



La genèse du bois

Bernard Thibaut CNRS

Equipe Mécanique de l'Arbre et du Bois



Photo J. Thiel.



Déroulement du cours

- Introduction
- Construction de l'arbre par la croissance du bois
- Déconstruction de l'arbre et récupération du bois matériau
- Gestion forestière et ressource en bois
- Conclusion

Introduction

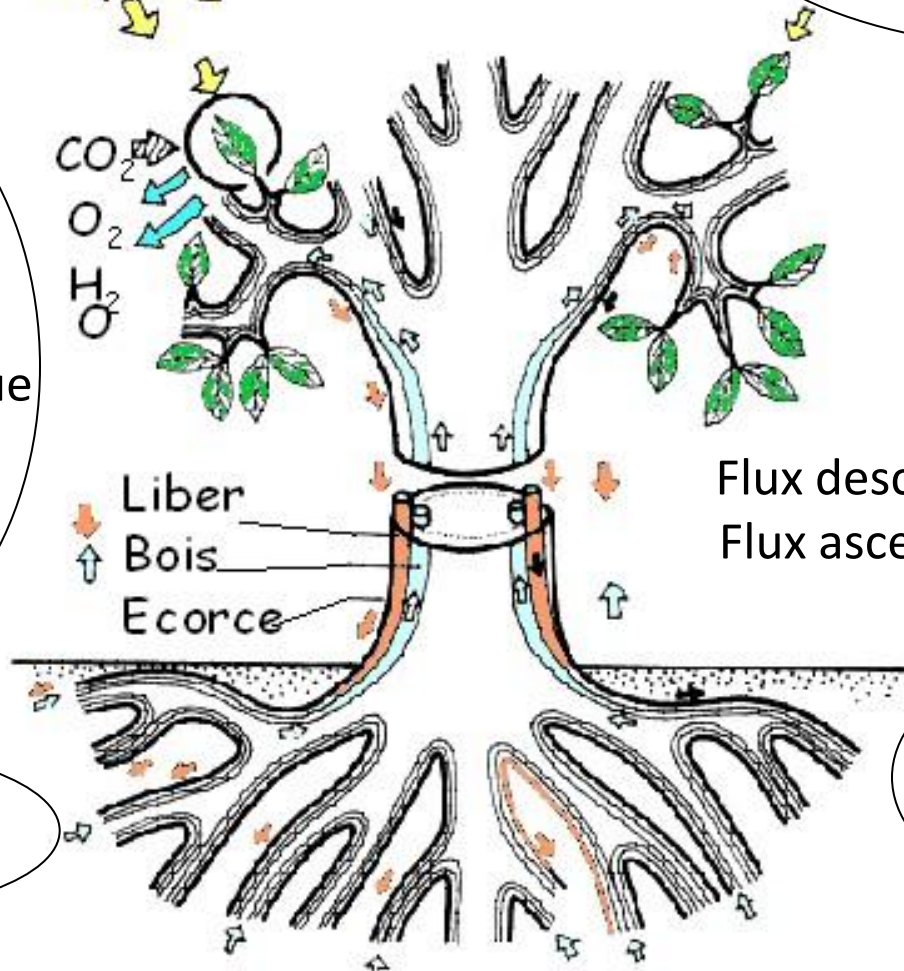
- Différence de point de vue entre l'arbre et l'ingénieur
- La croissance du bois construit l'arbre et lui permet de gérer ses problèmes mécaniques
- La naissance du matériau bois de l'ingénieur est une déconstruction de la structure existante
- Le bois est une ressource renouvelable issue de la gestion forestière

Le fonctionnement global de l'arbre



Feuillage =
Elaboration matière ligneuse
Respiration
Transpiration

Tronc =
Tuyauterie
Soutien mécanique
Stockage



Flux descendant : sève élaborée
Flux ascendant : sève brute

Eau
Sels minéraux

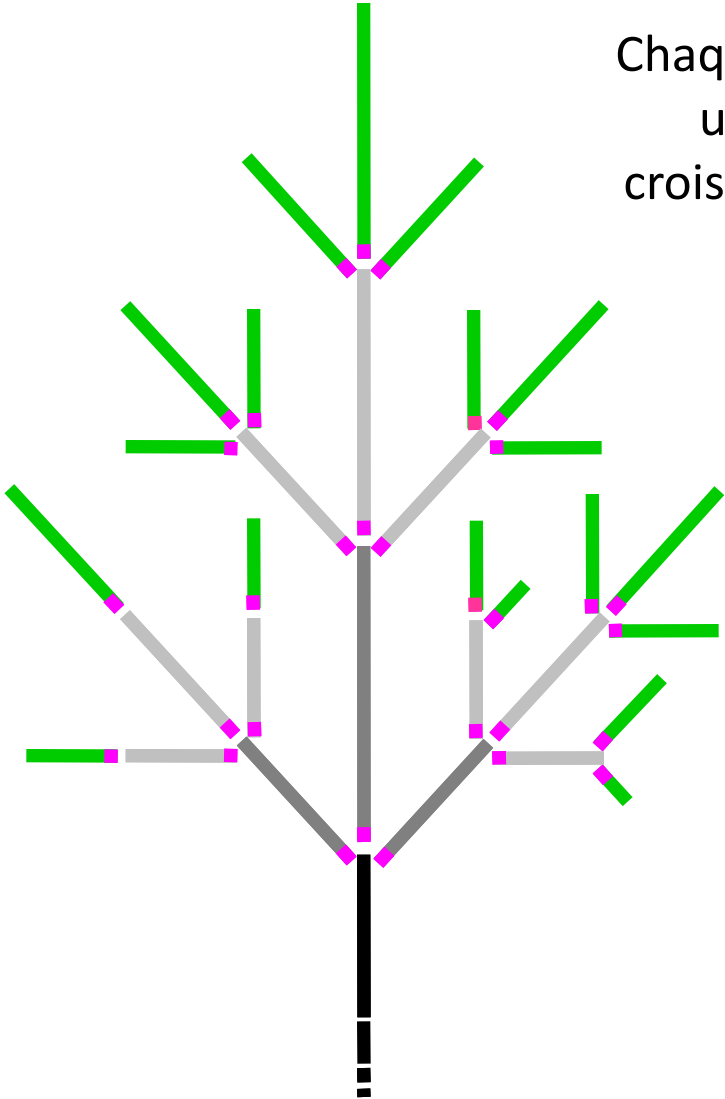
Système racinaire =
collecteur de
matière première

Croissance primaire, architecture

- Bourgeon terminal, croissance en longueur, unités de croissance
- Bourgeons latéraux, ramifications, ordre des unités de croissance

La croissance primaire: mise en place des axes et des unités de croissance

Chaque segment est une unité de croissance annuelle

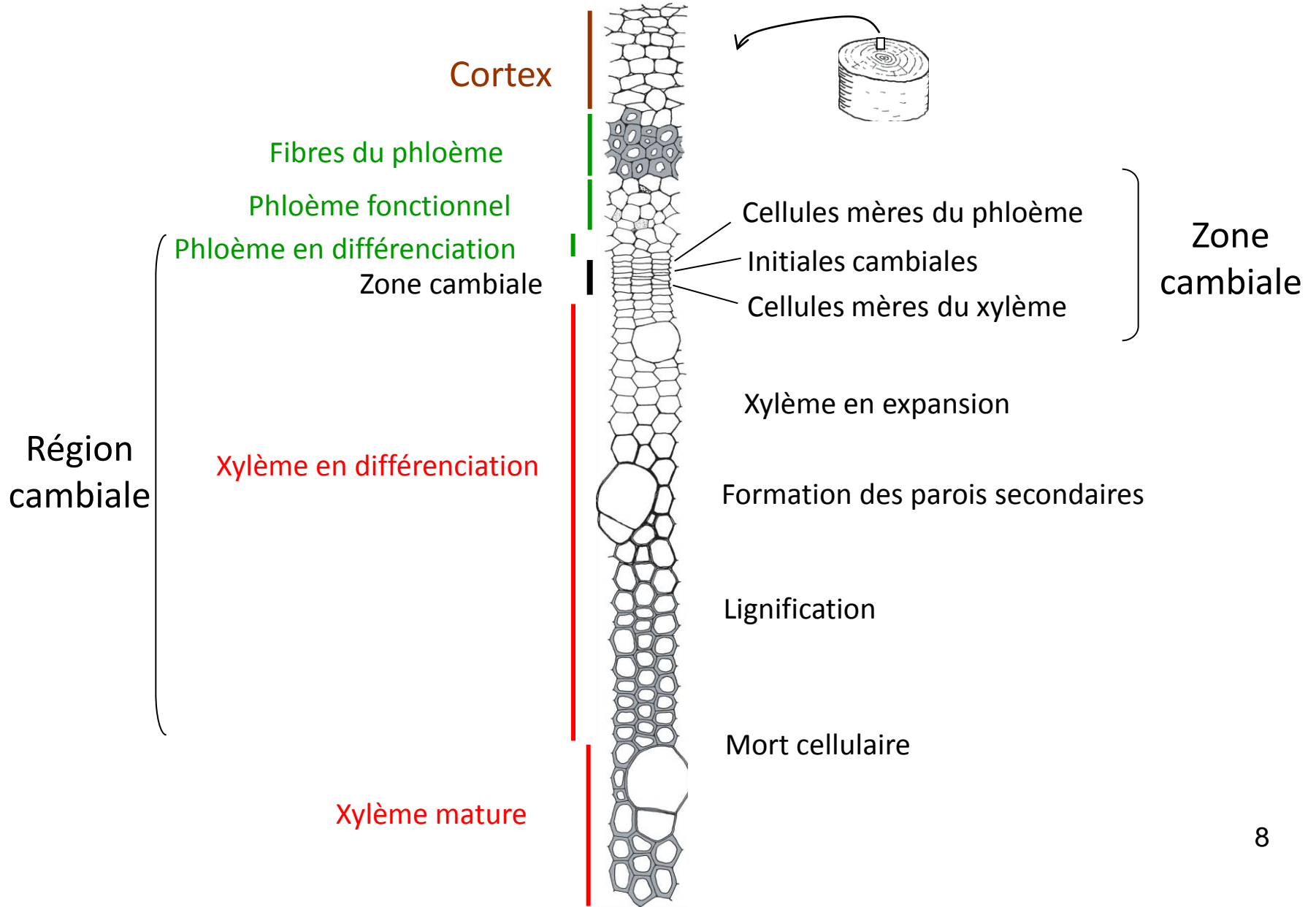


- Année 4
- Année 3
- Année 2
- Année 1
- Bourgeon

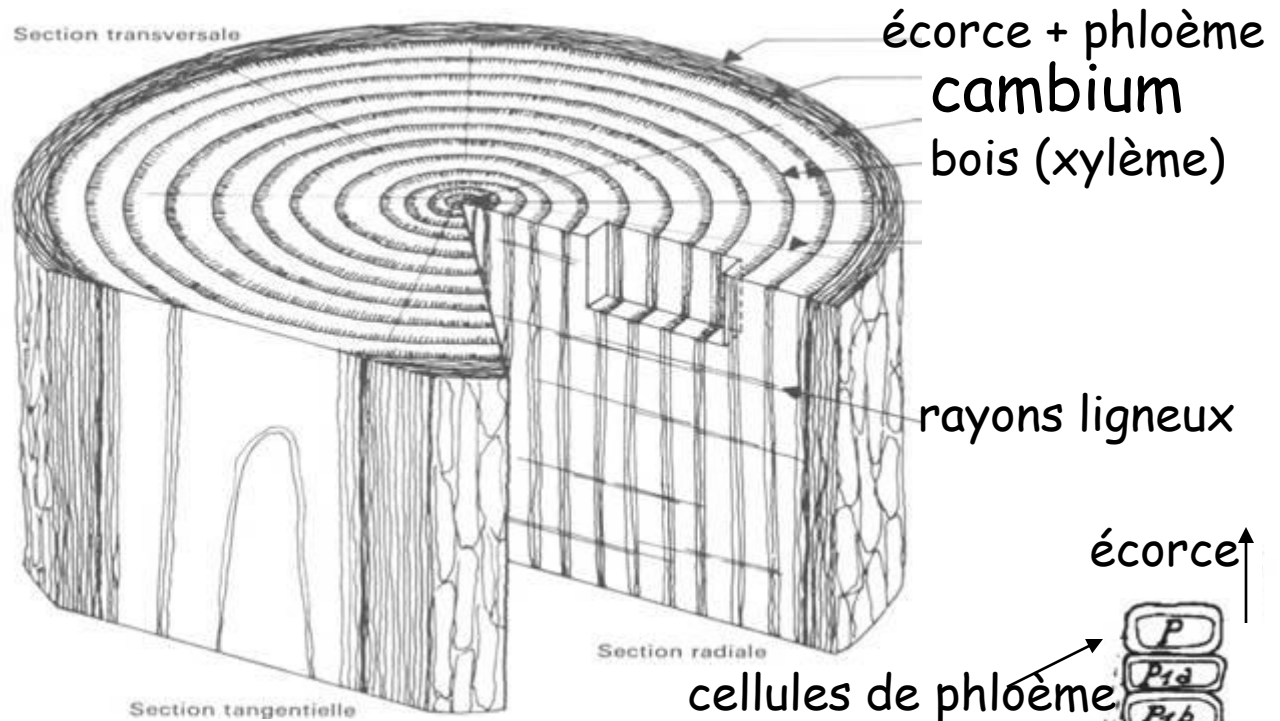
Croissance secondaire, plan ligneux

- Le cambium et la croissance en diamètre
- Couches d'accroissement (cernes)

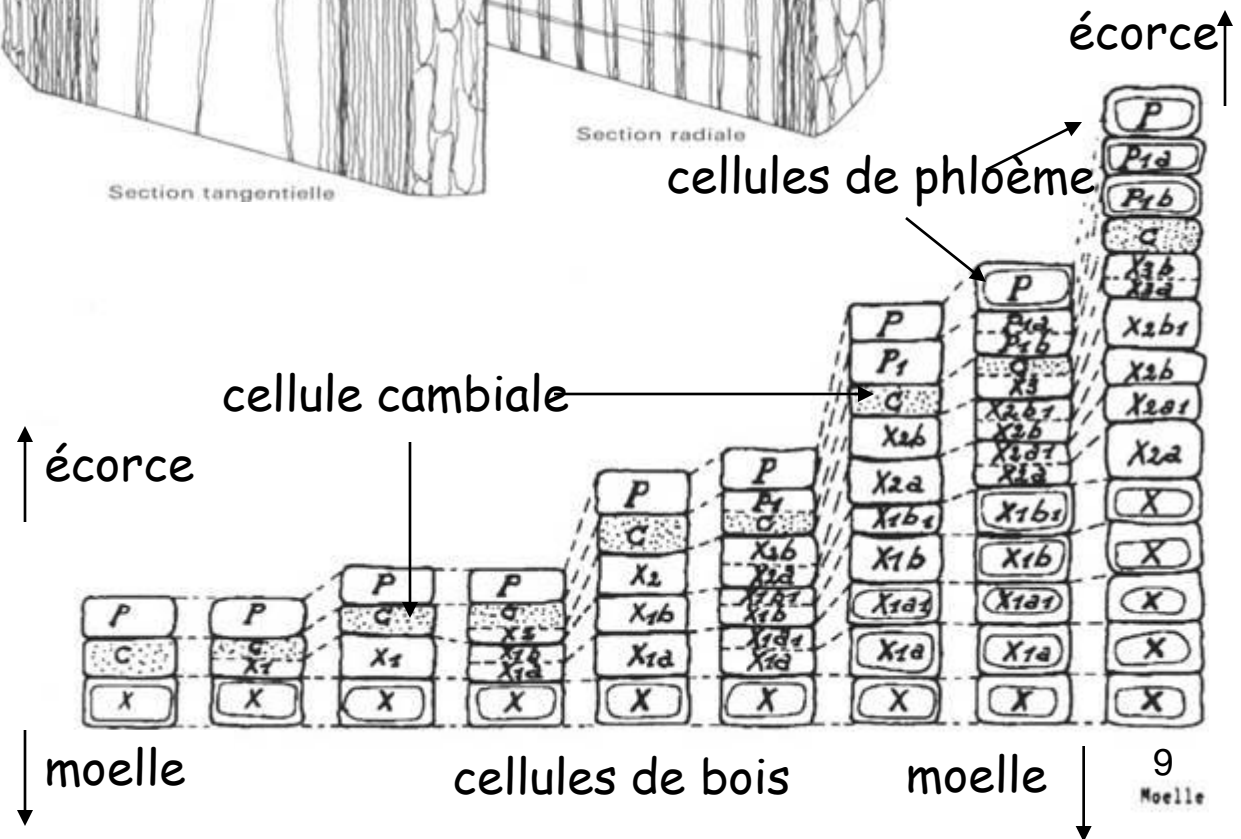
Fabrication du bois par le cambium



Le cambium

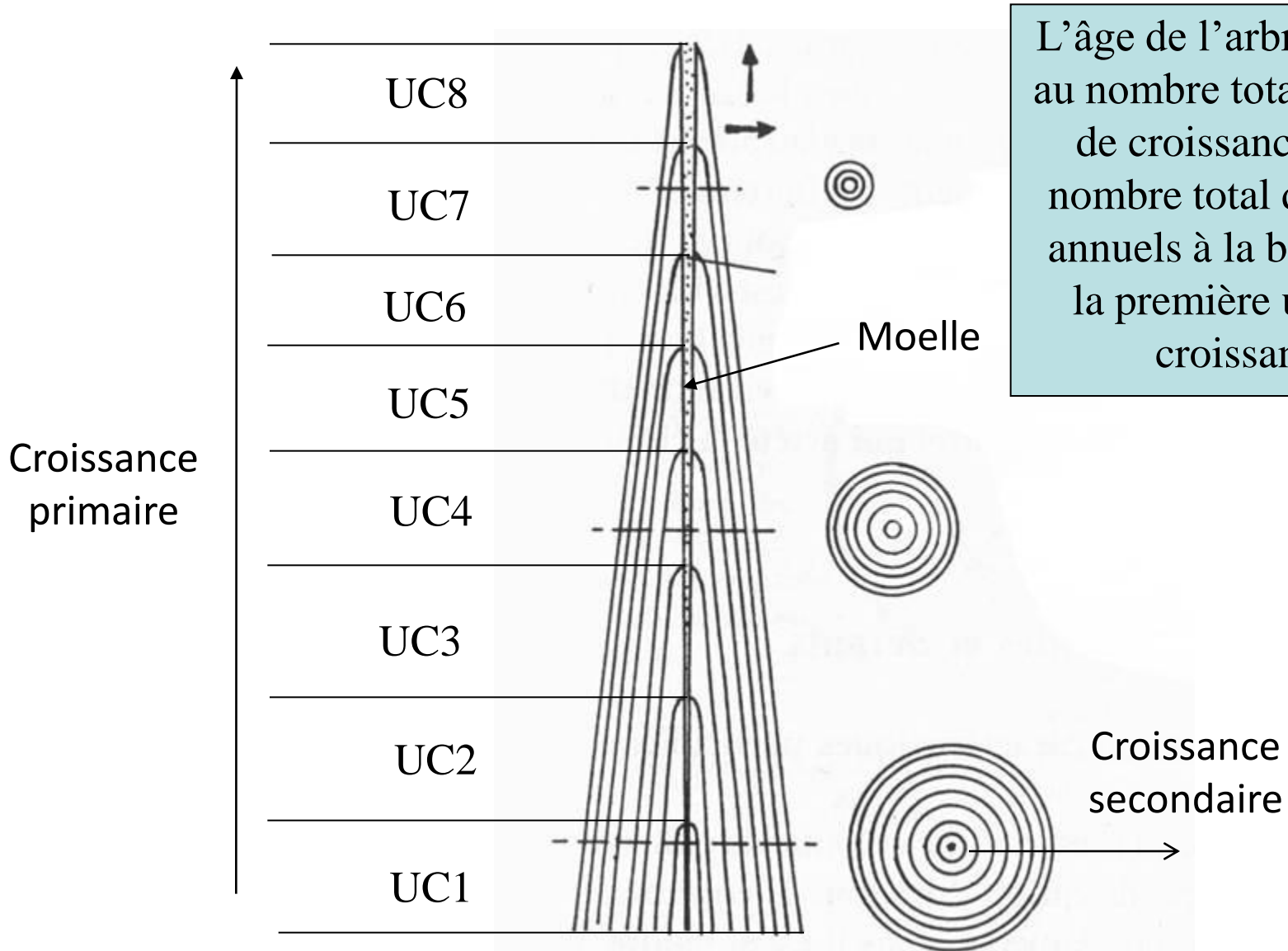


- tissu générateur issu du bourgeon
- surface active indéfiniment croissante



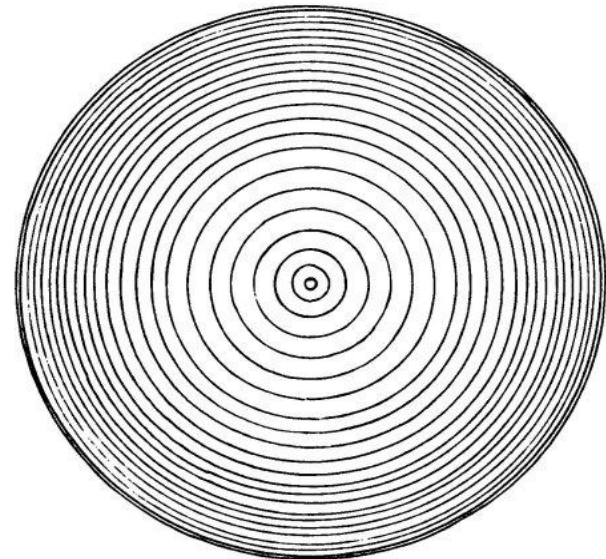
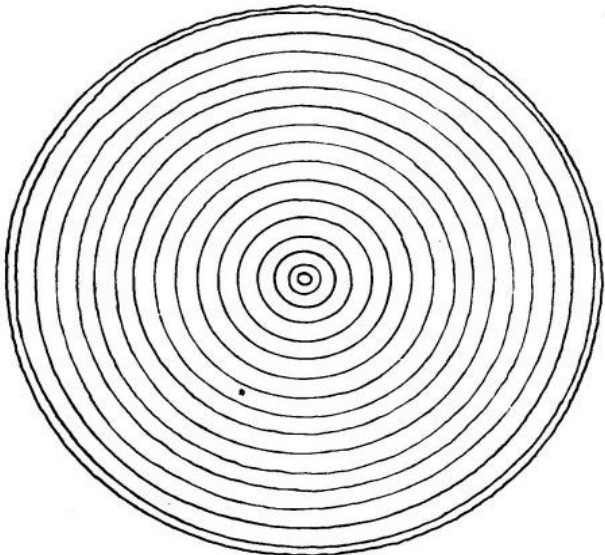
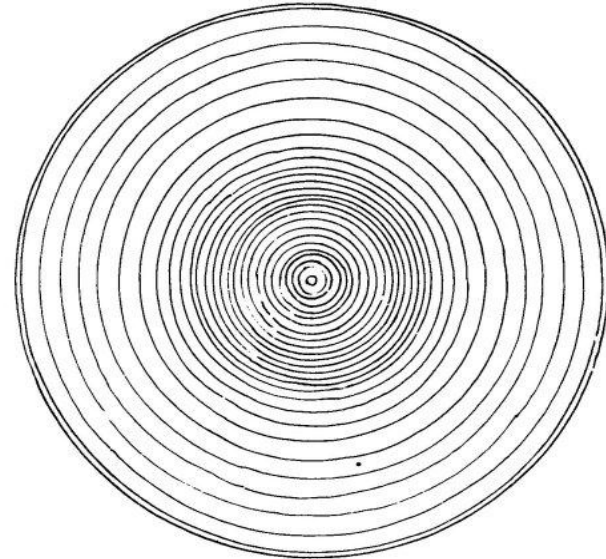
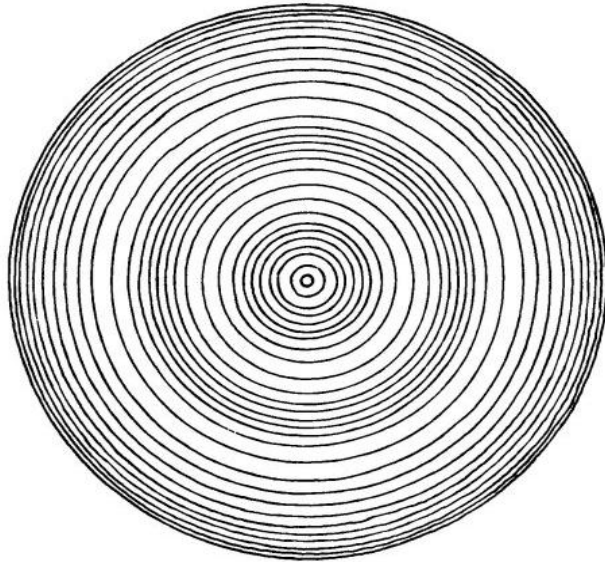
La division cellulaire du cambium bifacial

L'empilement des unités de croissance et des couches d'accroissement



L'âge de l'arbre est égal au nombre total d'unités de croissance ou au nombre total de cernes annuels à la base, dans la première unité de croissance

Cernes et vitesse de croissance de l'arbre



Le tronc et les branches vont grossir pendant toute leur vie par l'extérieur

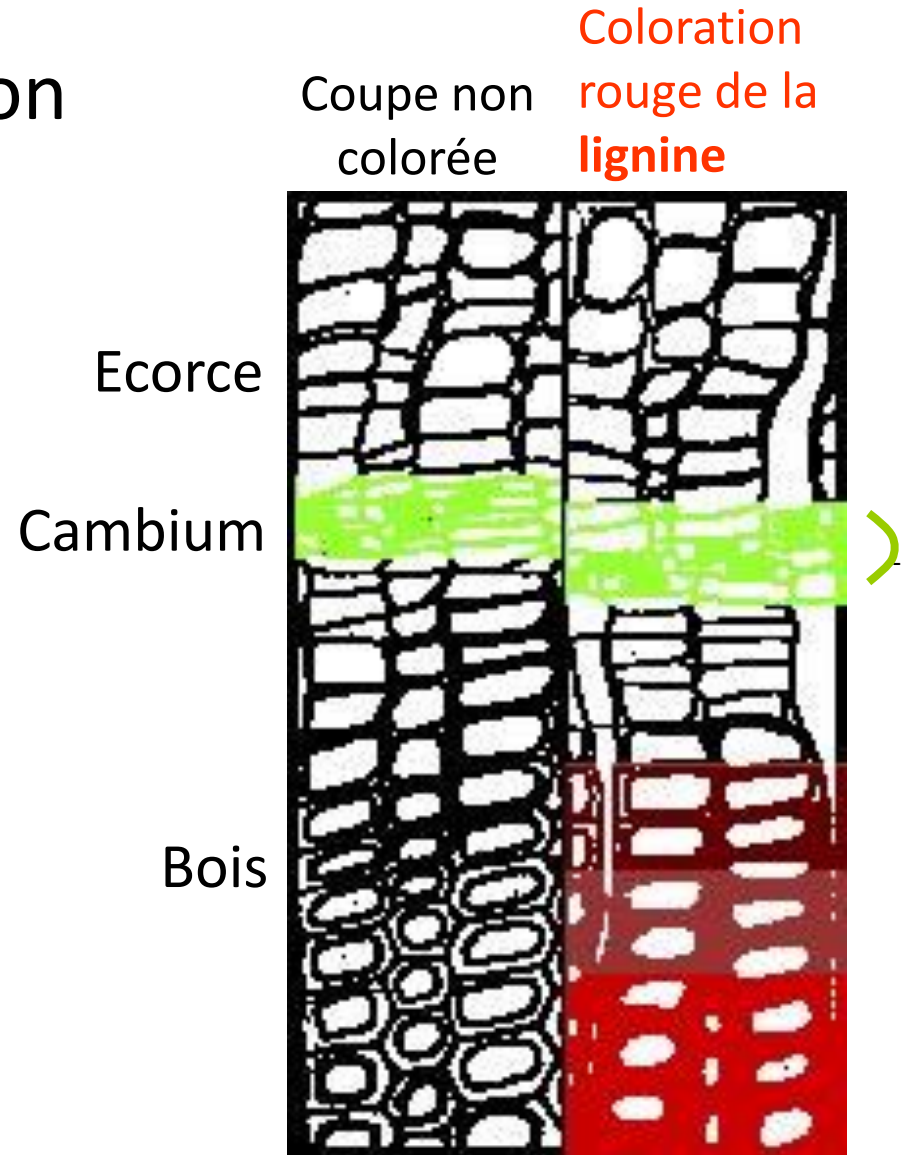


La différenciation cellulaire après la division

- Mécanisme qui dure environ 2 semaines
- Les cellules issues de la division se spécialisent (fibres, tracheïdes, vaisseaux) et prennent leur forme finale
- L'épaississement de la paroi des fibres se termine par leur mort (maturation)

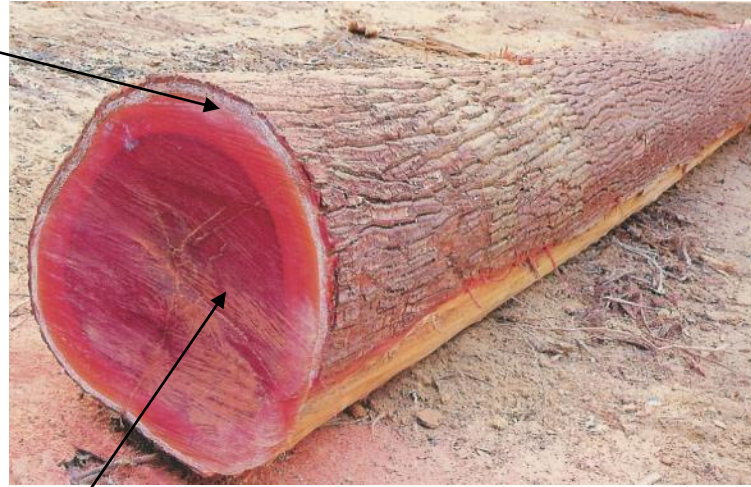
Maturation et lignification

- la formation de la paroi secondaire s'achève par la lignification
- les monomères de la lignine pénètrent entre les polysaccharides déjà en place puis polymérisent in-situ

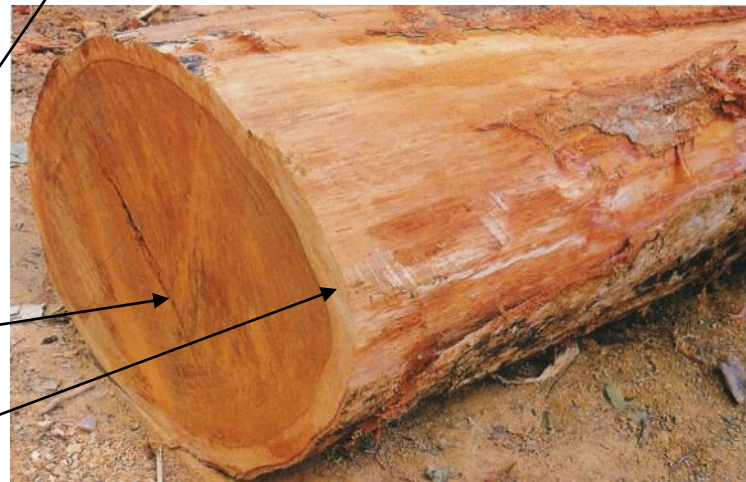


La duraminisation (*duramen = bois parfait*)

Aubier



Duramen



Aubier

La duraminisation

- Processus actif accompagné de biosynthèse de nouvelles molécules
- Mort des dernières cellules vivantes du bois
- Déclenchement à un âge du bois pouvant varier de quelques années seulement à plusieurs dizaines d'années

Quid des espèces sans duramen classique?

Durée de vie et vieillissement du bois

- Un bourgeon vit aussi longtemps que l'axe auquel il donne naissance
- Un bourgeon donne naissance à un cambium dès la création d'une unité de croissance
- Le cambium vit aussi longtemps que son unité de croissance
- Un cerne de bois subit un vieillissement mécanique depuis sa naissance
- Un cerne de bois parfait subit un vieillissement chimique depuis sa duraminisation

Les âges du bois

(l'âge est compté depuis la naissance)

- Age du bourgeon terminal: unités de croissance, juvénilité primaire
- Age du cambium dans une unité de croissance: juvénilité secondaire
- Age du bois depuis sa mise en place: contraintes résiduelles
- Age du bois parfait depuis sa duraminisation: durabilité naturelle

Rôle du bois dans la biomécanique de l'arbre

Contraintes et déformations

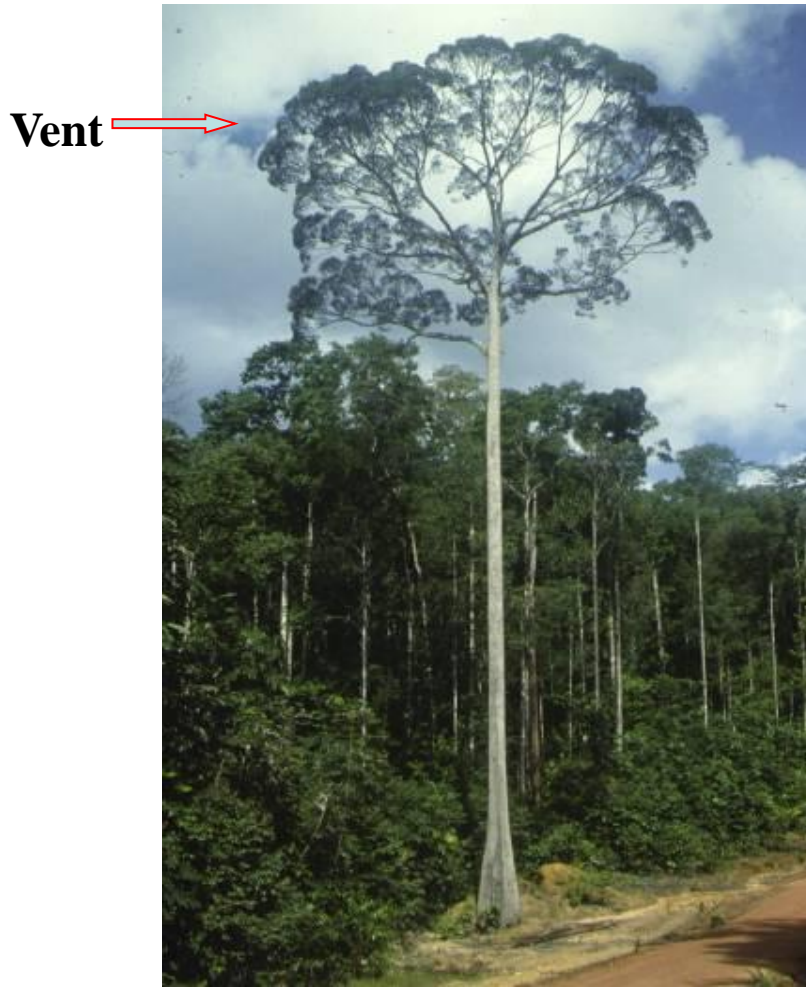
- Une déformation apparaissant dans un élément de matériau peut avoir son origine dans de nombreux phénomènes physiques, chimiques ou biologiques comme la dilatation thermique, le gonflement hygroscopique, la polymérisation d'une résine ou l'élongation d'une cellule... sans aucune action mécanique externe
- Si cette déformation est libre de s'exprimer, alors aucune contrainte n'apparaîtra dans le matériau
- Si cette déformation α ne peut pas s'exprimer, à cause de l'environnement externe, celui-ci doit exercer des forces extérieures sur l'élément de matériau, de manière à y produire exactement la déformation opposée $-\alpha$, avec un niveau local de contrainte $\sigma = -E * \alpha$

Générer des déformations qui ne peuvent s'exprimer, est un moyen de produire des contraintes dans un matériau, donc de générer des forces.

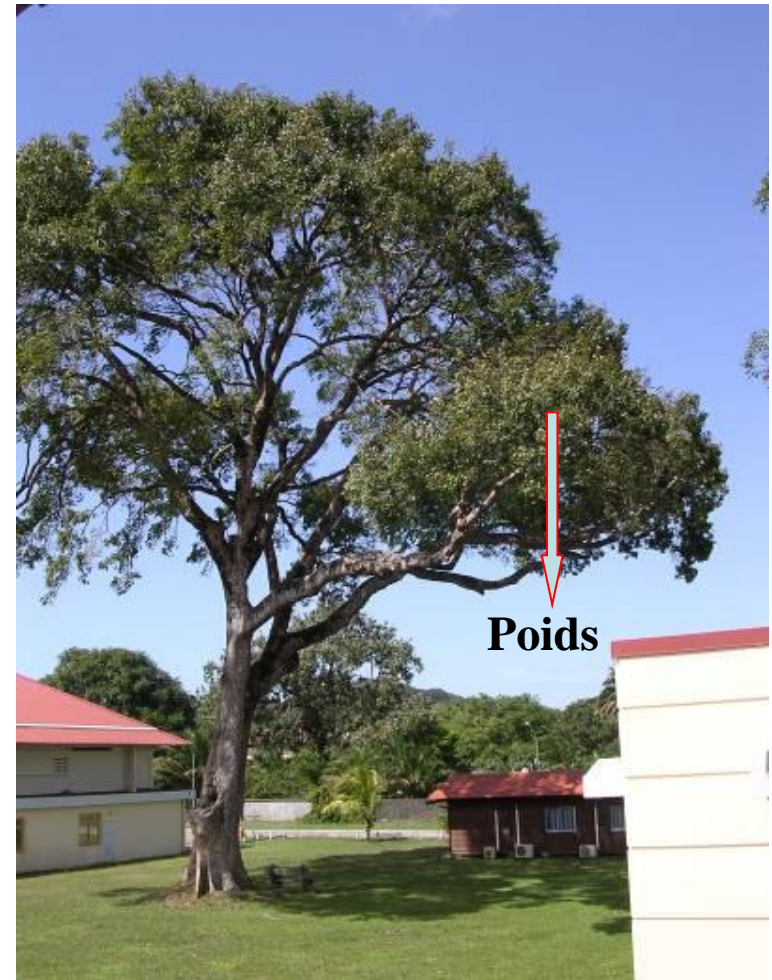
Les problèmes mécaniques qu'un arbre doit résoudre

- 1- Construire une structure, résister aux forces extérieures et maintenir la géométrie sur le long terme
- 2 – S'adapter aux aléas de son environnement

Construire une structure et résister aux forces extérieures



Grand arbre émergent en forêt guyanaise



Grosses branches horizontales d'acajou

La résistance à la flexion est le problème principal à résoudre à court et long terme

Adaptation aux aléas de l'environnement



Cecropia cherchant la lumière
entre un Manguier et un palmier



Restoration de la verticalité
après une chute accidentelle

La flexion active du tronc est le phénomène principal

Comment l'arbre gère les problèmes de flexion

La seule chose qu'un arbre puisse faire, au niveau du tronc ou des branches, c'est de croître en diamètre, mais il peut jouer sur:

- *Sa géométrie; section résistante, moment d'inertie, bras de levier*
- *La densité et le module d'Young de son bois*
- *La genèse de forces intérieures*
- *La séquence d'actions durant l'histoire mécanique*

Toutes ces actions sont le résultat de l'activité cambiale: division cellulaire puis différenciation, modulée localement

Croissance radiale locale

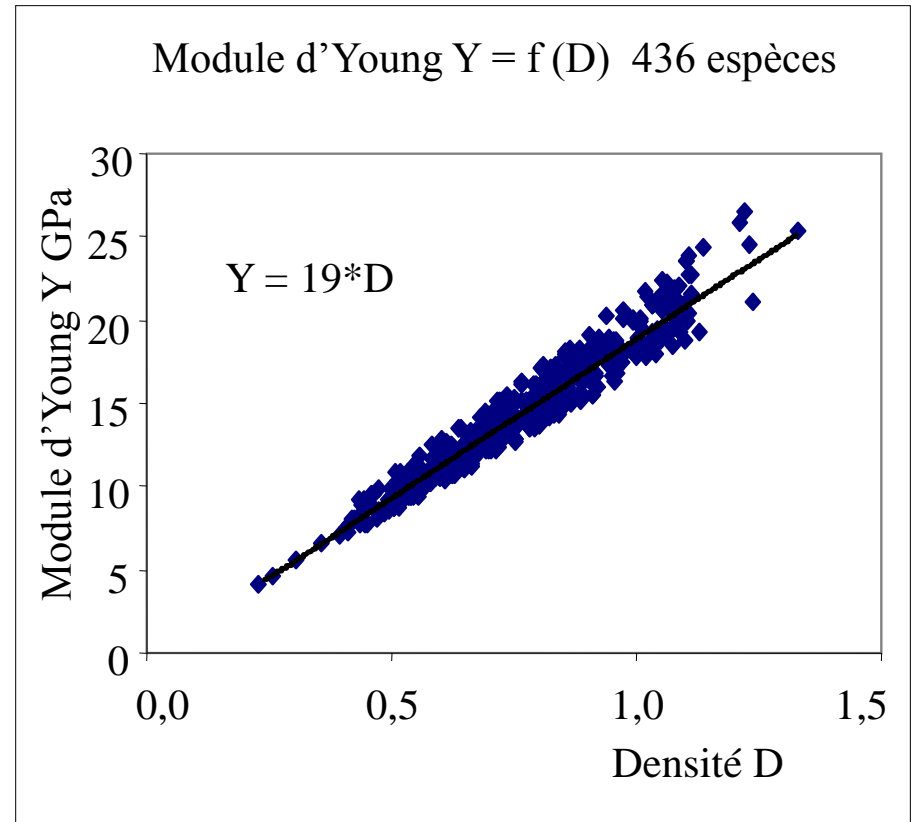
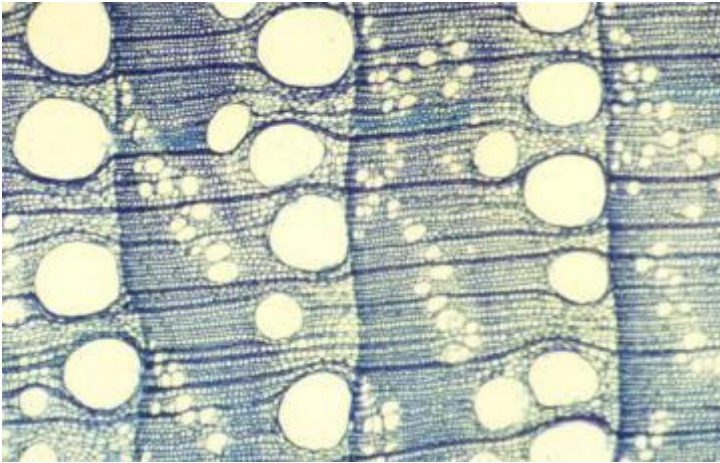
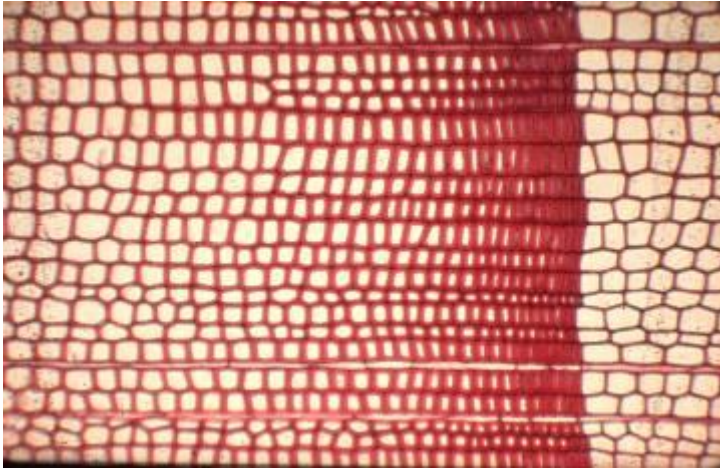


L'épaisseur de la couche annuelle peut être dix fois plus forte en des positions angulaires choisies



Changement des surfaces soumises aux forces
Changement du bras de levier de ces forces
Changement de localisation des poids
Changement des moments d'inertie

Densité



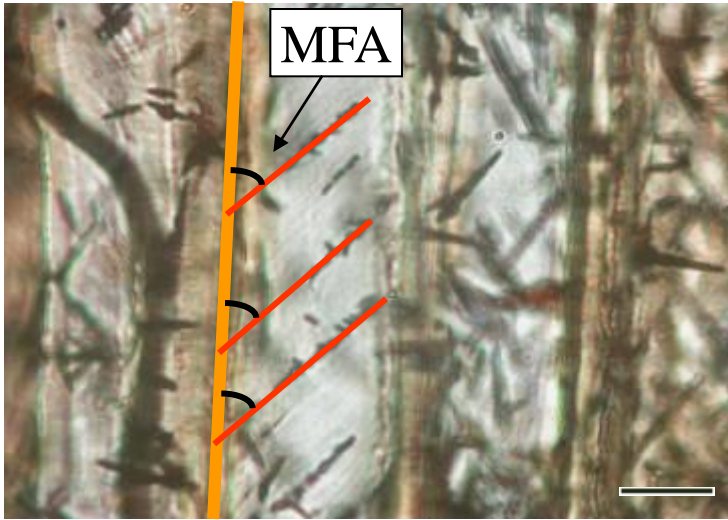
$$Y = E * D, E: \text{module d'élasticité spécifique}$$

Dans le plan ligneux, l'arbre peut changer la densité du bois du simple au double, voire plus, en jouant sur l'épaisseur de paroi, la taille ou la proportion des vaisseaux

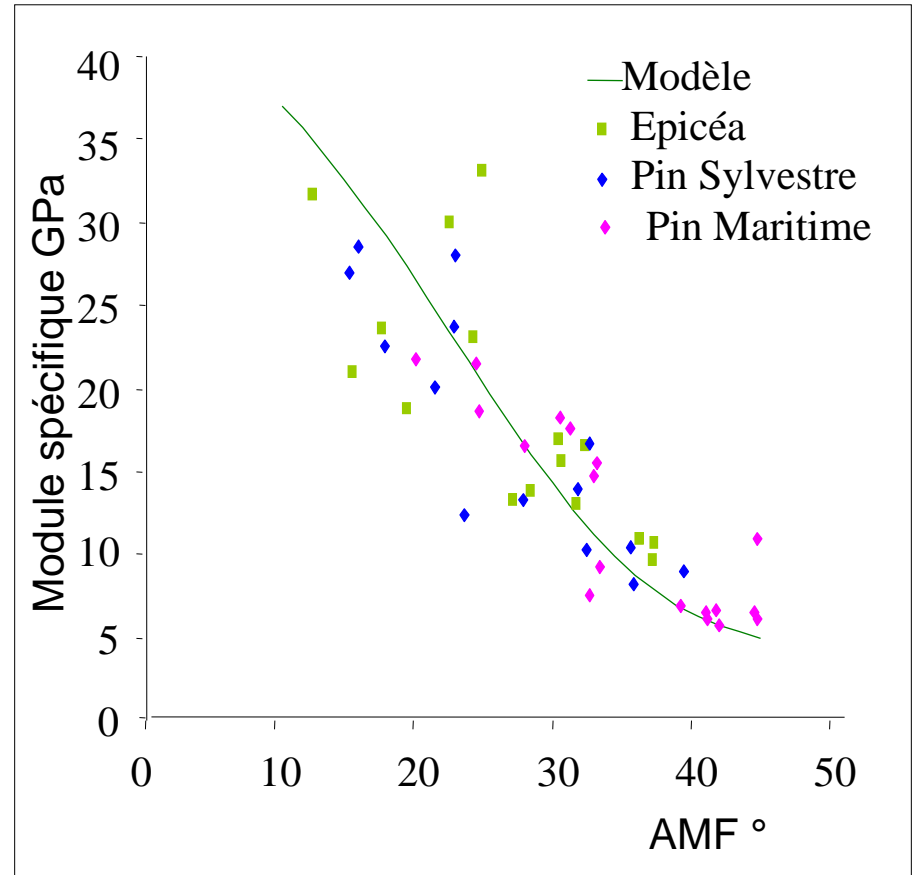


Changement de géométrie pour le même poids
Changement de module d'Young pour le même module spécifique

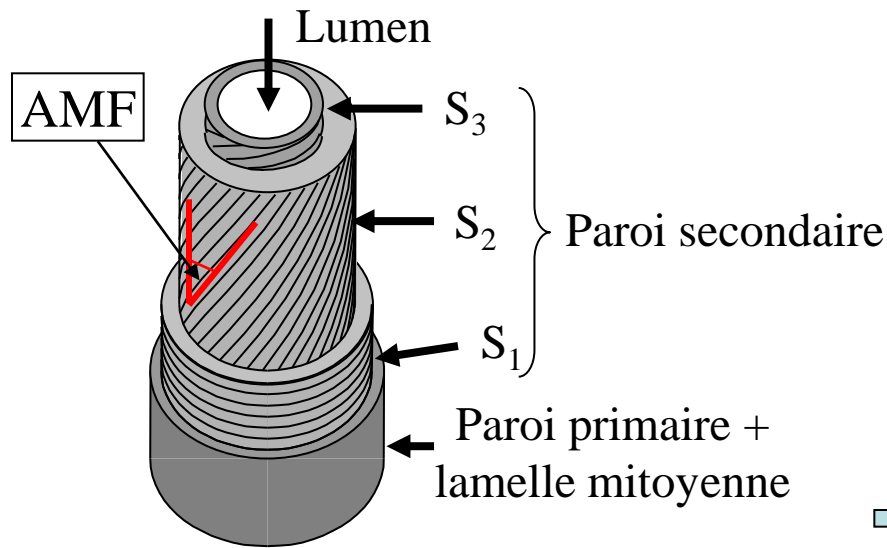
Module d'élasticité spécifique E



Mesure de l'angle des microfibrilles



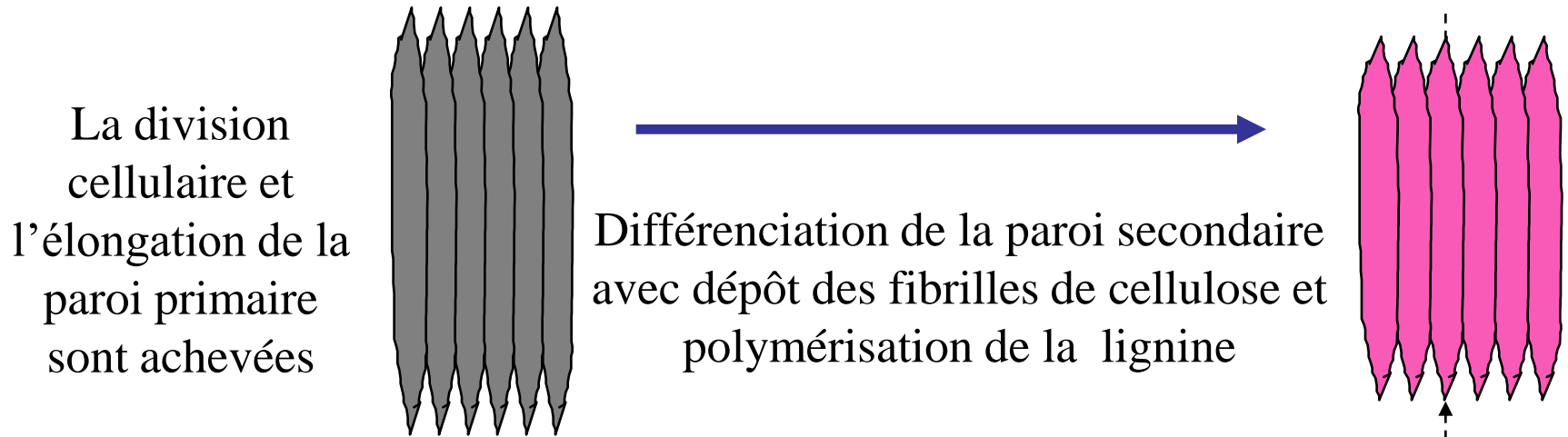
Changer l'angle des microfibrilles permet de changer le module spécifique de 1 à 6



Organisation de la paroi de la fibre

Modifier le module d'Young pour le même poids.

Mise en place de précontraintes

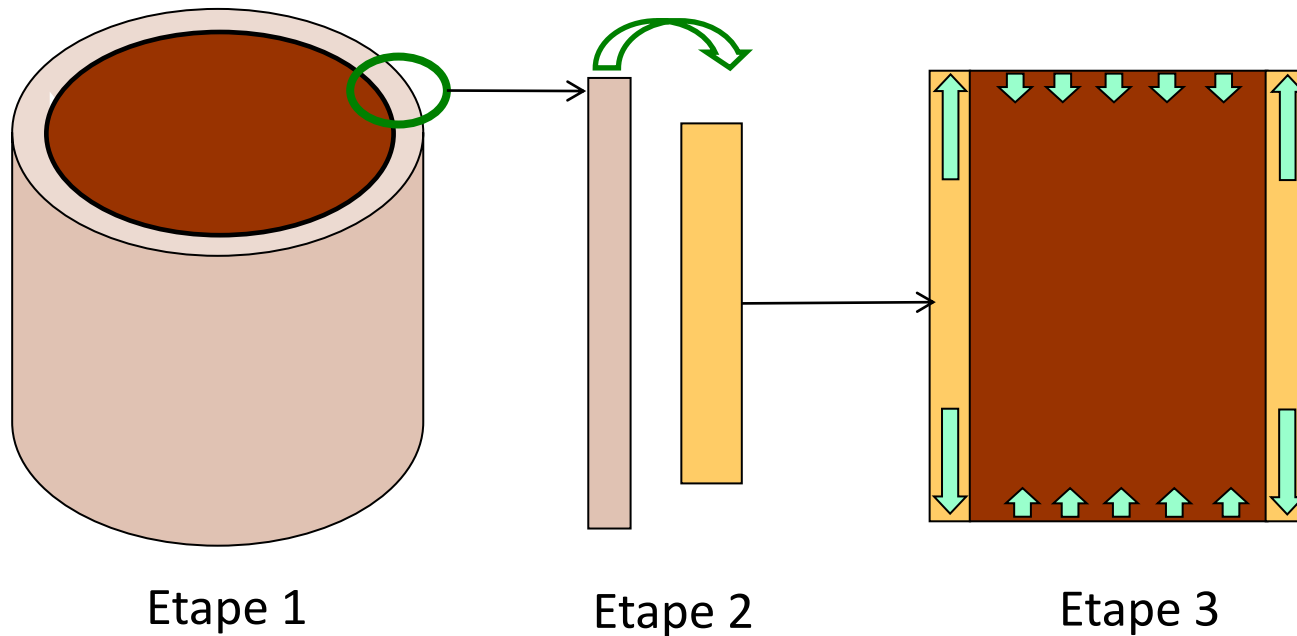


Dans une nouvelle couche de bois normal, les transformations biochimiques à la fin de la différenciation (maturation) produisent un très faible retrait α dans la direction axiale de la cellule (0,05%) alors que le module d'Young Y devient très grand (15 GPa). Le noyau de bois ancien sur lequel cette nouvelle couche est collée, empêche l'expression de ce retrait α

Genèse d'une contrainte dans la nouvelle couche de bois : $\sigma = Y * \alpha$ (10 MPa)

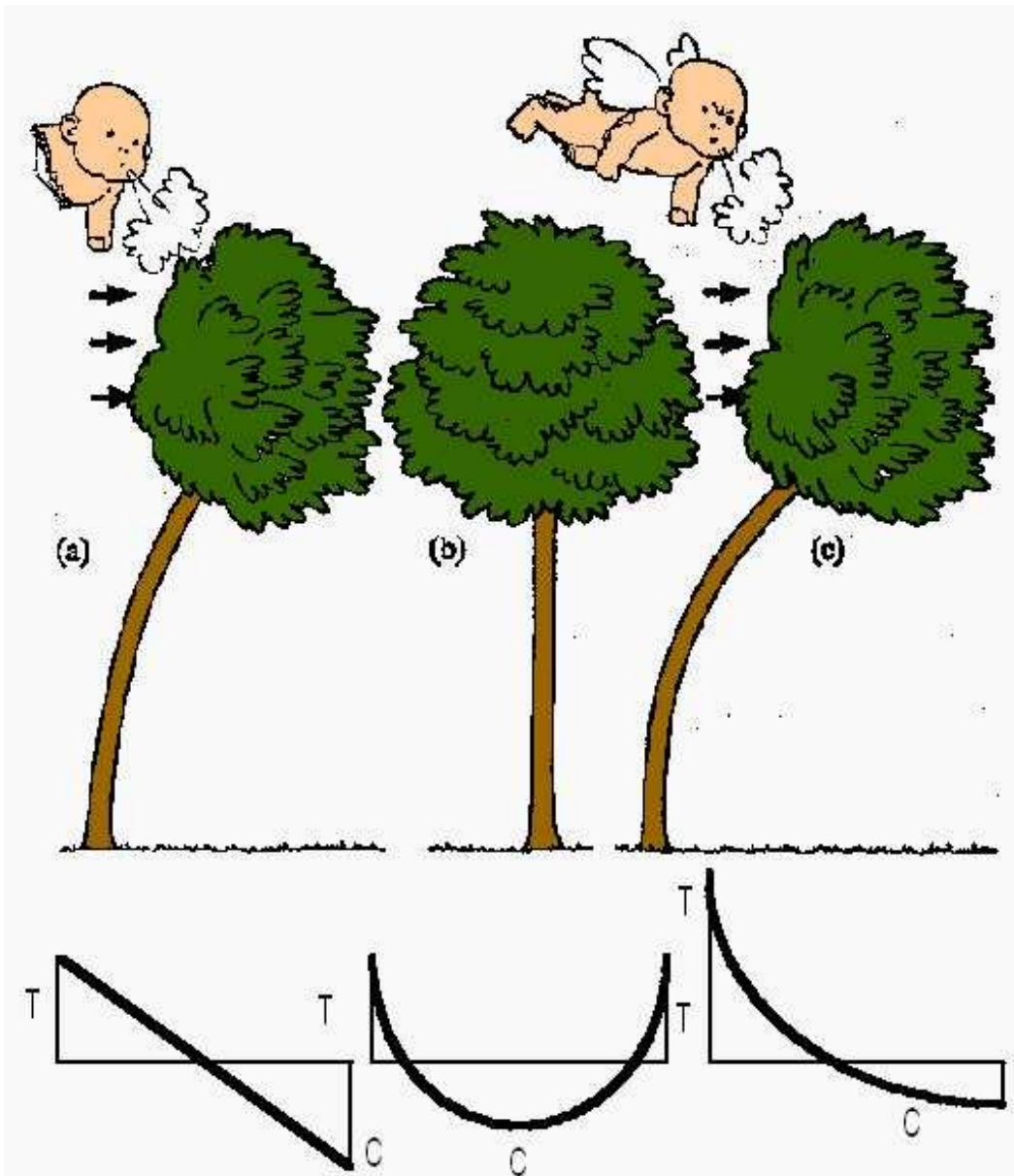
Création d'une force F dans chaque portion de couche de surface S : $F = S * Y * \alpha$
(1 KN pour chaque cm^2 de nouvelle couche de bois)

Genèse normale des contraintes axiales de maturation dans le bois



La genèse d'une nouvelle couche de bois crée une contrainte de tension élevée en périphérie compensée par un léger incrément de compression dans le noyau central

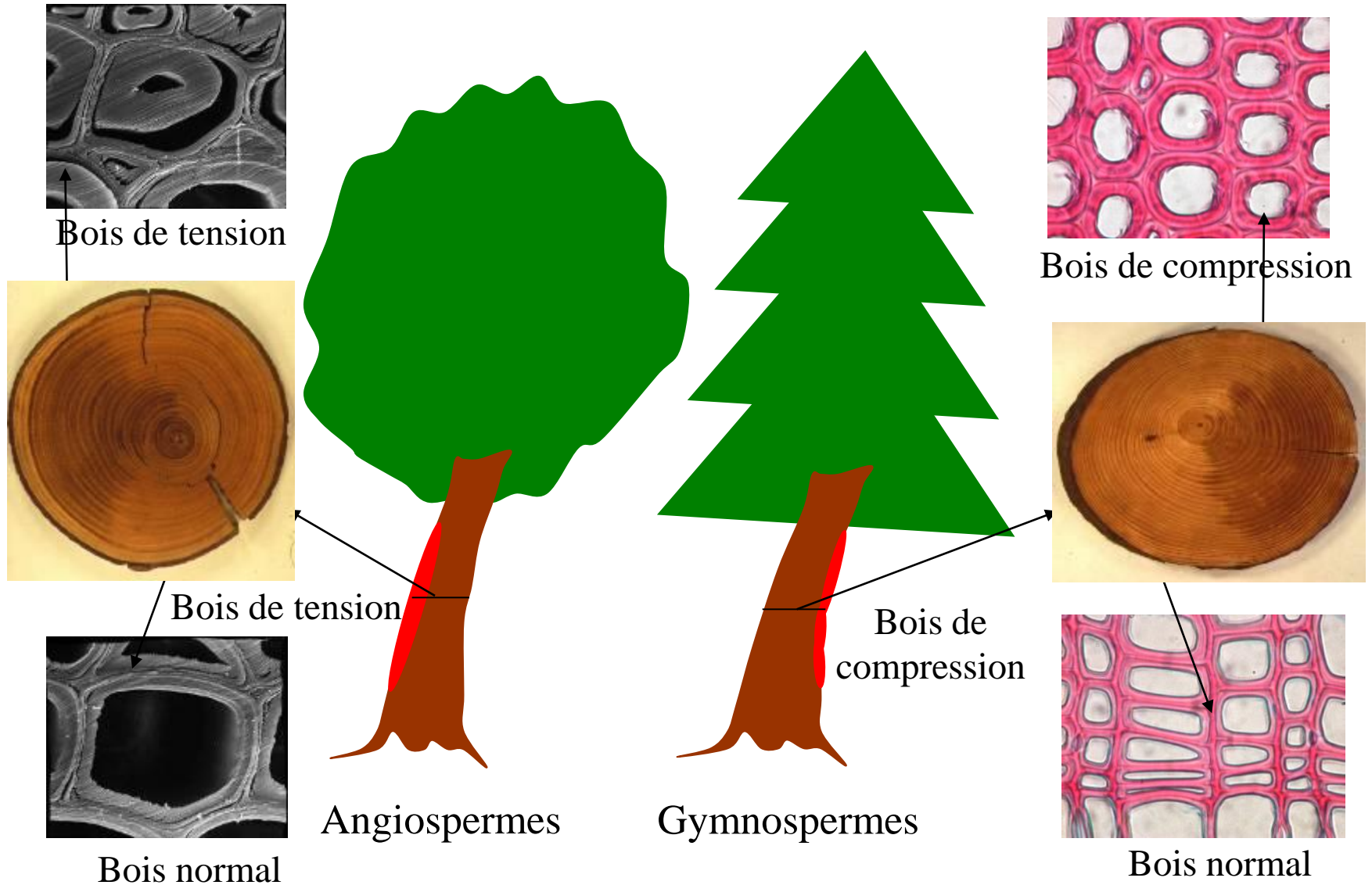
La précontrainte, un atout pour l'arbre



Le bois résiste au moins 2 fois moins en compression qu'en tension

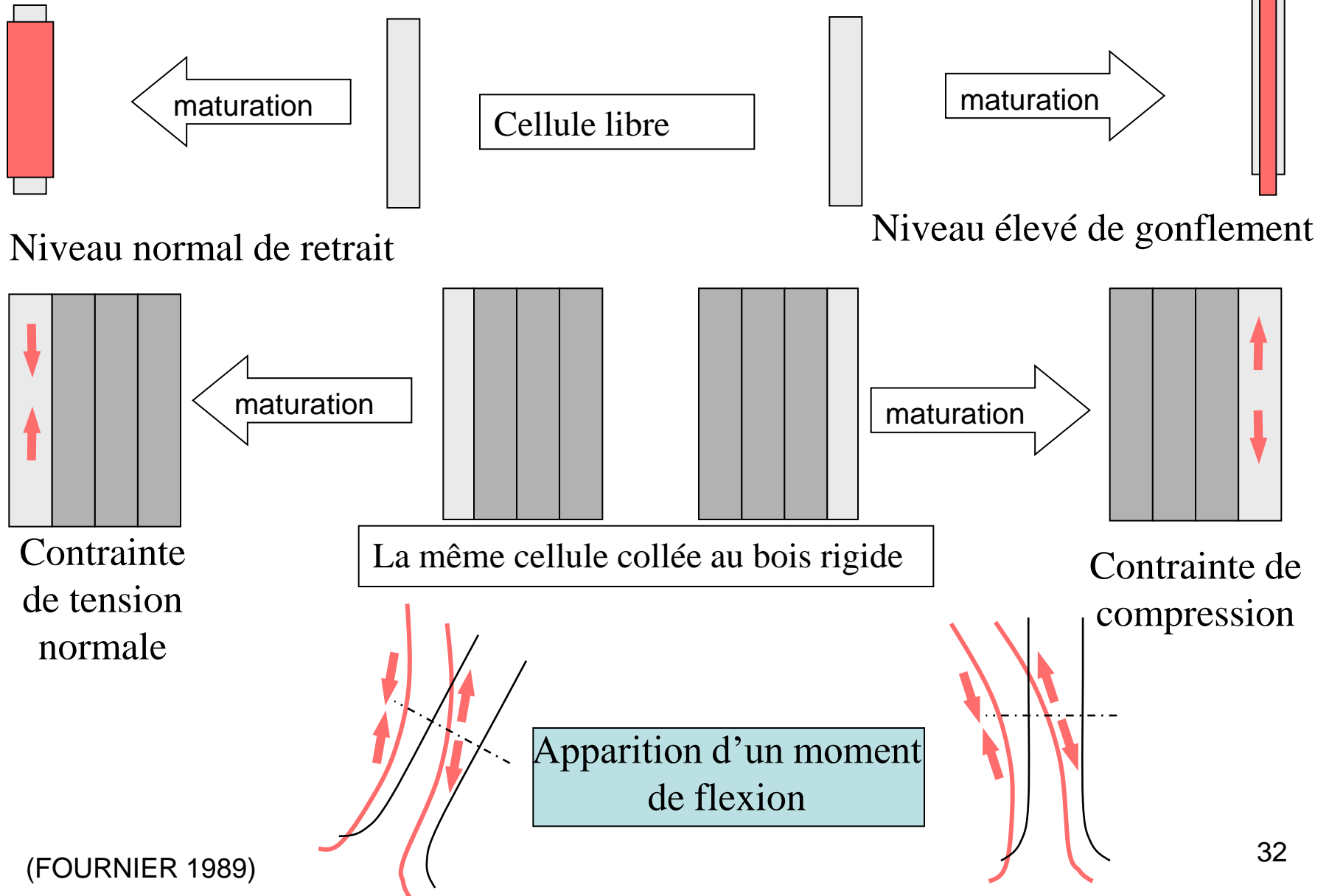
- (a) Arbre sans précontrainte soumis au vent
- (b) Arbre précontraint sans vent
- (c) Arbre précontraint soumis au vent

Créer un moment de flexion: bois de réaction



En dehors du bois normal, l'arbre peut produire du bois de réaction en n'importe quel endroit des tiges (tronc ou branches)

Bois de compression chez les gymnospermes

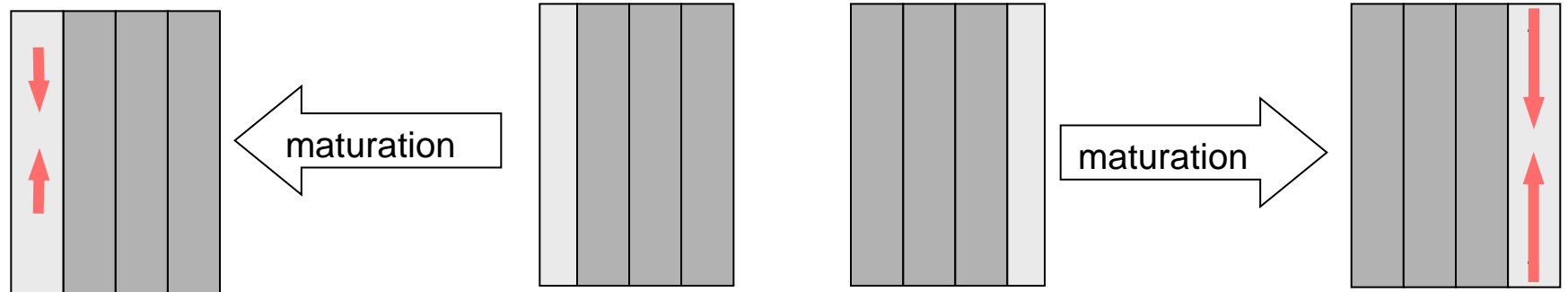


Bois de tension chez les angiospermes



Niveau normal de retrait

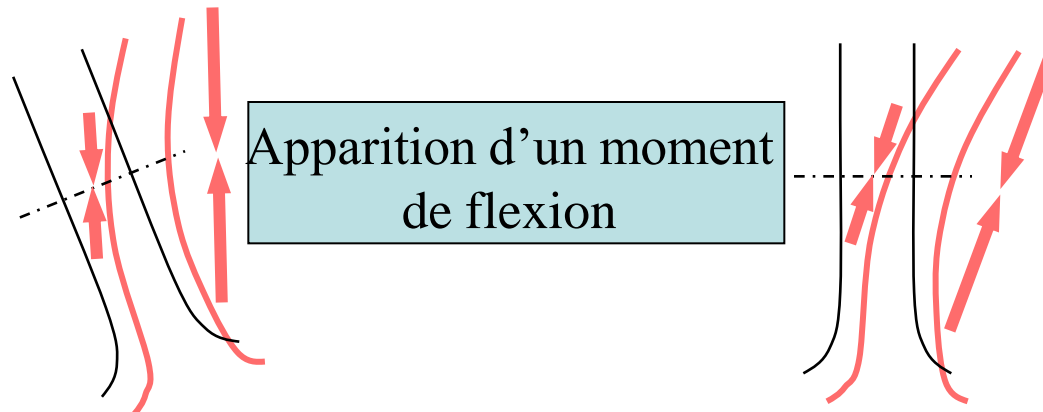
Niveau élevé de retrait



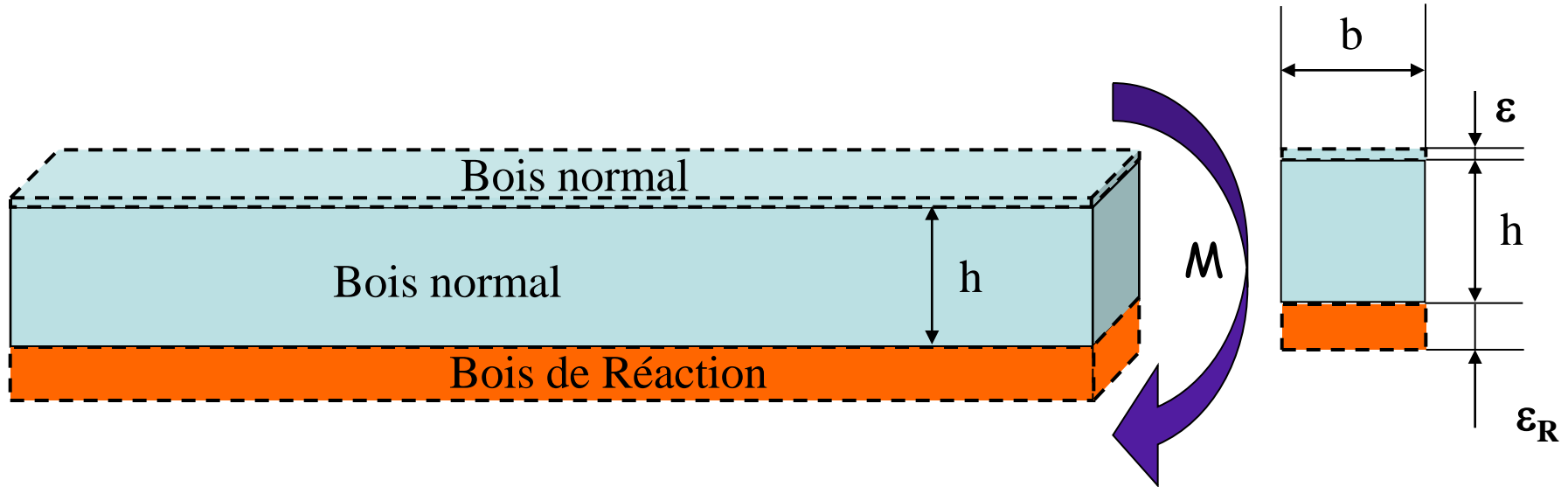
Contrainte de tension normale

La même cellule collée au bois rigide

Contrainte de tension élevée



Simulation d'une croissance dissymétrique



Hypothèses: 1 – La largeur des couches de croissance, ε & ε_R est bien plus petite que la hauteur de la poutre: h

2 – Le bois de réaction a des propriétés différentes de celles du bois normal

3 – La largeur de la poutre: b est supposée constante pendant cette période

La dissymétrie de croissance crée un moment fléchissant M

Paramètres pour le bois et relations mécaniques

	Bois normal	Bois de réaction
Densité	D	D _R
Module d'élasticité spécifique	E	E _R
Déformation de maturation	α	α _R
Épaisseur de la couche de croissance	ε	ε _R

bε: surface de la couche, ED: Module d'Young, αED: Contrainte de croissance,
 bεαED: Force exercée par la nouvelle couche, h/2: bras de levier

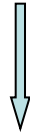
Moment fléchissant dû à la dissymétrie: $M=(bε_R α_R E_R D_R - bε α E D)h/2$

Moment d'inertie de la poutre : $I=bh^3/12$

Variation de courbure de la poutre : $ΔC=M/(EI)$

Variation de courbure de la poutre

$$\Delta C = 6\alpha\varepsilon/h^2 \left[(\varepsilon_R/\varepsilon)(\alpha_R/\alpha)(E_R/E)(D_R/D) - 1 \right]$$



Une forte croissance ε et un bon niveau de déformation de maturation de bois normal α sont utiles pour une restauration efficace de la verticalité qui est beaucoup plus rapide pour les petits diamètres h



Utiliser une déformation de maturation “négative” pour le bois de réaction, est une stratégie efficace



Tous les ratios entre paramètres du bois de réaction et du bois normal contribuent de la même manière à la courbure active par un effet multiplicatif.

Expérimentations sur des arbres inclinés

- Des arbres d'espèces différentes ont été choisis pour leur inclinaison et leur tendance à restaurer la verticalité.
- Les déformations de maturation en périphérie du tronc sont mesurées en 8 positions angulaires à hauteur de poitrine
- L'arbre est abattu après marquage des 8 positions sur le tronc, au dessus et au dessous des mesures
- Un petit billon contenant la zone de mesure est emmené au laboratoire



Mesures des paramètres

Échantillons de
2X2X40 cm
Mesure de D et
E en
laboratoire



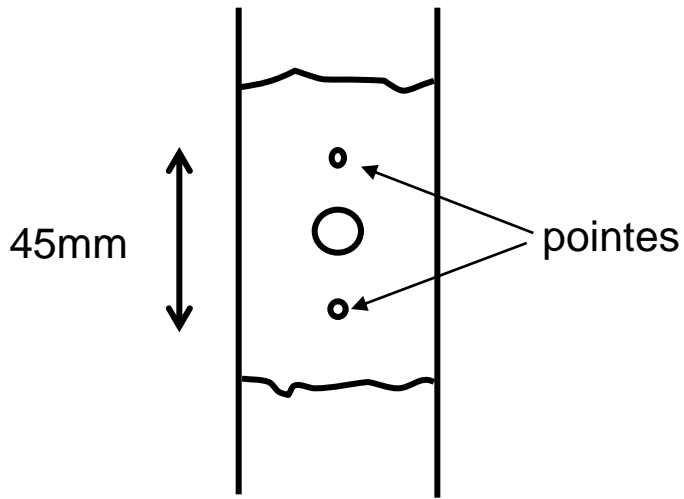
Billon de 50 cm
juste au dessus
de la zone de
mesure de α
Mesure de ε sur
la section



Mesure de α sur
l'arbre debout

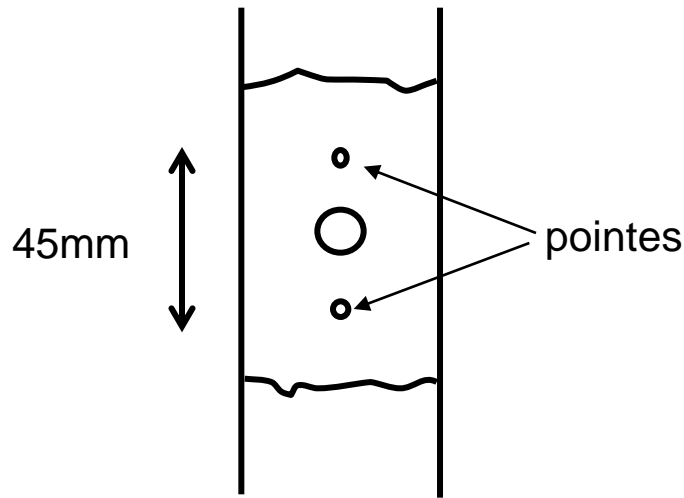
Pin maritime

Méthode du trou unique : méthodologie



- Ecorçage
- Pose de l'appareil
- Trou à la chignole (20mm)

Méthode du trou unique : principe (cas des feuillus)

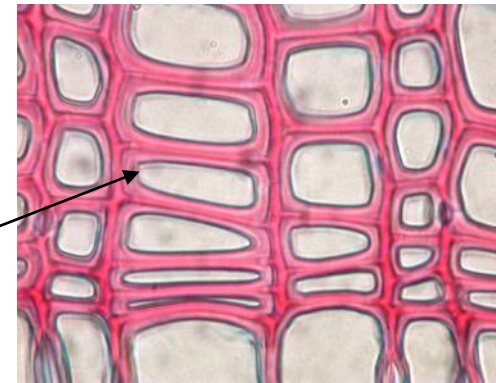
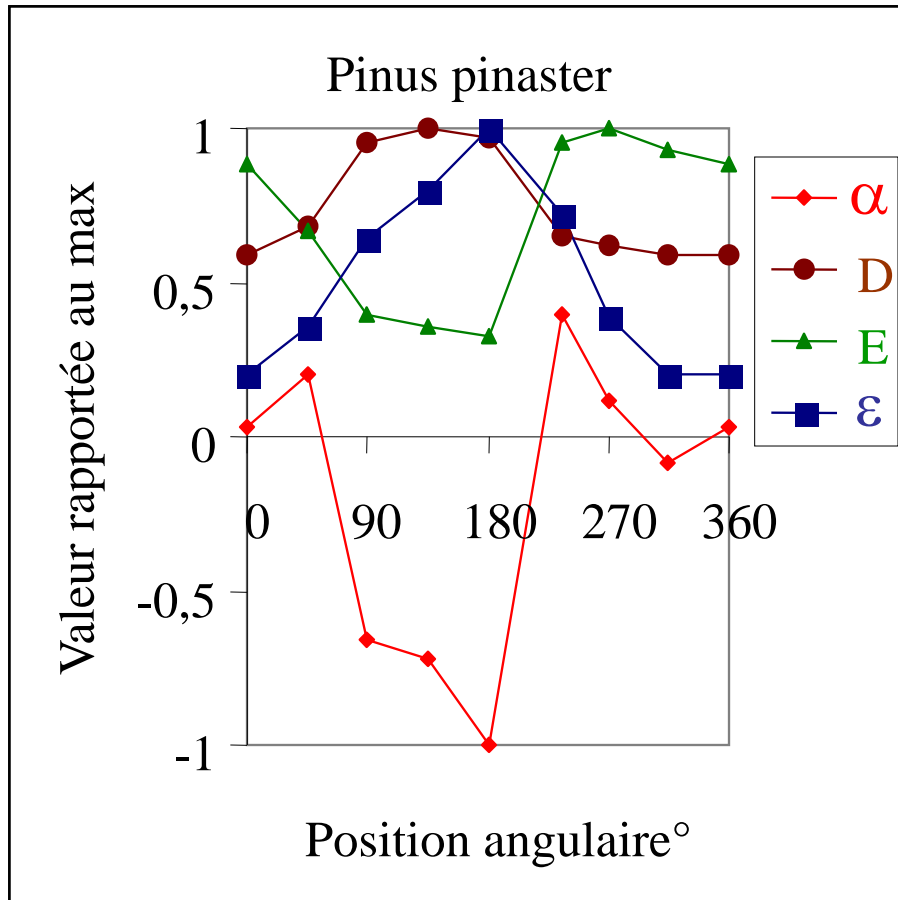


A géométrie de capteur fixée

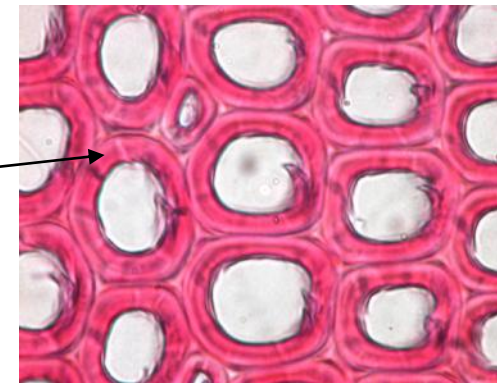
(distance entre pointes, diamètre du trou) :

- ➔ **Plus les pointes s'écartent lors du perçage**
- ➔ **Plus le retrait de maturation mesuré est grand**
- ➔ **Plus le bois était tendu**

Variations angulaires des paramètres: exemple pour les gymnospermes



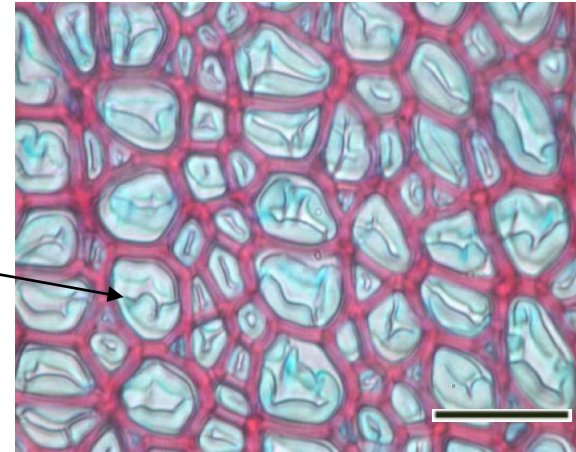
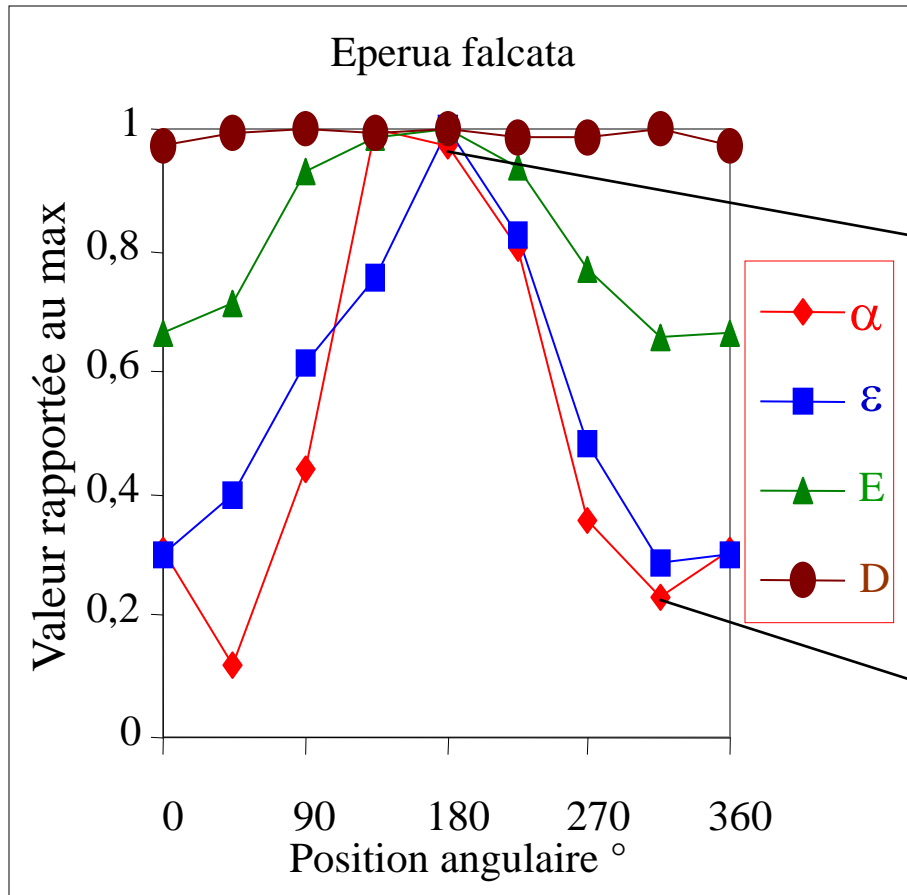
Bois normal



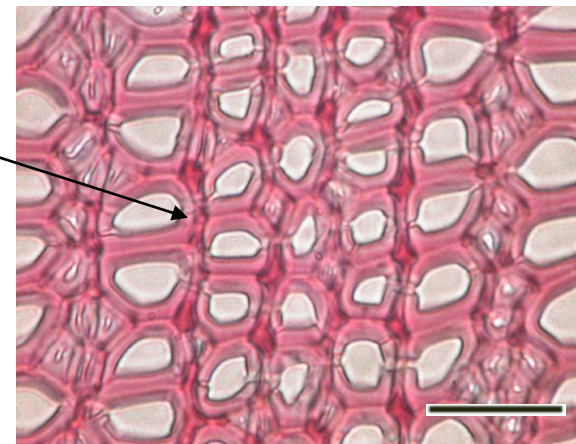
Bois de compression

Toutes le valeurs sont divisées par le maximum de la série

Variations angulaires des paramètres: exemple pour les angiospermes



Bois de tension



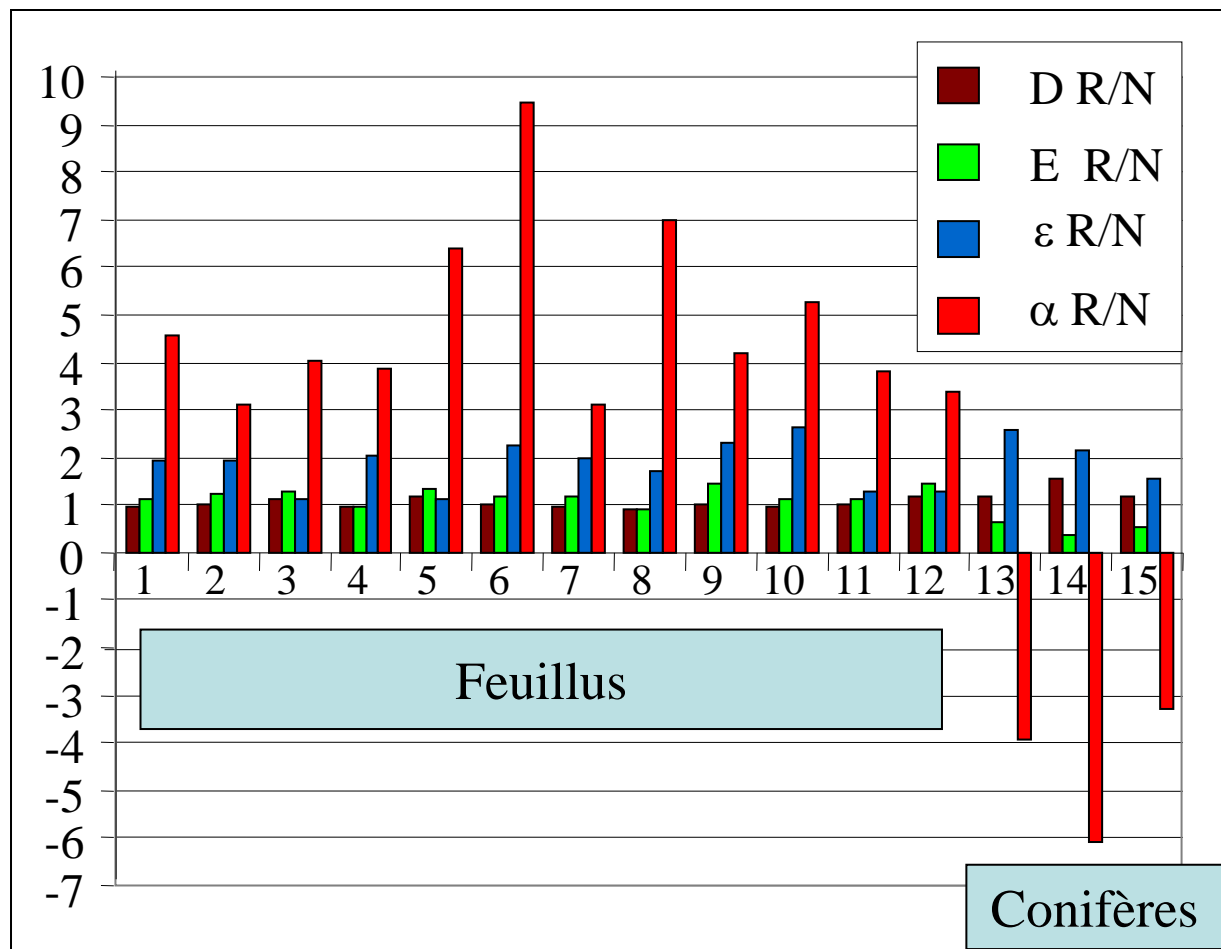
Bois normal

Toutes les valeurs sont divisées par le maximum de la série

Dissymétrie des paramètres entre le bois normal et de réaction

Espèces

- 1- *Miconia fragilis*
- 2- *Eschweilera decolorens*
- 3- *Qualea rosea*
- 4- *Cecropia sciadophylla*
- 5- *Ocotea guyanensis*
- 6- *Laetia procera*
- 7- *Jacaranda copaia*
- 8- *Virola surinamensis*
- 9- *Eperua falcata*
- 10- *Simaruba amara*
- 11- *Populus hybrid I-214*
- 12- *Populus hybrid I-69*
- 13- *Picea abies*
- 14- *Pinus pinaster*
- 15- *Pinus sylvestris*



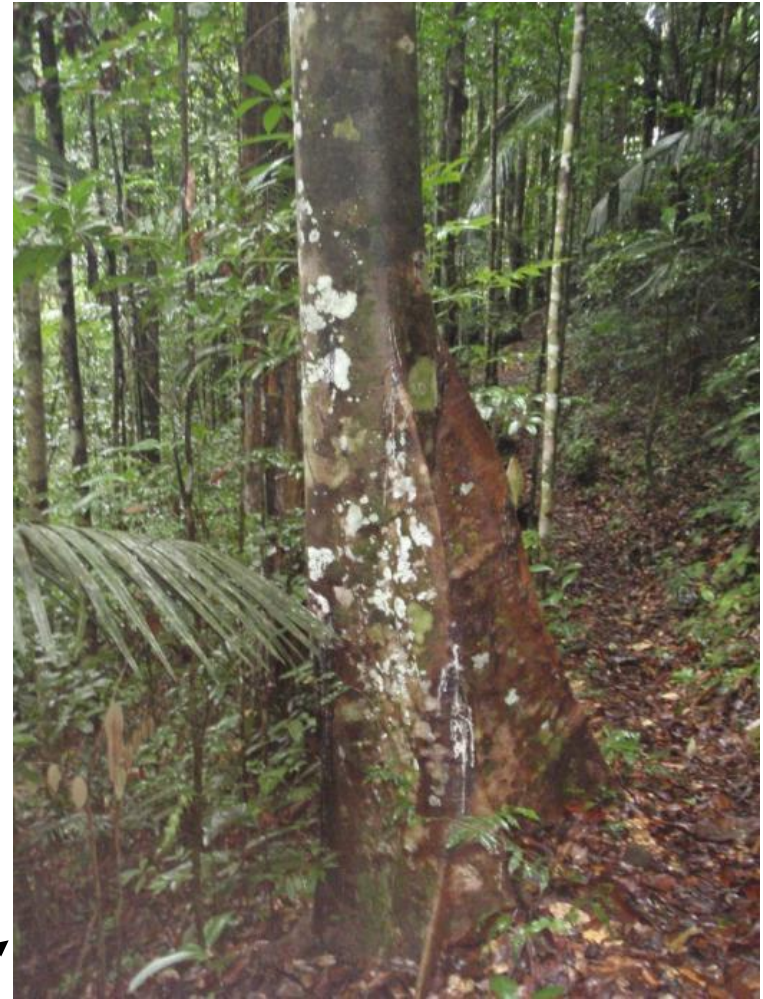
La déformation de maturation est toujours le paramètre le plus actif

La dissymétrie de croissance est presque toujours active, surtout chez les conifères

La **densité** et le **module spécifique** sont peu actifs chez les feuillus

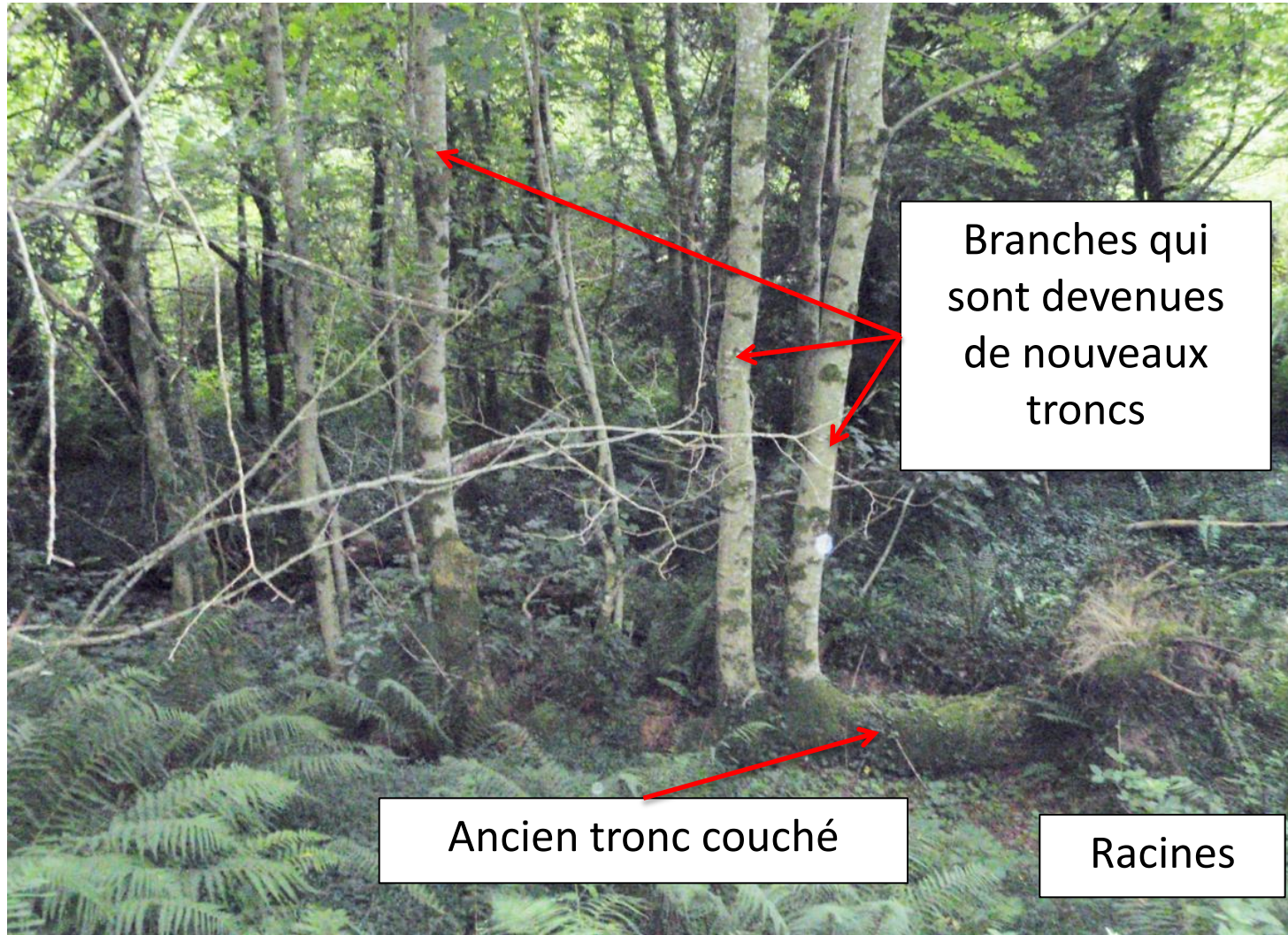
Pour les conifères le gain de **densité** compense un peu la chute du **module spécifique** 43

Contreforts ou haubans?



Les crêtes des contreforts se trouvent dans un état de précontrainte de tension très élevé

Et si c'est vraiment trop grave
Il reste la croissance primaire



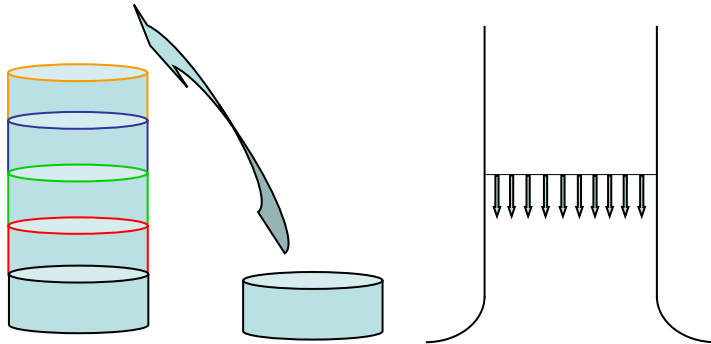
Erable sycomore complètement couché par la tempête

La déconstruction de l'arbre

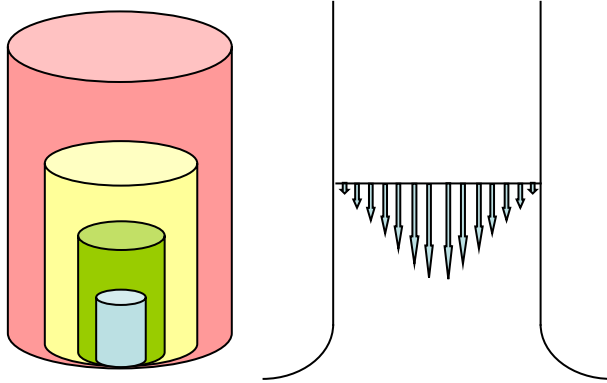
- Avant toute chose il est bon de connaître l'état mécanique de la structure à déconstruire
- La première étape est l'abattage de l'arbre et son tronçonnage en grumes et billons
- La deuxième étape est le débit en profilés
- La troisième étape est le séchage de ces éléments



Etat de contraintes longitudinales à la base du tronc

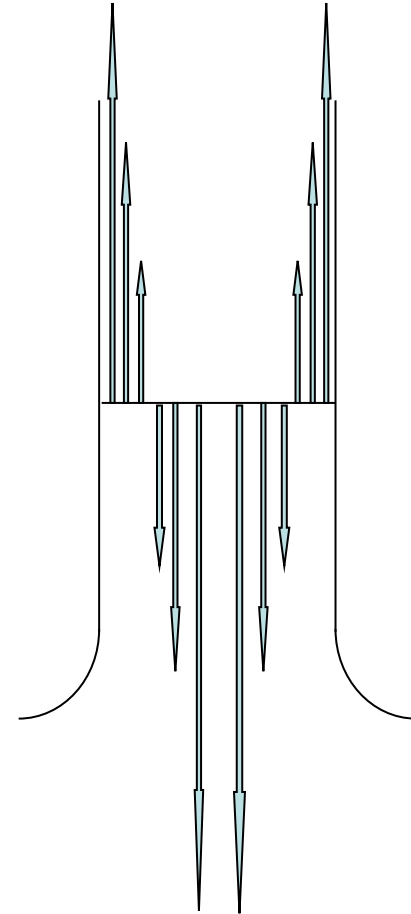


Construction classique



Construction progressive

Les contraintes de support



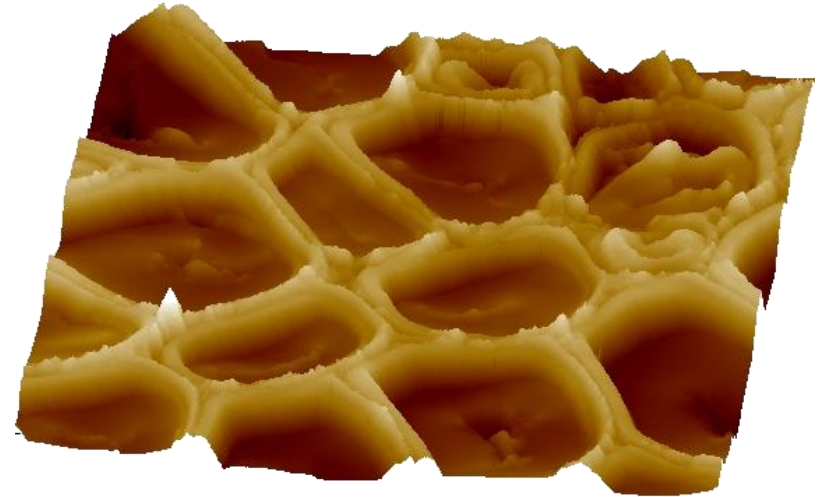
Les contraintes de maturation

Les contraintes résiduelles sont la somme des deux champs
(Les contraintes de support sont négligeables)

Conséquences des contraintes résiduelles lors des débits



Apparition de fente à l'abattage

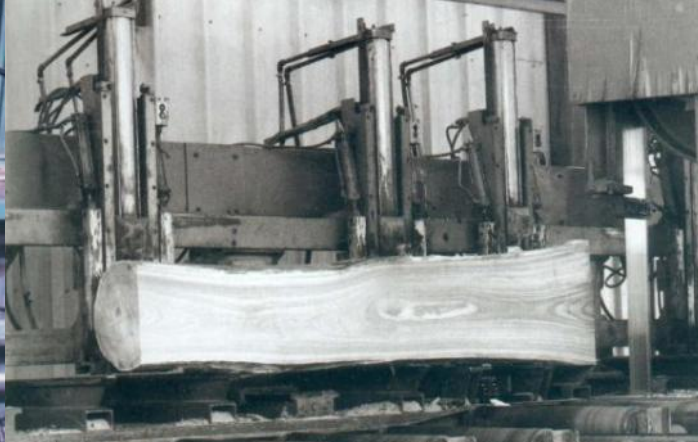
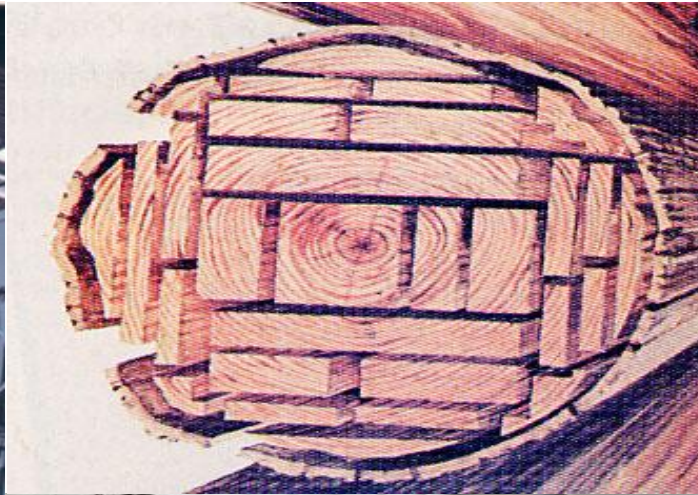


Relaxation de contraintes à l'échelle de la paroi (observation en MFA)



Eclatement d'une grume de déroulage aggravé par l'étuvage à l'état vert

Les étapes de la déconstruction



Tronçonnage:
grumes et billons

Sciage: profilés bois

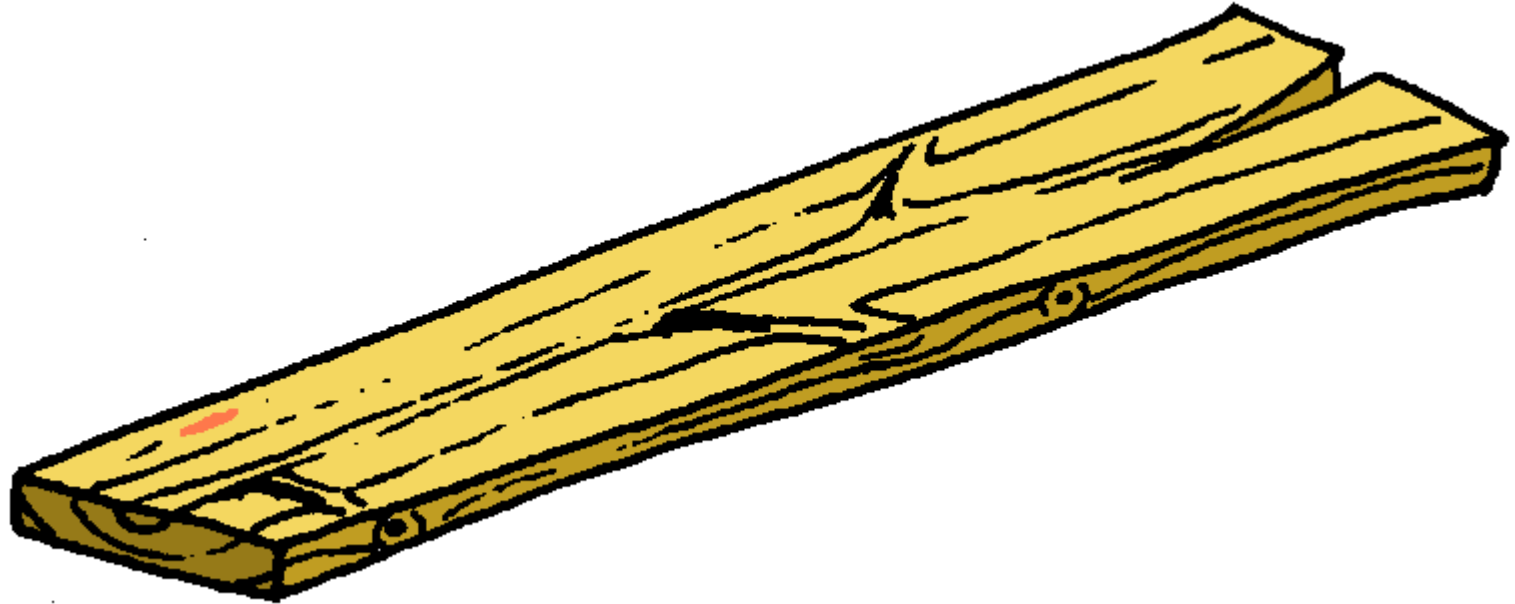
Déroutage et
tranchage: feuilles
de bois

Fragmentation:
plaquettes

Défibrage: fibres

Déconstruction de
la paroi: molécules

Hétérogénéité et variabilité



Une pièce de bois comporte toujours des événements différents de la vie de l'arbre (nœuds, aubier/duramen, bois normal/bois de compression ...) qui influent sur son comportement mécanique global.

Le bois matériau de l'ingénieur, de l'artisan et de l'artiste



Pour la construction et le génie civil



pour l'emballage et le transport

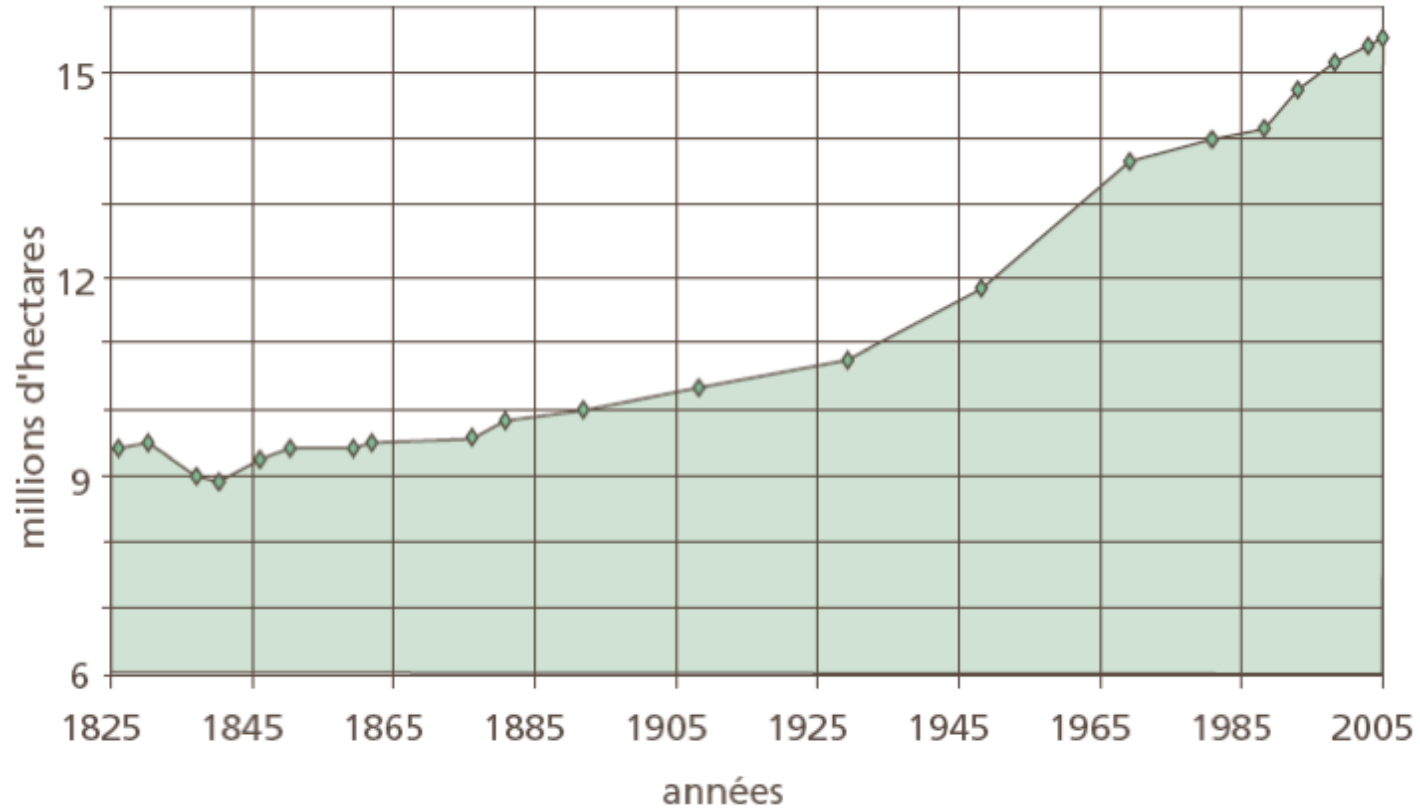




La forêt et les bois français

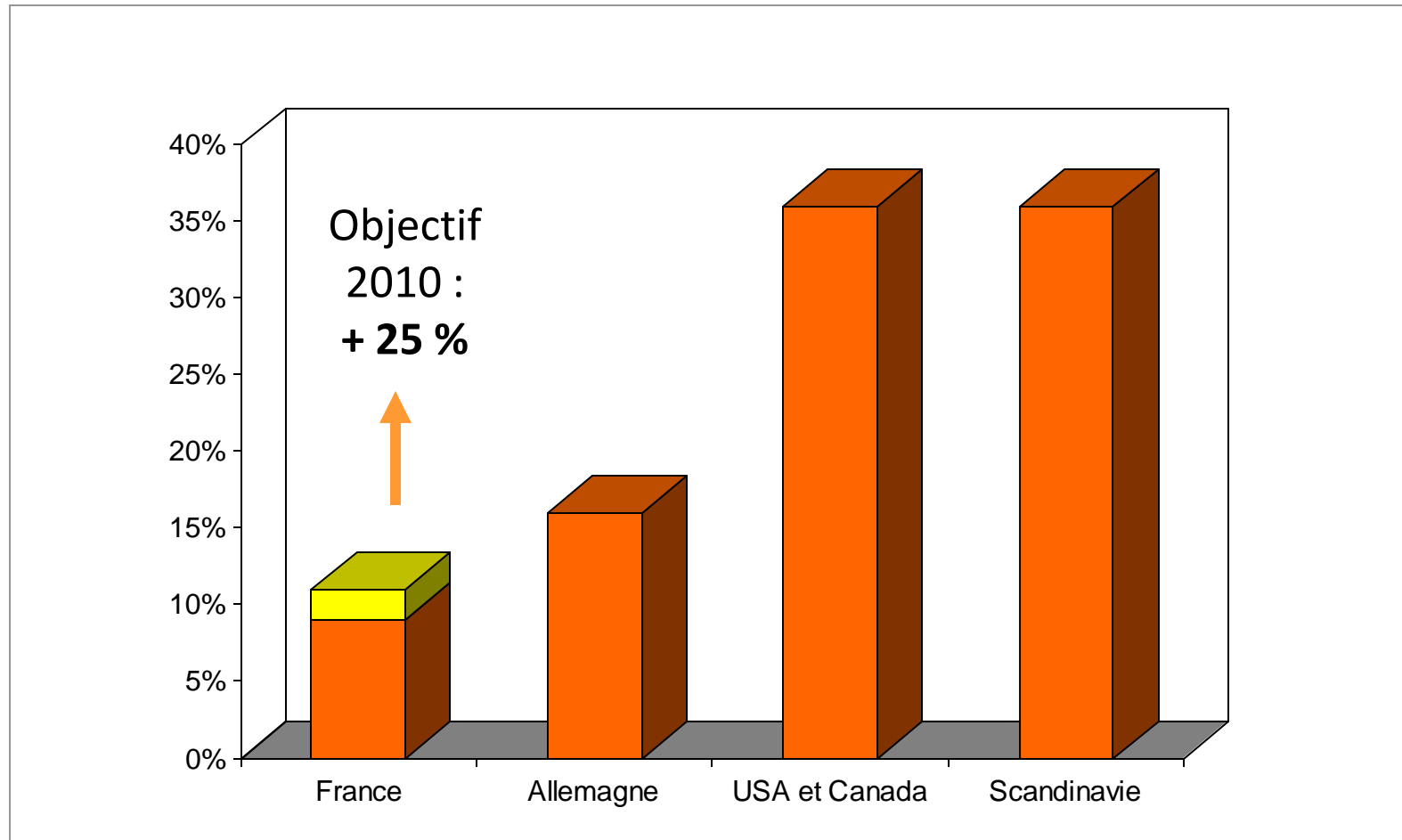
- 24 millions d'hectares au total
- 16 millions en France hexagonale, 8 millions en Guyane
- Une grande diversité: forêt tempérée, forêt méditerranéenne, forêt tropicale humide
- Un capital sur pied de 5 milliards de m³, moitié hexagone, moitié Guyane
- Une production biologique estimée à 85 millions de m³ par an dans l'hexagone (3,5% du volume sur pied) et 60 en Guyane.
- Une récolte de 44 millions de m³ par an dans l'hexagone et de 0,1 en Guyane
- 440 000 emplois dans l'hexagone, 1000 emplois en Guyane (*10 emplois pour 1000 m³ récoltés*)

Evolution de la forêt hexagonale



La surface a encore augmenté de 14% depuis un quart de siècle (déprise agricole), mais le volume sur pied a augmenté de 43% (sous valorisation)

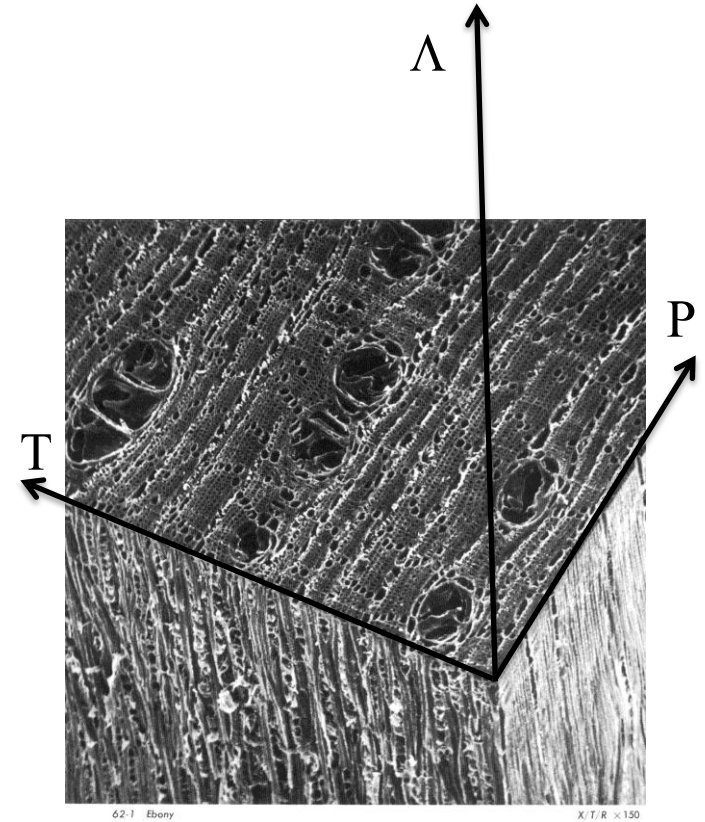
Part du bois dans les matériaux de construction



La France, un grand pays forestier à la traîne

En conclusion: les bois, une grande classe de matériaux du vivant

- Les bois sont
 - Anisotropes
 - Cellulaires (donc légers)
 - Composites à fibres nano structurés
 - Polymères thermo et hygro-sensibles
- Ils gardent la signature de leur origine biologique
- Ce sont toujours de bons matériaux de structure
- Ce sont aussi toujours de bons combustibles
- Leur coût énergétique est nul
- Leur utilisation permet de stocker du carbone prélevé dans l'atmosphère
- C'est une ressource renouvelable abondante
- La marge de progression en France est énorme



Composition élémentaire du bois: 50% carbone, 45% oxygène + hydrogène

Merci de votre attention