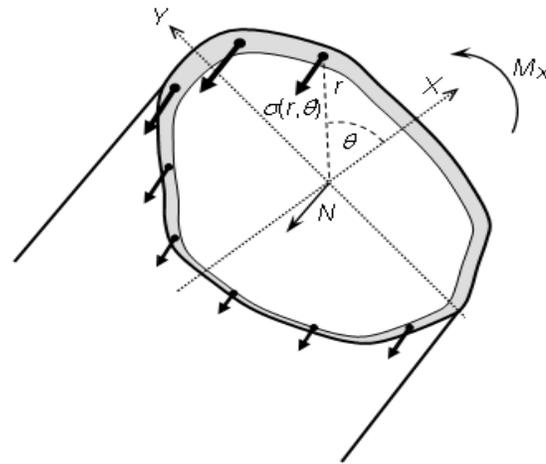
Bois de tension



Résineux



Bois de compression



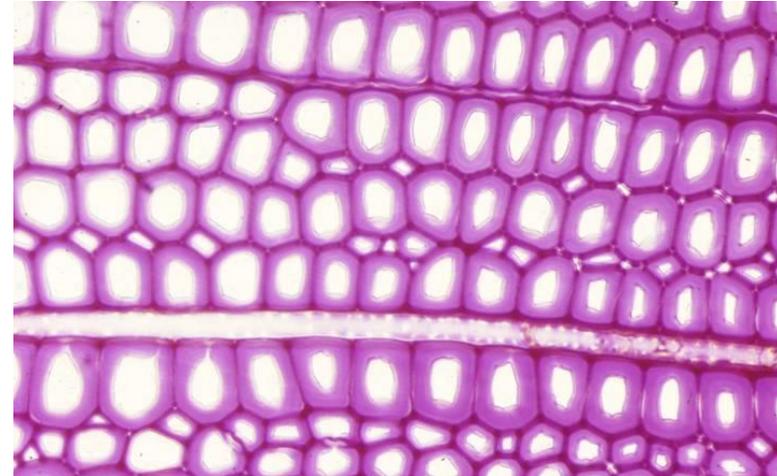
Le bois de réaction : source d'hétérogénéité

Anatomie des bois de réaction

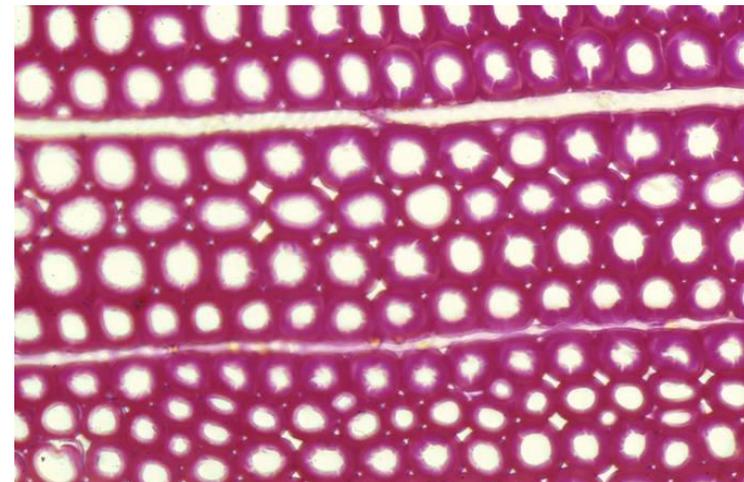
Bois de compression (résineux) :

- Cellules arrondies
- Fortement lignifié
- Méats intercellulaires
- Grand angle des microfibrilles

Bois normal



Bois de compression



Le bois de réaction : source d'hétérogénéité

Anatomie des bois de réaction

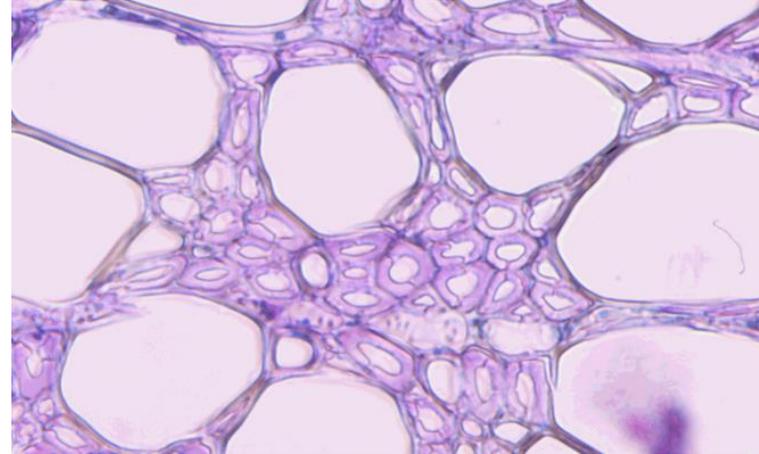
Bois de compression (résineux) :

- Cellules arrondies
- Fortement lignifié
- Méats intercellulaires
- Grand angle des microfibrilles

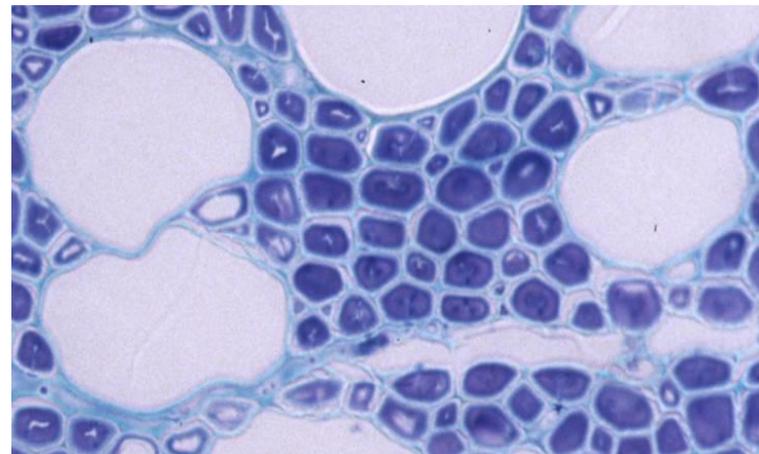
Bois de tension (feuillus) typique :

- Couche gélatineuse (G)
- Non-lignifiée, composition particulière
- Faible angle des microfibrilles

Bois normal

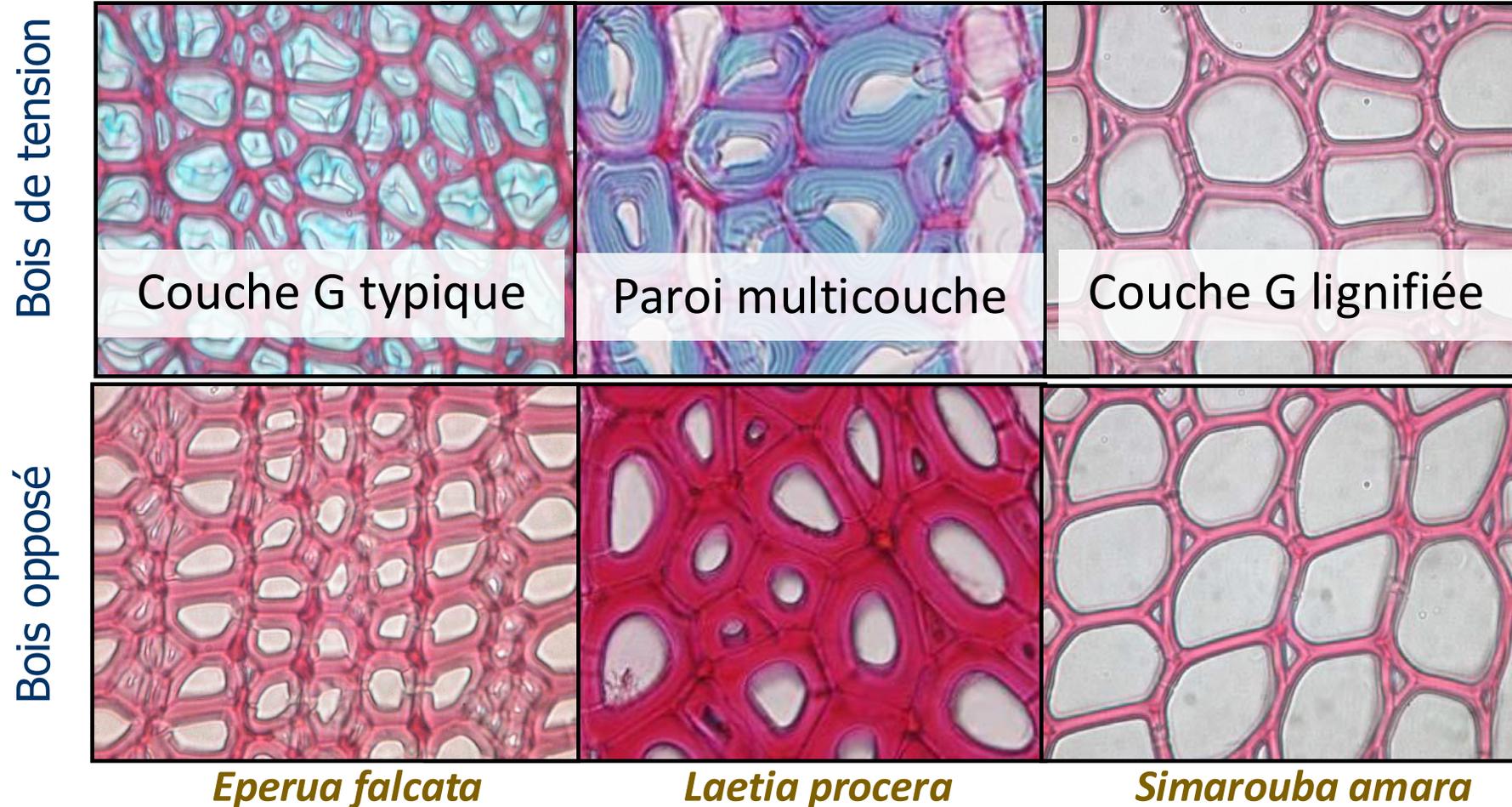


Bois de tension



Le bois de réaction : source d'hétérogénéité

Diversité des bois de tension



Le bois de réaction : source d'hétérogénéité



Le bois de réaction : un défaut ?

Propriétés intéressantes mais...

... source d'hétérogénéité !

Fort retrait au séchage (direction L)

Associé à des fortes contraintes de croissance



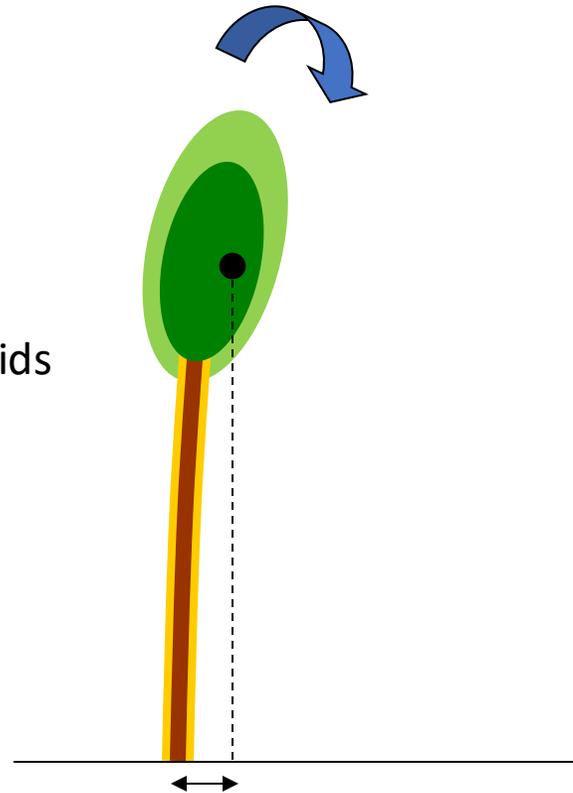
Photo 1. Lamelles de peuplier montrant un état de surface pelucheux suite à la présence de fibres gélatineuses en proportion importante dans le bois — *Poplar planks showing woolly surface due to the presence of an important proportion of gelatinous fibers in the wood.*

Le gravitropisme : une adaptation indispensable à la croissance verticale dans le champ de pesanteur

Croissance directionnelle dans le champ de pesanteur

En l'absence de réaction gravitropique, quelles seraient les conséquences de la croissance sur la forme et l'orientation des axes ?

- Un tronc n'est jamais parfaitement vertical
- La croissance implique une augmentation du poids
- Pas vertical => bras de levier => moment
- L'arbre fléchit sous l'effet de la croissance

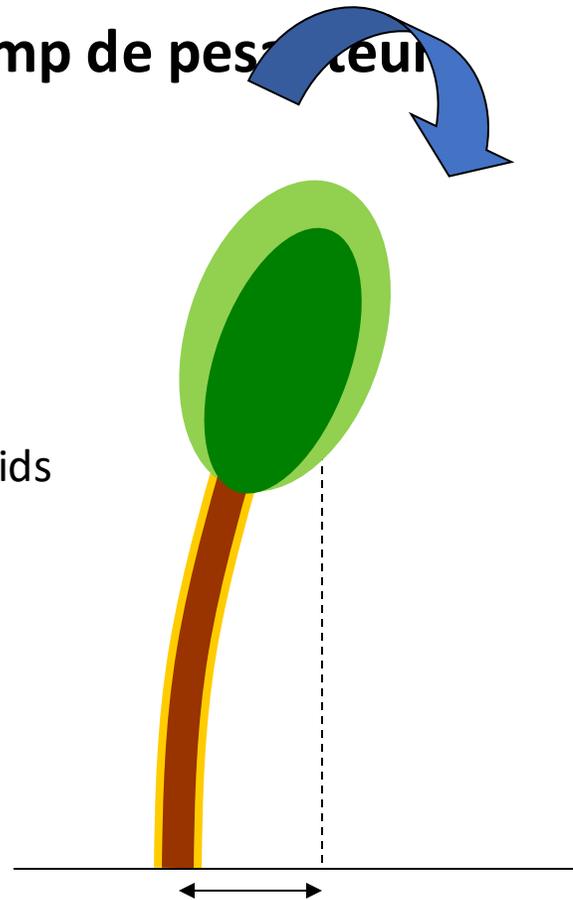


Le gravitropisme : une adaptation indispensable à la croissance verticale dans le champ de pesanteur

Croissance directionnelle dans le champ de pesanteur

En l'absence de réaction gravitropique, quelles seraient les conséquences de la croissance sur la forme et l'orientation des axes ?

- Un tronc n'est jamais parfaitement vertical
- La croissance implique une augmentation du poids
- Pas vertical => bras de levier => moment
- L'arbre fléchit sous l'effet de la croissance
- La flexion accentue le bras de levier...



Le gravitropisme : une adaptation indispensable à la croissance verticale dans le champ de pesanteur

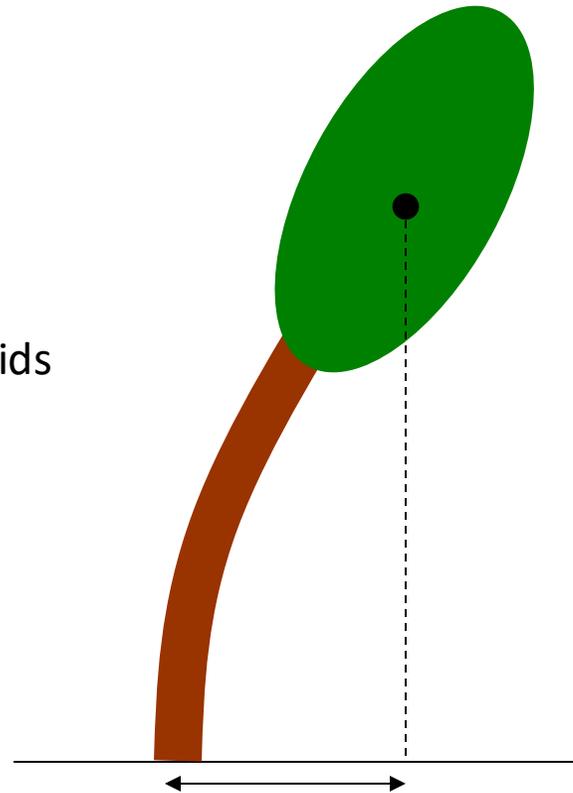
Croissance directionnelle dans le champ de pesanteur

En l'absence de réaction gravitropique, quelles seraient les conséquences de la croissance sur la forme et l'orientation des axes ?

- Un tronc n'est jamais parfaitement vertical
- La croissance implique une augmentation du poids
- Pas vertical => bras de levier => moment
- L'arbre fléchit sous l'effet de la croissance
- La flexion accentue le bras de levier...

La croissance verticale est un phénomène intrinsèquement instable !

Nécessité d'une régulation active



La réaction gravitropique (et la formation de bois de réaction) n'est pas une réponse traumatique, mais fait partie du développement normal des arbres

Propriétés du bois tissu de l'arbre vs propriétés du bois matériau de l'homme ?



Propriétés technologiques ?

(1) Bois « sans défaut »

Propriétés physiques et mécaniques

Les propriétés indiquées concernent les bois arrivés à maturité. Ces propriétés peuvent varier de façon notable selon la provenance et les conditions de croissance des bois.

Propriété	Valeur moyenne
Densité ¹	0,74
Dureté Monnin ¹	4,2
Coefficient de retrait volumique	0,44 % par %
Retrait tangentiel total (Rt)	9,7 %
Retrait radial total (Rr)	4,5 %
Ratio Rt/Rr	2,2
Point de saturation des fibres	31 %
Conductivité thermique (λ)	0,24 W/(m.K)
Pouvoir calorifique inférieur	18 390 kJ/kg
Contrainte de rupture en compression ¹	58 MPa
Contrainte de rupture en flexion statique ¹	105 MPa
Module d'élasticité longitudinal ¹	13 300 MPa

¹À 12 % d'humidité, avec 1 MPa = 1 N/mm

Chêne

Famille. Fagaceae

Noms botaniques.

Quercus petraea

Quercus robur

Continent. Europe



Débit sur dosse

Débit sur quartier



Durabilité naturelle et imprégnabilité du bois

Résistance aux champignons. Classe 2 - durable

Résistance aux insectes de bois sec. Classe D - durable (aubier distinct, risque limité à l'aubier)

Résistance aux termites. Classe M - moyennement durable

Imprégnabilité. Classe 4 - non imprégnable

Classe d'emploi couverte par la durabilité naturelle.

Classe 3 - hors contact du sol, à l'extérieur

**Y-a-t-il un lien entre ces propriétés technologiques
Et les propriétés « fonctionnelles » qui font que le bois
réalise plus ou moins bien ses fonctions dans l'arbre ?**

Allez sur wooclap.com et utilisez le code **MASTERCLASSBOIS**



Le lien n'est pas évident parce que :



1 Le bois dans l'arbre est vert alors que le bois matériau est sec

0% 0



2 Le bois dans l'arbre est vert alors que le bois matériau est sec. Cliquez sur l'écran projeté pour lancer la question

0% 0

3 Certaines propriétés n'ont aucun sens pour l'arbre, comme le pouvoir calorifique ou la résistance aux insectes de bois sec

0% 0



Propriétés technologiques ?

(2) En dimension d'emploi

Classement mécanique ou structural

Classement d'aspect ou choix



Sapin Epicéa

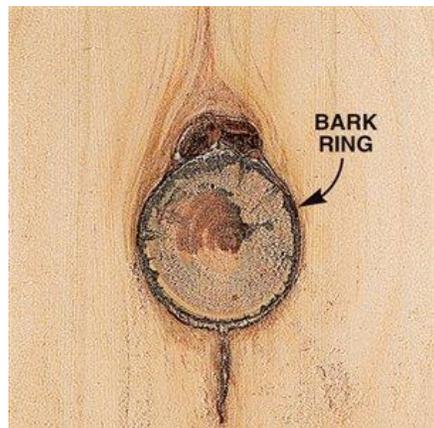
Critères ?

Défauts de process : Flaches, gerces, Pente de fil ...

Et défauts inhérents à l'arbre

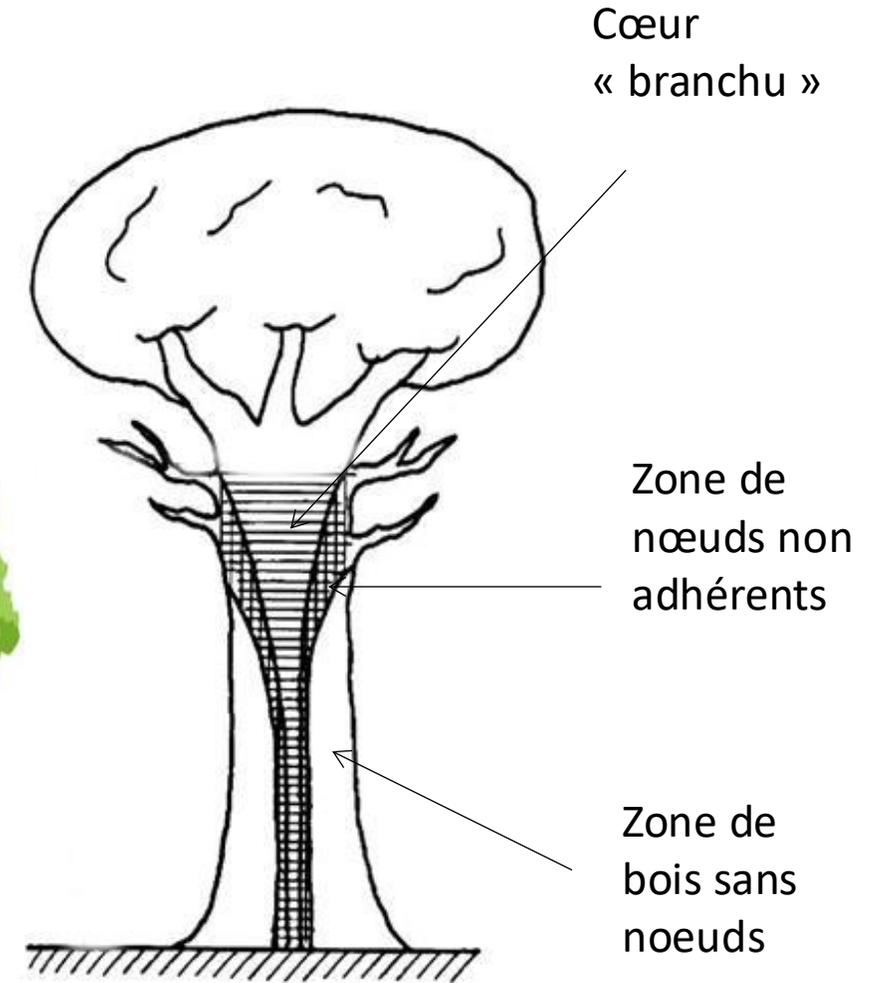
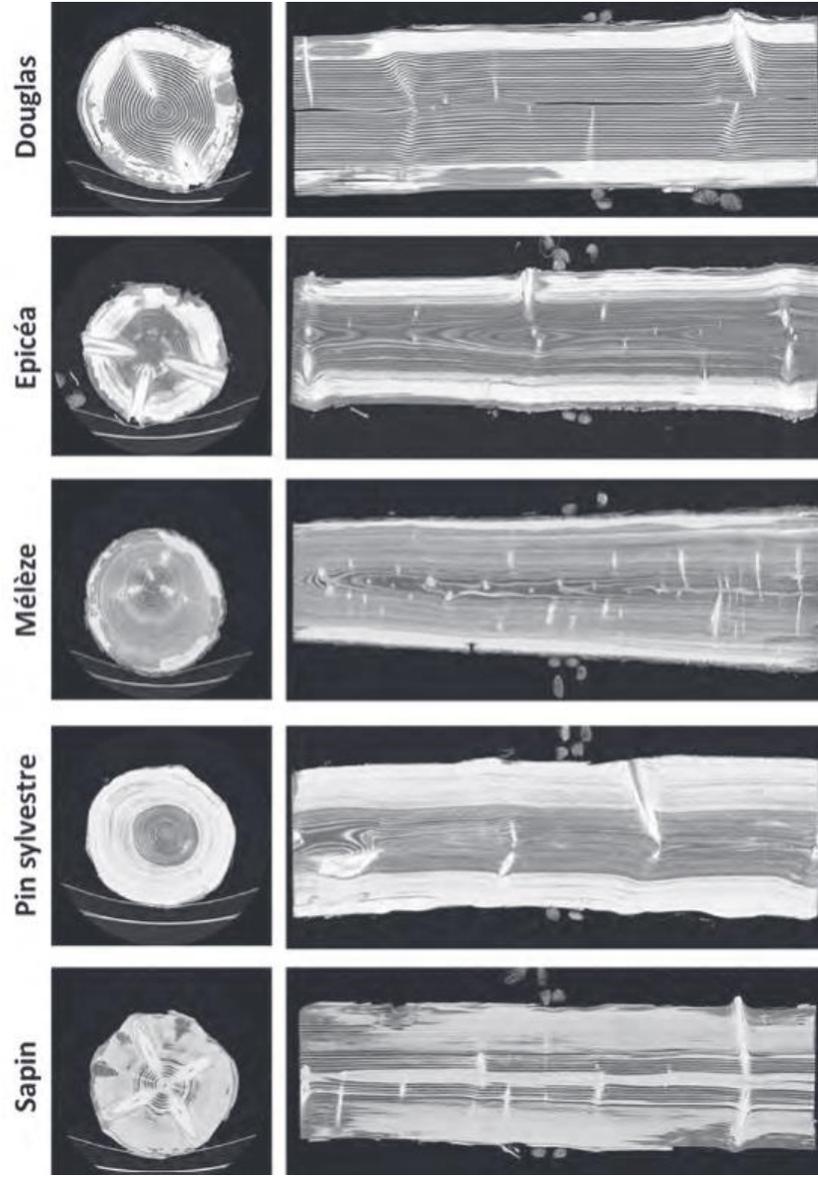
Fentes, Pente du fil, Poches de résine

Et ... **Nœuds**



Les nœuds = défauts pour le matériau mais branches nécessaires à l'arbre

Exemples d'analyse de la structure interne du bois par tomographie X
(Longuetaud et al, 2014, RV techniques ONF 2014)



La sylviculture peut minimiser les nœuds.

Allez sur wooclap.com et utilisez le code **MASTERCLASSBOIS**



Comment fait le sylviculteur pour minimiser les noeuds ?



① Il élague les arbres en coupant les branches basses qui sont le moins utiles à l'arbre 0% 0

② Il fait pousser les arbres serrés pour que les branches basses meurent toutes seules par manque de lumière 0% 0

③ Il utilise des espèces sans branches où les feuilles ne sont qu'au bout du tronc 0% 0

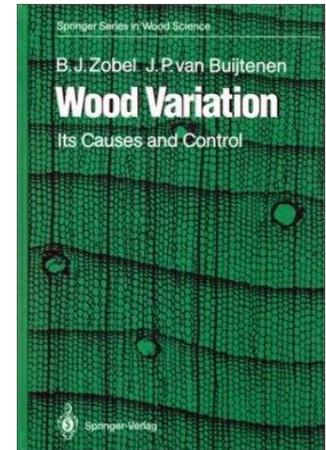
Cliquez sur l'écran projeté pour lancer la question



Variations de la densité du bois avec la vitesse de croissance (= la largeur de cerne)



Pins « durs »	Peu ou pas de relation
Autres conifères (Picea, Abies, Cupressus + Pins à croissance rapide : Pinus strobus)	La densité du bois diminue fortement avec la largeur de cerne
<i>Larix</i> et <i>Pseudotsuga</i>	Effet moins net.
Feuillus à zone initiale poreuse (Chênes)	La densité du bois augmente avec la largeur de cerne
Feuillus à pores diffus	Effets peu nets



1989 Wood variations : its causes and control B.J. Zobel et J.P. van Buijtenen

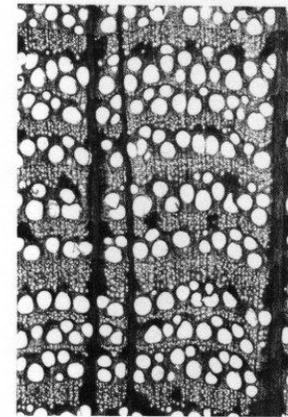
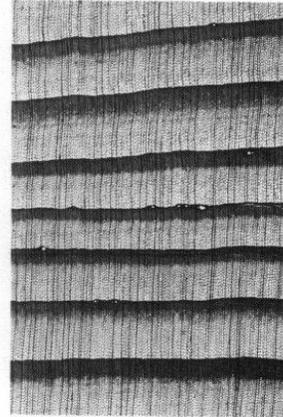
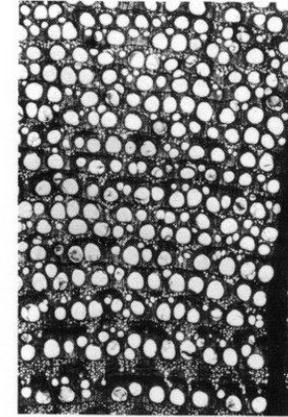
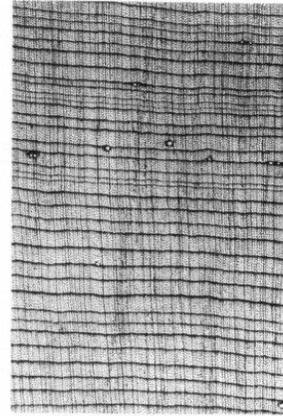
Springer Series in Wood Science

Climat plus froid, plus sec
Arbres serrés

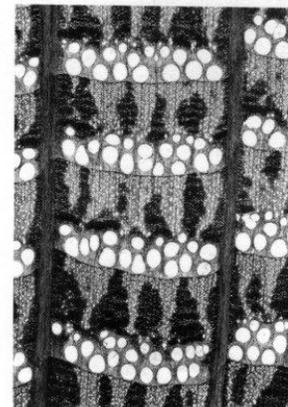
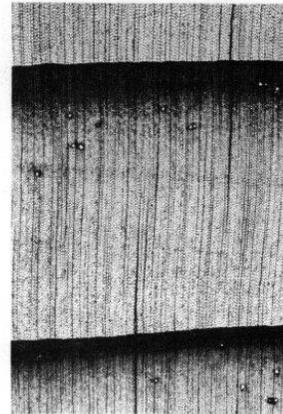
Epicéa

Chêne

Densité + forte



Densité + faible
Car plus de bois initial
en proportion



Densité + forte
Car le chêne fait plus ou
moins toujours la
même quantité de gros
vaisseaux au début

Climat favorable
Sylviculture « dynamique »

Allez sur wooclap.com et utilisez le code **MASTERCLASSBOIS**



Lorsqu'on fait une sylviculture "dynamique" qui se traduit par des cernes plus larges



① On améliore la qualité du bois d'Epicéa

0% 0

② On détériore la qualité du bois d'Epicéa

0% 0

Cliquez sur l'écran projeté pour lancer la question

③ On améliore la qualité du bois de Chêne

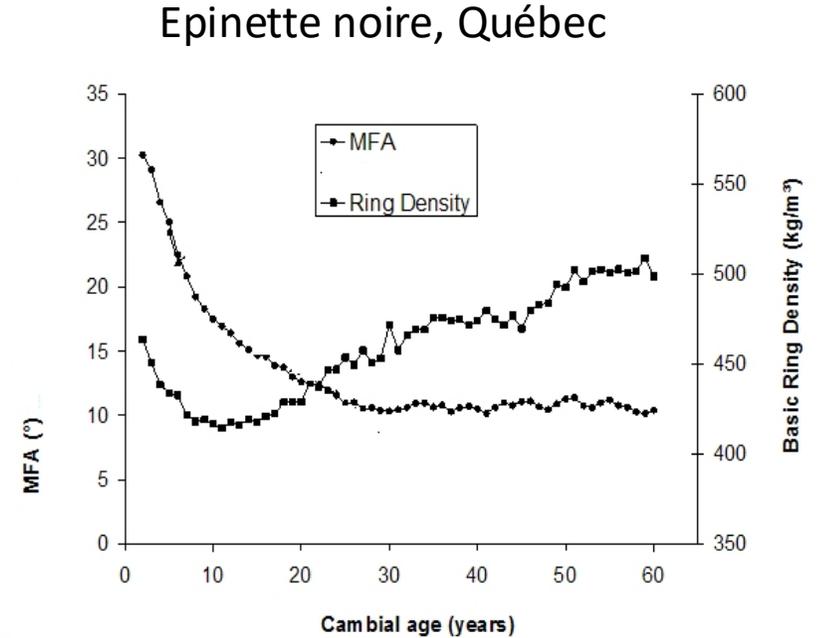
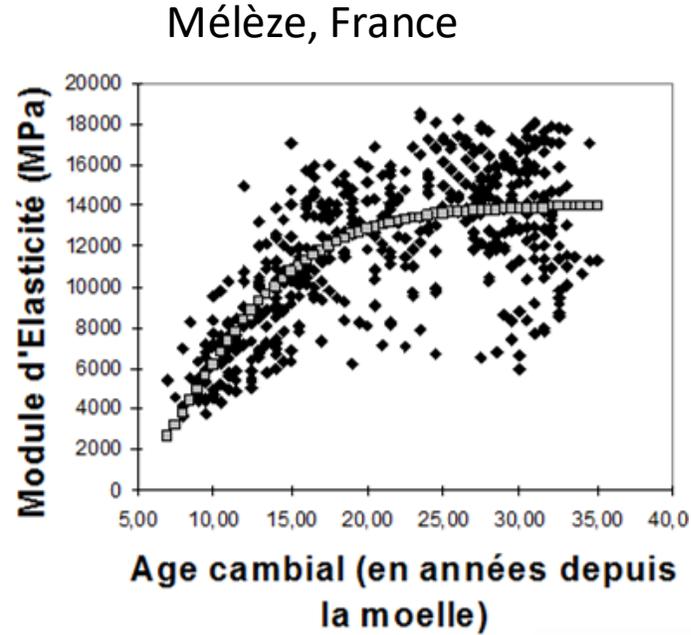
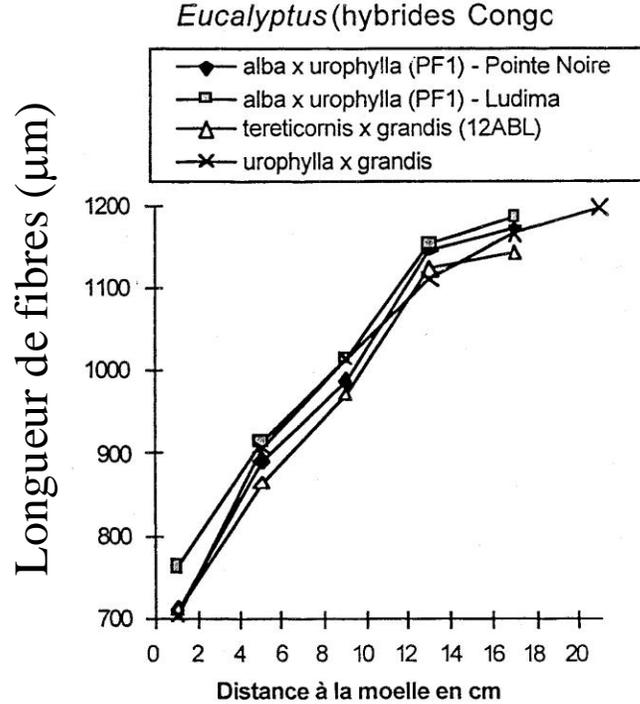
0% 0

④ On détériore la qualité du bois de Chêne

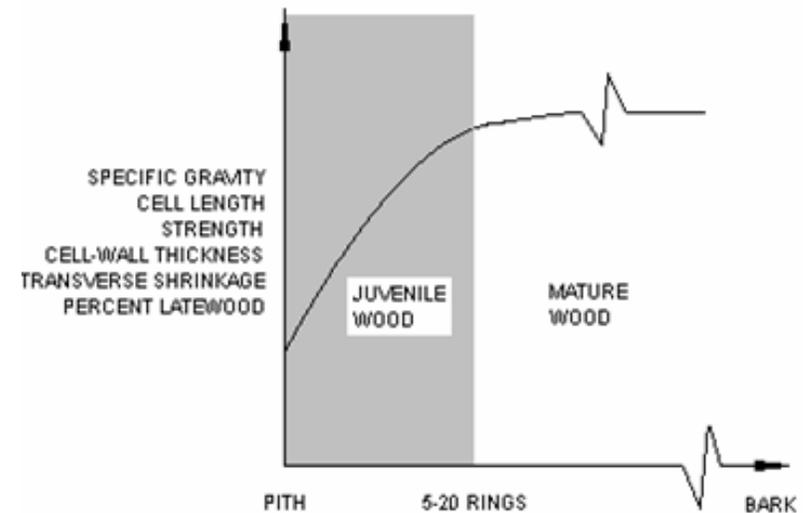
0% 0



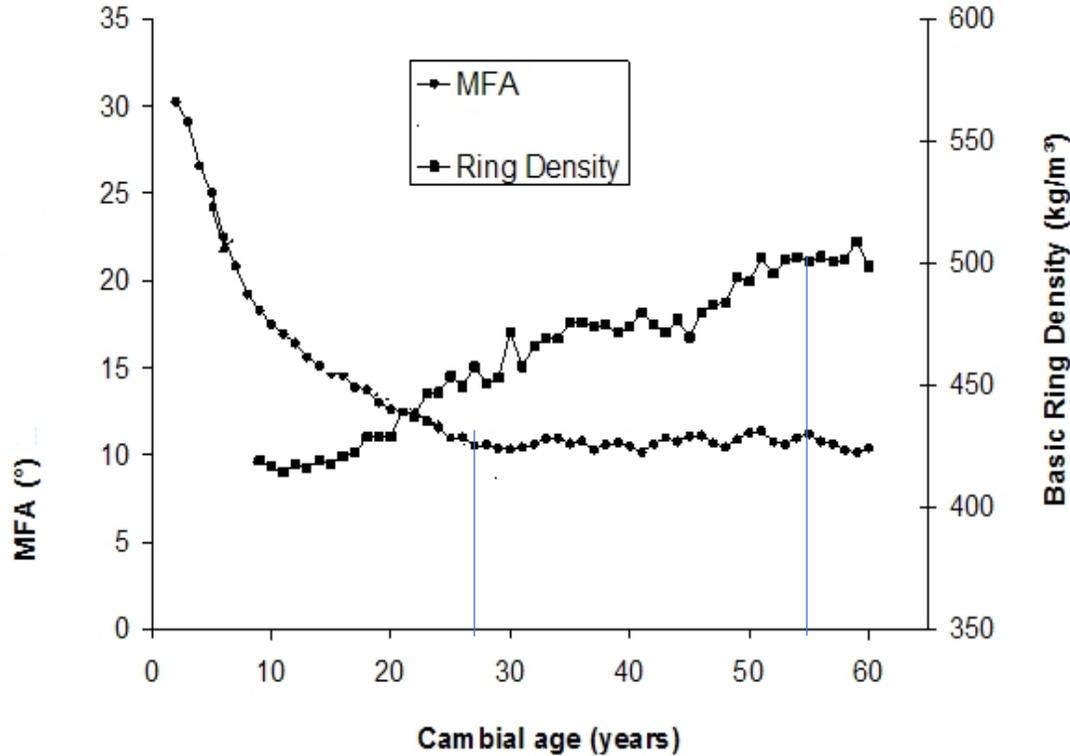
Bois juvénile ou « TRP » Typical radial pattern



-> ce qu'on trouve dans les livres de technologie du bois (ici Bendtsen 1978)

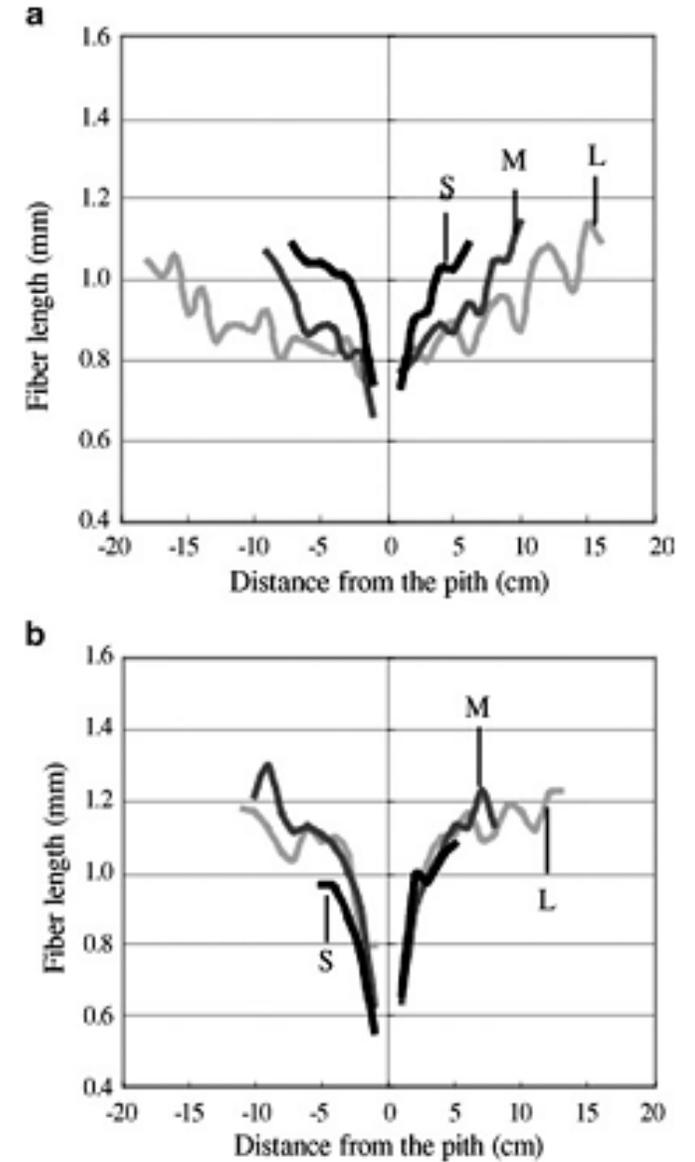


Une limite qui dépend de la propriété



Thèse Jérôme Alteyrac 2005 Université Laval Québec
 Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* Mill.)

Fig. 5.2 Radial distribution of fiber length at breast height from small (S), medium (M), and large (L) diameter plantation grown trees. (a) *Eucalyptus grandis* (14 years old, mean DBH of 21.7, 28.0, and 37.9 cm, respectively, n=6 trees/size class) showing dependence of fiber length on cambial age, not stem diameter. (b) *Acacia auriculiformis* (11 years old, mean DBH of 14.1, 19.1, and 25.8 cm, respectively, n=4 trees/size class) showing dependence of fiber length on stem diameter, not cambial age (From Kojima et al. 2009. Used with permissions)



Lachenbruch, B., Moore, J. R., & Evans, R. (2011). Radial variation in wood structure and function in woody plants, and hypotheses for its occurrence. *Size- and age-related changes in tree structure and function*, 121-164.

Histoire d'âge ou de diamètre ?

Allez sur wooclap.com et utilisez le code **MASTERCLASSBOIS**



Le bois juvénile



1 Est le bois le plus vieux de l'arbre

0% 0



2 Est une transition graduelle de la phase juvénile à la phase adulte

0% 0

Cliquez sur l'écran projeté pour lancer la question

3 Est un bois jeune qui laisse ensuite la place au duramen

0% 0



Aubier et duramen

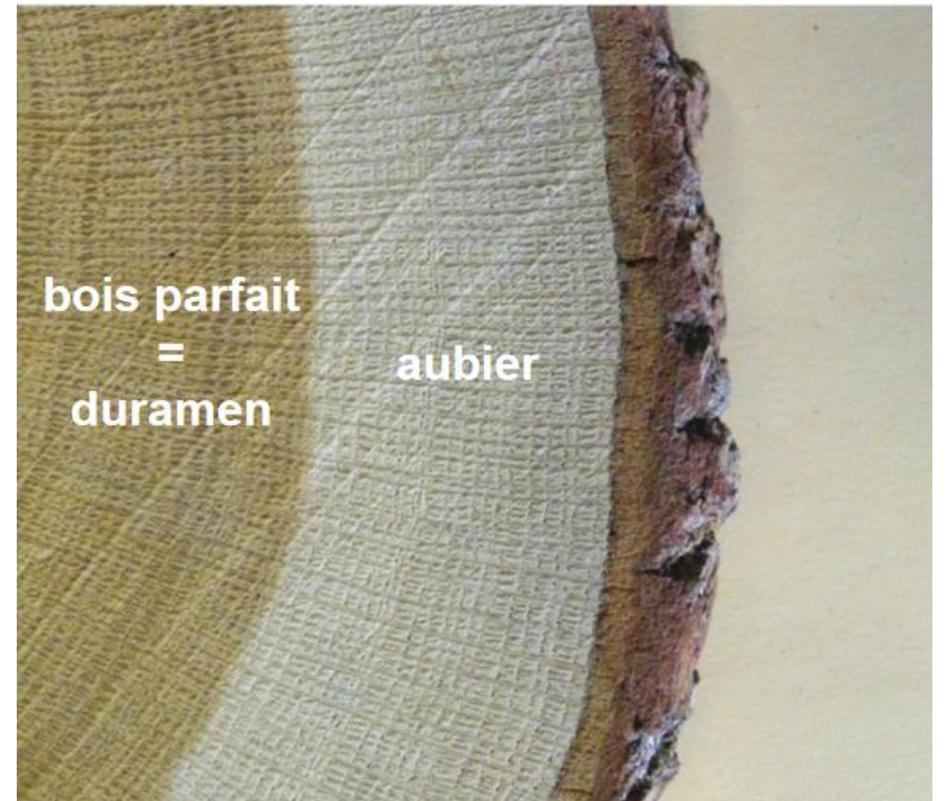
Aubier = bois périphérique, mécaniquement porteur (flexion), conduit la sève brute, contient des cellules vivantes (parenchymes) capables de transporter et stocker des réserves (amidon) ou de synthétiser des composés de défense.

Duramen = toutes les cellules sont mortes, le bois est biologiquement terminé (bois « parfait »). Peu fonctionnel dans l'arbre, ne se défend pas mais c'est pas si grave (un arbre creux peut vivre longtemps).

Illustrations issues du MOOC Anatomie des Bois

Marie Christine Trouy

<https://www.fun-mooc.fr/fr/cours/anatomie-du-bois/>



Tronc de sapin creux
Seul l'aubier a résisté

Aubier et duramen

Illustrations issues du MOOC Anatomie des Bois, Marie Christine Trouy

Avant de mourir les dernières cellules vivantes peuvent parfois sécréter des molécules « extractibles » qui bouchent les vaisseaux, ou qui protègent le duramen en lui donnant une couleur reconnaissable.

Une fois que l'arbre est mort, l'aubier n'est plus fonctionnel, il ne se défend plus et est moins résistant que le duramen aux attaques de microorganismes. Souvent l'homme n'utilise que le duramen en matériau.



Chêne abattu
Les champignons de pourriture attaquent l'aubier.



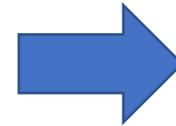
Bois à aubier différencié et bois à aubier non différencié



La caractérisation des **propriétés technologiques** du bois se concentrent sur **le duramen**

Alors que les **propriétés fonctionnelles** du bois dans l'arbre concernent **l'aubier**

Pas de grande différence pour les propriétés mécaniques de rigidité et résistance (concerne la structure du bois issu du cambium et ne change pas avec la mort des parenchymes, le duramen commence toujours par être aubier)



Par exemple tout ce qu'on a dit sur le bois de réaction ou l'effet de la largeur de cerne s'applique.

Mais les propriétés technologiques de viscosité, de couleur, de résistance aux champignons et insectes sont très dépendantes de la teneur en extractibles et donc proviennent du processus de duraminisation, sans grand lien avec les fonctions du bois dans l'arbre.

Allez sur **wooclap.com** et utilisez le code **MASTERCLASSBOIS**



Quelles recherches pour espérer prédire les quantités et les qualités chimiques du duramen dans une ressource en Douglas ?



1

Observer et modéliser les variations du nombre de cernes duraminisés dans des forêts de Douglas d'âge différents

0%

0



2

Comprendre les mécanismes biologiques qui contrôlent la mort des parenchymes.

0%

0



Cliquez sur l'écran projeté pour lancer la question

3

Caractériser les extractibles formés dans le duramen de Douglas dans des forêts variables (age des arbres, sol, climat, sylviculture, provenance) variées.

0%

0



4

Comprendre les mécanismes de biosynthèse des différents types d'extractibles

0%

0



Comprendre, prédire les variations des propriétés du duramen qui viennent de la synthèse des extractibles :

Observer les patrons de variations et comprendre le processus biologique de duraminisation, son contrôle génétique et environnemental.

Peu étudié (bien moins que la formation du bois par le cambium)

Quelques études « fondamentales » de compréhension

Des observations sur les bois les plus utilisés. Difficile d'en sortir des idées générales.

cf

Kampe, Andreas, and Elisabeth Magel. 2013 "New insights into heartwood and heartwood formation." *Cellular aspects of wood formation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. 71-95.

Taylor, A. M., Gartner, B. L., & Morrell, J. J. 2002. Heartwood formation and natural durability-a review. *Wood and fiber science* Vol 4. 587-611.

Les messages à emporter chez soi

- ✓ Les propriétés technologiques du bois sont variables parce que l'arbre est vivant
- ✓ Les variations viennent du génotype (espèce, provenance) mais aussi de l'environnement (compétition avec les autres arbres, sécheresse) et tout simplement de la croissance
- ✓ Quelques notions structurent ces variations : bois de réaction, nodosité et branchaison, effet de la largeur de cerne, bois juvénile, aubier et duramen.
- ✓ Les chercheurs sur la qualité des bois (liée à l'usage) renvoient des questions aux chercheurs en biologie et écologie des arbres : qu'est ce qui modifie la formation du bois par le cambium ou la duraminisation? Quel sens de ces variations par rapport au fonctionnement du bois dans et pour l'arbre ?
- ✓ Avec les menaces du changement climatique, une nouvelle question c'est désormais : Comment les propriétés du bois sont modifiées dans l'arbre sur pied au cours des dépérissements ?

Une question ouverte

Allez sur wooclap.com et utilisez le code **MASTERCLASSBOIS**



Comment adapter la transformation des bois à une matière première variable ?




Votez !
0
réponses reçues

