



Construction Bois 1



1 Bois et construction

- 1.1 Utilisation du bois
- 1.2 Ressources
- 1.3 Intérêt du bois

2 Matériau bois

- 2.1 Constitution
- 2.2 Hygroscopie
- 2.3 Préservation
- 2.4 Comportement mécanique
- 2.5 Comportement thermique / acoustique
- 2.6 Résistance mécanique
- 2.7 Aspects normatifs

3 Eléments de technologie

- 3.1 Produits dérivés du bois
- 3.2 Systèmes porteurs horizontaux
- 3.3 Systèmes porteurs verticaux
- 3.4 Portiques et arcs
- 3.5 Assemblages

4 Calcul des structures bois

- 4.1 Principes du calcul aux états limites
- 4.2 Résistance des sections
- 4.3 Stabilité des éléments
- 4.4 Déformation des ossatures
- 4.5 Stabilité au feu



0 Sources documentaires et sites

1. Construire avec le bois - *Gauzin-Müller*. Le Moniteur.
2. Construire en bois - Tome1. Tome 2. *Götz. Hoor. Möhler. Natterer*. Moniteur & PPUR.
3. Construction en bois - Vol.13 Traité de Génie Civil. *Natterer. Sandoz. Rey*. PPUR.
4. Structures en bois aux états limites - Tome 1. Tome 2. Eyrolles
5. Conception des structures en bois lamellé-collé - *Daguzé*. Eyrolles
6. Techniques de l'Ingénieur
7. Eurocode 5
8. Règles CB 71
9. Charpente en bois lamellé-collé - Guide pratique de conception et de mise en œuvre. Eyrolles
10. Revue Séquences Bois - CNDB
11. Organismes et portails (www.)

Forêt

onf.fr
crpf-midi-pyrenees.com
foretpriveefrancaise.com
cirad.fr
afocel.fr
fsc.org
pefc-france.org

Construction et filière bois

fnbois.com
bois-construction.org
maisons-bois.org
glulam.org
ucmp.org
netbois.com
gis-bois.fr

Centres techniques

ctba.fr



1.1 Utilisation du bois (1)

Parts dévolues aux matériaux de construction dans le bâtiment

Brique. béton. pierre = 35%

Acier. aluminium = 31%

Matériaux synthétiques = 24%

Bois = 10 %

Bois = 15 % Allemagne, Autriche

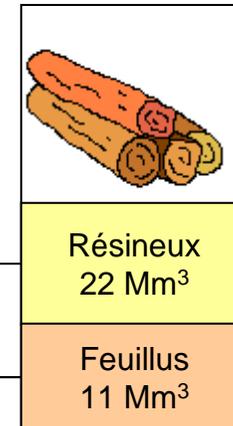
Bois = 35 % Amérique du Nord, Scandinavie

Importation

0.1 Mm³ 1.9 Mm³

8 Mm³
1 Mm³

Récolte
(bois d'oeuvre et bois d'industrie)



Destinations du bois dans la construction

- Éléments structuraux
- Voiles et planchers
- Menuiseries, escaliers
- Coffrages, cintres
- *Fondations exclues*

Types de construction

- Charpentes, supports de toiture
- Bâtiments industriels
- Bâtiments d'habitation
- Bâtiments de loisirs
- Bâtiments scolaires
- Ouvrages d'art
- *Immeubles de grande hauteur exclus*
- *Ouvrages en contact avec le sol exclus*



1.1 Utilisation du bois (2)

Marché de la construction bois en extension ?

Eléments favorables

- Ressources abondantes
- Création du CNDB (1989)
- Engagements de Rio (1992) et Kyoto (1997)
- Accord cadre Bois Const. Env. (2001)
- Article 21-V de la Loi sur l'Air (2004)

- Toutes constructions hors logement : obligatoire
- Logement : volontaire
- Principe : volume mini de bois / m² SHON

<i>Planchers porteurs</i>	50 dm ³ / m ²
<i>Ossatures poteaux-poutres</i>	25 dm ³ / ml
<i>Charpente BM / BLC</i>	40 dm ³ / m ²
<i>Charpente industrielle</i>	30 dm ³ / m ²
<i>Escaliers</i>	60 dm ³ / m ²
<i>Plinthes</i>	2 dm ³ / m ²

Utilisation du bois = 14% des engagements

Actions d'information aux MO et de formation

Utilisation du bois < 65% de l'accroissement biologique des forêts

Eléments défavorables

- Ressources peu régulières
- Affaiblissement du CNDB
- Manque de formation
- Concurrence (Arcelor. Laffarge)
- Préjugés

Bois = matériau dégradable, peu résistant, inflammable, couteux
Exploitation du bois = déforestation

Absence d'un groupement industriel équivalent, filière bois peu solidaire

3 écoles d'ingénieurs

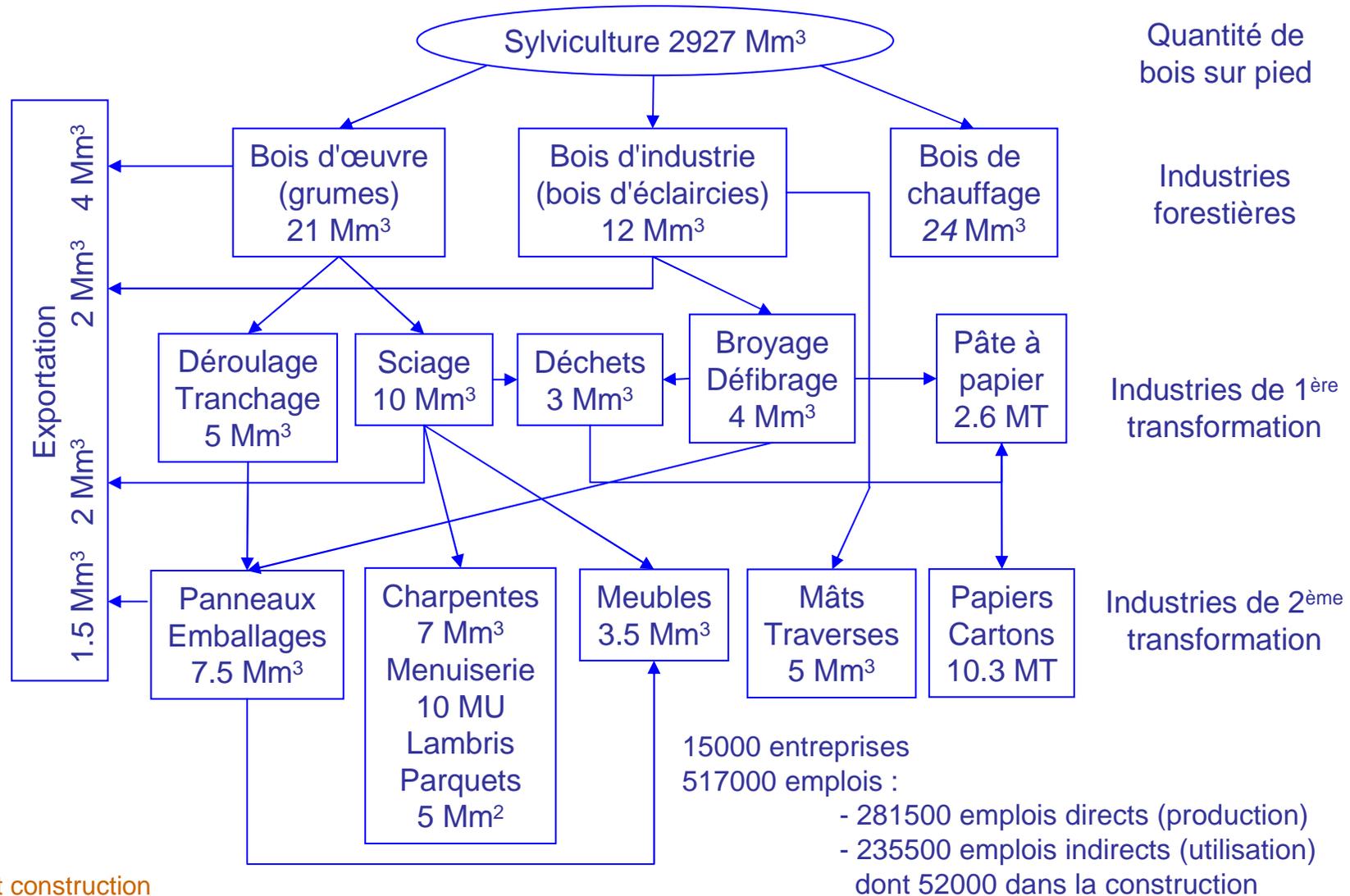
Fermeture des délégations régionales

Propriétés petites et nombreuses, difficulté de régulation du marché, bois LC ≈ 750 €/m³, bois M ≈ 300 €/m³



1.1 Utilisation du bois (3)

Répartition de la consommation dans la filière bois (M=10⁶)



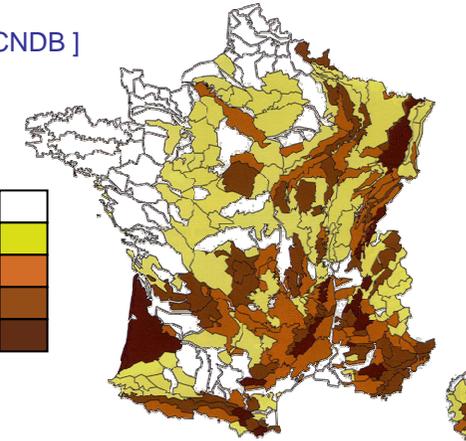
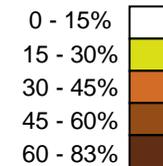


1.2 Ressources (1)

[Image : CD du CNDB]

Caractéristiques de la forêt métropolitaine (AFOCEL 2006)

- Superficie = 16 Mh (29% du territoire)
- Répartition = quart nord-ouest "chauve"
- Accroissement biologique = 90 Mm³ / an
- Diversité = 125 essences
- Hétérogénéité des peuplements
- Répartition des essences



64% feuillus

Chêne pédonculé	17%
Chêne rouvre	12%
Hêtre	9%
Châtaigner	4%
Feuillus précieux	3%
Peuplier	2%
Autres feuillus	17%

36% résineux

Sapin-Epicéa	10%
Pin maritime	9%
Pin sylvestre	8%
Douglas	2%
Autres résineux	7%

- Répartition des propriétaires

27% publics (forêts domaniales = 11%, forêts communales = 16%), 73% privés (83% en MP)
Morcellement de la forêt privée : 30% constituée de propriétés de 1 à 10 h

- Organisme de tutelle des forêts

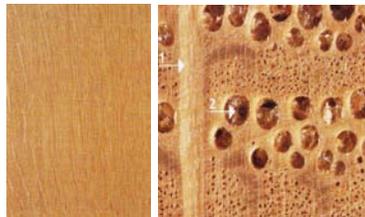
Forêt publique : Office National des Forêts (entretien, exploitation, gestion, contrôle, ingénierie)
Forêt privée : Centres Régionaux de la Propriété Forestière (conseil, contrôle, ingénierie)



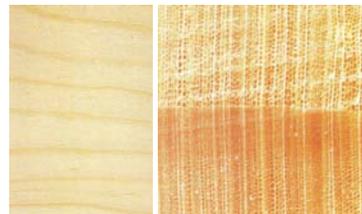
1.2 Ressources (2)

Principales essences métropolitaines utilisées en construction

Chêne



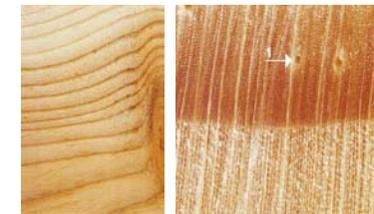
Sapin



Peuplier



Mélèze

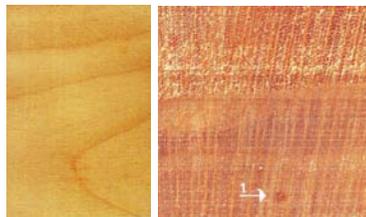




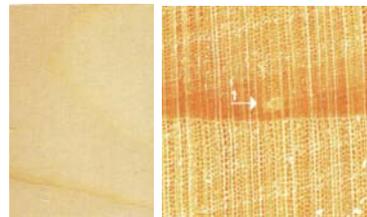
1.2 Ressources (3)

Principales essences métropolitaines utilisées en construction (suite)

Douglas



Epicea



Pin sylvestre





1.2 Ressources (4)

Position dans l'UE (surface forestière=140 Mh, production=450 Mm³ – sciages=95 Mm³)

- Superficie = Suède (19%), Finlande (16%), France (11%), Espagne (10%), Allemagne (8%)
- Volume = France (15%), Suède (15%), Allemagne (14%), Finlande (10%), Pologne (10%)
- Sciages = Allemagne (16 Mm³), Suède (16 Mm³), Finlande (13 Mm³), France (10 Mm³)
- Diversité = France, Espagne, Italie
- Premier exportateur de feuillus
- Importateur de résineux du nord (Suède, Finlande, Russie) = 3.5 Mm³ / an

Certification forestière

"La gérance et l'utilisation des forêts et des terrains boisés. d'une manière et à une intensité telles qu'elles maintiennent leur diversité biologique, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur capacité à satisfaire, actuellement et pour le futur, les fonctions écologiques, économiques et sociales pertinentes, aux niveaux local, national et mondial et qu'elles ne causent pas de préjudice aux autres écosystèmes"

- Objectifs

Promouvoir et accréditer la gestion durable des forêts et des produits ligneux
 Concilier écologie et économie
 Rassurer le consommateur final

- Organismes : dénomination et influence

Forest Stewardship Council (FSC - 1993)

47 Mh certifiés (30 pays), 75 pays affiliés

Programm for the Endorsement of the Forest Certification schemes (PEFC - 1999)

106 Mh certifiés (18 pays), 26 pays affiliés

- Situation française métropolitaine

3.7 Mh de forêts certifiées (90% dans le domaine public)

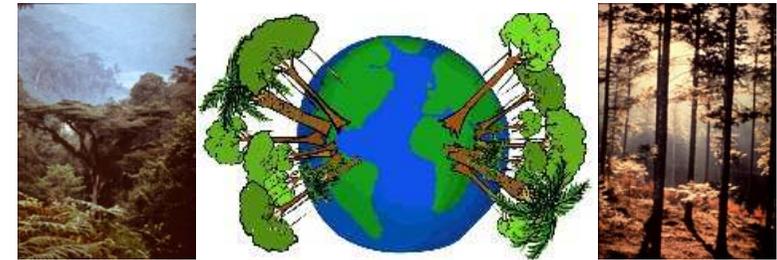
528 entreprises (83% liées à l'exploitation forestière)



1.2 Ressources (5)

Caractéristiques de la forêt mondiale (FAO-2000)

- Répartition par continents :



[Images : internet]

Superficie (3870 Mh) :

Afrique	17%
Amérique Nord	14%
Amérique Sud	23%
Asie-Océanie	19%
Europe	5%
ex-URSS	22%

Production et utilisation (3771 Mm³/an)

	Production (Mm ³ /an)	Bois énergie	Bois ronds	Sciages
Afrique	605 (16.1%)	87.3%	11.4%	1.3%
Amérique Nord	962 (25.5%)	16.2%	64.1%	19.7%
Amérique Sud	368 (9.8%)	50.3%	41.3%	8.4%
Asie-Océanie	1124 (29.7%)	70.7%	22.9%	6.4%
Europe	533 (14.1%)	10.1%	70.1%	19.8%
ex-URSS	179 (4.8%)	29.6%	59.2%	11.2%

- Situation de la déforestation (entre 1990 et 2000) :

Variation de la superficie

Afrique	-7.5%	52%	} -102 Mh
Amérique Nord	-1%	6%	
Amérique Sud	-4%	36%	
Asie-Océanie	-0.8%	6%	
Europe	+4.4%	89%	} +9 Mh
ex-URSS	+0.1%	11%	

Pays concernés

Bilan déficitaire	Bilan excédentaire
Brésil (-2.3Mh/an)	Chine (+1.8 Mh/an)
Indonésie (-1.3Mh/an)	France (+0.03 Mh/an)
Congo	
Nigeria	



1.2 Ressources (6)

Caractéristiques de la forêt mondiale (suite)

- Origines du déficit forestier :
 - Pression démographique (extension des zones peuplées vers les forêts)
 - Pauvreté (consommation des ressources disponibles et accessibles)
 - Culture sur brûlis (patûrages provisoires)
 - Conflits armés (monnaie d'échange)
 - Routes (accès facilité vers les forêts)
 - Exploitations et bénéfices illégaux** (non respect des cotas, non respect des pratiques de sylviculture, pression mafieuse, trafic de certification, blanchiment, etc.. **bénéfices ≈ 10 à 15 Milliards € / an**)
 - Manque de contrôles (laxisme des états. y compris ceux de l'UE)
- Pays encourageant la déforestation par leurs importations illégales (WWF-2005)
 - Pays exportateurs : Brésil, Indonésie, Congo, Nigéria, Russie
 - Pays importateurs : Angleterre, Finlande, Allemagne, France, Italie, Pays-Bas
 - Quantité importée : 20 Mm³ / an
 - Bénéfice illégal "blanchi" : 3 Milliards € / an

[Image : internet]

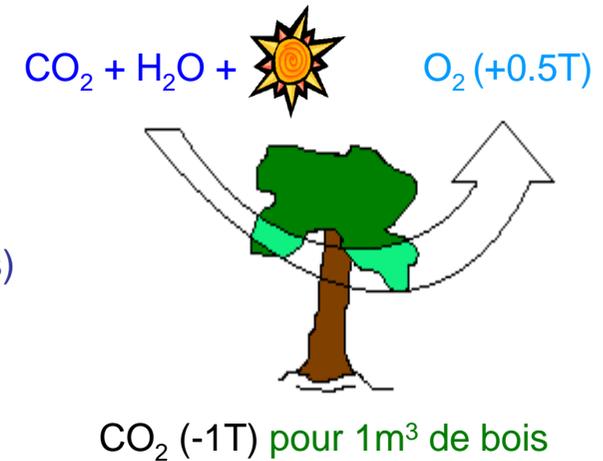
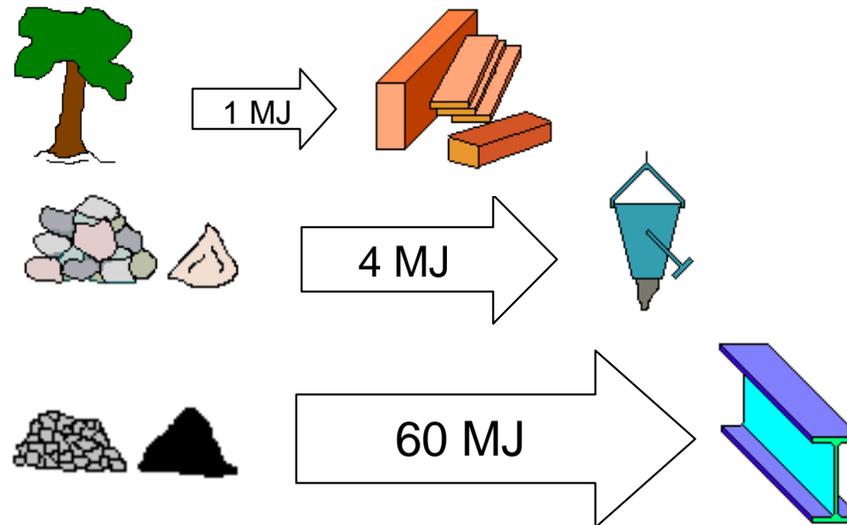




1.3 Intérêt du bois (1)

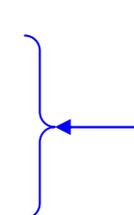
Ressource écologique

- Lutte contre l'effet de serre par fixation du carbone
- Seul matériau renouvelable (conditions de gestion des forêts)
- Faible énergie de transformation



- Valorisation des sous-produits (sciure, écorce, petit bois)
- Régulation du cycle de l'eau (limitation de l'érosion et amélioration de la perméabilité des sols)
- Amélioration du cadre de vie (paysages, lieux de détente, association aux projets HQE)

Cible 2 : Choix intégré des procédés et produits de construction
 Cible 3 : Chantier à faible nuisance
 Cible 4 : Gestion de l'énergie
 Cible 8 : Confort hygrométrique

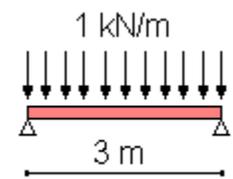




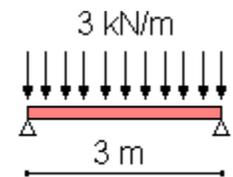
1.3 Intérêt du bois (2)

Ressource architecturale et technique

- Se prête à toutes les formes (arcs, dômes, éléments torsés)
- Performances naturelles
 - Mécaniques
 - Thermiques
 - Acoustiques
 - Résistance aux ambiances agressives
 - Tenue au feu
- Nombreux produits dérivés
- Durabilité (conditions d'emploi)



	Masse	Energie	Bilan CO ₂
Bois	30 kg	30 kJ	-50 kg
Acier	30 kg	1800 kJ	+20 kg
Béton	300 kg	1800 KJ	+110 kg



Bois	100 kg	100 kJ	-160 kg
Acier	60 kg	3600 kJ	+40 kg
Béton	300 kg	1800 KJ	+110 kg

Ressource naturelle (et industrielle ?)

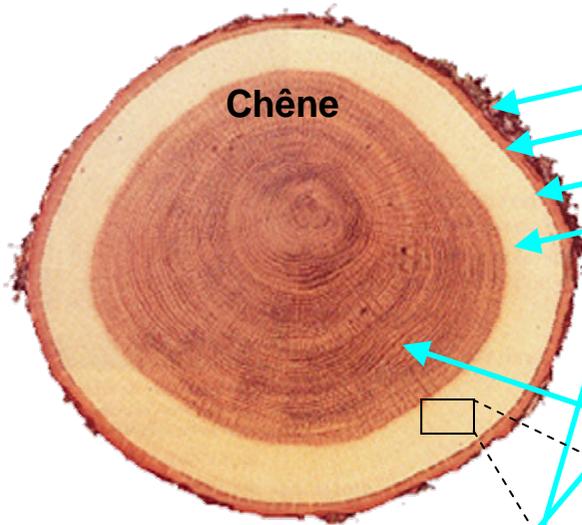
- Disponibilité continue (gestion cohérente des forêts)
- Irrégularité de l'offre (morcellement de la propriété)
- Variabilité des performances (climat - eau, température, vent -, sol - nutriments -, maladie)
- Variabilité des bois de construction (qualité des essences, diversité des peuplements)

Exemples de constructions bois



2.1 Constitution (1)

Croissance verticale et excentrique - Coupe diamétrale d'une grume



Chêne

Ecorce : protection
 Liber : conduction de la sève élaborée
 Cambium : couche génératrice
 Aubier : conduction de la sève brute

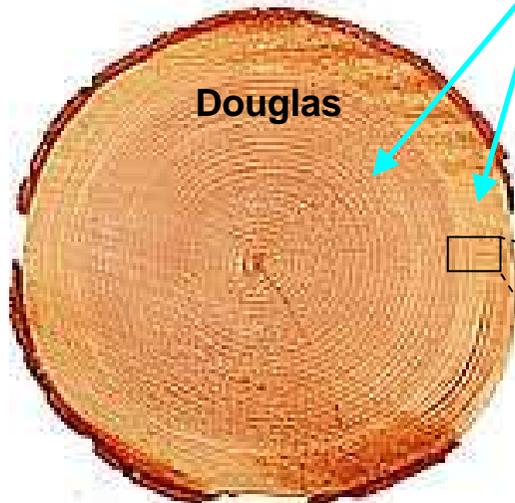
Activité biologique
 (développement,
 défense, nutrition)

Imprégnation de lignine et de tanins
 Obturation de la porosité

Duraminisation

Bois de cœur : support structural - résistance mécanique

[Images : site du CNDB]

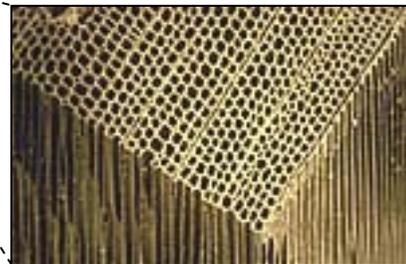


Douglas



Feuillus

Arbres à feuilles caduques
 Famille botanique : angiospermes
 Présents depuis 100 Ma (crétacé)
 Structure ligneuse complexe



Résineux (conifères)

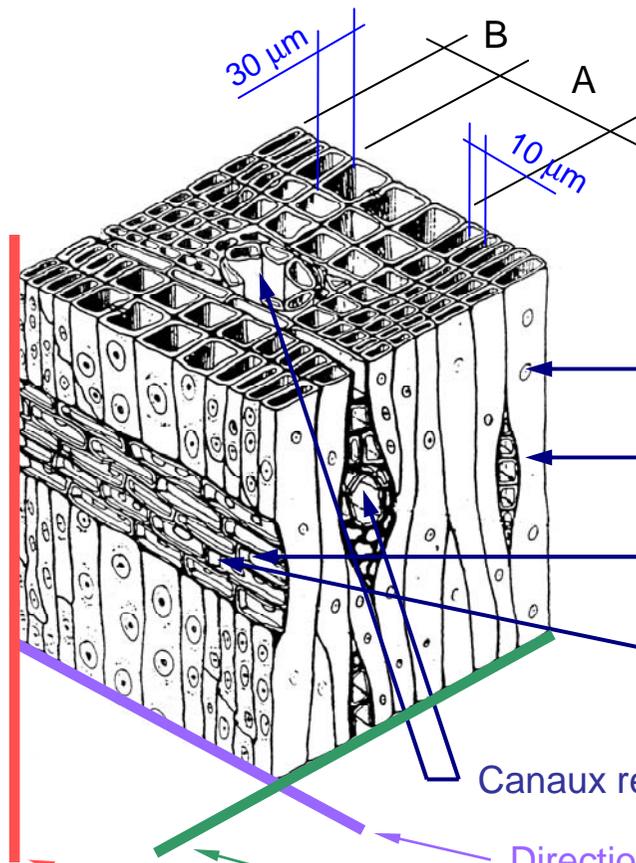
Arbres à aiguilles persistantes
 Famille botanique : gymnospermes
 Présents depuis 270 Ma (carbonifère)
 Structure ligneuse simple



2.1 Constitution (2)

Structure ligneuse

• Résineux



A : bois initial (bois de printemps)

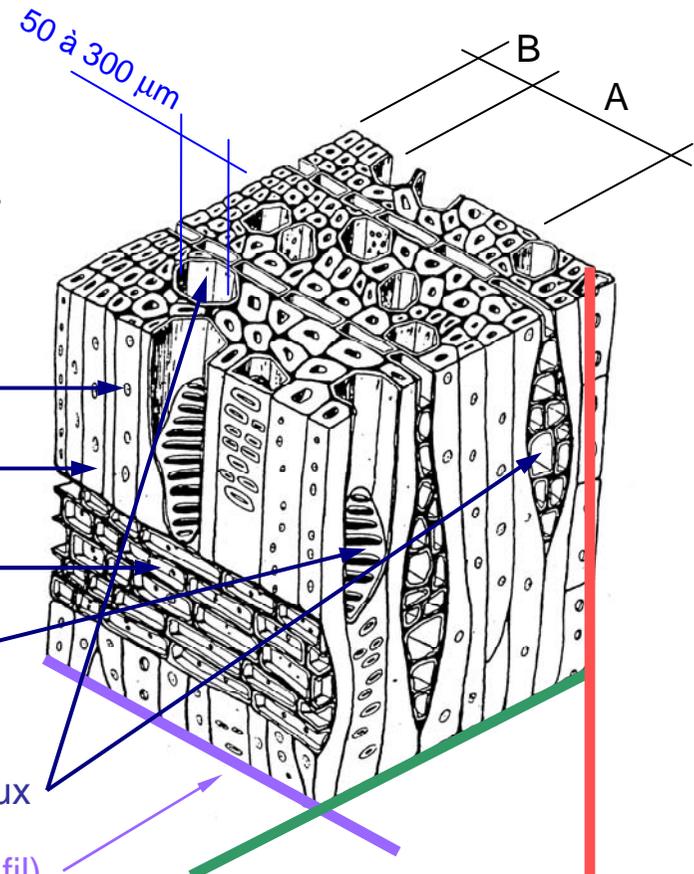
B : bois final (bois d'été)

A+B : cerne d'accroissement annuel

• Feuillus

Fibres = trachéïdes
Forme régulière
Paroi fine

Fibres ≠ trachéïdes
Forme irrégulière
Paroi épaisse



Ponctuations aérolées

Fibres

Rayons ligneux

Parenchymes

Cellules productrices

Canaux résinifères

Vaisseaux

Direction radiale (perpendiculaire au fil)

Direction orthoradiale (perpendiculaire au fil)

Direction axiale (sens du fil)

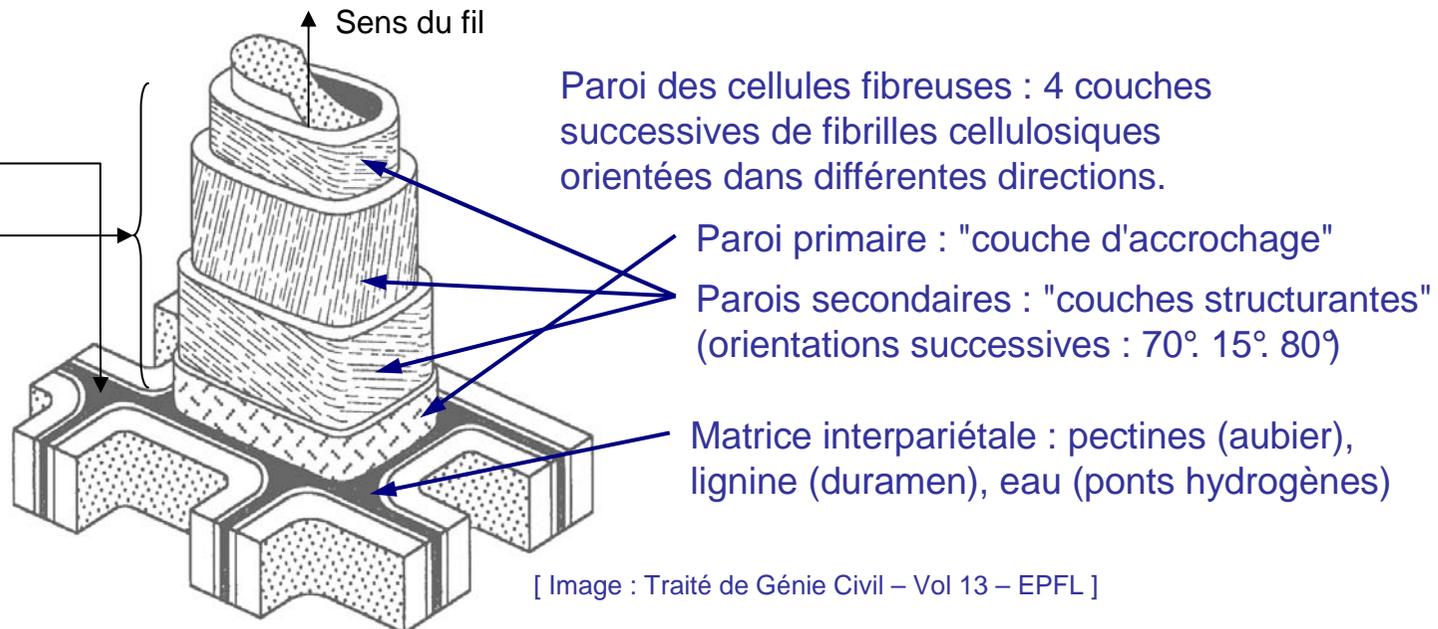
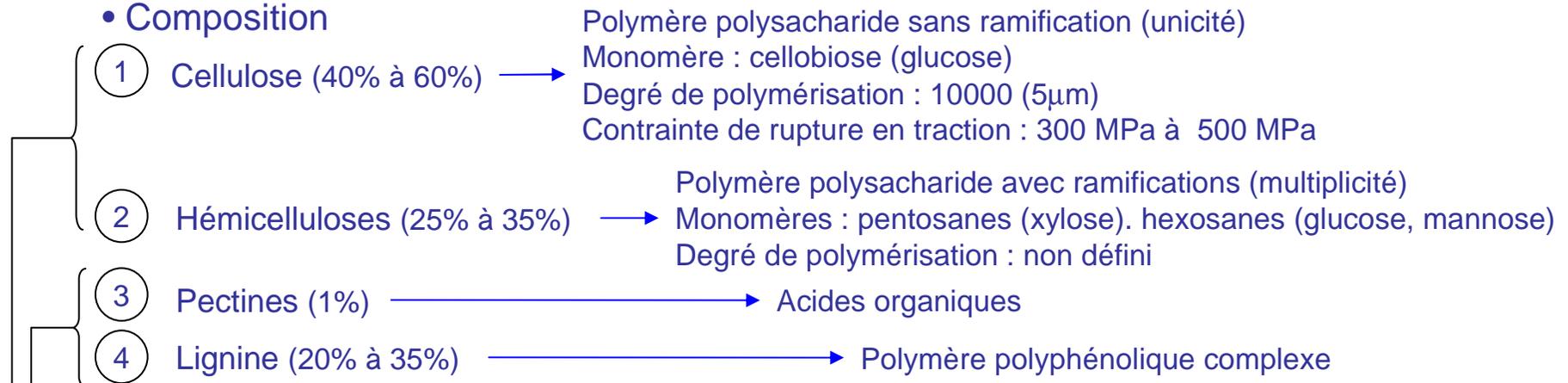


2.1 Constitution (3)

Matière ligneuse

- Dérivée du glucose synthétisé dans les feuilles ou les aiguilles

- Composition



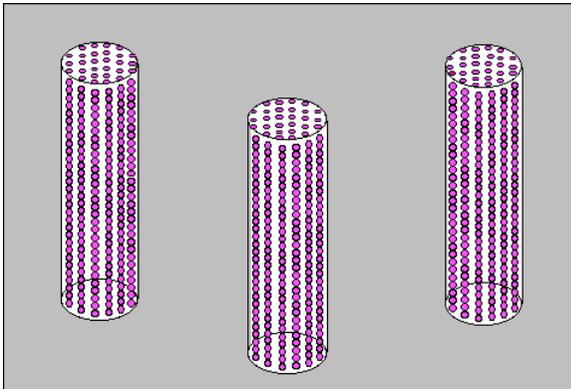


2.1 Constitution (4)

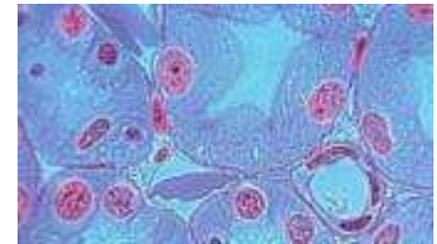
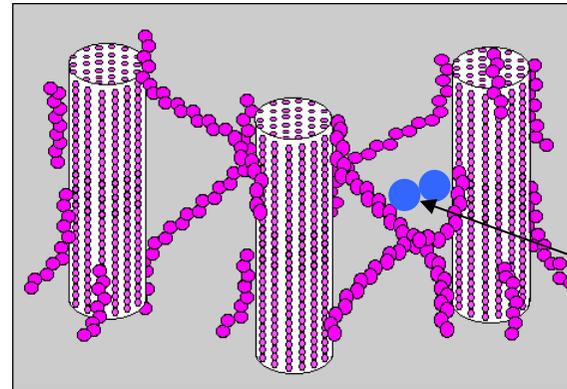
Matière ligneuse (suite)

- liaison intercomposants (dans une couche) : enchevêtrement complexe

① Fibrilles cellulosiques

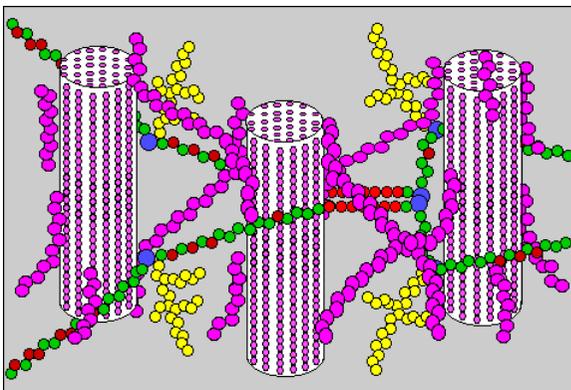


① et hémicelluloses ②

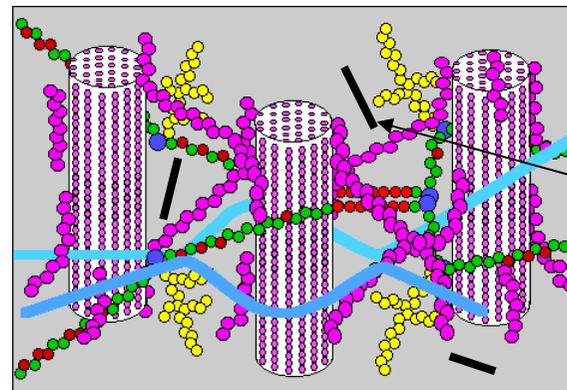


Molécules d'eau adsorbées par les hémicelluloses :
 (1) ponts hydrogènes dans la paroi et dans la matrice interpariétale,
 (2) phénomène de gonflement et retrait de la paroi.

① ② et pectines ③ ou lignine ④



① ② ③ et protéines



Eléments minéraux
 Potassium
 Magnésium
 Calcium
 Silice

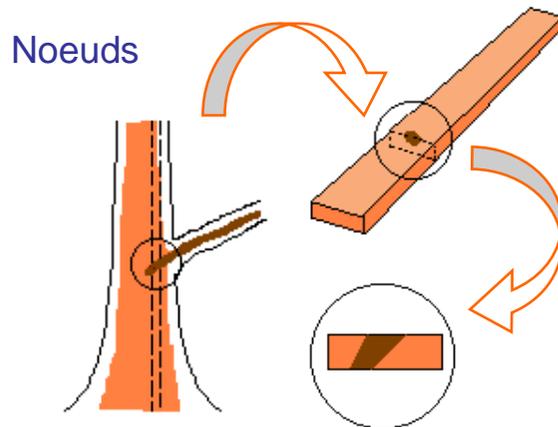
[Images : Site BM - UPMC Jussieu]



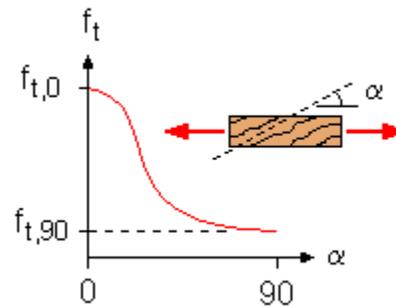
2.1 Constitution (5)

Singularités

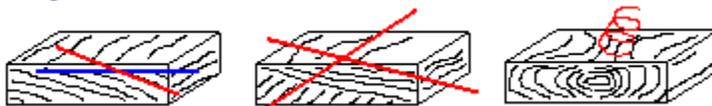
- Liées à la croissance



Déviations de l'orientation de la sollicitation par rapport au fil du bois : affaiblissement des résistances en flexion et en traction

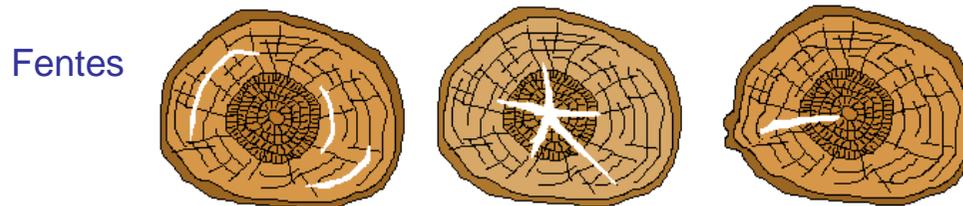


Irrégularité du sens du fil



Fil incliné, contre-fil, fil tors (loupe)

- Liées au climat (conditions de croissance)



Roulures, quadratures, gélivures

Lunures (cernes d'aubier dans le bois de cœur), poches de résine



2.2 Hygroscopie (1)

Teneur en eau

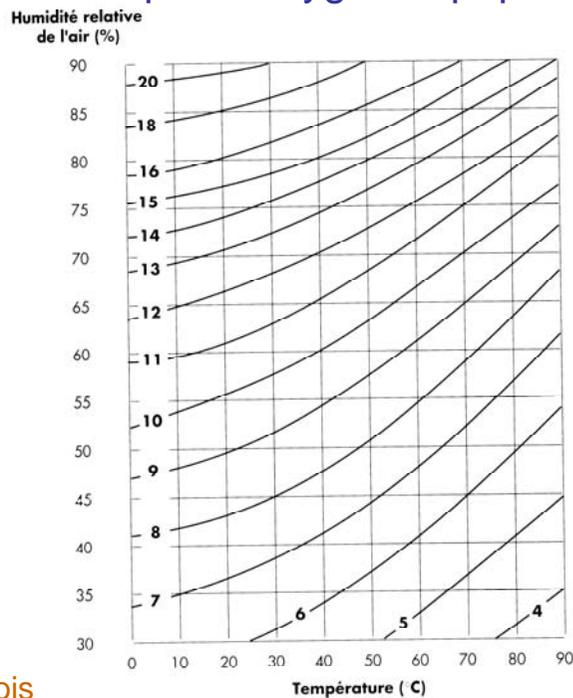
- Quantité d'eau contenue dans le bois

$$H = 100 \left(\frac{M_H - M_0}{M_0} \right)$$

M_H : masse du bois humide

M_0 : masse du bois anhydre

- Etat d'équilibre hygroscopique



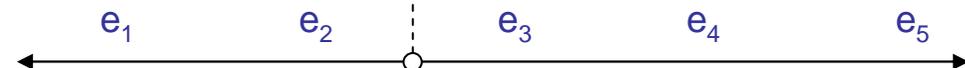
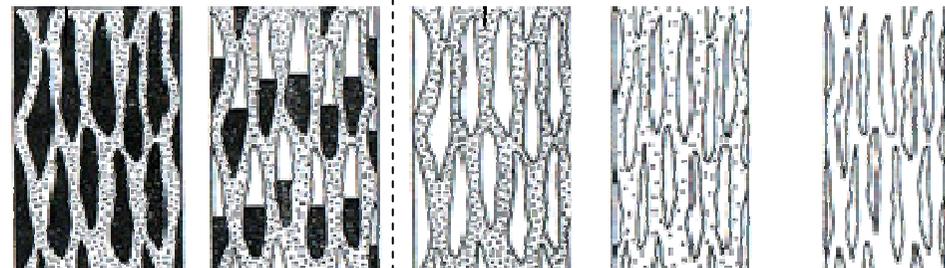
Bois fraîchement abattu (bois vert)
 Feuillus $H \approx 85\%$ - Résineux $H \approx 140\%$

Séchage naturel : $H \geq 13\%$
 Feuillus 4 à 12 mois
 Résineux 3 à 6 mois

Séchage artificiel : $H \geq 8\%$
 Feuillus 10 à 20 jours
 Résineux 2 à 5 jours



[Images : CD du CNDB]



$H > 30\%$
 Pas de retrait

$H < 30\%$
 Retrait

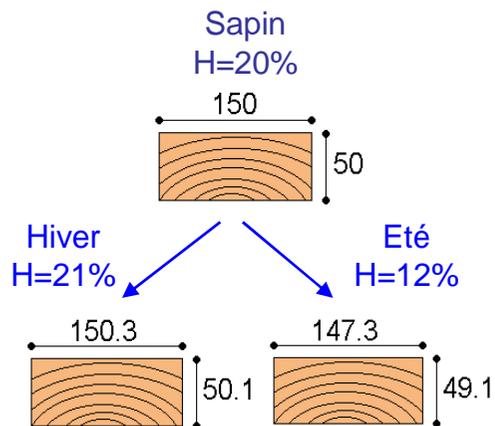
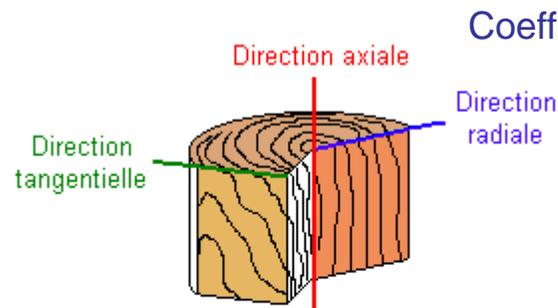
$$e_1 = e_2 > e_3 > e_4 > e_5$$



2.2 Hygroscopie (2)

Variations dimensionnelles

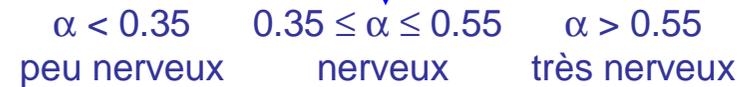
- Rétractibilité



Coefficients de retrait en % (par % d'humidité)

$$\left. \begin{aligned} \alpha_a &\leq 0.01 \\ 0.06 &\leq \alpha_r \leq 0.3 \\ 0.17 &\leq \alpha_t \leq 0.4 \end{aligned} \right\}$$

$\alpha = \alpha_a + \alpha_r + \alpha_t =$ rétractibilité volumétrique



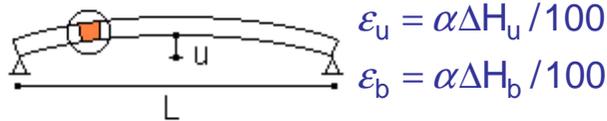
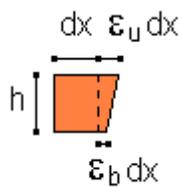
	α_r	α_t	Nervosité (stabilité)
Peuplier	0.15	0.28	N (MS)
Red cedar	0.08	0.22	PN (MS)
Sapin	0.14	0.31	N (S)
Epicéa	0.17	0.32	N (S)
Douglas	0.17	0.28	N (S)
Pins (mar. et sylv.)	0.17	0.30	N (MS)
Hêtre	0.21	0.41	TN (PS)
Mélèze	0.16	0.30	N (S)
Chêne	0.20	0.32	N (MS)
Azobé	0.31	0.40	TN (MS)
Ebène	0.27	0.30	TN (TS)



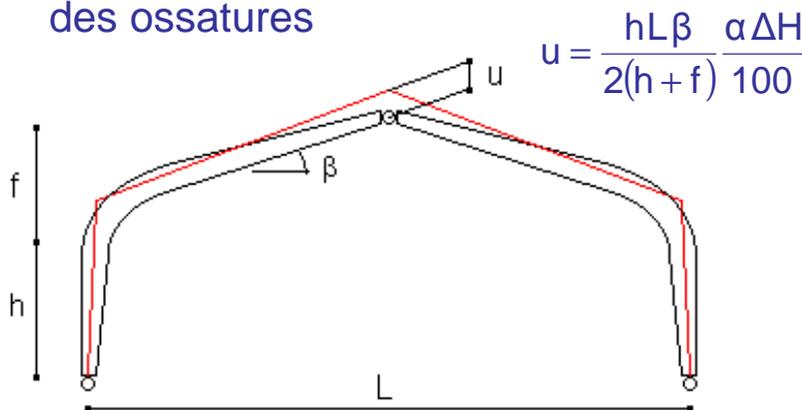
2.2 Hygroscopie (3)

Variations dimensionnelles

- Stabilité géométrique des sections droites
- Stabilité géométrique des éléments



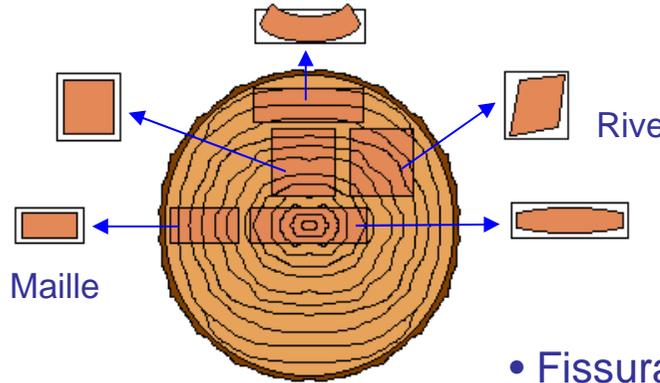
- Stabilité géométrique des ossatures



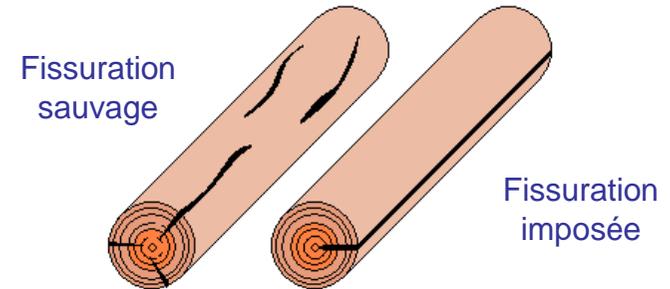
Dosse (tuilage)

Incidence sur :

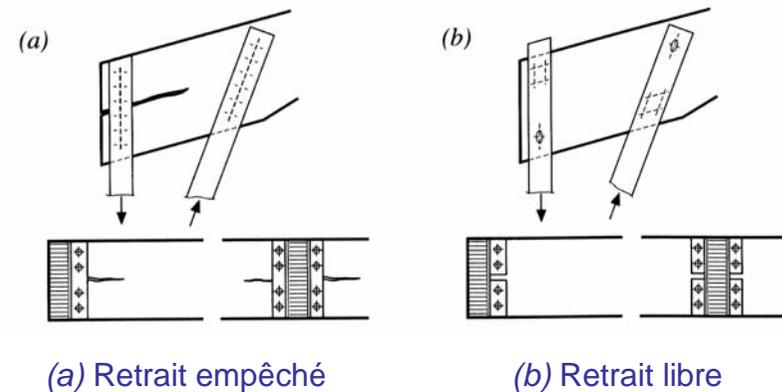
- Planchers.
- Bardages.
- Bois lamellé-collé.
- etc ...



- Fissuration des éléments



- Fissuration des assemblages



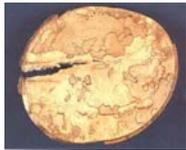


[Images : Construire avec le bois – Moniteur / Site CNDB]

2.3 Préservation (1)

Origine des dégradations (hors incendie)

- Champignons lignivores (consommation des polysaccharides)



Moisissures, bleuissement (dégradation esthétique)

Echauffures, pourritures (dégradation structurelle : méréule)

Conditions de développement : $22\% < H < 30\%$. $T > 5^{\circ}\text{C}$, den sité du bois



- Insecte xylophage (consommation des polysaccharides) : le termite



Dégradation structurelle, effets colatéraux

Détection très difficile (peu d'indices, termitière souterraine)

Conditions de consommation : $10\% < H < 30\%$. $T > 10^{\circ}\text{C}$

- Insectes à larves xylophages (consommation des polysaccharides)



Dégradation structurelle

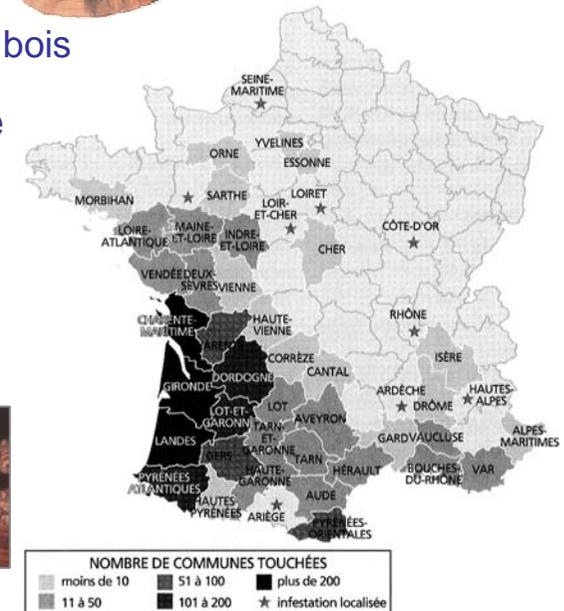
Détection difficile (sciures, trous)

Capricorne (résineux), hespérophone (feuillus)

Vrillettes (résineux et feuillus)

Bostryches (résineux – bois vert)

Conditions de développement : $10\% < H < 30\%$. $T > 10^{\circ}\text{C}$, den sité du bois



- Insectes nidificateurs (destruction sans consommation)

Fourmis, abeilles charpentières, guêpes, frelons



- Rayonnement ultra-violet (altération de la lignine)

Dégradation structurelle superficielle (esthétique), accentuée par l'eau ruisselante



2.3 Préservation (2)

Prévention des dégradations dues aux champignons

- Utilisation d'essences à durabilité naturelle conférée (EN 350)

1 : très durable	doussié, teck, robinier, iroko, azobé
2 : durable	azobé, châtaignier, chêne, <i>red cedar</i>
3 : moyennement durable	sipo, noyer, <i>douglas</i> , <i>mélèze</i> , <i>pins</i>
4 : faiblement durable	<i>épicéa</i> , <i>sapin</i> , orme
5 : non durable	aulne, bouleau, charme, hêtre, peuplier

- Dispositions constructives adéquates

Limiter l'humidité de l'air, ventiler les bois d'extrémité (à porosité débouchante)
 Eviter le contact des bois d'extrémité avec l'eau, éviter le contact avec l'eau stagnante
 Evacuer l'eau ruisselante (éviter les pièges à eau, surtout au niveau des assemblages)
 Eviter le contact avec le sol

- Traitement du bois

Forte nocivité	}	Protection chimique par produits d'imprégnation fongicides (et insecticides)
		Application : badigeon, pulvérisation, trempage, autoclavage
		Solutions salines (Chrome Cuivre Arsenic, Chrome Cuivre Bore, Chrome Cuivre Fluor)
		Solutions pétrolières (pyréthroïdes, triazoles)
Faible nocivité	}	Solutions aqueuses (xylophène)
		Huiles naturelles (créosote : issue de la distillation de la houille)
		Protection par oléothermie (imprégnation à chaud d'huiles végétales)
		Protection par réticulation (réticulation par torréfaction du bois)



2.3 Préservation (3)

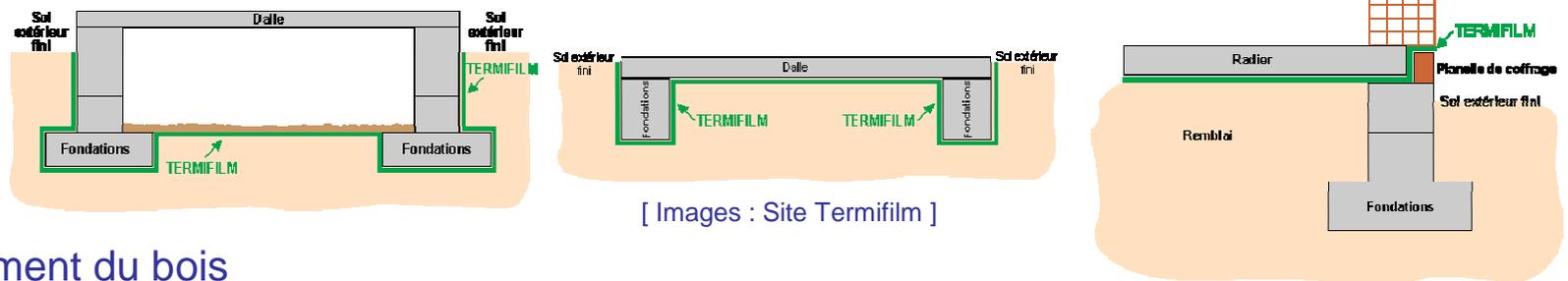
Prévention des dégradations dues aux insectes

- Utilisation d'essences à durabilité naturelle conférée (EN 350)

Termite	doussié, teck, robinier, iroko, azobé
Capricorne	<i>douglas, red cedar, mélèze, pins</i> – duramen uniquement
Hespérophane	chêne, châtaignier

- Dispositions constructives adéquates

Identiques aux précédentes car l'attaque fongique favorise l'attaque par les insectes
 Eviter la fissuration de retrait des pièces de bois (zone préférentielle de ponte)
 Termites : utilisation de collerettes sur les canalisations, de bavettes sous les seuils, utilisation d'un film polyéthylène termicide et répulsif (Termifilm – CECIL)



[Images : Site Termifilm]

- Traitement du bois

Identique aux précédents

Prévention des dégradations dues au rayonnement ultra-violet

- Traitement de finition du bois (lasures, vernis, peintures)

Traitement de finition (efficacité et durée limitées) \neq traitement de préservation (définitif)



2.3 Préservation (4)

Classification normative pour le choix d'une essence

- Classes de risque (EN 335)

Classe	Humidité	Champignons	Insectes	Exemples
1	< 20%	aucun	tous	parquets, menuiseries int,
2	occasionnellement > 20%	piqûres noires	tous	charpentes
3	fréquemment > 20%	pourritures superficielles	tous	bardages, menuiseries ext,
4	> 20%	pourritures profondes	tous	mâts, passelles, ponts
5	> 20% (eau de mer)	pourritures profondes	térébrants marins	pontons, jetées

- Classes de durabilité (EN 350)

- Classes d'imprégnabilité (EN 350)

1 : imprégnable	facile à traiter (pénétration à cœur sous pression)
2 : assez imprégnable	assez facile à traiter (6 mm de pénétration après 2 à 3 h sous pression)
3 : peu imprégnable	difficile à traiter (3 à 6 mm de pénétration après 3 à 4 h sous pression)
4 : non imprégnable	impossible à traiter (imprégnation superficielle après 3 à 4 h sous pression)

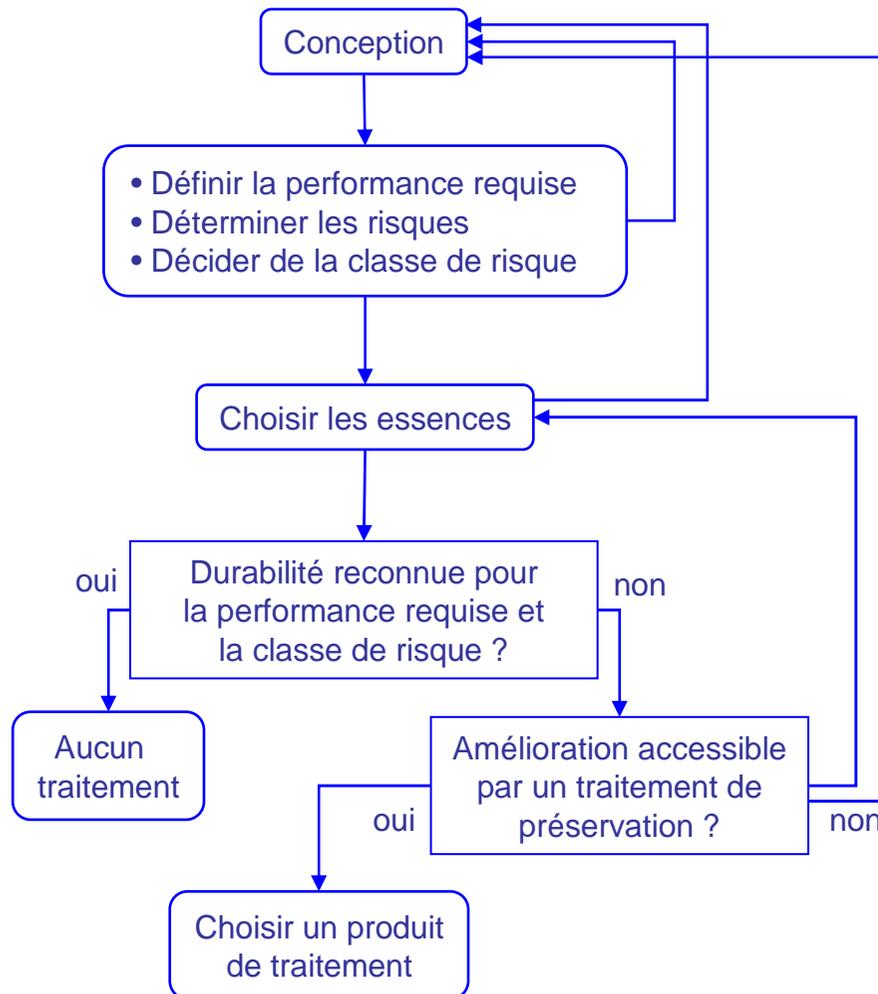
- Exigences de traitement (EN 351)

Classe de risque	Classe d'imprégnabilité	Type de traitement
1 - 2	1 - 4	Superficiel (0 à 3 mm) - Trempage, pulvérisation
3	1 - 3	Superficiel à semi profond (1 à 6 mm) - Trempage, autoclave
4 - 5	1	Profond (à cœur) - Autoclave, vide et pression



2.3 Préservation (5)

Démarche pour le choix d'une essence (EN 350)



	Cl. 1	Cl. 2	Cl. 3	Cl. 4
<i>Epicéa</i>	oui *	oui *	non	non
<i>Sapin</i>	oui	oui *	oui *	non
<i>Mélèze</i>	oui	oui	oui	non
<i>Pins</i>	oui	oui	oui	non
<i>Red cedar</i>	oui	oui	oui	oui *
<i>Douglas</i>	oui	oui	oui	oui *
Peuplier	oui *	oui *	non	non
Châtaignier	oui	oui	oui	oui *
<i>Chêne</i>	oui	oui	oui	oui *
Robinier	oui	oui	oui	oui
Azobé	oui	oui	oui	oui
Doussié	oui	oui	oui	oui
Iroko	oui	oui	oui	oui
Teck	oui	oui	oui	oui

oui : essence utilisable sans traitement
 oui * : essence utilisable avec traitement
 non : essence non utilisable



2.4 Comportement mécanique (1)

Masse volumique (ρ)

- Paramètre primordial du comportement mécanique

- Facteurs de différenciation

Famille botanique (résineux ou feuillus)

Largeur des cernes d'accroissement et proportion relative bois initial / bois final

Rapport épaisseur pariétale / "diamètre équivalent" des fibres

Densité en composants cellulosiques dans les parois des fibres (aubier)

Densité de lignification du bois de cœur (degré de duraminisation)

Humidité

- Facteurs de variabilité

Conditions environnementales (climat, qualité des sols, topographie, maladies)

Conditions d'exploitation (concurrence végétale, élagage, éclaircies)

- Exemples (kg/m^3 - H=15%)

Balsa	100 - 250	<i>Red cedar</i>	400 - 500
Peuplier	400 - 500	<i>Sapin</i>	400 - 500
Orme	550 - 650	<i>Epicéa</i>	400 - 550
Hêtre	550 - 650	<i>Douglas</i>	500 - 600
Châtaigner	550 - 650	<i>Pins</i>	500 - 600
<i>Chêne</i>	650 - 750	<i>Mélèze</i>	600 - 700
Robinier	650 - 750		
Olivier	750 - 1000		
Azobé	1000 - 1100		
Ebène	1050 - 1250		

$$\rho_H = \rho_{H_0} \left(1 + \frac{(1 - \alpha)(H - H_0)}{100} \right)$$

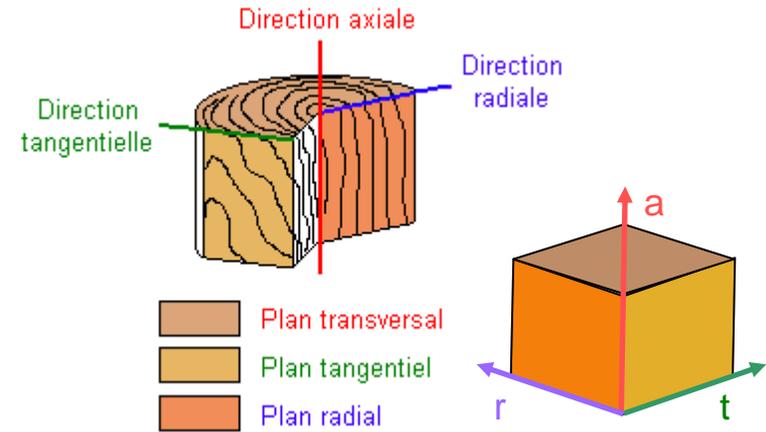


2.4 Comportement mécanique (2)

Anisotropie à symétrie cylindrique

- Comportement élastique idéal

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_t \\ \gamma_{rt} \\ \gamma_{at} \\ \gamma_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_a} & -\frac{\nu_{ra}}{E_r} & -\frac{\nu_{ta}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{ar}}{E_a} & \frac{1}{E_r} & -\frac{\nu_{tr}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{at}}{E_a} & -\frac{\nu_{rt}}{E_r} & \frac{1}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{rt}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{at}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ar}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_a \\ \sigma_r \\ \sigma_t \\ \tau_{rt} \\ \tau_{at} \\ \tau_{ar} \end{bmatrix}$$



avec $\frac{\nu_{ra}}{E_r} = \frac{\nu_{ar}}{E_a}$; $\frac{\nu_{ta}}{E_t} = \frac{\nu_{at}}{E_a}$; $\frac{\nu_{tr}}{E_t} = \frac{\nu_{rt}}{E_r}$

- Valeurs expérimentales des coefficients d'élasticité (40 échantillons de résineux H=12%)

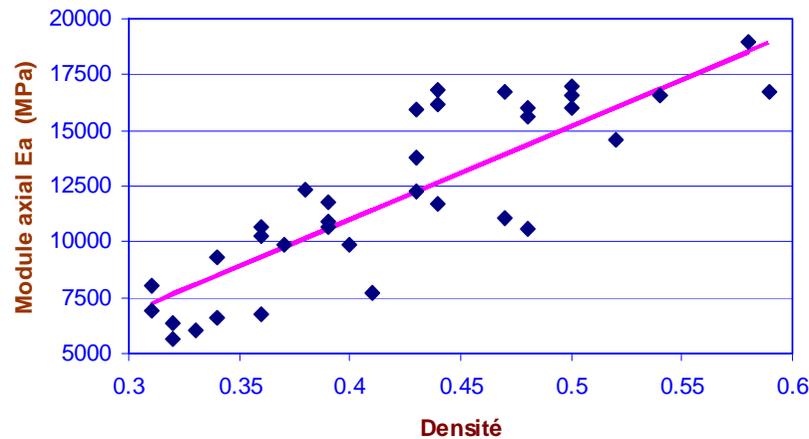
	E_r	E_t	E_a	G_{rt}	G_{at}	G_{ar}	ν_{tr}	ν_{rt}	ν_{at}	ν_{ta}	ν_{ra}	ν_{ar}	$d=p/1000$
Min	120	304	5610	22	301	322	0.18	0.06	0.28	0.01	0.01	0.25	0.31
Max	1720	1090	19000	173	930	1780	0.58	0.81	0.95	0.06	0.11	0.73	0.59
Moyenne	900	588	12082	78	721	782	0.31	0.48	0.47	0.02	0.03	0.41	0.41
CoV (%)	36	38	32	57	23	34	27	28	32	50	60	26	18



2.4 Comportement mécanique (3)

Anisotropie à symétrie cylindrique (suite)

- Incidence de la masse volumique



- Exemples (H=15%)

	densité	E _a (MPa)		densité	E _a (MPa)
<i>Sapin</i>	0.45	12000	<i>Peuplier</i>	0.45	8500
<i>Epicéa</i>	0.45	11000	<i>Châtaignier</i>	0.60	8500
<i>Red cedar</i>	0.45	8000	<i>Hêtre</i>	0.60	14000
<i>Douglas</i>	0.55	12000	<i>Chêne</i>	0.70	12500
<i>Pin Mar.</i>	0.55	9000	<i>Robinier</i>	0.70	11000
<i>Pin Syl.</i>	0.55	12000	<i>Doussié</i>	0.75	13700
<i>Mélèze</i>	0.65	12500	<i>Azobé</i>	1.05	17400

Moyennes avec une dispersion importante

Relations statistiques (40 échantillons)

Résineux à H=12% pour $0.3 \leq d \leq 0.6$ - MPa -

$$E_a = 13100 + 41700 (d-0.45)$$

$$G_{at} = 745 + 989 (d-0.45)$$

$$G_{ar} = 861 + 2080 (d-0.45)$$

Feuillus à H=12% pour $0.3 \leq d \leq 1.3$ - MPa -

$$E_a = 14400 (d / 0.65)^{1.03}$$

$$G_{at} = 971 (d / 0.65)^{1.26}$$

$$G_{ar} = 1260 (d / 0.65)^{1.14}$$

Corrections pour H≠12%

$$E_{a(H)} = E_{a(12)} [1 - 0.015 (H-12)]$$

$$G_{at(H)} = G_{at(12)} [1 - 0.030 (H-12)]$$

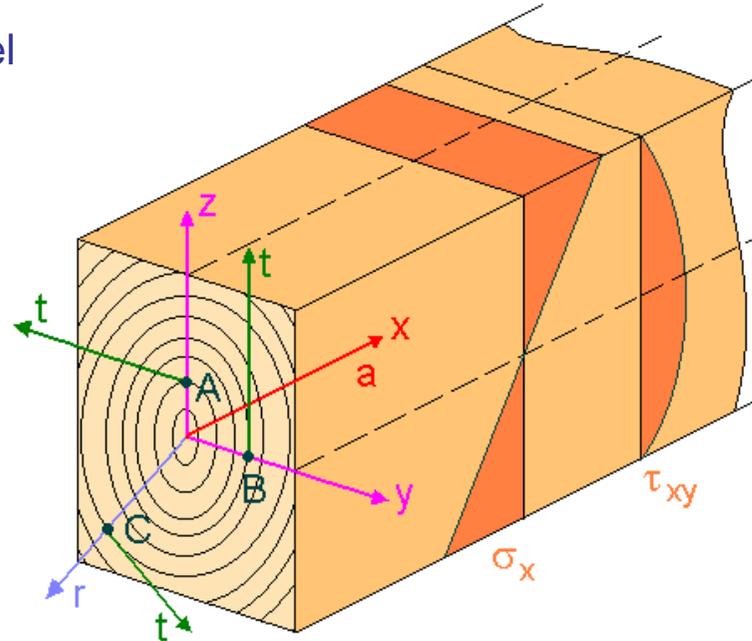


2.4 Comportement mécanique (3)

Application à la théorie des poutres planes

- Changement de référentiel

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & 0 \\ \nu_{xy} & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E} & 0 \\ 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$



$$E = E_a$$

Au point A

$$\nu_{xy} = \nu_{at} ; \nu_{xz} = \nu_{ar}$$

$$G = G_{ar}$$

Au point B

$$\nu_{xy} = \nu_{ar} ; \nu_{xz} = \nu_{at}$$

$$G = G_{at}$$

Au point C

...

- Coefficients élastiques retenus

$$\left. \begin{array}{l} E = E_a \\ G = \frac{G_{at} + G_{ar}}{2} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{E}{G} \approx 16 \neq 2(1+\nu)$$

Glissement dû au cisaillement non négligeable

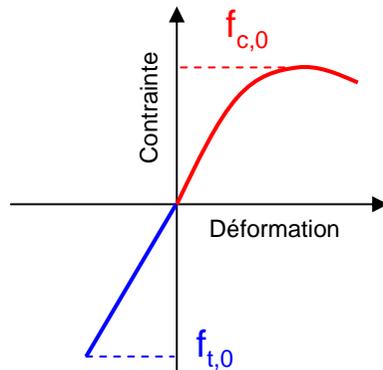
$$\left(\begin{array}{l} \text{Acier : } E/G \approx 2.6 \\ \text{béton : } E/G \approx 2.4 \end{array} \right)$$



2.4 Comportement mécanique (4)

Modes de rupture (bois sans noeud)

- Sens axial (sens du fil – relation de comportement mono-axiale simplifiée)



Compression

Rupture ductile non localisée (glissement et flambement des fibres)
Forte influence de l'humidité (ponts hydrogènes)

Traction

Rupture fragile localisée (déchirement des fibres)
Faible influence de l'humidité

Flexion

Rupture ductile ou fragile selon le rapport $f_{t,0} / f_{c,0}$

- Sens transversal (perpendiculaire au fil)

Compression : pincement des fibres
Traction : déchirement interpariétal

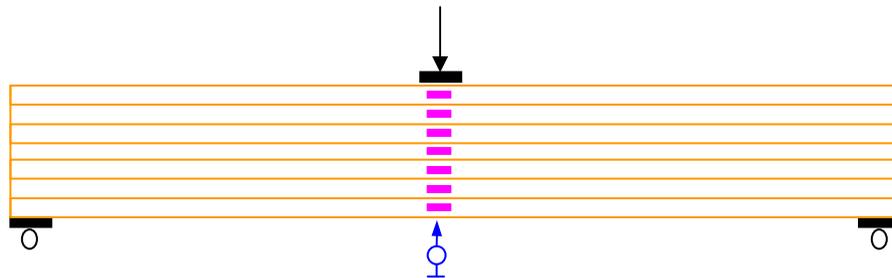
- Cisaillement longitudinal

Glissement des fibres

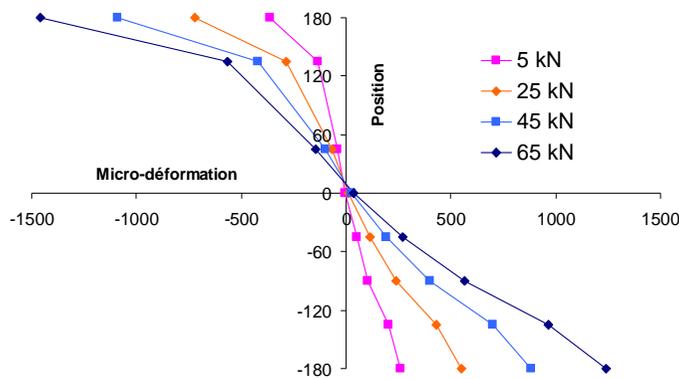


2.4 Comportement mécanique (5)

Comportement expérimental des poutres en bois – Phase élastique



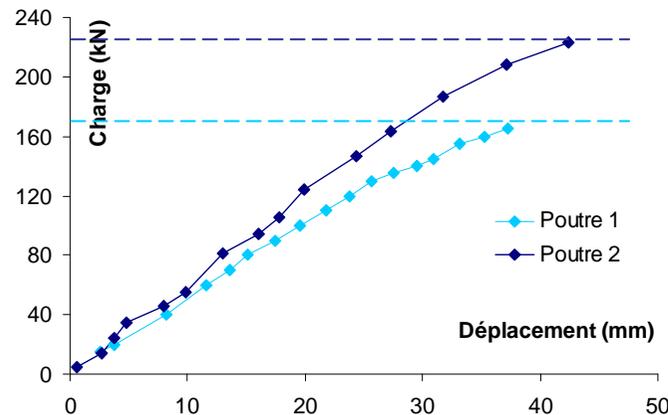
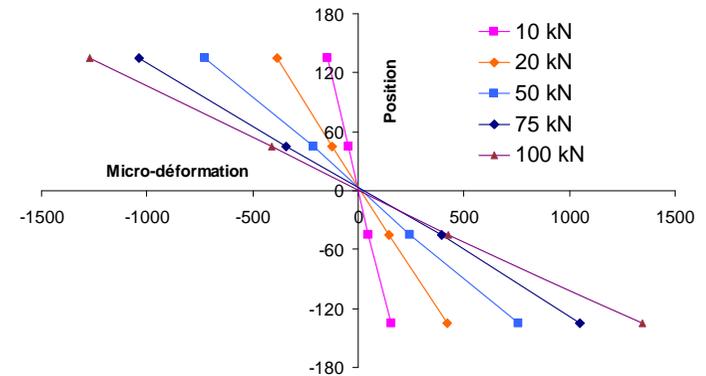
Poutre en bois lamellé-collé GL24
 Section 110x400 mm². portée 3 m
 Essai en flexion 3 points
 Mesures de **déformation** et de **déplacement**



Module élastique E_a (MPa)

Lamelle Poutre1 Poutre2

1 (c)	9426	-
2 (c)	18137	13350
4 (c)	24616	13855
6 (t)	13629	12674
7 (t)	12951	-
8 (t)	11109	12413
9 (t)	11665	-



Module élastique E_a (MPa) global ($E/G=16$)

Poutre 1 : 8420 MPa

Poutre 2 : 10670 MPa

Charges de rupture :

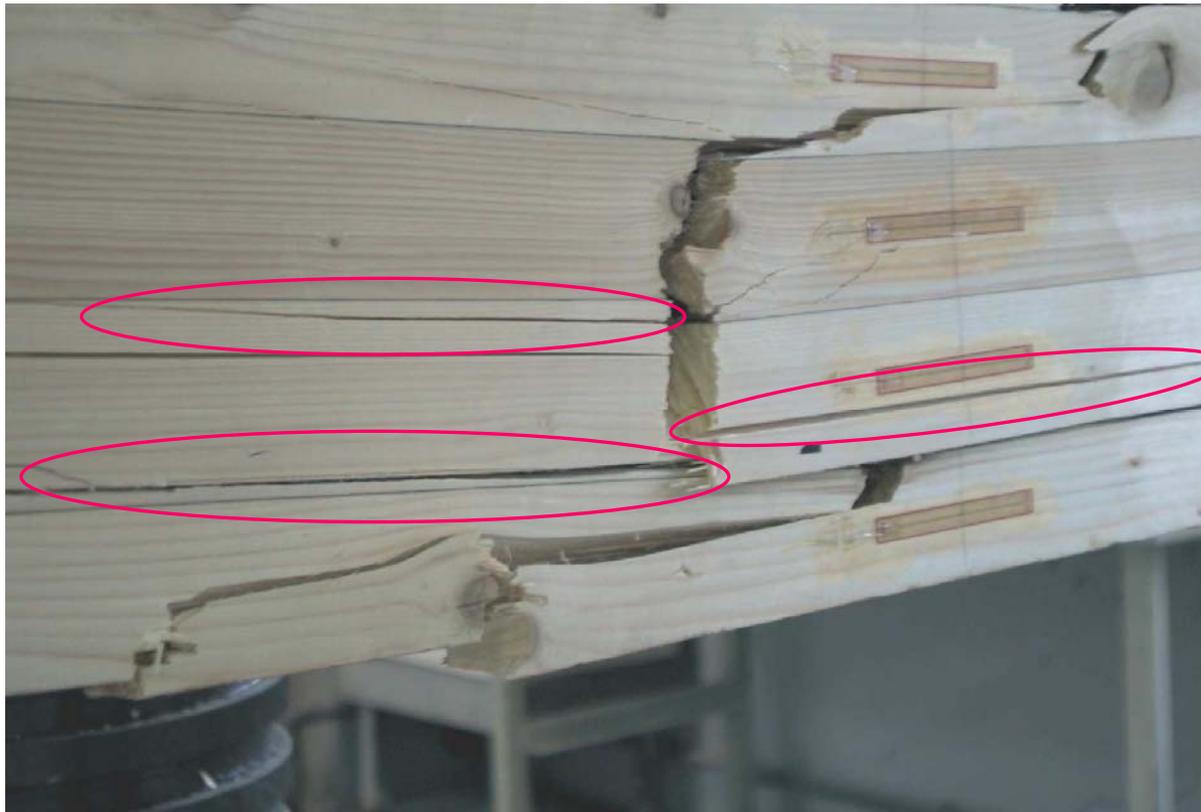
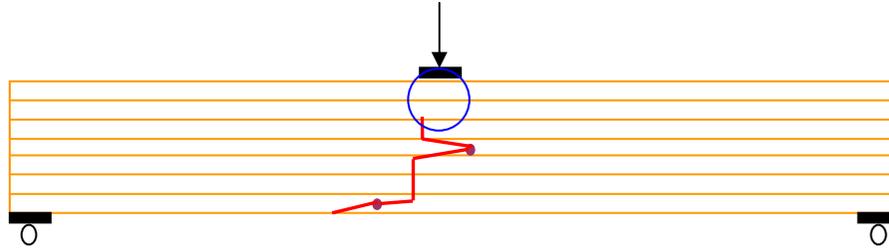
Poutre 1 : 170 kN

Poutre 2 : 225 kN



2.4 Comportement mécanique (6)

Comportement expérimental des poutres en bois – Phase de rupture – Poutre 1



Ecrasement transversal sous la plaque de chargement

Rupture en cascade des lamelles en traction avec cisaillement

Fissuration en cisaillement

Contraintes à la rupture

$$\sigma_f = 53.7 \text{ MPa}$$

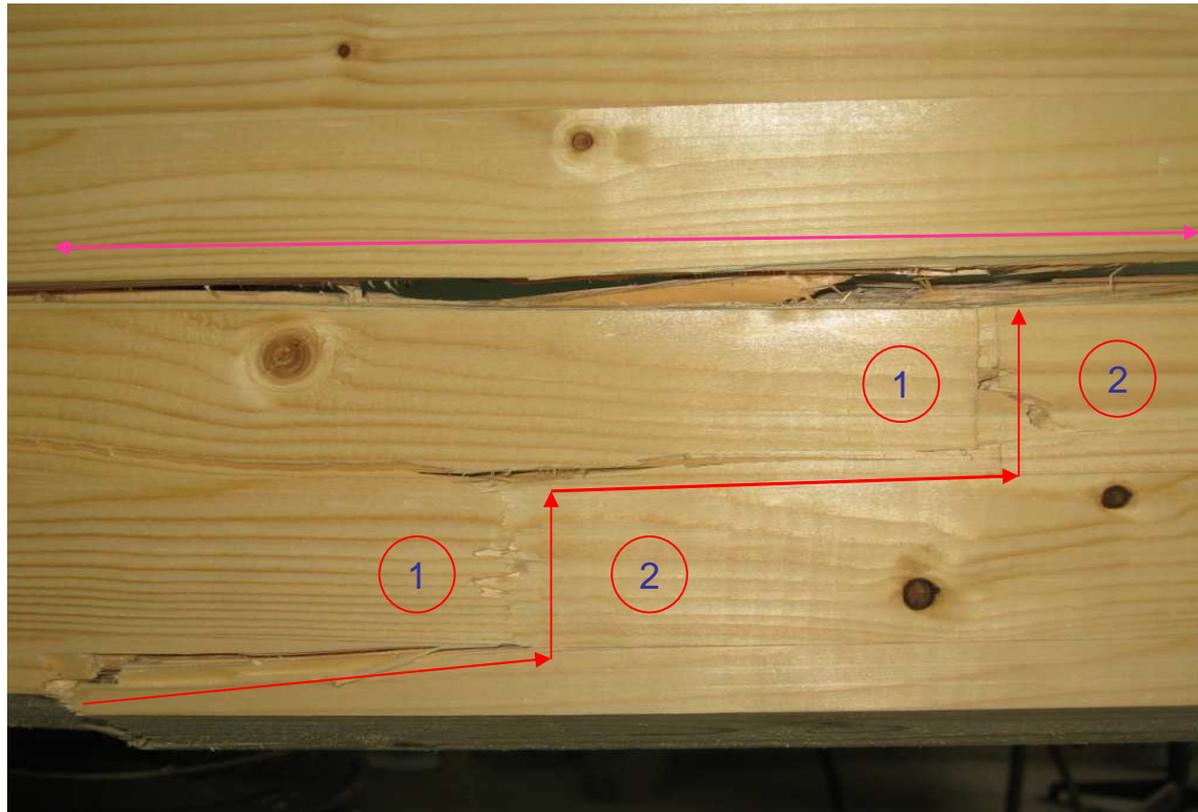
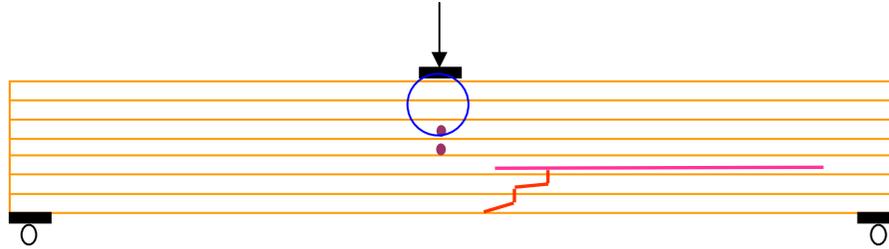
$$\sigma_{c,90} = 5.2 \text{ MPa}$$

$$\tau = 3.7 \text{ MPa}$$



2.4 Comportement mécanique (7)

Comportement expérimental des poutres en bois – Phase de rupture – Poutre 2



Ecrasement transversal sous la plaque de chargement

Rupture des deux premières lamelles en traction avec cisaillement

Rupture en cisaillement de la troisième lamelle

Contraintes à la rupture

$$\sigma_f = 60.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,90} = 5.9 \text{ MPa}$$

$$\tau = 3.8 \text{ MPa}$$



2.5 Comportement thermique / acoustique (1)

Propriétés thermiques

- Coefficients de dilatation thermique

Axial = $5.10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (acier = $12.10^{-6} / ^\circ\text{C}$. béton = $10.10^{-6} / ^\circ\text{C}$)

Transversal = $15.10^{-6} / ^\circ\text{C}$

- Coefficients de conduction thermique

Polystyrène 0.040 W/m.K

Balsa 0.052 W/m.K

Sapin 0.200 W/m.K

Chêne 0.230 W/m.K

Béton 1.750 W/m.K

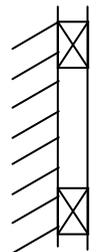
Propriétés acoustiques

Faible densité

Faible amortissement acoustique

Fréquence critique de membrane relativement élevée : bonne absorption acoustique

Exemple : lambris en sapin (épaisseur 1 cm) posé sur tasseaux (vide d'air 2 cm)



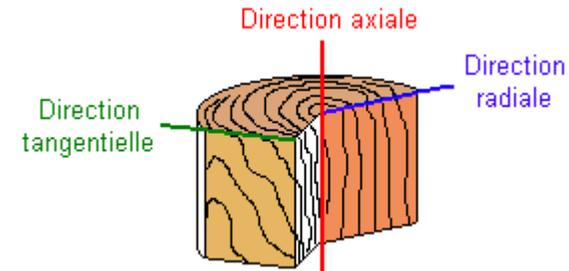
$$f_r = \frac{60}{\sqrt{450 \times 0,01 \times 0,02}} = 200 \text{ Hz}$$



2.6 Résistance mécanique (1)

Anisotropie à symétrie cylindrique (H=15%, bois sans noeud)

Compression axiale	20 à 110 MPa
Compression transversale	5 à 25 MPa
Traction axiale	70 à 200 MPa
Traction transversale	1 à 5 MPa
Cisaillement	2 à 8 MPa
Flexion	50 à 250 MPa



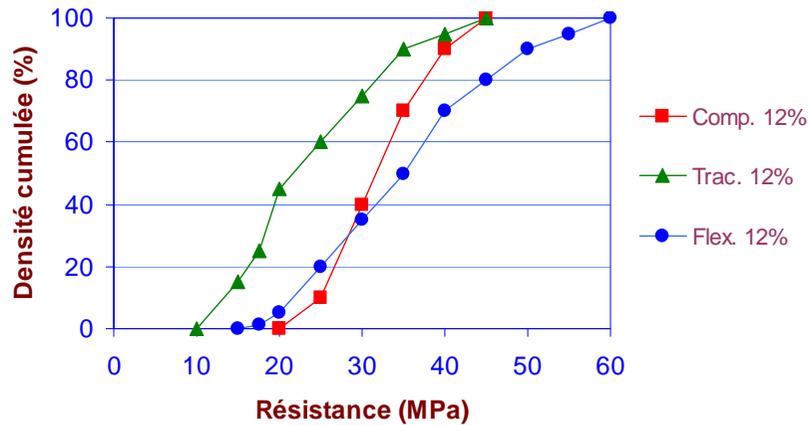
Influence de l'essence (H=15%, bois sans noeud)

(MPa)	Compression		Traction		Flexion	densité moyenne
	Axiale	Trans.	Axiale	Trans.		
Peuplier	20 - 40	5 - 7	60 - 80	1.5	55 - 75	0.45
Sapin	40 - 55	6 - 8	80 - 100	1.5	60 - 80	0.45
Epicéa	40 - 55	6 - 8	80 - 100	1.5	60 - 80	0.45
Douglas	45 - 70	7 - 9	80 - 110	1.8	70 - 100	0.55
Pins	45 - 65	7 - 9	85 - 110	1.8	75 - 110	0.55
Châtaigner	35 - 60	10 - 15	110 - 150	4	60 - 85	0.60
Mélèze	45 - 70	8 - 10	85 - 115	2	80 - 110	0.65
Chêne	50 - 70	15 - 20	85 - 115	4	90 - 110	0.70
Azobé	90 - 115	20 - 25	140 - 230	5	170 - 250	1.05



2.6 Résistance mécanique (2)

Influence des singularités (nœuds, pente du fil, largeur de cerne, etc..)



Echantillons d'épicéa issus d'un même biotope de développement

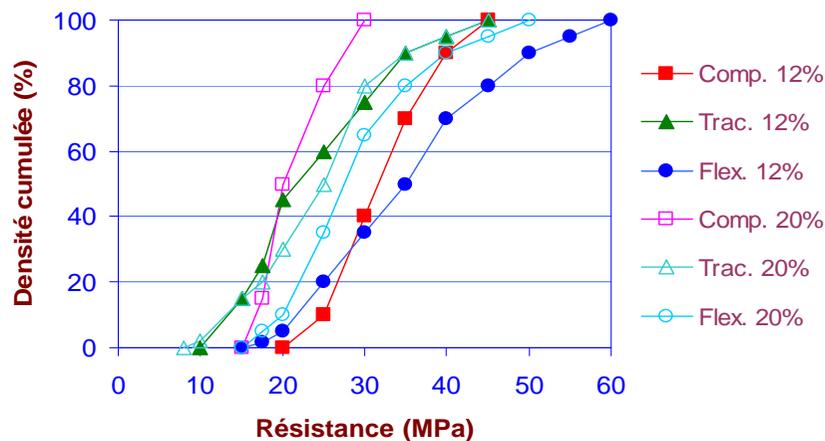
Coefficients de variation

Compression : 10% à 15%

Traction : 15% à 20%

Flexion : 20% à 25%

Influence de l'humidité et des singularités (nœuds, pente du fil, largeur de cerne, etc..)



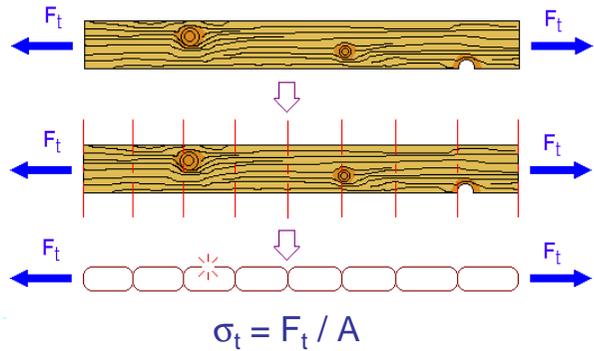
Variation des résistances pour $\Delta H = 1\%$ ($8\% \leq H \leq 20\%$)

Compression axiale	5%
Compression transversale	5%
Traction axiale	2.5%
Traction transversale	2%
Cisaillement	2.5%
Flexion	4%



2.6 Résistance mécanique (3)

Influence du volume contraint (effet d'échelle)



Analogie du comportement en traction avec celui d'une chaîne

Théorie du maillon le plus faible

Loi de probabilité de rupture identique pour chaque maillon

Indépendance stochastique des maillons

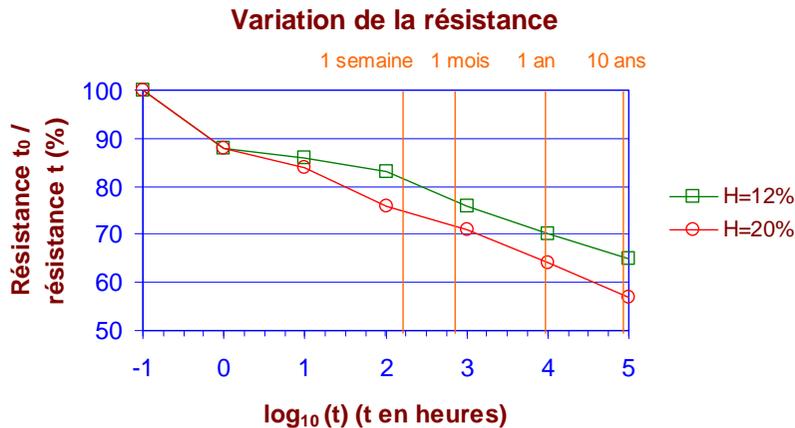
Loi de probabilité de la chaîne : loi de Weibull

$$P_f = P(f_t \leq \sigma_t) = 1 - \exp(-V(\sigma_t / m)^k)$$

V : volume de la chaîne (volume contraint)

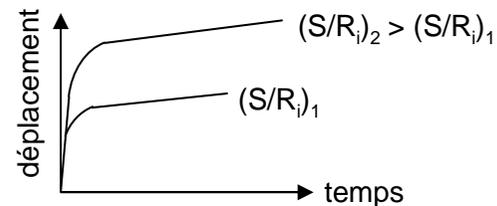
m, k : paramètres de la loi

Influence de la durée d'application des charges (bois sans noeud)



Echantillons d'épicéa issus d'un même biotope de développement

Influence importante également sur les coefficients élastiques (fluage)



L'humidité accentue l'effet du fluage



2.7 Aspects normatifs (1)

Classement des bois de sciage (prise en compte des essences et des singularités)

- Dénomination des classes : résineux Cf_m , feuillus Df_m , f_m =résistance en flexion
- Critères possibles de classement : corrélation statistique entre critères et paramètres

	Diamètre nœuds	Pente fil	Largeur cernes	Masse volumique	Module élastique
Flexion	-0.5	-0.2	± 0.4	0.5	0.75
Compression	-0.6	-0.2	± 0.5	0.5	0.75
Traction	-0.4	-0.1	± 0.5	0.6	0.75

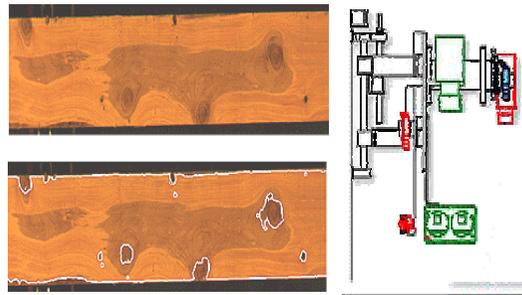
- Classement visuel (EN 518, NF B 52-001)

Largeur des cernes
Diamètres des nœuds
Pente du fil

→

STI
STII
STIII

[Images : Site Ey etec]



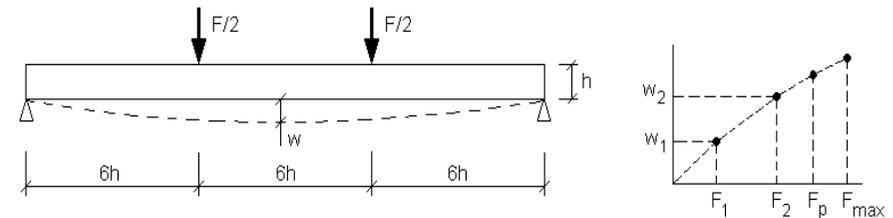
Correspondance
pour les
résineux

NF B52-001
STI
STII
STIII

EN 338
C27, C30
C24
C18

- Classement machine (EN 519, EN 408)

Module élastique axial



Essai non destructif

$$\left. \begin{array}{l} \Delta F = F_2 - F_1 \\ \Delta W = w_2 - w_1 \end{array} \right\} \rightarrow E_0^* (\geq E_{0,m})$$

moins de 3.5% de rupture sous $F_p = 0,96 k_h f_{m,k} \frac{th}{18}$

Essai destructif

$$F_{max} \rightarrow f_{m,k}^* = k_s f_{m,05}^* (\geq f_{m,k})$$



2.7 Aspects normatifs (2)

Classement des bois de sciage (suite)

- Classes de résistance du bois massif - BM - (EN338, EN 384)

	C18	C22	C24	C27	C30	D30	D35	D40	D50	D60
Flexion $f_{m,k}$	18	22	24	27	30	30	35	40	50	60
Traction axiale $f_{t,0,k}$	11	13	14	16	18	18	21	24	30	36
Traction transversale $f_{t,90,k}$	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Compression axiale $f_{c,0,k}$	18	20	21	22	23	23	25	26	29	32
Compression transversale $f_{c,90,k}$	2.2	2.4	2.5	2.6	2.7	8.0	8.4	8.8	9.7	10.5
Cisaillement $f_{v,k}$	2.0	2.4	2.5	2.8	3.0	3.0	3.4	3.8	4.6	5.3
Masse vol. caract. ρ_k (kg/m ³)	320	340	350	370	380	530	560	590	650	700
Masse vol. moy. ρ_m (kg/m ³)	380	410	420	450	460	640	670	700	780	840

- Modules élastiques - BM - (EN 338)

(GPa)	C18	C22	C24	C27	C30	D30	D35	D40	D50	D60
Axial $E_{0,m}$	9	10	11	11.5	12	10	10	11	14	17
Transversal $E_{90,m}$	$E_{90,m} = E_{0,m} / 30$					$E_{90,m} = E_{0,m} / 15$				
Axial caractéristique $E_{0,k}$	$E_{0,k} = 0.67 E_{0,m}$									
Cisaillement G_m	$G_m = E_{0,m} / 16$									
Cisaillement caractéristique G_k	$G_k = E_{0,k} / 16$									



2.7 Aspects normatifs (3)

Classement des bois de sciage (suite)

- Signification statistique

$$\text{Prob}(x \leq x_k) = 5\%$$

$$\text{Loi normale : } x_k = x_m (1 - 1.645 C_{v_x})$$

$$\text{Loi lognormale : } x_k \approx x_m \exp(-1.645 C_{v_x})$$

- Relations statistiques

$$f_{c,0,k} = 5 f_{m,k}^{0.45}$$

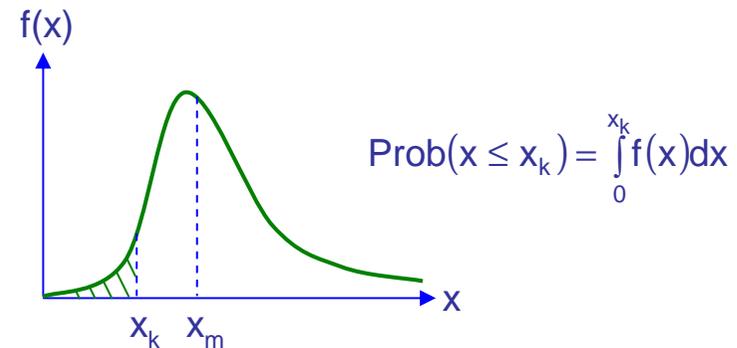
$$f_{t,90,k} = 0.0015 \rho_k$$

$$f_{t,0,k} = 0.6 f_{m,k}$$

$$f_{c,90,k} = 0.007 \rho_k \text{ (résineux)}$$

$$f_{v,k} = 0.2 f_{m,k}^{0.8}$$

$$f_{c,90,k} = 0.015 \rho_k \text{ (feuillus)}$$



Prise en compte de l'humidité (classes de service)

	Température	Humidité de l'air	Humidité du bois
Classe 1	20 °C	≤ 65 % > 65 % qqes semaines / an	≤ 12 %
Classe 2	20 °C	≤ 85 % > 85 % qqes semaines / an	≤ 20 %
Classe 3			> 20 %



2.7 Aspects normatifs (4)

Prise en compte de la durée d'application des charges (classes de durée d'application)

Permanente :	plus de 10 ans	(poids propre)
Long terme :	6 mois à 10 ans	(stockage)
Moyen terme :	1 semaine à 6 mois	(charge d'exploitation)
Court terme :	< 1 semaine	(neige et vent)
Instantanée :		(action accidentelle)

Coefficient modérateur des résistances caractéristiques k_{mod}

	Classe 1		Classe 2		Classe 3	
	BM,BLC	LVL,CP OSB	BM,BLC	LVL,CP OBS	BM,BLC	BM : bois massif
					LVL,CP	BLC : bois lamellé-collé
						CP : contre-plaqué
						OSB : Oriented Strand Board
						LVL : Laminated Veneer Lumber
Permanente	0.60	0.40	0.60	0.30	0.50	
Long terme	0.70	0.50	0.70	0.40	0.55	
Moyen terme	0.80	0.70	0.80	0.55	0.65	
Court terme	0.90	0.90	0.90	0.70	0.70	
Instantanée	1.10	1.10	1.10	0.90	0.90	

k_{mod} est défini vis-à-vis de l'action variable de base ou sinon de l'action permanente

Prise en compte du fluage k_{def}

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	
BM,BLC,LVL	0.60	0.80	2.00	$E_{0,m,\infty} = E_{0,m} / (1+k_{def})$
CP	0.80	1.00	2.50	
OSB	1.50	2.25		



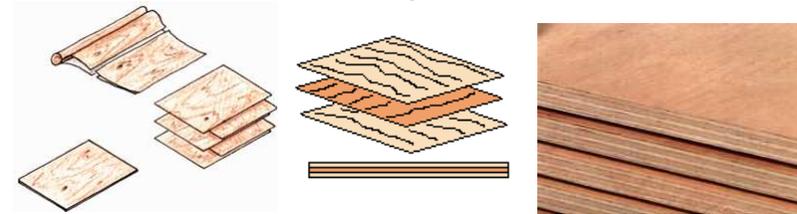
3.1 Produits dérivés du bois (1)

Panneaux

- Obtention de la matière ligneuse : déroulage. déchiquetage. broyage. défibrage de bois d'industrie
- Fabrication : étuvage. séchage. encollage. pressage
- Utilisation : plancher. toiture. gousset. âme de poutre. contreventement. bardage
- Contreplaqué (CTB-X. CTB-C)

[Images : CD CNDB]

Matière première : feuilles obtenues par déroulage
Comportement orthotrope (homogénéisé)



(MPa)

Flexion $\parallel f_{m,0,k}$

Flexion $\perp f_{m,90,k}$

Traction $\parallel f_{t,0,k}$

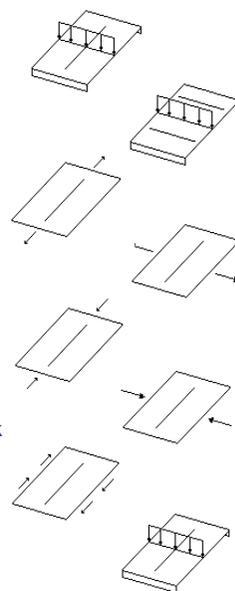
Traction $\perp f_{t,90,k}$

Compression $\parallel f_{c,0,k}$

Compression $\perp f_{c,90,k}$

Cisaillement $\parallel f_{v,0,k}$

Cisaillement $\perp f_{v,90,k}$



Résistance caractéristique
t=12 mm t=24 mm

Module élastique moyen
t=12 mm t=24 mm

Flexion $\parallel f_{m,0,k}$	23	21.6	9200	8700
Flexion $\perp f_{m,90,k}$	11.4	12.4	4600	5000
Traction $\parallel f_{t,0,k}$	15	15.4	7200	7400
Traction $\perp f_{t,90,k}$	12	11.4	4800	4600
Compression $\parallel f_{c,0,k}$	15	15.4	7200	7400
Compression $\perp f_{c,90,k}$	12	11.4	4800	4600
Cisaillement $\parallel f_{v,0,k}$	2.9	2.9	500	500
Cisaillement $\perp f_{v,90,k}$	0.9	0.9	500	500

Contreplaqué d'épicéa – $\rho_k=410 \text{ kg/m}^3$
Rétractibilité : $\alpha=0.15$ en plan.
 $\alpha=2$ en épaisseur

$$E_k = 0.8 E_m$$



3.1 Produits dérivés du bois (2)

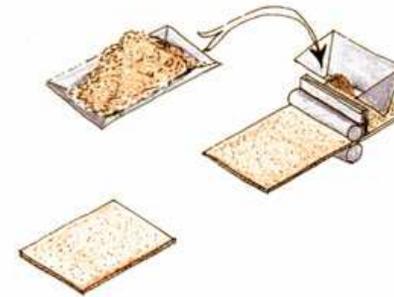
Panneaux (suite)

- Particules (CTB-H. CTB-RH)

Matière première : particules obtenues par déchetage
 Essences : épicéa. pin. hêtre
 Comportement isotrope

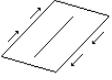
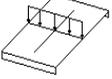
- Fibres (MDF : Medium Density Fiber)

Matière première : fibres obtenues par défibrage. sciures
 Essences : épicéa. pin. hêtre. peuplier
 Comportement isotrope



[Images : CD CNDB]



(MPa)	Résistance caractéristique		Module élastique moyen	
	Particules	Fibres	Particules	Fibres
Flexion $f_{m,k}$	12.5	15	2900	3900
Traction $f_{t,k}$	7.9	8	1700	2900
Compression $f_{c,k}$	11.1	8	1700	2900
Cisaillement $\parallel f_{v,0,k}$ 	6.1	4.5	830	1200
Cisaillement $\perp f_{v,90,k}$ 	1.6	0.25	830	1200
Masse volumique ρ_m (kg/m ³)	600	600	$E_k = 0.8 E_m$	
Retractibilité en plan	0.25	0.20		
Retractibilité dans l'épaisseur	7	3.5		





3.1 Produits dérivés du bois (3)

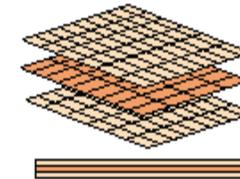
Panneaux (suite)

- Lamelles orientées (OSB : Oriented Strand Board)

Matière première : lamelles obtenues par tranchage

Essences : épicéa. pin. peuplier

Comportement orthotrope



[Images : CD CNDB]

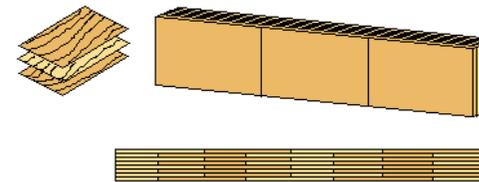


Produits structuraux en bois reconstitué

- Bois lamifié (LVL : Laminated Veneer Lumber)

Matière première : feuilles obtenues par déroulage

Comportement orthotrope (homogénéisé)



	Résistance caractéristique (MPa)	
Flexion sur chant $f_{m,0,k}$	48	Masses volumiques : $\rho_m=480 \text{ kg/m}^3$ $\rho_k=400 \text{ kg/m}^3$
Flexion à plat $f_{m,90,k}$	48	
Traction $\parallel f_{t,0,k}$	38	Modules élastiques : $E_{0,m} = 13500 \text{ MPa}$ $E_{0,k} = 11500 \text{ MPa}$ $G_k = 600 \text{ MPa}$
Traction $\perp f_{t,90,k}$	0.8	
Compression $\parallel f_{c,0,k}$	42	
Compression $\perp f_{c,90,k}$		Dimensions standards : $27 \text{ mm} \leq e \leq 63 \text{ mm} (\Delta e=6 \text{ mm})$ $h = (225 ; 260 ; 300 ; 360 ; 400 ; 450 ; 500 ; 600) \text{ mm}$ $L \leq 20 \text{ m}$
parallèle aux plan de collage	7	
perpendiculaire au plan de collage	4	
Cisaillement sur chant $\parallel f_{v,0,k}$	6	
Cisaillement à plat $\perp f_{v,90,k}$	4	





3.1 Produits dérivés du bois (4)

[Images : CD CNDB. site Nailweb]

Produits structuraux en bois reconstitué (suite)

- Bois en lamelle longues (PSL : Parallel Strand Lumber)

Matière première : lamelles obtenues par déroulage puis découpage

Essences : épicéa, sapin

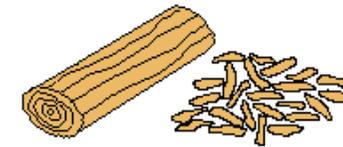
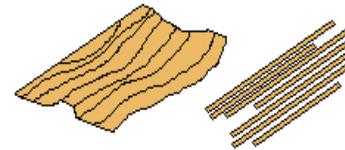
Comportement anisotrope (proche bois massif)

- Bois en copeaux longs (LSL : Laminated Strand Lumber)

Matière première : copeaux obtenus par tranchage

Essences : peuplier, hêtre

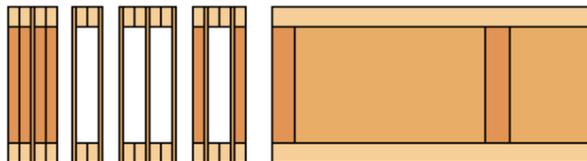
Comportement anisotrope (proche bois massif)



Produits structuraux en panneaux et bois massif

- Poutres en I à âmes minces droites

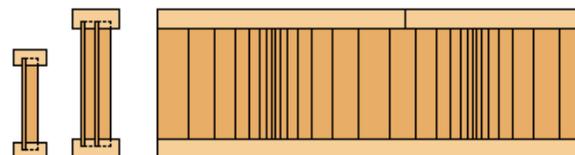
Membrures en bois massif. âmes en contreplaqué ou en OSB. liaison collée



- Poutres en I à âmes minces ondulées

Membrures en bois massif. âmes en contreplaqué ou en

acier. liaison collée ou mécanique



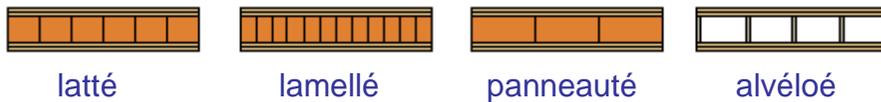


3.1 Produits dérivés du bois (5)

Produits structuraux en panneaux et bois massif (suite)

- Plateaux de cloison ou de bardage

Renforts en bois massifs associés (ou non) à un panneau



latté

lamellé

panneauté

alvéolé

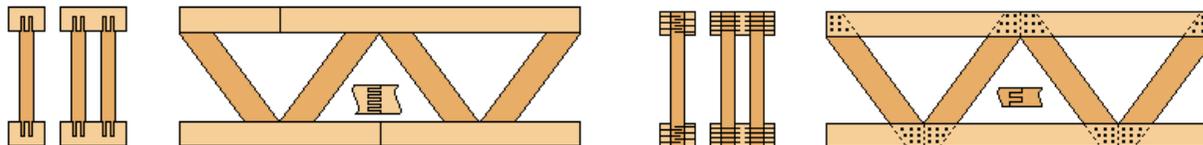


[Images : site et CD CNDB]

Produits structuraux en bois massif

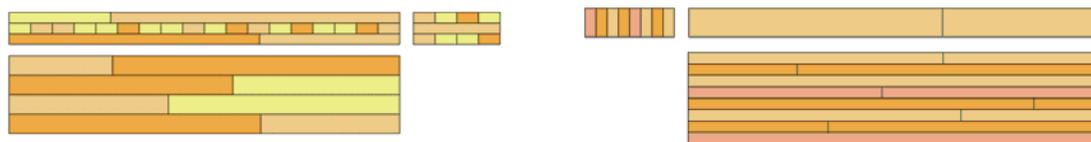
- Poutres treillis

Diagonales et membrures en bois massif. liaisons à entures collées ou clouées



- Plateaux de planches contre-collées

Collage à plat en une ou plusieurs épaisseurs



- Parpaings de bois

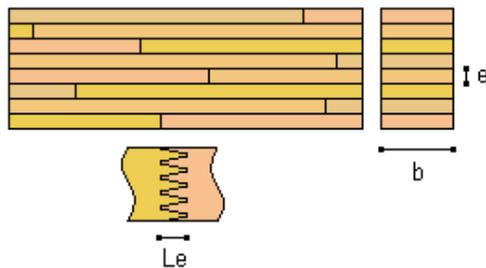




3.1 Produits dérivés du bois (6)

Bois lamellé-collé (brevet déposé en 1906 par K.F.O. Hetzer)

- Principe : lamelles aboutées par entures collées et collées plat sur plat.



$e = (28 ; 33 ; 38 ; 45) \text{ mm}$
 $b = (85 ; 110 ; 135 ; 160 ; 190 ; 210) \text{ mm}$
 $Le = 15 \text{ mm (except. 50 mm)}$

Possibilité de cintrage des éléments

$$r_i \geq \frac{250 e}{1 + f_{m,k} / 80}$$



[Image : site Arbonis]

- Classes de résistance (EN 1194 - Bois lamellé-collé homogène)

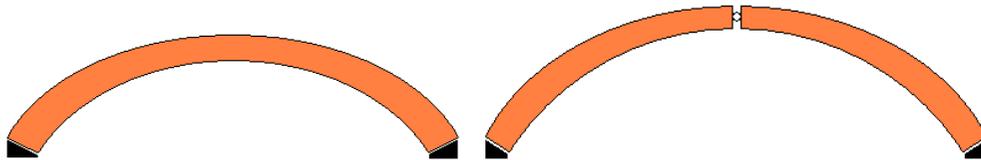
Valeurs caractéristiques (MPa)	à partir des lamelles (L)	GL22	GL24	GL28	GL30	GL32	
Flexion $f_{m,k}$	$1.2 + f_{t,0,L,k}$	22	24	28	30	32	
Traction axiale $f_{t,0,k}$	$9 + 0.75 f_{t,0,L,k}$	15.4	17	19.2	20.3	24	
Traction transversale $f_{t,90,k}$	$1.15 f_{t,90,L,k}$	0.35	0.35	0.45	0.45	0.45	
Compression axiale $f_{c,0,k}$	$(1.5 - 0.01 f_{c,0,L,k}) f_{c,0,L,k}$	23.6	25.8	28	29.1	29.3	
Compression transversale $f_{c,90,k}$	$f_{c,90,L,k}$	4.8	5.1	5.3	5.7	6	$E_{90,m} = E_{0,m} / 30$
Cisaillement $f_{v,k}$	$< f_{v,L,k}$	1.9	2.1	2.5	2.6	3.2	$E_{0,k} = 0.80 E_{0,m}$
Module axial $E_{0,m}$ (GPa)		9.9	10.8	12.5	12.5	14.5	$G_m = E_{0,m} / 16$
Masse volumique ρ_k (kg/m ³)		340	350	380	400	400	$G_k = E_{0,k} / 16$



3.1 Produits dérivés du bois (6)

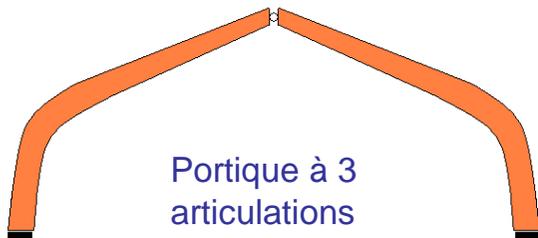
Bois lamellé-collé (suite)

- Formes courantes

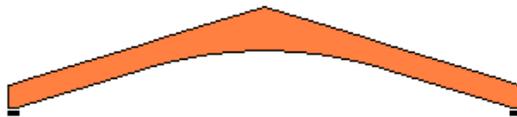


Arc à 2 articulations

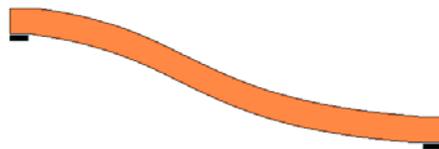
Arc à 3 articulations



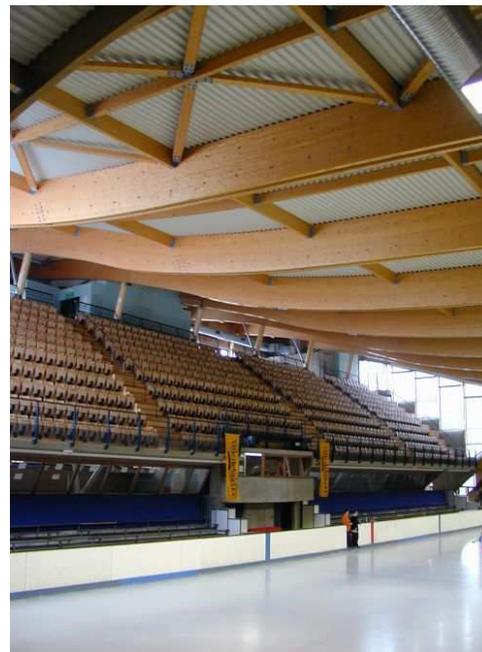
Portique à 3 articulations



Poutre à double décroissance à intrados courbe



Poutre à double courbure



[Images : internet]

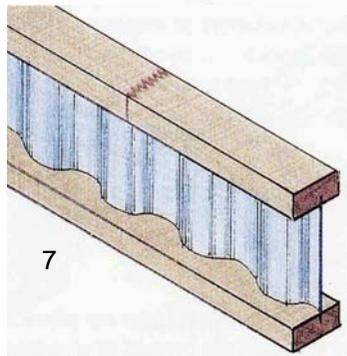
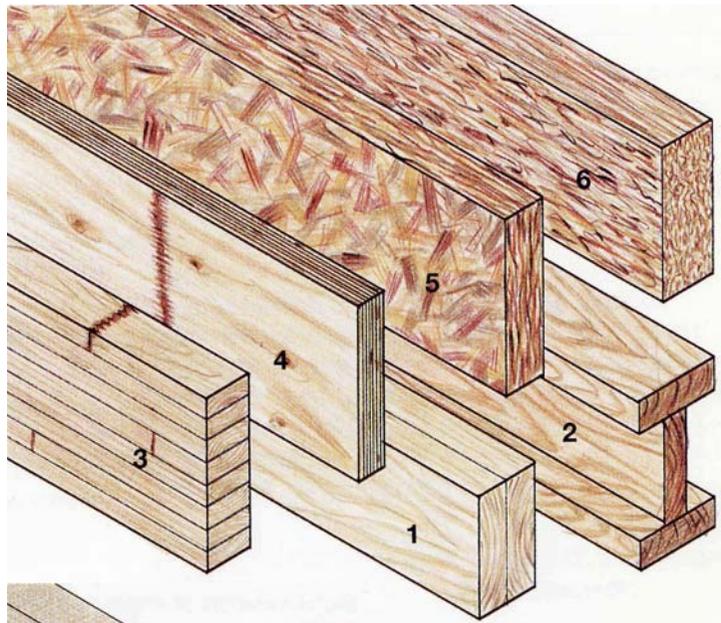


3.2 Systèmes porteurs horizontaux (1)

Poutres, pannes et solives

- Éléments de base : tous produits dérivés du bois et bois massif

[Images : Détails Bois]



- 1 Massif contrecollé
- 2 Profilé reconstitué collé
- 3 Lamellé-collé
- 4 Lamifié
- 5 LSL
- 6 PSL
- 7 Profilé mixte



[Images : distribution internet]

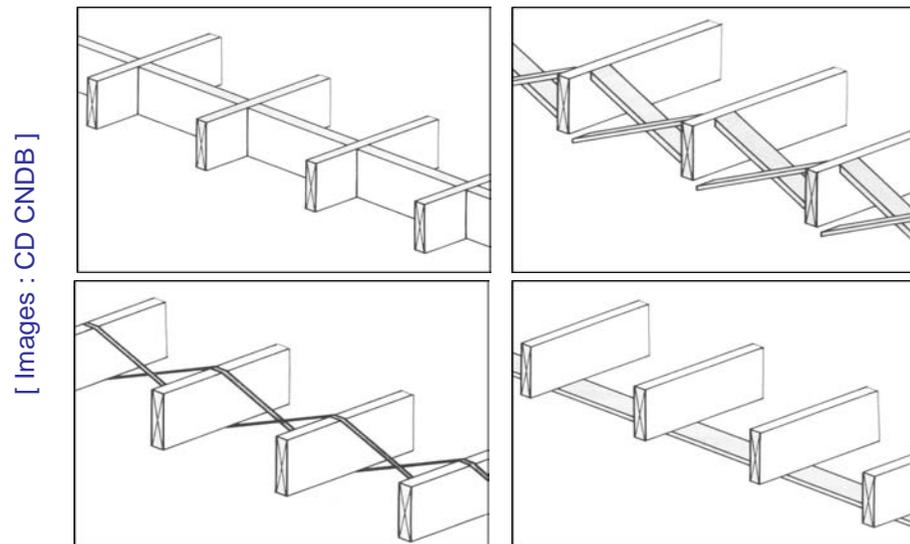
- Mode d'association poutre / panne. poutre / solive
- en œuvre
 - hors œuvre : maintiens de stabilité nécessaires



3.2 Systèmes porteurs horizontaux (2)

Poutres, pannes et solives

- Sections élancées : maintien au déversement nécessaire (entretoises, liens de pannes, bracons)



- Éléments de grande portée : poutres en bois lamellé-collé



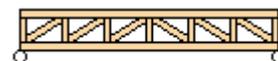
droite

$L \leq 20 \text{ m}$



banane

$L \leq 35 \text{ m}$



treillis

$L \leq 40 \text{ m}$



double décroissance

$L \leq 35 \text{ m}$



double décroissance
à intrados courbe

$L \leq 35 \text{ m}$

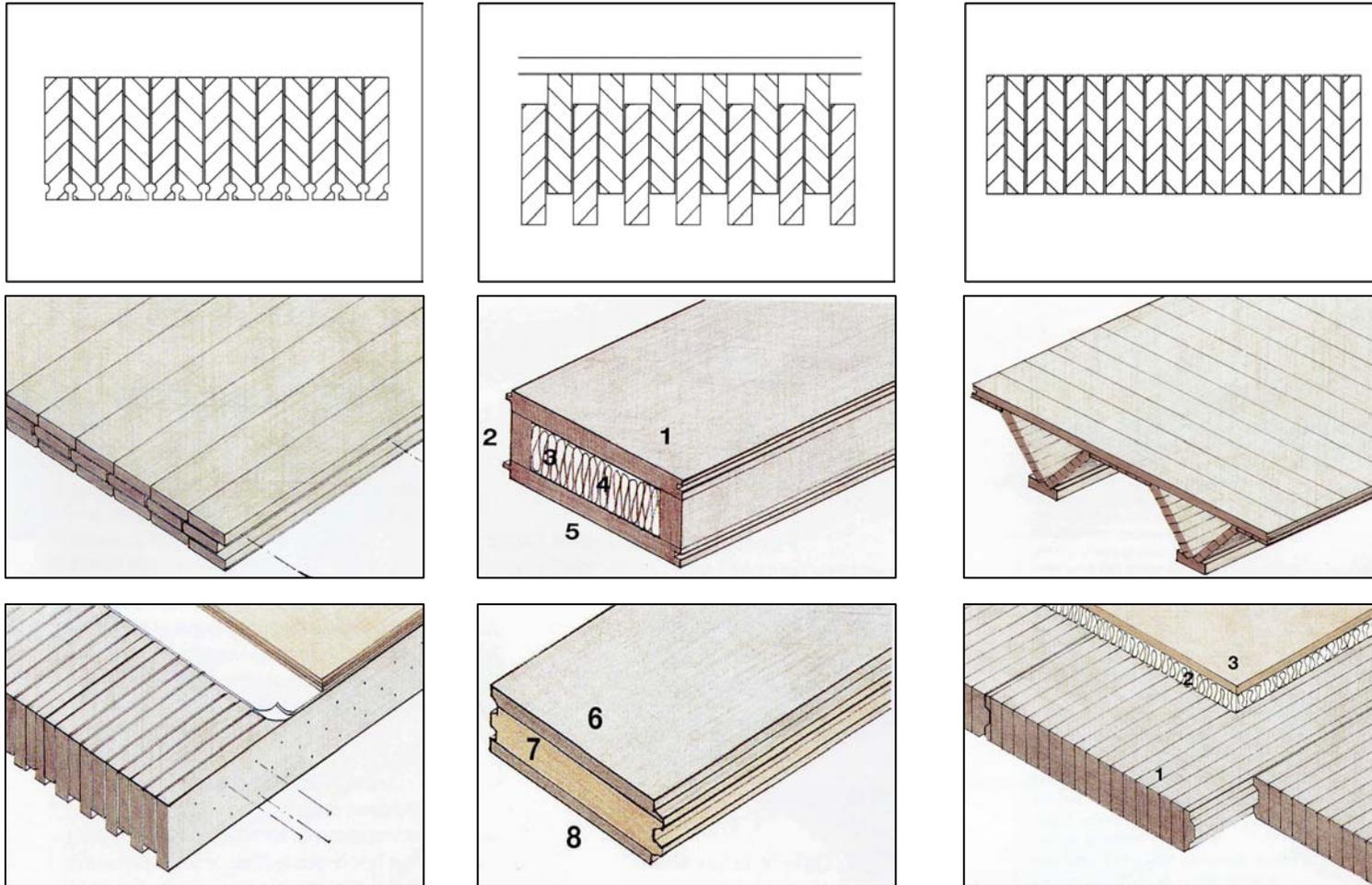


3.2 Systèmes porteurs horizontaux (3)

Planchers

- Planchers épais sans solivage : plateaux de planches contre-collées. ou planches contre-clouées

[Images : Détails Bois / CD CNDB]



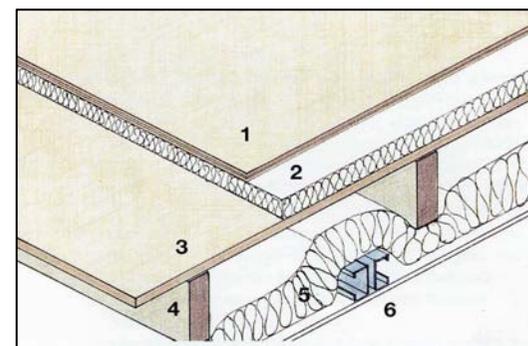
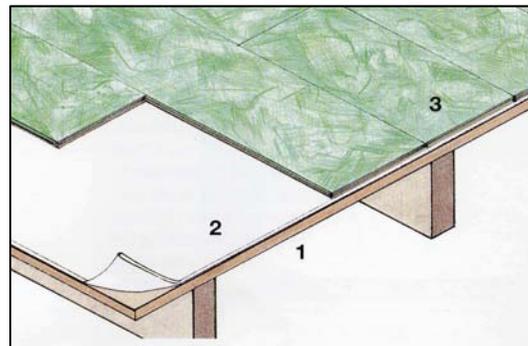
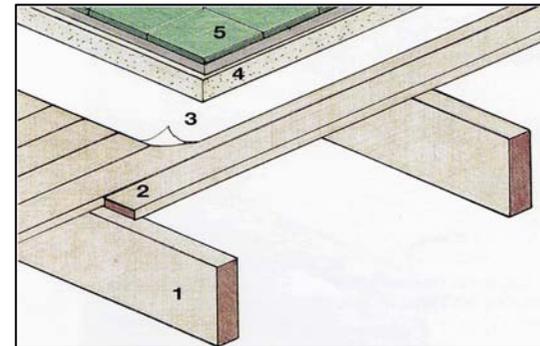
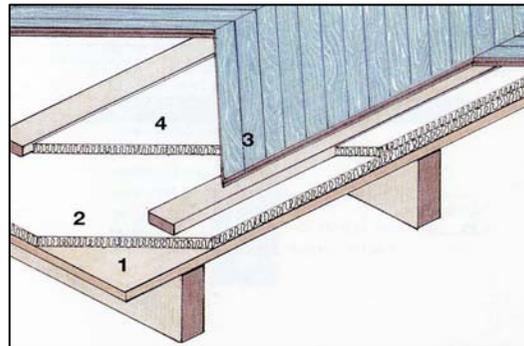
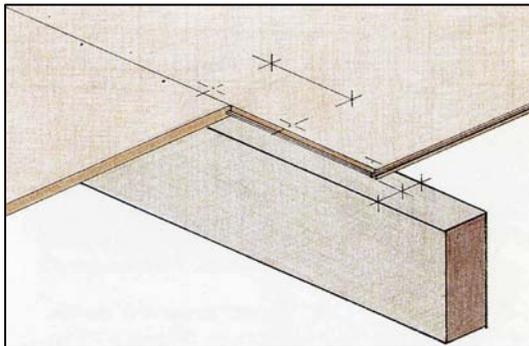
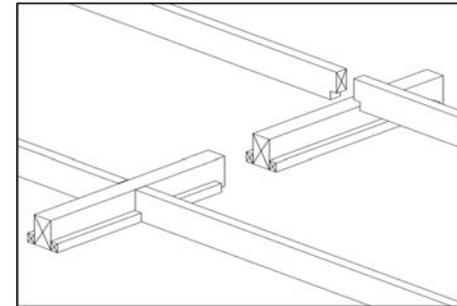
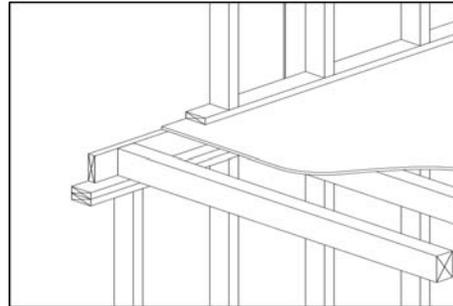
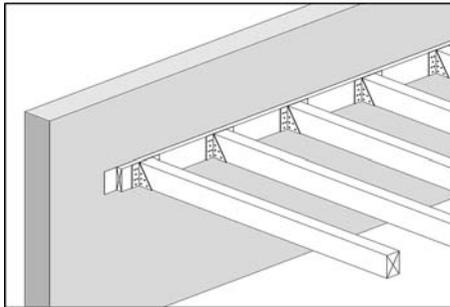


3.2 Systèmes porteurs horizontaux (4)

Planchers

- Planchers fins avec solivage : panneaux ou planches

[Images : Détails Bois / CD CNDB]





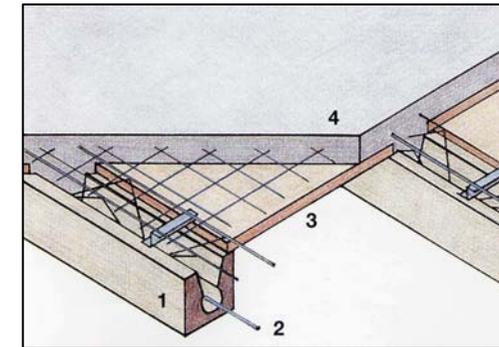
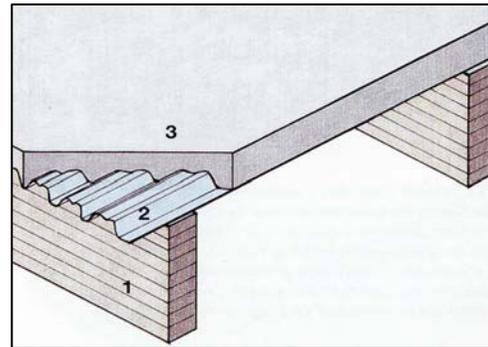
3.2 Systèmes porteurs horizontaux (5)

Planchers (suite)

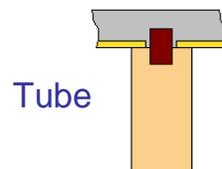
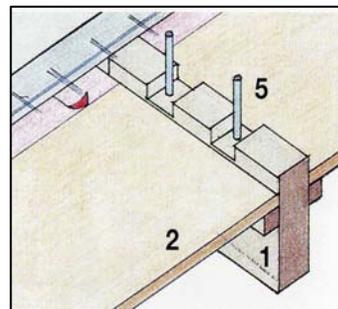
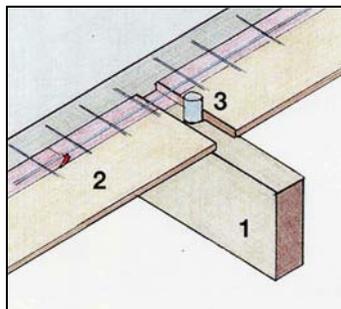
- Planchers bois-béton : solives et poutres équipées ou non de connecteurs. dalle coulée en place

Pas de connection :
bois porteur ou bois décoratif

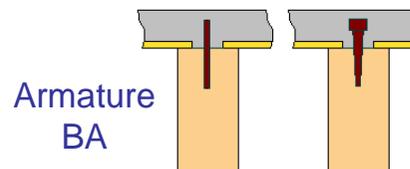
Connection :
poutre à table de compression



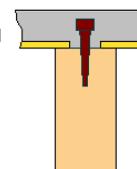
[Images : Détails Bois]



Tube



Armature
BA



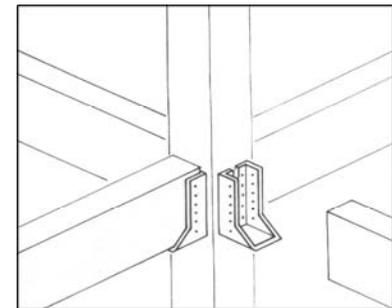
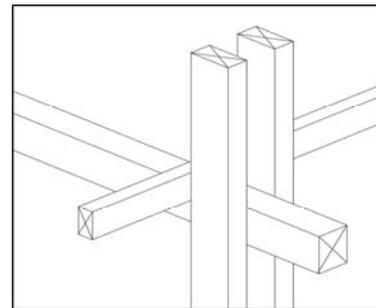
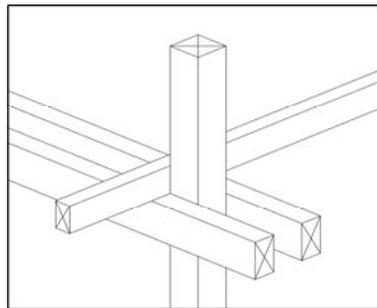
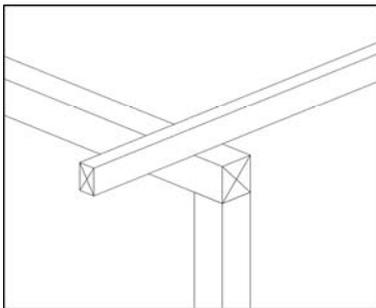
Tirefonds



3.2 Systèmes porteurs verticaux (1)

Poteaux

- Tous produits dérivés du bois et bois massif



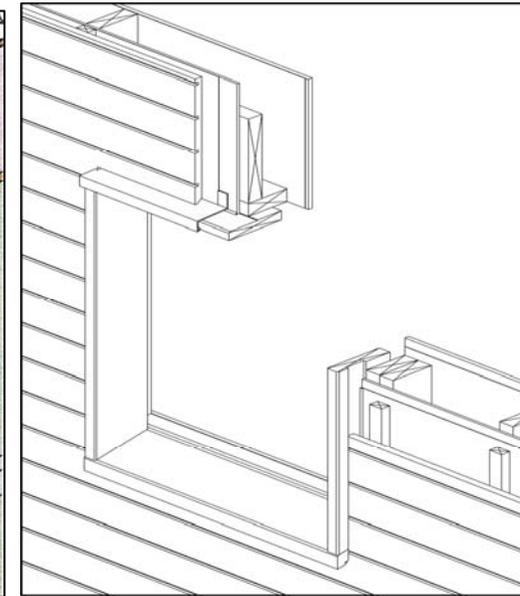
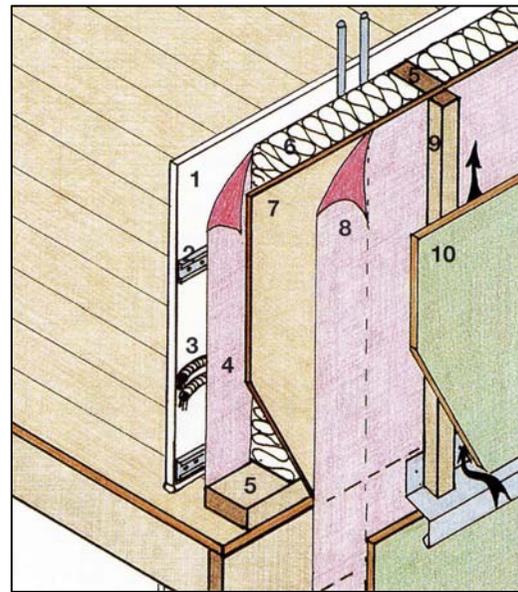
[Images : CD CNDB. sire Arbonis. distribution internet]



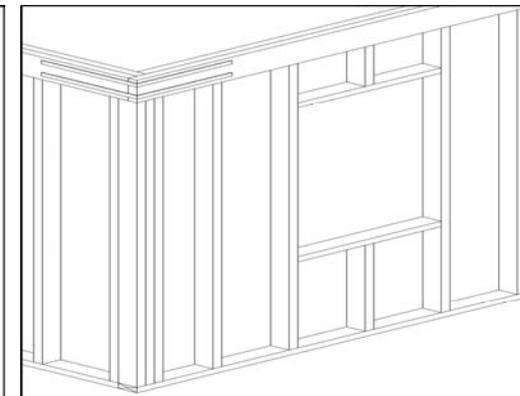
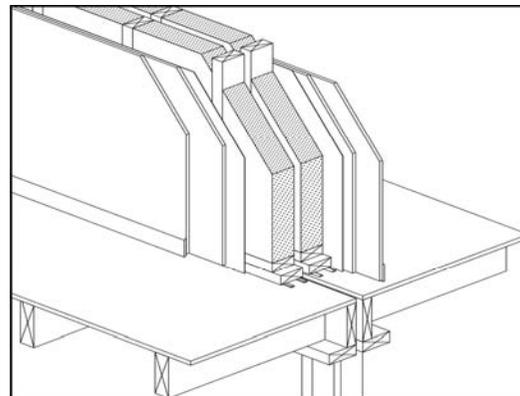
3.3 Systèmes porteurs verticaux (2)

Voiles

- Murs à ossature bois : ossature BM. panneaux ou planches



- 1 Plaque de plâtre (BA13)
- 2 Profil de pose
- 3 Gaine électrique
- 4 Pare-vapeur
- 5 Montant et lisse
- 6 Isolant
- 7 Panneau de contreventement
- 8 Pare-pluie
- 9 Support panneau de bardage
- 10 Panneau de bardage



[Images : Détails Bois / CD CNDB]

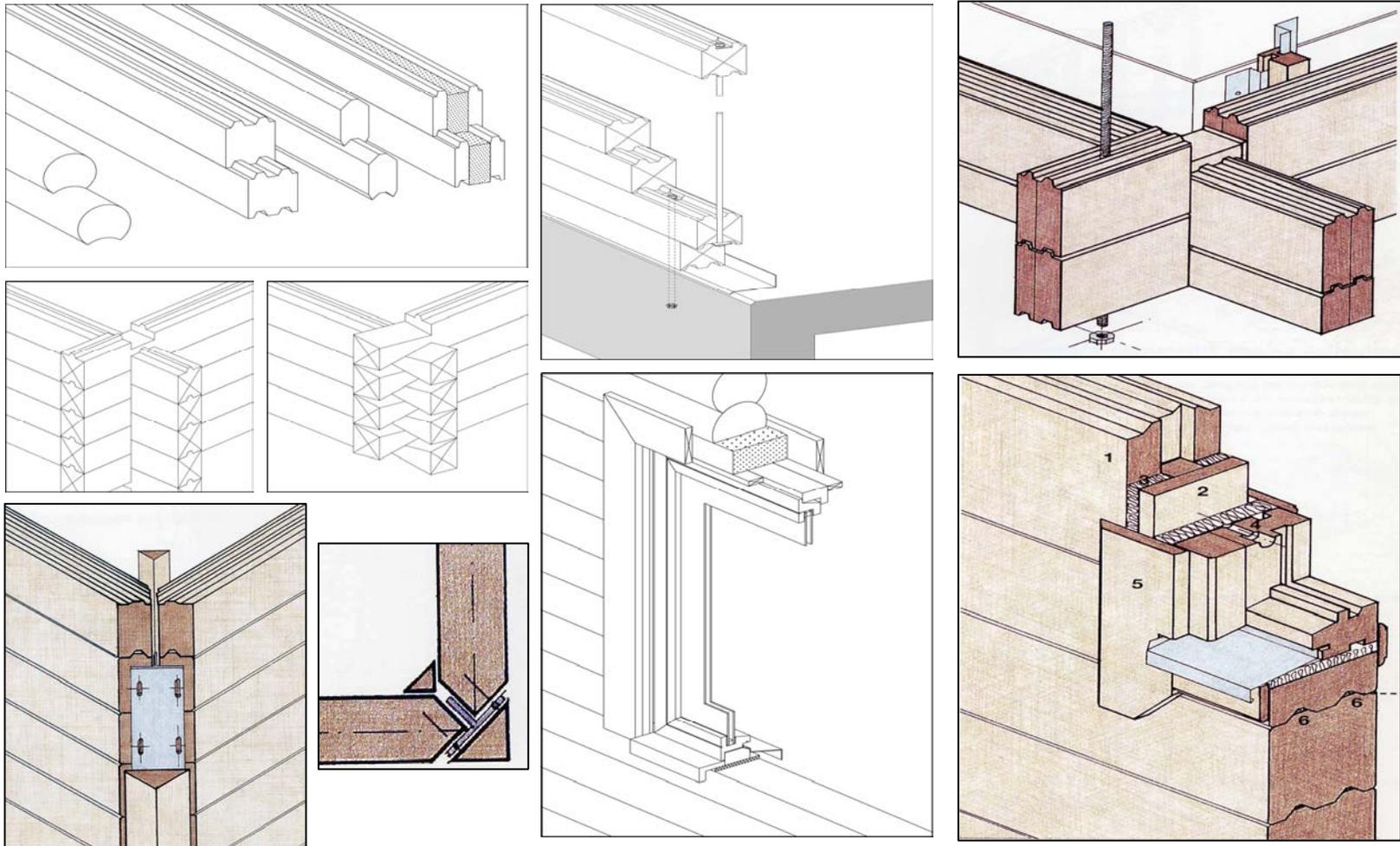


3.3 Systèmes porteurs verticaux (3)

Voiles

- Murs en bois plein : parpaings de bois, madriers ou rondins

[Images : Détails Bois / CD CNDB]

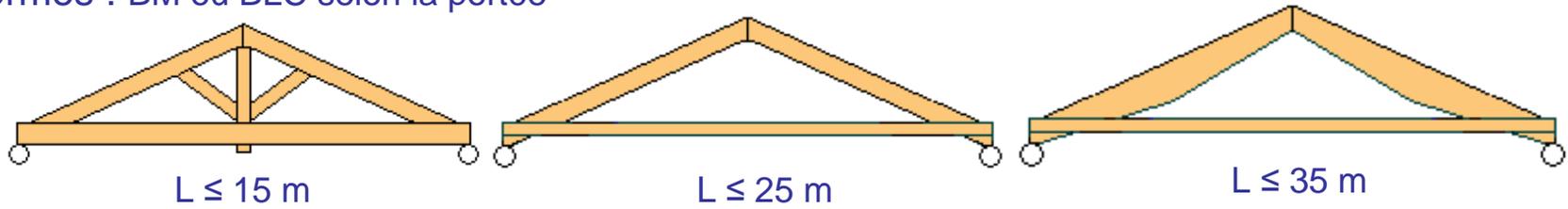




3.4 Portiques et arcs (2)

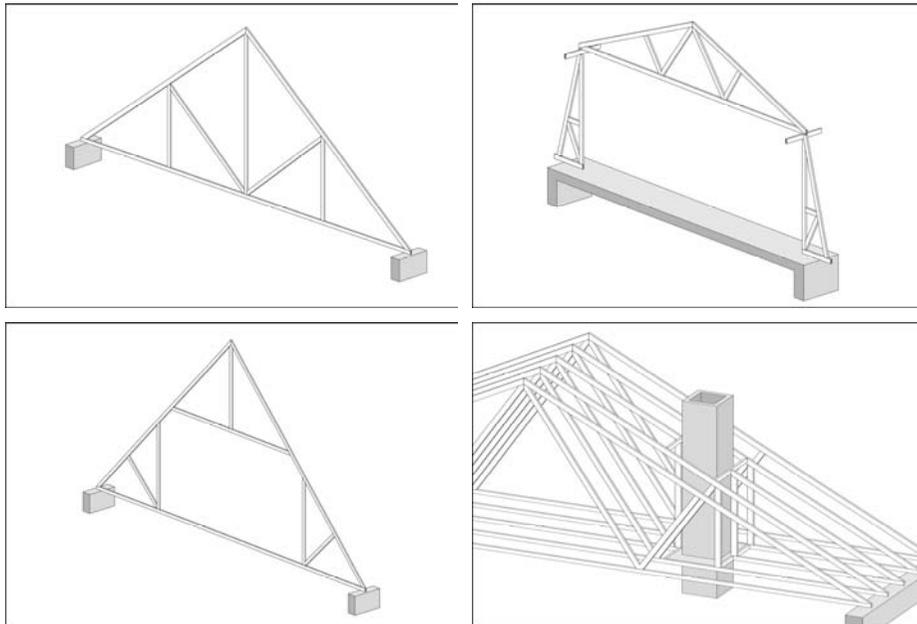
Charpentes

- Fermes : BM ou BLC selon la portée



- Fermettes industrielles : portée limitée à 15 m

[Images : CD CNDB]





3.4 Portiques et arcs (2)

Portiques et arcs

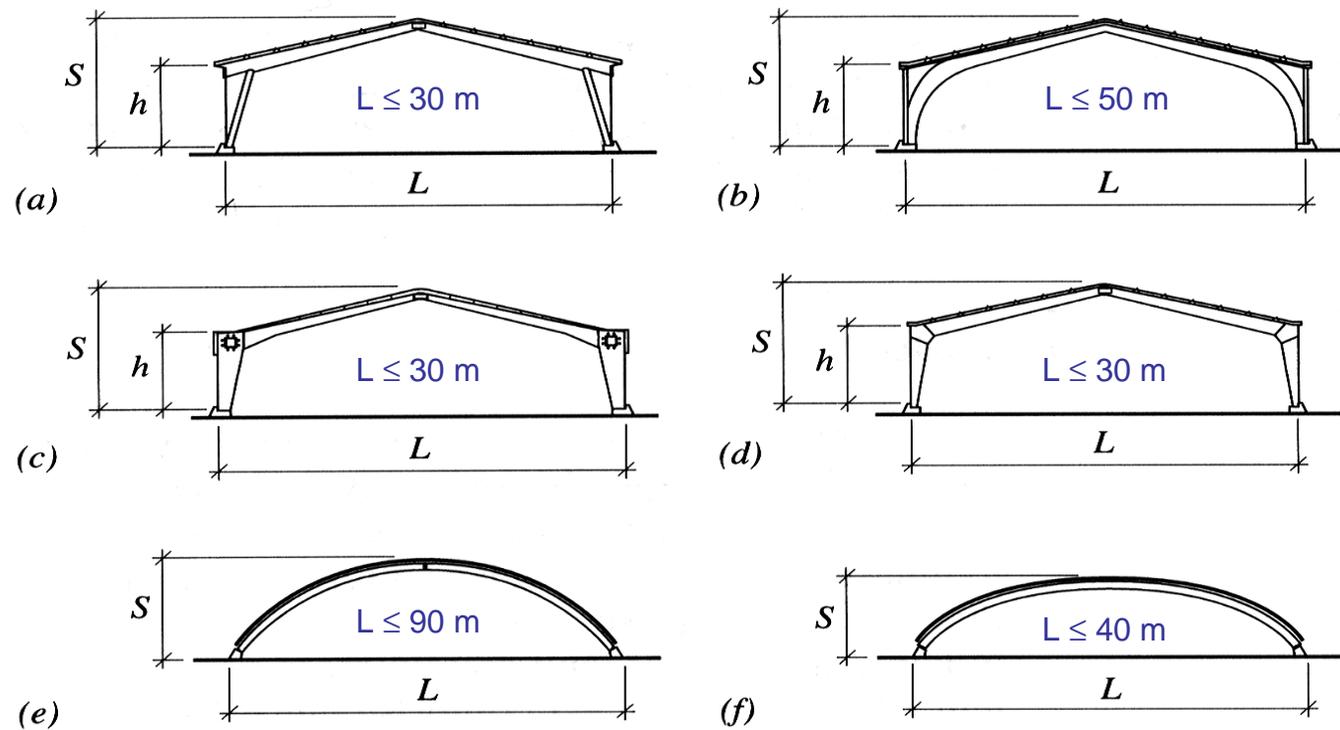
- Formes courantes

$$20 \text{ m} \leq L \leq 90 \text{ m}$$

$$10 \text{ m} \leq S \leq 20 \text{ m}$$



[Images : site Mathis]

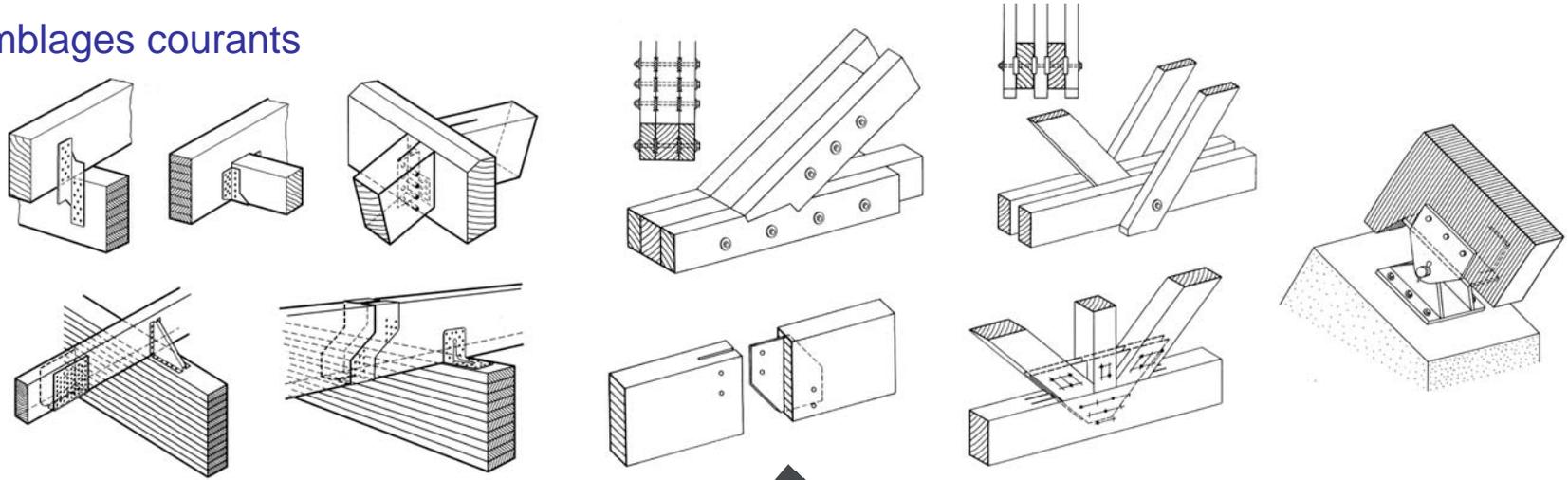


[Images : Le Bois aux états limites]

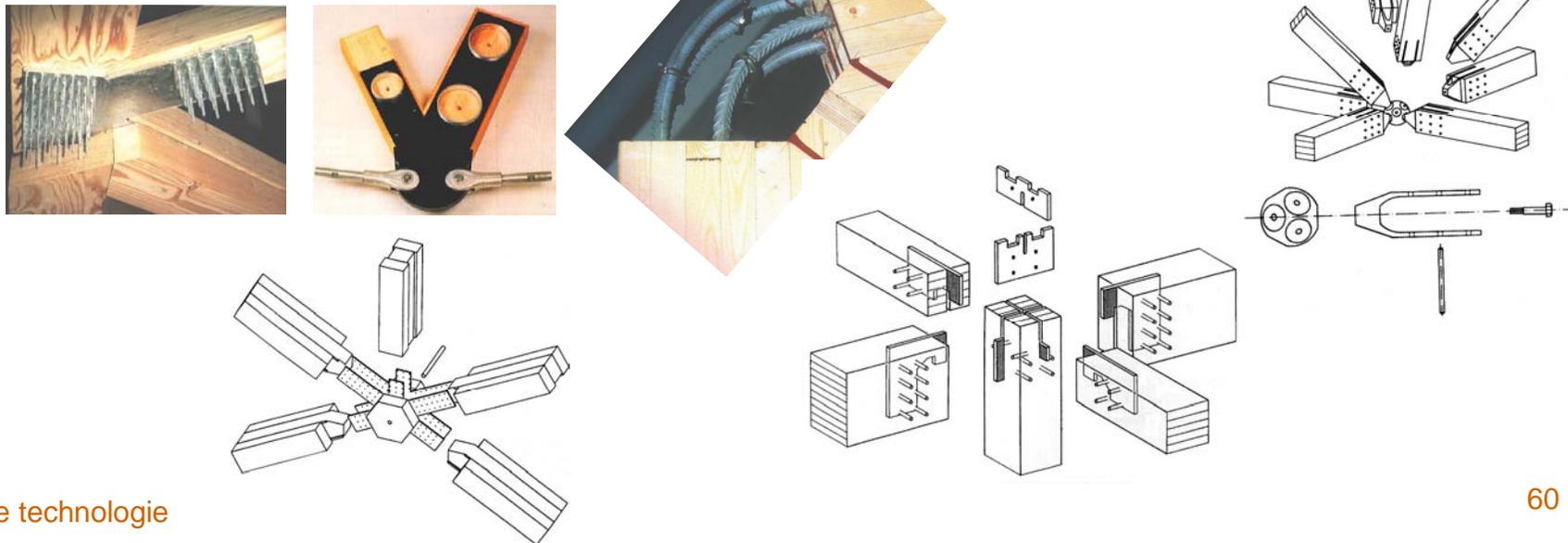


3.5 Assemblages (1)

Assemblages courants



Dispositifs industriels





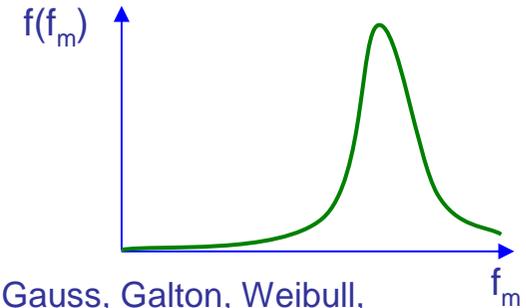
4.1 Principes du calcul aux états limites (1)

Probabilité de défaillance (le risque existe)

- Origine des incertitudes aléatoires

Propriétés physiques du bois
 Actions appliquées aux structures
 Dimensions géométriques des structures

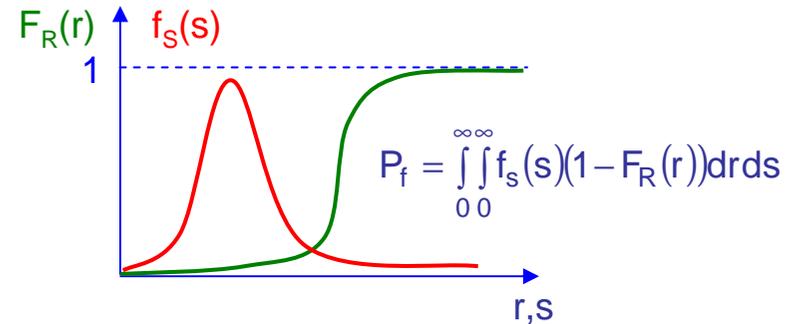
} → Lois de probabilité : Gauss, Galton, Weibull, Gumbel, Fréchet ...



- Défaillance = atteinte d'un état limite

Exemple : poutre en flexion
 Fonction d'état limite : $G(R,S) = R - S = f_m - \sigma_f$
 Probabilité de défaillance $P_f = \text{Prob}(R \leq S)$
 Objectifs du calcul aux états limites :

- (1) $\text{Prob}(R \leq S) \leq \text{plafond}$ ($P_{f0} \approx 10^{-5}$)
- (2) coût "raisonnable" (construction et réparation)
- (3) plafond "pragmatique" (politique)



Valeur de calcul des résistances et des sollicitations

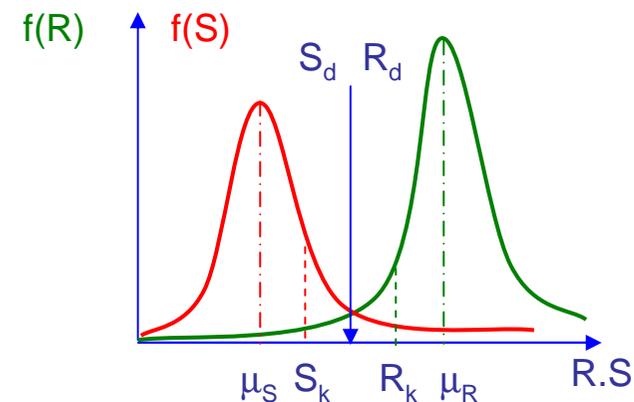
- Format semi-probabiliste

$$\text{Prob}(R \leq S) \leq P_{f0} \longrightarrow S_d = \gamma_F S_k \leq R_d = R_k / \gamma_M$$

- Valeurs caractéristiques

$$\text{Prob}(R \leq R_k) \leq 5\% \longrightarrow R_k \leftarrow (\text{loi}, \mu_R, \sigma_R)$$

$$\text{Prob}(S \geq S_k) \leq 5\% \longrightarrow S_k \leftarrow (\text{loi}, \mu_S, \sigma_S)$$

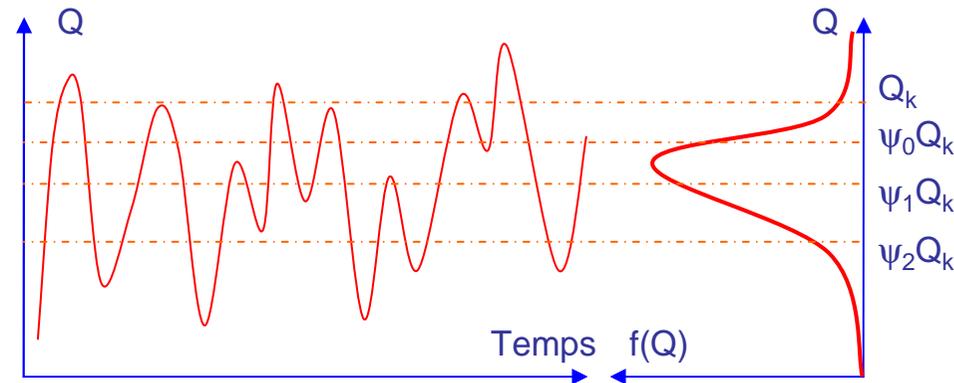




4.1 Principes du calcul aux états limites (2)

Combinaisons d'actions

- Variabilité dans le temps : période de référence, période de retour, granularité des mesures
Valeur rare (Q_k), fréquente ($\psi_1 Q_k$), quasi-permanente ($\psi_2 Q_k$)
- Coefficient d'accompagnement ψ_0 : actions simultanées (mais pas forcément maximales)
 $\text{Prob}(Q_{1,2} \geq Q_{k1} + Q_{k2}) < \text{Prob}(Q_1 \geq Q_{k1}) = \text{Prob}(Q_{1,2} \geq \psi_0 Q_{k1} + Q_{k2})$



- Combinaisons applicables pour les bâtiments

Vérification de la résistance des sections et de la stabilité de la structure à l'ELU

$$\gamma_{G,sup} G_{k,sup} \oplus \gamma_{G,inf} G_{k,inf} \oplus 1.5 Q_{k1} \oplus 1.5 \sum \psi_{0,i} Q_{ki} \quad (\text{STR}) \quad \gamma_{G,sup}=1.35 \quad (\text{EQU}) \quad \gamma_{G,sup}=1.1$$

$$\gamma_{G,inf}=1 \quad \gamma_{G,inf}=0.9$$

$$G_{k,sup} \oplus G_{k,inf} \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} Q_{k1} \oplus \sum (\psi_{2,i} Q_{ki}) \quad \text{accidentelle}$$

\oplus : combinaison des effets des actions (solicitations, contraintes, déplacements)



4.1 Principes du calcul aux états limites (3)

Combinaisons d'actions (suite)

- Combinaisons applicables pour les bâtiments (suite)

Vérification des conditions de service à l'ELS

$$\begin{array}{l}
 \cancel{G_{k.sup} \oplus G_{k.inf} \oplus Q_{k1} \oplus \sum \psi_{0,i} Q_{ki}} \quad \text{caractéristique} \\
 G_{k.sup} \oplus G_{k.inf} \oplus \psi_{1,1} Q_{k1} \oplus \sum \psi_{2,i} Q_{ki} \quad \text{fréquente} \\
 \cancel{G_{k.sup} \oplus G_{k.inf} \oplus \psi_{2,1} Q_{k1} \oplus \sum \psi_{2,i} Q_{ki}} \quad \text{quasi-permanente}
 \end{array}$$

Combinaison particulière pour les déplacements

- Valeurs des coefficients partiel, d'accompagnement et de combinaison

		ψ_0	ψ_1	ψ_2		
Charges d'exploitation	Cat. A : Habitations	0.70	0.50	0.30	Fondamentale	γ_M
	Cat. B : Bureaux	0.70	0.50	0.30		
	Cat. C : Lieux de réunion	0.70	0.70	0.60		
	Cat. D : Commerces	0.70	0.70	0.60		
	Cat. E : Lieux de stockage	1.00	0.90	0.80		
Neige	Altitude \leq 1000 m	0.50	0.20	0.00	Accidentelle	1.0
	Altitude $>$ 1000 m	0.70	0.50	0.20		
Vent		0.60	0.20	0.00	Service	1.0



4.1 Principes du calcul aux états limites (4)

Format de vérification :

$$E_d(Q_{ki}, \gamma_{Qi}, \psi_{0i}, G, \gamma_G) \leq R_d \left(X_d = k_{\mu} \frac{k_{\text{mod}} X_k}{\gamma_M} \right)$$

$E_d()$: modèle de calcul de la sollicitation

$R_d()$: modèle de calcul de la résistance

k_{μ} : coefficient tenant compte de

- l'effet d'échelle
- l'effet du volume contraint
- l'effet d'entaille

Hypothèses de calcul pour les structures bois

- Elasticité linéaire (pas de plasticité, petites déformations)
- Pas d'instabilité des sections mais instabilité des éléments (flambement et déversement)
- Comportement semi-rigide des assemblages (rigidité élastique)
- Prise en compte des imperfections géométriques globales et locales

Exemple d'états limites potentiels pour une poutre en flexion simple

- Déplacements (flèche, glissement d'assemblage, tassement aux appuis)
- Résistance (flexion, cisaillement, compression transversale aux appuis)
- Stabilité (déversement)



4.2 Résistances des sections (1)

Sollicitations simples

- Traction axiale

$$\sigma_{t,d} \leq f_{t,0,d}$$

$$\sigma_{t,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{net}}$$

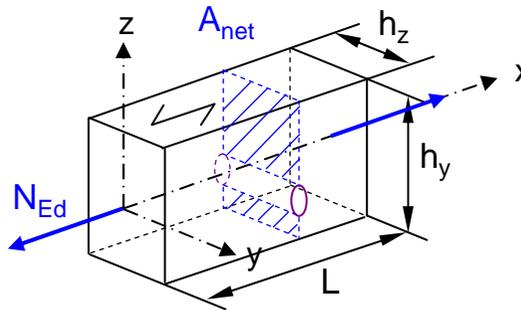
$$f_{t,0,d} = k_{dim} \frac{k_{mod} f_{t,0,k}}{\gamma_M}$$

$$k_{dim} = \begin{cases} 1 & \text{si } dim > dim_{ref} \\ \min\left(\left(\frac{dim_{ref}}{dim}\right)^e; k_{hmax}\right) & \text{si } dim \leq dim_{ref} \end{cases}$$

	BM	BLC	LVL
dim	$max(h_z; h_y)$	$max(h_z; h_y)$	L
dim _{ref}	150 mm	600 mm	3000 mm
e	0.2	0.1	0.075
k _{hmax}	1.3	1.1	1.1

A_{net} : section nette

A'_{net} : section nette, sauf si présence d'organe d'assemblage (A'_{net}=A)



- Compression axiale

$$\sigma_{c,d} \leq f_{c,0,d}$$

$$\sigma_{c,d} = \frac{N_{Ed}}{A'_{net}}$$

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} f_{c,0,k}}{\gamma_M}$$



4.2 Résistances des sections (2)

Sollicitations simples (suite)

- Flexion simple

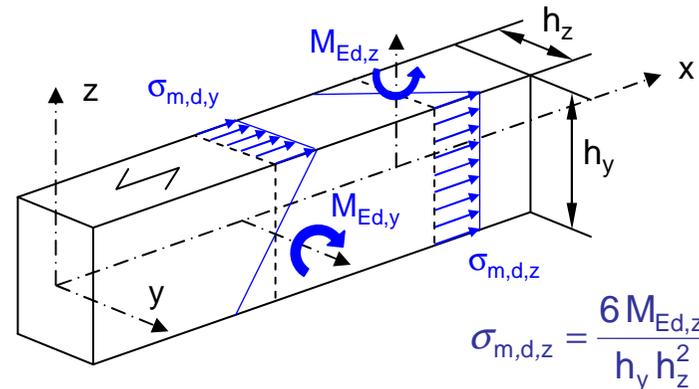
$$k_m \frac{\sigma_{m,d,y}}{f_{m,d,y}} + \frac{\sigma_{m,d,z}}{f_{m,d,z}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{m,d,y}}{f_{m,d,y}} + k_m \frac{\sigma_{m,d,z}}{f_{m,d,z}} \leq 1$$

$$\sigma_{m,d,a} = \frac{M_{Ed,a} h_a}{2 I_a}$$

$$f_{m,d,a} = k_{dim,a} \frac{k_{mod} f_{m,k}}{\gamma_M}$$

a : axe de flexion (y, z)



	BM	BLC	LVL	Valeur de k_m	$M_{ed,y}=0$ ou $M_{ed,z}=0$	$M_{ed,y} \neq 0$ et $M_{ed,z} \neq 0$
dim	h_a	h_a	h_a			
dim _{ref}	150 mm	600 mm	300 mm			
e	0.2	0.1	0.15			
k_{hmax}	1.3	1.1	1.2			
				Section rectangulaire	1	0.7
				Section non Rectangulaire	1	1



4.2 Résistances des sections (3)

Sollicitations simples (suite)

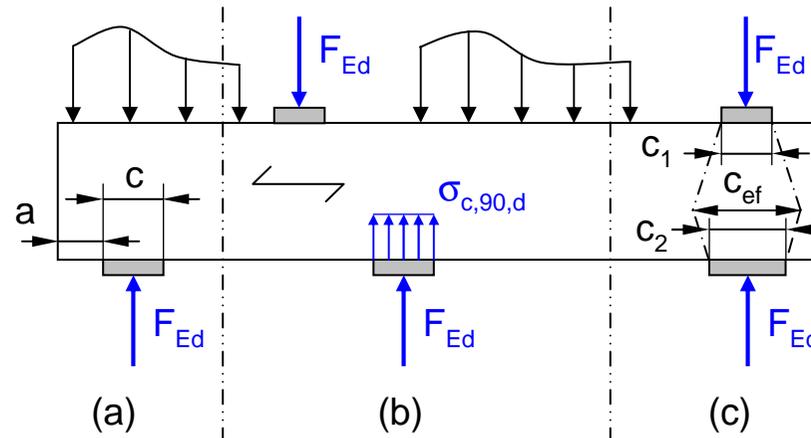
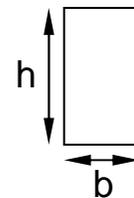
- Compression transversale localisée

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{Ed}}{bc}$$

$$f_{c,90,d} = k_{c,90} \frac{k_{mod} f_{c,90,k}}{\gamma_M}$$

c : largeur de la zone de contact
 $k_{c,90}$: coefficient de localisation
 ($1 \leq k_{c,90} \leq 4$)



diffusion
à 1/3

(a) : zone d'about ($a \leq h/3$)

$$k_{c,90} = \left(2.38 - \frac{c}{250} \right) \left(1 + \frac{h}{12c} \right)$$

(b) : zone intermédiaire

$$k_{c,90} = \left(2.38 - \frac{c}{250} \right) \left(1 + \frac{h}{6c} \right)$$

(c) : charges localisées en vis-à-vis
 possibilité de diffusion des charges
 vérification à effectuer en 1 et en 2

$$c_{ef} \leq 3c_i$$

$$k_{c,90} = \frac{c_{ef}}{c_i}$$



4.2 Résistances des sections (4)

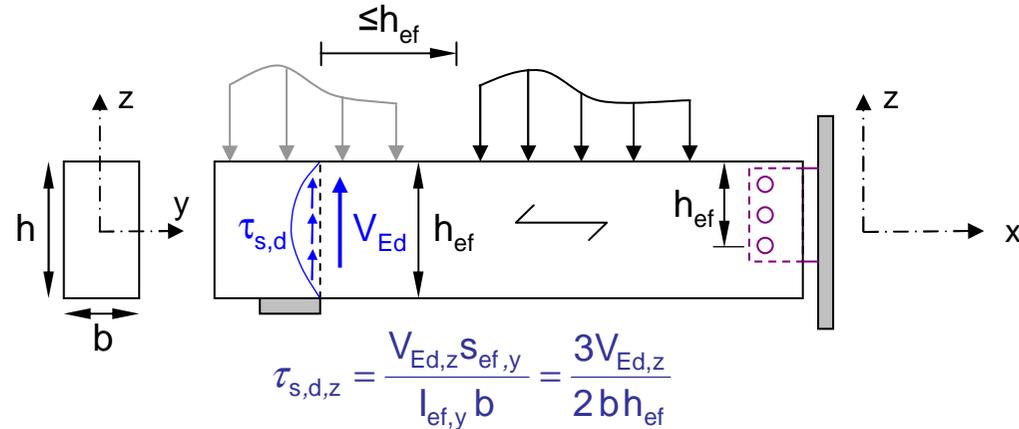
Sollicitations simples (suite)

- Cisaillement

$$\tau_{s,d} \leq f_{v,s,d}$$

$$\tau_{s,d} = \frac{V_{Ed} S_{ef}}{I_{ef} b}$$

$$f_{v,s,d} = k_V \frac{k_{mod} f_{v,k}}{\gamma_M}$$



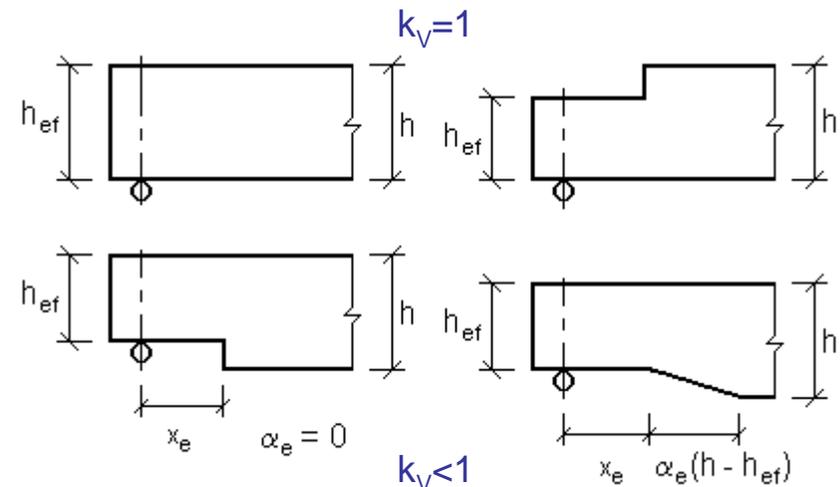
b, h_{ef} : largeur et hauteur effective de la zone cisailée

k_V : coefficient de prise en compte d'une entaille

V_{Ed} calculé en négligeant l'effet des charges situées à une abscisse $\leq h_{ef}$ (uniquement si $k_V=1$)

$$k_V = \min \left(1; \frac{k_n \left(1 + \frac{1.1\alpha_e^{1.5}}{\sqrt{h}} \right)}{\sqrt{h} \left(\sqrt{\frac{h_{ef}}{h} \left(1 - \frac{h_{ef}}{h} \right)} + 0.8 \frac{x_e}{h} \sqrt{\frac{h}{h_{ef}} - \left(\frac{h_{ef}}{h} \right)^2} \right)} \right)$$

$$k_n = \begin{cases} 5.0 & \text{pour le BM} \\ 6.5 & \text{pour le BLC} \\ 4.5 & \text{pour le LVL} \end{cases}$$





4.2 Résistances des sections (5)

Sollicitations simples (suite)

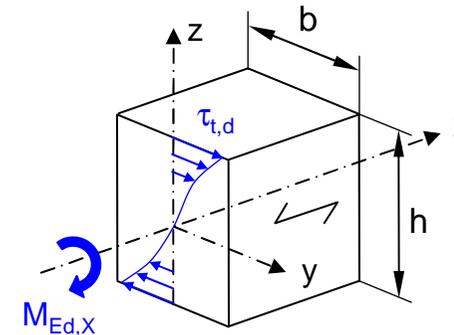
- Torsion

$$\tau_{t,d} \leq f_{v,t,d}$$

$$\tau_{t,d} = \begin{cases} 2 \frac{M_{Ed,x}}{\pi r^3} & \text{pour une section circulaire} \\ \frac{M_{Ed,x}}{\mu h b^2} & \text{pour une section rectangulaire (} b < h \text{)} \end{cases}$$

$$f_{v,t,d} = k_t \frac{k_{mod} f_{v,k}}{\gamma_M}$$

$$k_t = \begin{cases} 1.2 & \text{pour une section circulaire} \\ \min\left(1 + 0.15 \frac{h}{b}; 2\right) & \text{pour une section rectangulaire} \end{cases}$$



h/b	1	1.5	1.75	2	2.5	3	4	6	8	10	∞
μ	0.208	0.231	0.239	0.246	0.258	0.267	0.282	0.299	0.307	0.313	0.333

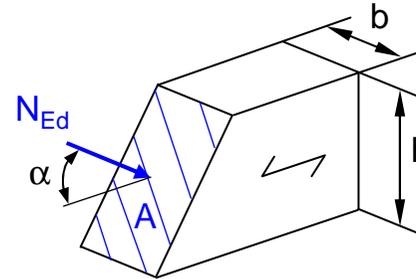


4.2 Résistances des sections (6)

Sollicitations simples (suite)

- Compression oblique

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d} f_{c,90,d}}{f_{c,0,d} \sin^2 \alpha + f_{c,90,d} \cos^2 \alpha}$$



Sollicitations combinées

- Flexion et traction axiale

$$k_m \frac{\sigma_{m,d,y}}{f_{m,d,y}} + \frac{\sigma_{m,d,z}}{f_{m,d,z}} + \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1$$

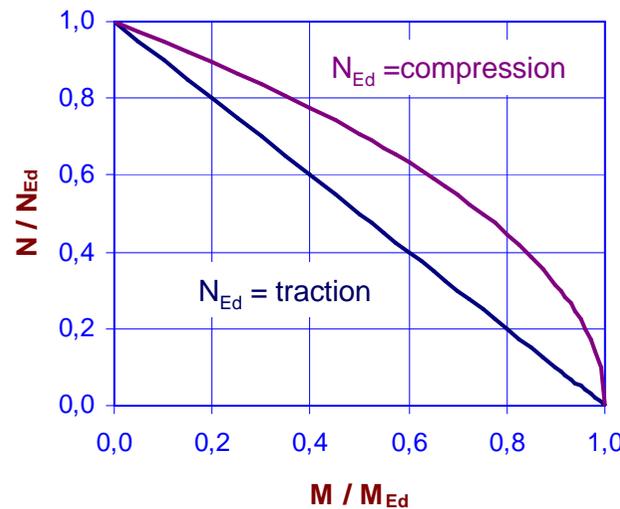
$$\frac{\sigma_{m,d,y}}{f_{m,d,y}} + k_m \frac{\sigma_{m,d,z}}{f_{m,d,z}} + \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1$$

- Flexion et compression axiale

$$k_m \frac{\sigma_{m,d,y}}{f_{m,d,y}} + \frac{\sigma_{m,d,z}}{f_{m,d,z}} + \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{m,d,y}}{f_{m,d,y}} + k_m \frac{\sigma_{m,d,z}}{f_{m,d,z}} + \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 \leq 1$$

Interaction N - M





4.3 Stabilité des éléments (1)

Eléments fléchis (instabilité = déversement)

- Contrainte critique de déversement

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi E_{0,k}}{4L_b} \sqrt{I_z I_t} \frac{1}{W_y}$$

Section rectangulaire ($b < h$)

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi E_{0,k}}{4L_b} \frac{b^2}{h} \sqrt{\left(1 - 0.63 \frac{b}{h}\right)}$$

$$L_b = \mu L + \Delta L$$

L : longueur libre entre points d'appuis latéraux

$$\Delta L = \begin{cases} +0.5h & \text{si la charge est appliquée sur la fibre comprimée} \\ -0.5h & \text{si la charge est appliquée sur la fibre tendue} \end{cases}$$

- Elancement relatif en flexion

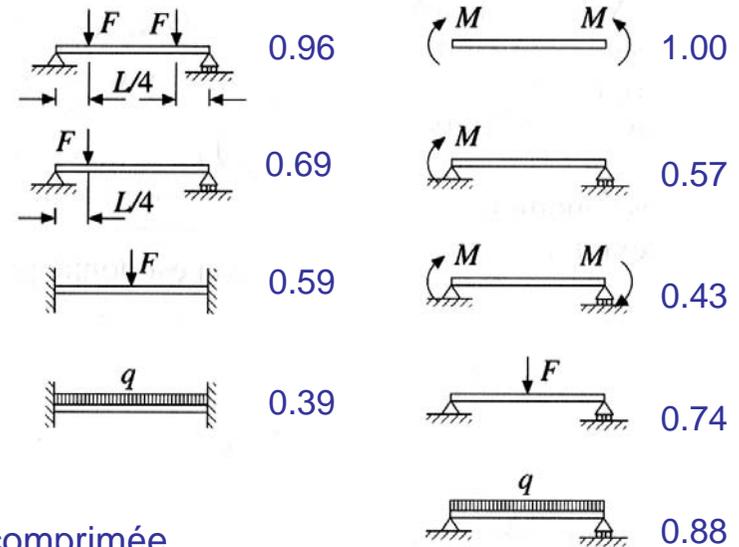
$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$$

- Vérification

$$\sigma_{m,d,y} \leq k_{crit} f_{m,d,y}$$

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{pour } \lambda_{rel,m} \leq 0.75 \\ 1.56 - 0.75 \lambda_{rel,m} & \text{pour } 0.75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1.4 \\ 1 / \lambda_{rel,m}^2 & \text{pour } \lambda_{rel,m} > 1.4 \end{cases}$$

μ : condition de chargement





4.3 Stabilité des éléments (2)

Éléments comprimés (suite)

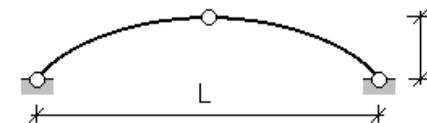
- Longueur de flambement

Calculée à partir de la longueur d'épure des éléments $L_b = \mu L$

Éléments simples

N_{d0}	1	0.5	0.7	0.7
N_{d1}	$\mu = ((1 + \mu_1 N_{d0} / N_{d1}) / \mu_2)^{0.5}$ avec $N_{d0} \leq N_{d1}$			
N_{d0}	$\mu_1 = 0.88$	$\mu_1 = 0.93$	$\mu_1 = 1.65$	$\mu_1 = 0.51$
N_{d1}	$\mu_2 = 1.88$	$\mu_2 = 7.72$	$\mu_2 = 5.42$	$\mu_2 = 3.09$
DIN 4114		$\mu_1 = 2.18$	$\mu_1 = 0.93$	
	N_{d1}	$\mu_2 = 3.18$	$\mu_2 = 7.72$	
N_{d0}	$\mu_1 = 1.09$	$\mu_1 = 0.35$		
N_{d1}	$\mu_2 = 2.09$	$\mu_2 = 5.40$		
N_{d0}				

Arcs



$$\mu = 0.57 (1 + 2 (f / L)^2)^{0.5}$$



$$\mu = 0.5 (1 + 6.15 (f / L)^2)^{0.5}$$

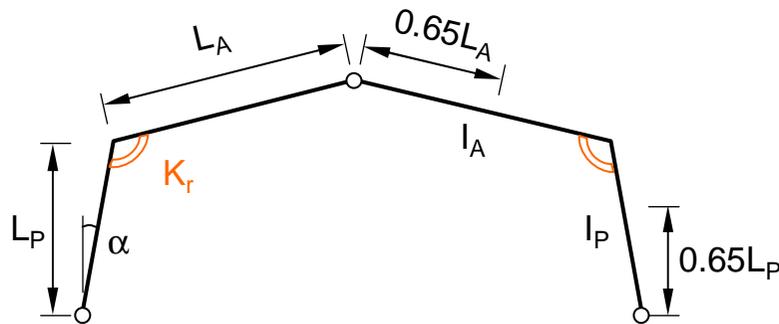


4.3 Stabilité des éléments (3)

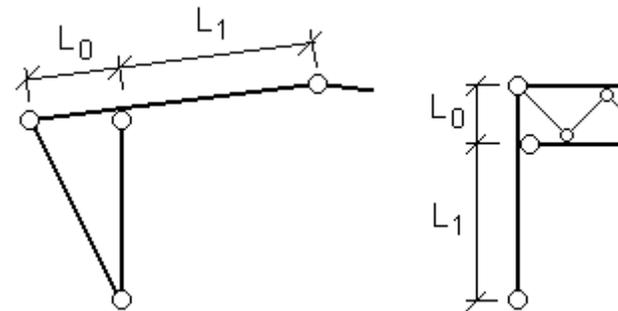
Éléments comprimés (suite)

- Longueur de flambement (suite)

Portique à trois articulations (plan x-z)



Éléments de treillis



$$\text{Arbalétrier : } L_{A,b} = L_P \sqrt{\left(4 + 3.2 \frac{I_P L_A}{I_A L_P} + 10 \frac{E_{0,k,P} I_P}{L_P K_r} \right) \frac{N_{Ed,P} I_A}{N_{Ed,A} I_P}}$$

$$\text{Poteau : } L_{P,b} = L_P \sqrt{4 + 3.2 \frac{I_P L_A}{I_A L_P} + 10 \frac{E_{0,k,P} I_P}{L_P K_r}}$$

$$L = L_1 + L_0$$

$$L_b = 2 L_1 + 0.7 L_0$$

K_r : rigidité de l'assemblage = $\sum K_u r_i^2$

$N_{Ed,P}$, $N_{Ed,A}$: efforts normaux calculés aux abscisses $0.65L_P$ et $0.65L_A$

I_P, I_A : inerties des sections (axe y), déterminées aux abscisses $0.65L_P$ et $0.65L_A$

α : inclinaison des poteaux $\alpha \leq 15^\circ$



4.3 Stabilité des éléments (4)

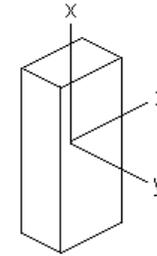
Éléments comprimés (suite)

- Elancement mécanique

L'elancement doit être déterminé dans les 2 plans de flambement potentiels :

plan x-z (axe de flexion : y) : $\lambda_y = L_{b,y} (A / I_y)^{0.5}$

plan x-y (axe de flexion : z) : $\lambda_z = L_{b,z} (A / I_z)^{0.5}$



- Elancement relatif en compression

$$\lambda_{rel,c} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit}}} \text{ avec } \sigma_{c,crit} = \frac{\pi^2 E_{0,k}}{\lambda^2}$$

- Vérification

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_c f_{c,0,d}$$

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{pour } \lambda_{rel,c} \leq 0.3 \\ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}} & \text{pour } \lambda_{rel,c} > 0.3 \end{cases}$$

$$k = 0.5 (1 + k_n (\lambda_{rel,c} - 0.3) + \lambda_{rel,c}^2)$$

$$k_n = \begin{cases} 0.2 & \text{pour le BM} \\ 0.1 & \text{pour le BLC et le LVL} \end{cases}$$



4.3 Stabilité des éléments (5)

Eléments comprimés et fléchis

- Interaction flambement / flexion sans déversement

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d,y}}{f_{m,d,y}} + k_m \frac{\sigma_{m,d,z}}{f_{m,d,z}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,d,y}}{f_{m,d,y}} + \frac{\sigma_{m,d,z}}{f_{m,d,z}} \leq 1$$

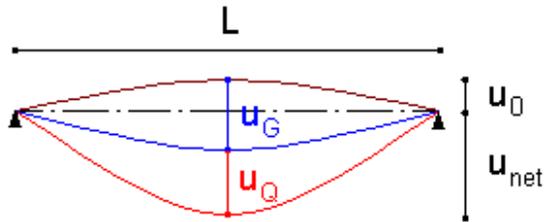
- Interaction flambement / flexion avec déversement

$$\left(\frac{\sigma_{m,d,y}}{k_{crit} f_{m,d,y}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1$$



4.4 Déformation des ossatures (1)

Combinaison considérée : combinaison de déplacements



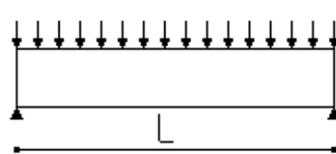
u_0 : contreflèche de fabrication

u_G : flèche due aux actions permanentes

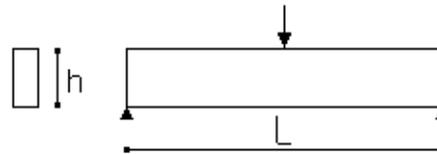
u_Q : flèche due aux actions variables

$$u_{net,f} = u_{G,i} (1 + k_{def}) + u_{Q1,i} (1 + \psi_{2,1} k_{def}) + \sum (u_{Qj,i} (\psi_{0,j} + \psi_{2,j} k_{def})) - u_0$$

Influence des glissements dûs au cisaillement



$$u_V \approx 15 u_M (h/L)^2$$



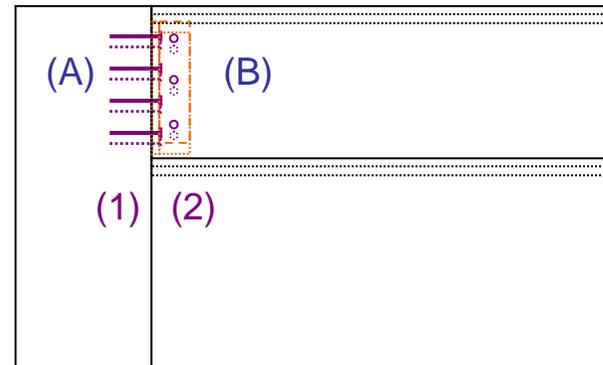
$$u_V \approx 19 u_M (h/L)^2$$

u_M : déplacement dû à la flexion

u_V : déplacement dû au cisaillement

Influence des glissements d'assemblage

$$u_{(B)/(A)} = V_{Ed(B)} \left(\frac{1}{K_{ser(1)}} + \frac{1}{K_{ser(2)}} \right)$$





4.4 Déformation des ossatures (2)

Limitations des déplacements horizontaux

	$u_{net,f}$	$u_{S,i}$ (vent)
Portiques sans pont roulant	H / 150	H / 150
Autres bâtiments à 1 niveau	H / 300	H / 250
Bâtiments à plusieurs niveaux :		
entre chaque étage		
bâtiment d'habitation	H / 300	H / 420
autres bâtiments	H / 300	H / 250
pour toute la structure	$H_t / 500$	$H_t / 420$

Limitation des déplacements verticaux

	$u_{net,f}$	$u_{Q,i}$	$u_{Q,f}$	u_0
Tous ouvrages	L / 200	L / 300	L / 200	
Consoles	L / 100	L / 150	L / 100	
Toitures non accessibles	L / 200	L / 250		L / 300
Planchers courants	L / 250	L / 300		L / 400
Supports de matériaux fragiles	L / 250	L / 350		L / 500
Esthétique	L / 250			



4.5 Stabilité au feu (1)

Comportement du bois au feu

- Situation d'incendie : critères et réaction du bois

Départ d'incendie : combustibilité, inflammabilité

bois = matériau combustible

bois = matériau inflammable (classement au feu M3 ou M4 en fonction de l'épaisseur)

Développement de l'incendie : vitesse de combustion, capacité calorifique, tenue au feu

bois = matériau à vitesse de combustion constante (densité)

bois = matériau de chauffage (densité)

bois = matériau dont les caractéristiques mécaniques sont invariantes avec la température

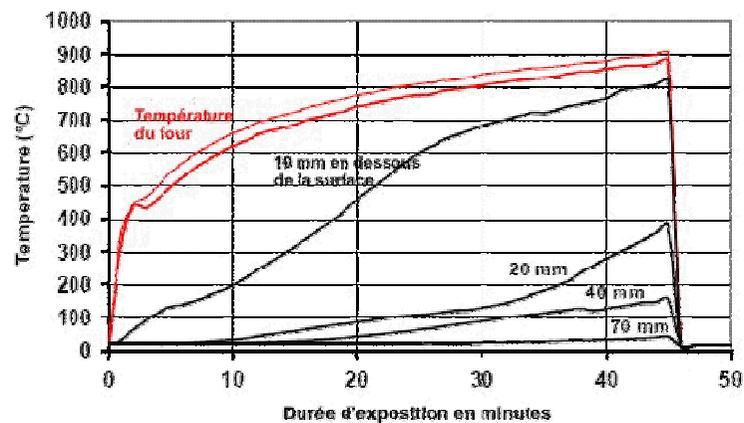
- Combustion du bois : phénomène stable (éléments de structure)

Formation immédiate de charbon de bois au contact d'une flamme

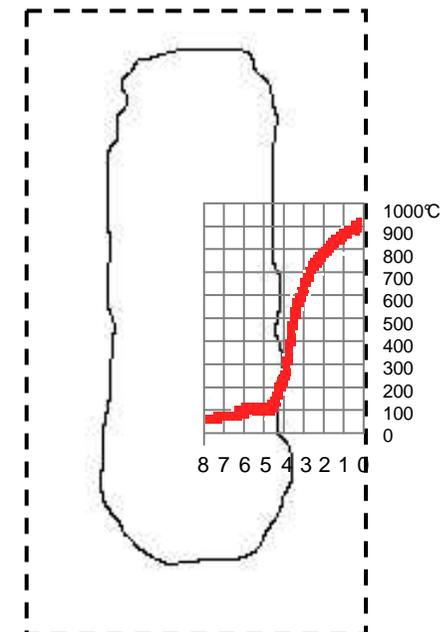
Départ de l'eau et des gaz de la zone pyrolysée

Stabilité mécanique et géométrique de la zone intègre

[Images : CD CNDB]



Températures moyennes mesurées à différentes profondeurs de poutres en bois lamellé collé (6) soumises à des essais d'exposition au feu. Etude réalisée par le Norwegian Institute of Wood Technology (NTI) avec la participation du FMPA. Rapport SP 2691:35





4.5 Stabilité au feu (2)

Vitesse de combustion

- Bois massif

- Résineux

$$\rho_k < 290 \text{ kg/m}^3 : \beta_0 = (290 / \rho_k)^{0.5} \beta_1$$

$$\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3 : \beta_0 = \beta_1$$

- Feuillus

$$290 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_k < \rho_{k1} : \beta_0 = \beta_2$$

$$\rho_k \geq \rho_{k1} : \beta_0 = \beta_3$$

Sans arrondi

Avec arrondi

ρ_{k1}

450 kg/m³

350 kg/m³

β_1

0.8 mm/min

0.64 mm/min

β_2

0.7 mm/min

0.67 mm/min

β_3

0.5 mm/min

0.54 mm/min

- Bois lamellé-collé

$$290 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_k < \rho_{k1} : \beta_0 = \beta_4$$

$$\rho_k \geq \rho_{k1} : \beta_0 = \beta_5$$

Sans arrondi

Avec arrondi

ρ_{k1}

450 kg/m³

350 kg/m³

β_4

0.7 mm/min

0.64 mm/min

β_5

0.5 mm/min

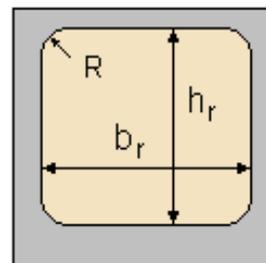
0.54 mm/min

- Arrondi dû à la combustion

R = 20 mm pour $t_f = 30$ min

R = 50 mm pour $t_f = 120$ min

R < min ($h_r/2$; $b_r/2$)





4.5 Stabilité au feu (3)

Section résiduelle

- Calcul sans arrondi : section efficace

$$a_r = a - 2 (\beta_0 t_f + k_0 d_0)$$

a : dimension avant exposition

$$k_0 = 1.0 \text{ si } t_f \geq 20 \text{ min}$$

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

- Calcul avec arrondi : résistance réduite

$$a_r = a - 2 \beta_0 t_f$$

a : dimension avant exposition

Principe de vérification

- Combinaison d'actions accidentelle
- Justification de la résistance : $R_{d,f} > S_{d,f}$

$$R_{d,f} = \min(k_{mod,f} k_f R_k ; R_k)$$

R_k : valeur caractéristique à température normale

k_f = 1.25 pour le BM, 1.15 pour le BLC, 1.10 pour le LVL

$k_{mod,f}$ dépend du mode de calcul de la résistance

section efficace : $k_{mod,f} = 1$

$$\text{résistance réduite : } k_{mod,f} = 1 - \frac{p}{k_s A_r}$$

p : périmètre (m)

A_r : section (m²)

	flexion	compression	traction
k_s	200	125	330



4.5 Stabilité au feu (4)

Vitesse de combustion des panneaux

Type de panneau	β_{0r}
Particules, fibres	0.9
Contreplaqué	1.0
$\beta_0 = (450 / \rho_k)^{0.5} \min((20 / t)^{0.5} ; 1) \beta_{0r}$	

Temps de protection (min) : $t_p = t / \beta_0 - 5$