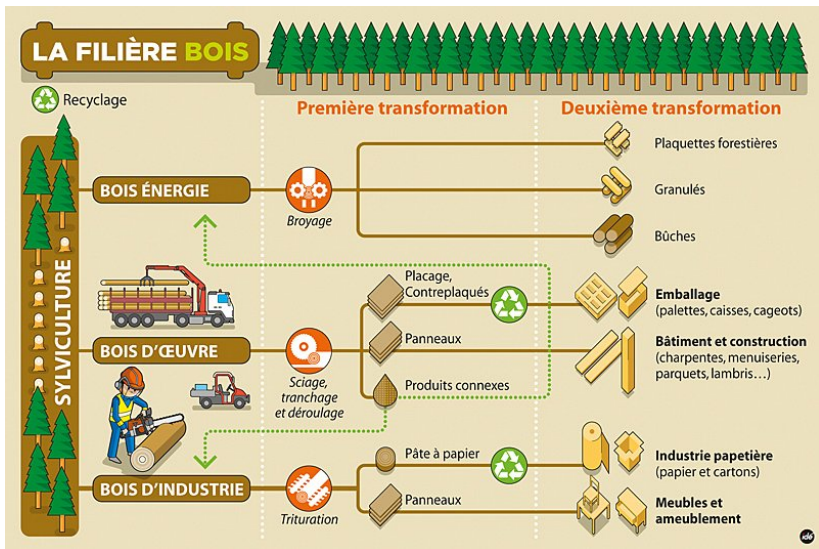




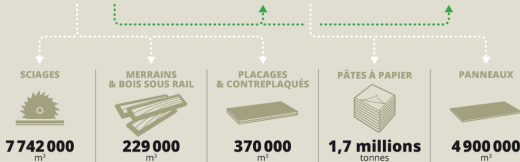
Pourquoi ce cours ?
Pourquoi moi ?



SOURCE : AGRESTE, CHIFFRES 2016.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION

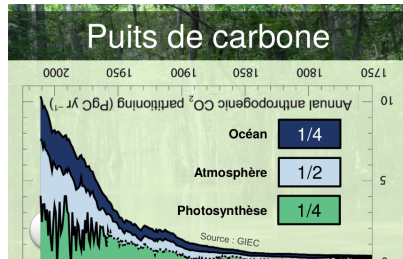
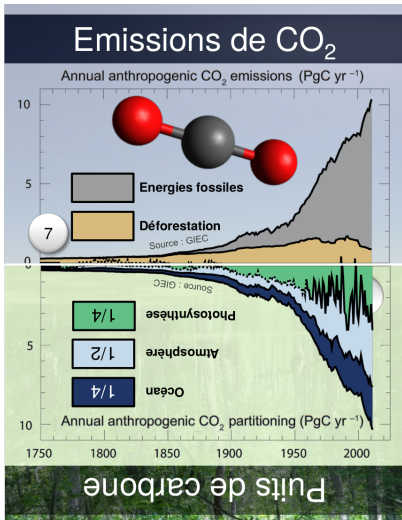
LA FILIÈRE FORÊT-BOIS FRANÇAISE



LE BOIS D'ŒUVRE CONTRIBUE À PRODUIRE **8,2 MILLIONS DE TONNES** DE PRODUITS CONNEXES DE CO-PRODUITS (PLAQUETTES OU SCIURES) UTILISÉS PAR L'INDUSTRIE DU PAPIER ET POUR L'ÉNERGIE.

Gaz à effets de serre

La forêt, puits de carbone



source : Fresque du climat / GIEC

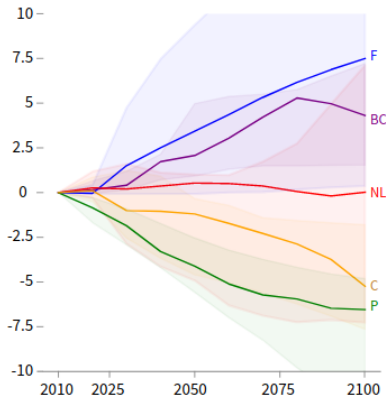
Scénarios IPCC (GIEC)

des forêts à la place de cultures et pâturages (ou en articulation)

Sustainability-focused (SSP1) Sustainability in land management, agricultural intensification, production and consumption patterns result in reduced need for agricultural land, despite increases in per capita food consumption. This land can instead be used for reforestation, afforestation, and bioenergy.

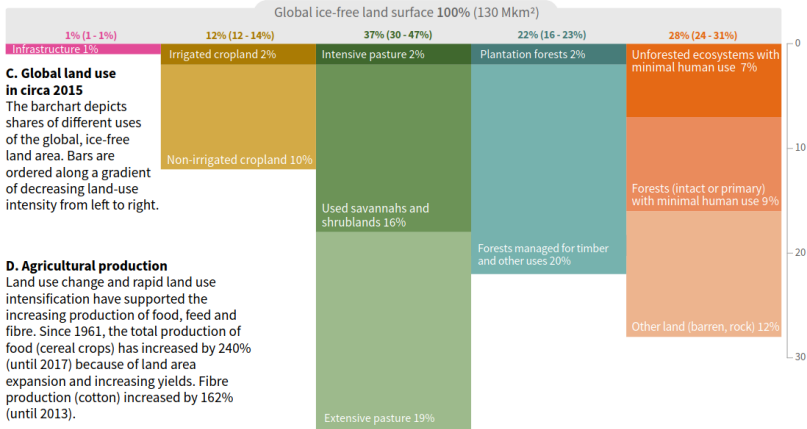
SSP1 Sustainability-focused

Change in Land from 2010 (Mkm²)



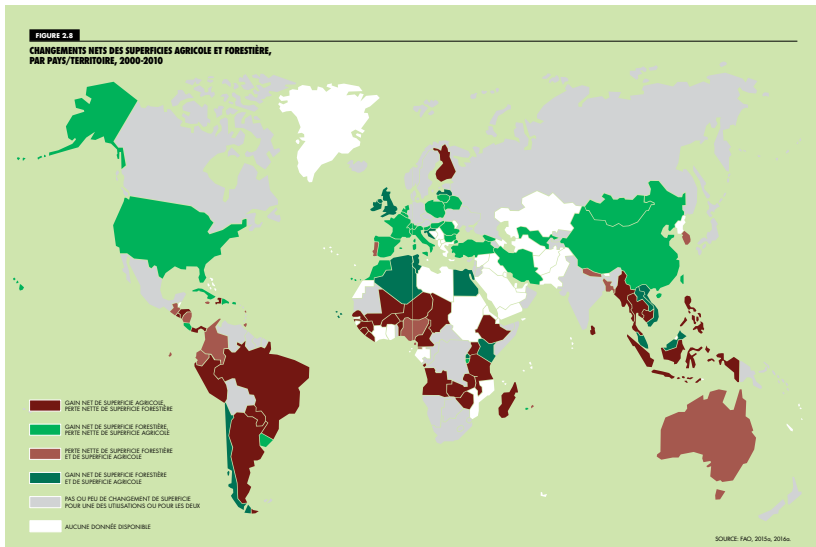
■ CROPLAND
 ■ PASTURE
 ■ BIOENERGY CROPLAND
 ■ FOREST
 ■ NATURAL LAND
 1

Terres émergées

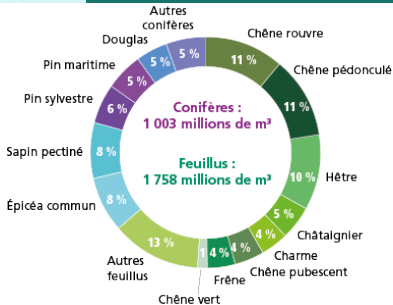
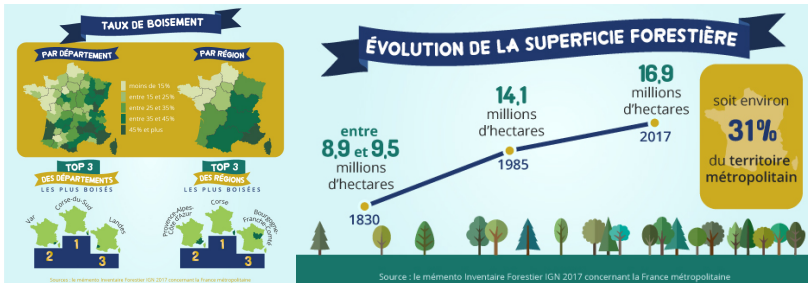


Déforestation

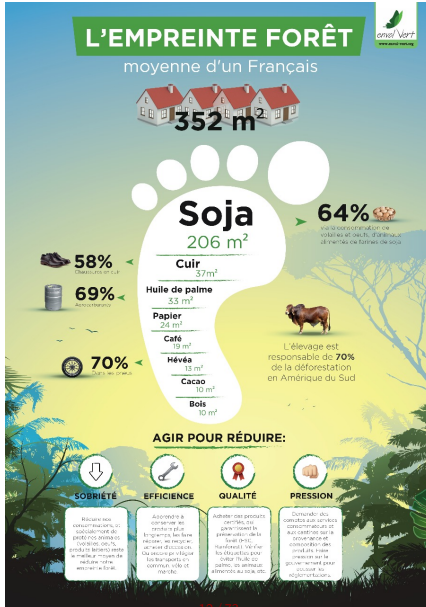
Équilibre agriculture/forêts



En France tout va bien ?



L'empreinte forêt des français·es



Sommaire du chapitre

- 3 Le bois, production de l'arbre
 - Vie de l'arbre et du bois
 - Mécanique de l'arbre
 - Propriétés induites
 - Stratégies de croissance

Vie de l'arbre

Arbres non clonaux



Olivier, France, 2000 ans



Cyprés, Iran, 4000 ans



Pin, Californie, 4800 ans

Arbres clonaux



Pin Tasmanie, 10 000 ans



Peupliers, Utah, 80 000 ans

Vie du bois



1 an

50 ans

500 ans

1000 ans



temps



Hōryū-ji, Japon. 1300 ans



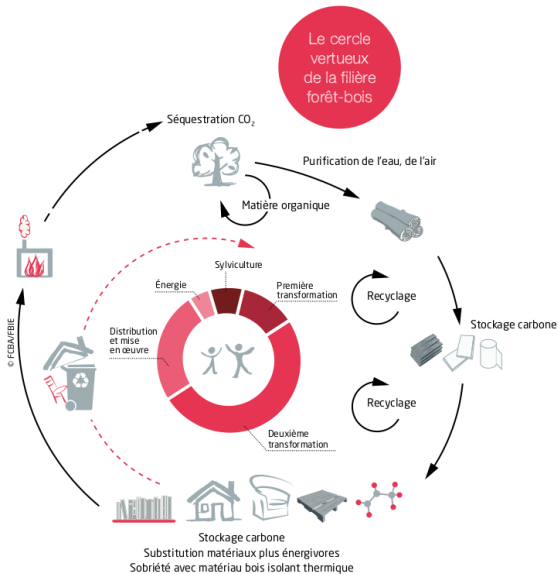
Piano à queue / Brodmann 1814 / E.982.6.1
© Cité de la Musique - Musée de la Musique / © photo Jean-Marc Angles



Mona Lisa, 1503

Cycle de vie du bois

retarder le cycle carbone



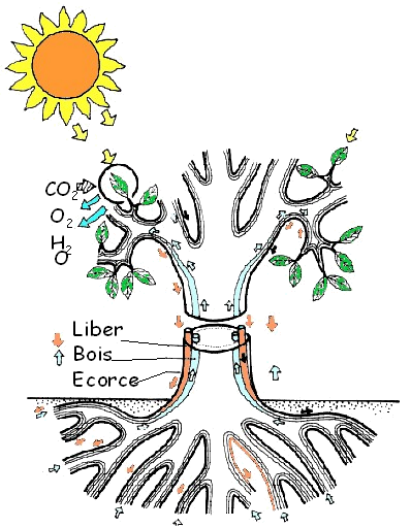
L'arbre

Cahier des charges

Cahier des charges :

Concevoir une tour autonome devant supporter une batterie de capteurs solaires, pesant quelques dizaines à quelques centaines de kilogrammes, à 30-40 m du sol en moyenne, résistant au vent et contenant une pompe et une tuyauterie capable d'alimenter en eau chaque capteur solaire. Sa durée de vie est d'au moins une bonne centaine d'années (et pouvant aller jusqu'à plusieurs milliers)...

Fonctions de l'arbre



Fonctions :

- ▶ feuillage : respiration, transpiration
- ▶ tronc : soutien mécanique, tuyauterie, stockage
- ▶ système racinaire : collecter la matière première (eau, sels minéraux)

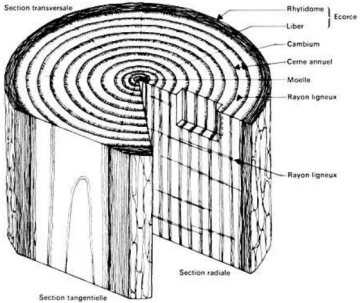
« Déchets » :

- ▶ bois
- ▶ couvert végétal
- ▶ fruit

Résineux et Feuillus

Résineux (par exemple épicéa)

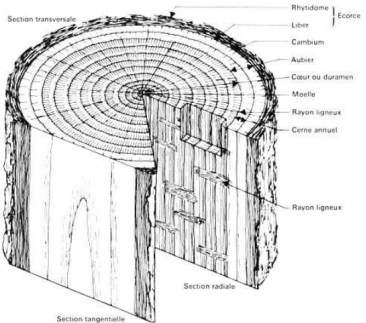
Exemple de bois ne présentant pas de différence de coloration entre l'aubier et le bois de cœur



Résineux = Conifère = Gymnospermes
Structure plus ancienne et plus simple
Croissance rapide
Applications bâti

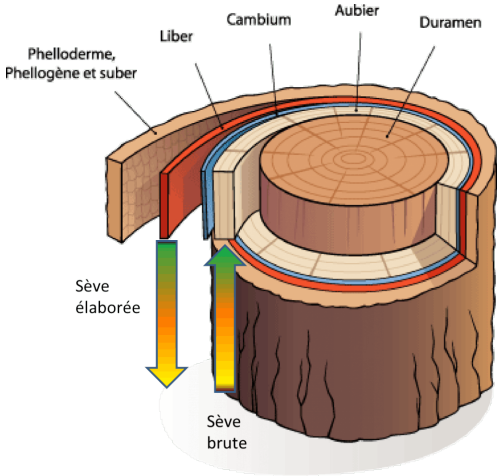
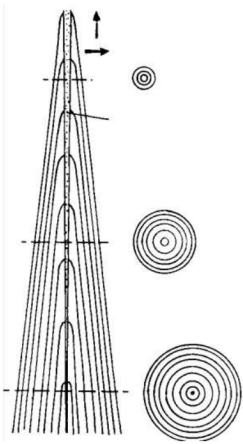
Feuillu (par exemple chêne)

Exemple de bois où l'aubier et le cœur sont visiblement différenciés (cœur coloré)



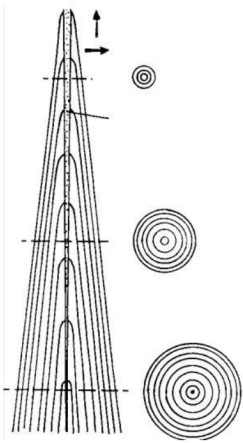
Feuillu = angiospermes
Structure plus élaborée (botaniquement)

Structure du tronc



Croissance de l'arbre

Croissance primaire et secondaire

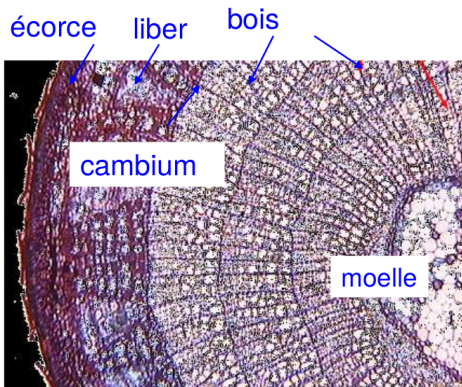


- ▶ ↑ croissance primaire de la tige
- ▶ ←→ croissance secondaire :
élargissement du tronc, fabrication du bois.

Croissance radiale (secondaire)

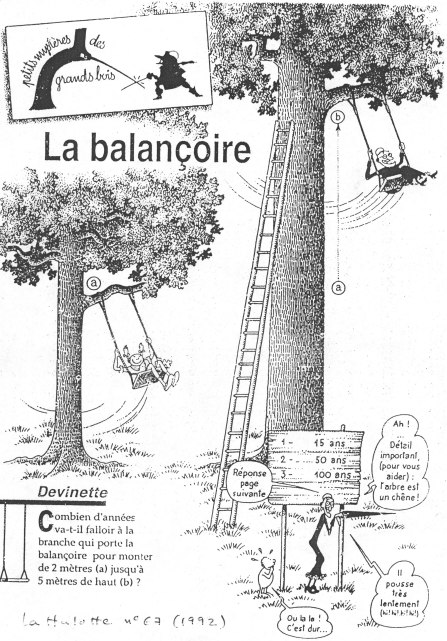
Division cellulaire depuis le cambium (écorce intérieure) :

- ▶ liber + écorce (phloème)
- ▶ bois (xylème)



Arbres gloutons





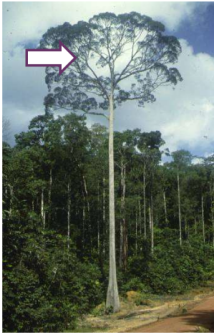
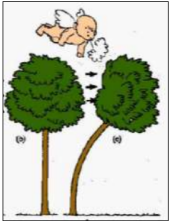
Devinette

Combien d'années va-t-il falloir à la branche qui porte la balançoire pour monter de 2 mètres (a) jusqu'à 5 mètres de haut (b) ?

La Huitième n°67 (1992)

Bio-mécanique du tronc

Chargement en flexion



Grand arbre émergent en forêt guyanaise.



Grosses branches horizontales d'acajou



La résistance à la flexion est le problème principal pour l'arbre.

Bio-mécanique du tronc

Chargement en compression

Sollicitation dominante du tronc en compression.



Poids du houppier

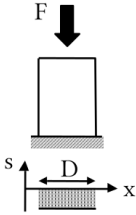
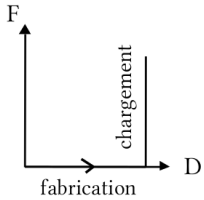


Poids propre

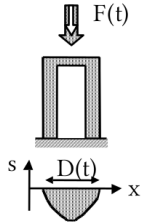
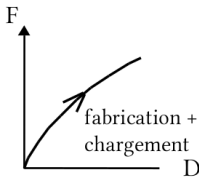


Bio-mécanique des tiges

Mise en place des contraintes



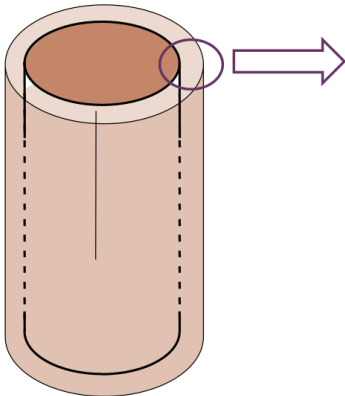
Le tronc existe, puis il est chargé (*non réaliste*)



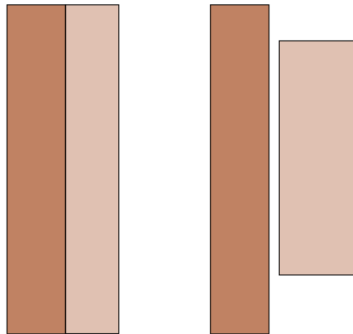
Le tronc est chargé au fur et à mesure qu'il est fabriqué

La mise en place des contraintes est progressive

Matériau précontraint

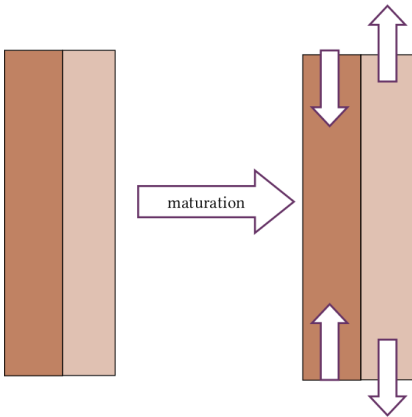


Création d'une nouvelle couche de bois.



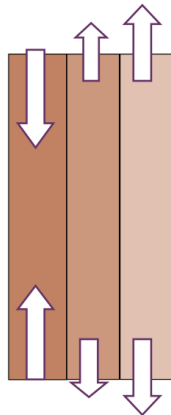
La nouvelle cellule tend à se rétracter suivant le fil du bois (déformation de maturation). Cette déformation est gênée par l'adhésion sur le bois plus ancien.

Matériau précontraint

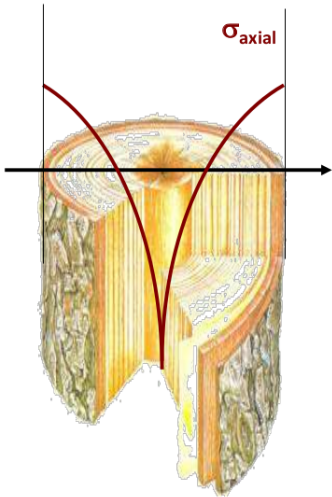


La nouvelle cellule est fortement tendue.
La cellule ancienne voisine est comprimée.

Empilement de couches successives.



Matériau précontraint

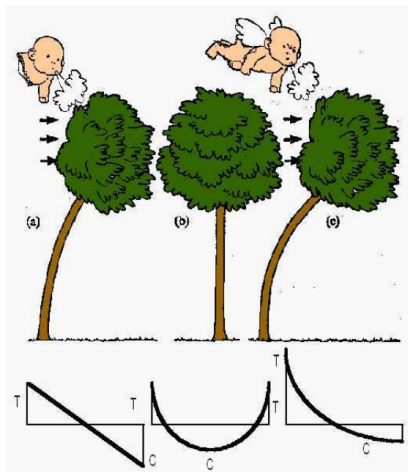
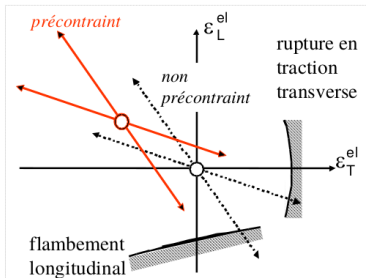


Tension en périphérie.
Compression à cœur.

Contrainte de croissance
=
contrainte de support
+
contrainte de maturation

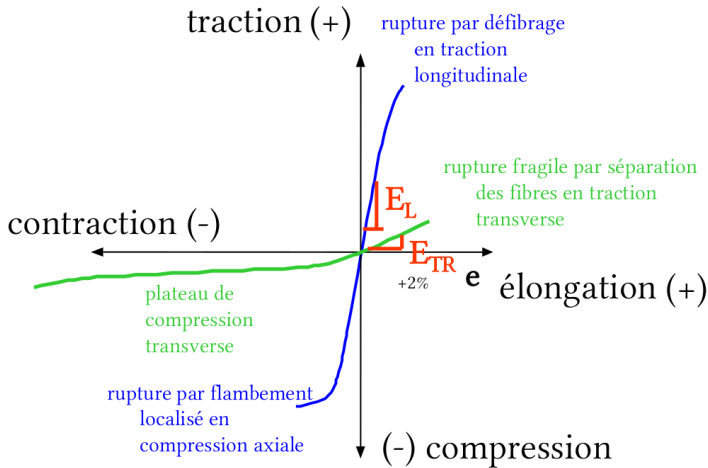
La « stratégie » des précontraintes

Intérêt pour la structure



La « stratégie » des précontraintes

Intérêt pour la structure



Lutter contre l'environnement

Quand il y a du mistral...



Stratégies de croissance

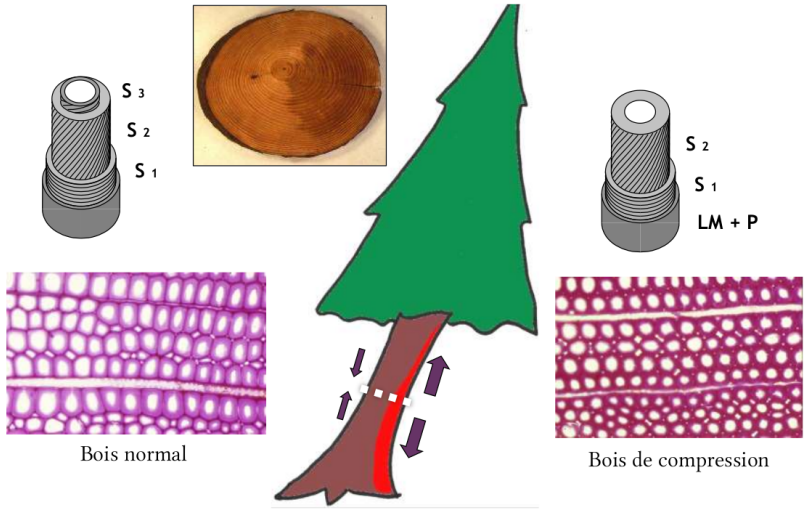


Stratégie de croissance radiale : excentrement

- ▶ changement de surfaces
- ▶ changement de bras de levier
- ▶ changement de moment quadratique

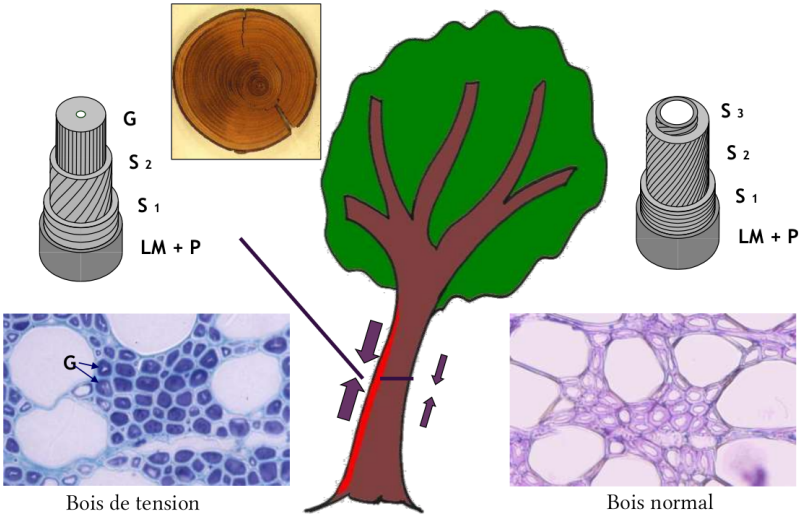
Stratégie différenciée

Les résineux « poussent »

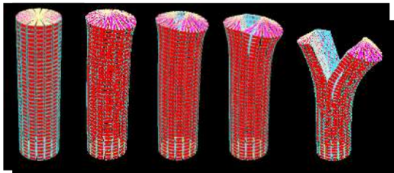


Stratégie différenciée

Les feuillus « tirent »

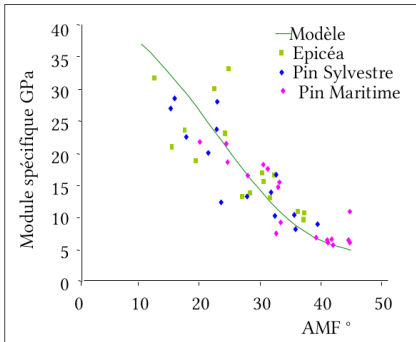
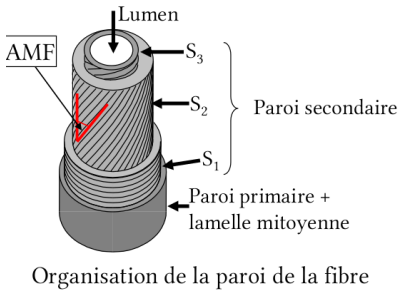


Conséquences des contraintes de croissance



Calculs par éléments finis de la propagation de fissures par restitution d'énergie.

Optimiser le matériau à travers l'angle des microfibrilles



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

Modifier le module de Young pour le même poids.

Mécanique du bois en France

LERFOB, LERMAB, ENSTIB (Nancy)

Plusieurs petites unités dans le centre
 CUST, PIAF (Clermont-Ferrand)
 LaMCoS (INSA - Lyon), IUT (Egletons),
 LABOMAP (ENSAM - Cluny)

LRBB, CTBA (Bordeaux)

LMGC, CIRAD (Montpellier)

ECOFOG, CIRAD (French Guyana)



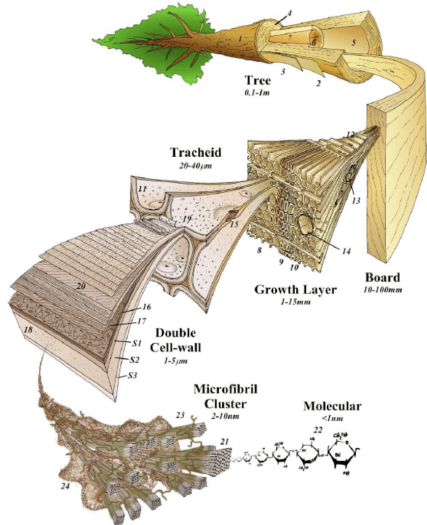
Matériau multi-échelles

Matériau

- ▶ composite
- ▶ multi-échelles

Différents types de mécanique :

- ▶ arbre
- ▶ bois matériau
- ▶ produits à base de microfibrilles



Matériau orthotrope

Définition des directions d'orthotropie

Longitudinal : direction des fibres

Radial : direction de croissance

Tangential : direction tangente aux cernes

Plan transverse : (RT)

Élasticité

Isotrope : 2 propriétés indépendantes (λ, μ) ou (E, ν)

Orthotrope : 9 propriétés indépendantes

($E_L, E_R, E_T, \nu_{RT}, \nu_{RL}, \nu_{TL}, G_{RT}, G_{RL}, G_{TL}$)

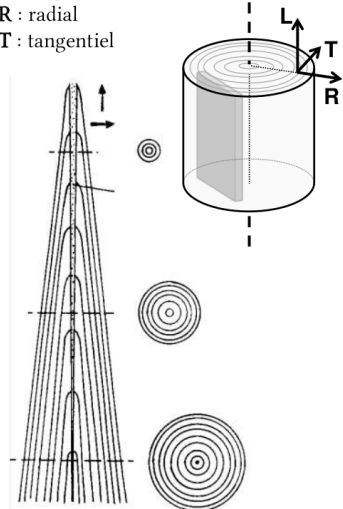
$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \end{pmatrix}$$

! Base cylindrique !

L : longitudinal

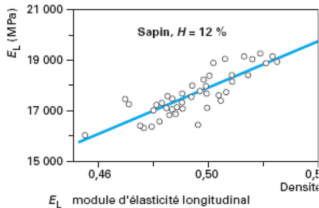
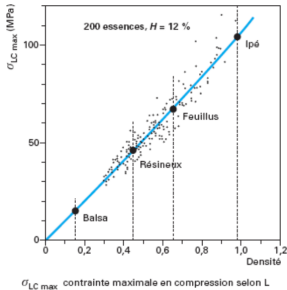
R : radial

T : tangential



Variabilité d'un matériau naturel

- ▶ **inter-spécifique** : on trouve différentes essences de bois
- ▶ **intra-spécifique** : au sein d'une même essence
 - ▶ **inter-individus** : suivant la zone géographique, le sol, l'exposition, etc.
 - ▶ **intra-individu** : deux morceaux prélevés dans le même arbre
 - ▶ variabilité spatiale : zone de prélèvement, âge du bois, fonction mécanique
 - ▶ « défauts » : nœuds, fissures, etc.



Propriétés mécaniques

Ordres de grandeur

| Essence | Module d'élasticité MPa | Compression MPa | Traction MPa | Flexion MPa | Cisaillement MPa |
|---------|-------------------------|-----------------|--------------|-------------|------------------|
| Épicéa | 11 000 | 43 | 90 | 66 | 6,7 |
| Pin | 12 000 | 47 | 104 | 87 | 10,0 |
| Mélèze | 13 800 | 55 | 107 | 99 | 9,0 |
| Hêtre | 16 000 | 62 | 135 | 105 | 10,0 |
| Chêne | 13 000 | 54 | 90 | 91 | 11,0 |

Source : ???

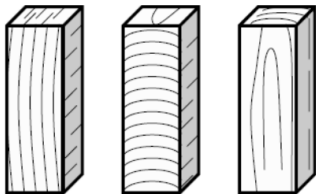
| | Acier S355 | Béton B30 | Bois lamellé collé GL28 |
|---------------------------------------|------------|-----------|-------------------------|
| Propriétés de résistance (MPa) | | | |
| Flexion | 270 | 18 | 12,3 |
| Traction axiale | 270 | 2,4 | 8,6 |
| Traction perpendiculaire | 270 | 2,4 | 0,2 |
| Compression axiale | 270 | 18 | 12,3 |
| Compression perpendiculaire | 270 | 18 | 2,4 |
| Cisaillement | 213 | 1,8 | 1,3 |
| Propriétés de rigidité (MPa) | | | |
| Module axial moyen | 210 000 | 11 500 | 12 600 |
| Module transversal moyen | 210 000 | 11 500 | 1 020 |
| Module de cisaillement moyen | 8 100 | 4 800 | 790 |

Source : techniques de l'ingénieur

Propriétés mécaniques

Caractérisation

Éprouvettes taillées selon les directions principales de l'orthotropie

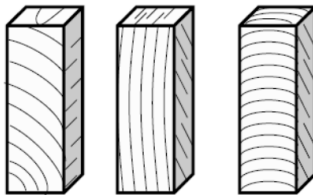


T

R

L

Éprouvettes taillées selon la bissectrice des directions principales



TR

TL

RL

E_T

E_R

E_L

G_{RT}

G_{TL}

G_{RL}

ν_{RT}

ν_{TR}

ν_{LT}

ν_{RI}

ν_{TI}

ν_{IR}

Le bois et l'eau

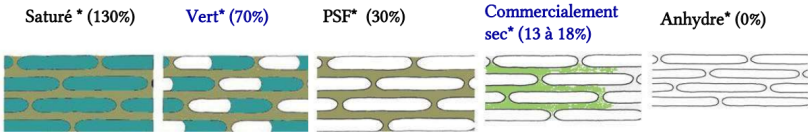
L'humidité du bois ou la teneur en eau, notée ici h , est la quantité d'eau que renferme le bois, exprimée en % de sa masse à l'état anhydre. Elle est définie par l'expression suivante :

$$h = \frac{m_h - m_0}{m_0}$$

avec

m_h la masse du bois à l'humidité h

m_0 la masse anhydre



* Valeurs indicatives pour du châtaigner

Le bois et l'eau

Domaine hygroscopique

Équilibre entre le bois non saturé d'eau et l'humidité relative de l'air.

Hygro-élasticité

$$\sigma = C(\varepsilon - \varepsilon_\alpha)$$

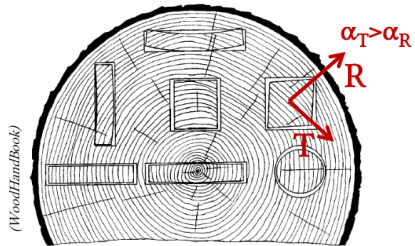
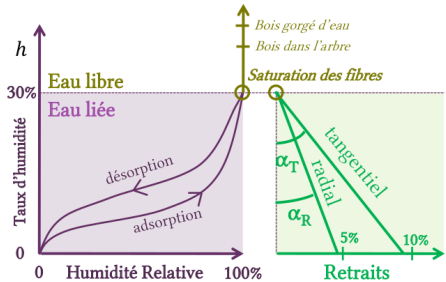
$$\varepsilon_\alpha = \alpha(h - h_0) = \alpha \Delta h$$

Retrait anisotrope / Repère cylindrique

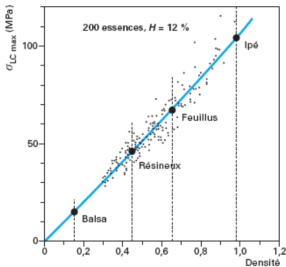
$$\alpha = \begin{vmatrix} \alpha_R & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_L \end{vmatrix}$$

$$\alpha_R \approx 0.2\%/\%$$

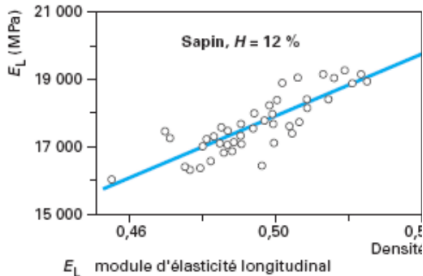
$$\alpha_T \approx 0.4\%/\%$$



Densité

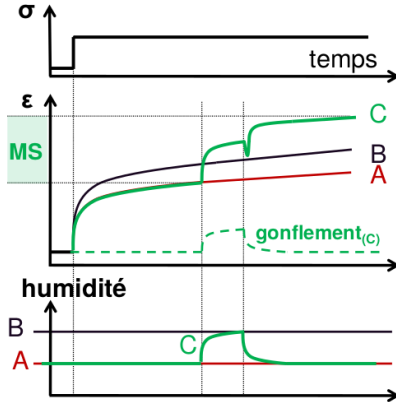


$\sigma_{LC \max}$ contrainte maximale en compression selon L

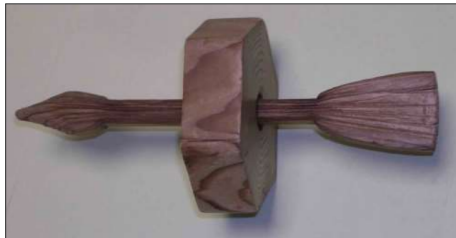
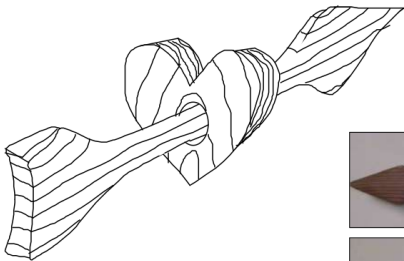


E_L module d'élasticité longitudinal

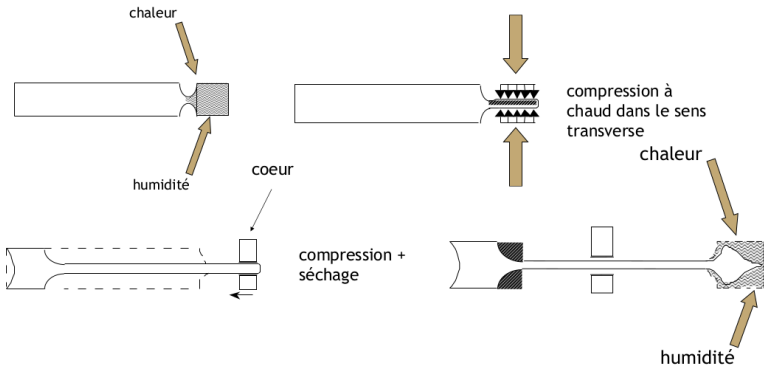
Couplages hydro-mécaniques



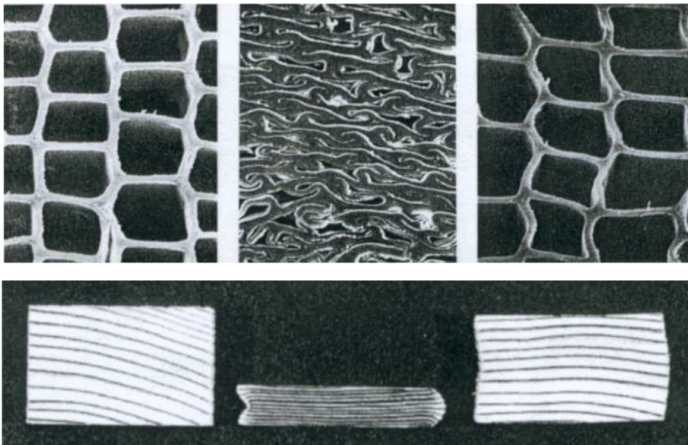
Curiosité



Mémoire de forme

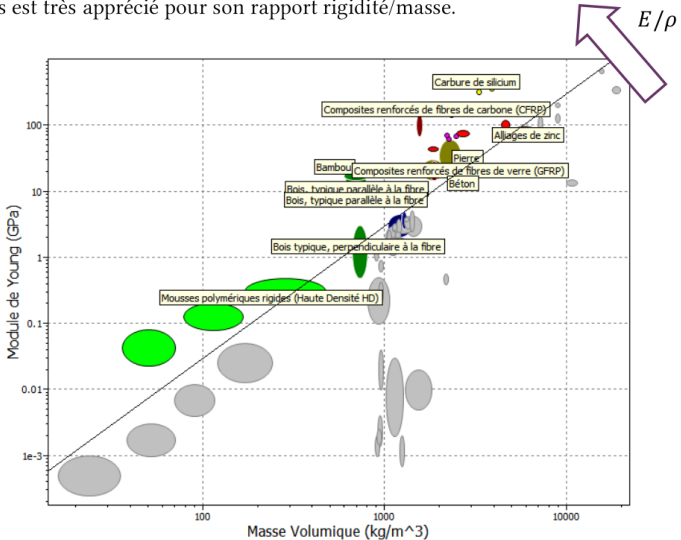


Mémoire de forme



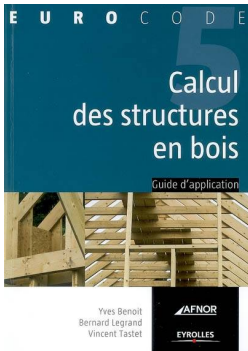
Un matériau optimisé

Le bois est très apprécié pour son rapport rigidité/masse.



Eurocode 5

Calcul des structures bois



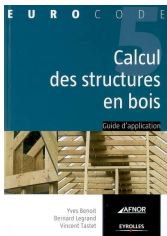
Eurocode 5

- ▶ **EN 1995-1-1** règles communes et règles pour les bâtiments
- ▶ **EN 1995-1-2** calcul des structures au feu
- ▶ **EN 1995-2** ponts

Classes de service

Gérer la variabilité

Classes de services :



| | | C14 | C16 | C18 | C20 | C22 | C24 | C27 | C30 | C35 | C40 |
|------------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Flexion | $f_{m,k}$ [N/mm ²] | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 27 | 30 | 35 | 40 |
| Traxion axiale | $f_{t,0,k}$ [N/mm ²] | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 16 | 18 | 21 | 24 |
| Compression axiale | $f_{c,0,k}$ [N/mm ²] | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 25 | 26 |
| Cisaillement | $f_{v,k}$ [N/mm ²] | 1.7 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 2.4 | 2.5 | 2.8 | 3.0 | 3.4 | 3.8 |
| Module d'élasticité | $E_{0,geom}$ [kN/mm ²] | 7 | 8 | 9 | 9.5 | 10 | 11 | 11.5 | 12 | 13 | 14 |
| Module de cisaillement | G_{geom} [kN/mm ²] | 0.44 | 0.50 | 0.56 | 0.59 | 0.63 | 0.69 | 0.72 | 0.75 | 0.81 | 0.88 |
| Masse volumique | ρ_k [kg/m ³] | 290 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 370 | 380 | 400 | 420 |

Tri visuel (densité)

Comportement différé

Gérer les chargements à long terme

Calcul de flèche (flexion)

$$w_{tot} = w_{inst} + w_{creep} = (1 + k_{def}) w_{inst}$$

Tableau 12 : valeur du k_{mod} du bois massif, du lamellé-collé, du lamibois (LVL) et du contreplaqué

| Durée de chargement | | Classe de service | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---|----------------------------------|
| Classe de durée | Exemple | 1 Hbois < 13 % (local chauffé) | 2 13 % < Hbois < 20 % (sous abri) | 3 Hbois > 20 % (extérieur) |
| Permanente (> 10 ans) | Charge de structure | 0,6 | 0,6 | 0,5 |
| Long terme (6 mois à 10 ans) | Stockage | 0,7 | 0,7 | 0,55 |
| Moyen terme (1 semaine à 6 mois) | Charges d'exploitation | 0,8 | 0,8 | 0,65 |
| | Neige Altitude > 1 000 m | | | |
| Court terme (< 1 semaine) | Neige Altitude < 1 000 m | 0,9 | 0,9 | 0,7 |
| Instantanée | Vent, neige exceptionnelle | 1,1 | 1,1 | 0,9 |

Sommaire du chapitre

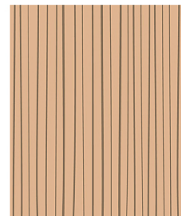
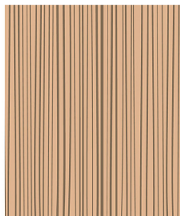
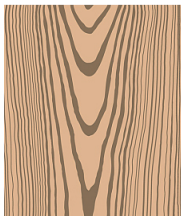
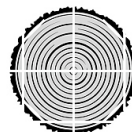
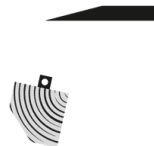
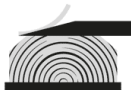
5 Produits à base de bois

- Procédés
- Produits

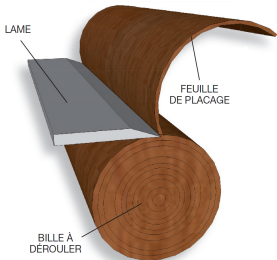
Sciage



Tranchage



Déroutage



Trituration



Dérivés du tranchage et déroulage

- ▶ Contreplaqué (fils croisés)
- ▶ Lamibois (LVL) (orientation parallèle)



Panneaux

- ▶ Panneaux de particules
- ▶ Panneaux de fibres
- ▶ Panneaux à lamelles (OSB)



Sommaire du chapitre

6 Bois et Patrimoine

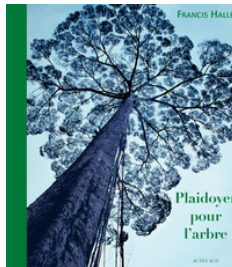
Bâtiments

Instruments de musique

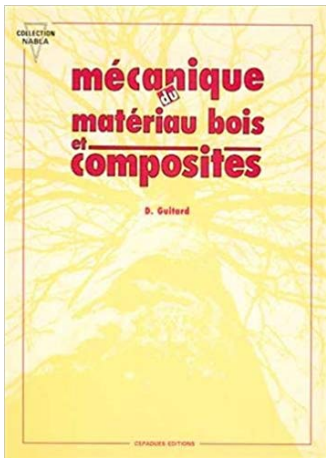
Panneaux peints

Paysages

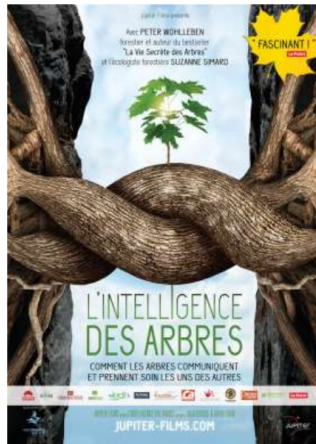
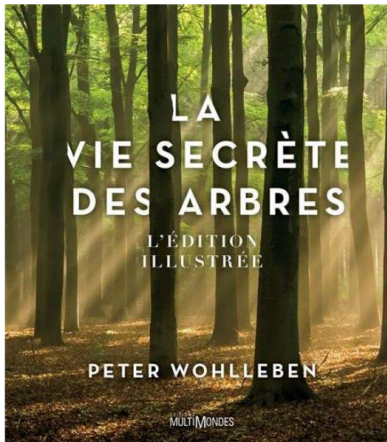
À lire



À lire



À lire / À voir



À jouer

