

Christian Coutris  
 Octobre 2008.

Le bois

1) Introduction:

La production mondiale de bois est à peu près celle de l'acier.  
 Le bois est un matériau naturel, sensible à l'humidité, de propriétés directionnelles et très variables.

Quelques exemples:

Bois	$\rho$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$E$ (GPa)		Résistance (MPa)		$k_{2c}$ (MPa.m)	
		// fibres	$\perp$ fibres	Traction	Compression	//	$\perp$
Salsa	0,1 - 0,3	4	0,2	23	12	0,05	1,2
Sapin Douglas	0,55	16,4	1,1	70	42	0,34	6,2
Pin d'écore	0,55	16,3	0,8	89	47	0,35	6,1
Frêne	0,67	15,8	1,1	116	53	0,61	9,0
Chêne	0,69	16,6	1,0	97	52	0,51	4,0
Hêtre	0,75	16,7	1,5	-	-	0,95	8,9

Remarque: Les masses volumiques et les caractéristiques sont variables  
 pour la même famille: variabilité  $\pm 20\%$  (m de propriétés)

l'anisotropie  $\uparrow$  quand  $\rho \downarrow$

généralement résistance transversale  $\approx 20\%$  résistance longitudinale

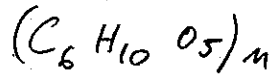
## 2) Microstructure et propriétés:

Le bois est un solide expansé. C'est une mousse composée de cellules (rayons ligneux).

Les rayons ligneux s'étendent dans un plan radial (par rapport au tronc de l'arbre) du centre de l'arbre vers l'écorce.

Les structures ligneuses ont une structure composite:

- des fibres de cellulose cristalline (45% en masse)



ce polymère cristallin pour former des microfibrilles très résistantes

- matrice:

- lignine: polymère amorphe

- l'hémicellulose: polymère partiellement cristallin

} 40% de la masse du bois

Le reste du bois: eau (10%), constituants étrangers (5%)

Les parois des cellules sont identiques, quel que soit le bois

Le bois est un composite fibreux expansé. Les cellules expansées et les fibres de cellulose sont // à l'axe du tronc.

⇒ c'est un matériau très anisotrope

Les propriétés des bois sont très dépendantes de la densité du bois, ce qui régit la taille des cellules et donc le nombre de parois portantes par cm<sup>2</sup>.

les papiers ont les propriétés suivantes :

masse volumique	$1,5 \text{ g.cm}^{-3}$
module d'Young	35 GPa (axial) 10 GPa (transverse)
limite d'élasticité	150 MPa (axial) 50 MPa (transverse).

le tableau de la page 2. relie donc densité et propriétés mécaniques.

les propriétés sont très dépendants de l'humidité du bois.

sec : 50% d'humidité.

sec : ~14% d'humidité.

le séchage se traduit par un retrait et donc une augmentation de la densité des cellules et donc une augmentation de propriétés mécaniques.

le bois est un solide visco-élastique : sous contrainte, il subit une déformation élastique immédiate suivie d'un fluage lent

Expérimentalement : à court terme le bois est considéré comme un élastique pur.

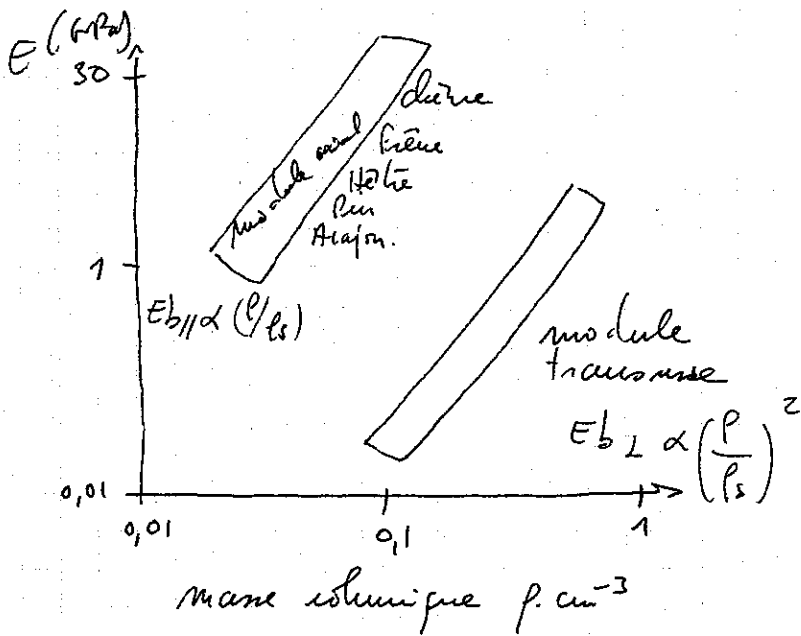
- à long terme on prend un module élastique  $\frac{E}{3}$ .

le module d'Young dépend de la densité et du sens de sollicitation par rapport aux fibres.

→ le module axial  $\propto$  densité

→ le module transverse  $\propto$  densité<sup>2</sup>

⇒ le bois est un matériau très anisotrope.



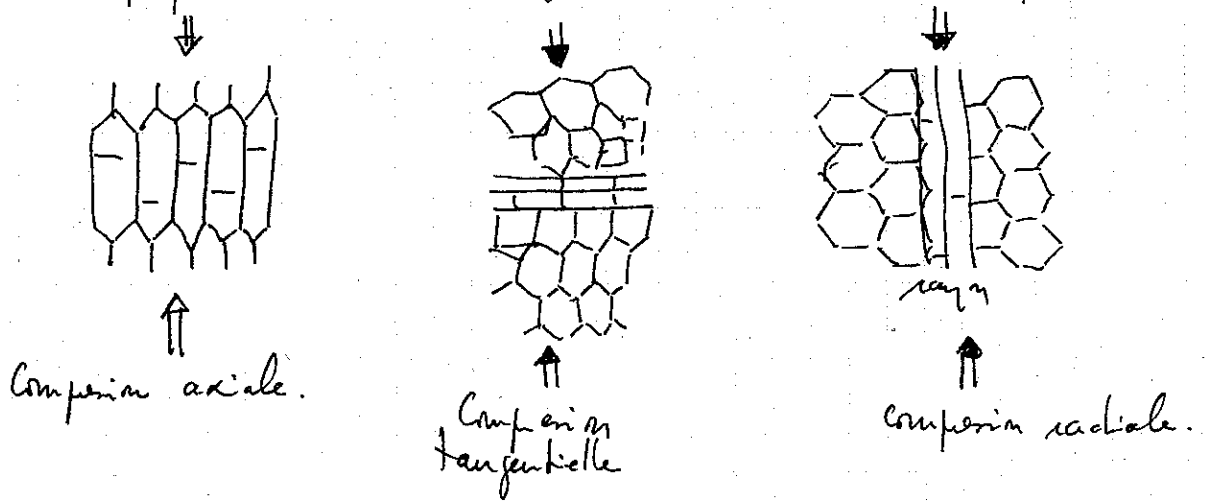
④

m comportement plus  
 celui des polymères  
 expansés.

Dans la construction on sollicite généralement le bois parallèlement aux fibres.

Et on l'attaque perpendiculairement (le module est alors 10 fois moins).

Explication:

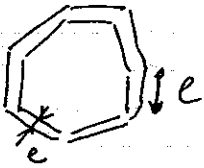


Compression axiale: les cellules se compriment.

le module  $E_{\parallel} = \frac{E_{\parallel} \text{ d'un pair}}{\text{surface réellement occupée par la pair.}}$

$\Rightarrow$  si la densité double, le nombre de pairs double, donc  $E_{\parallel}$  double.

Compression radiale: Intuitivement, la cellule est moins rigide dans cette direction. Sous cette sollicitation les cellules fléchissent.



(5)

densité relative de ces cellules a cellules hexagonales

$$\rho/\rho_s = (e/e_s)^2$$

le module équivalent de ces cellules est  $E = \sigma_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2$

le module radial du bois dépend donc au carré de la densité du bois.

⇒ plus le bois est dense plus l'anisotropie en module d'Young (anisotropie élastique) est faible

### Résistance à la traction:

valeur typique:  $R_{\text{axial}}$  à la traction  $\approx 100 \text{ MPa}$

(= les meilleurs polymères type éponydes)

ductilité faible (déformation à la rupture  $\approx 1\%$ )

### Résistance à compression

Elle est plus faible d'un facteur 2

Pour compression, les cellules flambent. Comme pour les composites fibres c'est ce flambage qui limite la compression.

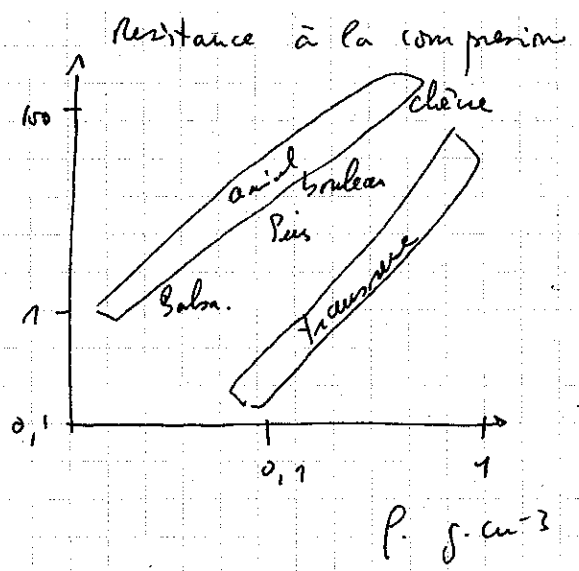
Comme le module d'Young:

$$\sigma_{\parallel} = \sigma_s \frac{\rho}{\rho_s}$$

$\sigma_s$ : résistance d'une fibre.

$$\sigma_{\perp} = \sigma_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2$$

les explications sont les mêmes que pour le module d'Young.

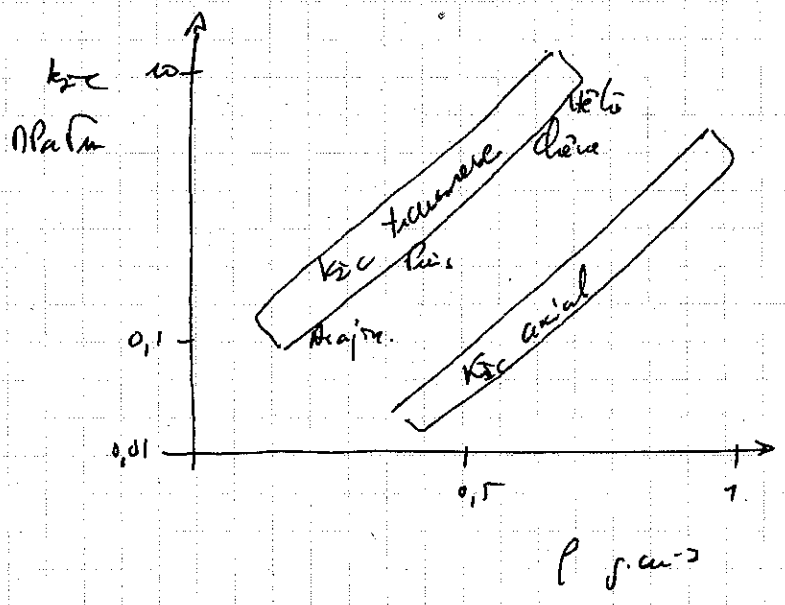


tenacité

le défaut critique: noeu d, compure de sicc, cellule endommagée par une manipulation trop brutale.

$k_{zc} \approx stc \times \left(\frac{P}{P_s}\right)^{3/2}$

la tenacité est 10 fois plus faible en axial qu'en traversure.



- la tenacité peut donc être très élevée car:
- les cellules dévient la force
  - P de l'échange d'absorption
  - les fibres peuvent se déchirer
  - P augmentation d'échange d'abs.

## Conclusion:

7

matériau	E/P	Le/P	K <sub>2c</sub> /P
bois	20-30	120-170	1-12
Alliage aluminium	25	179	8-16
Acier doux	26	30	18
Béton	15	3	0,08

en propriété ramené à la masse identique, le bois est tout à fait concurrencé.

### Avantages:

- pour:
- bonne propriétés / masse identique
  - pas cher
  - stockage de CO<sub>2</sub>

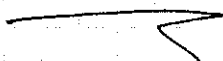
\*

- Inconvénients:
- sensible à l'humidité
  - sensible aux insectes
  - très anisotropes.

\* résistance au feu correcte sous certaines conditions:

- grandes sections: matériau pratiquement auto-protecteur par création d'une croûte de pyro-carbone en surface
- bonne tenue au feu pour les gros sections

Règles: bonne tenue aux attaques chimiques (charpentes en bois et caillots obligatoires pour le stockage de produits chimiques)



# Les matériaux dérivés du bois.

## 1. Introduction:

Le bois naturel est un matériau non isotrope accessible dans de nombreuses unités. Une de ses grande limitations repose sur ses retraits différentiels en fonction de l'humidité.

La réalisation de matériaux dérivés du bois repose sur deux volontés:

- développer des matériaux de grande taille avec une stabilité dimensionnelle élevée et une des propriétés directionnelles spécifiques.
- favoriser leur rentabilité et leur utilisation dans les procédés modernes de fabrication
- utiliser / valoriser les non produits de l'industrie du bois.

Les techniques reposent tout d'abord sur un défilage / déclivage du bois d'une façon plus ou moins fine de façon à obtenir un élément de base (pontelle, plaque, copeaux, sciure).

Cet élément de base doit être alors collé.

## 2. Les adhésifs - les colles.

### 2.1. Les adhésifs thermosensibles.

Ce sont des précondensats - prépolymères ayant une fonctionnalité  $> 3$ .  
Sans l'effet de la température: réticulation tridimensionnelle.

→ macromolécule géante.

Les propriétés mécaniques dépendent de la masse moléculaire de l'adhésif polymérisé.

La force de cohésion de ces adhésifs peut dépasser celle intrinsèque du bois.

Les résines isocyanates peuvent créer des liaisons forts avec les groupements hydroxyle du bois.

Les résines à base de phénols (phénoplasts) sont résistantes à l'eau.

Les résines à base d'urée (aminoplasts) sont sensibles à l'eau.



Résine phénolique: (PF) phénol - formaldéhyde

le ptt et le rapport P/F ainsi que le choix du phénol jouent sur les propriétés de cette résine.

Quelques exemples:

- \* résols : - résine phénolique -
- conditions basiques (souple)
- excès de formaldéhyde

Formaldéhyde / phénol : 2,5 à 2,4/1.

- mod : ↑ solubilité du résol dans l'eau
- ↑ la vitesse de réticulation de la résine

Température: > 120°C

- caractéristique :
- bonne résistance mécanique
  - bonne résistance à l'eau
  - bonne résistance aux produits chimiques.

→ contreplaqué et OSB (Oriented Strand Board: panneaux de lamelles orientées).

\* Novolacs :

phénol / formaldéhyde + milieu acide  
2/1

peu utilisés sauf pour la fabrication de certains OSB.

\* phénol-résorcinol-formaldéhyde (PRF)

↓  
diphénol

en substituant une partie du phénol par du résorcinol :

→ réticulation + rapide (16 à 24 heures).

→ lamelle-collé (assemblage et collage des lames).

## \* Tannin - formaldéhyde

On peut remplacer une partie du phénol par des tannins.

Les tannins sont par ailleurs présents dans le bois (70% dans l'écorce de chêne)

→ très bonne propriété mécanique et résistance à l'eau.

## \* Résines Urées - formaldéhyde (UF)

réticulation par réaction entre urée et le formaldéhyde

Collage à froid: durcisseur: acide citrique - acide tartarique

Collage à chaud: 120 - 200°C  
+ durcisseur nitrate ou sulfate d'ammonium

85% des résines UF sont utilisées pour le collage du bois.

elles sont moins chères que le PF.

Dés:

- sensibles à l'humidité
- évaporation du formaldéhyde libre  
↳ produit irritant.

→ ils existent des nouvelles utilisations en fonction du formaldéhyde libre

## \* Résines mélamine - formaldéhyde

mélamine - urée - formaldéhyde

la réaction entre formaldéhyde et mélamine → résine mélamine-formaldéhyde (MF)

MF: excellente résistance à l'eau

⇒ adhésif contreplaqué et panneaux de particules résistant à l'eau (pièce humide et pièce extérieure).

mis en œuvre: milieu acide, haute température

⚠ Coût élevé.

Application principale: fabrication de papiers imprégnés pour décors mélaminés et stratifiés collés sur panneaux de particules.

- Rivier mélamine - urée - formaldéhyde

→ plus moins élastique que le MF.

→ moins bonne résistance mécanique que le MF.

→ panneaux de particules

Avantage: moins d'émission de formaldéhyde que le MF.

\* Adhésifs à base d'isocyanate

monomères ou polymères de diphenylméthane diisocyanate (MDI)

→ polymérisation avec l'eau contenue dans le bois

→ fabrication de panneaux de particules, d'OSB.

Les isocyanates ont les réactifs  $-N=C=O$  à réagir avec les  $-OH$  du bois

→ collage mécanique très bon et très résistant à l'eau.

- Pas de formaldéhyde

- Vapeurs de MDI irritants.

Rem: diisocyanate + diol → polyuréthane

en présence d'eau les groupes diisocyanates peuvent réagir eux-mêmes sans ajout de diol

→ ~~est~~ adhésif polyuréthane monocomposant.

## 2.2. Adhésifs thermoplastiques: (hot melt)

5

l'adhésion résulte uniquement d'un processus physique. Les longues chaînes polymériques s'enchevêtrent et les frictions entre ces longues chaînes définissent la résistance mécanique.

Avantage: grande vitesse de collage.

Emulsion adhésive:

émulsion aqueuse de:

- éthylène-vinyl-acétate (EVA)
  - polyacétate de vinyle (PVAc)
- } polymère thermoplastique à structure linéaire.

→ dispersion de particules de polymère solide dans l'eau → colle blanche

Inconvénients: - sensible à l'eau  
- résistance mécanique faible

pour améliorer ces propriétés:

ajout de durcisseurs: rés métalliques, rés thermosensibles, isocyanates  
+ chauffage modéré (120°C)

→ liaison chimique avec les macromolécules du TP et du bois.

→ meilleure résistance. lamelles collées

## Colles polychloroprénielles. (Néoprène<sup>®</sup> dérivé de caoutchouc)

polymère de chloropradiène

ce sont des émulsions aqueuses.

piencollage, séchage, puis collage définitif.

Remarque: Colles d'origine naturelle.

- colles d'os et colles de merisier (colle forte)

→ très bonne tenue mécanique

→ sensible à l'eau

} mauvaise tenue intérieure

- colles caseïnes (phosphoprotéines de lait)



3. Matériaux dérivés du bois

3.1. Lamelles-collés

pièces massives reconstituées par collage de lamelles de bois.

↳ propriétés mécaniques sont celles du bois massif.

→ matériaux légers, résistants, renouvelables, résistants au feu.

adhésifs:

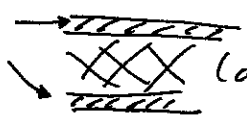
- résine formaldéhyde (RF)
- phénol - résine - formaldéhyde (RPF)
- mélamine avec formaldéhyde (MUF)
- avec formaldéhyde (UF)
- polyuréthane (PU)

→ comme les autres matériaux bois:

- sensible aux insectes
- sensible aux champignons.

3.2. Contreplaqué + lamelle-collé: panneaux multipli

contreplaqué.



lame de bois à fil croisé lamelle-collé

→ menuiserie, bardage extérieur.

3.3. Lamelles-collés aboutés.

se substituent proprement aux bois massifs.

3.4. Contreplaqués et autres matériaux issus du bois tranché ou déroulés

matériau feuilleté: lame de bois obtenue par tranchage ou déroulage de grumes après étamage

3.4.1. Laminé bois (LVL: laminated veneer lumber)

lamelle collée de placages - lamelle-collée en fil parallèle.

colle: phénol formaldéhyde

caractéristique mécanique > celle du bois massif.

le mot de placage anisotropes.

### 3.4.2. Écoulés d'écoupés en lamelles longues (PSL : Parallel Strand Lumber)

⑦

- pontes
- résines phénoliques } excellentes propriétés mécaniques.

### 3.4.2 Matériaux dérivés du bois haché.

- colls: UF ou PUF

→ panneaux de particules:

orientation aléatoire des particules: matériaux isotrope  
propriétés mécaniques inférieures au contreplaqué

→ panneaux de lamelles orientées (OSB: Oriented Strand Board)  
→ orientation des lamelles → matériaux anisotrope

panneaux de particules < propriétés mécaniques OSB < contreplaqué.

→ panneaux de fibres et panneaux de moyenne densité  
(MDF: Medium Density Fiberboard)

Fibres de lignocellulose.

matériaux presque isotrope - minérales - bonne finition.

leur résistance mécanique / densité dépend de leur densité.

### 4. Les placages

On peut coller des lames / placages de bois.

On peut coller en papier.

- papier kraft: imprégné d'une résine phénolique

par application d'une température élevée et d'une pression permet  
d'obtenir le collage direct de la résine sur le panneau de bois sous-jacent.

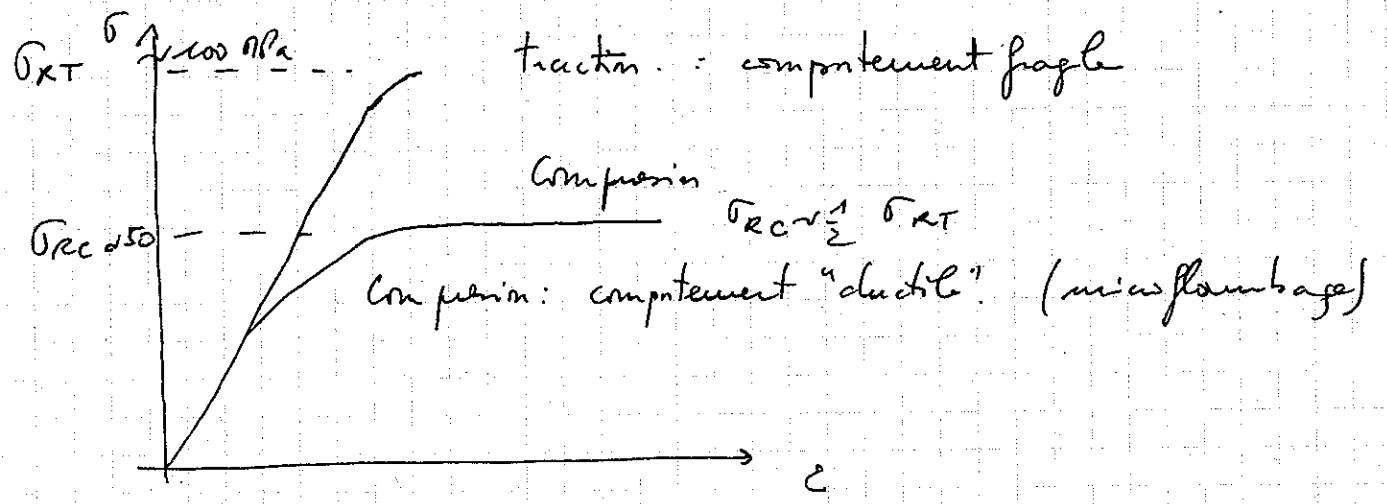
- mélaminés.

papier + résine mélamine-formaldéhyde (MF) ou (MUF)



Le Bois -  
quelques propriétés et comparaisons

- Propriétés mécaniques:



Effet de la densité sur la densité

Densité	Caractéristiques	Exemples (échelles classes Jardin)
$d > 0,85$	bois très durs.	$> 9$ ipé
$0,7 < d < 0,85$	bois lourds et durs	5 à 9 charme dur
$0,56 < d < 0,7$	bois mi-sourds et mi-durs	2,5 à 5 châtaignier - pin charme dur dur
$0,45 < d < 0,55$	bois légers et tendres	1,25 à 2,5 sapin, pin
$d < 0,45$	bois très légers et très tendres	$< 1,25$ peuplier, saule

## Comparaison des caractéristiques limites

②

	Acier S355	Béton B30	Bois lamelle collée GL28
Flexion (MPa)	270	18	12,3
Traction axiale (MPa)	270	2,4	8,6
Traction perpendiculaire	270	2,4	0,2
Compression axiale	270	18	12,3
Compression $\perp$	270	18	2,4
Cisaillement	213	1,8	1,3
Module élastique axial (GPa)	210	11,5	12,6
Module élastique $\perp$	210	11,5	1

## Comparaison en critère de de qualité vis à vis du poids.

matériaux	E (GPa)	densité	critère de qualité $\sqrt{E}/d$	$\sqrt[3]{E}/d$
Acier	210	7,8	58	7
Aluminium	75	2,6	105	16
Béton	11	2,6	41	9
matériaux composites artificiel	75	1,5	182	28
Résineux	10	0,4	950	54
Feuilles	13	0,7	162	33



$\sqrt{E}/d$  doit être maximal pour avoir un poteau porteur le + léger possible

$\sqrt[3]{E}/d$  doit être le + élevé possible pour avoir un panneau qui résiste au flambement tout en étant le plus léger possible.

Coefficient de dilatation thermique et conductivité thermique

matériau	$\alpha$ ( $\mu m/m/^\circ C$ )	$\lambda$ W/m/°C
Béton armé	12	1,5
Acier	12	50
Aluminium	24	175
Laine minérale		0,035

Bois		H=12% d'humidité		H=35% d'humidité	
Chêne ( $\lambda = 0,65$ )	3 à 6.	0,3 (Axial)	0,34 (Axial)	0,2 (T)	0,2 (T)
Épicéa ( $\lambda = 0,45$ )	3 à 6	0,2 (A)	0,25 (A)	0,13 (T)	0,12 (T)

Comportement au feu

La résistance des éléments en bois massif ou lamellé-collé est très satisfaisante. La zone carbonisée périphérique joue un rôle protecteur. Contrairement aux autres matériaux, le bois ne voit pas ses propriétés mécaniques diminuer lorsque la température augmente.

On admet une relation linéaire entre la profondeur de bois carbonisé et le temps.

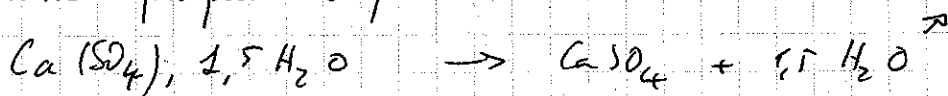
typiquement  $0,7 \text{ mm/min.}$

On peut améliorer cette résistance:

- sels hydrosolubles (hydroxyde de bore - d'alumine ?)
- résine ou peinture intumescente
- produits moussants.

Exemple: complexe bois / laine minérale / plaques de plâtre

$T > 13 \text{ min.}$  plaque de plâtre détruite



30% en poids du plâtre se transforme en  $\text{H}_2\text{O}$

→ réaction de décomposition endothermique

→ l'humidité imprègne la laine minérale. Ce fait lui-même ralentit la propagation du feu

- formation partielle de la laine de verre ( $\text{OH} < 0$ )

$T > 30 \text{ min}$  l'isolateur bois commence à se carboniser sur 5 mm.

⇒ meilleur comportement qu'un mur de béton + polystyrène + plâtre.

Protection des bois:

elles ont pour but d'éviter le développement des champignons et des insectes.

- produits hydrosolubles:

- sels minéraux: chlore, cuivre, arsenic (CCA)

ces sels sont bien fixés dans le bois, donc sont peu lésables

Jalgi la toxicité de ces produits, la très bonne fixation chimique de ces composés dans le bois évite leur lessivage et leur dispersion dans l'environnement.

Ces rés sont fixés, il faut donc les introduire rapidement dans le bois, cela ne peut pas se faire par imprégnation classique mais par des procédés chaud-froid en autoclave.

3 des produits à base de sel de bore, de cuivre + des molécules organiques. Il sont utilisés pour les bois de jeu pour enfants.

- pau de chrome et d'arsenic
- toxicité à long terme?

produits hydrosolubles non fixants mixtes:

sel de bore + ammonium quaternaire

On peut les appliquer par des cycles de ride-perme, trempage diffusion, autoclave.

Ce sont des produits peu fixés dans le bois → lessivage important (classe de protection 1-2 → 3).

produits solvants à base pétrolière:

Il s'agit d'insecticide et/ou de fongicide dilués/solvatisés dans des solvants pétroliers.

Insecticide: pyréthroïdes (perméthrine, cyperméthrine)

Le lindane et l'aldrine sont aujourd'hui interdits.

Fongicide: triazols (azaconazole, tébuconazole, propiconazole)

Rem: le pentachlorophénol (PCP) sont aujourd'hui interdits.

Les fongicides ne sont pas considérés comme des COV.

(ils peuvent être utilisés pour le traitement des bois intérieurs dans les maisons).

Rem: Pour diminuer la quantité de solvant pétrolier on peut utiliser des produits émulsifiés (produit actif + solvant pétrolier) + agent de dispersion (tensio actif) + eau.

- Les produits huileux naturels:

Les produits huileux issus de la distillation de la houille entre 100 et 500°C (crésote) contiennent de nombreux molécules actives insecticides et fongicides et hydrofuges.

Les produits traités ne peuvent pas être collés ni peints (→ traitement des poteaux électriques en bois) traces de chlore de fer...

Les produits contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP): produits cancérigènes et dangereux pour la vie aquatique.

Actuellement les crésotes utilisés contiennent beaucoup moins de ces produits dangereux (directive CEE 94/60).

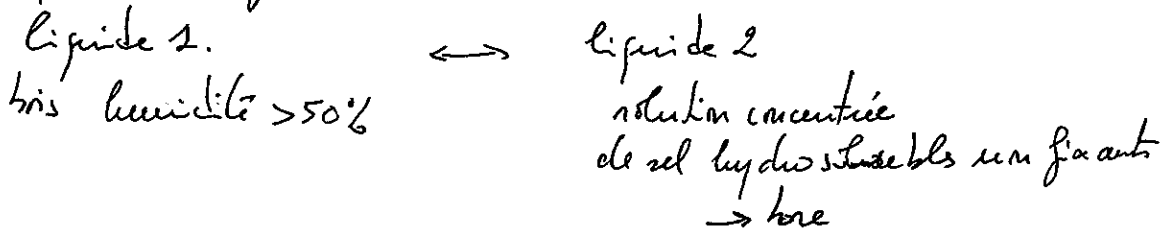
Application extérieure seulement.

Pas de contact permanent avec l'eau (risque de lessivage).

Application par auto-cure.

- Les procédés par diffusion:

Diffusion par échange d'ions entre deux milieux lipidiques



traitement long (plusieurs heures), puis séchage lent.

→ traitement classe 1 et 2.

- Fin de vie de ces bois traités

Les bois traités par les métaux lourds (CCA) et créosotes sont considérés comme dangereux. (classe de protection 3 et 4)

Les autres procédés de protection (classe 2 à 3) sont considérés comme des produits ménagers sont dangereux pour l'environnement.

Combustion des bois traités aux métaux lourds : présence de métaux dans les cendres et d'arsenic dans les fumées

donc? à priori impossible

Il y a un procédé industrielle permettant la récupération de ces métaux lourds (Charbon)

Bois créosotés et autres hydrocarbures : → combustion à haute température nécessaire.

- Stabilisation / traitement des bois par thermolyse ménagée

Thermolyse sous atmosphère réduite entre 180 et 280°C

→ création de liaisons (pont) intermoléculaires entre les molécules du bois. destruction <sup>partielle</sup> des fonctions hydroxyles → dégradation des hémicelluloses.

→ stabilité vis à vis de l'humidité.

→ le bois n'est plus digérable par les insectes

→ le bois n'est plus reconnu (absorbable) par les systèmes enzymatiques des champignons.

bois plats → bois réifié

Plus : bois + dur et + facile + cassant.

