

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	2
 CHAPITRE 1 – LE BOIS	4
INTRODUCTION	5
1. STRUCTURE DU BOIS	5
1.1. Constitution du bois macroscopique	5
1.2. Constitution du bois microscopie	6
1.3. Composition chimique du bois	7
2. PROPRIETES DU BOIS	7
2.1. Propriétés physiques	7
2.1.1. Masse volumique	7
2.1.2. L'eau dans le bois	8
2.1.3. Retrait du bois	8
2.2. Propriétés mécaniques	11
2.2.1. Résistance à la compression	11
2.2.2. Résistance à la traction par flexion	12
2.2.3. Résistance à la traction directe	12
3. LE SECHAGE	13
3.1. Le séchage naturel	13
3.2. Le séchage artificiel	13
4. DEFAUTS DU BOIS	14
4.1. Défauts de structure	14
4.2. Altérations du bois	17
4.2.1. La pourriture	17
4.2.2. Les vermoulures	19
5. PROTECTION DU BOIS	19
5.1. les produits utilisés.....	19
5.2. les traitements	20
6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU BOIS	21
6.1.1. Les avantages	22
6.1.2. Les inconvénients	21
7. TRANSFORMATION DU BOIS	23
7.1. Le bois de trituration	24
7.2. Les sciages	24
7.3. Les panneaux de particules	25
7.4. Les contre plaqués	26
7.4.1. Fabrication des contreplaqués	26
7.4.2. Composition des panneaux	26
8. NOMENCLATURE DES PRODUITS EN BOIS	28
 CHAPITRE 2 – LE VERRE	30
GENERALITES	31
1. COMPOSITION DES VERRES	31

1.1. L'oxyde formateur	31
1.2. Les modificateurs	31
1.3. Les fondants	31
1.4. Les stabilisants	31
1.5. Les colorants	32
2. STRUCTURE DU VERRE	33
3. FABRICATION DU VERRE	33
3.1. La fusion	33
3.2. L'affinage	33
3.3. Recuisson	34
3.4. Trempe du verre	34
3.3.1. La trempe thermique	35
3.3.2. La trempe chimique	35
4. TYPE DE VERRE	36
4.1. Verre imprimé	36
4.2. Verre armé	36
4.3. Verre profilé	36
5. PROPRIETES DES VERRES	37
6. LA FIBRE DE VERRE	36
6.1. Procédé de fabrication	38
6.2. Utilisations	39

CHAPITRE 3 – LES LIANTS HYDROCARBONES 40

INTRODUCTION	41
1. LIANTS NATURELS	41
2. LES GOUDRONS	41
3. LE BITUME DE PETROLE	42
3.1. Elaboration du bitume	42
3.2. Classification des bitumes de pétrole	43
3.2.1. Bitumes brutes	43
3.2.2. Bitumes spéciaux	43
3.2.3. Bitumes modifiés	44
4. PROPRIETES DES BITUMES DE PETROLE	44
4.1. Viscosité	44
4.2. Température de ramollissement	47
4.3. Plasticité ou ductilité	47
5. UTILISATION	48
5.1. Construction de routes	48
5.1.1. Enrobé.....	48
5.2. Enduits	49
5.2. L'étanchéité	50

CHAPITRE 1

LE BOIS

INTRODUCTION

1. STRUCTURE DU BOIS

- 1.1. Constitution du bois macroscopique
- 1.2. Constitution du bois microscopie
- 1.3. Composition chimique du bois

2. PROPRIÉTÉS DU BOIS

- 2.1. Propriétés physiques
 - 2.2.1. Masse volumique
 - 2.1.2. L'eau dans le bois
 - 2.1.3. Retrait du bois
- 2.2. Propriétés mécaniques
 - 2.2.1. Résistance à la compression
 - 2.2.2. Résistance à la traction par flexion
 - 2.2.3. Résistance à la traction directe

3. LE SÉCHAGE

- 3.1. Le séchage naturel
- 3.2. Le séchage artificiel

4. DÉFAUTS DU BOIS

- 4.1. Anomalie de structure
- 4.2. Altérations du bois
 - 4.2.1. La pourriture
 - 4.2.2. Les vermoulures

5. PROTECTION DU BOIS

- 4.1. Traitement thermique
- 4.2. Les huiles
- 4.3. Les sels
- 4.4. Le bitume
- 4.5. Les vernis
- 4.6. Les peintures
- 4.7. Autres

6. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU BOIS

7. TRANSFORMATION DU BOIS

- 7.1. Le bois de trituration
- 7.2. Les sciages
- 7.3. Les panneaux de particules
- 7.4. Les contre-plaqués :

8. NOMENCLATURE DES PRODUITS EN BOIS

CHAPITRE 1 - LE BOIS

INTRODUCTION

Le bois est l'un des plus vieux matériaux de construction. Il a pendant très longtemps été utilisé sans transformation importante, c'est à dire dans un état voisin de l'arbre. Poutres et solives (poutrelles et fermes) étaient constituées de troncs à peine équarris (tailler pour rendre carré). Les progrès effectués dans les techniques de sciage ont fait naître d'autres formes d'utilisation plus élaborées telles que les planches, les madriers, etc. ...De même sont apparues les techniques de déroulage de la grume qui ont donnés naissance à des produits de transformation plus poussés tels que les contres plaqués et placages divers. Les nouvelles techniques industrielles furent mise au point employant les déchets de bois (sciure de bois) qui n'étaient pas utilisables et qui sont à la base des divers matériaux agglomérés

On distingue deux catégories d'arbres : les feuillus et les résineux. Les feuillus sont des arbres à feuilles larges et persistantes qui tombent en automne. Les résineux produisent de la résine. On les appelle aussi conifères, car leurs graines sont logées dans des cônes. Leurs feuilles sont souvent en forme d'aiguilles.

On distingue deux catégories de bois : les bois tendres et les bois durs selon l'arbre dont ils sont issus. Les bois provenant d'arbres à feuilles (feuillus) sont les bois durs ; les bois résineux (de conifères) sont appelés bois tendres, quelle que soit leur dureté réelle (de nombreux bois tendres sont en fait plus durs que certains bois dits durs). Les bois durs sont munis de longs vaisseaux continus transportant la sève sur toute la longueur du tronc ; les bois tendres ne disposent pas de tels vaisseaux et la sève est transportée de cellule en cellule. De nombreux bois tendres (les conifères) contiennent des vaisseaux de résine disposés parallèlement aux veines. En général, ces bois produisent une grande quantité de résine, contrairement aux bois durs.

1. STRUCTURE DU BOIS

1.1. Macrostructure du bois

Le bois est une substance compacte qui constitue le tronc d'arbre, formée de fibres, de cellules et de faisceaux drainant la sève. L'examen d'une coupe transversale d'un tronc d'arbre fait apparaître plusieurs zones : (figure 1)

- **L'écorce** : L'écorce entoure l'arbre et le protège, il est composé de l'épiderme (couche externe) et du liber (couche interne composée de tissu vivant destinée à transposer la sève). Au fur et à mesure que l'arbre croît, l'écorce se distend, éclate et meurt.
- **le cambium** : Le cambium est constituée de cellules vivantes (cellules de liber vers l'extérieur et cellules de bois vers l'intérieur). Les cellules de bois qu'on appelle aussi cellules ligneuses sont la source de croissance du bois de l'arbre
- **L'aubier, ou l'assise cambiale** : L'aubier, est un bois en formation, constitué de cellules vivantes, de couleur claire. Il est formé de couches concentriques de cellules non encore lignifiées formant un bois encore imparfait. Ces couches, dans lesquelles circulent les matières nutritives (la sève),. Chaque année, l'aubier se transforme en bois de printemps, foncé, et en bois d'été, plus clair.
- **Le coeur, le duramen ou le bois parfait** Le duramen, bois parfait ou de cœur, constitue la partie centrale de l'arbre. Composé de cellules mortes, lignifiées et imprégnées de tanin ou de colorants selon les essences, il se distingue en général de l'aubier par une couleur plus foncée. C'est la partie la plus intéressante du point de vue du matériau; les cellules sont plus épaisses que celles du liber et très riches en carbone; elles sont souvent imprégnées de matières antiseptiques, le coeur est formé d'une série de couches concentriques (couches annuelles ou cernes) permettant de déterminer l'âge du bois.

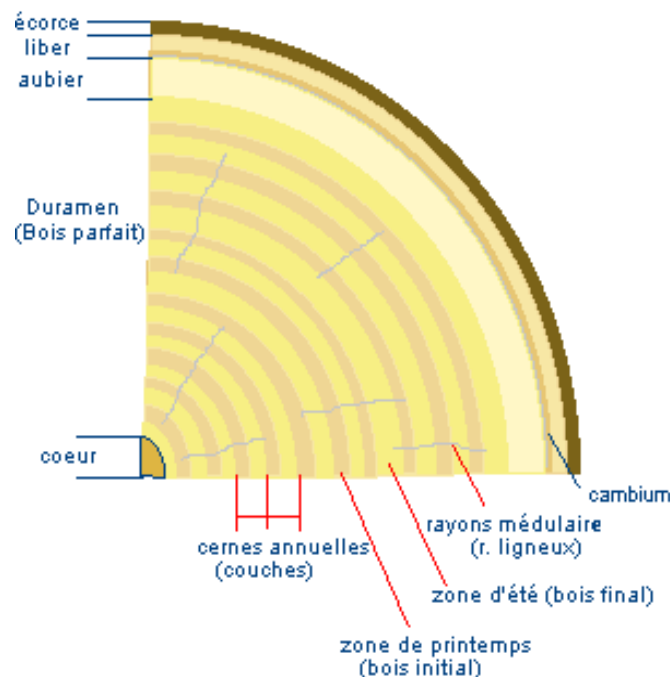


Figure 1 – Coupe transversale d'un tronc d'arbre

- **La moelle** : Elle se trouve au centre du tronc. Elle est formée d'un tissu léger et peu résistant. Importante dans les jeunes pousses, elle disparaît souvent avec l'âge pour ne laisser qu'un canal de faible section. La moelle est un ensemble de tissus spongieux qui évoluent en vieillissant.

- **Le cambium** : Le cambium est une fine zone entre l'aubier et l'écorce, qui produit le bois. Le liber comporte un ensemble de vaisseaux dans lesquels circule la sève élaborée.

1.2. Microstructure du bois

Le bois a une structure poreuse, On distingue le bois d'été d'une année n à gauche (de faible diamètre à parois épaisses) et le bois de printemps de l'année $n+1$ à droite (de fort diamètre et à parois plus fines). (figure 2)

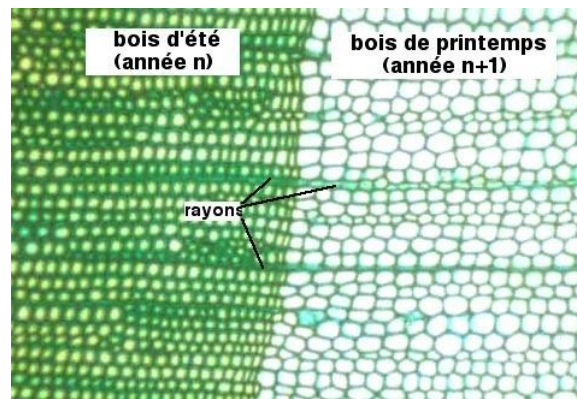


Figure 2 - Coupe transversale de bois de pin à la limite de deux cernes

1.3. Constitution et Composition chimique du bois

Le bois est une matière organique, au niveau cellulaire il est constitué principalement de matières organiques (cellulose et lignine) et d'un faible pourcentage (de 1 à 1,5%) d'éléments minéraux. Il contient également une part d'humidité variable.

- Cellulose (40 à 50%)
- Lignine (20 à 30%)
- Hémicellulose (15 à 25%)
- Autres substances organiques : résines, colorants, cires,...
- Eau (de constitution et d'humidité variable) qui est liée au bois par voie chimique, alors que l'eau d'imprégnation et de capillarité contenu dans les parois cellulaires et les pores du bois qui est liée au bois par voie physique. Cette eau peut être éliminée par séchage.

La cellulose et la lignine sont des polymères, au niveau moléculaire à l'état anhydre, le bois est composé de 50 % de carbone, 42 % d'oxygène, 6 % d'hydrogène et 1 % d'azote.

2. PROPRIÉTÉS DU BOIS

Les propriétés du bois dépendent de plusieurs facteurs : l'âge, la partie de l'arbre ou il a été coupé, les conditions de vie de l'arbre, le climat, la nature du sol, le peuplement de la forêt, de l'humidité du bois etc.

2.1. Propriétés physiques

2.1.1. Masse volumique

Il faut distinguer entre la masse volumique absolue du bois (qui est la densité de la matière ligneuse) et la masse volumique apparente de la masse du bois.

Tableau 1 – Masse volumique apparente de quelques espèces de bois

Type de Bois	$\rho_{app}, T / m^3$	Type de Bois	$\rho_{app}, T / m^3$
Sapin	0.40 - 0.50	Noyer	0.65 - 0.75
Épicéa	0.40 - 0.50	Pommier	0.65 - 0.75
Peuplier	0.40 - 0.50	Cerisier	0.65 - 0.75
Tremble	0.40 - 0.50	Poirier	0.65 - 0.75
Tilleul	0.40 - 0.50	Hêtre dur	0.70 - 0.80
Pin	0.40 - 0.60	Acacia	0.70 - 0.80
Aulne	0.50 - 0.60	Chêne	0.70 - 0.80
Bouleau	0.60 - 0.65	Frêne	0.70 - 0.80
Érable	0.60 - 0.65	Acajou	0.70 - 0.80
Mélèze	0.60 - 0.65	Prunier	0.75 - 0.85
Châtaignier	0.60 - 0.65	Charme	0.80 - 1
Platane	0.60 - 0.65	Cormier	0.80 - 1
Hêtre tendre	0.60 - 0.65	Buis	0.80 - 1
Cèdre	0.60 - 0.70	Teck	0.80 - 1
Cyprès	0.60 - 0.80	Pitchpin	0.80 - 1
Acajous	0.65 - 0.70	Olivier	0.80 - 1
Teck	0.65 - 0.70	Palissandre	0.9 - 1.10
Mûrier	0.65 - 0.70	Ebène	1.10 - 1.20
Orme	0.65 - 0.75	Gaïac	1.20 - 1.40

La connaissance de la masse volumique apparente du bois est utile non seulement parce qu'elle permet de déterminer le poids d'une construction en ce matériau, mais parce qu'elle renseigne déjà sur d'autres propriétés fondamentales, notamment sur la dureté et la résistance à la compression. La masse volumique apparente du bois est donc très variable selon les espèces et à l'intérieur d'une même espèce

Pour mesurer la densité réelle on réduit le bois en poudre. On constate alors que la densité de la matière ligneuse est sensiblement la même quelle que soit l'espèce considérée.

Elle est comprise entre 1,40 et 1,50.

La masse volumique apparente varie :

- d'une espèce à une autre,
- dans la même espèce suivant les conditions de climat, du sol, de luminosité,
- dans les diverses parties d'un même bois : le cœur est plus dense que l'aubier. Le bois de la base de l'arbre est plus dense que celui du sommet.

Mais surtout pour un même bois la masse volumique apparente varie beaucoup en fonction de la teneur en eau. On ne peut donc faire de comparaisons utiles que si l'on convient d'un pourcentage commun à toutes les éprouvettes. Le taux de 15% a été retenu.

La masse volumique est généralement inférieure à 1000 Kg / m³ pour la plupart des espèces.

2.1.2. L'eau dans le bois

L'humidité exerce une grande influence sur toutes les propriétés du bois, elle est déterminée par la formule suivante :

$$H = \frac{M_H - M_S}{M_S} . 100\%$$

H – Humidité du bois en %

M_H – Masse du bois à l'état humide

M_S - Masse du bois séché à l'étuve jusqu'à masse constante

L'eau se trouve dans le bois sous trois formes :

- **Eau libre** (absorbée, capillaire), qui remplit les cavités du bois saturé. Cette eau n'influence pas les propriétés du bois si ce n'est sur sa densité. Le départ de l'eau libre ne provoque pas de retrait.

- **Eau liée** (adsorbée, de saturation), qui se trouve dans les parois (cellules et vaisseaux) du bois sous forme de fines couches microscopiques. L'élimination de cette eau par séchage entraîne le retrait. Cette eau détermine le taux d'humidité H du bois ou le point de saturation.

- Bois vert (bois fraîchement abattu) : H > 30 %
- Bois demi sec : H = 23 – 30 %
- Bois commercialement sec : H = 18 – 22 %
- Bois sec à l'air : H = 13 – 18 %
- Bois desséché : H < 13 %

- **Eau de constitution**, qui entre dans la composition chimique du bois, son élimination (par le feu par exemple) entraîne la destruction du bois

2.1.3. Retrait du bois

Le bois est un matériau hygroscopique, il se met en équilibre hygrométrique avec le milieu environnant. Lorsque l'humidité du milieu est supérieure à celle du bois, il en absorbe une quantité en augmentant de dimensions (gonflement). Au contraire lorsque l'humidité du milieu est inférieure à celle du bois, il en restitue une quantité en se rétractant (retrait).

Le bois ne se comporte pas de la même manière selon la direction principale des fibres. C'est un matériau anisotrope, car le bois possède une structure cellulaire qui est orientée. Cet agencement cellulaire apparaît différemment selon les trois plans d'observation. On distingue 3 directions du bois qui dépendent du sciage (figure 3)

- **Le sens longitudinal ou axial (L)** désigne la direction parallèle aux fibres (coupe transversale). On distingue nettement les rayons et les cernes. Ces derniers sont constitués d'une alternance de zones poreuses (gros vaisseaux, bois de printemps) et de zones plus compactes (bois d'été). Le bois a été mouillé pour réaliser la photographie :

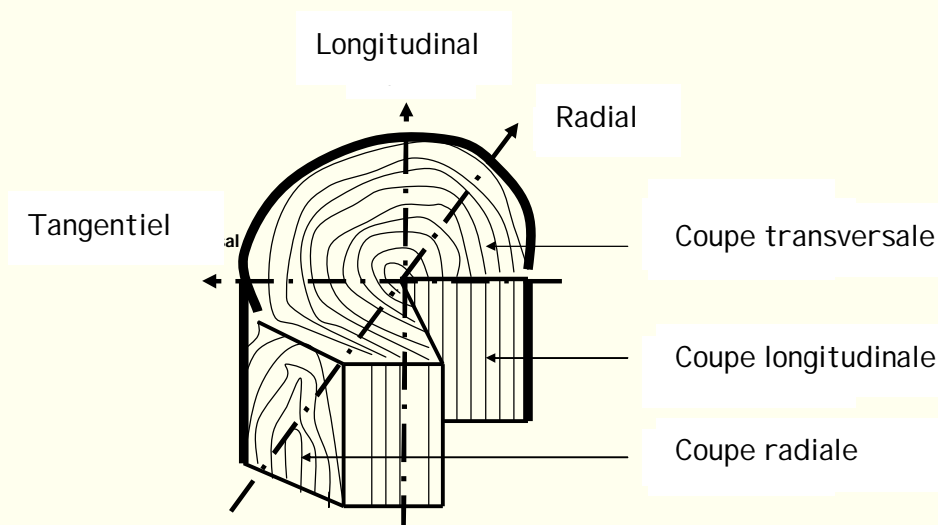


Figure 3 – différentes coupes d'un tronc d'arbre

- **Le sens tangentiel (T)** identifie une direction perpendiculaire aux fibres mais tangente aux cernes (coupe longitudinale). Le bois a été mouillé. Les rayons sont sectionnés perpendiculairement à la direction de leurs éléments ; ils apparaissent foncés. Le reste de la coupe constitué de vaisseaux et fibres longitudinaux apparaît plus clair. La coupe n'étant pas parfaitement longitudinale, le bois de printemps de deux cernes (gros vaisseaux) apparaît sous

forme d'arceaux plus foncés. Ce type de section est prisé car elle donne des effets décoratifs très intéressants (planches, placages, marqueteries) (figure 4)



Coupe tangentielle du bois de Chêne



Coupe radiale du bois de Chêne



Coupe transversale du bois de Chêne

Figure 4 – Différentes coupe du bois

- **Le sens radial (R)** indique une direction perpendiculaire aux fibres allant du cœur vers l'aubier. Elle passe par un rayon de l'arbre perpendiculairement aux cernes d'accroissement, (coupe radiale). Les gros vaisseaux verticaux du bois de printemps des différents cernes apparaissent nettement. Ils sont discontinus car la section n'est pas parfaitement longitudinale. Les rayons (cernes) du bois apparaissent sous forme de stries perpendiculaires aux vaisseaux (champs de croisement).

Le retrait est directement proportionnel à la diminution ou à l'augmentation du taux d'humidité du bois. L'amplitude des variations dimensionnelles observées dépend : (figure 5

- de la direction par rapport au fil du bois (axiale, radiale ou tangentielle),
- de l'essence (type de bois),
- de l'humidité et de la température du milieu de conservation du bois

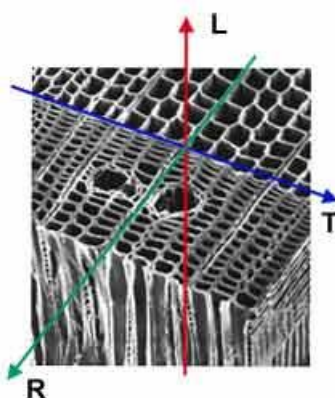


Figure 5 – Les trois orientations de la structure du bois (Observée au microscope)

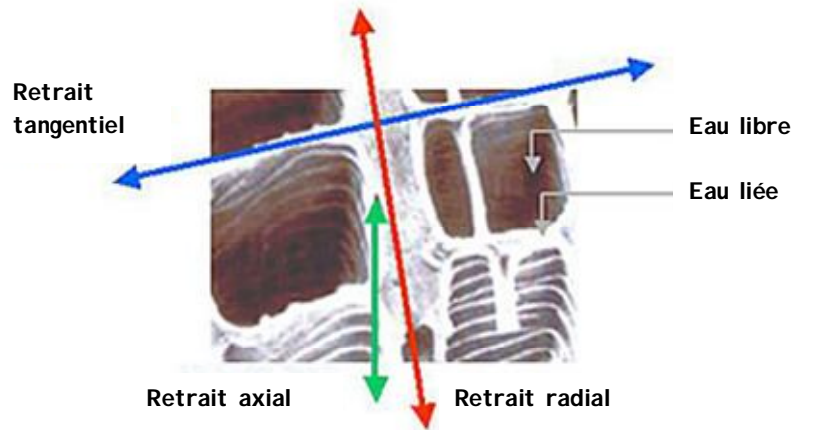


Figure 6 – Les trois orientations de la structure du bois
(Observée au microscope)

L'importance des variations dimensionnelles n'est pas la même suivant les espèces, mais est surtout variable suivant la direction considérée :

- le retrait longitudinal ou axial, variant de 0,1 à 0,3 % (négligeable) :

$$\Delta l = \frac{l - l_s}{l_s} 100\%$$

- le retrait radial, variant 3 à 6 % :

$$\Delta R = \frac{r - r_s}{r_s} 100\%$$

- le retrait tangentiel, variant de 7 à 12 % :

$$\Delta T = \frac{t - t_s}{t_s}$$

- l, r et t sont les dimensions des éprouvettes dans le sens longitudinal, radial et tangentiel avant séchage.
- l₀, r₀ et t₀ sont les dimensions des éprouvettes après séchage.

On peut distinguer la rétractabilité totale qui correspond à la variation de volume depuis le point de saturation jusqu'à l'état anhydre :

$$R_v = \frac{V - V_1}{V_1} 100\%$$

- V et V₁ sont respectivement les volumes de l'éprouvette avant et après séchage.

On peut aussi distinguer le coefficient de retrait total :

$$K_v = \frac{R_v}{H}$$

- H est le degré hygrométrique de l'éprouvette correspondant au point de saturation.

Tableau 2 – Coefficient de rétractabilité du bois

Bois	Coefficients de rétractabilité		Bois	Coefficients de rétractabilité	
acajou	0,180	0,200	Peuplier	0,085	0,243
Okoumé	0,096	0,169	Hêtre	0,175	0,340
Noyer	0,095	0,187	Sapin	0,140	0,310
Orme	0,110	0,254	Chêne	0,130	0,300
Frêne	0,210	0,360	Pin	0,136	0,340
Tilleul	0,110	0,400			

2.2. Propriétés mécaniques

Les essais mécaniques sont réalisés sur des éprouvettes en bois sans défauts séchées à l'air. Le bois est un matériau anisotrope, sa résistance mécanique varie selon la direction de l'effort appliqué (axial, tangentiel ou radial)

- Résistance dans la direction longitudinale : lorsque la direction de l'effort appliqué est, parallèle aux fibres (à l'axe longitudinale de l'arbre) soit perpendiculaire à la section transversale d'un tronc d'arbre
- Résistance dans la direction tangentielle : lorsque la direction de l'effort appliqué est parallèle aux rayons médullaires (cernes)
- Résistance dans la direction radiale : lorsque la direction de l'effort appliqué est perpendiculaire aux rayons médullaires (cernes)

2.2.1. Résistance à la compression :

L'essai de compression est réalisé sur une éprouvette prismatique de 30 mm de longueur, de largeur 20 et 20) mm d'épaisseur à une humidité de 15 % (figure 6)

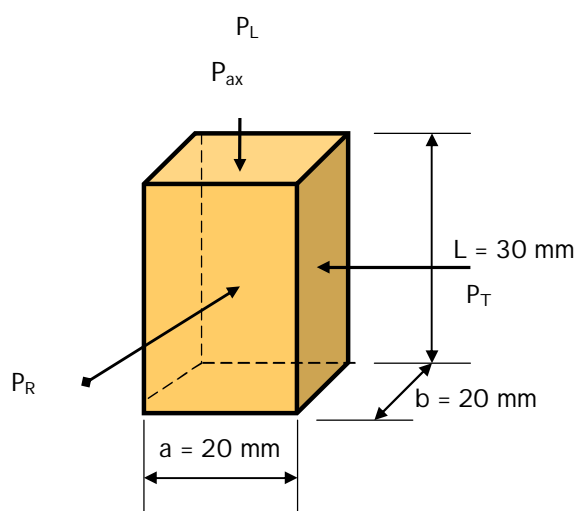


Figure 7 - Eprouvette pour essai de compression sur bois dans différentes directions

$$\sigma_c^{ax} = \frac{P}{a.b}, \quad \sigma_c^{tang} = \frac{P}{b.L}, \quad \sigma_c^{Rad} = \frac{P}{a.L}.$$

- σ_c : contrainte de compression axiale, tangentielle et radiale en MPa
- P : charge en N
- S : section de l'éprouvette en mm²

La résistance à la compression dans la direction axiale est la plus importante, elle varie en fonction des espèces de 30 à 80 MPa. La résistance à la compression dans la direction radiale varie de 4 à 25 MPa, alors que la résistance tangentielle varie de 7 à 15 MPa.

2.2.2. Résistance à la traction par flexion

L'essai de flexion est réalisé sur des éprouvettes prismatiques selon le schéma donné par la figure 8 : L'humidité de l'éprouvette pendant l'essai doit être égale à 15 %

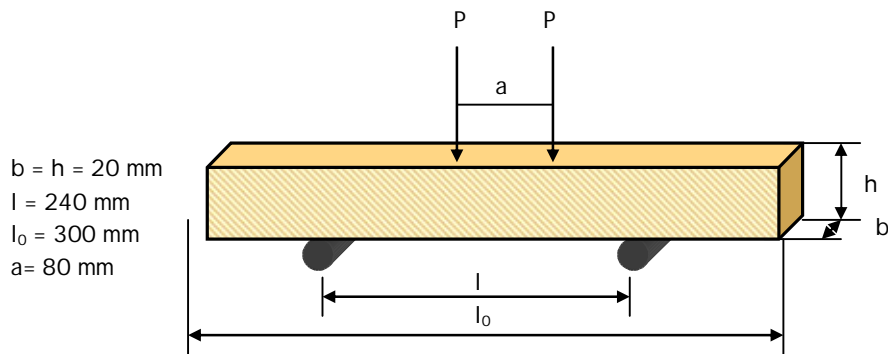


Figure 8 – essai de traction par flexion sur bois

$$\sigma_{tf} = \frac{3P(l-a)}{bh^2}$$

La résistance à la flexion du bois est une des caractéristiques les plus intéressantes, car elle est aussi élevée et même supérieure à la résistance en compression, elle varie de 50 à 100 MPa en fonction des espèces.

2.2.3. Résistance à la traction direct

L'essai de traction direct est réalisé sur une éprouvette de configuration et de dimensions données par la figure 8 :

$$\sigma_t = \frac{P}{S}, MPa$$

- P : Charge en N
- S = a x b : section en mm²

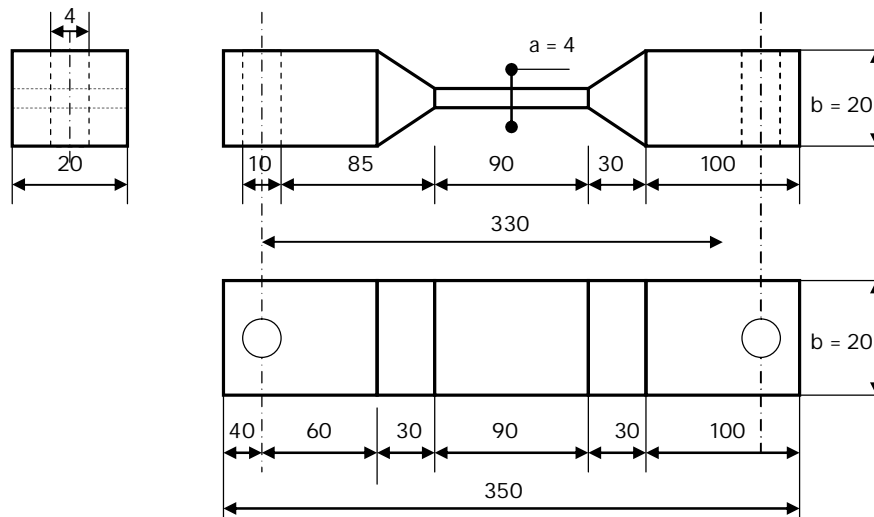


Figure 9 – essai de traction par flexion sur bois

Tableau 3 – Résistance mécanique de certaines essences de bois

Bois	Résistance mécanique en MPa		
	Compression	Traction directe	Traction par flexion
Bouleau	45	-	100
Hêtre	45	130	95
Chêne	50	130	95
Epicéa	40	120	75
Cèdre	35	78	65
Tilleul	40	120	70
Mélèze	50	130	100
Aune	40	-	70
Tremble	40	130	75
Sapin	35	110	65
Peuplier	35	110	60
Pin	45	110	80
Frêne	50	115	115

3. LE SECHAGE

3.1. Le séchage naturel

Afin d'éviter que le bois ne subisse des retraits après mise en oeuvre, ce qui pourrait entraîner des désordres notamment dans les assemblages, il est indispensable de le sécher avant tout usinage et utilisation en construction.

Ce séchage peut être réalisé naturellement en stockant le bois sous abri, en piles bien ventilées, avec séparation entre chaque rangée de planches et à une hauteur suffisante du sol.

Cette méthode a l'inconvénient d'immobiliser les stocks de bois pendant plusieurs mois, ce qui représente des frais financiers importants, de plus elle ne permet pas d'atteindre les taux d'hygrométrie exigés pour certaines applications : parquets, lamellé collé, etc.

3.2. Le séchage artificiel

Afin de pallier les inconvénients du séchage naturel, des méthodes de séchage artificiel ont été mises au point dans des cellules de séchage à plus ou moins haute température et dont le taux d'humidité de l'air ambiant est parfaitement maîtrisé.

Le séchage doit être conduit de façon à ce que l'eau enlevée par évaporation en surface soit remplacée au fur et à mesure par celle qui provient de l'intérieur des pièces de bois. Si l'évaporation est trop rapide, il se produit un glaçage de la surface, la cémentation, qui empêche la migration de l'eau vers l'extérieur.

Un écart trop important d'humidité entre les parties extérieure et intérieure d'une même pièce provoque, par suite des différences des retrait, des efforts internes et superficiels rendant le bois totalement ou partiellement inutilisable. On devra donc veiller à ne pas trop augmenter la vitesse d'évaporation. En général, on applique des températures plus basses au début qu'à la fin du séchage.

La conduite du séchage dépend notamment de l'essence du bois, de sa qualité, de son humidité initiale, de l'épaisseur des pièces... Ces caractéristiques devront être les mêmes pour l'ensemble d'un lot à sécher : il ne faut pas mélanger les essences et les épaisseurs. Les tables de séchage, établies pour les principales essences et épaisseurs, concernent la régulation de la température, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air selon l'humidité du bois pendant les différentes phases du séchage.

A titre indicatif, pour amener de 50 % à 12 % des sciages avivés de 27 mm d'épaisseur, il faut environ 20 jours pour du chêne et seulement 3 jours pour du sapin.

4. DEFAUTS DU BOIS

La qualité du bois dépend en premier lieu et avant toute autre caractéristique numérique de son aspect et des défauts qu'il présente. Les défauts du bois peuvent être naturels (défauts de structure) ou des altérations dues aux attaques par les parasites végétaux (champignons) et les insectes.

Les défauts peuvent apparaître pendant la croissance de l'arbre ou après son abattage (pendant le transport, le stockage ou l'exploitation). Les défauts du bois peuvent être classés en deux catégories, selon la cause de leur apparition :

- Défauts de structure (d'origine végétative),
- Altérations du bois

4.1. Défauts de structure

- **Nœud**

- Définition: Traces de la naissance d'une branche vivante ou morte, ayant produit une déviation locale des fibres.

cause : naturelle

- Conséquences: hétérogénéité de la texture du bois, fibres courbes, perte de résistance en traction, travail du bois difficile

- a - Nœud de sciage**

Provenant de la taille de branchages latéraux qui se sont développés dans le jeune âge de la plante.

- b - Nœud d'excroissance**

Nœud provenant d'un branchage additionnel, c'est à dire né du développement d'un bourgeon (tumeur) dormant.

- c - Nœud gouttière**

Résultant d'une rupture accidentelle d'une branche,

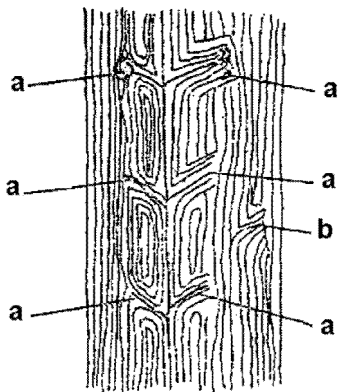


Figure 10 - Nœud de sciage et Nœud d'excroissance

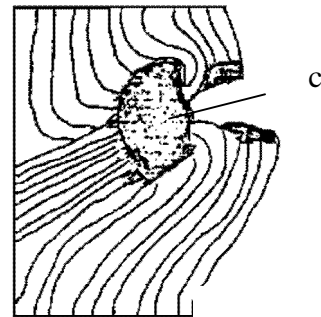


Figure 11 – Nœud gouttière

- **Gélivure**

- Définition: Fente (fissure) longitudinale plus ou moins profonde partant de la périphérie suivant un plan radial vers le centre de l'arbre sur pied. Peut être simple ou multiple.

- Causes: Grands froids (gel) provoquant une contraction plus considérable des couches externes que des couches internes de la tige.

- Conséquences: Dévaluation variable suivant l'étendue, le nombre des fentes et l'altération plus ou moins profonde qui s'ensuit

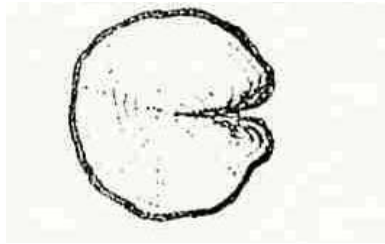


Figure 12 – La gélivure

- **Fils tors**

- Définition: Disposition des fibres en hélices plus ou moins inclinées par rapport à la direction longitudinale (axe) de l'arbre.
- Cause: Physiologique, croissance longitudinale trop vive des cellules périphériques après l'arrêt de la croissance en longueur du centre de la tige.
- Conséquences: Bois lourd, compact, peu élastique,

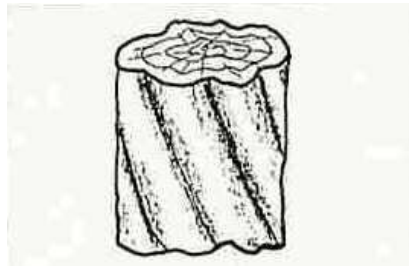


Figure 13 – Fibres torses

- **Entre – écorce (moelle double)**

Dans le régime du taillis on peut trouver des fourches résultant de la soudure par greffe naturelle de deux rejets ayant poussé sur la même souche. On verra alors en coupe transversale les deux cœurs et, dans la zone de soudure, des morceaux d'écorce qui sont restés englobés

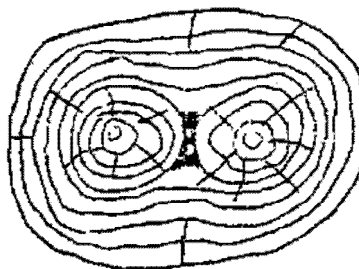


Figure 14 – Entre – écorce

- **Cadranure**

- Définition: Grosses fissures rayonnantes partant du coeur. La cadranure est souvent accompagnée d'un commencement de décomposition et est un stade avancé du coeur étoilé.

- Causes: Vieillesse de l'arbre. Mort et dessiccation des tissus centraux accompagnées de retrait et de fentes.

- Conséquences: En général, bois inutilisable, sauf comme bois de chauffage.

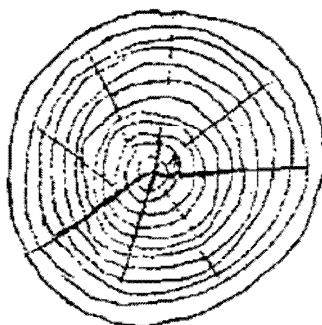


Figure 15 - Cadranures

- **Gerçure :**

Apparaît dans un bois abattu, c'est une fente de séchage (trop rapide)

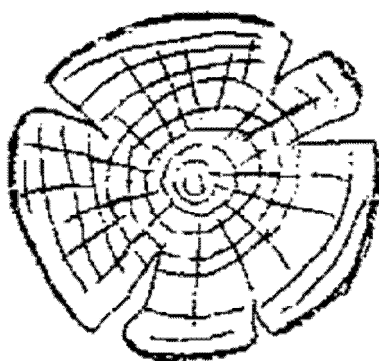


Figure 16 - Gerçures

- **Cœur étoilé**

- Définition: Cœur de l'arbre affecté de fentes radiales partant du centre. Se remarque sur des arbres de tout âge, à cœur sain.

- Causes: Chocs subis par l'arbre sur pied, nature du sol.

- Conséquences: dévalorise l'arbre

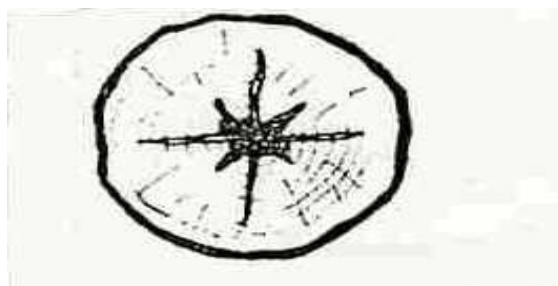


Figure 17 - Cœur étoilé

- **Fibres ondulées :**

Les fibres sont disposées suivant une ligne sinueuse (courbe) par rapport à l'axe de l'arbre.

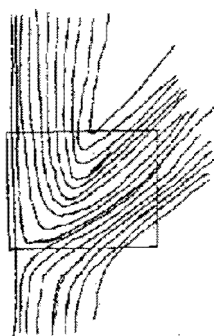


Figure 18 – Fibres ondulées

- **Roulure :**

- Définition: séparation de deux couches annuelles successives d'un arbre sur pied. Elle peut être totale (circulaire) ou partielle (en arc de cercle).

- Causes: Efforts mécaniques (vent) qui tendent à plier l'arbre dont les cernes sont d'épaisseur irrégulière. Peut également être une complication de la gélivure ou être provoquée par le dégel qui réchauffe et dilate plus rapidement la partie externe du tronc

- Conséquences : déchets considérables au débit. Généralement une cause de refus pour les grumes destinées au sciage, au tranchage et au déroulage.

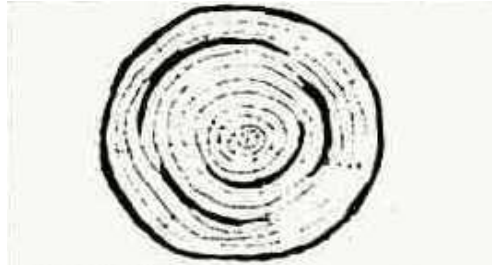


Figure 19 - Rou lure

- **Cicatrisation**

- Définition : Bourrelets d'écorce laissant apparaître ou non le bois.
- Causes : Morsures d'animaux. Frottements. Corps étrangers. Accident d'abattage.
- Conséquences : Les parties atteintes sont à éliminer au débit.

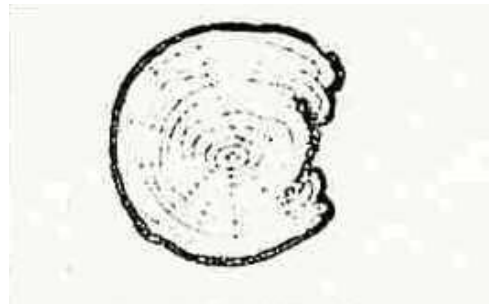


Figure 20 - Cicatrisation

- **Broussin**

- Définition : Excroissance d'aspérité hérissée. Fibres enchevêtrées en tous sens entourant de petites taches foncées.
- Causes : Tumeur végétale provenant d'une activité désordonnée du cambium après arrêt en cours de développement des bourgeons
- Conséquences : Employés uniquement en placage. (érable, thuya).

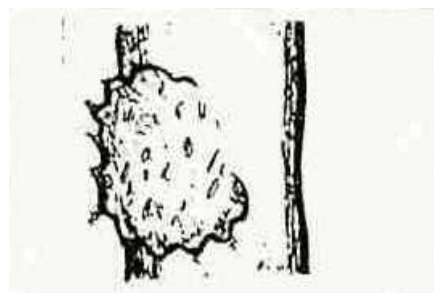


Figure 21 - Broussin

- **Loupes**

- Définition : Excroissance d'aspérité lisse. Bois d'aspect symétrique à l'intérieur
- Causes : Tumeur végétale provenant d'une activité désordonnée du cambium.

Morsures de rongeurs. Attaque d'insectes. Taille

- Conséquences : Employé uniquement en placage. (orme, frêne, érable

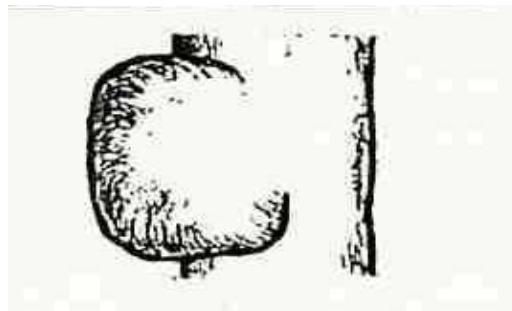


Figure 22 - Loupes

- **Lunure ou aubier double**

- Définition: Couche d'aubier à l'intérieur du bois parfait
- Causes: un grand froid peut modifier la transformation de l'aubier en bois parfait
- Conséquences: Bois défectueux. Mauvaise conservation.
- Signes extérieurs: Aucun sur les arbres debout. Sur section fraîche d'arbre abattu, la lunure se distingue du duramen par sa couleur pâle ou foncée par altération.

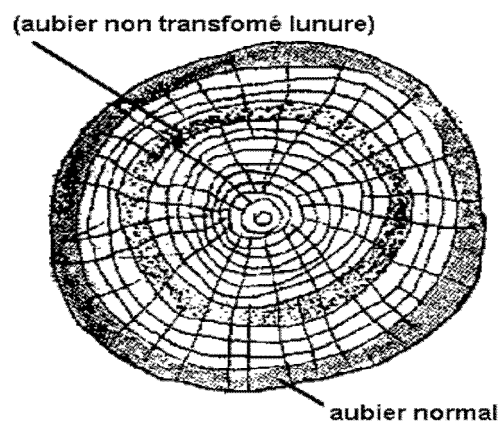


Figure 23 - Lunure ou aubier double

4.2. Altérations du bois

L'altération du bois peut être provoquée par les champignons et les insectes.

4.2.1. La pourriture :

La pourriture du bois est une transformation biologique qui se manifeste par la décomposition du bois par les champignons. Les champignons attaquent le principal constituant du bois qui est la cellulose et la transforme en glucose. Le glucose est une substance soluble dans l'eau et constitue une source d'alimentation des champignons et favorise leur croissance.

Le développement des champignons est favorisé par les conditions climatiques :

- L'humidité : correspondant à l'état de saturation du bois (30 %). Un bois dont l'humidité est inférieure à 20 % ne pourrit, un bois immergé sous l'eau peut se conserver très longtemps à cause de l'absence de l'oxygène.

- La température : de 25 à 35 °C, domaine favorable de fructifications des champignons. Le bois ne pourrit en période de gel car les champignons ne peuvent se développer qu'à une température supérieure à 0 °C..

- La lumière est un facteur d'apparition des fructifications

- L'atmosphère : l'oxygène est nécessaire pour la vie des champignons.

Certains champignons ne peuvent se développer que sur le bois sur pied, alors que d'autres fructifient sur le bois en grumes (bois débité), et enfin la dernière catégorie de champignons peut se développer aussi bien sur le bois sur pied ou débité.

L'effet destructeur des champignons commencent souvent dans le bois sur pied et se poursuit dans le bois débité. Le bois attaqué change d'abord de couleur, devient friable et se vide et se remplit de fentes et finit par perdre ses propriétés physiques et mécaniques et se détruit.

Parmi les champignons qui attaquent le bois sur pied et se développent sur le bois débité, on peut citer :

- les moisissures blanche et brune du hêtre
- blanche des feuillis.

Les champignons qui se développent et qu'on rencontre le plus souvent dans le bois construit et qui sont les plus dangereux sont appelés champignons de maison (champignons blancs des maisons). Un bois sec est un bois inattaquable par les champignons.

4.2.2. Vermoulure

Les vermoulures sont des altérations causées par les insectes, fentes de formes circulaires ou ovales de profondeurs variables (figure 10). Le bois fraîchement abattu est plus

vulnérable aux attaques des insectes que les bois sur pied desséchés et affaiblis. Dans certains cas les insectes attaquent même les bois sains pendant la croissance.

Les insectes déposent souvent des spores de champignons qui provoquent la putréfaction du bois.



Figure 24 - Bois mangé par des fourmis

Tableau 5 – Les altérations physiologiques

Altérations physiologique et biologique du bois	Définition – Causes et Conséquences
Baïonnette	Définition: Déviation de la tige Cause : attaque du bourgeon terminal par un insecte Conséquence : la partie déviée est inutilisable sauf comme bois de chauffage.
Bleuissement	Définition: Coloration bleue de l'aubier des résineux et de certains feuillus. Causes: Provoqué par des champignons Conséquences: Le bois bleui peut être admis pour tous les emplois abrités où les conditions d'aspect sont sans importance, toutefois ce bois serait plus sensible à des altérations ultérieures.
Faux coeur	Définition: Coloration plus ou moins prononcée et généralement de forme irrégulière de certaines parties du bois. Causes: Modification chimique du bois, consécutive à l'influence de grands froids, à celle de champignons plus ou moins actifs ou simple manifestation de vieillissement. Conséquences: Variables avec les essences et les causes..
Maladie du pleurote	Définition: Affaîssement de l'écorce suivant certaines génératrices. Causes : Due à certains champignons (pleurotus) tuant le cambium suivant des bandes dirigées de bas en haut. Entre ces bandes, l'accroissement se poursuit, ce qui produit des tiges profondément creusées. Conséquences: Pertes au débit.
Piqûres	Définition: Galeries de petit diamètre

vermoulures	causes : action des larves d'insectes variés, Conséquences : perte de résistance mécanique, facilement putréfiable.
pourritures blanches, rouges, brunes	Définition: Altération de l'un ou de l'autre ou de tous les éléments constitutifs du bois entraînant une modification profonde de sa composition chimique, qu'il s'agisse de bois sur pied, en grume, débité ou mis en oeuvre,. Il y a changement de consistance et de coloration; lorsque la cellulose est d'abord consommée, on a des pourritures brunes et rouges; si la lignine disparaît d'abord on aura une pourriture blanche. Causes : action de champignons parasites et de bactéries Conséquences: détérioration du bois.

5. PROTECTION DU BOIS

Il est possible de protéger le bois des altérations causées par les champignons et les insectes.

Il s'agit d'appliquer un traitement préventif qui contient une base insecticide et fongicide. Ce traitement se fait principalement par trempage (immersion dans un bac contenant le produit). Le traitement préventif est inutile en principe si les bois utilisés sont secs. En effet, les insectes (et les champignons) s'attaquent principalement à des bois au dessus de 20 % d'humidité.

Mais il est vrai que l'on traitera souvent la structure portante de la maison, même si le bois utilisé est durable, car on ne sait jamais, rares sont les bois qui peuvent véritablement résister à tous les insectes existants...

Certains produits comme les huiles et le bitume sont utilisés depuis toujours pour protéger le bois. D'autres produits naturels ont fait leur apparition

5.1. Les produits utilisés

- **Les huiles**

L'huile en général est le traitement de surface le plus simple, plus économique et le plus écologique. Elle protège le bois de l'eau en jouant le rôle de bouche-pores. Elle imprègne le bois, est non filmogène, et laisse passer la vapeur d'eau, ce qui permet au bois de sécher s'il a été accidentellement humidifié, mais avec une moindre résistance, en particulier en présence de sollicitations mécaniques. L'huile de lin est une protection naturelle utilisée depuis longtemps pour protéger tous les bois, intérieurs comme extérieurs sous abri.

L'huile dure protège le bois de revêtements de sols tout en le laissant respirer, et a une certaine résistance aux sollicitations mécaniques

- **Le bitume**

L'asphalte naturel est utilisé depuis longtemps comme protection des piquets de clôtures et des bateaux, les utilisations de bois les plus difficiles car les zones situées entre l'air et l'eau sont le terrain privilégié des champignons.

- **Les peintures**

Les peintures filmogènes empêchent certes l'eau d'atteindre le bois lorsqu'elles sont en bon état, mais contribuent à créer les conditions de confinement propres au développement des champignons dès qu'elles présentent des imperfections. Les peintures acryliques ne pénètrent pas dans le bois et peuvent former des « cloques » où l'eau s'infiltre. Les peintures à l'huile restent plus longtemps adhérentes.

- **Les vernis**

Le vernis est une couche transparente épaisse, dure et filmogène. Il est utilisé pour la finition des parquets, les rendant insensibles aux taches. Mais le vernis empêche le bois de respirer, le rend inodore et froid.

- **Les sels**

Les sels sont généralement des antiseptiques. Les sels de bore et de fluore sont des poudres blanches que l'on dilue dans l'eau (inodore) pour en badigeonner le bois. Ils constituent une bonne protection intérieure contre les champignons, et répulsif contre les insectes. À l'extérieur ils sont lavés par la pluie et ne peuvent donc pas être utilisés.

D'autres sels sont connus et utilisés pour la préservation industrielle, comme les sels de cuivre, chrome, arsenic, etc., qui sont très dangereux et polluants. Ces produits peuvent être utilisés pour des applications industrielles uniquement, par exemple pour les traverses de chemin de fer et les poteaux télégraphiques, à cause de leur effet cancérigène.

5.2. Les traitements

- **Traitement thermique**

Le chauffage devrait améliorer la durabilité et la stabilité dimensionnelle des bois, sans apport de biocides. Par une thermolyse (chauffage à 150-200°C en milieu aqueux), un séchage conventionnel puis un deuxième passage dans un four, sec cette fois, cette technique fragmente l'hémicellulose en la liant à la lignine, elle-même aussi partiellement modifiée.

Ceci provoque l'apparition d'une structure réticulaire et rend ces composantes du bois moins reconnaissables, donc moins accessibles, aux champignons.

L'hémicellulose ne peut plus non plus attirer l'eau présente dans le milieu ambiant, et l'équilibre hygroscopique du bois ne dépassera plus les 17%. On se trouve donc en présence d'une matière qui n'est plus véritablement du bois, qui ne jouera plus de rôle régulateur d'humidité, mais, mis à part la dépense d'énergie pour les fours, cette méthode apparaît à première vue comme plutôt écologique, surtout pour des utilisations à haut risque comme l'extérieur.

- **Traitement aux antiseptiques**

Le traitement du bois aux antiseptiques peut être superficiel (par badigeonnage) ou en profondeur par imprégnation dans un bain (chaud et froid).

6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU BOIS

6.1.1. Les avantages

- **Matériau solide et léger**

L'épicéa pèse entre 430 et 470 kg/m³ lorsqu'il est sec à l'air il pèse soit cinq fois moins que le béton et dix-sept fois moins que l'acier. Une maison de deux étages et de 100m² au sol pèse 200 tonnes si elle est construite en matériaux durs, et seulement 70 tonnes en ossature bois! La résistance du bois par rapport à son poids le rend très attractif pour des réalisations légères. Le bois amortit les chocs.

Le bois est très résistant dans le sens longitudinal, en compression et en traction (il faudrait exercer une charge de 10 tonnes pour écraser un cube en bois de 5 cm d'arête)

- **Isolation thermique:**

Du fait de sa structure cellulaire, qui emprisonne de l'air sous forme de petits volumes, le bois est un matériau mauvais conducteur de la chaleur (figure 11). Cependant sa conductibilité thermique est très variable en fonction de son degré d'humidité, de sa densité et de l'essence considérée, ainsi que de l'orientation par rapport au fil du bois: il est meilleur conducteur dans le sens axial que dans le sens radial. On utilise couramment des panneaux agglomérés en particules de bois comme isolants thermiques.

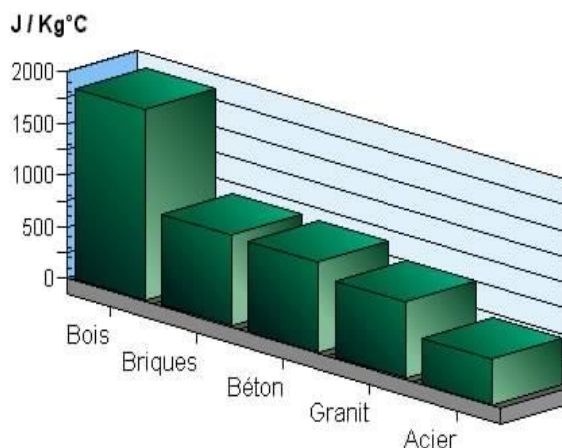


Figure 25 – Capacité d'absorption thermique

La conductivité thermique de l'épicéa, par exemple, est de $\lambda = 0.11 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, donc quinze fois plus faible que celle du béton et quatre cent fois plus faible que celle de l'acier. Dans les pays froids, le bois est très apprécié pour les qualités citées ci-dessus.

- **Facilité d'usinage et de mise en œuvre**

Le bois se prête facilement à l'usinage et à la préfabrication, à l'artisanat comme à l'industrie. Le système à ossature est très flexible, les bâtiments en bois sont faciles à transformer et à agrandir. Les méthodes d'assemblage sont nombreuses et s'adaptent à toutes les situations, du simple clouage au collage très performant, en passant par les broches, plaques, boulons, etc.

La préfabrication permet de raccourcir fortement la durée du chantier, mais la préfabrication en atelier, le recours à des équipes de montage polyvalentes représentent un véritable bouleversement des métiers du bâtiment et supposent une nouvelle forme d'organisation du chantier.

- **Matériau économique**

À qualités mécaniques égales et isolation thermique améliorée, les murs en bois sont de 15 à 20 cm moins épais que des parois en maçonnerie. Le gain de surface est évalué à 10% pour une maison individuelle.

L'avantage le plus important est la réduction possible des coûts de chauffage à long terme, favorisé par la réduction des ponts thermiques et la facilité de mise en œuvre d'une forte épaisseur d'isolant entre les montants de l'ossature.

- **Aspects écologiques**

Le bois est un matériau naturel, une matière première renouvelable. Il peut facilement être un matériau indigène car il est souvent disponible sur place.

L'arbre, pour pousser, absorbe du CO₂ et libère de l'oxygène. Lorsque l'arbre meurt, il subit une dégradation biologique par les insectes et les champignons. Cette dégradation utilise de l'oxygène et libère une quantité égale de CO₂ dans l'air que celle absorbée par l'arbre durant sa croissance. Le bilan est alors neutre. Par contre, si l'on coupe l'arbre à maturité et qu'on l'empêche de se dégrader en l'utilisant dans la construction, le gaz carbonique reste stocké. Il y a ainsi moins de CO₂ dans l'atmosphère et ceci contribue à réduire l'effet de serre.

L'utilisation du bois nécessite peu de matière et d'énergie, et ceci dans toutes les étapes d'une construction: la fabrication se fait naturellement, la transformation est faible, la mise en œuvre nécessite peu de produits annexes et reste généralement facile. La pollution des milieux physiques (air, sol, eau) est très faible, et les déchets peuvent parfois être recyclés dans d'autres constructions ou brûlés pour produire de l'énergie.

La consommation d'énergie grise pour la production de bois de construction (bois local, scié, raboté, prêt à l'emploi) est de 300kWh/tonne, contre 450 pour les maçonneries traditionnelles en terre cuite, 8000 pour l'acier, 250 à 300 pour le béton ordinaire (!), et de 100 à 1000 pour la pierre, selon le degré de finition.

- **Délai de réalisation des constructions**

Le délai de construction doit être considéré dans le calcul du coût d'une opération. Les systèmes constructifs à base de bois sont, de ce point de vue, très performants. Grâce à une forte valeur ajoutée en préfabrication, ils apportent des gains de temps importants. C'est le gros avantage de la filière dite « sèche » dont le bois fait partie.

6.1.2. Inconvénients

- **Résistance au feu**

Contrairement aux autres matériaux, le bois se suffit à lui-même pour satisfaire aux obligations de tenue au feu. En effet, pour améliorer la tenue au feu, il suffit d'augmenter son épaisseur sans avoir besoin d'une protection ou d'un dispositif supplémentaires.

Le bois est certes combustible mais il est plus résistant à l'incendie que d'autres matériaux de construction. La température d'ignition du bois (c'est-à-dire la température qu'il faut atteindre pour qu'il s'enflamme) est de 250°C pour la plupart des résineux et de 350°C pour les feuillus. Lorsque les armatures du béton armé se déforment et font basculer la structure, le bois ne brûle que de 0,7 mm par minute (4,2 cm par heure) et la couche

carbonisée forme une protection pour le cœur du bois. Dans cette couche, le flux de chaleur est réduit de plus de moitié. Le bois est mauvais conducteur de la chaleur, ne se dilate que peu. Qu'un incendie évolue à 500 ou 1200°C, le bois reste intact à partir d'un cm sous sa surface carbonisée, et la capacité portante de la section intacte reste préservée.

Lors d'un incendie, le bois ne produit pas de fumées toxiques, au contraire du PVC (ex : châssis) qui, en brûlant, dégage du cyanure. L'acier perd ses capacités porteuses à 450°C,

- **Anisotropie :**

Le bois est un matériau anisotrope ses résistances mécaniques et ses variations dimensionnelles (retrait et gonflement) sont différents selon le sens considéré (axial, radial ou tangentiel) ;

- **Hygroscopie :**

Le bois est un matériau hygroscopique, il absorbe l'eau lorsque son humidité est inférieure à celle du milieu et il en restitue lorsque son humidité est supérieure à celle du milieu. L'hygroscopie du bois entraîne des variations dimensionnelles, il se rétracte au séchage et gonfle en s'humidifiant. Ces différentes déformations en fonction du sens envisagé peuvent causer des tensions dans le bois. Les bois de section réduite vont gauchir, tandis que les bois de forte section (poutres, bois ronds) risquent de se fendre lors d'un séchage

- **Isolation phonique :**

Le bois est un piètre isolant phonique. Il ne peut opposer de masse importante à la transmission des bruits aériens. On corrige ce défaut en ajoutant des matériaux isolants dans la composition de la paroi. Néanmoins, le bois absorbe les sons et il est utilisé pour répondre aux exigences des salles de concert.

- **Le bois est biodégradable**

Le bois non protégé est, par un processus naturel, dégradé par les insectes, les champignons, le vent, la sécheresse, le soleil. L'action de l'eau sur le bois est double :

- par les cycles répétés d'humidification et de séchage le bois se déforme (on dit qu le bois gauchit)

- Une humidité favorable (> 20 %) constitue un terrain favorable de développement et de prolifération des champignons.

- **Entretien**

En général, l'entretien des ouvrages à base de bois nécessite une fréquence d'interventions plus importante.

- **Action de l'humidité**

En ambiance humide, il absorbera de l'eau et se gonflera. En ambiance sèche, il perdra de l'eau et se rétractera.

- **Limites techniques de l'utilisation du bois dans les constructions**

Comme tout matériau de construction, le bois connaît des limites techniques l'utilisation dans la construction. Celles-ci se situent dans la combinaison d'exigences réglementaires et des coûts qui en découlent. Pour des immeubles d'habitation, pour des raisons économiques liées à la sécurité incendie, le nombre d'étage est limité à R + 3 ou R + 4 (rez-de-chaussée plus trois ou quatre étages).

- **Coût d'une construction en bois :**

Lors de la construction, le bois ne s'avère pas toujours moins cher que les matériaux traditionnels, notamment parce que les intervenants sont très nombreux (bûcheron, débardeur, transporteur, sécheur, stockeur, scieur, grossiste, détaillant, charpentier), prenant chacun leur bénéfice, et parce que les spécialistes sont encore difficiles à trouver.

7. TRANSFORMATION DU BOIS

Le bois est un matériau que les industries de première transformation modifient sous de multiples formes: bois sciés, lamellés collés, panneaux, pièces aboutées (assemblées) (figures 12 et 13). Comme matériau, le bois s'emploie soit directement comme matière première pour la fabrication d'éléments de menuiserie, de meubles, d'emballages, de papier - soit pour la réalisation de matériaux dérivés tels que les panneaux de particules et contreplaqués.

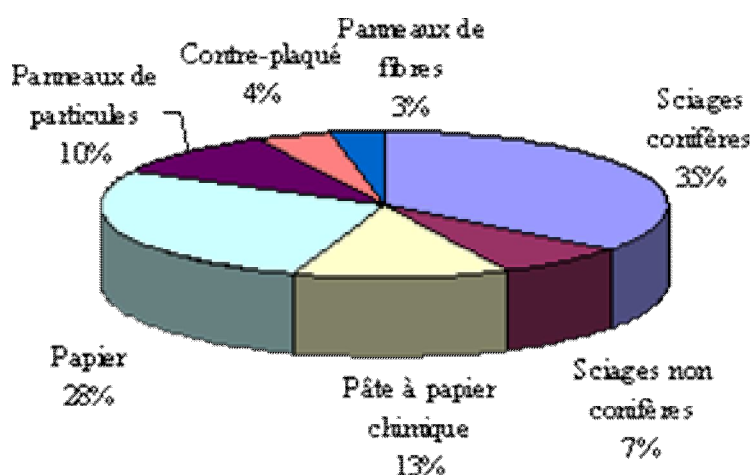


Figure 26 – Divers utilisations du bois

Le schéma suivant présente de manière synthétique les différents emplois du bois.

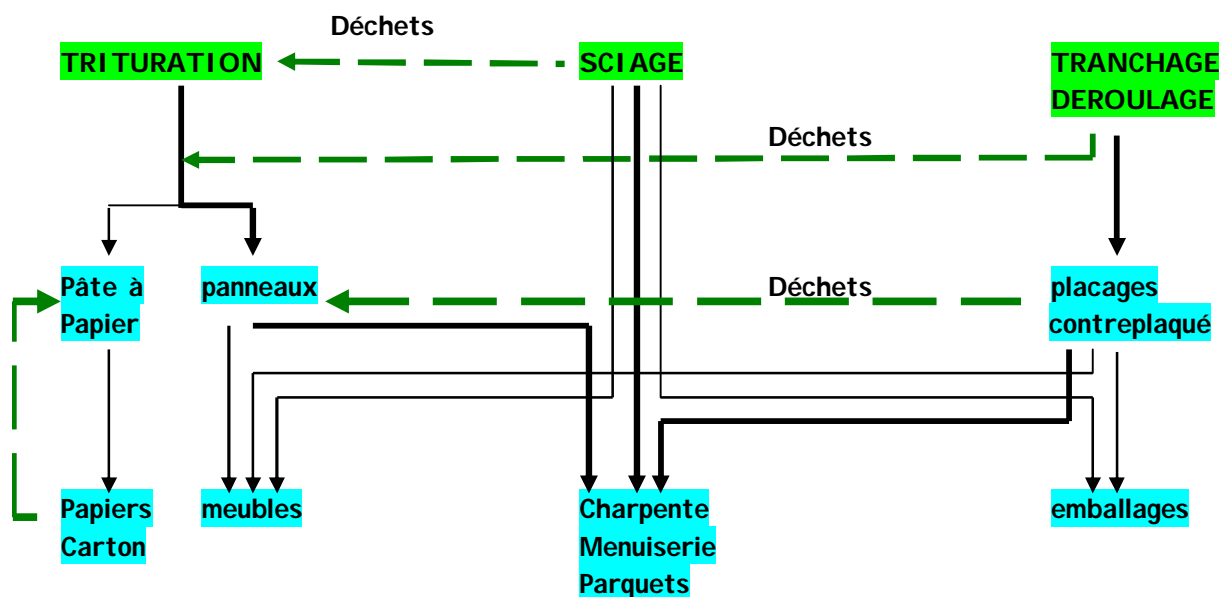


Figure 27 – Transformation du bois

7.1. Le bois de trituration

Aux usages traditionnels du bois, se sont ajoutés les débouchés que permet la chimie du bois, notamment dans le domaine des papiers.

Les débouchés finaux de cette industrie peuvent être regroupés dans deux grandes catégories qui sont les emballages et le papier d'imprimerie..

Le recyclage est particulièrement développé dans ce secteur. Pour ne citer qu'un exemple, en France le ratio des produits recyclés sur le total de pâte à papier utilisée est de l'ordre de 60% environ.

7.2. Les sciages

Ils constituent l'étape préalable à toutes activités de la filière bois sauf celle du bois de chauffage (figure 14).

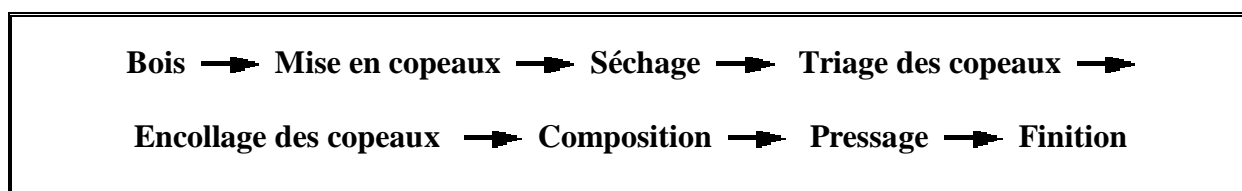
**Photo 1 - Bois rond****Figure Photo 2 - Bois scié (les sciages)**

Les sciages sont des grumes (tout bois abattu, non écorcé, mais ébranché, propre à fournir du bois d'oeuvre) qui ont été calibrées, puis découpées à des dimensions pouvant être employées dans les industries de transformation. Ces dimensions peuvent être soit standardisées, soit spécifique à une commande (figure 15).

7.3. Les panneaux de particules

Pour éviter les problèmes liés aux propriétés mécaniques particulières du bois, dues en particulier à sa structure anisotrope, on a recours à des matériaux dérivés dont les plus connus sont les agglomérés, les contreplaqués et les lamellés-collés.

Le processus de production des panneaux de particules (figure 16)

**Figure 28 - Processus de production des panneaux de particules**

Les agglomérés ou panneaux de particules sont formés de particules de bois pressées avec de la colle. Le sens des particules étant aléatoire, les propriétés mécaniques sont les mêmes dans toutes les directions mais la résistance à la cassure est faible. Par contre, ces panneaux sont de bons isolants (figure 17)



a - Aggloméré

b - multiplié

c - massif

Photos 3 – Les panneaux de bois

- panneau aggloméré appelé aussi M.D.F (Medium density fiber board, fibres de bois à densité moyenne)
- panneau aggloméré mélaminé (formule brute de la mélamine $C_3H_6N_6$)
- panneau multiplié appelé aussi OSB (Oriented strand board, panneau à lamelles orientées)
- panneau en bois massif

7.4. Les contreplaqués :

Les contreplaqués sont constitués de fines feuilles de bois découpées dans le sens tangentiel, par déroulage d'une bille de bois ou par tranchage. Ces feuilles très fines sont fragiles.

7.4.1. Fabrication des contreplaqués

La fabrication de contreplaqué comporte les phases suivantes

- Étuvage : Les grumes sont étuvées à la vapeur pour ramollir le bois et le rendre momentanément apte au déroulage.
- Déroulage : Les billes tournent parallèlement contre un couteau qui déroule la bille en un ruban continu de 1 à 3 mètres de largeur. (c'est un système comparable au "taille crayon") (figure 18)

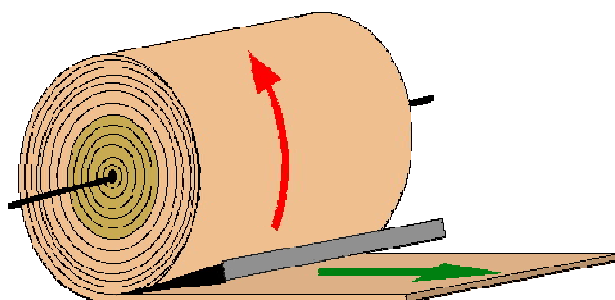


Figure 29 – Déroulage des grumes

- Massicotage (tranchage) : Le ruban de bois déroulé est ensuite massicoté pour être découpé aux dimensions requises par la fabrication.
- Séchage : Le séchage a pour but de ramener la teneur en eau des feuilles dans des limites les rendant aptes à subir le collage.
- Encollage : Les feuilles de placages sont enduites de colle.

7.4.2. Composition des panneaux

C'est à ce stade que les panneaux sont composés par un empilage de placages ("plis") (figure 19)



Deux portions de feuilles tangentielle obtenues placées selon des directions perpendiculaires..



Empilement des portions de feuilles



Forme finale du contreplaqué
Les cinq feuilles sont ensuite encollées et pressées pour donner une planche d'épaisseur régulière

Photos 4 - Construction schématique d'un contreplaqué à 5 feuilles.

- Pressage: Le gâteau ainsi réalisé est introduit dans la presse. Cet appareil exerce une pression pendant un temps et une température variables en fonction de la nature de la colle et de l'épaisseur des panneaux.
- Equarrissage et finition : Les bords des panneaux bruts sont affranchis, mis à dimension puis sont poncés. Certains panneaux subissent d'autres opérations telles que : usinage des faces façon lambris, traitement autoclave, filmage pour le coffrage du béton ou pour peindre, etc.

La feuille du milieu, plus épaisse et de bois souvent tendre, est appelée l'âme. Elle est encadrée par deux feuilles disposées perpendiculairement puis par deux autres feuilles disposées perpendiculairement par rapport aux précédentes.

La planche obtenue est remarquablement résistante. Ses propriétés mécaniques sont les mêmes dans toutes les directions. Selon les usages, on peut fabriquer des contreplaqués d'épaisseurs différentes comportant un nombre de feuillets variés (en nombre impair). Selon la qualité de la colle elle-même, il est possible de réaliser des matériaux résistants à certaines expositions (exemple : contreplaqué "marine")

- **Les lamellés-collés**

Le but de cette technique est de reconstituer de grosses pièces à partir de lamelles de bois de dimensions relativement réduites en comparaison à celles de la pièce (figure 20). Elles sont collées ensemble de manière à ce que leurs fils soient parallèles. C'est un matériau intéressant car il permet notamment de réaliser des arches très solides par pliage.

Le lamellé collé est très adapté aux ouvrages de grande portée (gymnases, piscines, salles de spectacles, etc.) et apporte une grande souplesse architecturale (poutres droites, éléments courbes, etc.).

Les lamellés collés sont réalisés sur un principe proche de celui qui permet la réalisation de planches larges à partir d'éléments associés par entailles et rainures) (exemple des planchers et des charpente). La différence est que les petites lamelles sont emboutées pour réaliser des structures longitudinales rigides qui sont ensuite collées parallèlement.

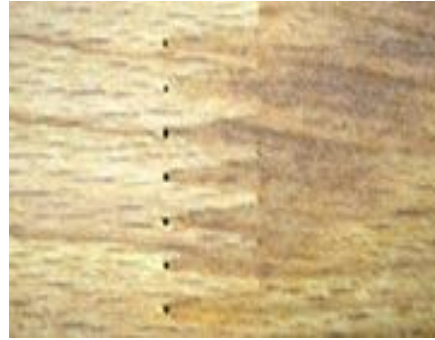
Cette technique permet de réaliser des planches mais peut être utilisée pour construire des éléments de formes beaucoup plus complexes. Elle permet aujourd'hui de développer des conceptions très remarquables dans les charpentes et l'architecture.

Le lamellé-collé permet de réaliser des planches de très grande taille, résistantes et indéformables.

Les différentes règles parfaitement calibrées sont ensuite collées parallèlement sous pression



Vue de surface : On distingue les courtes lamelles associées longitudinalement puis collées parallèlement.



Les petites lamelles sont embouties et collées à l'aide d'un procédé proche de celui classique des tenons et mortaises pour réaliser une longue règle rigide.

Photos 5 - Planches en lamellé-collé de hêtre.

On note que l'orientation du bois est différente dans chaque lamelle, ce qui permet de donner à la planche une résistance égale dans toutes les directions de l'espace. Notons de plus l'importance de la qualité de la colle utilisée (figure 21).



Photos 6 - Planche en lamellé-collé de hêtre.

- **Les placages**

Peuvent être séparés en deux sous-groupes : les planches de placage et les copeaux. La première catégorie est toujours utilisée dans le but d'embellir une surface, alors que la seconde est davantage employée dans la fabrication de panneaux destinés à une variété très large d'applications. Les planches de placage peuvent être découpées dans des épaisseurs très fines (à partir de 0,25mm). Le processus de production des placages est donné par la figure 22

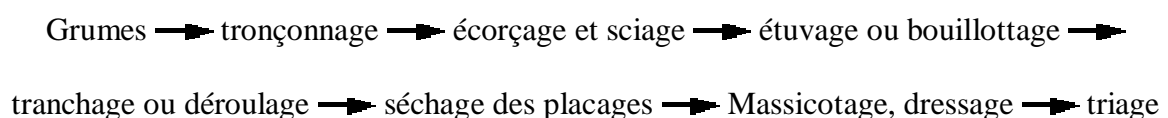


Figure 30 - processus de production des placages

8. NOMENCLATURE DES PRODUITS EN BOIS

Le bois est un matériau qui s'intègre sous différentes formes dans la quasi-totalité des typologies d'ouvrages. Toutefois, des performances spécifiques à certains composants ou matériaux sont valorisés de façon significative dans certains types d'ouvrages :

- les profils structuraux composites
- les charpentes
- les parois composites à ossature en bois
- les revêtements de sols en bois
- les parements intérieurs ou extérieurs,
- les équipements extérieurs (signalétique, glissières de sécurité)

- **Elément porteur**

Le bois peut être utilisé en structures porteuses sur tous les types de parois en construction :

- en planchers
- en toitures-terrasses ;
- en parois extérieures et intérieures ;
- en charpente.

- **Elément de parement**

Le bois peut être utilisé pour assurer une fonction de parement, en intérieur comme en extérieur :

- en revêtements de sols (parquets, revêtements de sols stratifiés) ;
- en revêtements muraux (bardages, lambris) ;
- en revêtements de plafonds.

- **Équipements dans les constructions**

Le bois occupe une place prépondérante dans plusieurs équipements de construction :

- menuiseries extérieures (portes, fenêtres) ;
- portes intérieures ;
- escaliers ;
- plinthes ;
- profils décoratifs.

CHAPITRE 2

LE VERRE

1. INTRODUCTION

1. COMPOSITION DES VERRES

- 1.1. L'oxyde formateur
- 1.2. Les modificateurs
- 1.3. Les colorants

2. STRUCTURE DU VERRE

3. FABRICATION DU VERRE

- 3.1. La fusion
- 3.2. L'affinage
- 3.3. Trempe du verre
 - 3.3.1. La trempe thermique
 - 3.3.2. La trempe chimique

4. TYPE DE VERRE

- 4.1. Verre imprimé
- 4.2. Verre armé
- 4.3. Verre profilé

5. PROPRIETES DES VERRES

6. LA FIBRE DE VERRE

- 6.1. Procédé de fabrication
- 6.2. Utilisations

CHAPITRE 2 - LE VERRE

INTRODUCTION

Le verre est un matériau solide transparent, translucide, opaque ou coloré, obtenue par fusion à haute température, d'un mélange composée principalement de silice comme constituant formateur, à laquelle on ajoute d'autres oxydes pour améliorer certaines propriétés.

1. COMPOSITION DES VERRES

La composition des verres dépend des propriétés recherchées et du mode de fabrication. Les verres de silicates auxquels se rapportent les verres utilisés dans le bâtiment sont composés d'oxydes formateurs, modificateurs, fondants, stabilisants et colorants.

1.1. L'oxyde formateur

- **La silice**

L'ingrédient de base est La silice (dioxyde de silicium SiO_2 qui représente environ 70% de la masse Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C . Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant.

1. 2. Les modificateurs

- **L'anhydride borique** (le bore ou borax anhydre B_2O_3) :

Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à 2300°C . Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex).

- **L'anhydride phosphorique** (le phosphore P_2O_5) :

Employé dans le domaine de l'optique.

1.3. Les fondants (oxydes alcalins) :

La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé (1730°C). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à 1400°C (économie d'énergie) et on

facilite les possibilités de travail. Les fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement. Un même verre peut associer plusieurs fondants : soude et chaux (verre sodocalcique), soude et plomb (cristal).

- **L'oxyde de sodium** (la soude Na_2O) :

Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes marines (ex : la salicorne) ou de nitre (grec = nitron). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage.

- **L'oxyde de potassium** (K_2O) :

Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes terrestres comme la fougère ; aujourd'hui, on utilise du salpêtre (nitrate de potassium KNO_3). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, mais il diminue sa résistance chimique. Il avantage le soufflage du verre car il augmente le temps de travail lors du façonnage.

- **L'oxyde de magnésium** (MgO) :

Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium+magnésium). Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf le verre flotté, le verre à vitre et en gobeletterie. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques.

1.4. Les stabilisants (oxydes alcalino-terreux) :

L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) a provoqué la rupture d'une liaison Si - O et l'apparition d'un oxygène "non pontant". Ceci a pour effet de fragiliser le réseau et d'augmenter la solubilité à l'eau.

- **L'oxyde de calcium** (CaO) :

Il se trouve sous forme de chaux (qui est le stabilisant le plus employé) ou de dolomie (lorsque le verre doit contenir de la magnésie). Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa solubilité, mais en excès il provoque une dévitrification. Il était utilisé au moyen âge pour les verres sodiques.

- **L'oxyde de zinc** (ZnO) :

Il augmente l'éclat et l'élasticité.

- **L'oxyde de fer** (Fe_2O_3) :

C'est un stabilisant et un colorant, souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre.

Il faut donc procéder à une décoloration de cette teinte. Pour cela, on peut ajouter du bioxyde de manganèse (MnO_2) (savon des verriers).

• **L'oxyde de plomb (PbO) :**

Il entre dans la composition du cristal. Il abaisse également le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler.

1.5. Les colorants :

Les verres sont le plus souvent teintés dans la masse ; cela signifie que l'on ajoute des oxydes métalliques tels que l'oxyde de cuivre, de fer, de chrome, de cobalt, pendant la fusion. Ils entrent en très faible proportion du mélange (ex : oxyde de cuivre pour du vert). La coloration dans la masse est due à la présence dans le verre d'ions de métaux de transition.

- Bleu → oxyde de cobalt.
- Jaune → chrome, argent.
- Rouge → oxyde de cuivre.
- Violet → oxyde de manganèse.
- Rose et rouge rubis → l'or.
- Jaune orangé à rouge → le sélénium

Tableau 1 - Exemple de composition des verres les plus courants

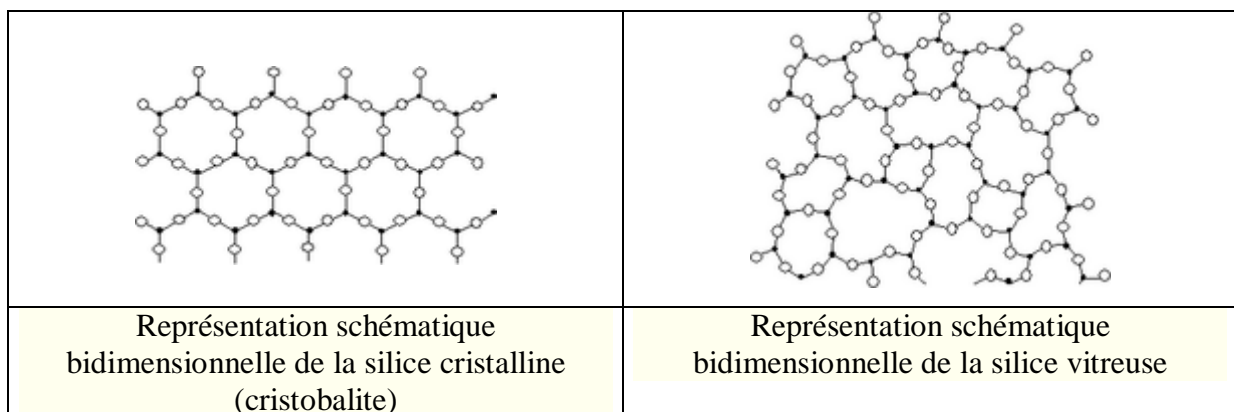
Composants	Types de verres			
	Silico-sodo-calcique	céramique	borosilicate	Au plomb
SiO_2	71	71	71	71
Na_2O	14			
CaO	10			
Al_2O_3		14		
Li_2O_3		10		
B_2O_3			14	
Pb_2O_3				14
Autres	5	5	10	10
	Application courante - bâtiment - transport - mobilier - décoration	Dilatation nulle - table de cuisson - protection incendie ...	Faible coefficient de dilatation - verrerie de laboratoire - verrerie culinaire ...	Protection - rayons X, - rayonnement nucléaire

2. STRUCTURE DU VERRE

Le verre est une substance amorphe (non cristalline), l'augmentation de la viscosité au cours du refroidissement lui confère les propriétés d'un corps rigide sans qu'il y ait cristallisation. Les molécules sont disposées de manière désordonnée, mais avec suffisamment de cohésion pour offrir les propriétés d'un solide. Si on le réchauffe suffisamment, il peut reprendre une forme liquide. En général transparent, le verre peut également être translucide ou opaque. Sa couleur varie selon sa composition.

- **L'état amorphe**

Le verre est un matériau amorphe, c'est-à-dire non cristallin. De ce fait, il présente un désordre structural important. Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance (Figure 1). Un verre peut même être vu comme un "réseau" tridimensionnel, semblable à celui d'un cristal, mais dans lequel seul l'ordre à courte distance est conservé. Comparons, par exemple, la structure de la silice (SiO_2) cristalline (sous sa forme cristobalite) et celle de la silice (SiO_2) vitreuse.



Figures 1 – Structure du verre de silice

- **La viscosité**

La viscosité est une qualité qui permet d'opposer une résistance à l'écoulement de la matière sur une surface donnée ; c'est le cas du verre lorsqu'il est chauffé entre 1000 et 1400°C. Les molécules sont liées ensemble et possèdent un degré de liberté pour se déplacer les uns par rapport aux autres : ceci s'appelle la viscosité. A savoir que le verre même fortement chauffé n'est jamais fluide, il devient progressivement malléable, puis de 1000° à 1400°C, il devient visqueux (consistance du miel). Dans le sens inverse, en se refroidissant, la matière est de moins en moins visqueuse, elle redevient plastique, (on peut la déformer car elle est encore déformable) puis elle redevient finalement solide et rigide. Le verre peut donc

être qualifié de liquide figé (solide non cristallisé) obtenu après figement d'une matière surfondue dont la viscosité est extrêmement élevée.

3. FABRICATION DU VERRE

3.1. La fusion

Toutes les matières premières (mélange vitrifiable) sont dosées et concassées de manière à obtenir une granulométrie fine, comprise entre 0,1 et 0,6 mm. On ajoute généralement au mélange des déchets de verre, appelés calcin ou groisil, afin d'accélérer le processus de fusion. Le mélange homogénéisé est porté à l'état de fusion, entre 1 300 et 1 500 °C.

3.2. L'affinage

Le verre fondu est alors débarrassé des bulles gazeuses, homogénéisé dans la zone d'affinage vers 1350 °C et progressivement refroidi jusqu'à 1000 °C environ.

Le verre liquide coule dans un four contenant de l'étain en fusion de grande pureté (figure 2) .

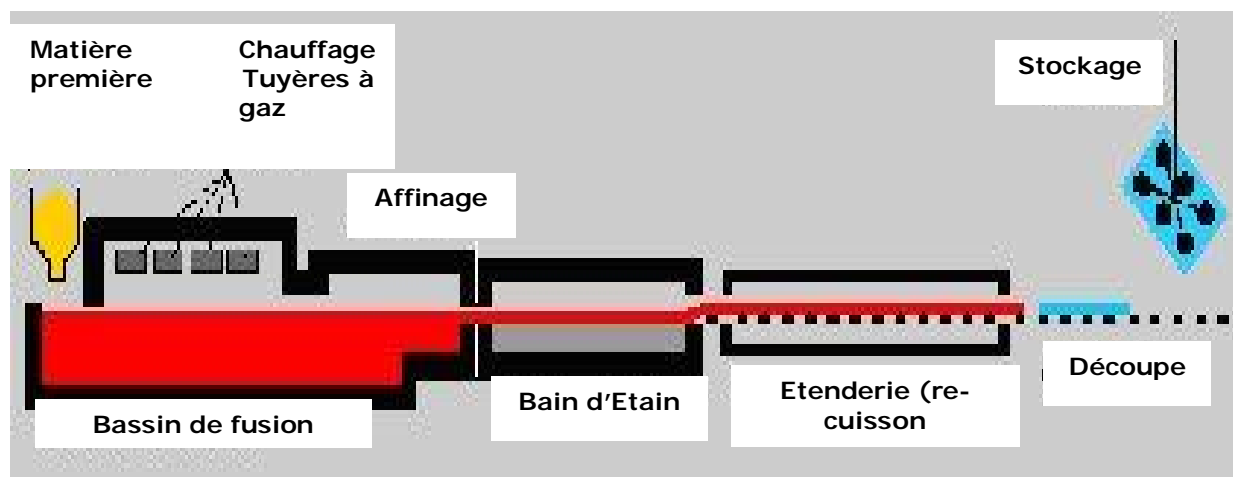


Figure 2 – Procédé de fabrication du verre

Le verre moins dense que l'étain « flotte » sur celui-ci et forme un ruban dont l'épaisseur naturelle est de l'ordre de 6 mm. Des dispositifs annexes permettent de limiter ou d'accélérer l'étalement de ce ruban de verre afin d'en maîtriser l'épaisseur et le parallélisme des faces. Le polissage est dû, pour la face supérieure, à l'action du feu et pour la face inférieure, au contact verre métal en fusion.

A la sortie du bain d'étain le verre est à une température de l'ordre de 620 °C. Il est alors suffisamment rigide pour être transporté sur des rouleaux et introduit en continu dans un tunnel de re-cuisson appelé « étenderie » dans laquelle sa température s'abaisse

progressivement vers 250 °C. Pendant ce refroidissement lent le verre a été libéré de toutes les contraintes internes qui empêcheraient son exploitation future.

Après la fusion et l'affinage, le verre est refroidi à une extrémité de la cuve. On ajuste ainsi la viscosité du matériau, qui peut alors être mis en forme (généralement entre 800 et 1200 °C). Il existe différents modes de façonnage : le soufflage, le presse-souffle, l'étirage ou encore le laminage. Tous ces procédés, utilisés depuis des siècles, ont été améliorés pour produire du verre à usage industriel. Ainsi, on peut utiliser des machines de soufflage entièrement automatisées. Le verre peut être peint ou verni, être rendu opaque ou être poli en projetant des abrasifs (du sable par exemple) ou en utilisant une meule ou des acides. Il est possible de déposer sur le verre un revêtement superficiel comme un traitement antireflet ou semi-reflechissant. Les techniques industrielles utilisées pour la fabrication de produits en verre sont variées et dépendent généralement du type de produit ainsi que du type de verre.

Le ruban de verre, qui s'est refroidi lentement à l'air libre, est découpé automatiquement en plateaux de 6000 x 3210 mm. Ceux-ci sont manipulés à l'aide de ventouses vers l'aire de stockage et expédiés à l'aide de véhicules spéciaux.

3.3. Re - cuisson

Traitement que le verre doit subir à l'issue de sa fabrication pour éliminer certaines tensions moléculaires qui le fragilisent. Ce traitement tente de baisser progressivement et de façon maîtrisée la température du verre jusqu'à température ambiante. Les paliers de re - cuisson varient suivant la nature et le volume du produit verrier.

3.4. Trempe du verre

La trempe du verre est un procédé qui modifie les propriétés d'un verre pour le rendre cinq fois plus résistant. On distingue la trempe thermique et la trempe chimique. Des tensions de compression et d'extension sont provoquées de façon permanente pour lui permettre une résistance qui fait de lui un verre de sécurité. Il existe deux possibilités de traitement : la trempe thermique et la trempe chimique.

3.4.1. La trempe thermique

Le volume de verre est chauffé jusqu'à 700°C (température où les molécules peuvent se déplacer), puis refroidit très rapidement et uniformément à 300°C par des jets d'air froid. Les couches externes sont refroidies en premier. La surface se rigidifie car les molécules diminuent de volume et atteignent leurs dimensions définitives avant celles de la couche

interne. Quand les régions internes se contractent à leur tour, elles «tirent» sur la surface et créent une tension résiduelle de compression.

Le procédé crée des tensions permanentes dans l'épaisseur du verre. On distingue trois couches de tensions qui permettent de compenser les tensions inverses subies par un choc éventuel, par une flexion (figure 3)

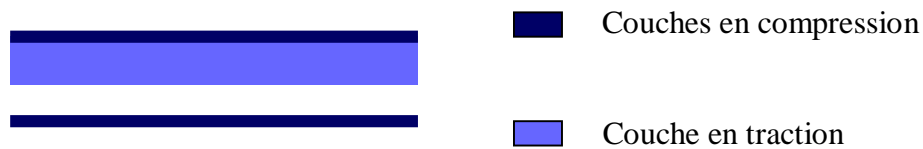


Figure 3 – Dispositif des couches de tension dans l'épaisseur d'une feuille de verre trempé
(Etats de contraintes dans un verre trempé)

La trempe dite « à-plat » est effectuée dans des fours horizontaux. Avec un verre épais, la trempe est d'autant plus forte si le refroidissement est rapide. Il est difficile de tremper une vitre mince car le refroidissement atteint trop rapidement la couche interne. Au-delà de 2/3 mm d'épaisseur, il est possible de tremper un verre thermiquement. En dessous de cette épaisseur, on pratique la trempe chimique.

- **avantages :**

- La résistance à la flexion est accrue considérablement. Un vitrage de 8 mm résiste à une bille en acier de 500 grammes tombant d'une hauteur de 2 mètres tandis qu'une hauteur de 30 cm serait suffisante pour briser un verre non trempé.
- Le verre se fragmente en une multitude de petits éclats non coupants en cas de brisure.
- Le risque de casse par choc thermique est considérablement affaibli. Si un verre non trempé n'est pas chauffé de façon uniforme (à partir d'une différence de température de 30°C entre deux points), des tensions internes peuvent provoquer sa casse. Le vitrage trempé, quant à lui, résiste à des variations de température de 200°C. Il peut être exposé à une température allant jusqu'à 250°C.
 - Sa densité diminue.
 - On ne peut plus le couper ni le percer au risque de l'éclater.
 - Il est possible de le détremper en lui faisant subir une « re - cuisson » (montée en température puis refroidissement lent).

3.4.2. La trempe chimique :

Elle est plus facile à contrôler que la trempe thermique mais elle est plus coûteuse et réservée à des verres spéciaux (hublot pour avion).

Le verre est immergé dans un bain salin (sel de potasse ou nitrate de potassium fondu) à 400°C pendant une durée de 12 à 36 heures (ou plus en fonction de la résistance désirée). Les ions sodium du verre quittent sa surface et sont remplacés par les ions potassium qui sont plus grands ; ceux-ci compressent la surface interne qui se met en extension. Il y a donc une compression très élevée sur une très faible épaisseur de la surface.

- **Avantages :**

- Le verre est beaucoup plus résistant qu'un verre trempé thermiquement. S'agissant d'un traitement superficiel, le verre trempé chimiquement présente, en cas de casse, la fragmentation typique d'un verre normal
- La trempe chimique permet le traitement des feuilles d'épaisseur fine (2-3 mm) qui ne peuvent être trempées avec le processus thermique.

4. TYPE DE VERRE

4.1. Verre imprimé

Les verres imprimés sont obtenus en coulée continue. A la sortie du four de fusion la feuille de verre, par débordement, passe entre deux rouleaux lamineurs dont l'un (ou les deux) comporte un dessin qui s'imprime sur le verre (figure 4).

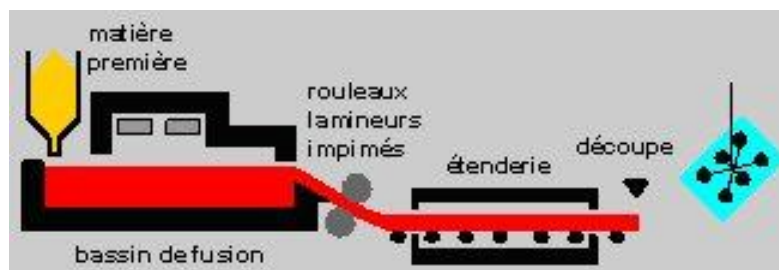


Figure 4 – Procédé de fabrication du verre imprimé

4.2. Verre armé

Sur le même principe on peut, à la sortie du four, introduire dans la feuille de verre, au niveau des rouleaux lamineurs, une armature de fils métalliques inoxydables pour obtenir du verre armé (figure 5)

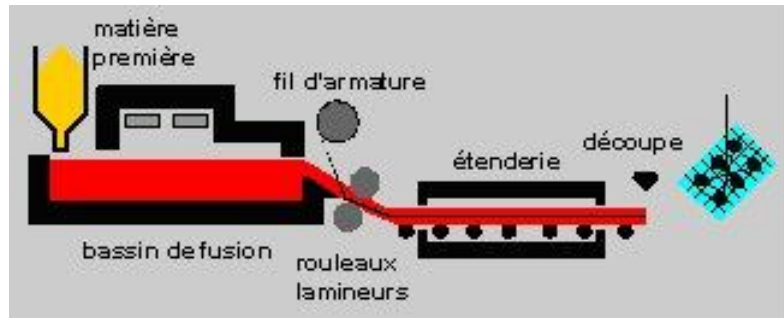


Figure 5 – Procédé de fabrication du verre armé

4.3. Verre profilé

Comme pour le verre imprimé une succession de rouleaux lamineurs permettent d'obtenir du verre profilé armé ou non (figure 6)

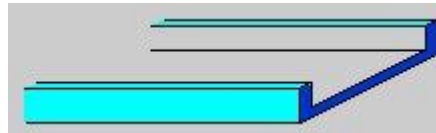


Figure 6 – Verre profilé

5. PROPRIETES DES VERRES

- **Dureté :**

Le verre est un matériau relativement dur, sa dureté sur l'échelle de Mohr qui en compte 10 varie de 5 à 7 en fonction de sa composition.

- **Résistance mécanique :**

La résistance à la flexion est en moyenne égale à 40 MPa, alors que sa résistance en compression peut atteindre 1000 MPa.

- **Masse volumique ou densité :**

La densité du verre est voisine de celle du béton, elle varie de 2,45 à 2,55.

- **Conductibilité thermique :**

Le verre conduit relativement mal la chaleur, sa conductivité varie de 0,65 à 1,15 W/m°C

- **Contraintes thermiques :**

Le verre résiste mal à la chaleur parce qu'il possède d'une part un faible coefficient de conductivité thermique et d'autre part un coefficient de dilatation relativement élevé

- **Comportement au feu :**

Le feu n'a aucune action chimique sur le verre :

- Il est ininflammable et incombustible
- Il n'est pas décomposé
- Il n'est pas oxydé

- **Dilatation thermique :**

Elle s'exprime par un coefficient mesurant l'allongement par unité de longueur pour une variation de 1°C. Le verre se dilate sous l'effet de la chaleur, son coefficient de dilatation thermique est relativement important (tableau 2)

Tableau 2 – Coefficient de dilatation

Matériaux	Coefficient de dilatation	Matériaux	Coefficient de dilatation
Verre	$9. 10^{-6}$	Acier	$12. 10^{-6}$
Bois	$4. 10^{-6}$	Aluminium	$23. 10^{-6}$
Ciment	$14. 10^{-6}$	Brique	$5. 10^{-6}$
PVC	$70. 10^{-6}$		

- **Propriétés acoustiques :**

L'isolation acoustique apportée par une feuille de verre dépend en grande partie de ses dimensions, du mode de pose et de l'étanchéité réalisée dans le châssis. Les ondes sonores véhiculées par l'air mettent en vibration les parois. Celles - ci sont d'autant plus imperméables que leur masse est importante. L'indice d'affaiblissement acoustique varie donc avec l'épaisseur. On peut accroître les performances acoustiques d'un vitrage isolant en associant deux verres d'épaisseurs différentes, 4 mm et 10 mm par exemple, ou en assemblant des produits spécialement conçus pour cet usage tels certains feuilletés présentant un intercalaire souple.

- **Résistance chimique :**

Il n'est attaqué que par l'acide fluorhydrique ou quelques produits fortement alcalins. Les eaux de ruissellement de béton sont de ce point de vue particulièrement dommageables pour les vitrages.

- **Imperméabilité :**

Elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène.

- **La transparence du verre :**

Il ne suffit pas qu'un milieu soit transparent pour qu'il soit invisible. Ce phénomène est lié à la discontinuité des milieux traversés par la lumière, ici : l'air et le verre.

Lorsque la lumière frappe la surface d'un vitrage, la majeure partie de celle-ci passe à travers le verre. Cependant une partie de cette lumière est réfléchiée et une partie est absorbée en cours de traversée.

Le facteur de transmission varie d'une longueur d'onde à l'autre. Ainsi dans les domaines de l'ultraviolet et de l'infrarouge, l'absorption est très importante ; au contraire dans le domaine où se situe le spectre visible, le verre est transparent.

Ainsi le verre est transparent pour le visible dans un domaine de longueur d'onde compris entre 0,38 et 0,78 μm . La lumière visible ne met en vibration aucun électron et l'énergie qu'elle transporte n'est pas susceptible d'être absorbée.

6. LA FIBRE DE VERRE

C'est un filament de verre extrêmement fin, obtenu par étirage du verre fondu jusqu'à ce qu'il présente un diamètre compris entre 0,5 et 15 μm (figure 7).

Il est possible de fabriquer des fils longs, continus et multifilaires aussi bien que des fibres courtes de différentes longueurs. On obtient les fibres de verre selon deux procédés. On peut effectuer un étirage mécanique à grande vitesse, la vitesse déterminant le diamètre des fibres qui est compris entre 1 et 8 μm . Ces fibres sont destinées au renforcement des matrices minérales et synthétiques, et pour l'isolement électrique. La deuxième méthode de fabrication consiste à étirer le verre par entraînement de filets fluides de verre par des jets d'air ou de vapeur. On obtient par ce procédé des fibres discontinues, minces et de longueur variable.

Elles sont utilisées pour fabriquer des panneaux, de la laine et des cordons (essentiellement pour l'isolation thermique et acoustique)



Figure 7 – Fibres de verre

Plusieurs types de compositions verrières sont utilisés comme matières premières, en fonction de l'usage spécifique qu'il sera fait de la fibre. Pour les fibres de renforcement, les principales compositions de verres utilisés sont données dans le tableau 3 :

Tableau 3 – Composition de la matière première pour la fabrication de la fibre de verre

oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO ₂
%	55 - 61	3,5-15	5 - 23	1 - 3	0,8- 17	5 - 8	0,3–0,5	0 – 0,5	0 - 10

On utilise également le bore pour abaisser la température de fusion et la fluidité du mélange (ce qui améliore le filage).

6.1. Procédé de fabrication

- **Affinage à 1500 °C :**

La composition est chauffée ; elle devient visqueuse (vers 800 °C), puis liquide, et finalement se vitrifie. À 1500 °C, elle est homogène, et les dernières bulles et impuretés disparaissent

- **Filage par étirement :**

Le verre en fusion se transforme en filament en étant étiré à grande vitesse ; la filature des filaments s'apparente en fait à la filature textile classique pour produire un fil. Ce fil de verre est bobiné ensuite autour d'une broche.

- **Ensimage :**

L'étirage et le bobinage n'ont pas suffisamment d'effet pour rassembler durablement les centaines de filaments en un fil (le verre est trop lisse pour s'agglomérer). L'ensimage consiste à ajouter un revêtement protecteur pour permettre l'agglomération des filaments et faciliter l'intégration dans les polymères.

- **Finition :**

Les fils sont ensuite bobinés ou coupés selon les finalités

- **Séchage:**

Les fils sont finalement séchés à des températures de 600 à 700°C

6.2. Usages

La fibre de verre trouve des applications en renforcement, isolation et optique. La première application est la plus importante : la fibre de verre est alors utilisée pour renforcer les bétons ou les polymères en vue de fabriquer des matériaux composites.

- **En renforcement**

La fibre de verre est utilisée comme armature dans les matériaux composites à matrice résineuse généralement thermodurcissables, polyester, vinylester ou encore époxy ou à matrice minérale, mortier, béton, béton armé, et plâtre

- **En isolation**

La fabrication est menée par encollage des fibres par une résine synthétique. Le produit fini aura la forme de panneaux rigides ou de matelas souples pour protéger murs et plafonds, ou encore la forme de coquilles pour isoler les tuyaux

- **En optique**

Les fibres de verres, grâce à leur souplesse, leur transparence et leur excellente capacité de transmission de la lumière, sont jointes en faisceau et utilisées comme fibres optiques

A partir des années 1950, les fibres optiques furent largement employées dans le domaine de la recherche scientifique, médicale et industrielle. Ces fibres de verre à haut indice de réfraction, placées parallèlement les unes aux autres et séparées par de minces couches de verre de faible indice de réfraction, peuvent transmettre des signaux électromagnétiques (dont la lumière) avec des pertes presque nulles et avec des débits très élevés. Les endoscopes sont équipés de telles fibres, facilitant ainsi l'examen de cavités du corps humain normalement inaccessibles. Les fibres optiques sont maintenant utilisées dans le domaine des télécommunications, et promises à un grand avenir. Par exemple, combinées aux lasers, elles sont utilisées dans la téléphonie longue distance et dans la téléinformatique.

Les principales utilisations de la fibre sont, par ordre d'importances :

- les bâtiments et les infrastructures (29%),
- les transports (25%),
- l'électricité et l'électronique (16%),
- les sports et loisirs (14%),
- les équipements industriels (11%).

CHAPITRE 3

LES LIANTS HYDROCARBONES

INTRODUCTION

1. LIANTS NATURELS:

2. Les goudrons

3. LE BITUME DE PETROLE

3.1. Elaboration du bitume

3.2. Classification des bitumes de pétrole

3.2.1. Bitumes bruts

3.2.2. Bitumes spéciaux

3.2.3. Bitumes modifiés

4. PROPRIETES DES BITUMES DE PETROLE

4.1. Viscosité.

4.2. Température de ramollissement

4.3. Plasticité ou ductilité

5. Utilisation

5.1. Construction de routes

5.2. Enduits

5.2. L'étanchéité

CHAPITRE 3

LIANTS HYDROCARBONES ET LEURS PRODUITS

INTRODUCTION

Le bitume, connu depuis la plus haute Antiquité sous forme naturelle, provient, de nos jours, presque exclusivement de la distillation des pétroles bruts. C'est un matériau très visqueux, noir ou brun foncé. Ses qualités physiques et chimiques en ont fait un matériau de toute première importance, comme liant dans les produits routiers.

- **Définition**

Les liants hydrocarbonés sont des liants organiques, constituées essentiellement d'assemblages d'atomes de carbone et d'hydrogène.

On distingue trois familles de liants hydrocarbonés :

- les liants naturels (bitume naturel ou roche d'asphalte) ;
- les goudrons provenant de la pyrogénéation (par réaction chimique à haute température) des matières organiques telles que la houille et le charbon et le bois.
- les bitumes, provenant du raffinage et du traitement des pétroles bruts ;

La houille (la tourbe et la lignite, en fonction du % de carbone) est une roche naturelle, carbonée. C'est une roche combustible.

1. LIANTS NATURELS:

- **Bitume naturel (asphalte) :**

C'est une roche naturelle d'origine sédimentaire plus souvent calcaire, poreuse imprégnée en profondeur de liant hydrocarboné. C'est la roche asphaltique qui, après broyage donne naissance à l'asphalte

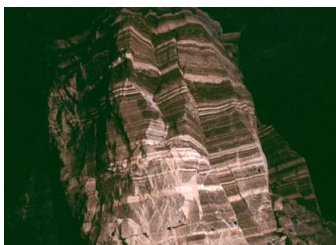


Photo 1 – Roche naturelle d'asphalte

2. LES GOUDRONS

Fraction visqueuse, brun foncé à noire, générée lors de la combustion de matières organiques telles que la houille, le charbon ou le bois. Le goudron de houille, par distillation,

fournit des dérivés huileux pouvant servir comme fluxant (permet de fluidifier les bitumes durs) des bitumes. Le brai de houille, résidu de distillation du goudron, n'est (en principe) plus utilisé dans les travaux routiers. Dans le langage courant, on le confond souvent avec le bitume d'origine pétrolière.

3. LE BITUME DE PETROLE

Le bitume, connu depuis la plus haute Antiquité sous forme naturelle, provient, de nos jours, presque exclusivement de la distillation des pétroles bruts. C'est une substance composée d'un mélange d'hydrocarbures, très visqueuse (voire solide) à la température ambiante et de couleur noire.

Le bitume s'obtient essentiellement par distillation d'un mélange d'hydrocarbures bruts (pétroles) contenant au moins un brut à bitume. Les pétroles légers, ne produisent pas de bitume.

Un hydrocarbure (HC) est un composé organique contenant exclusivement des atomes de carbone (**C**) et d'hydrogène (**H**). Ils possèdent en conséquence une formule brute de type : C_nH_m , où n et m sont deux entiers naturels.

3.1. Elaboration du bitume

Le bitume est produit par raffinage du pétrole brut qui est chauffé à 300°C, partiellement vaporisé dans un four et transféré dans une colonne de distillation atmosphérique dans laquelle s'opère la séparation des différentes fractions. Les plus légères se vaporisent tandis que les plus lourdes (résidu atmosphérique) restent au fond de colonne et passent dans un second échangeur de chaleur avant traitement en colonne de distillation sous vide. Enfin le bitume est récupéré au fond de cette colonne.

- **La distillation**

Est un procédé de séparation de substances, mélangées sous forme liquide. Elle consiste à porter le mélange à ébullition et à recueillir une fraction légère appelée distillat, et une fraction lourde appelée résidu (figure 2)

Le procédé utilise la différence de volatilité (capacité à s'évaporer dépendant de la température) entre les constituants afin de les séparer : le plus volatil a une température d'ébullition plus basse que le moins volatil, etc. Ainsi, en chauffant le liquide, chaque constituant va être séparé successivement (on parle de coupe de distillation).

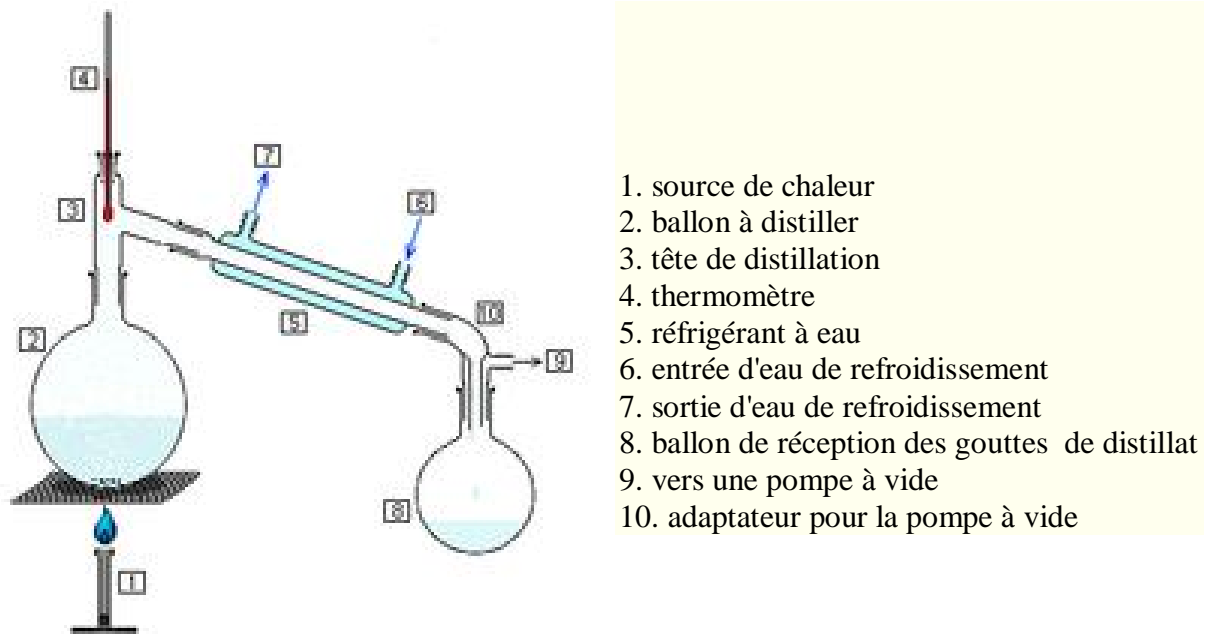


Figure 1 - Principe de la distillation

La vapeur ainsi produite peut être condensée et transformée en différents combustibles (distillat), et la substance restante est appelée résidu et transformée en différents bitumes (figure 3)

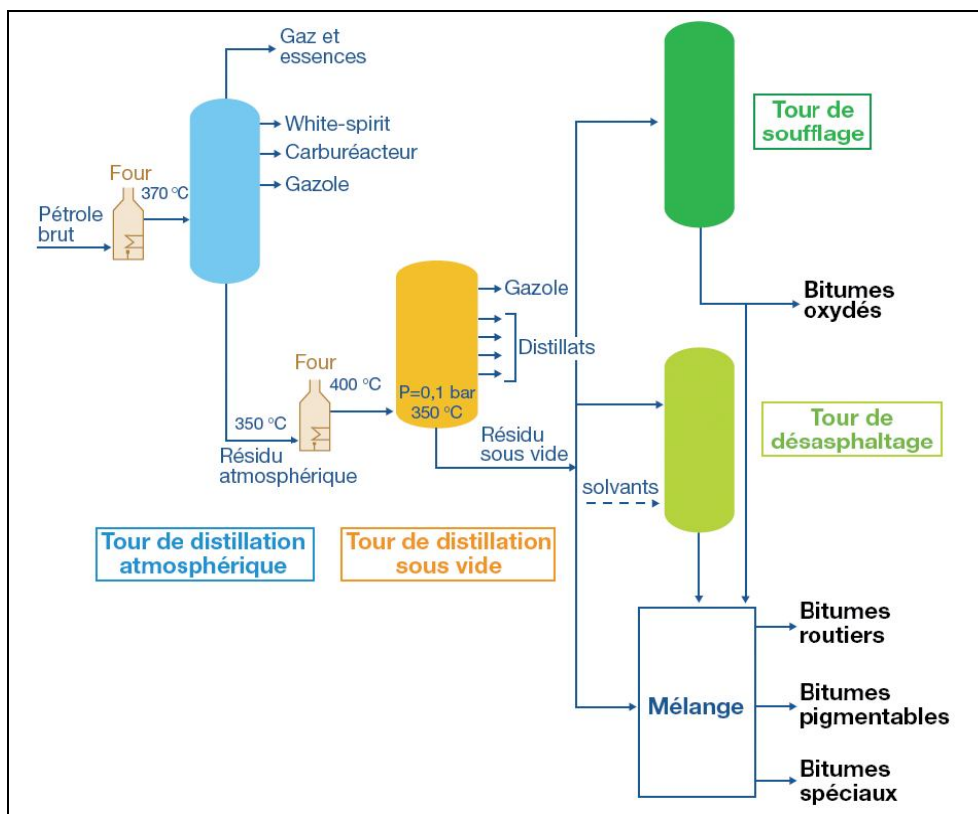


Figure 2 - Principe d'obtention des bitumes

3.2. Classification des bitumes de pétrole

L'adaptation à l'évolution des techniques aussi bien dans le domaine du génie civil que dans celui de l'industrie a conduit à produire sept grands types de liants de type bitume répondant à des spécifications bien précises que l'on peut classer en :

- Bitume brut (sans aucune addition ni traitement) ;
- Bitumes spéciaux ;
- Bitumes modifiés

3.2.1. Bitumes bruts (routiers)

Le mode d'utilisation principal est sous la forme de bitume pur. Il est chauffé à des températures permettant l'enrobage des matériaux granulaires,

3.2.2. Bitumes spéciaux

Ils sont obtenus par des modes de fabrication particuliers, par l'ajout d'additifs ou par une combinaison des deux. On distingue ainsi :

- **Bitumes oxydés**

Les bitumes oxydés sont obtenus par soufflage à l'air (par réaction de l'oxygène de l'air avec l'hydrogène contenu dans le résidu en formant des vapeurs d'eau) suivi de compactage.

- **Bitume de craquage**

Les bitumes de craquage ou cracking sont obtenus par décomposition à haute température du pétrole et de ses huiles.

3.2.3. Bitumes modifiés (pigmentables)

Les bitumes modifiés sont des liants bitumineux dont les propriétés ont été modifiées par l'emploi d'un agent chimique (résines et polymères), qui, introduit dans le bitume de base, en modifie la structure chimique et les propriétés physiques et mécaniques.

Les bitumes modifiés par des ajouts (polymères, résines) peuvent être en général mis sous les formes :

- Bitume fluidifié
- Bitume fluxé
- Emulsion

- **Bitume fluidifié**

Le bitume a été principalement utilisé sous une forme rendue fluide à froid par l'addition de diluants : des solvants du type kérosène ou pétrole absorbant.

Le cut-back est un bitume fluidifié par addition de solvants volatiles. Ce sont des bitumes fluides.

- **Bitume fluxé**

La technique des bitumes fluidifiés est toujours d'actualité, mais des systèmes plus élaborés conduisant à des viscosités de liants plus élevées, ont vu le jour sous l'appellation de bitumes fluxés. La fluxion est la fluidification d'un bitume dur par un bitume mou ou par l'huile. Ces liants ont rendu possible la confection d'enduits superficiels très performants. Les liants fluidifiés ou fluxés peuvent être également utilisés pour la réalisation d'enrobés dits "à froid".

- **Emulsion**

Une émulsion de bitume est un mélange de bitume et d'eau en suspension.

4. PROPRIETES DES BITUMES DE PETROLE

Les bitumes peuvent être caractérisés par :

- La viscosité
- Le point de ramollissement
- La ductilité

4.1. Viscosité.

Est la propriété d'un matériau de résister au déplacement des particules sous l'influence de forces extérieures. La viscosité des bitumes dépend de la température. A basse température, la viscosité est élevée et les bitumes acquièrent les propriétés d'un solide. A haute température, la viscosité diminue et les bitumes passent à l'état liquide.

Pour caractériser la viscosité des bitumes fluides, l'appareil utilisé est le B.R.T.A (British Road Tar Association) ou S.T.V. (Standart Tar (goudron) Viscosity) (figure 4) dont l'orifice a soit 10 mm de diamètre soit 4 mm. Il y a un rapport de 30 environ entre les durées d'écoulement au travers des deux orifices de diamètres successifs 4 et 10 mm (ce dernier donnant un écoulement beaucoup plus rapide). On énonce ainsi la viscosité : B.R.T.A. ((British Road Tar Association), ou S.T.V.(Standart Tar Viscosity) de tant de secondes pour l'orifice de 10 mm ou de 4 mm selon le cas.



Orifices de \varnothing 10 et 4 mm

Figure 3 - Viscosimètre STV (BRTA, British Road Tar Association)

- **Viscosité ENGLER**

Pour les émulsions, on utilise un viscosimètre différent qu'on appelle viscosimètre "ENGLER" (figure 5 et 6), son orifice a pour diamètre 2,8 mm. Le degré ENGLER est le rapport entre les durées d'écoulement de l'émulsion à la température où l'on effectue la mesure et la durée d'écoulement d'un égal volume d'eau à 25 °C.



Figure 4 - Viscosimètre ENGLER

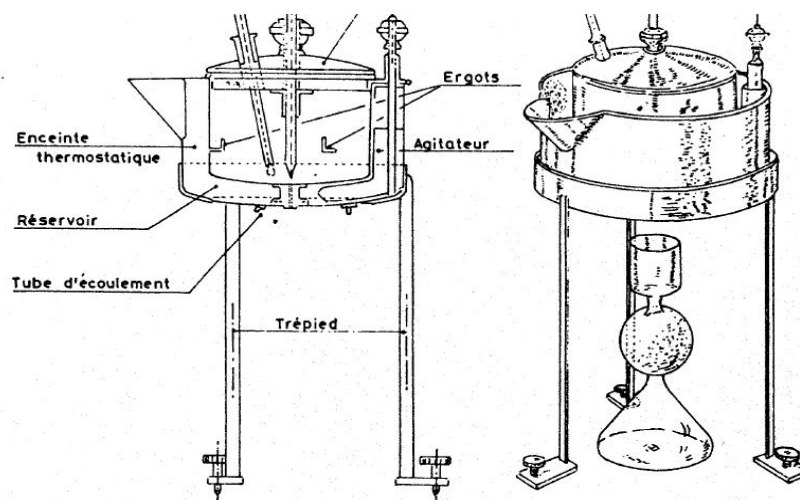


Figure 5 - Viscosimètre ENGLER (schéma de principe)

- **Pénétromètre**

La profondeur de pénétration est déterminée à l'aide du pénétromètre (figure 6). Le bitume fondu est versé dans une coupe pour former une couche de 30 mm d'épaisseur. La coupe est plongée dans l'eau maintenue à une température de 25°C, l'ensemble est placé sur le support du pénétromètre. L'essai est réalisé par la mesure de la profondeur de pénétration de l'aiguille chargée de 100 g pendant 5 secondes, elle est exprimée en degré ($1^\circ = 0,1 \text{ mm}$).



Figure 6 - Pénétromètre à bitume

La pénétration standard d'un liant caractérise en effet son état de viscosité à 25 °C; mais pour les bitumes très durs, le procédé n'a plus de sensibilité. Au contraire, pour les liants très mous, de faibles variations dans la viscosité entraînent de très fortes variations dans mesure; Il

est vrai que l'on peut dans le cadre de liant très dur, mesurer la pénétration à une température beaucoup plus élevée (ex. : 35 °C). Par contre pour les liants très mous, on peut mesurer la pénétration à une température plus faible (15° ou 0 °C). Il reste préférable de déterminer un point de ramollissement du liant, c'est-à-dire une température où le liant réalise une consistance repérable et déterminable. .

4.2. Température de ramollissement

Le point de ramollissement le plus utilisé est le B.A. (bille – anneau ou ring & ball) (figure 7), il est désigné comme étant la température à laquelle une bille d'acier, après avoir traversée la matière testée (coulée dans un anneau), atteint le fond d'un vase standardisé rempli d'eau que l'on chauffe progressivement (5°C / mn) et dans lequel on a plongé l'appareil. Le point de ramollissement B.A. marque un stade de viscosité déterminée par l'enfoncement total de la bille dans le bitume.

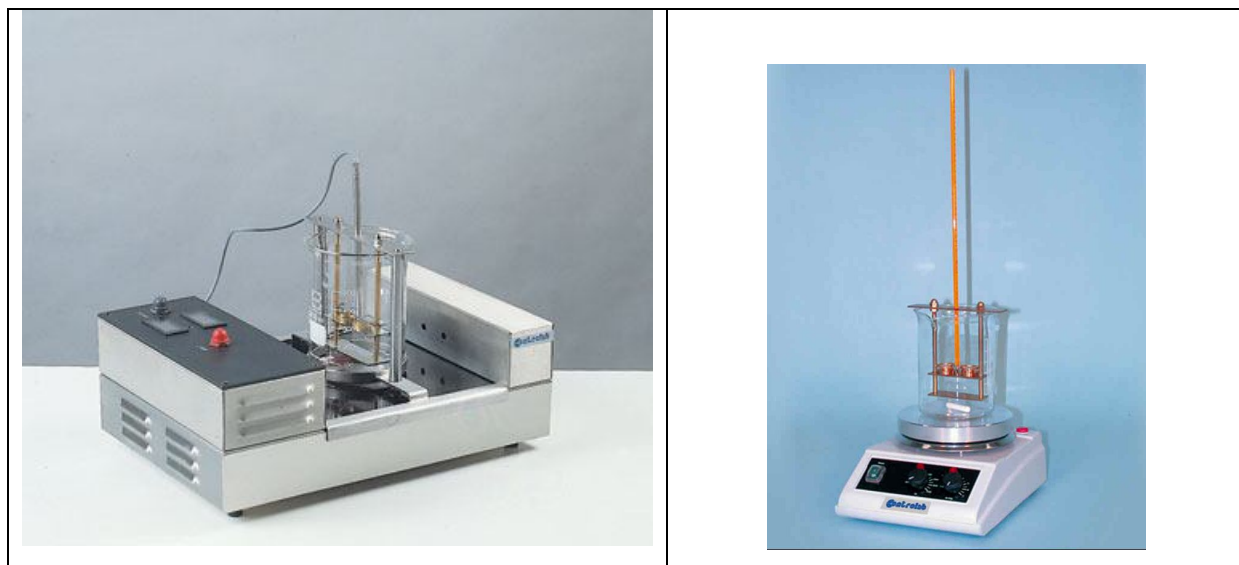


Figure 7 – Appareil BA (bille – anneau ou ring & ball),

4.3. Plasticité ou ductilité

La ductilité du bitume est caractérisée par sa résistance à la rupture, en traction. . L'essai se fait dans un appareil appelé ductilimètre (figure 8) sur des éprouvettes en forme de 8 immergés dans l'eau chauffée et maintenue à une température de 25 °C. L'éprouvette de bitume est soumise à un étirement à une vitesse de 5 cm / mn, celle – ci commence à s'allonger, un fil fin se forme et finit par se rompre. La ductilité est exprimée par la longueur du fil en cm.

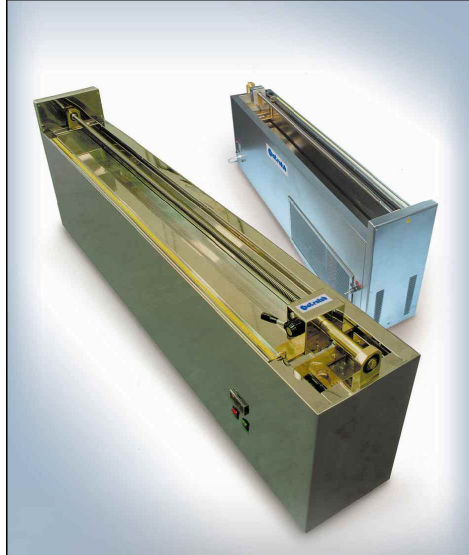


Figure 8 – Ductilimètre

La viscosité, le point de ramollissement et la ductilité sont trois propriétés physiques principales interdépendantes du bitume.

5. UTILISATIONS

Ses qualités physiques et chimiques en ont fait un matériau de toute première importance. Il possède un grand pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton, bois, métal, verre. C'est un excellent isolant thermique.

Il est léger, ductile et souple. On peut en obtenir des solutions dans de nombreux solvants organiques. Il est pratiquement inerte vis-à-vis de la plupart des agents chimiques usuels.

5.1. Construction de routes

L'essentiel du bitume sert, pour des applications routières, bien que ce matériau ne représente que 5 % environ de la masse de l'enrobé bitumineux. Aujourd'hui, l'immense majorité des routes est réalisée avec des enrobés ou des enduits bitumineux.(figure 9)

5.1.1. Enrobé :

Est un mélange de bitume (environ 5 %) en masse et de granulats concassés utilisés pour la construction et l'entretien des routes dans lesquels le bitume assure le lien entre les différents granulats. On distingue les enrobés à chaud et les enrobés à froid

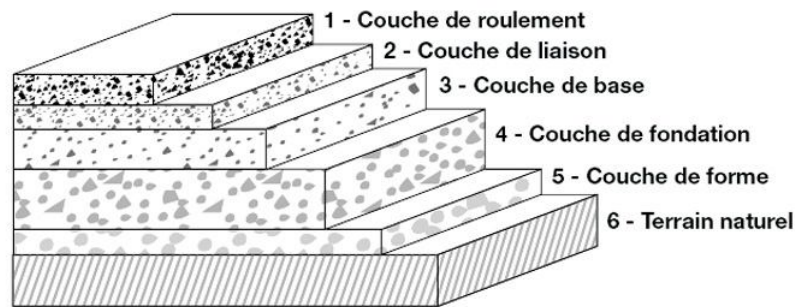


Figure 9 – Différentes couches d'une route

- **Enrobés fabriqués à chaud**

Il s'agit des enrobés fabriqués à chaud à une température de l'ordre de 180°C et appliqués à chaud à une température de l'ordre de 150°C :

- **Béton bitumineux** : Enrobé riche en bitume, utilisé principalement pour les couches de roulement, c'est à dire pour les couches supérieures de la chaussée. Les bétons bitumineux se classent en fonction de leur granulométrie :

- **Béton Bitumineux Ultra Mince (BBUM)**: Granulométrie inférieure à 2 cm, utilisé pour les couches d'accrochage destinées à lier 2 couches.

- **Béton Bitumineux Très Mince (BBTM)** : Granulométrie inférieure à 2,5 cm. Permet d'élaborer des couches de surfaces très lisses, notamment des ouvrages urbains (places alternant pavés et enrobés) ou sportifs (skatepark).

- **Béton Bitumineux Mince (BBM)** : Granulométrie de 3 à 5 cm.

- **Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG)** : Très utilisé en France pour les couches de roulement. Granulométrie allant de 6 cm à 14 cm (voire 20 cm exceptionnellement).

- **Grave bitume** : Enrobé à plus faible teneur en liant (bitume) destiné aux couches de fondation ou d'assise (sous-couches).

On distingue également d'autres formules plus rarement utilisées :

- **Enrobé drainant**

L'enrobé drainant, avec 25 à 30 % de vide, laisse passer l'eau, évitant qu'elle ne s'accumule sur la chaussée par temps de pluie. Il contribue à limiter l'épaisseur du film d'eau

à la surface du revêtement routier et à éliminer le risque de formation d'un « coin d'eau » sous le pneu lorsque le véhicule roule à une vitesse élevée ou freine brusquement.

- **Enrobé acoustique**

Cet enrobé permet d'abaisser considérablement les nuisances sonores provoquées par la circulation routière (bruits de roulement, de moteurs et de suspensions) en dessous de 72 dB, soit 5 dB de moins qu'un enrobé classique, et 9 dB de moins qu'un revêtement en béton (on rappelle qu'une réduction de 3 dB signifie que la nuisance sonore a été réduite de moitié).

- **Enrobé anti-orniérant**

Le liant spécial anti-orniérant permet d'optimiser la conservation de la chaussée. Il minimise les ornières, causes de mauvaise tenue du cap des véhicules, notamment par temps de pluie avec la formation de flaques d'eau. Cet enrobé est très répandu sur les autoroutes et les chaussées à trafic lourd.

- **Enrobé coloré**

Reconnaissable à sa couleur sombre caractéristique, le bitume peut de nos jours offrir une large gamme de teintes (vert, bleu, orange... jusqu'au blanc immaculé !). Il existe même des enrobés rétro réfléchissants. Fabriqués à partir de résine de pétrole clair, ces nouveaux bitumes de synthèse peuvent être colorés, soit en incorporant des pigments de couleur dans le liant, soit en utilisant directement des granulats de couleur.

- **Enrobés fabriqués à froid :**

Il s'agit d'enrobés fabriqués et appliqués à froid, par adjonction d'émulsion de bitume garantissant l'ouvrabilité du matériau.

- **Enrobé froid :** enrobé de faible granulométrie (0/4 ou 0/6 en principe) avec une forte teneur en liant et en fines, généralement utilisé de manière temporaire pour permettre la circulation de véhicules sur des voies en cours de travaux, ou encore pour reboucher des petites tranchées, trous, et nids de poules sur des chaussées déformées. Cet enrobé est très utilisé au printemps en période de dégel, pour réparer les détériorations de la chaussée dus au gel.

- **Grave émulsion :** mélange de grave avec une faible proportion d'émulsion de bitume.

5.2. Enduits

Les enduits superficiels sont des revêtements comprenant essentiellement deux constituants mis en œuvre séparément et successivement: le liant fluide et les granulats.

Le liant peut se présenter sous deux formes: en liant anhydre (bitume + fluxant) ou en émulsion (dispersion de bitume dans de l'eau). Les deux rôles principaux d'un enduit superficiel sont l'imperméabilisation du support et la rugosité superficielle.

Les enduits sont surtout employés pour des travaux d'entretien et dans une proportion moindre pour des travaux neufs. Les enduits sont caractérisés par une bonne adhérence initiale et bonne évolution dans le temps, une bonne étanchéité et un faible coût au m².

5.3. L'étanchéité

Assurer l'étanchéité des bâtiments et des navires était son usage le plus courant dans les siècles passés. Actuellement, le bitume et ses dérivés servent à fabriquer des chapes d'étanchéité pour la couverture de bâtiments (toiture, et terrasses) ou l'imperméabilisation des parois de retenues d'eau (citerne, canalisation, barrage, digue à la mer...), ainsi que les peintures, vernis et émulsions pâteuses pour hydrofuger les parois en béton hydraulique.

Outre la construction et l'entretien du réseau routier, le bitume est également utilisé dans des applications moins connues mais très variées qui font appel à ses propriétés particulières (étanchéité, cohésivité, élasticité, durabilité) :

- Construction de barrage, réservoirs, matériaux de couverture
- Confinement de déchets
- Sols industriels, aires de stockage
- Isolation, insonorisation