

CHAPITRE 7

Le verre

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | COMPOSITION GENERALE | 2 |
| 2 | CLASSEMENT DES VERRES PAR COMPOSITION | 5 |
| 3 | PROPRIETES CHIMIQUES | 5 |
| 4 | PROPRIETES PHYSIQUES | 6 |
| 5 | PROPRIETES THERMIQUES | 7 |
| 6 | PROPRIETES MECANIQUES | 7 |
| 7 | PRINCIPE DE FABRICATION - PROCEDE FLOAT-GLASS | 12 |
| 7.1 | LA PREPARATION DE LA COMPOSITION | 12 |
| 7.2 | LA FUSION DANS LE FOUR | 13 |
| 7.3 | LE BAIN D'ETAIN | 13 |
| 7.4 | RECUISSON ET REFROIDISSEMENT CONTROLE..... | 14 |
| 7.5 | LIGNE DE DECOUPE ET D'EMBALLAGE..... | 15 |
| 7.6 | LES AVANTAGES DU PROCEDE | 15 |
| 8 | LA TREMPE DU VERRE | 16 |
| 8.1 | COMPORTEMENT : VERRE RECUIT ET VERRE TREMPE | 16 |
| 8.2 | TREMPE THERMIQUE | 17 |
| 8.3 | TREMPE CHIMIQUE..... | 17 |
| 9 | PRODUITS VERRIERS DANS LE BATIMENT | 18 |

1 COMPOSITION GENERALE

Certains éléments comme le **silicium*** et le **bore**** peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène (oxyde de ...) et par élévation à une très haute température. Ces oxydes sont appelés oxydes « **formateurs** » car ils forment le squelette du verre.

On les combine avec d'autres éléments dits « **modificateurs** » qui sont :

- Les « **fondants** » qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice = 1730°C).
- Les « **stabilisants** » qui modifient les propriétés physiques du verre.



dioxyde de silicium



Cristal de borax

* Le silicium est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène, soit 25,7 % de sa masse. Il n'existe pas à l'état libre, mais sous forme de composés : sous forme de dioxyde de silicium (SiO₂), la silice (dans le sable, le quartz, la crystalite, etc...) ou d'autres silicates (dans les feldspath, la kaolinite, etc...)

** Le bore se trouve abondamment dans la nature sous forme de borax. Le minerai de borax se trouve généralement dans d'anciens lacs asséchés où l'eau s'est évaporé.

| | | |
|---|--|--|
| OXYDES FORMATEURS | FONDANTS (oxydes alcalins) | STABILISANTS (oxydes alcalino-terreux) |
| | Ils permettent d'abaisser la température de fusion de la silice seule de 1730°C à 1400°C (économie d'énergie). On les utilisait dès le Moyen Age. On peut trouver dans un verre plusieurs fondants : soude et chaux (verre sodocalcique). | L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) a provoqué la rupture d'une liaison Si - O et l'apparition d'un oxygène seul ce qui fragilise le réseau et augmente la solubilité à l'eau. |
| LA SILICE (dioxyde de silicium SiO ₂) Point de fusion: en moyenne 1730°C. C'est le vitifiant principal des verres . Elle apparaît sous forme de <i>sable</i> , dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les <i>sables quartzeux</i>). Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant et dur | L'OXYDE DE SODIUM (la soude Na ₂ O) 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 utilisé pour le verre industriel, car nécessitant d'être constamment réchauffé lors du façonnage. | L'OXYDE DE CALCIUM (CaO) Se trouve sous forme de chaux (qui est le stabilisant le plus employé) ou de dolomite. Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa solubilité, mais en excès il provoque une dévitrification. |

| | | |
|--|---|---|
| <p>L'ANHYDRIDE BORIQUE</p> <p>(le bore ou borax anhydre B_2O_3) Point de fusion: $450^{\circ}C$. Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques et à l'eau. Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex). Il possède aussi les propriétés d'un fondant.</p> | <p>L'OXYDE DE POTASSIUM (K_2O)</p> <p>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 est utilisé dans le soufflage du verre car augmente le temps de travail lors du façonnage.</p> | <p>L'OXYDE DE ZINC (ZnO)</p> <p>Il augmente l'éclat et l'élasticité.</p> |
| <p>L'ANHYDRIDE PHOSPHORIQUE</p> <p>(le phosphore P_2O_5) Point de fusion: $570^{\circ}C$. Il est employé en optique.</p> | <p>L'OXYDE DE MAGNESIUM (MgO)</p> <p>Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium+magnésium). Il est indispensable pour le verre flotté et le verre à vitre et en gobeletterie. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques.</p> | <p>L'OXYDE DE FER (Fe_2O_3)</p> <p>C'est un stabilisant et un colorant contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre. Pour décolorer cette teinte, on peut ajouter du bioxyde de manganèse (MnO_2) (savon des verriers).</p> |
| | | <p>L'OXYDE DE PLOMB (PbO)</p> <p>Il entre dans la composition du cristal car il facilite la coupe et le travail du verre. Il abaisse le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus brillant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre.</p> |

Les colorants du verre

La coloration directe

La couleur est donnée en ajoutant des **mélanges d'oxydes métalliques** qui **absorbent certaines longueurs d'onde de la lumière**. L'oxyde de fer par, exemple, absorbe le rouge et donne le vert. La tonalité et l'intensité d'une coloration dépendent de la nature et de la quantité des colorants ainsi que de la composition du verre lui-même (sodique ou potassique).

La coloration indirecte

Certains oxydes sont en **suspension** dans la masse vitreuse au cours de la fusion. La **coloration** apparaît lors du **réchauffement du verre** aux alentours de **$600^{\circ}C$** . La chaleur provoque une dilatation des particules qui met en évidence la couleur dans la longueur d'onde souhaitée.



Verres sous une lampe à UV, montrant la fluorescence caractéristique causée par la présence de dioxyde d'uranium.



Les vitraux, inventés au XIIIe siècle, sont un art à part entière. Les pièces sont issues de la découpe d'un manchon aplati, et la coloration se fait à base d'oxydes métalliques.

| ADDITIF | COULEUR |
|---|--|
| Cobalt 0.025 à 0.1% | bleue |
| manganèse | élimine la teinte verte produite par le fer améthyste |
| sélénium | décolore la teinte rouge |
| oxyde d'étain oxydes d'antimoine oxydes d'arsenic | blanc opaque (imitation de porcelaine vénitienne) |
| oxyde de cuivre 2 à 3% | Turquoise |
| cuivre métallique | rouge très sombre, opaque rubis doré |
| nickel | bleus, violets ou même noirs |
| titane | jaune-brun |
| or métallique 0.001% | Rubis à groseille |
| Uranium 0.1 à 2% | jaune ou verte fluorescente |
| composés à base d'argent nitrate d'argent | rouge orangé au jaune |

2 CLASSEMENT DES VERRES PAR COMPOSITION

VERRES SODOCALCIQUES (le plus commun)

Silice (72%) + soude (13%) + chaux (5%)

Température de ramollissement* = 700°C.

Coefficient de dilatation de 0 à 300°C : 86×10^{-7} (élevé)

- Bonne stabilité chimique mais sensible aux chocs thermiques.
- Verres plats et creux, ampoules électriques et bouteillerie.

VERRES BOROSILICATES (ex: Pyrex)

Silice (80%) + anhydride borique (13%) + soude (4%) + alumine (3%)

Température de ramollissement = 820°C.

Coefficient de dilatation de 0 à 300°C : 32×10^{-7} (faible)

- Bonne résistance aux chocs thermiques.
- Ustensiles de laboratoire et de cuisine (résistance à la chaleur et aux agents chimiques), isolation (fibres de verre), stockage de déchets radioactifs.

VERRES AU PLOMB (si oxyde de plomb > 24% : CRISTAL)

Silice (62%) + oxyde de plomb (21%) + potasse (7%)

Température de ramollissement = 630°C

Coefficient de dilatation de 0 à 300°C : 90×10^{-7} (très élevé)

- Limpide, sonore, très résistant à la dévitrification.
- Gobeletterie et verrerie d'art, téléviseurs et électronique, protection des rayons X (forte teneur en plomb).

VERRE DE SILICE

Minimum 96% de silice.

Température de ramollissement = 1700°C.

Coefficient de dilatation de 0 à 300°C : $5,6 \times 10^{-7}$ (très faible)

- Grande pureté (transparence optique), grande résistance aux températures élevées, à la corrosion et aux chocs thermiques.
- Tubes de lampe à halogène, éléments d'optique.

VITROCERAMIQUES (vitro cristallins)

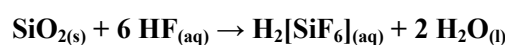
Silice (75%) + alumine (15%) + sel de titane (5%) + oxyde de lithium (3%)

- Grande résistance à la rupture, très résistant aux chocs thermiques.
- Verrerie culinaire résistante au feu (plaques de cuisson), optique.

3 PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Le verre est un matériau présentant une très **grande inertie chimique**.

Cependant, l'**ACIDE FLUORHYDRIQUE*** est l'un des seuls liquides connus (avec quelques **produits alcalins**) capables de dissoudre le verre, constitué principalement de **silice**



* L'**acide fluorhydrique** est une solution aqueuse très corrosive et toxique de fluorure d'hydrogène.

On se sert de l'acide fluorhydrique pour **graver le verre** en profondeur.

Le *feu* n'a aucune action chimique sur le verre : il est **INCOMBUSTIBLE**.

L'**EAU** agit sur les *silicates* qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient **peu à peu opaque** ; le verre perd de sa transparence.

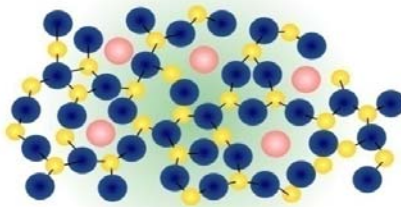
L'acide *carbonique* contenu dans l'**AIR** réagit avec les *silicates alcalins* ce qui donne un **dépôt blanchâtre** à la surface du verre.

Exposés à la lumière et aux *ultraviolets*, certains verres se **colorent** ou se **décolorent**.

Représentation atomique du verre: Silicium– Oxygène – Métal (ex: Sodium)

Le Sodium provoque la rupture de certaines liaisons chimiques de l'oxygène.

Cet affaiblissement des liaisons chimiques fait baisser la température de fusion (d'où son rôle de fondant).



4 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

| | |
|---|-------------------------------|
| MASSE VOLUMIQUE ρ | 2 700 kg/m³ |
| DENSITÉ (dépend des composants) $\Rightarrow 1 \text{ m}^3$ pèse 2,7 t \Rightarrow feuille d'un $1\text{m}^2 \times 1\text{mm}$ pèse 2,7 kg | 2,7 |
| DURETÉ (sur échelle de Mohs) Le verre est un matériau dur mais « fragile » dans le sens cassant. Seuls les diamants et le carbure de tungstène peuvent le rayer. Le plus dur est celui de Bohême, le plus tendre est le cristal. | 6,5 |
| IMPERMÉABILITÉ Bien qu'extrêmement imperméable, le verre reste poreux pour certains liquides, comme le kérosène. On peut cependant créer une texture poreuse par la mise en forme (inclusion de gaz) : c'est la <i>verre-mousse</i> . | |
| RESILIENCE (Résistance aux chocs) (<i>énergie nécessaire pour produire la rupture d'un échantillon</i>). On parle de « verre de sécurité » lorsqu'il réduit le risque de blessure, en cas de cassure (vitrages feuilletés, trempés, armés). | 1500 à 2500 Pa |
| RESISTANCE A LA COMPRESSION (très élevée) <i>Pour briser un cube de 1 cm d'arête, la charge nécessaire est de 10 t.</i> | > à 1000 MPa |
| TRANSPARENCE Le verre est transparent , mais il a un indice de réfraction* égal à 1,5 . | |

5 PROPRIÉTÉS THERMIQUES

Le réchauffement ou un refroidissement brutal d'un verre, à cause de sa faible conductivité thermique, entraîne des tensions provoquant des casses dites thermiques.

Sa mauvaise conductivité en fait un bon isolant thermique dans le bâtiment.

CONDUCTIVITÉ THERMIQUE 1.0 W/m.K

Quantité de chaleur traversant une paroi de 1 m² x 1 m d'épaisseur, pendant 1 s, avec une différence de température entre les parois 1 °C.

DILATATION THERMIQUE LINÉAIRE α 9 x 10⁻⁶/K

Elle s'exprime par un coefficient mesurant l'allongement par unité de longueur pour une variation de 1°C.

9 x 10⁻⁶//K pour un verre sodocalcique

5 x 10⁻⁶/K pour un borosilicate (Pyrex)

CAPACITÉ THERMIQUE MASSIQUE 720 J/kg/K

Quantité de chaleur nécessaire pour élever une masse de 1kg de 1°C.

RESISTANCE AU FEU MO/M1/M2

D'après la Réglementation Incendie des matériaux de construction:

- vitrages monolithiques : classés **M0** (Incombustibles).
- vitrages feuilletés: classés **M1** (Non inflammable) ou **M2** (Difficilement inflammable) selon leur composition.

CONDUCTIVITÉ ELECTRIQUE Résistivité: 10¹⁷ Ω. m

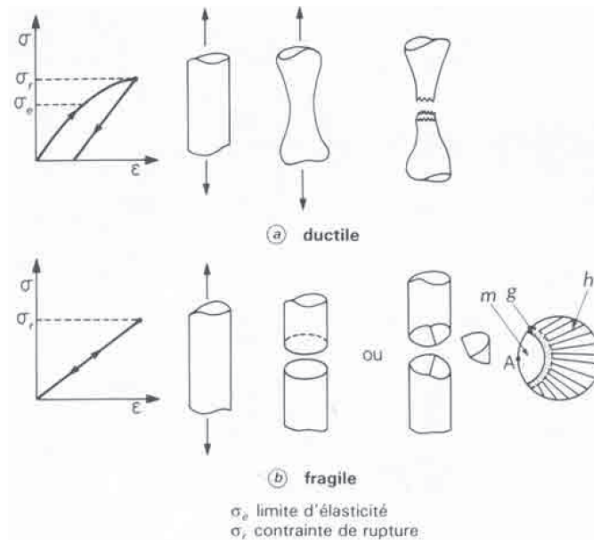
(température<100°C)

Le verre est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on l'utilise comme isolant électrique.

6 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

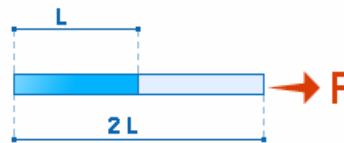
- *Elasticité*

Le verre est un matériau **fragile**, car si on lui applique un effort croissant, il se **casse brutalement**. Ses propriétés mécaniques dépendent fortement de son niveau de détérioration. Il est parfaitement **élastique** puisqu'il **ne présente pas de déformation permanente**



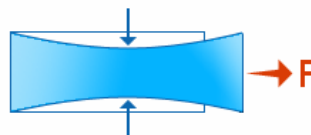
- **Module d'Young E** (ou module d'élasticité) : $7 \times 10^5 \text{ daN/cm}^2 = 70 \text{ GPa}$

Ce module exprime l'effort de traction F théorique pour allonger une éprouvette de verre au double de sa longueur initiale.



- **Coefficient de poisson γ** 0,20 à 0,22

Ce coefficient caractérise le rétrécissement de la section d'une éprouvette soumise à un allongement. C'est le rapport entre le **rétrécissement** et l'**allongement**.

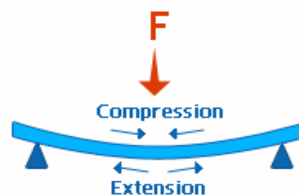


- **Résistance à la flexion**

Un vitrage plan soumis à un **effort de flexion** (effet du vent, de la neige, ...) a :

- une face en **compression**
- une face en **extension**.

Dans les calculs de dimensionnement, les **contraintes à la rupture** sont minorées par des **coefficients de sécurité** prenant en compte la présence de **micro-fractures** (transport, manipulation, stockage, agression extérieure).



| CONTRAINTES A LA RUPTURE | |
|---------------------------------|--------------|
| Vitrage courant recuit | 40 MPa |
| Vitrage trempé | 120 /200 MPa |
| CONTRAINTES DE TRAVAIL | |
| Vitrage recuit vertical | 20 MPa |
| Vitrage recuit horizontal | 10 MPa |
| Vitrage trempé vertical | 50 MPa |
| Vitrage trempé horizontal | 25 MPa |

- **Résistance à la traction**

La contrainte théorique de rupture du verre à l'extension est de **40 à 50 MPa**. Cependant les défauts à la surface du verre entrent fortement en compte dans le calcul de contraintes.

- **Loi de Weibull – loi du maillon le plus faible**

La résistance à la traction est difficile à déterminer à cause de la présence des défauts de surface

Les défauts ne pouvant pas être connus de manière déterministe : on associe à un niveau de contrainte, une probabilité de rupture (Loi de Weibull : théorie du maillon le plus faible).

La probabilité de rupture vaut :

$$P_f = 1 - \exp \left[- \frac{1}{S_0} \int_S \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0} \right)^m ds \right]$$

avec :

P_f : probabilité de rupture

σ : contrainte appliquée

S_0 : surface de référence

σ_0 ; m : paramètres de Weibull

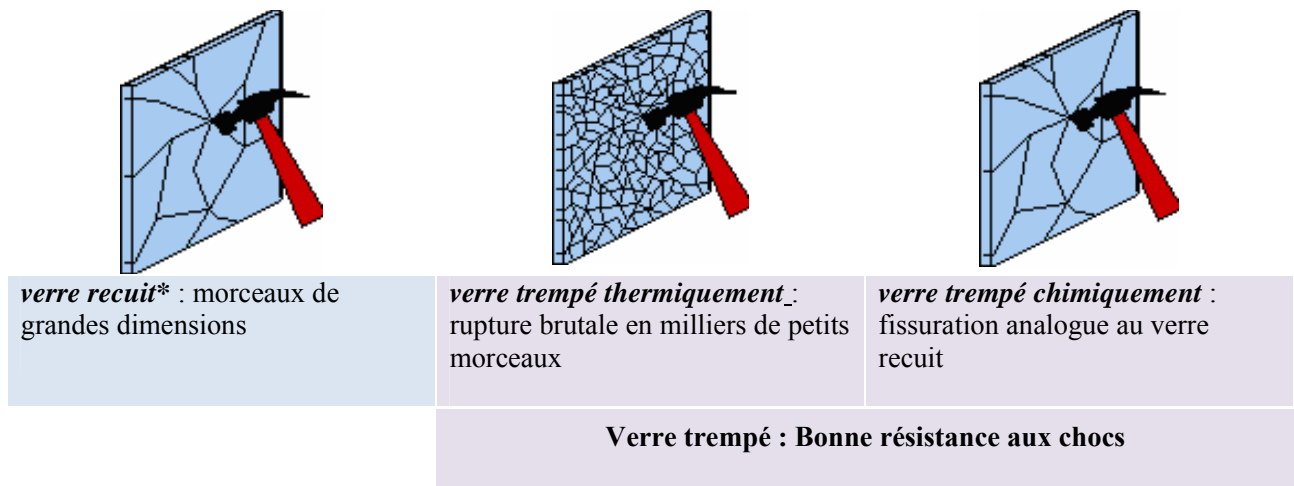
Cette loi donne la probabilité de rupture du verre en fonction des dimensions de l'élément et de son état de contrainte

- **Résistance à la compression**

- Très grande
- Beaucoup plus élevé que la résistance à la traction
- Ne constitue pas un critère dimensionnant

- **Résistance aux chocs mécaniques**

C'est un point faible du verre (ténacité est assez faible ($0.75 \text{ MPa.m}^{0.5}$))



* Le **recuit** d'une pièce est un procédé correspondant à un cycle de chauffage, maintien en température puis refroidissement permettant de modifier les caractéristiques

- **Résistance aux Chocs thermiques**

- Le verre recuit est très sensible aux chocs thermiques
- La rupture est brutale quand la différence de température atteint 60 K
- La trempe permet de porter ce seuil d'écart à 200 K environ
- La fissuration par choc thermique présente une physionomie irrégulière

- **Viscosité**

Ce qui définit plus précisément un « verre » est son état physique et le processus qui y mène.

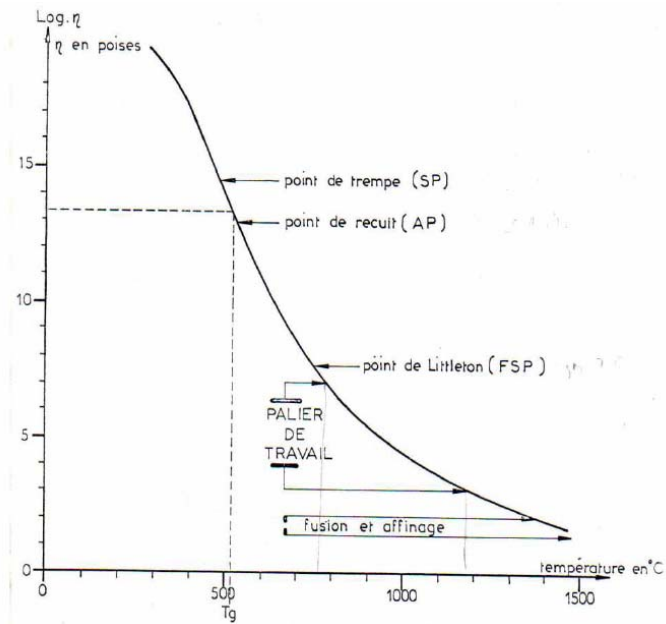
En thermodynamique, on considère que le verre est obtenu à partir d'une phase liquide surfondue solidifiée au point de transition vitreuse.

La viscosité d'un matériau caractérise sa capacité de coulabilité

La viscosité est certainement la propriété la plus importante du verre, au niveau de sa fusion, de sa fabrication et de sa recuisson

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

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.



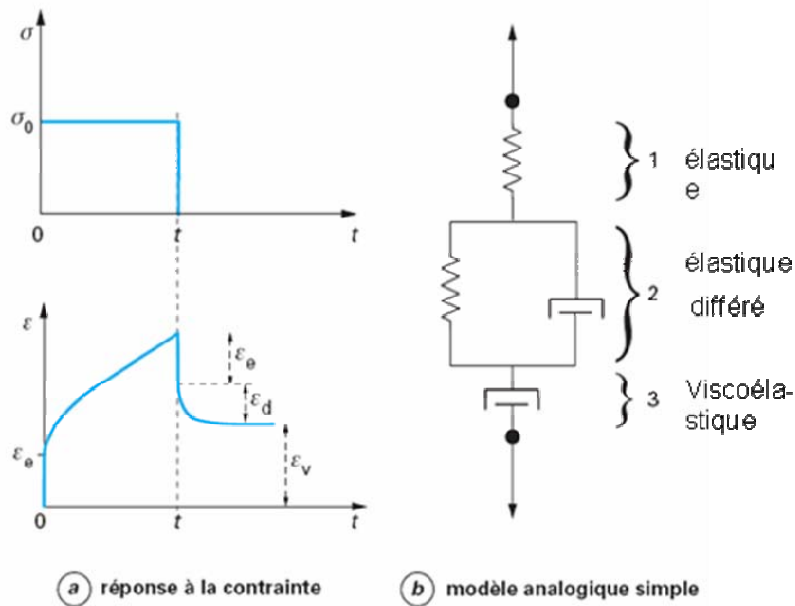
Viscosité ($\log \eta$) en poises ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) du verre sodocalcique

• **Viscoélasticité**

Dans le domaine de transition vitreuse (le verre devient progressivement plus visqueux et passe de l'état liquide à l'état solide), le comportement du verre est viscoélastique.

Si on soumet brusquement un verre, dans son domaine viscoélastique, à une contrainte de tension uniaxiale constante σ_0 , la réponse peut être décomposée en :

- une réponse élastique instantanée ϵ_e de valeur finie indépendante du temps ;
- une réponse élastique différée ϵ_d qui dépend du temps ;
- une réponse visqueuse ϵ_v qui dépend du temps et qui est inversement proportionnelle à la viscosité du milieu.

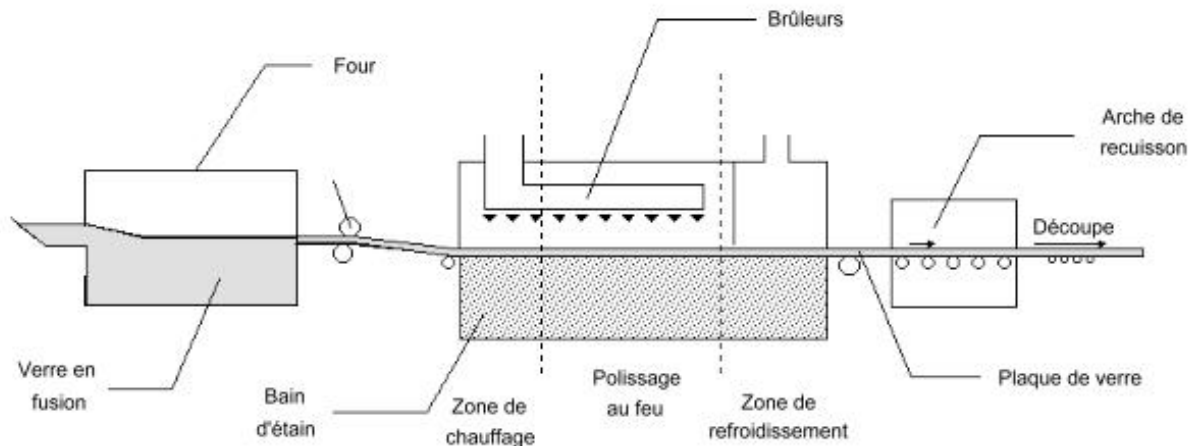


7 PRINCIPE DE FABRICATION - PROCÉDE FLOAT-GLASS

En 1959, la firme anglaise Pilkington met au point un procédé révolutionnaire de verre flotté, qui permet d'obtenir des vitres et des glaces d'une dimension et d'une qualité exceptionnelles.

C'est le mode de fabrication le plus utilisé (automobile, bâtiment, vitrage, miroiterie...).

Ce procédé est basé sur l'utilisation de l'étain fondu qui est le seul liquide pouvant soutenir le verre sans réagir avec lui et ayant une tension de vapeur suffisamment faible.



7.1 La préparation de la composition

La première étape consiste à doser et à mélanger les matières premières destinées à la fusion.

Des morceaux de verre recyclé, le calcin, provenant du système de découpe des plaques sont ajoutés à la composition de matières premières. Chaque lot contient environ 10 à 30% de calcin.



Stockage de calcin

7.2 La fusion dans le four

La composition est chauffée par des brûleurs au gaz naturel à environ 1650°C. Les matières premières sont tout d'abord fondues, la pâte de verre brute est ensuite dégazée puis mécaniquement homogénéisée pour être finalement refroidie lentement dans la partie aval du four appelée le bassin de travail.

Le verre, chimiquement et thermiquement homogène quitte alors le four et se déverse avec un débit contrôlé dans le bain d'étain pour y prendre ses caractéristiques géométriques.



L'enfourneuse alimente le four de fusion dont la température atteint 1650 °C.

7.3 Le bain d'étain

A la sortie du four, le verre fondu est dirigé dans un canal d'où il coule sur un bain d'étain en fusion.

Le bain est un système étanche avec une atmosphère contrôlée composée d'azote et d'hydrogène.

Le bain mesure environ 60m de long sur 8m de large avec une vitesse de défilement pouvant atteindre jusqu'à 25 m/min. Le bain contient près de 200 tonnes d'étain pur, fondu à une température moyenne de 800 °C.

Le verre flotte sur l'étain car sa densité est inférieure à celle du métal (d'où le nom du procédé). On a alors un long ruban continu.

On obtient une feuille de verre aux faces parallèles car il y a absence de toute contrainte extérieure. Le feu polit la face supérieure tandis que l'étain en fusion polit la face inférieure. L'épaisseur des feuilles varie entre 1,1 et 19 millimètres.



La pâte de verre se déverse sur le bain d'étain fondu, dont elle reste séparée pendant le formage.

Le bain d'étain possède 3 zones (zone de chauffage, polissage au feu, zone de refroidissement) et à chaque zone correspond une température qui est importante pour la qualité du verre.

La zone de refroidissement est importante car, à la sortie du bain d'étain, le verre doit être suffisamment dur pour être manipulé par les rouleaux sans que ceux-ci ne laissent des marques sur la face inférieure.

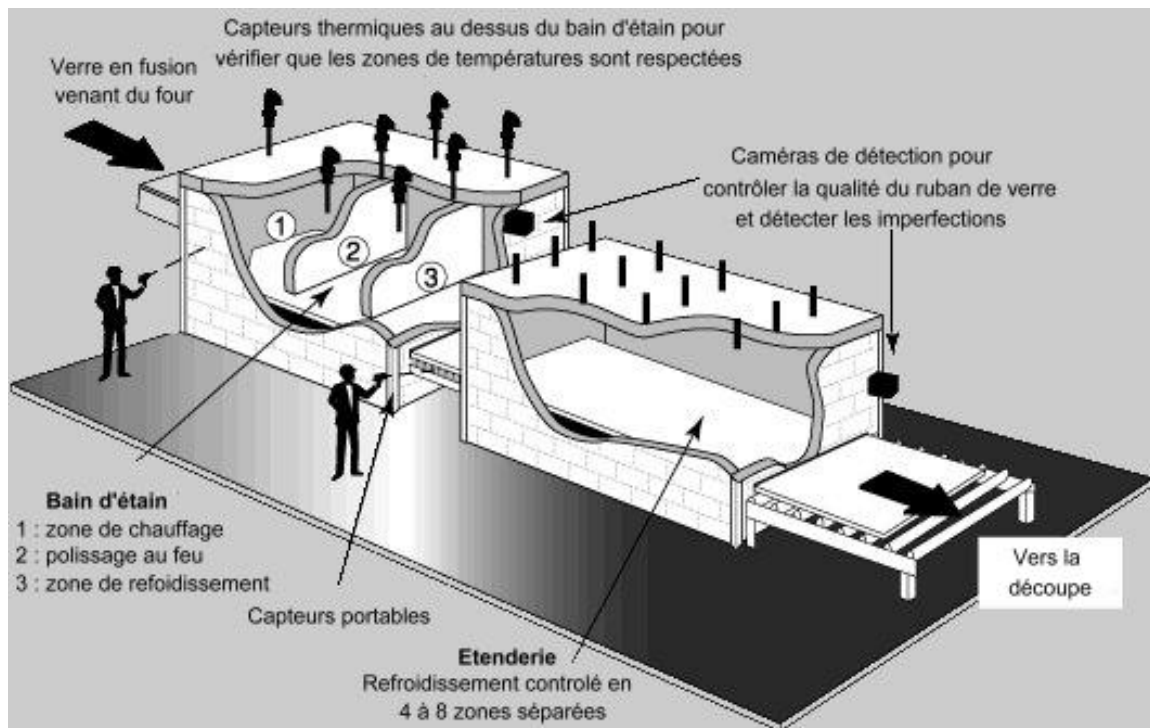
Le bain d'étain doit donc **être assez long** pour que la température de l'entièreté du ruban de verre diminue de 1050°C à 600°C.

Le bain d'étain doit aussi **être lisse et plan** pour que le ruban de verre aie des faces parallèles. Sinon il se forme des imperfections dans le verre qui détériorent sa qualité et le fragilisent. C'est pourquoi l'atmosphère à l'intérieur est neutre ou faiblement réductrice pour empêcher l'oxydation de l'étain. Il faut aussi que la tension superficielle soit constante car l'épaisseur de la feuille en dépend.

7.4 Recuisson et refroidissement contrôlé

Le ruban de verre quitte le bain à une température de 600° C à laquelle il est suffisamment solide pour être transporté sur des rouleaux. Il ne peut toutefois se refroidir librement à l'air libre sans que le refroidissement différentiel entre les faces externes et le cœur du ruban n'engendrent des contraintes pouvant entraîner sa rupture spontanée. Il est donc nécessaire de réduire la température du ruban de verre jusqu'à la température ambiante, d'une façon progressive et contrôlée (la recuisson) en fonction de son épaisseur.

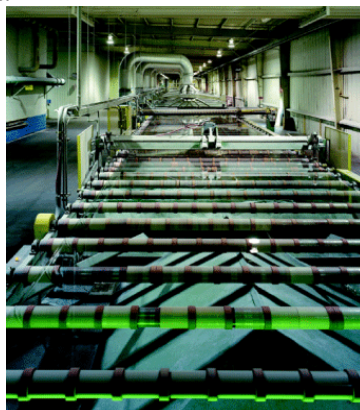
Ceci est effectué dans un tunnel d'environ 120 m de long sur 6 m de large appelé **étenderie** (voir Figure). Des résistances de chauffage et des ventilateurs permettent un contrôle précis du profil de température sur toute la largeur du ruban de verre. Le verre est transporté sur des rouleaux entraînés par un système mécanique.



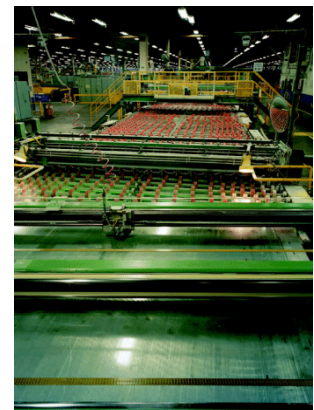
7.5 Ligne de découpe et d'emballage

En sortie de l'étenderie, le verre passe sous un système d'inspection en ligne permettant la détection d'éventuels défauts. Les bords du ruban sont alors détachés puis le ruban est découpé automatiquement en plaques de différentes dimensions. Le verre non-utilisé, le calcin, est recyclé dans la composition. Les plaques de verre reçoivent un traitement leur permettant d'être stockées sans dommage avant d'être levées et puis empilées. Les plaques de verre déposées sur des chevalets sont alors transférées vers l'entrepôt de stockage ou pour expédition au client.

Ruban de verre de verre en sortie d'étenderie avant le système d'inspection des défauts



Le verre passe sous des systèmes automatiques de découpe.



7.6 Les avantages du procédé

La technique du flottage permet d'obtenir des feuilles parfaitement planes et transparentes tout en évitant les opérations de doucissage et de polissages nécessaires avec les autres procédés.

Il s'agit là d'un gain financier important car ces opérations sont coûteuses en matériel, en matières premières et en énergie. Cela constitue également une accélération du processus de fabrication, puisque la vitesse de sortie est entre 5 et 10 fois plus élevée que dans le cas de l'étirage.

C'est donc un procédé très efficace et c'est pourquoi il s'est si vite installé au rang de standard pour la fabrication du verre plat.

8 LA TREMPE DU VERRE

Un verre plat se brise facilement lorsqu'il subit des contraintes de flexion.



Un verre plat devient un produit de sécurité lorsqu'il subit un processus de **trempe**. Celle-ci le rend cinq fois plus résistant à la flexion et aux chocs thermiques.

Il existe deux possibilités de traitement :

- 1) la trempe thermique,
- 2) la trempe chimique.

8.1 Comportement : Verre recuit et verre trempé

Poutre en béton reposant sur 2 appuis, sous une pression P , la poutre fléchit, la partie supérieure x est en compression, la partie inférieure y en extension.

Comme le béton est plus résistant à la compression qu'à l'extension, la rupture se produit en y

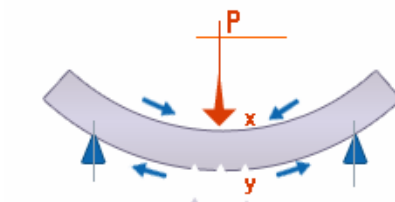


Figure a

x : partie en compression
 y : partie en extension

La même poutre, percée pour recevoir une tige d'acier, serrée aux extrémités à l'aide de boulons. La poutre ne casse pas car, la partie supérieure n'étant qu'un peu plus comprimée, la partie inférieure se décompresse. Il faut que la décompression annule la compression due à la barre d'acier pour avoir la rupture.

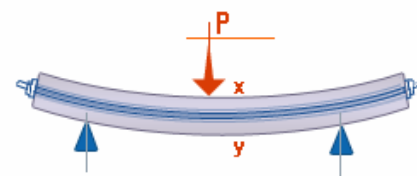


Figure b

8.2 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.

Quand les régions internes se contractent, 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.



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 « recuisson » (montée en température puis refroidissement lent).

8.3 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). compression très élevée sur une très faible épaisseur de la surface.

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.

9 PRODUITS VERRIERS DANS LE BÂTIMENT

Les verres à vitres :

- Travaux classiques du bâtiment.
- Les verres trempés sont employés pour l'éclairage des ateliers, des bureaux, des immeubles



Nouvelle coupole du Reichstag à Berlin

La glace

- Pour les installations de magasins, en grands panneaux de façade de bâtiment
- Elle peut être transparente, teintée dans la masse, réfléchissante, filtrante,...
- Le verre ou la glace trempée servent pour les portes (avec ou sans encadrement), les cloisons intérieures, les fenêtres sans encadrement, les marches d'escalier...



Verre trempé pour façade



- **Les briques, pavés et tuiles**

On trouve des briques pleines, creuses, pour la confection de cloisons verticales intérieures ou extérieures, de dalles horizontales, de plancher

Le béton translucide est une association verre-mortier



Briques et pavés de verre



Béton translucide

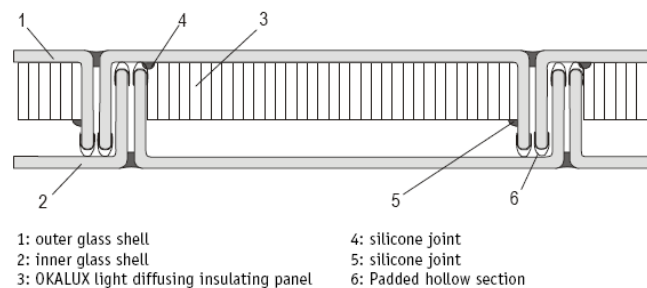
- **Verres profilés ou ondulés**

On fabrique des verres profilés souvent en forme de U et pouvant être armés

Les plaques de verre ondulé : une face peut être lisse et l'autre striée. On les utilise en toiture, en shed, en bardage. Elles sont raccordées à des tôles.



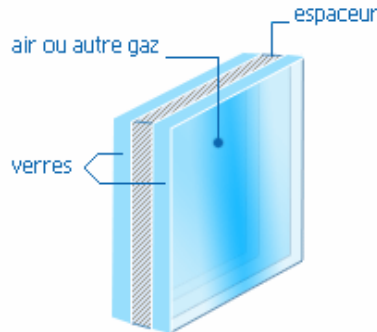
Profilés de verre en forme de U



Assemblage des profilés en U

• **Produits composés : vitrages**

Par association de 2 ou plusieurs verres ou glaces, on réalise des vitrages isolants (thermique ou acoustique)
Une lame d'air de 6 à 12 mm sépare les vitrages et des joints plastiques ou métalliques assurent l'étanchéité.



L'air peut être remplacé par :

- l'**argon** employé fréquemment et plus performant que l'air
- le **krypton et le xenon** plus performants que l'air et l'argon
-

L'ensemble est maintenu par un cadre périphérique (en acier doux, en aluminium, ...)

Le vitrage isolant doit répondre à deux conditions essentielles :

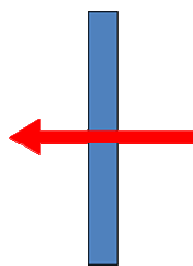
1. rester transparent
2. rester isolant

Remarque : Performances thermiques des vitrages isolants

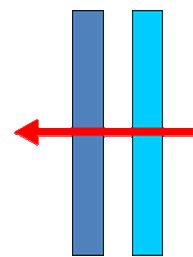
L'isolation thermique d'un vitrage est caractérisée par le coefficient **U**; plus il est faible, meilleure est la performance thermique.

Il représente la quantité de chaleur, exprimée en Watt (W), qui traverse une paroi d'une surface de 1 m² quand il y a un écart de température de 1°K entre les ambiances séparées par celle-ci [coefficient U en W/(m².°K)].

Le coefficient U dépend des caractéristiques de l'espace de gaz (nature et épaisseur), des composants verriers et de la nature de l'intercalaire



Vitrage simple 6 mm
U=5.7



Double vitrage
6-12-6 mm
U=3.1 (air) U=2.8 (argon) U=2.6
(krypton)

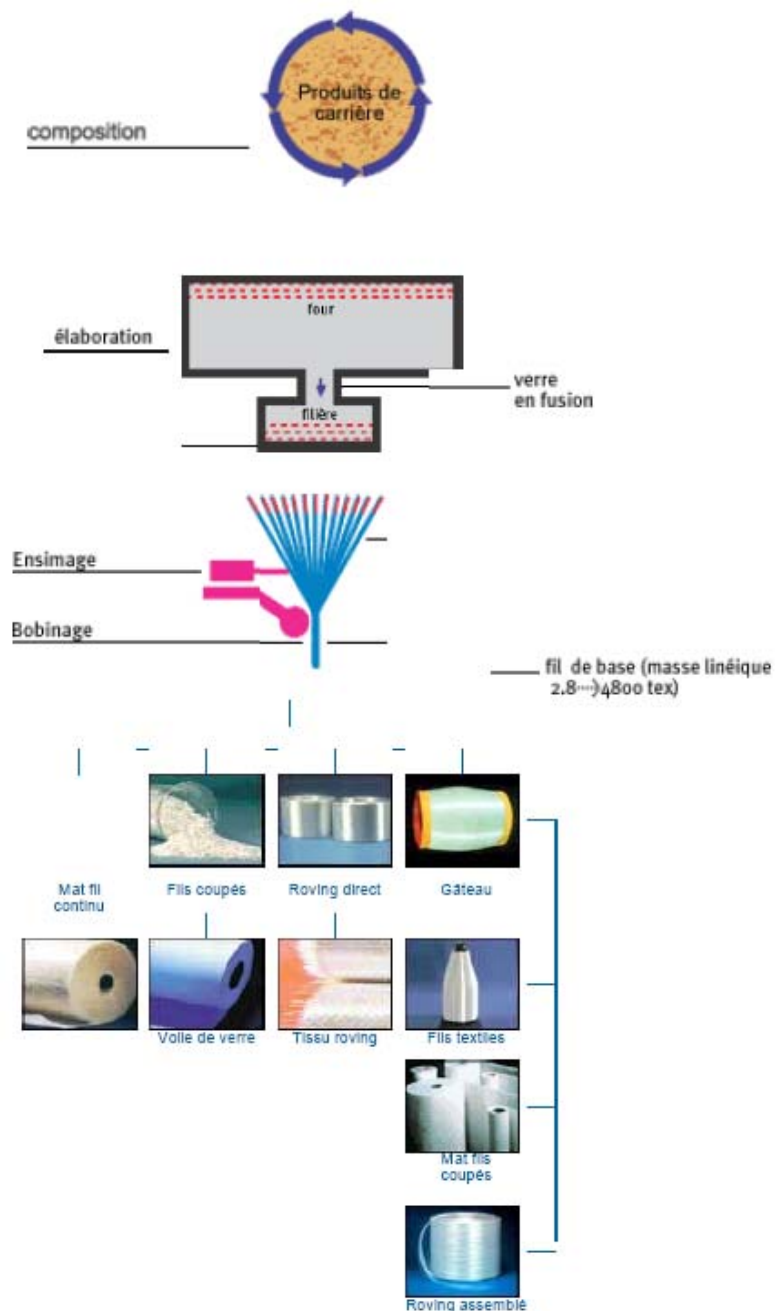
Laine de verre

Sont surtout utilisées pour l’isolation thermique (toitures, sols, murs,...)

La fibre de verre est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

Fabrication de fibre de verre

1. Composition (mélange des oxydes)
2. Fusion (1500°C)
3. Fibrage : 1 à 2 mm (1250°C)
4. Etirage : diamètre de 3 à 20 mm
5. Ensimage (traitements de surface des fibres)
6. Bobinage
7. Tissage



Conservatoire National des Arts et Métiers

Matériaux de construction CCV015

Enseignant responsable : W. LARBI

Travaux Dirigés n°4

Le verre

1. Le verre est un matériau fragile ou ductile (expliquer pourquoi) ?
2. Quelle est la valeur du module de Young du verre.
3. Quelle est la matière première qui sert à la fabrication du verre ?
4. Le verre peut-il se recycler à l'infini ?
5. Quel sont les rôles de ces composants dans la composition générale du verre :
 - *Les formateurs,*
 - *Les fondants,*
 - *Les stabilisants.*
6. Pourquoi trempe-t-on le verre ?
7. Donner les principales propriétés physiques du verre.
8. Définir la transition vitreuse du verre.
9. Quel est le comportement du verre dans le domaine de transition vitreuse ?
10. Par quel ajout le verre est coloré ? Donner quelques exemples.
11. Donner quelques exemples d'utilisation du verre trempé dans le bâtiment.
12. L'air peut être remplacé par quels produits dans le double vitrage ?

Le verre

1. Le verre est un matériau fragile ou ductile (expliquer pourquoi) ?

Matériau fragile

2. Quelle est la valeur du module de Young du verre.

$E = 70 \text{ GPa}$

3. Quelle est la matière première qui sert à la fabrication du verre?

Le verre est élaboré à partir d'un mélange de sable, de carbonate de sodium et de chaux ou par récupération de débris de verre broyés. Les matières sont fondues à une température voisine de 1550°C . La fusion est suivie d'une étape d'affinage qui permet d'éliminer les bulles, puis d'une autre étape, la braise, qui permet de ramener le verre à la température du façonnage, opération effectuée pendant qu'il est encore plastique. Enfin une étape de recuisson du verre permet de diminuer sa fragilité. Cette dernière opération consiste à maintenir le verre dans un four très chaud, puis laisser le four se refroidir lentement.

4. Le verre peut-il se recycler à l'infini ?

Le verre se recycle à l'infini.

Le recyclage du verre sert à protéger l'environnement : il diminue le contenu des poubelles, il évite de prendre dans la nature de nouvelles matières premières, il économise l'énergie (car le calcin fond à une température plus basse que les matières premières nécessaires à la fabrication du verre).

5. Quel sont les rôles de ces composants dans la composition générale du verre :

*Les formateurs,
Les fondants,
Les stabilisants.*

Certains éléments comme le **silicium** et le **bore** peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène (oxyde de ...) et par élévation à une très haute température. Ces oxydes sont appelés oxydes « **formateurs** » car ils forment le squelette du verre.

On les combine avec d'autres éléments dits « **modificateurs** » qui sont :

- Les « **fondants** » qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice = 1730°C).
- Les « **stabilisants** » qui modifient les propriétés physiques du verre.

6. Pourquoi trempe-t-on le verre ?

Pour améliorer ces propriétés de résistances mécaniques et thermiques

7. Donner les principales propriétés physiques du verre.

La transparence
L'imperméabilité

...

8. Définir la transition vitreuse du verre.

Le verre devient progressivement plus visqueux et passe de l'état liquide à l'état solide

9. Quel est le comportement du verre dans le domaine de transition vitreuse ?

Comportement viscoélastique

10. Par quel ajout le verre est coloré ? Donner quelques exemples.

La couleur est donnée en ajoutant des mélanges d'oxydes métalliques.

- L'oxyde de fer par, exemple, absorbe le rouge et donne le vert.
- Bleu = oxyde de cobalt, de manganèse.
- Jaune = chrome, argent.
- Rouge = oxyde de cuivre.
- Violet = oxyde de manganèse.
- Rose et rouge rubis = l'or.
- jaune orangé à rouge = le sélénium.

11. Donner quelques exemples d'utilisation du verre trempé dans le bâtiment.

Le verre ou la glace trempée servent pour les portes (avec ou sans encadrement), les cloisons intérieures, les fenêtres sans encadrement, les marches d'escalier...

12. L'air peut être remplacé par quels produits dans le double vitrage ?

L'air peut être remplacé par :

- l'**argon** employé fréquemment et plus performant que l'air
- le **krypton** et le **xénon** plus performants que l'air et l'argon

CHAPITRE 8

Le bois

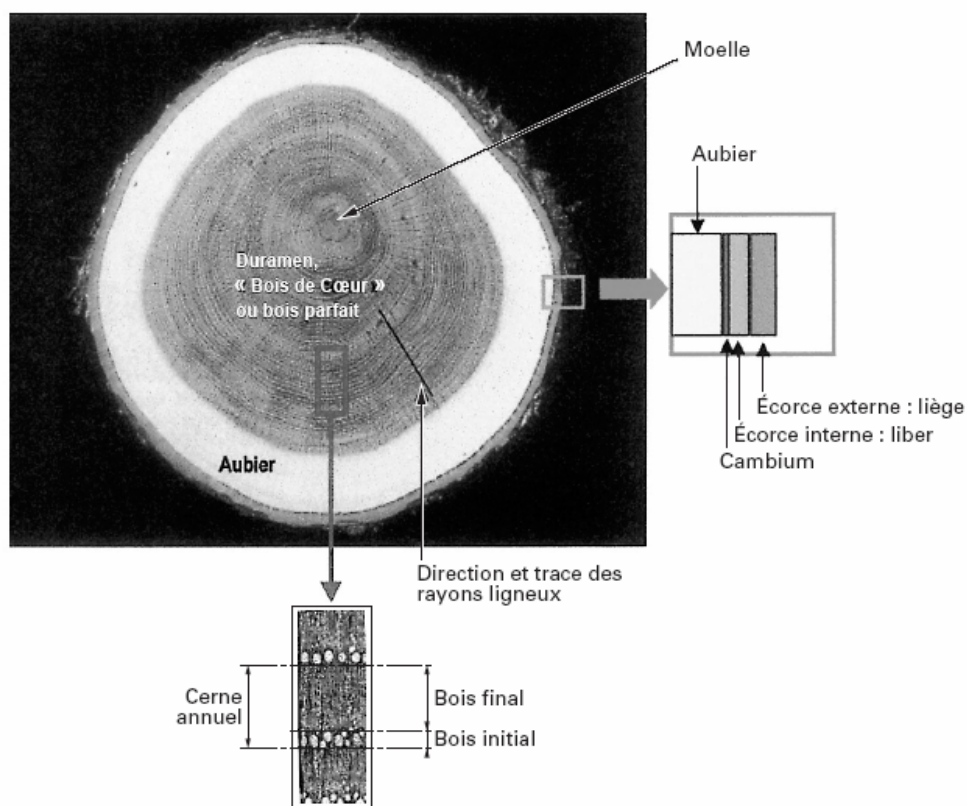
| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | DESCRIPTION | 2 |
| 2 | PROPRIETES MECANIQUES | 4 |
| 3 | PROPRIETES PHYSIQUES | 7 |
| 3.1 | HUMIDITE | 7 |
| 3.2 | DENSITE | 8 |
| 3.3 | TEMPERATURE..... | 9 |
| 4 | COMPORTEMENT ET RESISTANCE DU BOIS AU FEU | 9 |
| 4.1 | LE POUVOIR CALORIFIQUE DU BOIS | 9 |
| 4.2 | LA REACTION DU BOIS AU FEU | 10 |
| 4.3 | LA VITESSE DE COMBUSTION DU BOIS..... | 11 |
| 4.4 | LA RESISTANCE DU BOIS AU FEU | 11 |
| 5 | DURABILITE ET PRESERVATION | 11 |
| 5.1 | LES CHAMPIGNONS | 12 |
| 5.2 | LES INSECTES A LARVES XYLOPHAGES | 12 |
| 5.3 | LE TRAITEMENT DU BOIS | 14 |
| 6 | UTILISATION DU BOIS EN CONSTRUCTION | 15 |
| 6.1 | LE BOIS MASSIF | 15 |
| 6.2 | LES PRODUITS DERIVES DU BOIS | 16 |

1 DESCRIPTION

Le bois est un tissu végétal, assimilable à un matériau composite, formé de cellules, de forme carré ou circulaire, composées principalement de cellulose.

Chimiquement, le bois se compose presque toujours de 50% de carbone, 42% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% d'éléments divers.

La coupe transversale d'un tronc d'arbre fait apparaître trois, parfois quatre parties concentriques, de l'extérieur vers l'intérieur :



- **L'écorce** : forme l'enveloppe extérieure
- **L'aubier** : couche peu épaisse de couleur claire correspondant à la partie en croissance (bois jeune)
- **Le bois de cœur** : partie principale plus dense et plus dure, de couleur plus foncée que celle de l'aubier
- **La moelle (parfois!)** : partie molle, de faible diamètre, située au centre
- Les espèces végétales donnant du bois (essences) sont partagées en deux grands groupes

Les espèces végétales donnant du bois (essences) sont partagées en deux grands groupes

1. **Les feuillus**

Sont des arbres produisant des feuilles bien développées.

Exemples : le chêne, le mûrier, le peuplier.

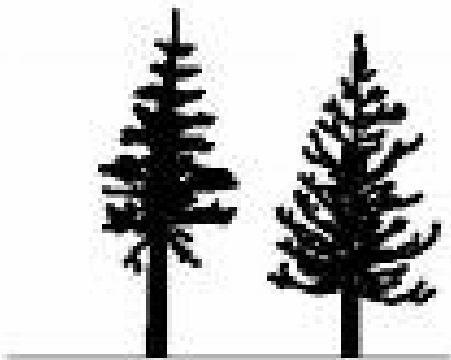


2. **Les résineux (ou conifères)**

Sont des arbres dont les feuilles sont pour la plupart étroites et persistantes.

Ce sont les aiguilles vertes foncées qui donnent une couleur sombre aux flancs des montagnes.

Forme d'un cône.

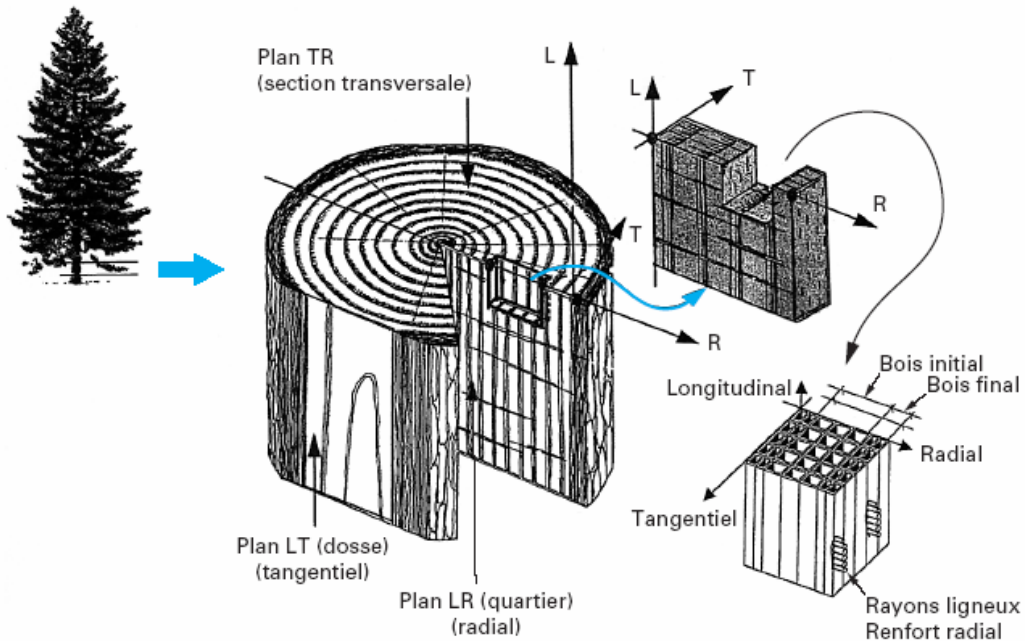


| <i>Le hêtre</i> | <i>Le chêne</i> | <i>Le pin sylvestre</i> | <i>L'épicéa</i> | <i>Le sapin pectiné</i> |
|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|



Dans l'étude ou la reconnaissance d'un bois, les observations doivent se faire selon trois plans parfaitement définis :

- le plan transversal (L)**, perpendiculaire à l'axe de l'arbre (bois de bout) ;
- le plan radial (R)**, parallèle à l'axe et passant par le centre structurel de l'arbre (débit sur quartier) ;
- le plan tangentiel (T)**, tangent aux cernes de croissance (débit sur dosse).



Le bois est un matériau composite multicouche. Cette structure confère au matériau un caractère anisotrope et hétérogène.

Il résulte de cette orthotropie que la caractérisation complète du bois au sens de la mécanique repose sur la détermination de :

- 3 modules d'élasticité : E_L, E_R, E_T
- 3 modules de cisaillement : G_{LR}, G_{LT}, G_{RT}
- 6 coefficients de Poisson : $\gamma_{RT}, \gamma_{LT}, \gamma_{LR}, \gamma_{TR}, \gamma_{RL}, \gamma_{TL}$.

2 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Le bois étant un matériau composite, sa résistance dépend :

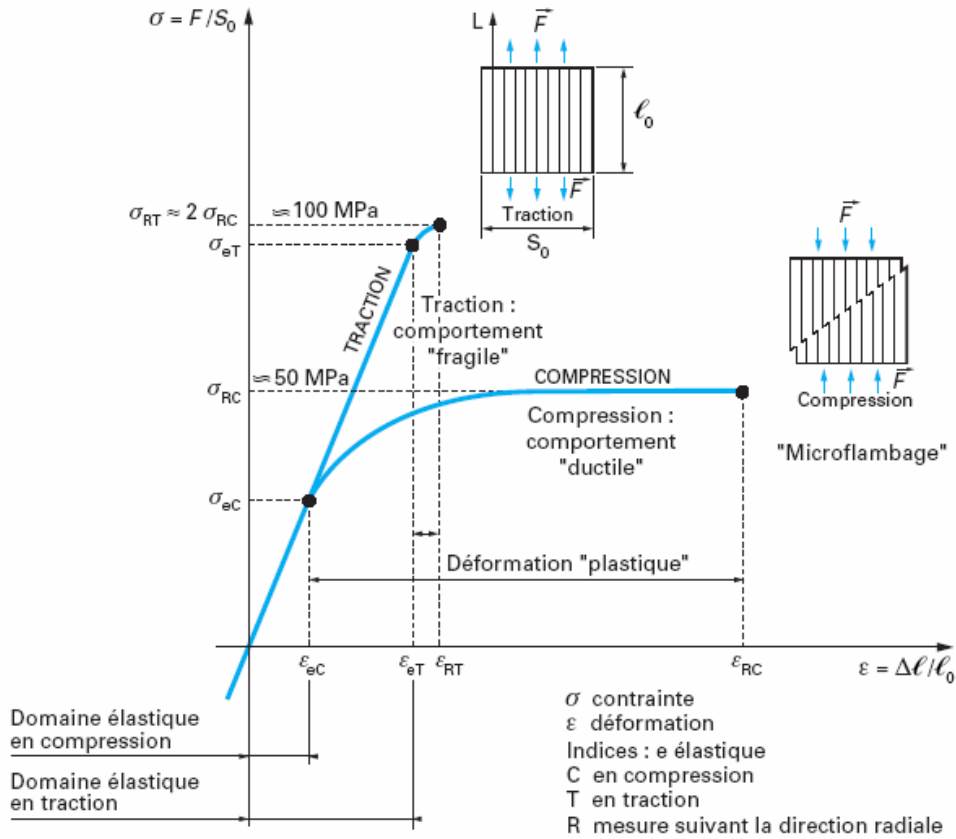
- Du sens des efforts exercés
- De sa teneur en eau
- De sa densité
- bien évidemment, de sa nature
- On essaie les bois à 15 % d'humidité (tenir compte de la teneur en eau réelle : plus elle est élevée, plus la résistance du bois est faible)

La résistance du bois est d'autant plus forte que la densité est plus élevée

Comportement du bois en traction compression dans la direction longitudinale :

- Caractère fragile en traction
- Caractère ductile en compression

En compression les éléments tubulaires (sens L) sont soumis à du micro-flambement expliquant les différences de résistance traction / compression.

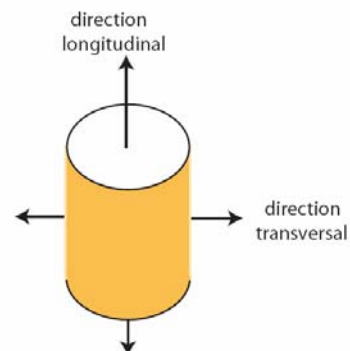


On classe la résistance mécanique du bois en fonction du sens de la sollicitation

| Sens par rapport aux fibres | Résistance | |
|-----------------------------|------------------|---------------|
| | À la compression | À la traction |
| longitudinal | Bonne | Très bonne |
| transversal | Faible | Quasi nulle |

Contraintes admissibles pour dimensionner les pièces en bois :

- La compression axiale C_a
- La traction axiale T_a
- La flexion statique F
- Le cisaillement longitudinal C
- La traction transversale (sans cisaillement) T_t
- La compression transversale C_t



Contraintes admissibles en MPa pour le chêne et pour les résineux pour une teneur en humidité de 15%

| Nature de contrainte | Contraintes de base théoriques pour bois sans défaut | | Catégorie I | |
|---------------------------|--|----------|-------------|----------|
| | Chêne | Résineux | Chêne | Résineux |
| Compression axiale | 19 | 18 | 13.6 | 13.1 |
| Traction axiale | 43.5 | 36.3 | 16.4 | 15.2 |
| Flexion statique | 21.2 | 20.2 | 14.7 | 14.2 |
| Cisaillement longitudinal | 2.7 | 2.2 | 2.2 | 1.6 |
| Traction transversale | 1.6 | 1.2 | 1.3 | 0.9 |
| Compression transversale | 5.4 | 3.0 | 4.9 | 2.7 |

Ces valeurs sont normalisées et servent de base aux règles françaises de calcul et de conception de charpente en bois.

Résistances à la rupture en MPa (teneur en humidité 15%)

| Nature de contrainte | Bois résineux | | | Bois feuillus | | | |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|---------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | Légers Sapin, épicéa | Mi-lourds Pin, orégon | Lourds mélèze | Tendres peuplier | Mi-durs Chêne, hêtre | Durs Chêne dur, chêne | Très durs Bois exotiques |
| Compression axiale | 30-40 | 35-45 | 40-60 | 25-35 | 40-60 | 50-70 | 60 |
| Compression transversale | 5-7 | 7-9 | 10 | 8-9 | 10-12 | 15-20 | 25 |
| Traction axiale | 100 à 120 | | | 80 à 120 | | 100 à 150 | |
| Traction transversale | 2 à 3 | | | 2 à 3 | | 4 à 6 | |
| Cisaillement | 3 à 6 | | | 4 à 6 | | 6 à 10 | |
| Module d'élasticité longitudinale | 8 à 12000 | | | 8 à 12000 | | 12000 à 15000 | |

Résistance dans le sens des fibres :

- Le bois résiste 2 à 3 fois mieux en traction qu'en compression
- En compression, les fibres s'écartent les unes des autres et ont tendance à flamber

Résistance dans le sens perpendiculaire au sens des fibres

- Le bois résiste mal à des efforts de traction ou de compression

Module d'élasticité du bois

- Est plus élevé en traction qu'en compression
- Diminue lorsque la température croît
- Diminue lorsque l'humidité augmente
- La flèche augmente et peut doubler de valeur lorsque le bois est humide et chaud

Le bois résiste bien aux chocs et aux vibrations → Utilisation dans les zones sismiques.

Comparaison des propriétés mécaniques du bois avec celles d'autres matériaux de construction :

- Poteaux porteurs
- On recherche le matériau le plus léger (facilité de mise en œuvre), résistant en compression et au flambement charge limite F, provoquant le flambement

$$F = k\pi^2 \frac{EI}{L^2}$$

- Pour une géométrie de section droite du poteau, à partir de la densité d, la masse du poteau prend la forme :

$$m = k' \frac{d}{\sqrt{E}} L^2 \sqrt{F}$$

- Cette expression revient à rechercher pour m minimal, un rapport \sqrt{E} / d qui soit maximal. Ce rapport représente alors le critère de qualité pour un matériau mis en œuvre sous forme de poteau.

Critères de performance des matériaux

| Matériaux | Module d'élasticité E (MPa) | Densité d | Critère de qualité pour une colonne \sqrt{E}/d |
|-------------------------------|-----------------------------|------------|--|
| Acier | 210 000 | 7,8 | 58 |
| Aluminium | 75 000 | 2,6 | 105 |
| Béton | 11 500 | 2,6 | 41 |
| Matériau composite artificiel | 75 000 | 1,5 | 182 |
| Résineux | 10 000 | 0,4 | 250 |
| Feuillus | 13 000 | 0,7 | 162 |

3 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

3.1 Humidité

C'est la quantité d'eau contenue dans le bois.

Degrés d'humidité $H = \frac{m_H - m_S}{m_S} * 100$ (m_H : masse à l'état humide ; m_S : masse à l'état sec)

Le degré d'humidité référence est 15 %.

En fonction de la température et surtout de l'humidité de l'air ambiant, le bois se stabilise à une humidité d'équilibre, dite équilibre hygroscopique :

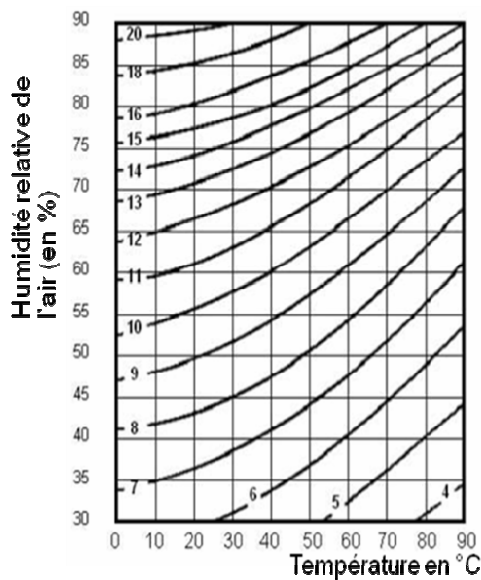
- à 20 °C et à 70 % d'humidité relative de l'air (HR), ce qui correspond à un équilibre hygroscopique du bois d'environ 13 %
- Entre 0 et 5 °C et 85 % HR, ce qui correspond à un équilibre hygroscopique du bois de l'ordre de 19 %.
- un ouvrage en bois situé à l'extérieur (fenêtres, volets...) verra son humidité tendre vers 13 % en été, et vers 19 % en hiver
- Pour que les variations dimensionnelles du bois soient minimales,

Il faut que son humidité de mise en œuvre se situe entre 15 et 16 %.

Qualifications normalisées des bois en fonction du taux d'humidité (NF B51-002)

| Taux d'humidité | Qualification |
|--|---------------------|
| Au-delà du point de saturation des fibres (30 %) | Bois vert |
| De 30 à 23 % | Bois mi-sec |
| De 22 à 18 % | Commercialement sec |
| De 17 à 13 % | Bois sec à l'air |
| En dessous de 13 % | Desséché |
| 0 % | Anhydre |

Afin d'éviter que le bois ne subisse des retraits après mise en œuvre, il est indispensable de le sécher avant tout usinage et utilisation en construction et de mettre le bois en œuvre au plus près de ce qui sera son humidité d'équilibre.



Cette courbe permet de déterminer le taux d'humidité du bois en fonction de la température et du taux d'humidité de l'air ambiant

3.2 Densité

C'est le paramètre le plus important pour caractériser un bois

Le bois est un matériau de construction relativement léger, par rapport aux matériaux de construction courants

La densité du bois varie fortement en fonction de son degré d'humidité ; elle dépend de l'essence
 On l'exprime normalement pour un taux d'humidité égal à 15%
 Elle varie pour les résineux de 400 à 900 kg/m³
 Elle varie pour les feuillus de 350 à 900 kg/m³

3.3 Température

Le bois est tout à la fois :

- un matériau combustible,
- mauvais conducteur thermique,
- à faible dilatation thermique
- au comportement mécanique hautement sécurisant en cas d'incendie dans les constructions

Coefficient de dilatation thermique ($\alpha=4.10^{-6}$ m/m.°C)

Le coefficient de dilatation thermique linéique caractérise l'augmentation relative de longueur d'un élément pour un échauffement de 1 °C

Pour le bois, la dilatation thermique reste dans tous les cas plus faible que le rétrécissement dû à la perte d'humidité (ne joue donc aucun rôle dans les ouvrages)

Conductivité thermique

Avec une conductivité thermique moyenne $\lambda = 0.12$ W/m°C le bois est un très bon isolant thermique.

| Alu | Acier | Granite | Béton | Plâtre | Chêne | Sapin | Liège | Balsa | LdVerre |
|-----|-------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 230 | 52 | 3.5 | 1.75 | 0.5 | 0.23 | 0.12 | 0.10 | 0.054 | 0.04 |

4 COMPORTEMENT ET RESISTANCE DU BOIS AU FEU

Contrairement aux idées reçues, le bois présente des avantages en cas d'incendie :

- Il ne se déforme pas,
- Ne dégage pas de gaz toxiques,
- Il brûle lentement laissant le temps nécessaire à l'évacuation des personnes

En fait, son comportement au feu est totalement prévisible. Il faut savoir que :

- Le bois est le matériau préféré des pompiers,
- La dilatation thermique du bois est 3 fois plus faible que celle de l'acier et du béton (sous l'action de la chaleur, une charpente métallique a tendance à se déformer, voire d'effondre. Une charpente en bois ne se déforme pas ou peu et continue d'assurer ses fonctions porteuses)
- La conductivité thermique du bois est faible. Il est 12 fois plus isolant que le béton, 350 fois plus que l'acier, 1500 fois plus que l'aluminium.

La couche carbonisée, dont la conductivité thermique est encore plus faible, protège les couches internes et ralentit l'avance du feu.

Le comportement du bois au feu est défini d'après plusieurs critères :

- Le pouvoir calorifique,
- La réaction au feu,
- La vitesse de combustion,
- La résistance au feu

4.1 Le pouvoir calorifique du bois

Le pouvoir calorifique d'un matériau est l'énergie dégagée par la combustion complète de la masse unitaire de ce matériau.

Par convention, le pouvoir calorifique du bois et de ses dérivés est de 17 MJ/kg (4000 kcal/kg) et varie peu d'une essence à l'autre.

Cette notion de pouvoir calorifique est intéressante lorsqu'on utilise le bois comme combustible, mais n'intervient pas dans le comportement du bois mis en œuvre lors d'un incendie.

4.2 La réaction du bois au feu

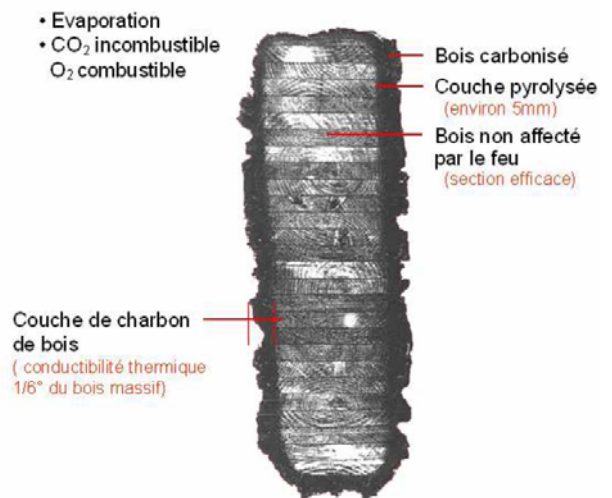
La réaction au feu est définie comme l'aptitude d'un matériau, dans des conditions spécifiques, à s'enflammer et à propager l'incendie par ses propres flammes. Les matériaux de construction sont classés en 5 classes vis-à-vis de leur réaction au feu :

| Classement des matériaux au feu | |
|---------------------------------|---------------------------|
| classe | comportement |
| M0 | Incombustible |
| M1 | Non inflammable |
| M2 | Difficilement inflammable |
| M3 | Moyennement inflammable |
| M4 | Facilement inflammable |

Le bois et les panneaux dérivés du bois sont toujours classés M3 ou M4. Des procédés d'ignifugation en surface (vernis ou peinture) permettent d'atteindre un classement M2 ou M1.

Lors de la combustion d'une pièce de bois massif, la formation d'une couche superficielle de charbon de bois de conductivité thermique très faible, protège le cœur de la section et prolonge les caractéristiques mécaniques.

| Classement des bois au feu | |
|----------------------------|---|
| Bois massif feuillus | Epaisseur sup. ou égale à 14mm M3 |
| | Epaisseur inférieure à 14 mm M4 |
| Bois massif résineux | Epaisseur sup. ou égale à 18 mm M3 |
| | Epaisseur inférieure à 18 mm M4 |



Quelle est la différence entre M1 et M0 ?

Le classement M1 caractérise un matériau qui ne dégage aucune flamme en se consumant. Dans ce cas, bien que combustible (une tache noir correspondant à la zone carbonisée va en s'étendant), il ne participe pas à la propagation de l'incendie et ne crée pas de panique chez les occupants du lieu où il se développe. (matériaux pour magasins, musées, salles de spectacles, etc.)

Le classement M0, « incombustible » ne peut jamais être atteint par le bois ou les matériaux dérivés en raison de leur pouvoir calorifique qui est supérieur au seuil de 2,5 MJ/kg exigé pour le classement M0.

Matériaux *a priori* M0 : Verre, béton, brique, plâtre, fer, fonte, acier, aluminium, cuivre, zinc, plomb, produits céramiques

4.3 La vitesse de combustion du bois

Une notion importante dans le domaine de la sécurité incendie est la vitesse de combustion des matériaux employés. La vitesse de combustion correspond à l'épaisseur de matériau dégradé, pendant une durée donnée, par l'action de la chaleur et ne présentant plus une tenue mécanique.

| Bois | Vitesse de combustion |
|---|-----------------------|
| Bois de construction | |
| Bois naturel (Sapin, épicéa, pin sylvestre chêne, etc.) | 0,7 mm/min |
| Bois lamellés-collés | 0,7 mm/min |
| Bois de menuiserie intérieure | |
| Essences durs (chêne, doussié, etc.) | 0,5 mm/min |
| Autres essences feuillues ou résineux | 0,6 mm/min |

4.4 La résistance du bois au feu

La résistance au feu des éléments de construction qualifie leur capacité à conserver leur rôle isolant ou porteur durant le temps nécessaire à l'évacuation, au sauvetage et à la lutte contre l'incendie. Le classement est attribué suivant la durée (1/4 d'heure, 1/2 d'heure, 3/4 d'heure,...) pendant laquelle l'élément a conservé ses propriétés suivant trois critères :

- La résistance mécanique,
- L'étanchéité aux flammes et aux gaz chauds ou inflammables,
- L'isolation thermique

Ces notions s'appliquent à différents types d'ouvrages, comme les structures, les blocs portes, ou les éléments de mur; On définit ainsi les caractères suivants :

- Stable au feu : conserve sa résistance mécanique pendant la durée spécifiée.
- Pare-flamme : stable au feu et étanche aux flammes et aux gaz chauds inflammables
- Coupe-feu : possède, en plus des deux propriétés précédentes, le caractère d'isolant thermique

5 DURABILITÉ ET PRÉSERVATION

La structure du bois (cellulosique) l'expose aux attaques de certains organismes vivants (insectes et champignons). Cependant, il faut savoir que :

- Le bois n'est affecté que lorsqu'il est mis en œuvre dans un lieu enfermé, sans ventilation et les conditions d'hygiène et d'entretien sont défectueuses

- Aucun champignon ne peut attaquer un bois sec, c'est-à-dire dont l'humidité est inférieure à 22 %
- Il est toujours préférable d'éviter un contact permanent du bois avec l'humidité
- Le bois contient deux parties distinctes : l'aubier (partie externe de l'arbre) et le bois parfait (partie interne de l'arbre). Si les aubiers de tous les bois sont périssables, les bois parfaits de certaines essences sont très résistants. Eliminer l'aubier permet d'utiliser ces bois sans aucun traitement, même en extérieur. On parle de bois purgé d'aubier.

Les agents de dégradation : Il existe deux types d'agents biologiques de dégradation du bois :

- les champignons,
- les insectes.

5.1 Les champignons

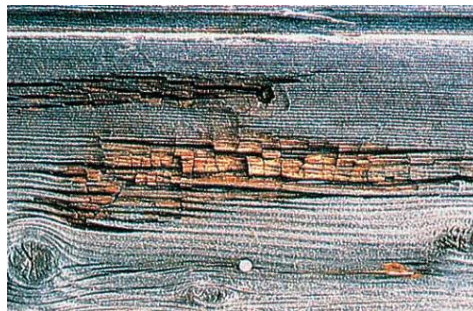
Ne peuvent s'attaquer qu'à des bois dont l'humidité est supérieure à 22 %

Les champignons les plus courants sont :

- Les moisissures, les agents de discolorations qui n'occasionnent que des dégradations esthétiques



- Les échauffures, les pourritures qui sont à l'origine de dégradations structurelles du bois.



Pourriture cubique

La présence de champignons se signale par les indices suivants :

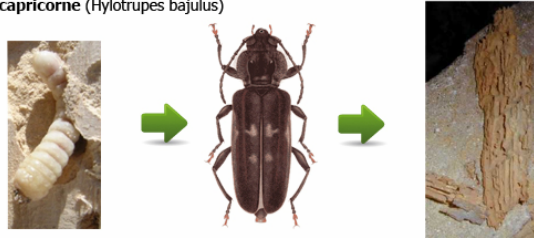
- une perte de structure du bois,
- une coloration anormale,
- une odeur caractéristique,
- un changement d'aspect du bois (ramollissement)
- la présence de feutrage et/ou de filaments
- un son creux lorsqu'on frappe le bois

5.2 Les insectes à larves xylophages

En France, les principaux insectes à larves xylophages sont :

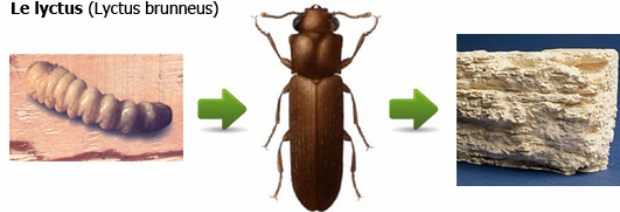
| | |
|-------------------------|--|
| Le capricorne de maison | il n'attaque que les bois résineux (sapin, épicéa, etc.) |
|-------------------------|--|

Le capricorne (*Hylotrupes bajulus*)



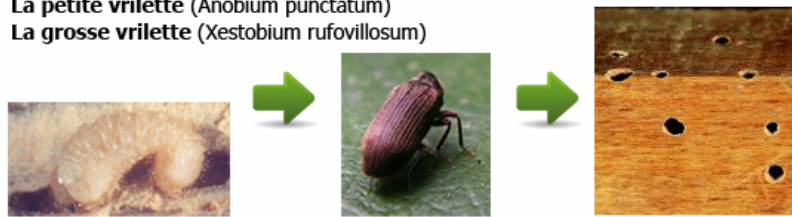
| | |
|-----------------------------|--|
| L'hespérophane et le lyctus | ils n'attaquent que des bois feuillus (chêne, hêtre, etc.) |
|-----------------------------|--|

Le lyctus (*Lyctus brunneus*)



| | |
|--|---|
| La petite vrillette et la grosse vrillette | elles attaquent tous les bois sauf les bois tropicaux |
|--|---|

La petite vrillette (*Anobium punctatum*)
La grosse vrillette (*Xestobium rufovillosum*)



Ces insectes se développent suivant le cycle suivant :

- Une femelle vient pondre des œufs dans le bois,
- Les œufs éclosent et se transforment en larves. ***Ce sont les larves qui se nourrissent du bois et y creusent des galeries.***
- Les larves se transforment en insectes. Ces insectes ne vivent que 2 à semaines. Ils ne se nourrissent pas, mais s'accouplent et pondent à leur tour des œufs dans le bois

| | |
|--------------|---|
| Les termites | Ils fuient constamment la lumière. Leur aliment principal est la cellulose. C'est les termites adultes qui dégradent le bois et non les larves. |
|--------------|---|

Le termite (*Reticulitermes Sp*)







5.3 Le traitement du bois

Il existe trois groupes de produits pour traiter le bois :

- Les produits à base de substances organiques de synthèse. Ce sont les plus toxiques et les plus couramment utilisés.
- Les produits à base de sels solubles dans l'eau (hydrosolubles). Les silicofluorures, les arséniates et les sels de chrome, très toxiques. Les sels de bore, utilisés en préventif, peu toxiques, ne se diffusent pas dans l'air.
- Les produits huileux naturels à base de résines qui permettent de boucher les pores du bois et réduisent les possibilités d'attaque. Sans risque pour la santé.

Méthode de traitement curatif des bois par injection

| | |
|---|--|
| Nettoyage du bois (dépeussierage) | Prépare le bois à recevoir le produit de traitement (plus le bois est propre, et meilleur est le taux de pénétration du produit). |
| Le bûchage | Enlèvement de l'aubier ou du bois vermoulu. |
|  | |
| Le perçage | Il permet le sondage du bois. Pose d'un injecteur par lequel est injecté le produit de traitement. |
|  | |
| La pulvérisation (injection) | Une injection soutenue est effectuée. Elle permet d'éviter de nouvelles pontes et de tuer la larve devenue adulte, lors de sa sortie du bois, grâce au fort taux de pénétration du produit. |
|  | |
| Application de surface | Une double pulvérisation est effectuée sur l'ensemble de la surface de toutes les pièces de bois de la charpente. Elle va permettre de préserver les pièces de bois de nouvelles pontes d'insectes et d'éliminer les larves proches de la surface du bois. |
|  | |

6 UTILISATION DU BOIS EN CONSTRUCTION

6.1 Le bois massif

Travail du bois

Le bois massif est essentiellement mis en forme par enlèvement de matière bien qu'il arrive qu'il soit cintré. En plus des machines de finitions (ponceuse), les principales machines utilisées sont :

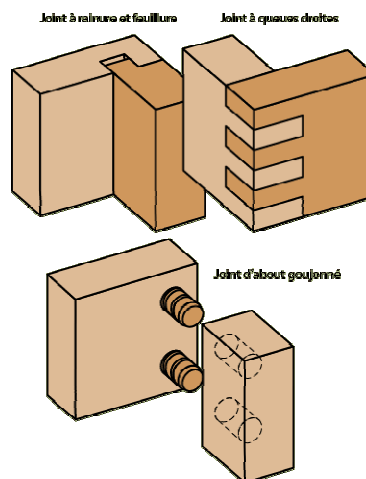
- La dégauchisseuse ;
- La raboteuse d'épaisseur ;
- La scie circulaire ;
- La scie à ruban ;
- La perceuse sensitive ;
- Le tour ;
- La toupie.

Construction en bois massif

On parle de construction en bois massif lorsque le bois naturel est utilisé de part et d'autre des panneaux utilisés.

Les joints sont utilisés pour réunir des planches de bois. Les joints peuvent être vissés, goujonnés ou collés. Ces systèmes peuvent ou non être combinés.

Les trois assemblages suivants (présenté à titre d'exemples) sont habituellement collés.



Bois de structure et de charpente

Pour les éléments structurels ou en charpente, on utilise toujours le bois dans la longueur de la fibre.



Charpente en bois



Poutres et poteaux

Bois de revêtements extérieurs (Les revêtements extérieurs sont les éléments fixés sur l'ossature, et directement exposés aux intempéries, dont la fonction est de protéger le bâtiment des intempéries).



Toiture



Bardage

Bois d'habillage



Parquet



Escalier

Dalles plancher/
Panneaux voiles

6.2 Les produits dérivés du bois

La fabrication des produits dérivés du bois a pour but :

- d'utiliser des bois de petite section facile à produire,
- d'utiliser des déchets de l'industrie du bois
- **matériaux dérivés du sciage : lamellé-collé**
- telle une mille-feuille géante, le lamellé-collé associe par collage à plat et à fils parallèles plusieurs lamelles de bois massifs (3,5 - 4,5 cm d'épaisseur)
- il est connu pour ses performances techniques souvent supérieures à celles du bois massif
- on les retrouve dans les poutres de grandes portées



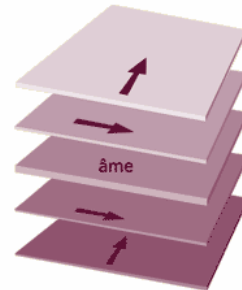
Bois lamellé-collé

Matériaux dérivés du déroulage ou du tranchage du bois

Ce sont des panneaux obtenus par collage d'un certains nombres de placages entre eux.

Leurs nombres et leurs orientations varient suivant les produits voulus.

On retrouve les contreplaqués ou les panneaux à lamelles orientés.



Contreplaqué

Matériaux dérivés de la trituration

Ces panneaux sont obtenus par collage et pressage de copeaux et de particules de bois.



Panneau de MDF

Produits composites

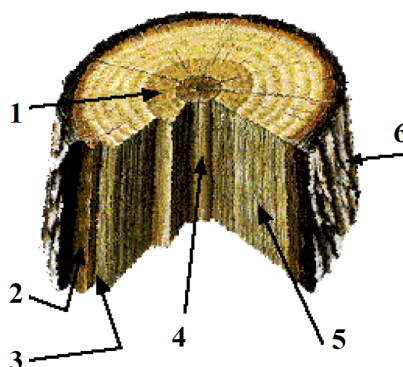
On retrouve dans cette famille de nombreux produits associant le bois à d'autres matériaux (métal, matériaux dérivés du bois)

Exemples : les poutres composites à âme triangulée ou à âme mince, les éléments préfabriqués de planchers, les panneaux isolants supports de toiture



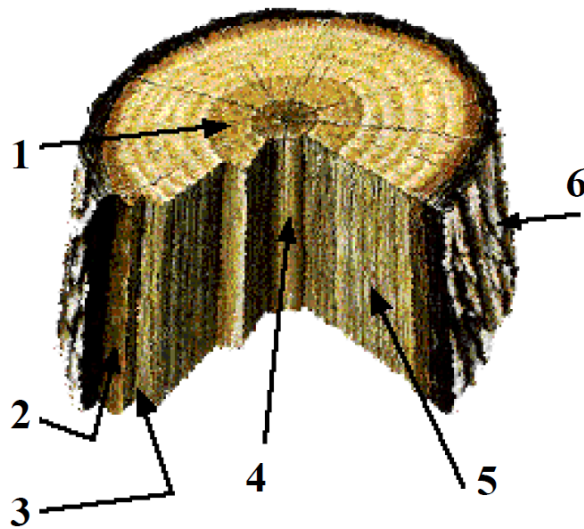
Poutre composite en I

1. Indiquer le nom de chacun des éléments composant ce tronc



2. Citez le nom d'un bois résineux. Indiquez l'utilisation principale de ce bois.
3. Citez le nom d'un bois feuillu. Indiquez l'utilisation principale de ce bois.
4. Quels sont les composants chimiques principaux du bois ?
5. Citez des phénomènes qui peuvent provoquer des détériorations du bois dans la construction de bâtiment.
6. De quels facteurs dépend l'humidité du bois ?
7. Quel est l'inconvénient majeur d'un bois contenant des nœuds ?
8. Pourquoi le bois est assimilable à un matériau composite ?
9. De quels facteurs dépend la résistance mécanique du bois ?
10. Dans la direction longitudinale des fibres, quel est le comportement du bois en compression (donner une courbe explicative) ?
11. Quel est le classement des bois au feu ?
12. Quelles sont les propriétés de la classe des matériaux « Non Inflammable : M1 ». Le bois peut-il atteindre ce classement ?
13. Pourquoi le bois est le matériau préféré des pompiers en cas d'incendie ?
14. Quels sont les agents de dégradation du bois ? Donner des exemples de traitement.

1. Indiquez le nom de chacun des éléments composant ce tronc



- 1 : Cœur (duramen ou bois parfait)
- 2 : Ecorce interne (liber)
- 3 : Cambium
- 4 : Moelle
- 5 : Aubier
- 6 : Ecorce externe (liège)

2. Citez le nom d'un bois résineux. Indiquez l'utilisation principale de ce bois.
pins, sapins, épicéas...(utilisation : voir tableau suivant)

3. Citez le nom d'un bois feuillu. Indiquez l'utilisation principale de ce bois.
hêtre, chêne...(utilisation : voir tableau suivant)

| Domaines d'application par essences | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------|---------------|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------|---------|-------------|-----------|
| | Charpente | Ossature bois | Bardage | Menuiserie intérieure | Menuiserie extérieure | Mobilier urbain | Terrasses | Parquet | Ameublement | Emballage |
| Chêne | AT | AT | ST | ST | ST | ST | AT | ST | ST | * |
| Châtaignier | AT | AT | ST | ST | ST | ST | AT | ST | ST | * |
| Hêtre | * | * | * | ST | AT | AT | AT | ST | ST | * |
| Robinier | * | * | ST | ST | * | ST | ST | ST | ST | * |
| Frêne | * | * | * | ST | * | * | * | ST | ST | ST |
| Peuplier | AT | AT | AT | ST | * | * | AT | ST | ST | * |
| Aulne | AT | AT | ST | ST | * | * | * | ST | ST | * |
| Pin Sylvestre | AT | AT | AT | ST | AT | AT | AT | ST | ST | ST |
| Sapin | AT | AT | AT | ST | AT | AT | AT | ST | ST | ST |
| Epicea | AT | AT | AT | ST | AT | AT | AT | ST | ST | ST |
| Douglas | AT | AT | ST | ST | ST | AT | AT | ST | ST | ST |
| Mélèze | AT | AT | ST | ST | ST | ST | AT | ST | ST | * |
| Western Red Cedar | AT | AT | ST | ST | ST | ST | * | ST | ST | * |
| Ipé | * | * | ST | ST | ST | ST | ST | ST | ST | * |
| Iroko | * | * | ST | ST | ST | ST | ST | ST | ST | * |
| Bangkirai | * | * | ST | ST | ST | ST | ST | ST | ST | * |

AT = Avec Traitement, ST = Sans Traitement, * = pas d'utilisation courante

4. Citez des phénomènes qui peuvent provoquer des détériorations du bois dans la construction de bâtiment.

- On peut citer la détérioration biologique des éléments en bois. Les principaux organismes qui attaquent le bois sont les champignons, les insectes, les bactéries et les tarets. Les champignons peuvent considérablement affaiblir la solidité. En général, la moisissure affecte peu la solidité du bois, mais elle peut en accroître la capacité d'absorption. Dans ce cas, le bois absorbe trop de colles et de peintures et devient plus poreux et susceptible de s'imprégner d'eau, attirant ainsi des colonies de champignons qui, eux, causent la détérioration du bois.
- On peut citer la détérioration du bois dans une toiture qui est le symptôme d'un problème d'infiltration d'humidité.
- Détériorations dues aux intempéries.

5. De quels facteurs dépend l'humidité du bois ?

L'humidité dans le bois varie en fonction de la température et de l'humidité de l'air environnant.

6. Quel est l'inconvénient majeur d'un bois contenant des nœuds.

L'inconvénient des nœuds varie avec leurs dimensions et l'état de conservation des tissus inclus. Ils rendent le bois difficile à travailler et moins résistant. S'ils sont sains, on fixera les tolérances possibles d'après la nature de l'emploi (menuiserie, charpente, etc.). S'ils sont vicieux ou non adhérents (bouchons), on les proscritra.

7. Pourquoi le bois est assimilable à un matériau composite ?

Puisque il n'a pas les mêmes caractéristiques mécaniques suivants tous les plans de couple (transversal, radial, tangentiel)

8. De quels facteurs dépend la résistance mécanique du bois ?

Le bois étant un matériau composite, sa résistance dépend :

- du sens des efforts exercés
- de sa teneur en eau
- de sa densité
- bien évidemment, de sa nature

9. Dans la direction longitudinale des fibres, quel est le comportement du bois en compression (donner une courbe explicative) ?

Ductile

