



**Université de Relizane**  
**Faculté des Sciences et Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



**-2021/2022-**

**Module Bois et Mousses**  
**3<sup>ème</sup> Génie des Matériaux**  
**Semestre 6**

**Elaboré par**  
**Dr. ZOUAMBI Leila**

**Objectifs de l'enseignement :**

Cette matière présente et expose deux matériaux d'intérêts très spécifique ; premièrement le bois qui possède une structure d'un composite complexe offrant des caractéristiques pour des utilisations ordinaire ou technique. L'étudiant découvrira en plus de sa structure fascinante, qu'en valeur absolue les propriétés (rigidité et résistance) du bois sont moindres comparées à d'autre matériaux, mais en terme de propriétés spécifique le bois a des propriétés comparable ou dépasse celles métaux, c'est pour cette raison que les premières avions étaient fabriqués en bois. Deuxièmement les mousses ; là aussi l'étudiant apprendra que la mousse offre des caractéristiques idéales pour l'emballage par exemple, ou en l'associant à d'autres matériaux composites donne des structures sandwichs pour atteindre des caractéristiques spécifiques sans égales.

## Table des matières

<b>Chapitre I : Structure du bois</b> .....	4
<b>Introduction</b> .....	4
<b>Définition</b> .....	5
<b>Classification botanique (Types de bois)</b> .....	6
<b>Structure macroscopique du bois en coupe</b> .....	12
- <b>Parties distinctes du tronc de l'arbre</b> .....	13
<b>Le bois de printemps et le bois d'été.</b> .....	14
<b>Chapitre II : Structure microscopique du bois</b> .....	16
<b>Le plan ligneux :</b> .....	16
<b>La paroi cellulaire :</b> .....	16
<b>CHAPITRE IV : Les Propriétés Mécaniques du bois</b> .....	25
<b>I. INTRODUCTION</b> .....	25
<b>II. LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES BOIS.</b> .....	25
1. <i>Masse volumique et densité</i> .....	25
<b>III. PROPRIETES MECANIQUE DU BOIS</b> .....	32
<b>Chapitre V : Bois modifiées</b> .....	41
<b>Introduction</b> .....	41
<b>Bois Lamellé-collé</b> .....	41
<i>Caractéristiques constantes et garanties :</i> .....	42
<i>Les étapes de fabrication du lamellé-collé</i> .....	42
<i>Domaines d'utilisation</i> .....	45
<b>Bois contre-plaqués</b> .....	46
<i>Caractéristiques du bois contreplaqué</i> .....	47
<i>Inconvénients</i> .....	47
<b>Panneaux de particules</b> .....	48
<b>Fabrication</b> .....	48
<i>Caractéristiques du bois à panneaux de particules</i> .....	49
<i>Inconvénients</i> .....	49
<b>Panneaux de fibres</b> .....	49
<b>Fabrication</b> .....	49
<b>Utilisation</b> .....	50
<i>Caractéristiques du bois à panneaux de fibres</i> .....	50
<i>Inconvénients</i> .....	50
<b>Chapitre VI : Mousses ou solides cellulaires</b> .....	51
<b>I. Introduction</b> .....	51

II. Définitions :.....	52
Types de mousses .....	53
a) <i>Mousses à pores fermés</i> .....	53
b) <i>Mousses à pores ouverts</i> .....	53
c) <i>Mousses stochastiques</i> .....	54
d) <i>Mousses régulières</i> .....	54
Techniques de Fabrication .....	54
Applications des matériaux poreux .....	55
a) <i>Isolation thermique</i> .....	55
b) <i>Emballage</i> .....	56
c) <i>Matériaux de structure</i> .....	58
d) <i>Flottabilité</i> .....	59
Voies de synthèse des mousses solides polymères.....	59
Mousses solides élastomères.....	63
Chapitre VII : Propriétés mécanique des mousses .....	70
Les propriétés mécaniques des mousses.....	70
Compression et absorption d'énergie.....	71
Effet de la structure (ouverte ou fermée).....	72
Effet de la nature du matériau .....	72
Effet de la taille et la forme des cellules.....	73
Effet de la vitesse de sollicitation .....	74
Caractéristiques clés .....	75
Choc balistique.....	76
Références bibliographiques:.....	81

# Chapitre I : Structure du bois

## Introduction

Par leurs interactions sur le cycle de l'eau et surtout sur celui du carbone, les forêts constituent un régulateur écologique de base de la planète terre (Fig. I.1). Le processus de croissance de la forêt est basé sur la transformation du  $\text{CO}_2$  gazeux de l'atmosphère en polyglucides assimilables par la cellule végétale (Fig. I.2).

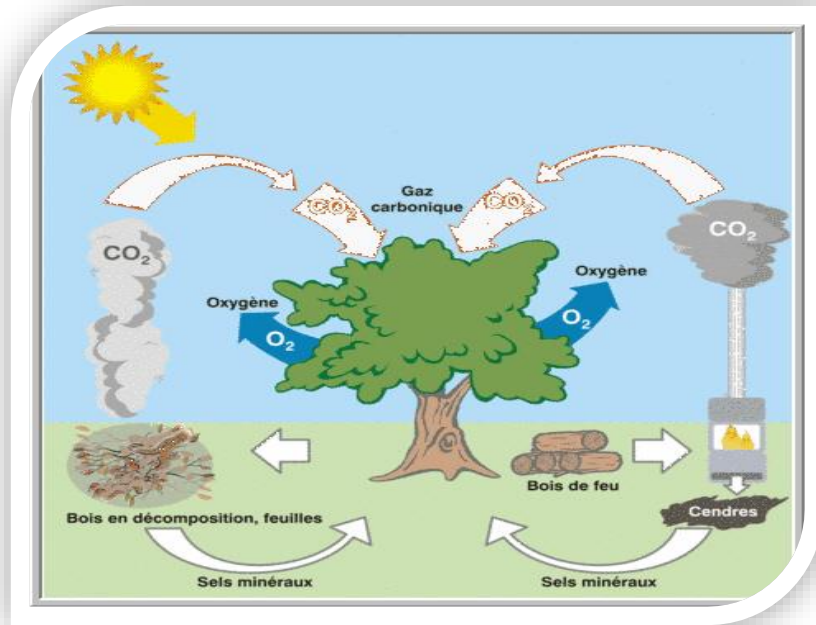


Figure I.1 : Réaction de transformation condensée de l'oxygène.

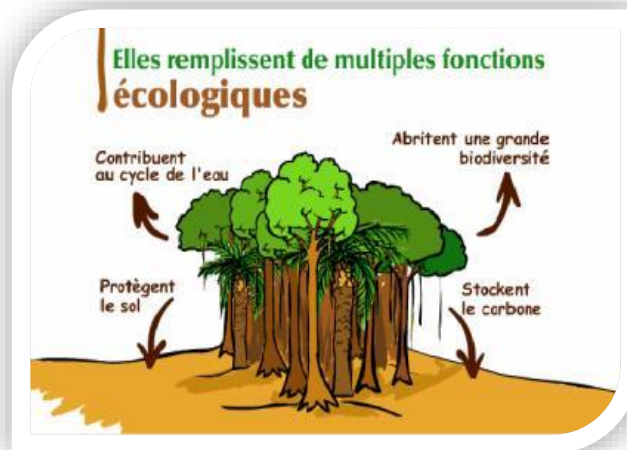


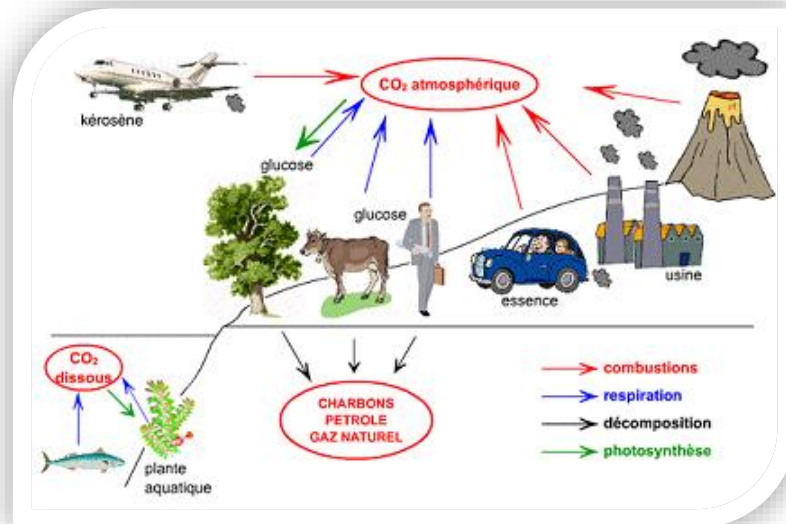
Figure I.2 : Intérêt écologique de la forêt.

L'énergie de transformation est apportée par les rayons lumineux du soleil et par la réaction de transformation condensée de l'oxygène qui est relâché dans l'atmosphère (Fig. I.1). La forêt

possède donc l'intérêt écologique d'être un mécanisme naturel de fixation du CO<sub>2</sub> et d'être le plus grand fournisseur d'oxygène de la planète.

Les forêts exploitées de façon soutenue, c'est-à-dire avec des prélèvements limités aux arbres arrivés à maturité, sans perturber l'équilibre biologique général, sont des forêts pour lesquelles le dynamisme biologique est préservé.

La croissance, et donc la fixation du dioxyde de carbone sont régulées. Au contraire, la destruction, ou la substitution des forêts existantes visant à une autre utilisation du sol, provoquent une forte diminution de la biomasse accumulée (Fig. 1.3) et engendrent une relaxation de dioxyde de carbone.



**Figure 1.3 :** Augmentation du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère

L'augmentation du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est principalement due à la combustion d'énergies fossiles (charbon, pétrole, etc.), mais également dans une mesure non négligeable, à la destruction par le feu des forêts. Ainsi, la forêt contribue à atténuer l'effet de serre dont le CO<sub>2</sub> et le gaz responsable à 60% du phénomène global et donc majoritairement impliqué dans le réchauffement climatique.

### Définition

Le bois est un polymère complexe qui possède une organisation microstructurale extrêmement élaborée.

Le bois est un amas de cellules végétales (Fig. I.4). La cellule végétale se différencie de la cellule animale par une seule chose : sa paroi cellulaire. Alors que les cellules animales n'ont pas de paroi, mais seulement une membrane intercellulaire et des cellules spécialisées pour développer une structure squelettique (cellules osseuses). La cellule végétale est autoportante et permet des développements structurels gigantesques à l'échelle biologique (arbre de 50 mètres de hauteur).

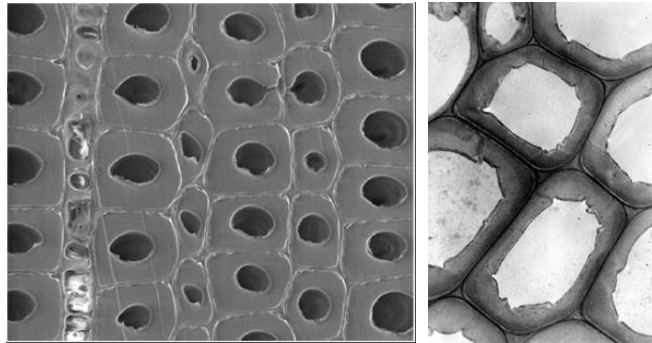


Figure I.4 : Cellules végétales.

En fait, la paroi cellulaire (Fig. I.5) de la cellule végétale n'est rien d'autre que le matériau bois que nous connaissons. Le bois est un amas de cellules végétales mortes, stockées au sein de l'arbre.

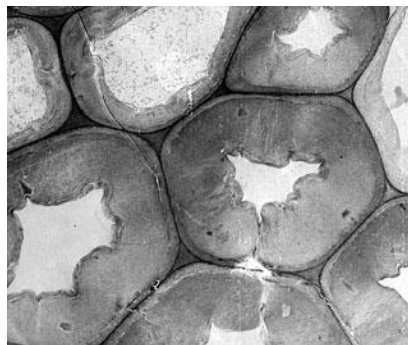


Figure I.5 : Paroi cellulaire en bois

Une autre différence physiologique entre les systèmes végétaux et animaux est que les premiers sont autotrophes (se dit des plantes qui élaborent leurs substances organiques seulement à partir d'éléments minéraux), alors que les seconds sont hétérotrophes (se dit des organismes qui se nourrissent non de composés minéraux mais de substances organiques, c'est-à-dire d'aliments déjà transformés par un organisme).

### Classification botanique (Types de bois)

On peut décomposer le bois en deux grandes classes : **Résineux** (Fig. I.6) et **Feuillus** (Fig. I.7).



Figure I.6 : Classe des arbres résineux.

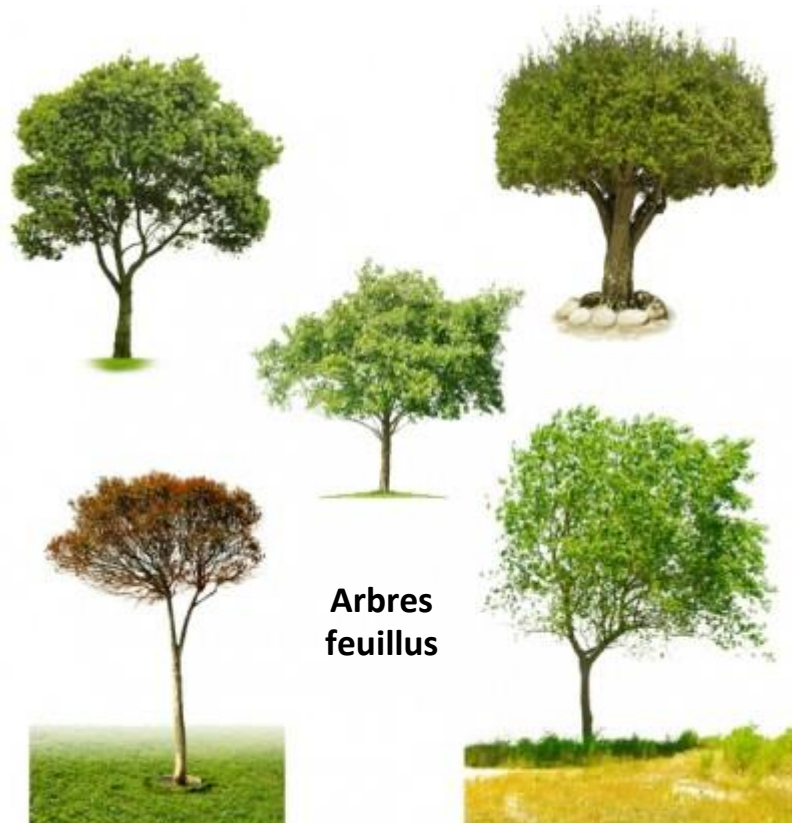


Figure I.7 : Classe des arbres Feuillus.

Etant donné leur grande disponibilité dans l'hémisphère nord, et leur valeur économique plus faible que celle des feuillus, les structures et les constructions en bois sont généralement réalisées en résineux.

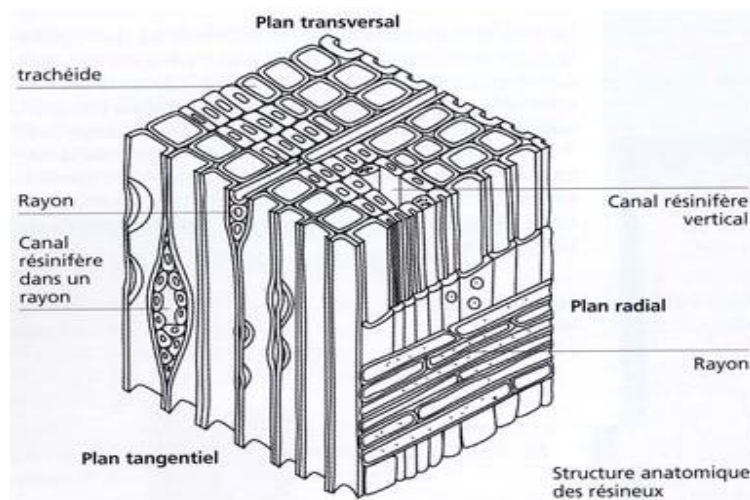


- **Les résineux**

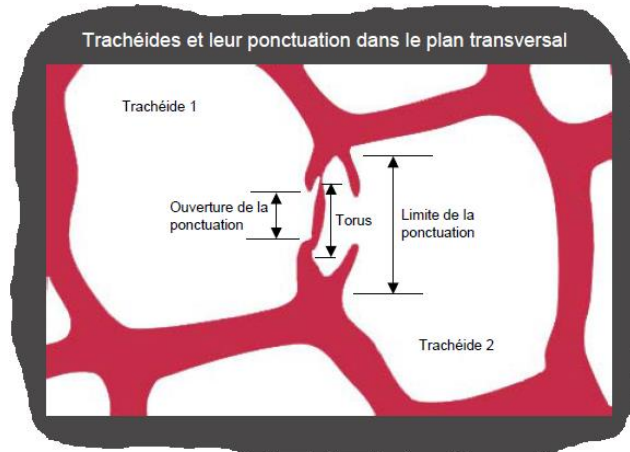
Les bois résineux sont apparus bien avant les bois feuillus dans l'histoire phylogénétique et datent d'environ 350 millions d'années. Leur structure (Fig. 1.8) est donc moins évoluée.

Le tissu est formé de trachéides qui sont les cellules fusiformes couramment appelées veines ou fibres du bois.

Les trachéides situées dans le bois de printemps remplissent une fonction conductrice d'eau et de substances nutritives entre les cellules longitudinales et radiales.



**Figure 1.8 :** Microstructure des bois résineux.

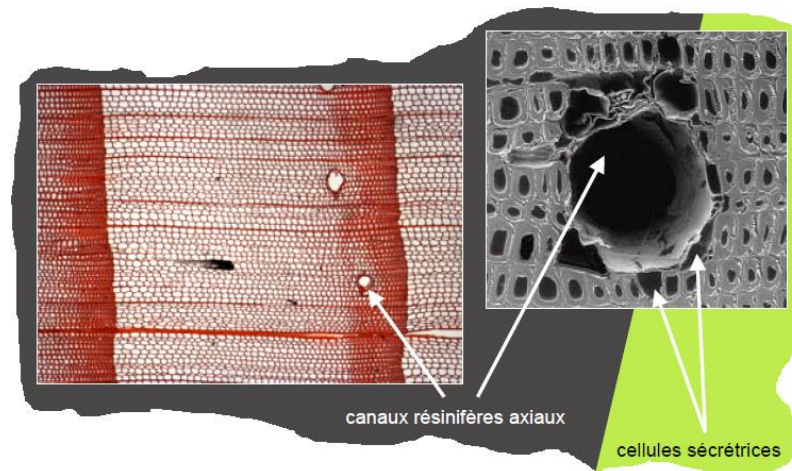


**Figure 1.9 :** Trachéides et leur ponctuation dans le plan transversal des bois résineux.

Les trachéides du bois d'été ont des parois plus épaisses et constituent principalement un tissu de soutien conférant au bois ses qualités mécaniques. Elles possèdent des ponctuations permettant de faire circuler la sève d'une trachéide à une autre trachéide (Fig. 1.9) (ponctuations aérolées) mais également d'une trachéide à une cellule de parenchyme (ponctuations de champs de croisement).



La plupart des résineux ont des canaux résinifères qui sont disposés parallèlement aux trachéides. En construction on utilise principalement les bois résineux (sapins, pins, épicéa, mélèze...)



**Figure I.10** : Canaux résinifères des bois résineux.

En résumé, les bois résineux sont constitués, dans la direction longitudinale, de trachéides et d'une faible quantité d'autres cellules longitudinales, notamment de cellules sécrétrices et de canaux sécréteurs (Fig. I.10) (les deux derniers ne sont présents que chez certaines espèces). Dans la direction radiale, il existe essentiellement des rayons de cellules parenchymes et une faible quantité de trachéides transversales.

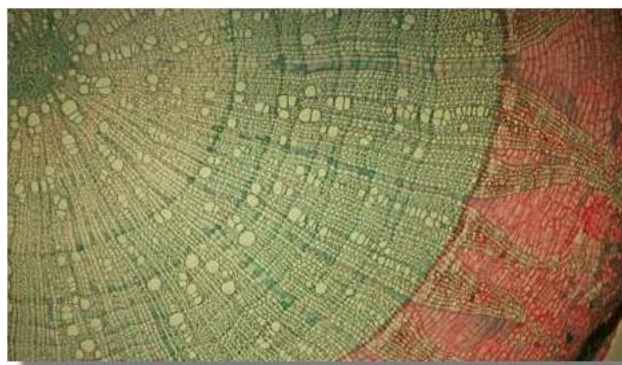
On peut dire que les bois résineux sont constitués de cellules longitudinales mortes et de rayons ligneux composés de cellules parenchymes qui sont vivantes dans l'aubier. Les cellules longitudinales du bois de printemps sont plus grandes en diamètre et en lumen par rapport aux cellules d'été. Les parois de ces cellules sont caractérisées par l'existence de ponctuations aréolées à travers lesquelles la sève est transférée entre cellules voisines. Les parois des cellules longitudinales sont assez rigides pour assumer la fonction de soutien de l'arbre vivant. Les cellules parenchymes vivantes sont responsables de la réserve de la nourriture. Leurs parois contiennent des ponctuations simples.

#### - **Les feuillus**

Les bois feuillus sont plus récents que les bois résineux dans l'histoire phylogénétique (150 millions d'années) et leur diversité biologique est très supérieure à celle des résineux (environ 100 fois plus), ce qui donne un ensemble innombrable de familles.

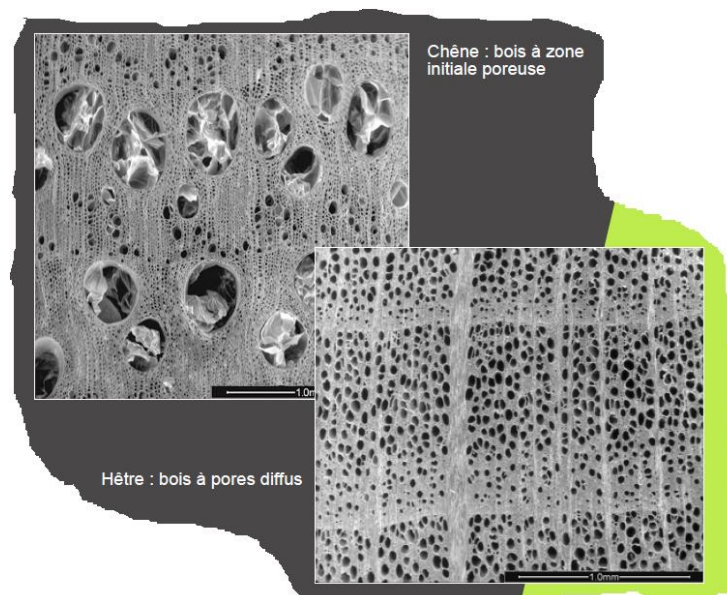
Ils présentent une structure anatomique plus complexe. Dans la plupart des cas, les feuillus montrent une réduction sensible de leurs caractéristiques anisotropiques. Ils sont donc appréciés pour leurs performances mécaniques transversales.

Contrairement aux conifères où les fonctions de conduction et de soutien sont toutes deux assurées par les trachéides, les feuillus ont deux types de cellules. Des vaisseaux qui constituent un système tubulaire s'étendant des racines aux feuilles pour assurer la circulation de la sève (Fig. I.11). Le support mécanique, en revanche, est assuré, comme pour les résineux, par les trachéides pleines.



**Figure I.11** : Section transversale d'un tronc des feuillus

L'épaisseur des parois de ces fibres détermine la densité qui varie fortement chez les feuillus d'une espèce à l'autre alors qu'elle est relativement uniforme pour les résineux.



**Figure I.12** : (a) Porosité diffuse (hêtre). (b) Porosité annulaire (chêne).

Sur la coupe transversale, les vaisseaux apparaissent comme des trous permettant de distinguer les feuillus des conifères. Lorsque dans une coupe transversale, la distribution des

pores est uniforme, on parle de bois à porosité diffuse (hêtre, érable, tilleul, etc.) (Fig. I.12a). Dans le cas contraire, où les pores sont concentrés dans le bois de printemps, on a une porosité annulaire (chêne, frêne, etc.) (Fig. I.12b).

- **Les vaisseaux (ou pores)** sont les cellules permettant le transport de la sève chez le feuillus. Ils sont implantés de manière longitudinale dans le bois et peuvent être ou non juxtaposés. L'évolution de la taille des vaisseaux et de leur répartition au cours d'un cerne annuel dans le bois permet de classer les feuillus en trois classes.
- **Fibres** : Les cellules longitudinales ont un rôle de soutien dans le bois. Ce sont des cellules allongées avec des parois épaisses et rigides. Elles varient entre 25 et 75% en volume. La longueur des cellules varie entre 0.8 et 2.3 mm ; voir Fig. (I.13).

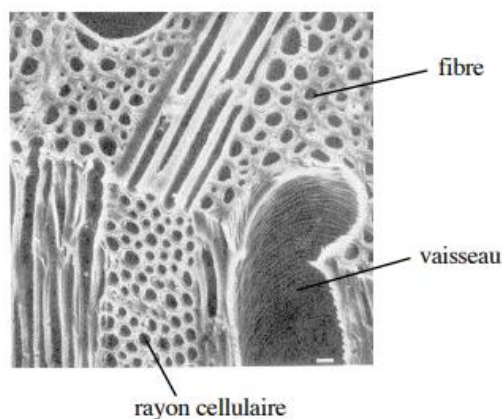


Figure I.13 : Schématisation des fibres.

- **Parenchymes longitudinales** : Les bois feuillus, comme les bois résineux, contiennent, en pourcentage volumique, très peu de parenchymes longitudinaux. Ces cellules ont un rôle nutritif et peuvent emmagasiner des réserves dans le bois. Les rayons ligneux chez les bois feuillus sont constitués de deux ou plusieurs cellules transversales. On note que le bois résineux est composé d'une série ou de deux séries de cellules parenchymes.

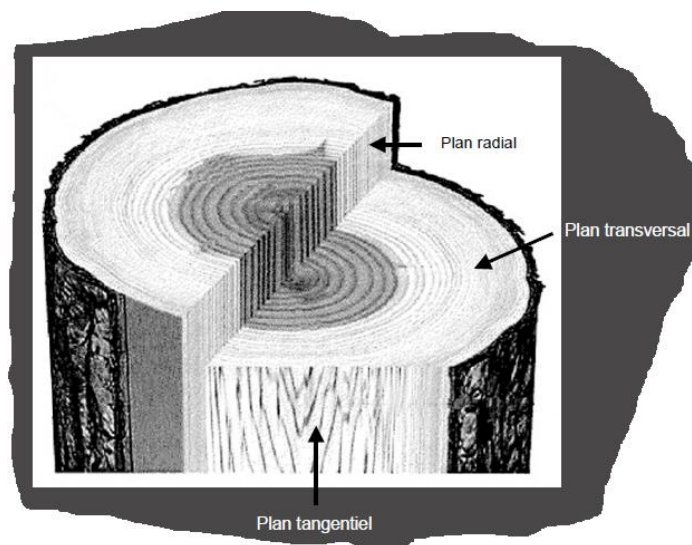
En résumé, le bois feuillu est caractérisé par la présence de vaisseaux (pores diffus ou zones poreuses), de trachéides, de fibres, de parenchymes longitudinales et de rayons parenchymes. Les vaisseaux remplissent le rôle de conduction. Les fibres, pouvant constituer une très grande partie du bois (jusqu'à 60 % en volume) avec des parois épaisses, jouent le rôle de soutien dans le bois. Les cellules parenchymes transversales et longitudinal remplissent le rôle de réserve de nourriture dans le bois.

Les cellules transversales sont beaucoup plus nombreuses dans les feuillus, ce qui explique que les rayons ligneux sont alors beaucoup plus apparents sur une coupe transversale (chêne, hêtre, etc.), et donc les propriétés mécaniques transversales des feuillus sont supérieures à celles des résineux.

### Structure macroscopique du bois en coupe

Suivant l'anatomie du tronc de l'arbre (Fig. I.14), la structure macroscopique du bois est caractérisée par ses trois directions de croissance naturelle (Fig. I.15).

- 1- Direction longitudinale permettant le transport de la sève.
- 2- Direction radiale sur laquelle se développent les trachéides radiales permettant la communication tridimensionnelle sur plusieurs épaisseurs de cellules, ainsi qu'une meilleure cohésion structurelle de l'ensemble.
- 3- Direction tangentielle sur laquelle se trouve la région active où les cellules sont vivantes et se divisent pour donner la croissance diamétrale.



**Figure I.15** : Anatomie d'un tronc d'arbre

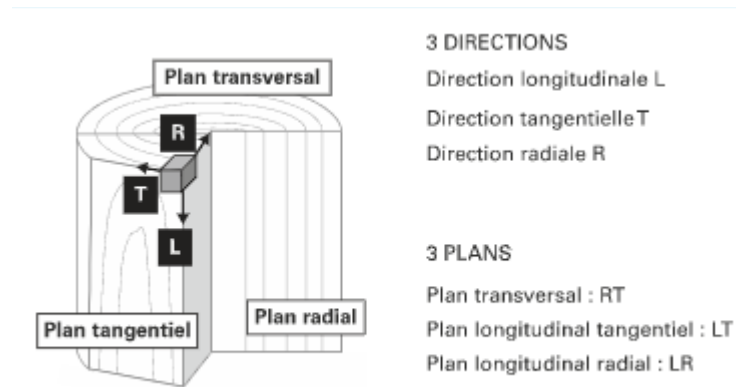


Figure I.16 : Trois directions de croissance naturelle du bois.

- Parties distinctes du tronc de l'arbre

La section transversale complète d'un tronc permet de mettre en évidence les parties plus ou moins distinctes que sont (Fig. I.16) :

- **L'écorce** : qui sert de couche protectrice du tronc.
- **L'aubier** : partie partiellement vivante de l'arbre qui assure l'approvisionnement en sève de l'arbre. Cette partie est formée des premiers cerne se trouvant derrière l'écorce. Son épaisseur est fonction du type de bois.
- **Le duramen** : appelé également bois de cœur ou bois parfait. Il s'agit de la partie centrale du tronc où les vaisseaux sont bouchés. Ce processus est appelé duraminisation.
- **Le cambium** : est un tissu végétal qui est à l'origine de la création de bois dans les arbres. Ce tissu remarquable permet au tronc et aux branches de prendre du volume et fournit pour se tenir debout pendant la croissance (Fig. I.17).

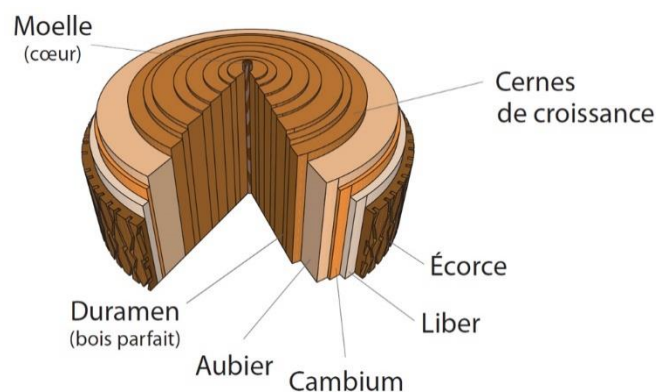


Figure I.16 : Parties distinctes du tronc de l'arbre.

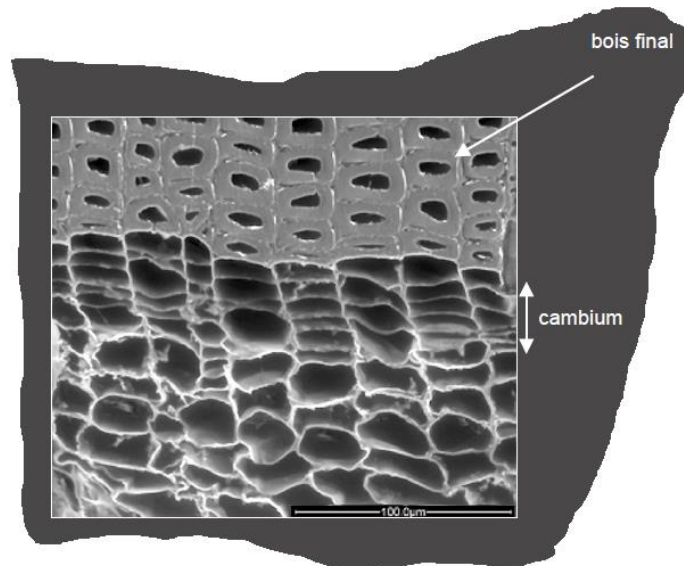


Figure I.17 : Illustration du bois final et la couche Cambium.

### Le bois de printemps et le bois d'été.

Un arbre est caractérisé par le fait qu'il "fabrique" du bois. Chaque année l'arbre croît en hauteur et en grosseur. Sous les climats tempérés et avec une alternance des saisons, une "couche" de bois annuelle (un cerne), s'ajoute aux précédentes. La croissance d'un arbre peut être comparée à un empilement de cônes s'emboitant les uns sur les autres, du plus petit au plus gros (Fig. I.18).

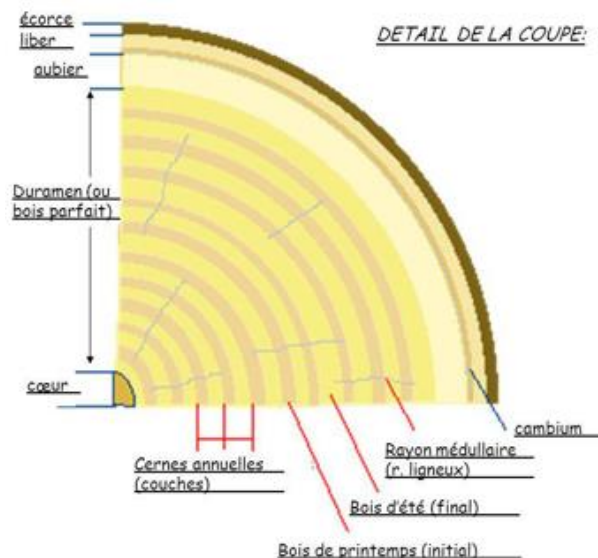


Figure I.18 : Etapes de croissance d'un arbre.

### - le bois de printemps (appelé bois initial)

Comme au printemps (période de reprise de croissance), les besoins en eau sont importants (pour assurer le développement des feuilles et des fleurs) et que les conditions climatiques



sont en général les plus favorables (chaleur et pluviométrie), cela permet une croissance plus rapide. Ainsi dans le cerne annuel, le bois de printemps apparaît comme une large bande de bois, tendre et de couleur claire ;

**- le bois d'été (appelé bois final)**

Comme en été les conditions climatiques sont moins favorables (fortes chaleurs ou sécheresse), la croissance devient plus lente et dans le cerne, le bois d'été à la forme d'une bande plus étroite, dure, compacte et plus foncée (Fig. I.19).

La distinction bois de printemps, bois d'été est souvent difficile à l'œil nu. Mais elle apparaît nettement lors de l'observation au microscope. Le bois de printemps présente de grosses cellules alors que le bois d'été est formé de cellules plus petites (Fig. I.20).

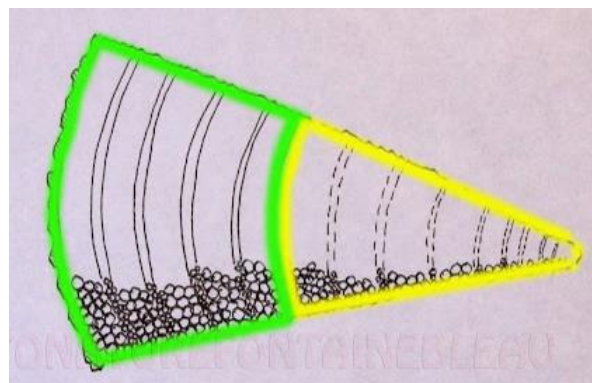


Figure I.19 : En vert l'aubier (bois vivant) en jaune le cœur ou duramen (bois mort).

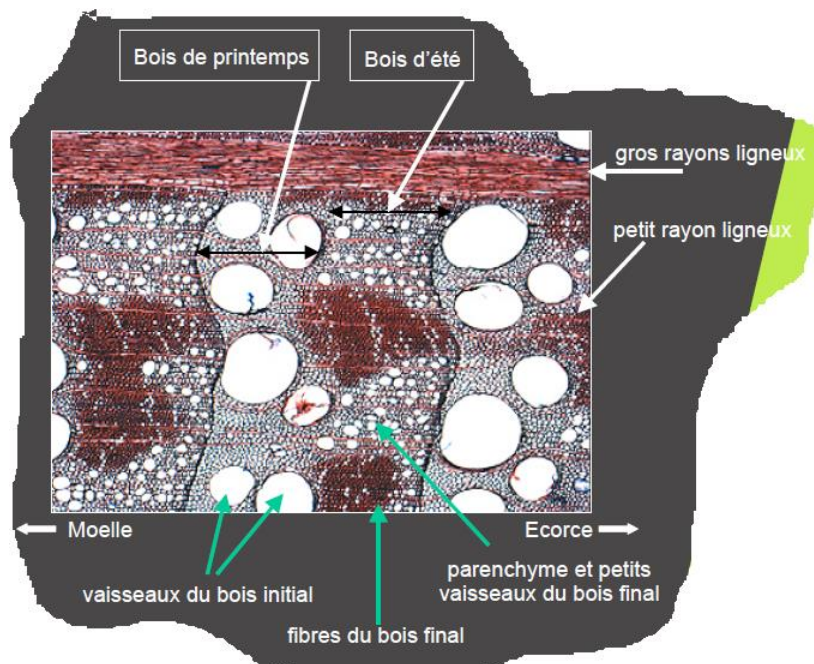


Figure I.20 : Microstructure du bois de printemps et bois d'été.



## Chapitre II : Structure microscopique du bois

Le bois est un matériau fibreux. Plus de 90 % du volume des bois résineux sont formés de fibres (cellules longitudinales) liées les unes aux autres ainsi qu'aux autres éléments constituant du bois.

Le plan ligneux :

a) la Cellule : Le bois est donc un ensemble de cellules mortes organisées en plan ligneux au sein de l'arbre. La cellule répond à plusieurs fonctions :

La fonction de transport : puisque la cellule doit alimenter la feuille en eau qui sera véhiculée depuis les racines sous forme de sève brute, contenant également des minéraux (Phosphore, calcium, magnésium, potassium, soufre). La cellule est longitudinale, creuse et constituée d'une fibre continue.

Ce type de cellule correspond aux cellules initiales fusiformes, appelées encore trachéides pour les résineux.

- La fonction de résistance : pour soutenir le développement architectural de l'arbre permettant un apport d'énergie solaire suffisant. Cette fonction de résistance est assurée par la paroi cellulaire. Elle-même est constituée de plusieurs couches pour garantir des propriétés mécaniques supérieures.
- La fonction d'élaboration et de transformation chimique des substances et la fonction de la nutrition, avec stockage énergétique disponible en cas d'arrêt de l'apport énergétique par la sève élaboré (sève descendante), par exemple la nuit ou en cas de sécheresse → cellules parenchymes longitudinales et radiales .
- La fonction de communication : avec les cellules adjacentes orthogonales, permettant de créer un réseau tridimensionnel avec des champs de croisement entre cellules longitudinales et transversales permettant à la sève de circuler sur plusieurs épaisseurs de cellules. Les cellules sont à l'origine des rayons ligneux.
- La fonction de protection : notamment sur l'épiderme de la plante. Ces cellules seront surtout localisées dans l'écorce de l'arbre.

La paroi cellulaire :

Après la mort des cellules il ne reste que les parois cellulaires qui constituent le matériau bois.

Les différentes couches de la paroi cellulaire sont, en observant de l'extérieur vers l'intérieur (Fig. II.1).

- Une couche intercellulaire : c'est la couche qui réalise le cimentage de cellule à cellule d'une épaisseur  $0.5\mu m \leq e \leq 1.5\mu m$

- Une paroi primaire : c'est une très fine paroi élastique de  $0,1 \mu m$ . Elle est constituée de plusieurs couches de micro-fibrilles de cellulose enchevêtrées.

- Une paroi secondaire : c'est la partie la plus structurale de la paroi cellulaire, elle est dense, rigide et composée de trois couches fibreuses (Fig. II.2).

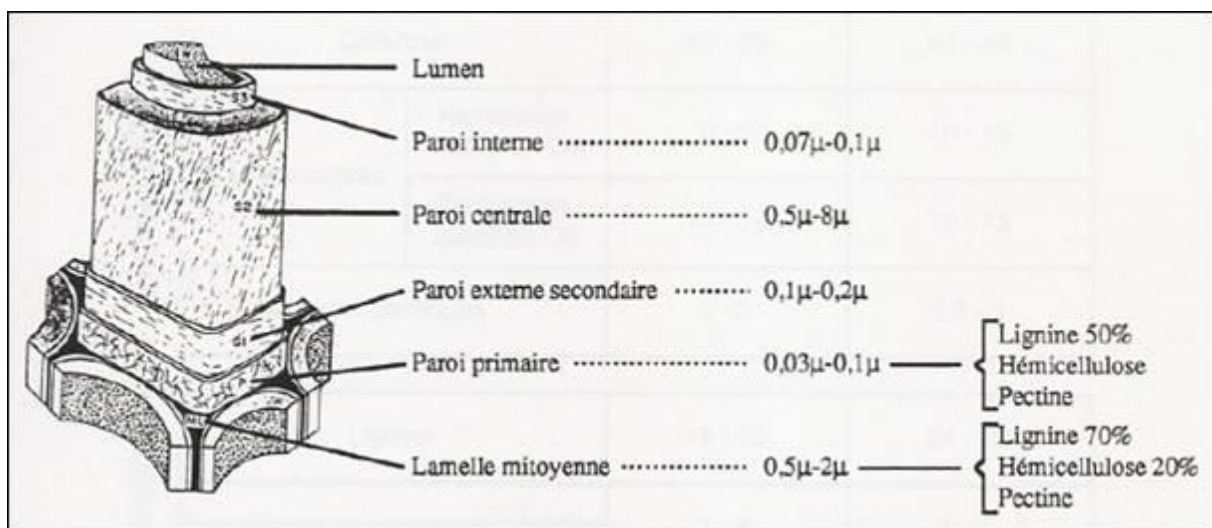


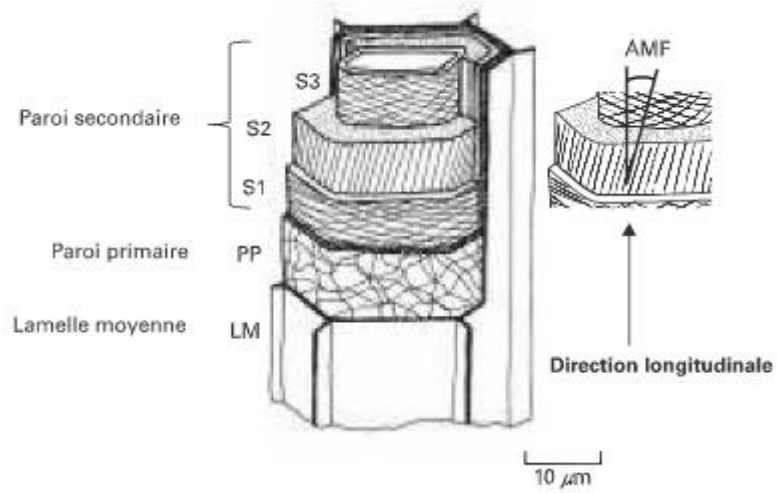
Figure II.1 : Représentation schématique des différentes parois constituant la cellule du bois.

\* La couche externe S1 : avec des micro-fibrilles disposées en hélice d'orientation variable alternée, dont l'angle atteint  $60$  à  $80$  % par rapport à l'axe de la cellule. Son épaisseur varie de  $0,1$  à  $0,35\mu m$  et garantit de bonnes performances de traction transversale de cette zone.

\* La couche externe S2 : Constituée de lamelles de micro-fibrilles disposées en hélices parallèles, dont l'angle par rapport à l'axe est de  $5^\circ$  à  $30^\circ$ , son épaisseur varie de  $1$  à  $10\mu m$  et représente  $75$  à  $85\%$  de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire.

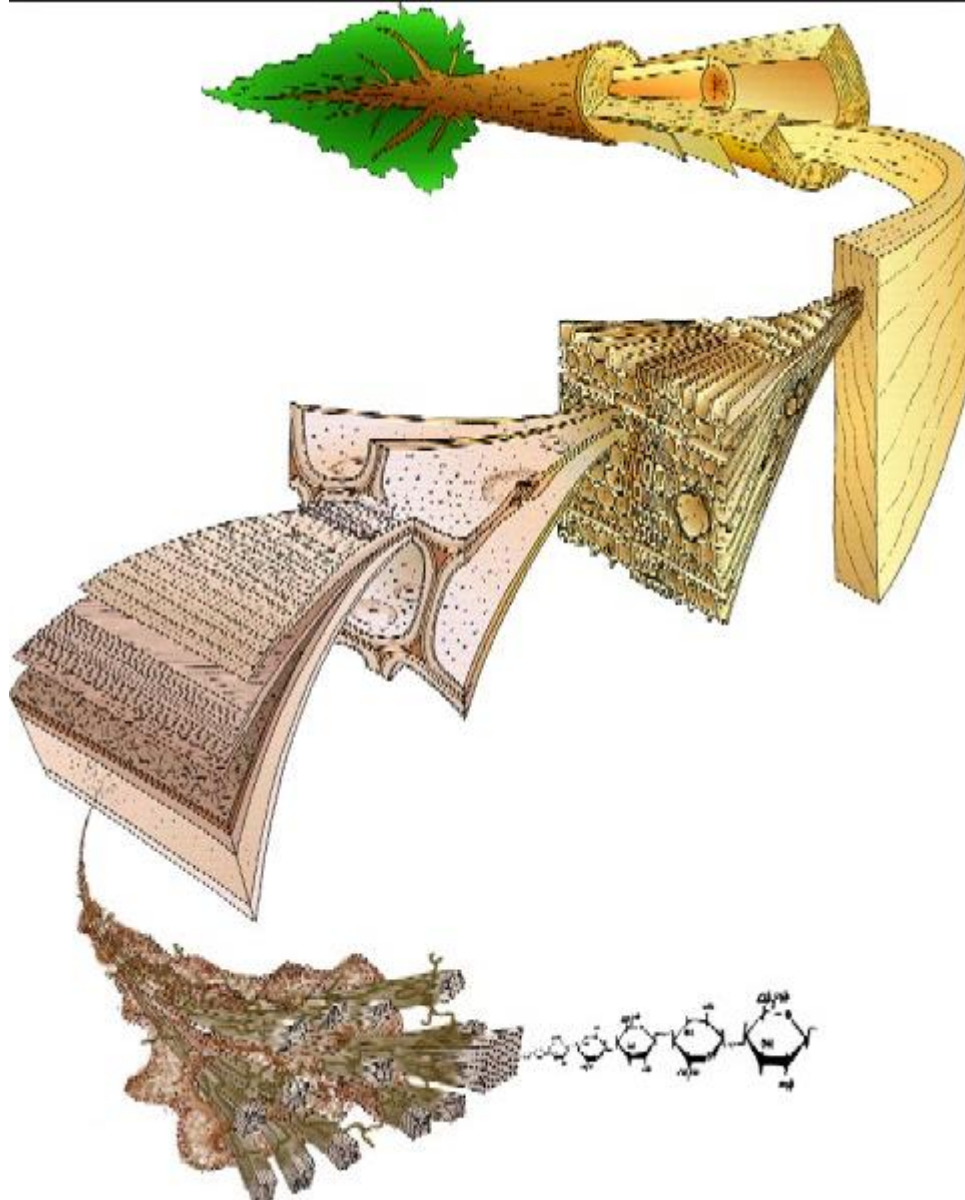
\* La couche externe S3 : constituée de micro-fibrilles, dont l'angle par rapport à l'axe de la cellule est de  $60$  à  $90^\circ$  son épaisseur varie de  $0,5$  à  $1,1 \mu m$ .

Les (03) couches sont judicieusement disposées avec une alternance croisée visant à réduire l'anisotropie de cette paroi.



**Figure II.2** : Représentation schématique des différentes couches constituant la paroi cellulaire.

## Chapitre III : Composition chimique du bois



Les principaux composants chimiques du bois sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Il existe en plus d'autres composants nommés les extractifs. Ces extractifs sont déposés dans la paroi de la cellule pendant la formation du bois parfait par la sécrétion.

La composition chimique élémentaire de la matière organique bois varie très peu d'une essence à l'autre. En moyenne elle se répartit, en pour cent du poids anhydre, de la façon suivante :

- Carbone C 50%
- Oxygène O 43%
- Hydrogène H 6%

- Azote N 1%
- Cendres (Silice, Phosphate, Potassium, Calcium) < 1%

Avec ces corps simples sont synthétisés, selon les essences, les trois principaux composants de types macro-polymère qui forment les parois cellulaires du bois, à savoir (Fig. III.1) :

- La cellulose → 42-55%
- L'hémicellulose → 13-28%
- La lignine → 19-29%
- Les extractibles sont composés de graisses, de cires ou encore de résines.

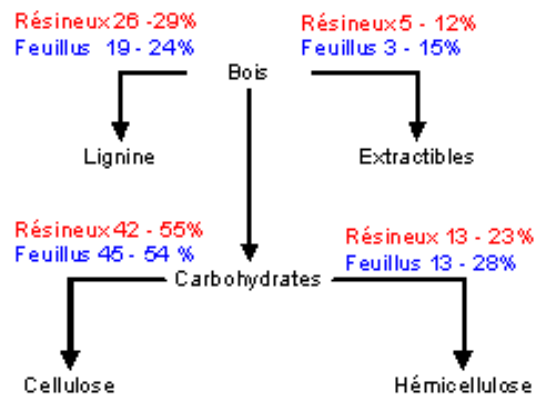


Figure III.1 : Constituants chimiques du bois et leur proportion

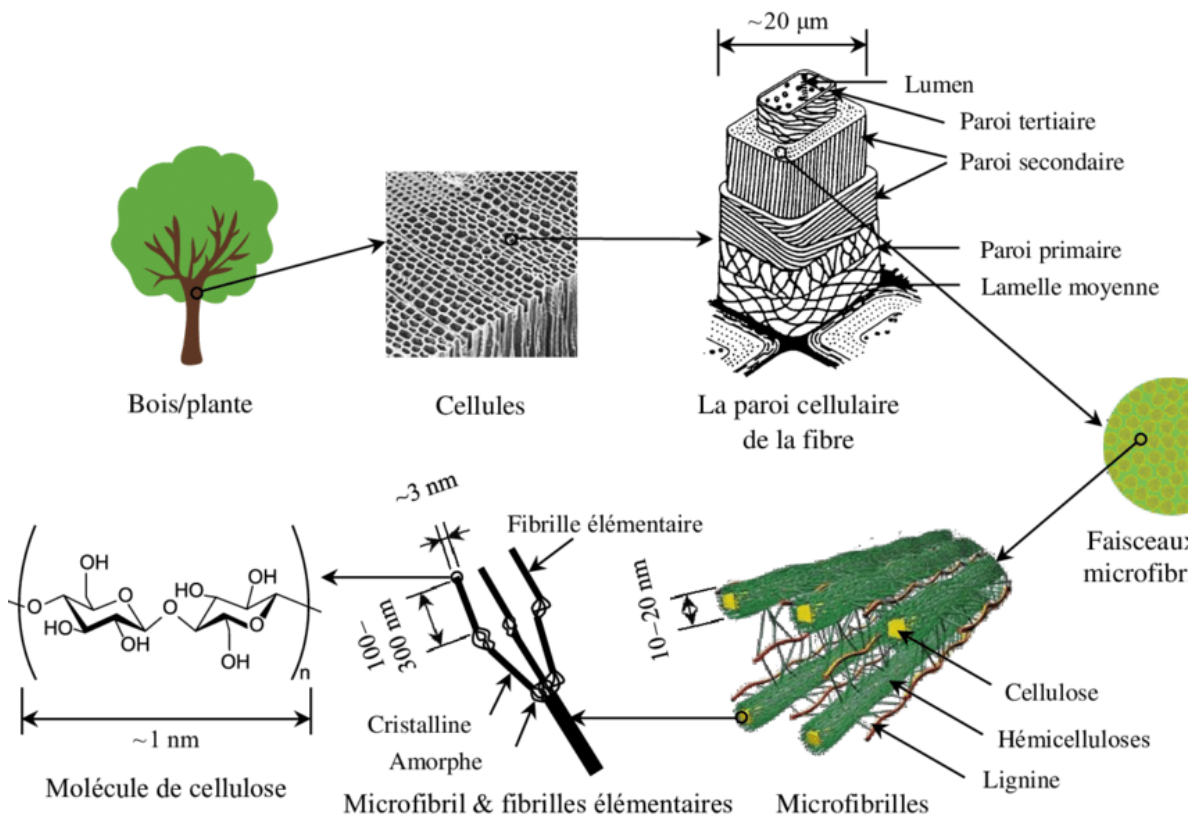


Figure III.2 : Schéma de la composition structurelle du bois

La cellulose est un des composés organiques les plus abondants sur terre, constituant de toutes les plantes fibreuses (Fig. III.2). Partout dans la nature, elle prend l'aspect de microfibrilles composées de longues bandes de molécules de cellulose arrangées de façon essentiellement parallèle. A l'exception des fibres de coton qui sont constituées de cellulose quasiment pure, la cellulose est normalement associée dans les microfibrilles aux hémicelluloses et à la lignine. La cellulose est un macro-polymère à fort degré de polymérisation prenant successivement des formes cristallines et amorphes. Le monomère de base est le cellulose, donnant les chaînes polymériques dont le composé élémentaire est un sucre en C<sub>6</sub> : le glucose (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub> (Fig. III.3).

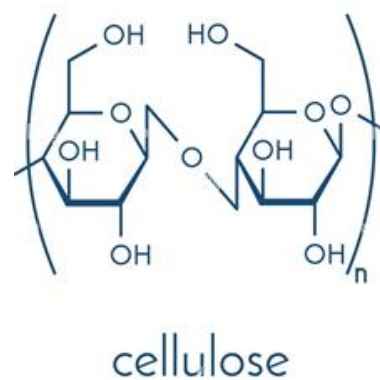


Figure III.3 : Composition chimique du macro-polymère (Cellulose).

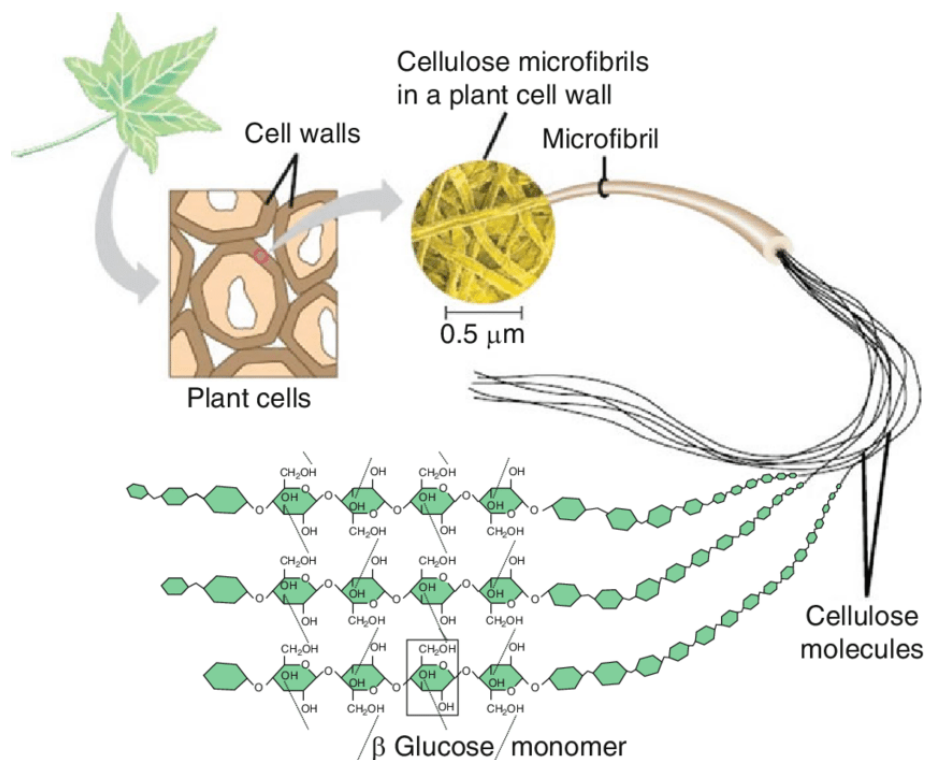
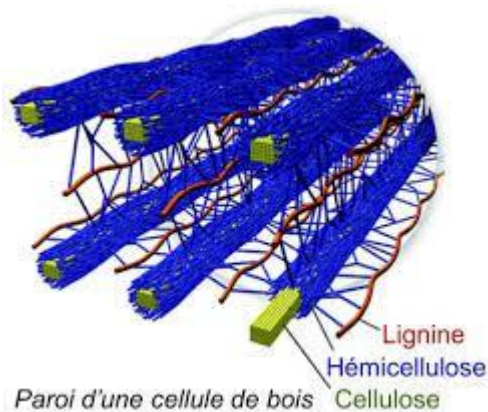


Figure III.4 : Structure de la cellulose du bois

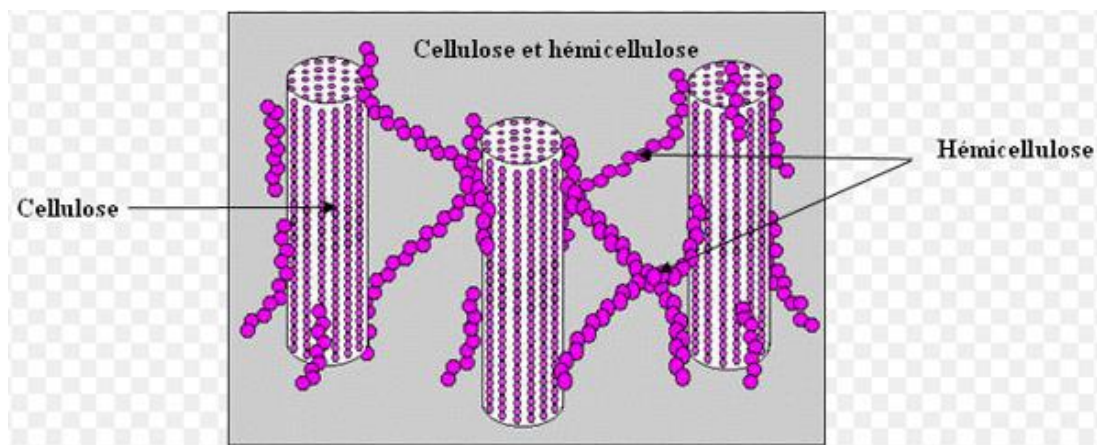


La cellulose cristalline (Fig. III.4) a des propriétés mécaniques extraordinairement élevées. Dans le bois, elle joue le rôle d'une espèce d'armature directement en relation avec les performances mécaniques. Des études sur des énergies physico-chimiques nécessaires à rompre les liaisons covalentes constitutives de la cellulose ont montré que des tensions de 800N/mm<sup>2</sup> devraient être atteintes. De plus, la rupture des fibres de cellulose pure se fait en mode de cisaillement pas en mode de traction, étant donné la rigidité différentielle des chaînes cristallines par rapport aux chaînes amorphes.

Les hémicelluloses (Fig. III.5a), une des composantes du bois après la cellulose sont des macro-polymères de formules très variables. Mais d'un poids très inférieur à la cellulose. Elles ont un rôle de pontage entre les fibres de cellulose par liaison H (Fig. III.5b). Contrairement aux celluloses, les hémicelluloses contiennent plusieurs sucres en C<sub>6</sub> et C<sub>5</sub>.



(a)

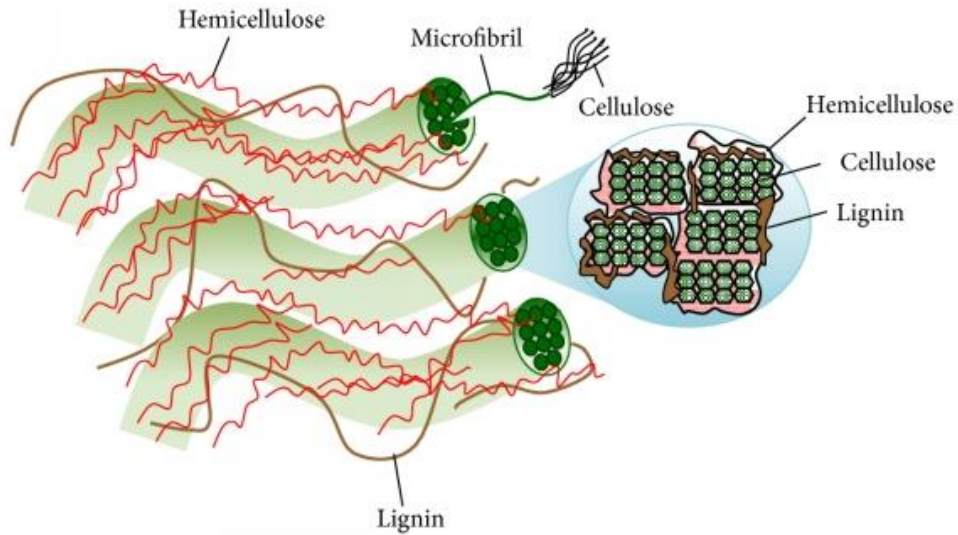


(b)

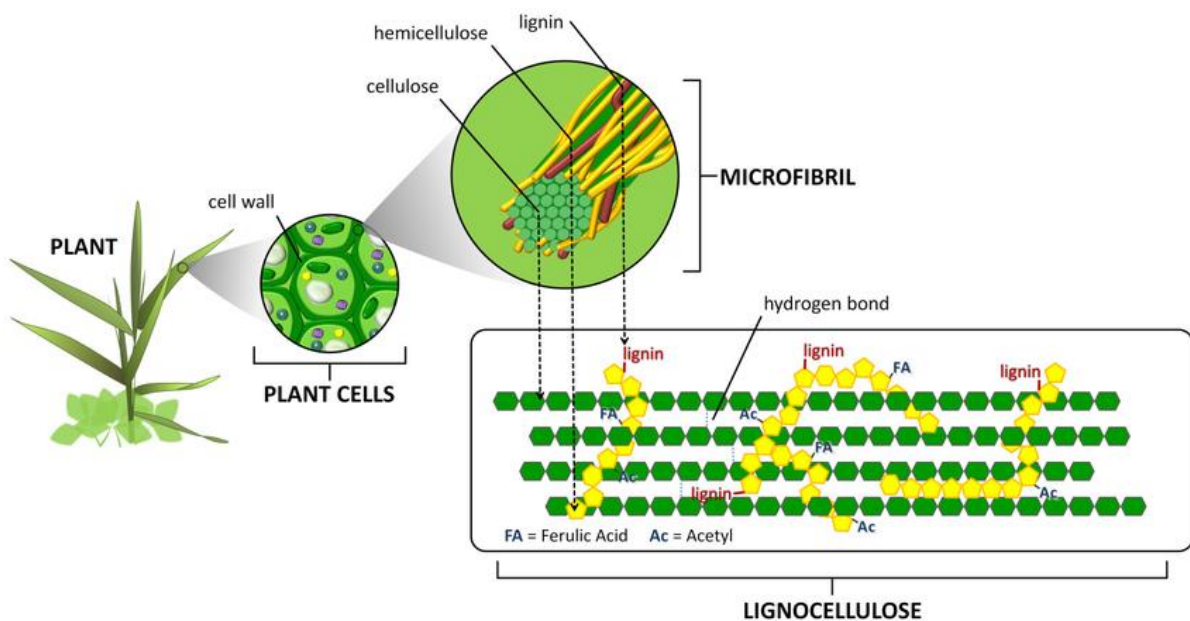
Figure III.5 : Pontage de l'hémicellulose (en bleu) entre les fibres de cellulose



La lignine (Fig. III.6a) est une substance d'incrustation dans le bois (Fig. III.6b). Elle est constituée d'un réseau tridimensionnel complexe, de type polyphénolique  $(C_6H_5OH)_n$  qui garantit au bois sa durabilité naturelle.



(a)



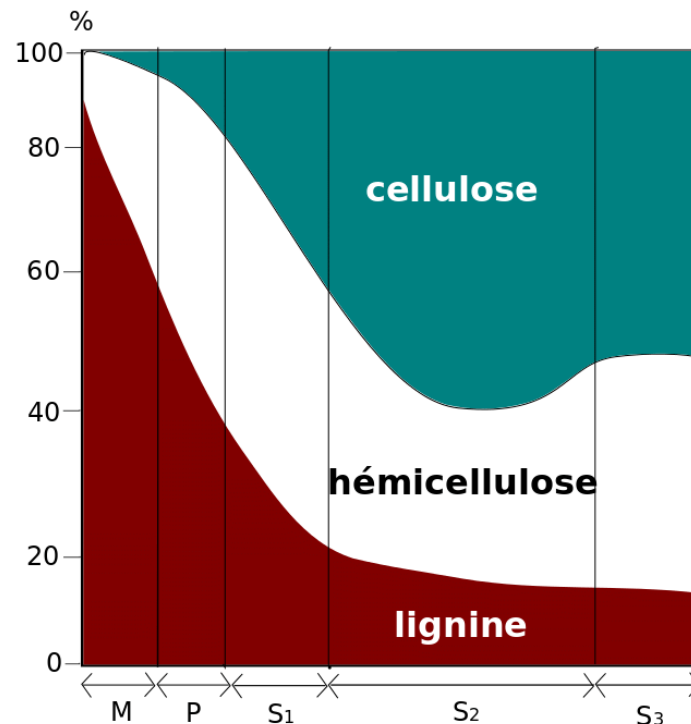
(b)

Figure III.6 : Incrustation de la lignine dans le bois

La lignine est la principale composante non hydro-carburée du bois. Elle est chimiquement très différente de la cellulose et de l'hemicellulose. C'est un polymère amorphe, réticulé,

tridimensionnel et complexe. La lignine est essentiellement formée d'unités phénol présentées à la Fig. (1.27c). La nature aromatique de l'unité phénolique rend la lignine hydrophobe et sa structure tridimensionnelle présente une grande rigidité. Sans lignine, le bois ne pourrait pas avoir un rôle de soutien.

La figure (III.7) représente la répartition de la lignine à l'intérieur de la paroi cellulaire des différents constituants polymériques.



**Figure III.7 :** Distribution en pour cent de la cellulose, la lignine et l'hémicellulose à l'intérieur de la paroi cellulaire.

La cellulose et l'hémicellulose se trouve dans le bois sous forme de fibres constituées de chaînes moléculaires amorphes ou tridimensionnelles pour la cellulose (cristaux). Ces fibres sont orientées parallèlement aux cellules du bois, confèrent à ce matériau ces bonnes propriétés mécaniques de résistance à la traction et à la compression longitudinales (//) aux fibres. La lignine joue le rôle de liant pour assurer la cohésion transversale aux fibres mais comme elle est amorphe, elle ne confère aucune rigidité transversale. Les parois cellulaires sont un matériau composite formé de deux polymères essentiels de types cellulosique  $(C_6H_{10}O_5)_n$  et polyphénolique  $(C_6H_5OH)_n$ . D'autres substances, dites accompagnantes, telles que les résines, elles représentent généralement moins 5% du poids, elles jouent un rôle de la prise de colle ou adhésion de la peinture et la durabilité du bois.

# CHAPITRE IV : Les Propriétés Mécaniques du bois

## I. INTRODUCTION

La mécanique est par définition une partie de la physique ayant pour objet l'étude des mouvements des objets, leurs relations et les forces qui les produisent.

## II. LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES BOIS.

Les caractéristiques mécaniques du bois dépendent directement de ses propriétés physiques et son comportement à des influences extérieures autres que des forces appliquées. Les propriétés physiques du bois dépendent largement de sa structure, c'est à dire de la disposition et de la nature des éléments qui le composent. Nous parlerons ici des propriétés directionnelles (anisotropie), du contenu en humidité, de la densité...

La connaissance des propriétés physiques est importante car celles-ci peuvent influencer significativement la performance et la force du bois en utilisation.

### 1. Masse volumique et densité

Caractéristiques étroitement liées aux propriétés mécaniques du bois. La masse volumique  $\rho_S$  spécifique de la matière ligneuse (masse volumique des parois cellulaires) ne varie pratiquement pas, quelle que soit l'essence considérée :  $\rho_S = 1530 \text{ kg/m}^3$

En revanche, la masse volumique  $\rho$  du bois varie très fortement en fonction des paramètres suivants :

- La teneur en eau  $\omega$  ;
- L'essence ;
- Les caractéristiques de croissance ;
- La texture de croissance.

$\rho_0 \rightarrow$  masse volumique à l'état sec

$\rho_\omega \rightarrow$  masse volumique à l'état humide

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_\omega = \frac{m_\omega}{V_\omega} \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\omega} = \frac{m_0 \left(1 + \frac{\omega}{100}\right)}{V_0 \left(1 + \frac{\beta_0}{100} \omega\right)} = \rho_0 \frac{\left(1 + \frac{\omega}{100}\right)}{\left(1 + \frac{\beta_0}{100} \omega\right)}$$

$\beta_0$  est le coefficient de gonflement volumique

Le volume des pores

$$C = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_s}\right) 100\%$$

Elle dépend de la porosité du bois.

Le volume des pores C%

Exemple :

Balsa  $\rightarrow \rho_0 = 100 \frac{kg}{m^3} \rightarrow C = 93\%$



Epicéa  $\rightarrow \rho_0 = 400 \frac{kg}{m^3} \rightarrow C = 73\%$



Hêtre  $\rightarrow \rho_0 = 650 \frac{kg}{m^3} \rightarrow C = 57\%$



Amourette  $\rightarrow \rho_0 = 1300 \frac{kg}{m^3} \rightarrow C = 13\%$



On remarque que la masse volumique  $\rho_0$  du bois le plus lourd est inférieure à  $\rho_C$  de la matière ligneuse, afin de conserver une porosité vitale permettant la circulation de la sève.

La densité du bois varie selon l'essence, son degré d'humidité, la situation géographique et son climat.

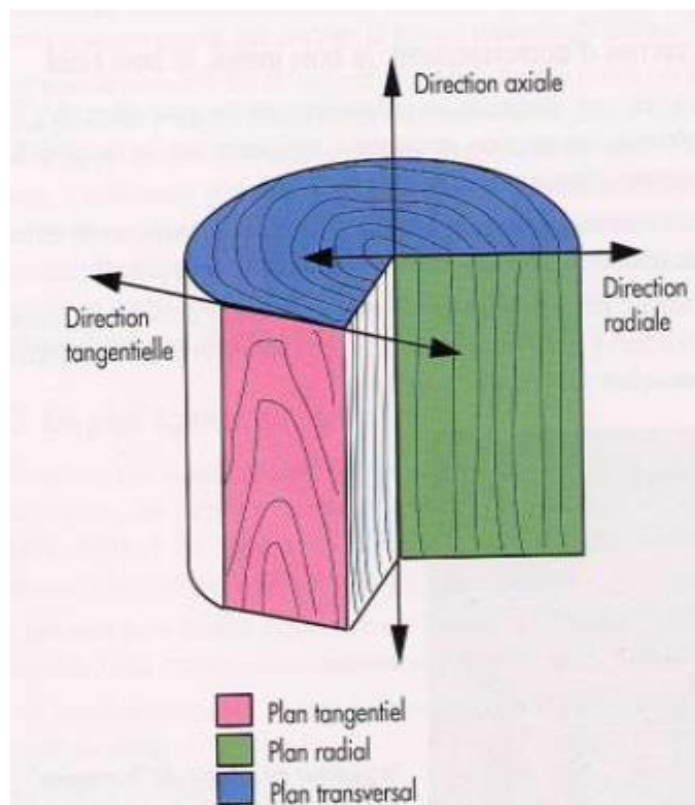
Une grande production de bois est utilisée dans le bâtiment : pour les poutres, les solives, les planches et les supports de charges diverses.

### **Conséquences**

Le choix de caractéristiques précises, selon les propriétés physiques du bois, va être influant sur l'ouvrage à réaliser notamment pour l'essence et le type de débit.

a) Anisotropie :

Le bois est un matériau anisotrope (Fig. IV.1), c'est-à-dire que sa structure et ses propriétés varient dans les différentes directions du plan ligneux : directions longitudinale (parallèles aux fibres), radiale (perpendiculaire aux fibres et normales aux cernes) et tangentielle (perpendiculaire aux fibres et tangent aux cernes). Bien que la plupart des propriétés du bois diffèrent dans ces trois directions, les différences de propriétés entre l'axe radial et tangentiel sont en général mineures, les différences principales étant observées pour l'axe longitudinal.



**Figure IV.1** : Anisotropie du matériau bois

Ces propriétés permettent de choisir le type de découpe selon l'utilisation souhaitée (Fig. IV.2)



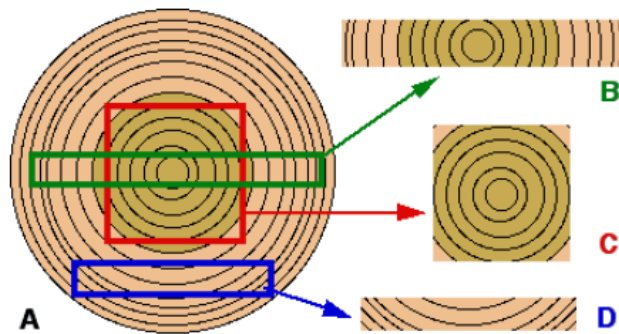


Figure IV.2 : Différents type de découpe du matériau bois

Dans un tronc (A),

B) Pour la fabrication de planches, la découpe radiale permet la meilleure résistance.

C) La découpe symétrique du bois de cœur permet la fabrication de poutres ou de poteaux très résistants.

D) Par contre les découpes tangentielles donnent des planches qui peuvent se voiler en séchant.

La fabrication de plateau de table peut difficilement se réaliser à partir d'une seule planche (sauf exception) (Fig. IV.3).



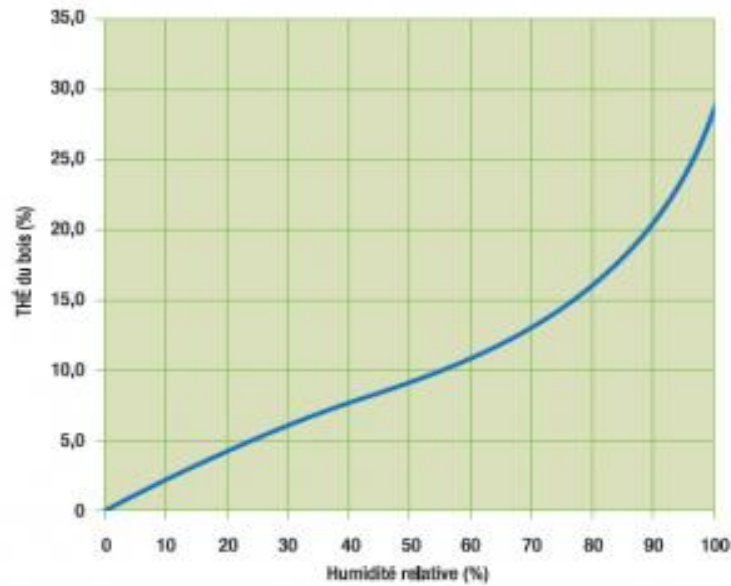
Figure IV.3 : Association de plusieurs planches ou plusieurs tasseaux orientés de manière adéquate permet de compenser les problèmes de voilage.

*b) Hygroscopicité :*

L'hygroscopicité est le phénomène selon lequel la teneur en humidité du bois varie en fonction des conditions d'humidité relative et de température de l'air ambiant. Au bout d'un moment, dans des conditions climatiques stables, les échanges d'humidité entre le bois et l'air cessent : le bois atteint alors ce que l'on appelle sa teneur en humidité à l'équilibre (THÉ). Ce phénomène est bien documenté et répond à la courbe de la figure IV.4 :

À l'intérieur d'un bâtiment chauffé (à 21°C), l'humidité relative se situe généralement entre 45 % et 65 %, dépendamment des saisons. À ces conditions climatiques, la teneur en humidité d'équilibre du bois oscille entre 8 % et 12 %.





**Figure IV. 4 :** Teneur en humidité à l'équilibre (THÉ) en fonction de l'humidité relative en %

Le calcul du taux d'humidité est comme suit :

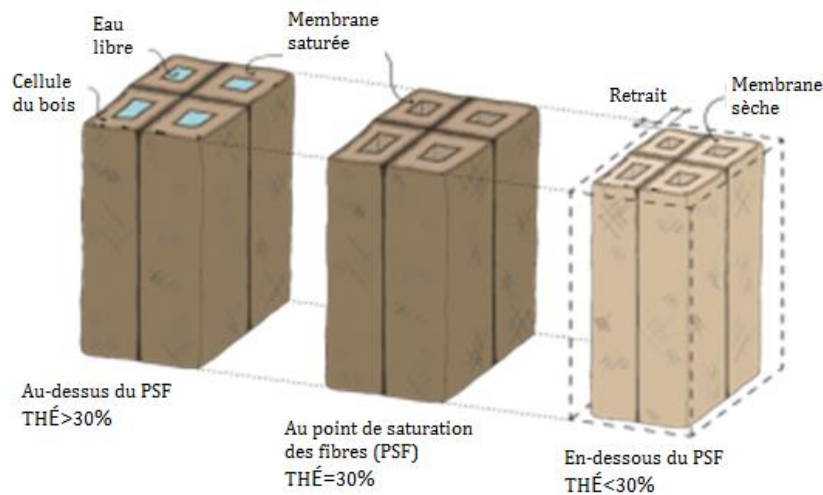
$$H = \frac{(Masse.bois.humide - Masse.bois.anhydre)}{(Masse.bois.anhydre)} \times 100$$

$$H = \frac{(Masse.eau.dans.bois)}{(Masse.bois.anhydre)} \times 100$$

**c) Rétractabilité (retrait) & Gonflement :**

Le retrait et le gonflement sont les changements dimensionnels du bois qui se produisent en fonction de sa teneur en humidité, et donc, de la quantité d'eau présente dans ses cellules.

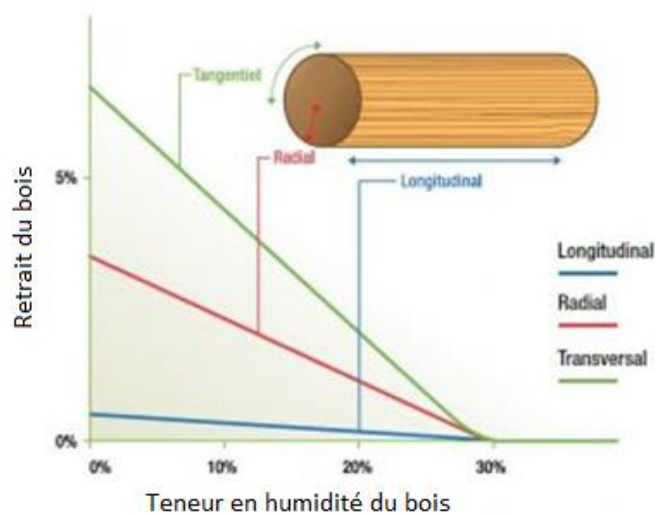
Le bois contient de l'eau sous deux formes. Lorsque la teneur en humidité est maximale, il y a présence d'eau absorbée à l'intérieur des parois cellulaires ainsi que de l'eau libre dans les vides à l'intérieur des cellules. Quand le bois sèche, l'eau libre à l'intérieur des cavités cellulaires s'évapore en premier jusqu'à l'obtention du taux d'humidité correspondant au point de saturation des fibres (PSF). Le PSF correspond au degré d'humidité où toute l'eau libre est extraite du bois, mais où les parois des cellules en sont encore saturées. Il se situe à une teneur en humidité d'environ 30 % pour la plupart des essences de bois.



**Figure IV.5 :** Influence du retrait et gonflement sur les changements dimensionnels du bois.

En dessous du point de saturation des fibres, le bois perd ou absorbe de l'humidité jusqu'à ce que la teneur en humidité soit en équilibre avec celle de l'air ambiant. Les dimensions du bois vont alors varier : en perdant de l'humidité, le bois va se rétracter (retrait) alors qu'en absorbant de l'humidité, il gonflera (gonflement). Par contre, au-dessus du point de saturation des fibres, il ne se produit plus de changement dimensionnel du bois (gonflement) (Fig. IV.5).

En raison de l'agencement des cellules dans la structure microscopique du bois, le retrait dans le sens radial et tangentiel est beaucoup plus important que dans le sens longitudinal, qui lui, est presque nul (Fig. IV.6).



**Figure IV.6 :** Influence du retrait en fonction de la teneur en humidité du bois.

*d) Durabilité :*

La durabilité d'un bois caractérise sa résistance aux agressions externes qui peuvent avoir plusieurs origines : les organismes biologiques destructeurs (bactéries, champignons lignivores, insectes à larves xylophages, termites et organismes xylophages marins), les sollicitations physiques (humidité de l'air, lumière, froid, pluie, érosion mécanique) et chimiques (acides, bases ou autres agents chimiques). En effet, ces différents agents sont susceptibles d'altérer la composition et la structure du bois et donc ces propriétés.

*e) Homogénéité/Hétérogénéité :*

Un bois homogène est un bois dans lequel le bois de printemps est peu différent par sa structure, son aspect et ses propriétés du bois d'été, si bien que le bois initial et le bois final à l'intérieur d'un cerne, de même que les cernes de croissance entre eux, sont peu distincts.

Au contraire, un bois hétérogène est un bois dans lequel le bois initial contraste fortement par sa structure, son aspect et ses propriétés, avec le bois final, ce qui rend très apparentes les deux zones à l'intérieur d'un cerne ainsi que les limites entre les différents cernes.

### III. PROPRIETES MECANIQUE DU BOIS

L'élasticité est la propriété de reprendre la forme de bois (ou leurs dimensions initiales) lorsque la charge causant la déformation est enlevée, ceci peut avoir lieu lorsqu'on est en dessous de la limite proportionnelle ou élastique. La limite proportionnelle est un paramètre qui distingue le comportement élastique du comportement plastique. Les propriétés élastiques de bois sont différentes dans les trois directions. Par ailleurs, ils sont influencés par plusieurs facteurs, principalement : la densité, la teneur en eau et la température.

*a) Module d'élasticité*

Ainsi les propriétés qui intéressent un bureau d'études sont les constantes d'élasticité, la limite d'élasticité, la charge d'écrasement et la ténacité (tableau **IV.1**).

Plus la masse volumique est faible, plus l'anisotropie élastique est importante.

Il dépend en premier lieu de la masse volumique et de l'angle entre la direction de sollicitation et les fibres. L'expression suivante exprime l'anisotropie élastique :

$$E_{\parallel} / E_{\perp} = \frac{\rho}{\rho_S}$$

Avec  $E_{\parallel}$  est le module de Young parallèle aux fibres ;

Et  $E_{\perp}$  est le module de Young perpendiculaire aux fibres ;

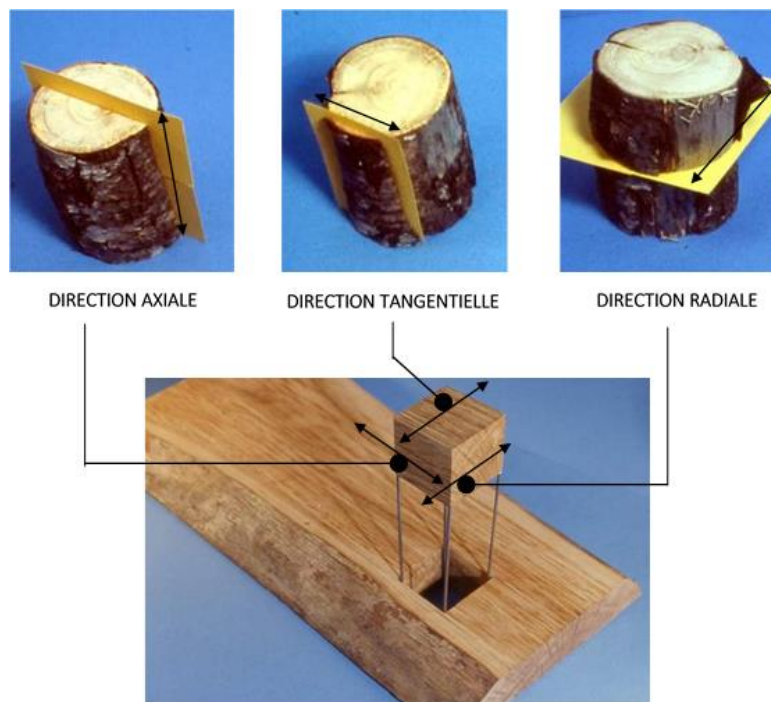
$\rho_S$  est la masse volumique des parois cellulaires.

**Exemple :**

**Tableau IV.1 :** Caractéristiques mécaniques du bois

Bois	Masse volumique kg/m <sup>3</sup> 1	E (GPa) 1		Résistance (PMa) // 1,2		Ténacité (MPa√m) 1	
		// Fibres	⊥ Fibres	Traction	Compression	// Fibres	⊥ Fibres
Balsa	0.1-0.3	4	0.2	23	12	0.05	1.2
Acajou	0.53	13.5	0.8	90	46	0.25	6.3
Sapin	0.55	16.4	1.1	70	42	0.34	6.2
Pin	0.55	16.3	0.8	89	47	0.35	6.1
Frêne	0.67	15.8	1.1	116	53	0.61	9.0
Chêne	0.69	16.6	1.0	97	52	0.51	4.0
Hêtre	0.75	16.7	1.5	---	---	0.95	8.9

- 1- Ces caractéristiques sont variables selon le taux d'humidité et la température
- 2- L'anisotropie augmente lorsque la densité diminue. La résistance transversale représente en principe 10 à 20% de la résistance longitudinale.



**Figure IV.7 :** Volume représentatif indiquant les directions de sollicitations

Sur le tableau IV.2 est représentée la comparaison du comportement mécanique du bois en traction et les autres matériaux suivant les directions de sollicitations (axiale et transversale) illustrées sur la figure IV.7.

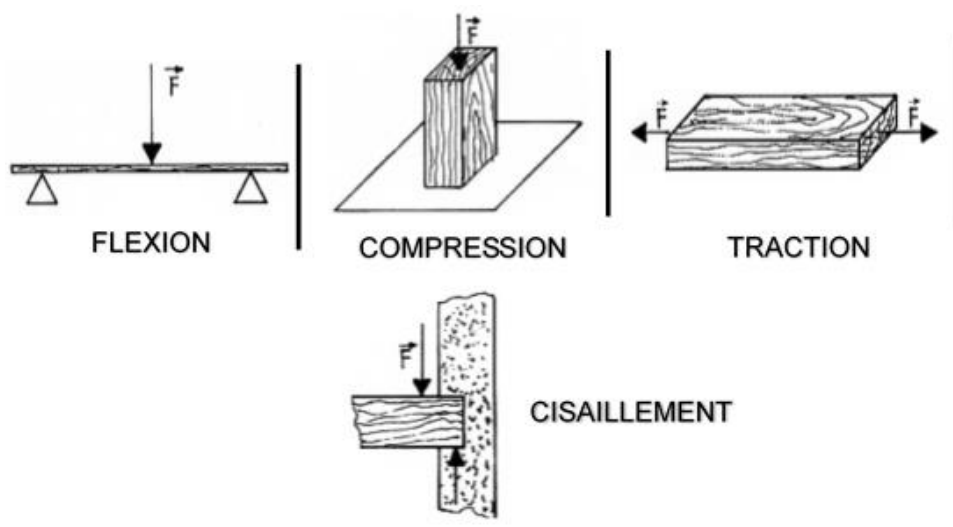
**Tableau IV.2 :** Comparaison entre le comportement mécanique du bois en traction suivant les directions de sollicitations (axiale et transversale) et les autres matériaux :

	RESINEUX (sapin)	FEUILLU (chêne tendre)	FEUILLU (Azobé)	ACIER	BETON
TRACTION (axiale)	90 - 100	100 - 120	150-200	270	2.4
TRACTION (transversale)	1.2	3	5	270	2.4

*b) Les différentes sollicitations :*

Le bois est un matériau possédant une structure interne particulière. Les cellules sont en effet toutes orientées verticalement et parallèlement dans les parois cellulaires, permettant ainsi aux arbres de résister à des forces extérieures comme le vent. Cette caractéristique fait du bois un matériau possédant une meilleure résistance dans la direction parallèle au fil (longitudinalement) que dans la direction perpendiculaire à celui-ci (radialement et tangentiellment).

L'étude du comportement mécanique du bois a pour but de connaître sa réponse à une sollicitation donnée (flexion, compression, traction, cisaillement) (Fig. IV.8).


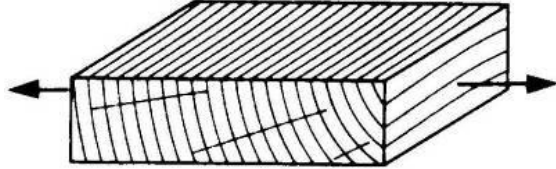


**Figure IV.8 :** Différentes sollicitations étudiées

c) *Résistance à la traction et compression* (Tableau IV.3 & IV.4)

- La résistance à la traction de nombreux bois est voisine de 100MPa.
- La ductilité est faible.
- L'allongement à la rupture étant typiquement 1%.
- La résistance à la compression est faible.
- La compression fait flamber les parois cellulaires.

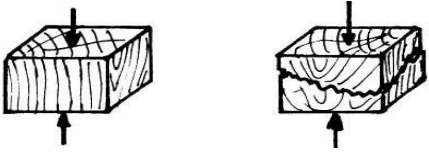
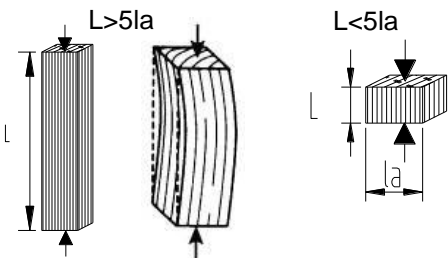
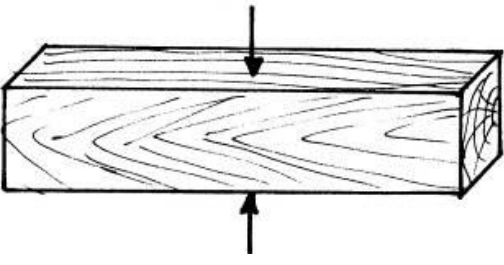
**Tableau IV.3** : Comportement mécanique du bois aux sollicitations de traction (axiale et transversale)

Type	Croquis	Constatations	Résistance
TRACTION	AXIALE 	Faible allongement des fibres	Très Grande Résistance
	TRANSVERSALE 	Rupture rapide des fibres par décollement	Très mauvaise résistance. A éviter.

De plus, en raison de sa structure interne, le bois possède également une très bonne capacité en traction lorsque celle-ci est exercée parallèlement au fil. Par contre, la présence de nœuds dans une pièce tendue réduit la résistance en traction de celle-ci.

La traction exercée perpendiculairement au fil doit être le plus souvent possible limitée car le bois possède très peu de résistance dans cette direction. Un effort radial exercé dans un élément courbé tel qu'une arche peut provoquer ce genre de sollicitation indésirable.

**Tableau IV.4** : Comportement mécanique du bois aux sollicitations de compression (axiale et transversale)

Type		Croquis	Constatations	Résistance	
COMPRESSION	AXIALE	Pièces courtes		Raccourcissement et écrasement	Bonne Résistance
		Pièces longues		Flambement de la pièce si $L > 5la$ Raccourcissement de la pièce si $L < 5la$	Plus la pièce est longue plus la résistance diminue.
	TRANSVERSALE		Faible allongement des fibres	Résistance plus faible.	

Puisque les cellules du bois sont toutes orientées dans le sens longitudinal, la structure interne du bois est comparable à une multitude de petits tubes soudés les uns aux autres. Cela fait en sorte que le bois est très résistant à la compression exercée dans le sens du fil (compression axiale). On doit cependant tenir compte du flambement au cours du calcul de la résistance à la compression d'éléments porteur.

La résistance à la compression exercée perpendiculairement au fil est inférieure à celle appliquée parallèlement au fil. Elle est principalement causée par la présence de charges concentrées ou par des contraintes exercées aux appuis des éléments fléchis. On utilise généralement des plaques d'appuis en acier afin d'augmenter la surface d'appui et ainsi de diminuer les effets de la compression perpendiculaire au fil.

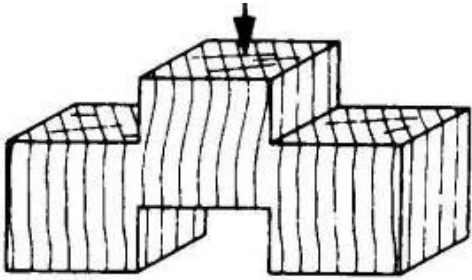
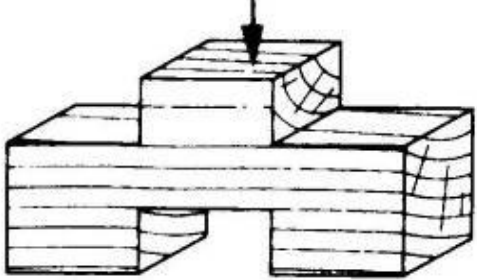
#### d) Résistances au cisaillement (Tableau IV.5)

Le cisaillement longitudinal est un autre aspect à considérer au moment des calculs de résistance d'un élément en bois. La réduction de l'aire transversale d'une section en bois



causée par des ouvertures pour les connecteurs ou par des entailles influence la résistance au cisaillement.

**Tableau IV.5** : Comportement mécanique du bois aux sollicitations de cisaillement (axiale et transversale)

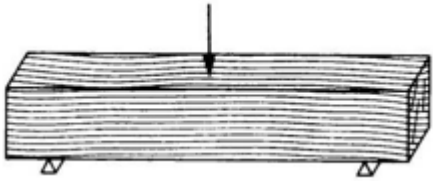
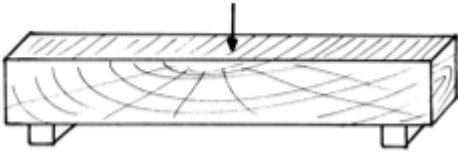
Type		Croquis	Constatations	Résistance
CISAILLEMENT	AXIALE		Rupture rapide des fibres par décollement	A éviter
	TRANSVERSALE		Faible tassement des fibres	Bon comportement du bois.

e) *Résistances à la flexion* (Tableau IV.6)

Selon des principes de base d'ingénierie, un couple de flexion est le résultat d'efforts de compression et/ou de traction excentriques par rapport à l'axe neutre d'un élément. Puisqu'il résiste très bien à la compression et à la tension axiale, le bois est donc également efficace en flexion.

**Tableau IV.6** : Comportement mécanique du bois aux sollicitations de flexion (axiale et transversale)

Type	Croquis	Constatations	Résistance

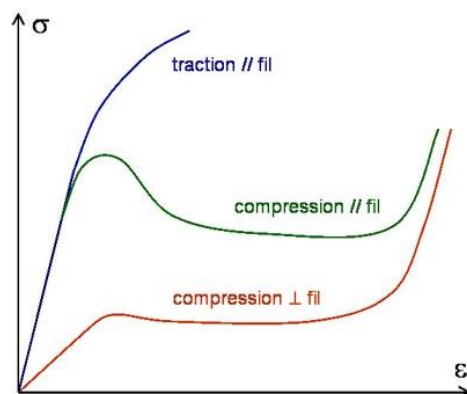
FLEXION	AXIALE		Déformation de la pièce	La résistance augmente si les appuis sont rapprochés.
	TRANSVERSALE		Rupture rapide des fibres par décollement	Très mauvaise résistance. A éviter

#### f) Résistances à la Fatigue

Le bois est un matériau qui résiste très bien aux charges cycliques comme celles dues au vent ou aux séismes.

#### Illustration de la résistance mécanique du bois

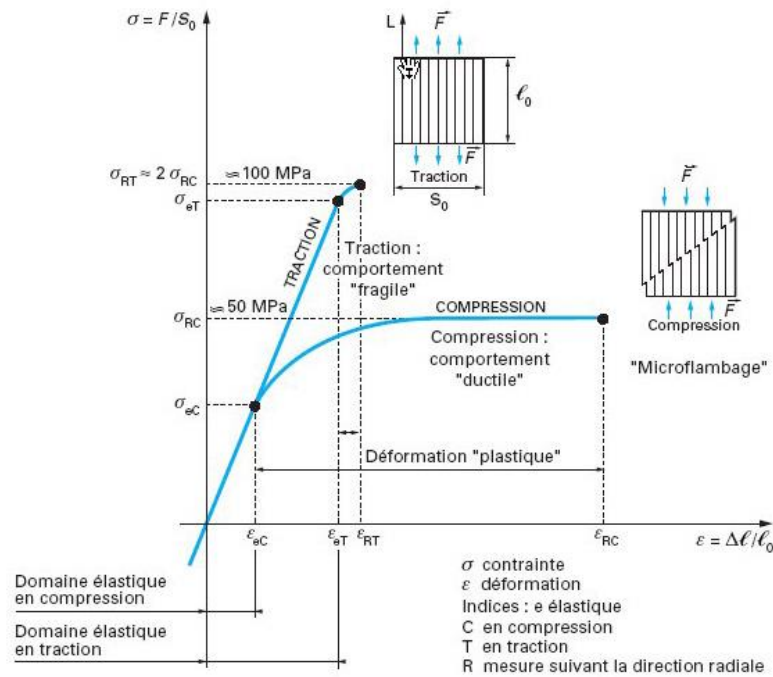
Il est important d'être conscient de la variation de ces propriétés dans la conception de structures en bois. Les courbes contrainte-déformation typiques du bois en traction et en compression parallèle et perpendiculaire aux fibres sont représentées sur la figure IV.9.



**Figure IV.9 :** Comportement mécanique du bois aux sollicitations de compression et traction (axiale // et transversale ⊥)

En compression, le bois est par contre ductile. La grande faiblesse mécanique du bois est en traction dans le sens perpendiculaire aux fibres (Fig. IV.10). La résistance en traction

perpendiculaire aux fibres est nettement inférieure à celle parallèle, et la rupture présente un caractère fragile. La résistance est pratiquement divisée par 100 par rapport au sens parallèle aux fibres. Les sollicitations en traction perpendiculaire aux fibres sont donc à éviter dans la conception des structures en bois.



**Figure IV.10** : Comportement du bois en traction et en compression dans la direction longitudinale des fibres

La distribution de la résistance du bois, pour la même essence et classe, est assez large et très variée selon la direction de sollicitation. Les résistances en traction transversale et au cisaillement du bois sont très faibles, ceux-ci sont de l'ordre de 0.5MPa en traction transversale et de 3MPa en cisaillement. La résistance longitudinale en compression, quant à elle, est beaucoup plus élevée : elle est de l'ordre de 40 à 50MPa. Cependant, les défauts (nœuds par exemple.) influencent aussi sur l'anisotropie de la résistance. Les nœuds sont les cicatrices des branches. Ils sont sains et adhérents lorsqu'ils sont issus de la partie vivante de la branche, noirs et non adhérents si la branche est morte.

La géométrie du nœud dans la poutre dépend de la position de la planche dans le billon et du mode de débit. Ce type de défauts est critique essentiellement en traction. C'est pourquoi la résistance en traction longitudinale du bois présente une forte variabilité, si bien que la valeur de dimensionnement devient normalement plus faible qu'en compression.

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

et

$$\sigma_{\perp} = \sigma_S \left( \frac{\rho}{\rho_S} \right)^2$$

$\sigma_S$  est la limite élastique d'une paroi cellulaire

### *g) Ténacité*

Facteur très important. Il permet de dire si la structure en bois est susceptible de rompre soudainement par la propagation d'une fissure.

Le paramètre adéquat est la ténacité KIC. Il dépend de la masse volumique en  $\left( \frac{\rho}{\rho_S} \right)^{3/2}$ .

La ténacité est plus faible dans la direction axiale que dans la direction transversale.

# Chapitre V : Bois modifiées

## Introduction

Les bois modifiés sont des bois traités ou mélangés à d'autres substances pour obtenir un matériau possédant des propriétés différentes de celles du bois naturel. Il arrive parfois que les arbres retrouvés en forêt ne peuvent répondre directement à nos besoins.

La production de bois modifié permet les avantages suivants :

- Obtenir des matériaux présentant des propriétés mécaniques plus constantes ;
- obtenir des matériaux plus résistants aux intempéries ;
- fabriquer des matériaux de plus grandes dimensions ;
- utiliser des arbres plus petits pour produire les matériaux ;
- permettre l'utilisation des restes de bois et des résidus de coupe.

Il existe plusieurs types de bois modifié :

## Bois Lamellé-collé

Les conifères sont les essences très largement utilisées pour les structures en lamellé collé. La dimension transversale maximale du bois massif est environ 300 mm, ce qui limite la portée maximale d'un élément en bois.

Le bois lamellé-collé (BLC), aussi appelé plus simplement lamellé-collé ou bois lamellé (glue-laminated timber ou glulam en anglais), est un matériau qui s'obtient par collage de plusieurs lamelles en bois dont le fil est essentiellement parallèle. Son intérêt est d'une part la fabrication d'une pièce de grande dimension ou de formes particulières qui n'auraient pu être obtenues par utilisation du même matériau sans transformation, d'autre part l'amélioration de la résistance mécanique par rapport à une pièce de bois massif (grâce au triage et à la purge des défauts).



**Figure V.1 :** Bois lamellé-collé

### Caractéristiques constantes et garanties :

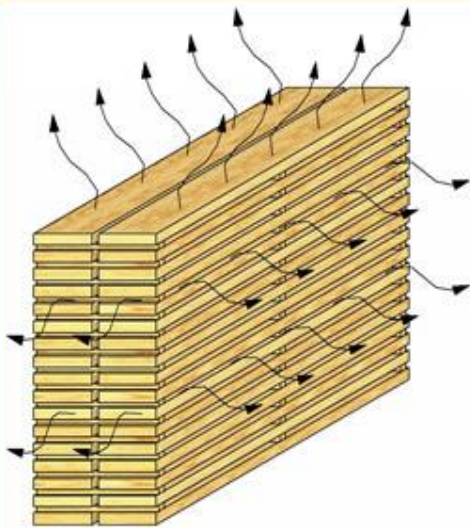
En charpente, le lamellé-collé est constitué de lamelles de bois, souvent de l'épicéa, du Douglas ou du pin sylvestre d'une épaisseur de  $33\text{mm}$  à  $45\text{mm}$  et collées entre elles. La masse volumique du bois lamellé-collé est fonction des essences de bois utilisées pour le fabriquer : aux environs de  $500\text{kg}/\text{m}^3$  pour les résineux cités plus haut, supérieure à  $700\text{kg}/\text{m}^3$  pour le bois lamellé-collé de chêne.

Les résistances mécaniques des classes les plus courantes de bois lamellé-collé vont de  $20$  à  $40\text{MPa}$  pour la résistance en flexion, de  $13,6$  à  $22,5\text{MPa}$  pour la résistance en traction et de  $21$  à  $29\text{MPa}$  pour la résistance en compression.

Le lamellé-collé de bambou est utilisé pour la fabrication de parquets, meubles, etc., et également en charpente. Celui-ci aurait même de meilleures performances de résistances que le lamellé-collé en "bois classique" (grâce à ses caractéristiques propre de la Fibre de bambou). Il est principalement fabriqué en Asie.

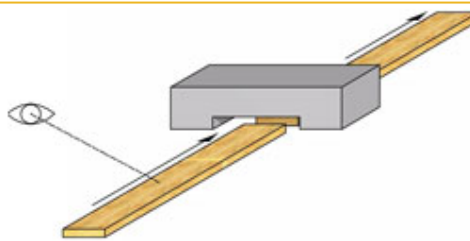
### Les étapes de fabrication du lamellé-collé

1. Réception et tri des bois
2. Séchage et stabilisation



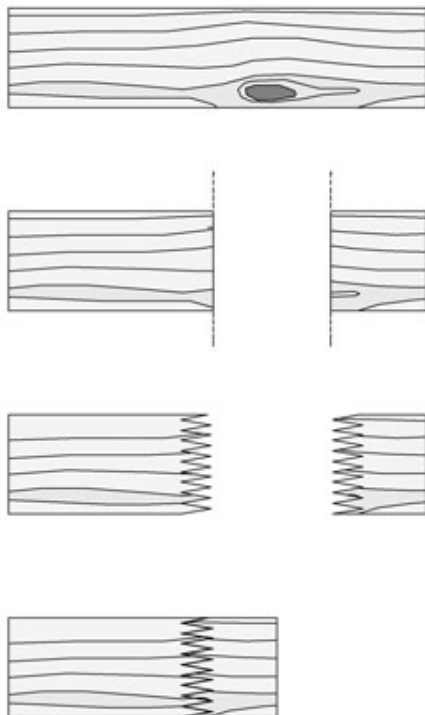
Les sciages de résineux passent d'abord au séchoir pour ramener leur teneur en humidité à environ 12%. Ils sont ensuite rabotés.

### 3. Purge des lamelles (flashes, gerces, nœuds)



Après le séchage et un premier rabotage les planches sont inspectées et classées selon la qualité du bois (classes de résistance mécanique). Ce tri (purge) se fait de plus en plus par des machines. Les critères de tri font aussi intervenir des critères de qualité sur l'état de surface des pièces.

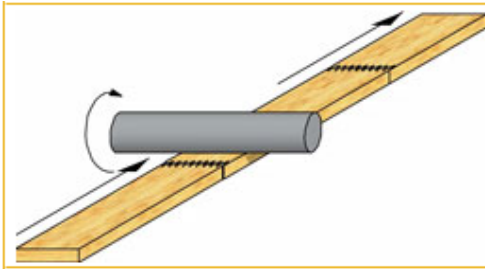
### 4. Aboutage et mise en longueur (Enlèvement des nœuds et des défauts)



Le tri (purge) élimine les pièces ou les sections de pièces présentant des altérations ou des défauts rédhibitoires pour la classe de tenue mécanique et/ou la qualité d'état de surface recherchée (gerces, piqûres, fente de cœur, nœuds pourris, poches de résine, etc.). Les planches peuvent ensuite être encollées bout à bout dans leur grande longueur pour former des pièces de grande dimension (encollage des extrémités taillées en dents de scie, dit encore aboutage à entures multiples).



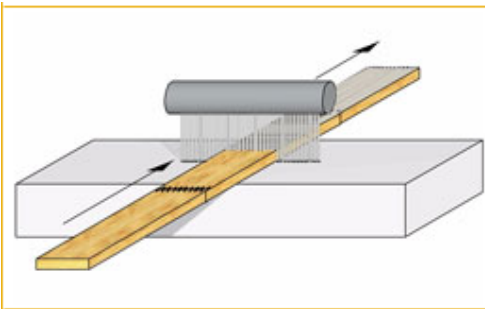
## 5. Rabotage



### Rabotage des lames (ou lamelles)

Les lames sont rabotées jusqu'à une épaisseur de 45 mm

## 6. Encollage :

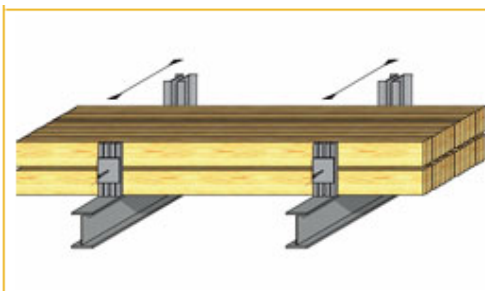


### Encollage

L'application de colle se fait sur les faces des lames

Les joints de colle sont très minces (env. 0,3mm), les colles sont très peu sensibles à l'action des produits chimiques. S'il est prévu un produit de protection des éléments en BLC, la compatibilité de ce produit avec la colle devra être évaluée au préalable. Les fabricants de BLC ne travaillent pas en général avec n'importe quelle colle pour l'encollage à plat.

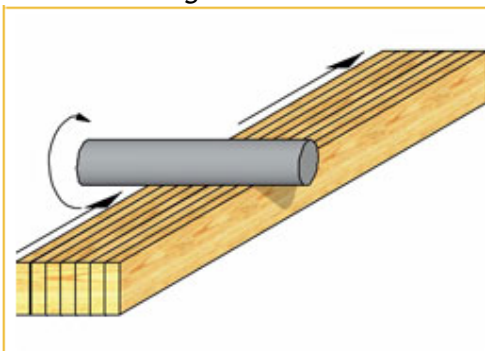
## 7. Pressage et mise en forme



### Pressage des lamelles

Le serrage se fait sur au moins trois lames (ou lamelles) sur un banc de presse de géométrie droite ou cintrée.

## 8. Rabotage



### Rabotage

Les plans de collage des pièces obtenues (lamellé collé) durcissent sous l'effet de la pression. Après le durcissement les pièces passent à la raboteuse.

## 9. Taillage et finitions



### Domaines d'utilisation

Cette technique est utilisée essentiellement en charpente.



**Figure V.2 :** Poutres en lamellé-collé de l'aéroport d'Oslo.



**Figure V.3 :** Charpente en lamellé-collé au château de Courceriers (Mayenne).

En agencement, des plans de travail sont réalisés en lamellé-collé d'essence de bois identique ou varié pour jouer sur la teinte ou l'aspect du bois.

En menuiserie, dans le domaine du parquet par exemple, le lamellé-collé assemble des lames de bambou pour constituer des lames de parquet. Cette technique permet l'utilisation du bambou dans des domaines qui lui seraient normalement interdits.

Pour la fabrication d'objets plus petits ou demandant une grande homogénéité du matériau bois ou pour l'assemblage de matériaux disparates (carbone-bois, corne-bois...) afin d'améliorer les qualités mécaniques ou esthétiques d'un objet. En particulier dans le matériel sportif : l'archerie, ski, raquettes...

L'aviation utilise depuis longtemps le principe du lamellé-collé, souvent avec alternance des essences de bois, pour fabriquer des hélices solides et rigides, ou permettre à des hélices aux formes complexes comme les tripales d'être fabriquées en un seul bloc, sans avoir recours à la fixation de plusieurs pales sur un moyeu séparé.

### **Bois contre-plaqués**

Un contreplaqué ou plus précisément panneau contreplaqué est un panneau à base de bois obtenu par collage de couches adjacentes à fibres croisés habituellement à angles droits. Le contreplaqué est composé de plusieurs couches de placages, appelées plis, en nombre impair. L'épaisseur d'un panneau varie entre 1mm et 50mm.



Figure V.4 : panneau contreplaqué

### Caractéristiques du bois contreplaqué

- Le bois est un matériau naturellement hygroscopique : en fonction des conditions hygrothermiques environnantes (température et humidité relative de l'air (vapeur d'eau)), le bois va « s'équilibrer » : il va donc reprendre de l'humidité ou en restituer. Ces variations d'humidité peuvent se traduire par des variations dimensionnelles du matériau. Ce phénomène est toutefois **réversible** et n'affecte pas les caractéristiques mécaniques des produits ;
- Le module d'élasticité traduit la rigidité des panneaux et sert de base pour le calcul de la flèche des panneaux travaillants. En fonction de la composition du panneau, la résistance à la flexion et le module d'élasticité peuvent être très différents selon qu'il s'agit du sens long ou du sens transversal. Des valeurs très élevées en module sens long peuvent être obtenues en ajustant la composition. Néanmoins, la moyenne des valeurs mesurées est une constante, caractéristique de l'essence ou des essences utilisées ;
- Bonne résistance aux fissures et à la déformation ;
- Economique.

### Inconvénients

- Les colles contiennent des produits toxiques.

## Panneaux de particules

Un **panneau de particules de bois**, appelé aussi **aggloméré** est un matériau en plaque fabriqué sous pression et chaleur à partir de particules de bois avec addition d'un liant organique ou minéral.



**Figure V.5** : Panneau de particules de bois

L'épaisseur d'un panneau de particules de bois varie entre 3 et 50mm. Des épaisseurs supérieures allant jusqu'à 70 mm sont généralement réservées à la réalisation de cloisons.

Ce type de panneau est composé de morceaux de bois plus gros que ceux des panneaux de fibres à densité moyenne et des panneaux de fibres à haute densité. Ce n'est pas la seule différence, les panneaux de particules sont réalisés à base de copeaux coupés-broyés alors que les panneaux de fibres, comme son nom l'indique, sont confectionnés avec du bois défibré, sans liant pour tous sauf pour les panneaux de fibres à densité moyenne (MDF).

### Fabrication

---

Les particules de bois sont à base de copeaux, sciures, farine de bois et déchets de scierie.

Les panneaux de particules de bois sont fabriqués selon un procédé appelé sec ou à sec. Lors de ce procédé, un liant est utilisé.

Ce procédé suit les étapes suivantes : broyage des morceaux de bois pour former des particules, séchage des particules, triage des particules, encollage des particules, conformation du mat, pressage, cuisson, stabilisation et enfin mise à dimension.



### Caractéristiques du bois à panneaux de particules

- Réutilisation des copeaux de bois ;
- Economique ;
- propriétés uniformes.

### Inconvénients

- Les colles contiennent des produits toxiques.

### **Panneaux de fibres**

Le panneau de fibres de bois est un matériau en plaque d'une épaisseur égale ou supérieure à 1,5mm obtenue à partir de fibres ligno-cellulosiques avec application de chaleur et/ou de pression.



**Figure V.6** : panneau de fibres de bois

### **Fabrication**

---

Les panneaux de fibres de bois peuvent être fabriqués selon deux procédés :

- Procédé humide ou sous atmosphère humide : les fibres ligno-cellulosiques se lient entre elles par des liaisons naturelles de type pont hydrogène lors du rapprochement des fibres par séchage et par pression. Ce procédé suit les étapes suivantes : défibrage des morceaux de bois pour former des fibres, mélange des fibres avec de l'eau, formation du "gâteau", essorage, pressage et enfin mise à dimension.
- Procédé sec ou à sec : un liant est utilisé. Ce procédé suit les étapes suivantes : défibrage, encollage des fibres, conformation du mat, pressage, stabilisation et enfin mise à dimension.

## **Utilisation**

---

Les panneaux isolants sont utilisés comme écrans de sous toiture, contreventements, compléments d'isolation, etc.

### *Caractéristiques du bois à panneaux de fibres*

- Économique ;
- facile à utiliser ;
- propriétés uniformes.

### *Inconvénients*

- Lourdeur,
- doivent être peints,
- les colles contiennent des produits toxiques



# Chapitre VI : Mousses ou solides cellulaires

## I. Introduction

Les matériaux poreux sont présents partout dans notre environnement. On les utilise pour l'isolation, pour l'emballage, et dans bien d'autres domaines. Il est donc important d'avoir une connaissance la plus précise de la structure mésoscopique de ce type de matériau ainsi qu'une bonne compréhension des propriétés qui en découlent. Maîtriser leur structure, leur nature et prédire leur comportement est essentiel pour en faire une bonne utilisation.

Naturellement les mousses les plus présentes sont celles à base de polymères que l'on trouve dans les éponges ou les coussins mais il en existe de toute autre nature aussi : en métal, en céramique et même en verre. Ces matériaux possèdent, grâce à leur structure, des propriétés très particulières. Elles leur confèrent une place de choix dans de très nombreux domaines.

Les matériaux poreux sont aussi appelés matériaux cellulaires. Le mot cellule provient du Latin « cella » qui représente un petit compartiment, un espace clos. Les matériaux poreux correspondent à un assemblage de cellules avec des arêtes solides ou des faces, collées les unes aux autres afin de remplir l'espace. Ce type de matériau est courant dans la nature : bois, éponge, liège et corail par exemple.

Bien qu'utilisé depuis des siècles, ce type de matériau suscite un engouement important récent dans le domaine de la recherche.

Il existe de nos jours des mousses solides de différentes natures sont de plus en plus utilisées dans de nombreux domaines qui exploitent les propriétés liées à la combinaison de leur nature et de leur structure particulière.

Les mousses ou les matériaux alvéolaires résultent de la volonté d'introduire de façon maîtrisée une certaine proportion de vides dans le but :

- D'augmenter la souplesse : mousses pour l'ameublement ;
- D'améliorer le caractère isolant, thermique ou phonique : mousses pour le bâtiment ;
- De rendre le matériau amortissant : mousses d'emballage ;
- D'alléger le matériau en lui conservant ses propriétés structurelles.

L'application des matériaux poreux varie en fonction de la taille des pores, de la structure, etc. Les applications courantes des matériaux poreux sont illustrées sur la Figure VI.1. Les applications les plus importantes des matériaux poreux sont la catalyse, le biomédical, l'adsorption, les capteurs, les super-condensateurs, traitement des eaux usées, photonique, électronique, séparation et stockage des gaz, etc.



Figure VI.1 : Applications courantes des matériaux poreux.

Les matériaux alvéolaires sont constitués d'un squelette de matériau entourant des alvéoles fermés ou partiellement ou totalement ouverts sur les alvéoles voisins ou sur l'extérieur.

## II. Définitions :

**Alvéole** : nm ; petite cavité élémentaire entourée complètement ou partiellement par une paroi

**Cellule ou alvéole fermé** : totalement clos par sa paroi → ne communiquant pas avec d'autres alvéoles ou avec l'extérieur.

**Pore ou alvéole ouvert** : non totalement clos par sa paroi

**Matériau poreux ou spongieux** : matériau dans lequel la majorité des alvéoles sont des pores qui communiquent entre eux à travers toute la masse, ainsi qu'avec l'extérieur.

## Types de mousses

### a) Mousses à pores fermés

Les mousses à pores fermés sont généralement fabriquées par injection d'un gaz inerte ou mélange d'un agent moussant dans un matériau liquide (Fig. VI.2).

Elles sont principalement utilisées comme un matériau absorbant l'impact ; les matériaux métalliques comme les polymères mais avec un chargement plus élevé.

Les mousses métalliques contrairement aux polymères, elles restent déformées après l'impact.

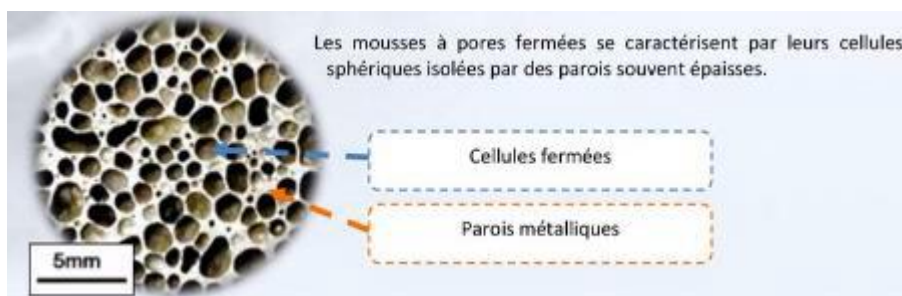


Figure VI.2 : Matériaux mousseux à pores fermés.

### b) Mousses à pores ouverts

Appelées aussi éponges (Fig. VI.3) peuvent être fabriquées par plusieurs voies, notamment la fonderie ou la métallurgie de poudre.

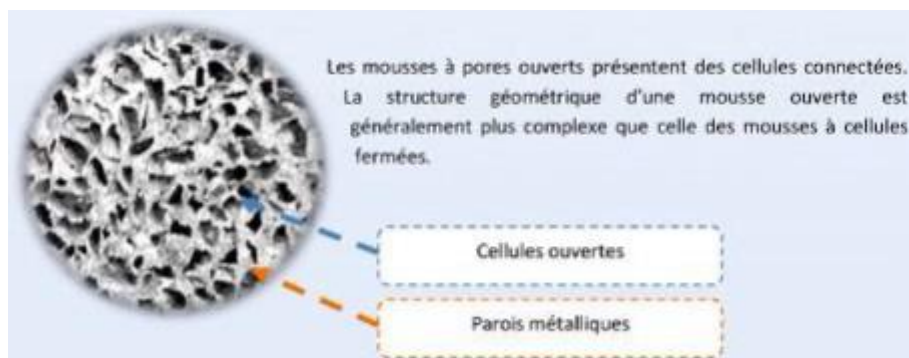


Figure VI.3 : Matériaux mousseux à pores ouverts.

Elles sont utilisées comme échangeurs de chaleur compacte, d'absorption d'énergie. Elles sont dans des technologies pointues comme l'aérospatiale, la fabrication, la construction...

### c) *Mousses stochastiques*

Une mousse est dite stochastique lorsque la répartition des porosités est aléatoire.

La majeure partie des mousses sont stochastiques car leur fabrication relève soit :

- Des procédés de moussage qu'il soit liquide ou solide (poudre)
- Du moulage d'un moule contenant des billes ou une matrice elle-même aléatoire.

### d) *Mousses régulières*

Une mousse est dite régulière lorsque la structure est ordonnée (Fig. VI.4). La méthode existante est celle du moulage par fonderie (des plaques en sable sont utilisées comme noyaux) leur forme est étudiée pour chaque application.

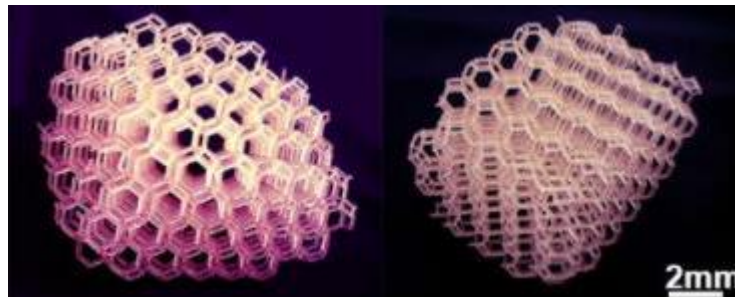


Figure VI.4 : Matériaux mousseux à pores réguliers.

## Techniques de Fabrication

### a) *Pores fermés* (Fonderie et métallurgie des poudres. Fonderie Injection de gaz)

Ce procédé est majoritairement utilisé par insertion des particules insolubles (ou à lente dissolution) comme les particules de carbure de silicium (SiC), d'oxyde d'aluminium ou encore d'oxyde de magnésium. Cet ajout permet d'augmenter la viscosité du métal en fusion et ainsi permettre la solidification de la mousse.

Généralement on utilise de l'air pour créer les bulles mais on peut également se servir de dioxyde de carbone, d'oxygène, d'un gaz inerte ou même d'eau. On peut effectuer du calandrage afin de dimensionner la pièce obtenue (méthode semblable à l'extrusion). Le diamètre des pores obtenus peut varier de 0,5 à 5mm.

### ***b) Pores ouverts***

De nombreux procédés de fabrication permettent de fabriquer des mousses polymères à cellules ouvertes avec de faibles densités relatives. L'une d'elle est la fabrication par procédés d'infiltration. Ce procédé se déroule de la façon suivante :

Premièrement, on crée un polymère possédant la forme, la taille des cellules et la densité désirée. Ce polymère servira de master pour la mousse métallique que l'on va synthétiser. Ce polymère est ensuite revêtu d'un mortier (boue, sable...) afin de créer un moule avec une image inversée de la future mousse métallique. Ce moule est ensuite placé dans un four. Grâce à la température importante, le polymère va se décomposer et libérer le moule. Ensuite le moule est rempli d'un alliage métallique puis refroidit. Après refroidissement, le mortier est retiré par friction (chocs) pour ne laisser que la mousse métallique qui est la réplique parfaite de la mousse de polymère initiale. Ce procédé simple permet aussi l'utilisation de poudres métalliques et d'obtenir des mousses métalliques à cellules ouvertes avec des tailles de pores de 1 à 5mm. Aussi grâce à cette méthode, un grand nombre de métaux peuvent être utilisés ce qui permet de créer une grande variété de mousses métalliques.

### **Applications des matériaux poreux**

Quatre domaines d'applications majeurs des mousses solides : l'isolation thermique, l'emballage, les matériaux de structures – de construction, et la flottabilité.

#### ***a) Isolation thermique***

La plus large application faisant appel aux mousses polymères et en verre est l'isolation thermique. Il y a plus de mousses utilisées dans le domaine de l'isolation thermique que dans tous les autres domaines. Des matériaux aussi simples que ceux utilisés pour fabriquer certaines tasses à café ou aussi élaborés que les revêtements des propulseurs des fusées reposent sur la faible conductivité des mousses. Les bâtiments récents, les systèmes de transports réfrigérés ou les bateaux de transport de gaz naturels utilisent tous les avantages de la faible conductivité thermique des mousses polymères expansées (Fig. VI.5). Tous ces exemples utilisent des mousses à porosité fermée. Lors d'une mise à température d'un système (aussi bien pour des températures très basses que très hautes), une grande quantité de l'énergie est dépensée pour amener à température le contenant, or pour les

matériaux poreux l'énergie est d'autant plus faible que la masse thermique est faible, augmentant ainsi l'efficacité du contenant.



**Figure VI.5 :** isolation thermique par mousses polymères expansées

b) *Emballage*

Le deuxième domaine d'application utilisant le plus les mousses solides est celui de l'emballage.



Un emballage efficace doit absorber l'énergie d'un impact ou d'une force générée par décélération sans transférer au contenu des contraintes pouvant entraîner des dommages (Fig. VI.6). Les mousses sont particulières adaptées pour ce genre de fonction puisqu'elles peuvent accepter de grandes déformations (70% et plus) à contrainte constante, leur permettant ainsi d'absorber une grande quantité d'énergie. Les mousses offrent aussi des avantages : la facilité de moulage permet de bien emballer des objets de formes compliqués pour le protéger et ce à un moindre coût. Les polymères les plus utilisés pour réaliser ces matériaux sont le polystyrène (Fig. VI.6), le polyuréthane (Fig. VI.7) et le polyéthylène (Fig. VI.8). Ce sont fréquemment des mousses à porosité fermée comme dans le cas des emballages alimentaires.



**Figure VI.6 :** Emballage de Polystyrène.



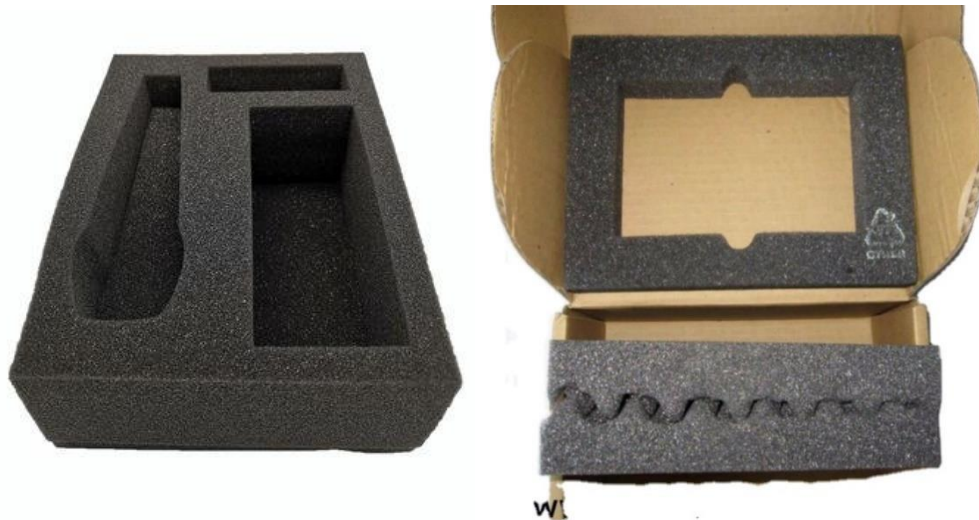


Figure VI.7 : Emballage de polyuréthane

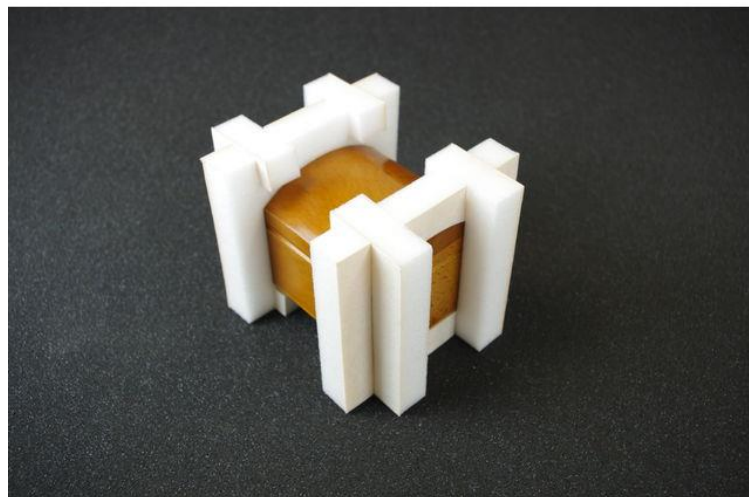


Figure VI.8 : Emballage de polyéthylène

c) *Matériaux de structure*

Nombre de matériaux naturels de structures sont des solides poreux : le bois, le corail (Fig. VI.9) et les os (Fig. VI.10) supportent des cycles de chargement sur de très longues périodes. Citons comme autre exemple synthétique les échafaudages servant de support à la reformation d'os suite à une fracture dans le domaine biomédical. Ce sont ici des exemples de matériaux à porosité ouverte.



Figure VI.9 : corail naturel texture fossile forme d'une pierre poreuse

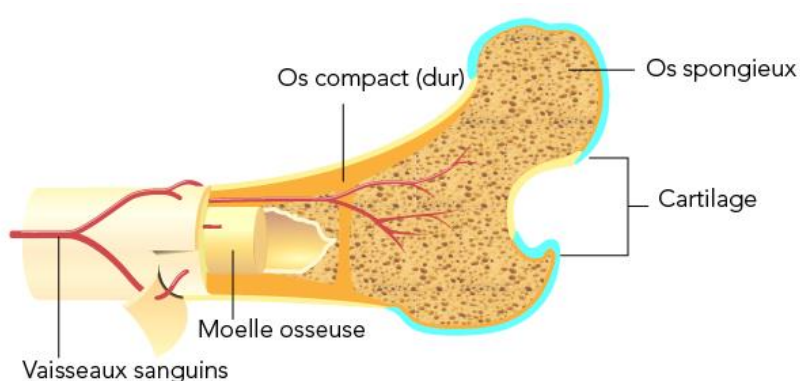


Figure VI.10 : Anatomie de l'os du fémur

#### d) Flottabilité

Les matériaux poreux sont utilisés dans le domaine maritime. Les plastiques poreux à porosité fermée sont largement utilisés comme support de structures flottantes ou dans la flottaison des bateaux. Les mousses résistent bien mieux aux dégâts que les sacs de flottaison même lorsqu'elles sont très endommagées. De plus elles ne s'oxydent pas et ne rouillent pas dans le temps permettant d'avoir un matériau très stable.

#### Voies de synthèse des mousses solides polymères

Il existe de nombreuses voies pour synthétiser des matériaux poreux. Pour les mousses de polymères on dénombre trois méthodes principales :

- L'expansion d'un gaz
- Un phénomène de séparation
- Une polymérisation via l'utilisation d'un moule (appelé 'template' en anglais)

D'autres méthodes de fabrication pour les mousses de type métallique, céramique ou à base de verre existent.

#### **a. Expansion d'un gaz**

La méthode dite d'expansion d'un gaz pour les matériaux polymères implique la mise en œuvre d'un porogène<sup>1</sup> gazeux durant l'étape de polymérisation afin de générer de la porosité dans la matrice polymère avant qu'elle ne soit totalement réticulée. Ce dégagement gazeux peut être soit induit par la réaction de polymérisation elle-même soit généré par la décomposition ou la vaporisation d'un additif. La macroporosité peut également être directement générée par l'utilisation de gaz tels que le dioxyde de carbone, l'azote ou l'air dans des polymères fondus.

La Figure VI.11 représente un schéma illustrant les différentes étapes de cette méthode.

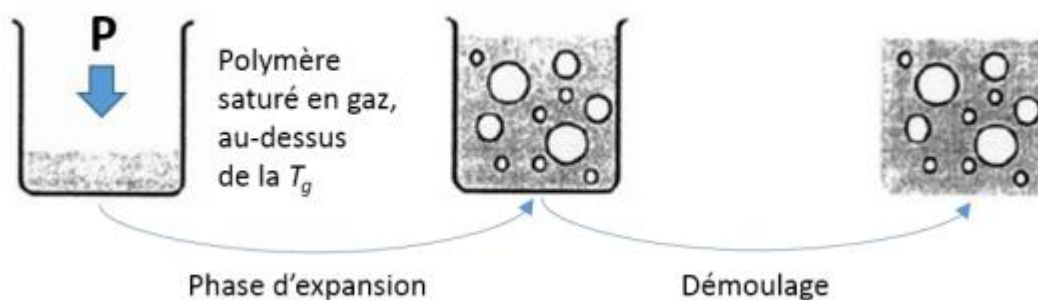


Figure VI.11 : Technique d'élaboration de mousse par expansion d'un gaz

Cette méthode conduit à des mousses de faible densité possédant des porosités ouvertes (éponges, mousses souples) ou fermées. Le dégagement gazeux n'est pas facilement contrôlable ce qui implique une distribution de taille des pores très large.

Les additifs générateurs de mousse peuvent être des agents chimiques ou physiques. Les agents chimiques sont des composés qui produisent un gaz par réaction chimique entre plusieurs composés ou par décomposition thermique. Les agents physiques sont des substances qui peuvent passer d'un état liquide à un état gazeux soit par réduction de

<sup>1</sup> Porogène est un agent additif qui génère de la porosité dans la matrice polymère

la pression, soit par augmentation de température. Cette élévation de température peut être induite par une source extérieure ou par une réaction exothermique.

### **b. Séparation de phase**

Le phénomène de séparation de phase implique la génération de deux phases non miscibles, une phase riche en polymère et une phase riche en porogène, à partir d'une seule phase contenant des polymères dissous dans un solvant. Cette séparation peut être induite par des phénomènes physiques comme la température ou par la réaction de réticulation. Au cours de la réaction, des nodules de matière se forment et deviennent de moins en moins solubles dans le solvant. Ces nodules sphériques s'agglomèrent et forment des agglomérats appelés microsphères. La Figure VI.12 illustre les différentes étapes de méthode de synthèse des mousses par séparation de phase.

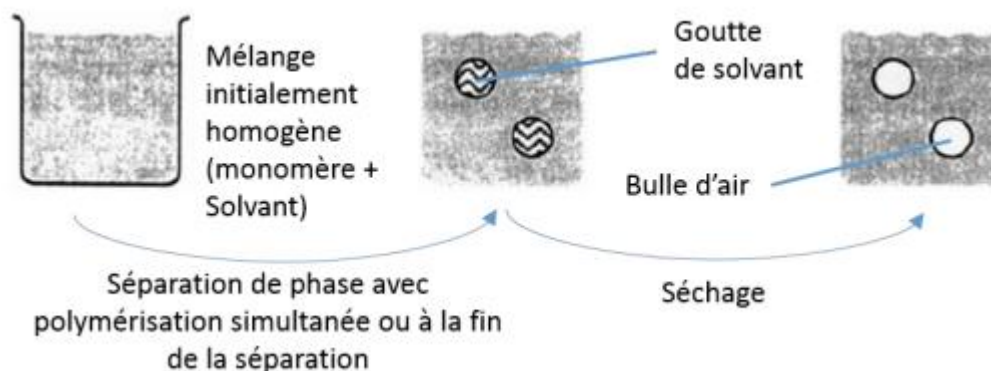


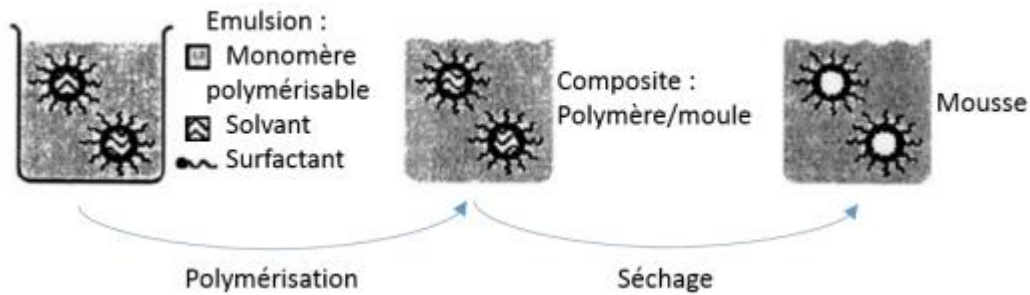
Figure VI.12 : Technique d'élaboration de mousse par séparation de phase

Les matériaux obtenus possèdent des pores dont la taille est comprise entre 1 et 100 $\mu$ m suivant la compatibilité entre les monomères et le porogène (solvant).

### **c. Utilisation d'un moule**

Le principe général de cette méthode est de réaliser une réplique d'une structure existante en utilisant une phase dispersée solide ou liquide comme moule durant l'étape de réticulation.

L'élimination de ce porogène (solide ou liquide) permet de générer ensuite de la porosité au sein du matériau obtenu. La Figure VI.13 présente les différentes étapes de synthèse de mousse par utilisation d'un moule. Dans un premier temps l'empreinte est dispersée dans une solution de monomères. Après polymérisation un composite polymère/moule est obtenu. Enfin l'extraction du moule génère la porosité souhaitée de la mousse.



**Figure VI.13 :** Technique d'élaboration de mousse par l'utilisation d'un moule.

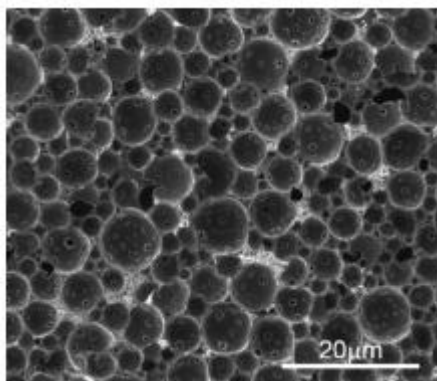
Cette Figure présente le cas des émulsions avec un moule liquide mais il existe deux types de moule : les moules « solides » et les moules « liquides ».

L'utilisation d'un « template » solide consiste à utiliser des particules solides de taille contrôlées (microsphères de latex<sup>2</sup> ou de silice), en présence des monomères. Le tout est polymérisé. Ensuite le moule solide est retiré par l'utilisation d'un composé chimique (par exemple avec de l'acide fluorhydrique pour la silice) ou par carbonisation du support. L'inconvénient de cette technique est la méthode d'extraction qui peut affecter la matrice polymère.

La méthode de 'template' liquide fait référence à la polymérisation d'émulsions. Deux liquides non miscibles sont mélangés afin de former une dispersion d'un des liquides (phase dispersée) dans l'autre liquide (phase continue contenant les monomères). La polymérisation de la phase continue permet d'obtenir un réseau de polymère solide et après extraction de la phase dispersée, on obtient la structure poreuse.

A partir des années 80 une extension de cette méthode appelée HIPE utilisant des émulsions hautement concentrées (où la phase dispersée représentant plus de 74% du volume total de l'émulsion) permet d'obtenir des mousses solides à structure bien définie avec une porosité ouverte. La Figure VI.14 présente une mousse synthétisée par la technique de polyHIPE à partir de styrène avec 50 mol% de divinylbenzène et 80 vol% de phase dispersée, correspondant au moule.

<sup>2</sup> Latex : matériau en polystyrène



**Figure VI.14** : Image de polyHIPE à base de polystyrène avec 50 mol% de divinylbenzène comme réticulant et 80 vol% de phase dispersée correspondant au moule.

Les pores sphériques sont l’empreinte des gouttes d’eau présentes pendant la phase d’émulsion.

Grâce à cette technique il est aussi possible de refaire passer l’émulsion préparé dans le système et d’y introduire des bulles de gaz de tailles différentes permettant ainsi d’obtenir une porosité dite « hiérarchisée » car au moins deux échelles de tailles sont présentes.

### **Mousses solides élastomères**

On a mis en avant l’omniprésence des matériaux poreux par leur présence dans un très grand nombre de domaine d’application. A chaque domaine d’application correspond une structure de mousse (porosité ouverte ou fermée) qui est déterminée par la méthode de mise en œuvre. Afin de pouvoir étudier le lien entre le comportement mécanique et la structure de la mousse il est nécessaire d’obtenir un panel de matériaux poreux avec une structure mésoscopique bien contrôlée, par conséquent c’est la méthode d’émulsion qui a été retenue. Et plus particulièrement la méthode d’émulsion hautement concentrée, appelée HIPE, pour obtenir une porosité ouverte. Les matériaux poreux qui en découlent sont appelés les polyHIPEs. Cette catégorie de matériaux se décompose essentiellement en 2 grandes familles.

#### *Mousses polyHIPEs*

Les polyHIPEs sont les matériaux poreux issus de la méthode de synthèse par émulsion hautement concentrée (HIPE) permettant d’obtenir des mousses avec une porosité et une structure contrôlée. Cette méthode a été décrite pour la première fois en 1962 et est appelée sous différents noms tels que « émulsion de gels », « polymères macroporeux



» ou encore « mousses micro-cellulaires ouvertes ». Bien que certaines études aient été réalisées au milieu de 20<sup>ième</sup> siècle l'intérêt pour ces matériaux s'est multiplié depuis les années 90.

#### **a. Porosité à plusieurs échelles**

Une des spécificités des polyHIPES est de posséder une porosité importante, supérieur à 74%. Ceci leur confère une surface spécifique très supérieure à celle des matériaux denses ce qui est très utile pour des applications telles que des supports pour des réactions chimiques, pour la culture de tissus vivants, ou comme support d'extraction pour la purification.

La première échelle de porosité correspond aux pores c'est-à-dire à l'empreinte du moule. Elle s'étale de quelques microns à plusieurs centaines de microns. La deuxième échelle correspond aux interconnexions (fenêtre entre deux pores adjacents). Elle s'étend de quelques microns à une dizaine de microns. La troisième échelle correspond aux trous présents dans les bords de Plateau. Elle s'étend sur quelques centaines de nanomètres. La Figure VI.15 illustre ces différentes échelles de porosités.

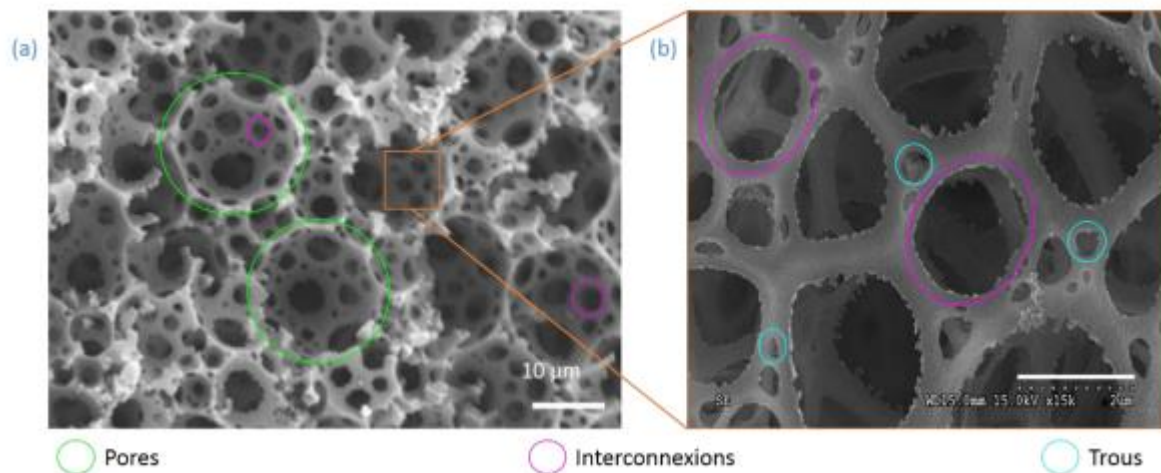


Figure VI.15 : Porosité à plusieurs échelles : (a) pores et interconnexions et (b) interconnexions et des trous dans les bords de Plateau.

On notera que les trous au cœur des bords de Plateau ne sont pas observables sur tous les polyHIPES. La majorité des polyHIPES présentent seulement une macroporosité et une microporosité. Les trous sont généralement obtenus avec addition supplémentaire d'un agent porogène comme le toluène par exemple.



### ***b. Les deux types de polyHIPEs***

L'émulsion hautement concentrée est le moule servant à synthétiser la mousse polyHIPE. Le moule consiste en une phase liquide immiscible avec la phase contenant les monomères (phase qui engendrera la mousse). La difficulté liée à cette technique est la stabilisation des 2 phases immiscibles qui composent l'émulsion. Pour ce faire il existe deux types de stabilisant : les tensioactifs (petites molécules, polymères) et les particules de Pickering<sup>3</sup>.

- Les émulsions classiques utilisent depuis longtemps des tensioactifs comme stabilisants. Ce sont des molécules amphiphiles<sup>4</sup> qui se positionnent à l'interface entre la phase dispersée et la phase continue. Ces tensioactifs<sup>5</sup> peuvent être des molécules simples ou des polymères. Ils présentent l'avantage de pouvoir être retirés, à la fin de la polymérisation, par lavage permettant ainsi d'obtenir une mousse « purifiée » contenant seulement le(s) polymère(s) et le(s) réticulant(s).
- Depuis le début des années 2000 plusieurs études utilisent des particules de Pickering à la place des tensioactifs, on parle alors d'émulsion de Pickering. Ces particules se présentent sous la forme de nanoparticules de silice, de nanotubes de carbones ou même des particules de polymères. L'utilisation des particules permet de stabiliser facilement des émulsions pour des volumes de phase dispersée supérieur à 95%. Un des intérêts de ces particules est l'utilisation d'une quantité beaucoup plus faible que pour les tensioactifs : de 0,4% à 5% pour les particules de Pickering contre 10% à 30% pour les tensioactifs. D'autre part ces particules peuvent jouer un rôle de centre de réticulation ou d'amorceur de polymérisation. Ils peuvent aussi modifier les propriétés mécaniques, électriques ou magnétiques des mousses. Cependant l'ancrage à l'interface est irréversible et il n'est pas possible de les retirer de la mousse une fois la synthèse terminée.

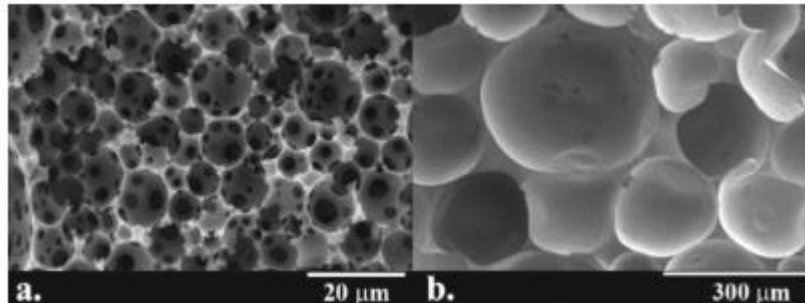
---

<sup>3</sup> Les émulsions de Pickering sont stabilisées par des particules solides adsorbées à la place d'un émulsifiant ou agent tensio-actif. De ce fait, les émulsions de Pickering peuvent être considérées comme « sans émulsifiant » ou « Sans agent tensio-actif » car ils sont stabilisés par des particules solides.

<sup>4</sup> Élément chimique qui a pour caractéristique d'être à la fois hydrophile et lipophile.

<sup>5</sup> Capable d'augmenter les capacités d'étalement, de mouillage d'un liquide, en abaissant sa tension superficielle.

La Figure VI.16 présente deux polyHIPEs de polystyrène contenant 75 vol% de phase dispersée émulsifiés avec (a) du tensioactif Hypermer 2296 comme stabilisant et (b) des nanoparticules de silice comme seul stabilisant.



**Figure VI.16** : PolyHIPEs de polystyrène avec 75 vol% de phase dispersée synthétiser avec : (a) du tensioactif Hypermer 2296 comme seul stabilisant, (b) des nanoparticules de silices comme seul stabilisant.

Quel que soit le type de stabilisant (tensioactif ou particule de Pickering) il est possible d'en trouver de différentes natures pour stabiliser aussi bien des émulsions eau dans huile qu'inversement. Ceci permet d'utiliser cette voie pour synthétiser des mousses pour toutes les natures de monomère (hydrophiles ou hydrophobes).

### ***c. Familles de polyHIPEs***

Parmi les polyHIPEs il se dégage une famille qui représente la grande majorité des mousses solides polymères synthétisées par cette technique : ce sont les polyHIPEs à base de polystyrène. Une autre famille, bien moins présente dans la littérature, s'articule autour des acrylates et des méthacrylates.

#### **i. PolyHIPE à base de polystyrène**

Le premier polyHIPE5 a été obtenu par une émulsion inverse stabilisé avec un ester gras de sorbitan avec le styrène comme monomère et le divinylbenzène comme réticulant dans la phase continue. Dès lors cette formulation reste, de loin, la plus étudiée et la plus utilisée dans les applications des polyHIPEs. L'étude de ces paramètres tels que, le diamètre moyen des pores, la surface spécifique, la densité ou encore les propriétés mécaniques ont été intensément étudiées et le sont encore.

#### **ii. PolyHIPE à base de poly(méth)acrylate**

Depuis les années 2000 des équipes se sont intéressées à l'utilisation des acrylates et des méthacrylates pour étendre la gamme des propriétés atteintes par les matrices à base de polystyrènes. Ainsi l'acrylate d'éthylhexyle et l'acrylate de n-butyle ont été utilisés et permettent par exemple d'atteindre des températures de transition vitreuse ( $T_g$ ) très inférieures à celles des polyHIPEs à base de styrène pour synthétiser des polyHIPEs hydrophobes. Le poly(méthacrylate de méthyle) a été étudié et possède une déformation à rupture plus importante ainsi qu'un module d'Young plus faible que le polystyrène. Des matériaux à base de méthacrylate de glycidyle ou d'acrylate d'éthylhexyle ont été largement utilisés pour des applications de chromatographie.

### **Mousses élastomères**

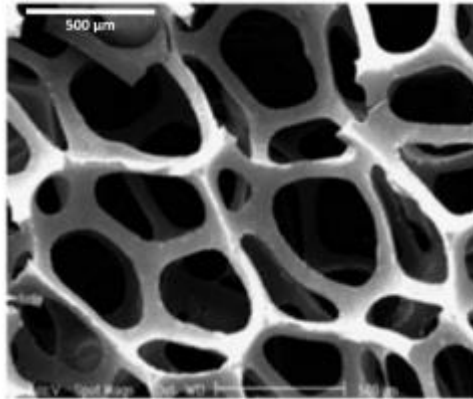
Les mousses élastomères sont omniprésentes dans notre société. L'allègement des polymères par moussage permet de créer des structures légères, résistantes, ayant des propriétés mécaniques et thermiques intéressantes qui rendent possible leur utilisation dans de très nombreux domaines. Ces mousses industrielles élastomères sont mises en œuvre par des méthodes différentes de celle des mousses solides polyHIPEs mais plutôt par l'utilisation d'un gaz. Bien qu'il existe des polyuréthanes rigides et semi-rigide, ils constituent la plus grande famille de mousses élastomères. On trouve également d'autres mousses comme celles à base de silicone par exemple.

#### **a. Polyuréthane**

Les mousses de polyuréthane sont très utilisées dans les activités industrielles car elles sont très faciles à mettre en œuvre (forme et temps de fabrication). La technique la plus utilisée pour synthétiser les mousses polyuréthanes consiste à mélanger tous les composés en une seule étape. Tous les réactifs (isocyanate, alcool, tensioactif, eau ou agent volatil et catalyseur) sont mélangés ensemble. Le système est alors cuit pour obtenir la mousse finale. L'apparition de gaz (formation de dioxyde de carbone et la vaporisation de l'agent volatil) entraîne la formation des pores. Les mousses finales sont particulièrement légères, en effet la masse volumique des mousses polyuréthanes s'étend de 10 à 800  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  et la porosité peut atteindre 98%.

Le contrôle de l'expansion du gaz, qui se fait en concomitance avec la polymérisation/réticulation, est relativement bien maîtrisé ce qui permet d'obtenir une

mousse avec des pores relativement homogènes. La figure VI.17 illustre la structure d'une mousse polyuréthane composée de bords de Plateau.



**Figure VI.17** : Image de microscopie électronique à balayage d'une mousse de polyuréthane

Les pores sont identifiables et ont un diamètre relativement homogène. En contrôlant la pression il est possible de contrôler la densité des mousses de polyuréthane et indirectement la taille et la quantité des fenêtrés entre deux pores adjacents (appelées interconnexions). Les pores ont en général une orientation préférentielle dans le sens où le gaz s'est extrait du milieu poreux. La taille des pores est donc relativement bien maîtrisée mais ils ne sont pas sphériques.

Ces matériaux étant très répandus, de nombreuses études numériques sur leur comportement mécanique ont été menées. Les mousses de polyuréthane peuvent être également renforcées à l'aide de charges comme des nanotubes de carbones par exemple.

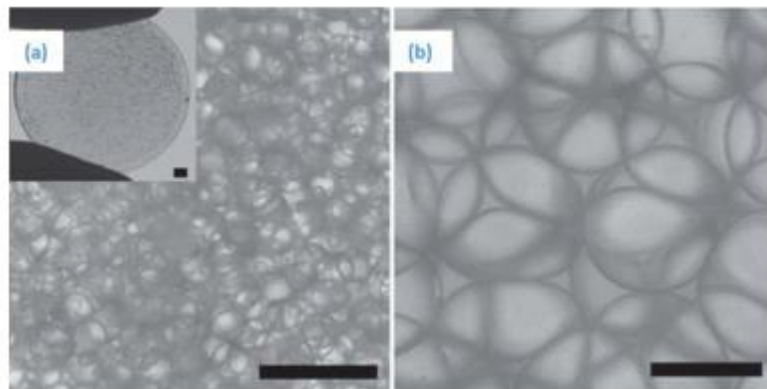
Les mousses de polyuréthane ont une structure relativement bien ordonnée et homogène mais il n'est pas facile de la contrôler (obtenir une taille de pore ou un pourcentage de vide prédéfini).

De plus leur comportement mécanique est encore mal maîtrisé. D'autre part la matrice de ces mousses n'est pas modifiable chimiquement et donc aucun lien n'a été établi entre la réponse mécanique des mousses polyuréthanes et la nature physico-chimique de la matrice. Pour conclure, le polyuréthane est un matériau relativement bien ordonné mais qu'il est difficile à modifier.

### **b. Silicone**

Les silicones sont généralement viscoélastiques, biocompatibles, chimiquement et mécaniquement résistants avec une faible température de transition vitreuse ce qui en font

des matériaux de choix dans de nombreuses applications. Depuis plusieurs dizaines d'années des mousses sont élaborées à partir de silicone. Elles sont utilisées par exemple comme amortisseur pour protéger des chocs car elles sont très déformables, ont un fort taux de recouvrance et subissent très peu d'endommagement. Elles servent aussi dans l'isolation thermique, phonique et pour les joints. Comme pour les polyuréthanes la structure des mousses silicones n'est pas évidente à contrôler. En revanche il est plus facile de jouer sur la physico-chimie que pour les polyuréthanes, en particulier sur le taux de réticulation.



**Figure VI.18 :** Image d'émulsions solides de silicone Sylgard 184 préparées par un système de microfluidique avec des gouttes de polyéthylène glycol 400 de (a) 335µm et (b) 1390µm.

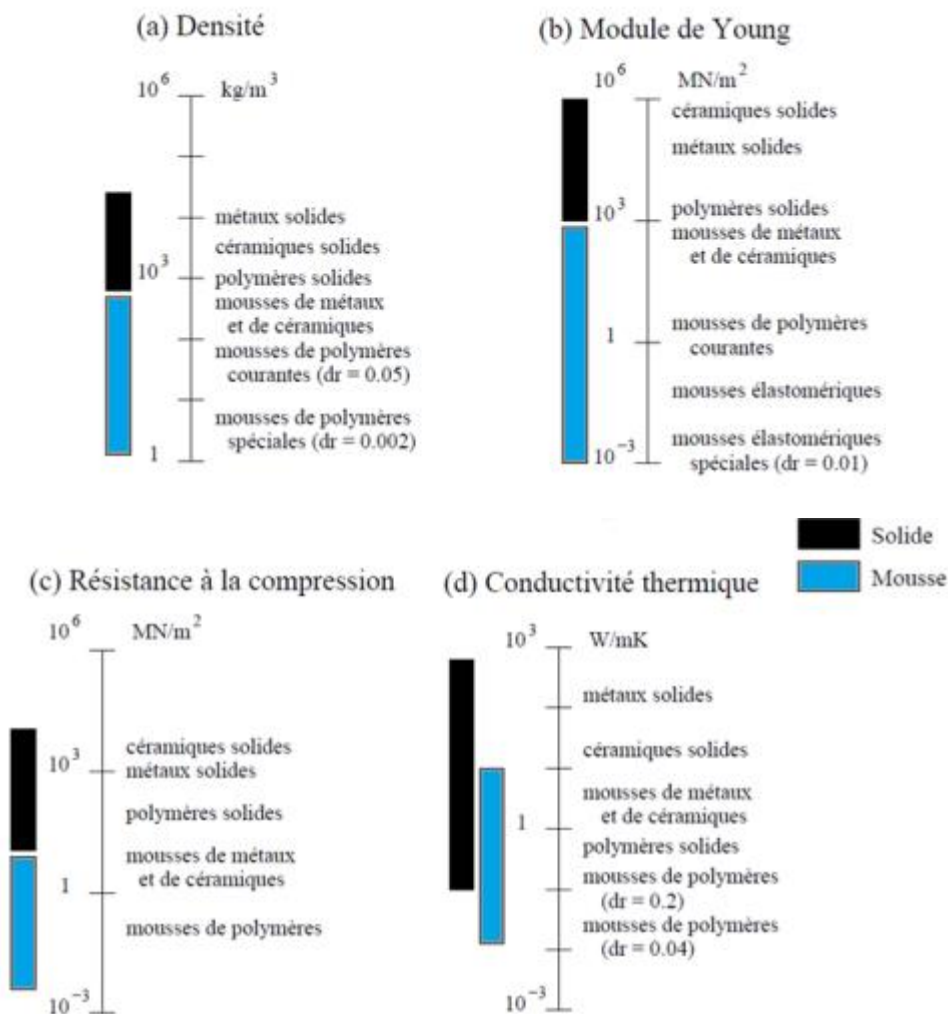
Des polyHIPes synthétisés ont récemment été contrôlés à base de silicone à l'aide d'un dispositif de microfluidique. La phase dispersée représente 50 à 99,9% du volume total de l'émulsion. La Figure **VI.18** présente des émulsions solides de silicone Sylgard 184 avec des gouttes de polyéthylène glycol 400.

Cet exemple de mousse silicone est la première mousse élastomère contrôlée. Grâce à la technique de microfluidique utilisée il est possible d'obtenir des tailles de gouttes contrôlées dans une gamme couvrant plusieurs décades. Cependant cette mousse est une « émulsion solide » qui contient toujours sa phase dispersée emprisonnée dans la matrice. Ce n'est donc pas une mousse solide ouverte.

# Chapitre VII : Propriétés mécanique des mousses

## Les propriétés mécaniques des mousses

Les mousses solides permettent d'étendre de manière considérable la gamme des propriétés disponibles. Elles combinent une matrice polymère remplie de gaz leur procurant une très faible densité. La combinaison des propriétés, dues à la structure mésoscopique de la mousse et à la nature physico-chimique du polymère, leur permet ainsi de fournir des matériaux pour des applications qui ne peuvent être réalisées facilement avec des solides denses. La Figure VII.1 présente les quatre caractéristiques typiques des mousses : la densité, le module d'Young, la résistance à la compression et la conductivité thermique. Les rectangles noirs représentent la gamme atteinte par les matériaux denses solides et les rectangles bleus ceux des mousses.



**Figure VII.1** : Plages accessibles pour les mousses et les solides pour 4 propriétés différentes : (a) la densité, (b) le module d'Young, (c) la résistance à la compression et (d) la conductivité thermique.

Pour ces quatre propriétés l'utilisation de mousse solide permet de gagner une décade à minima pour la conductivité thermique et au moins 3 décades pour les autres propriétés. Les mousses permettent donc d'accéder à des ordres de grandeurs pour la densité, le module d'Young, la résistance à la compression et la conductivité thermique que les polymères en masse ne peuvent pas atteindre.

Les polymères en masse ont des densités très faibles et peuvent accepter des déformations très importantes (0,7 et plus). Les métaux bruts se distinguent par une forte densité, une très bonne conductivité thermique mais une faible capacité de déformation. Les verres et les céramiques présentent une densité et une conductivité thermique intermédiaire entre les polymères et les métaux. Ils ont une très bonne résistance à la chaleur. En revanche ils ont un comportement fragile qui leur offre une très faible résistance aux déformations mécaniques. Tous ces types de matériaux peuvent aussi être synthétisés sous forme de mousse leur conférant des propriétés adaptées à des applications pour lesquelles des solides denses ne pourraient pas convenir.

### **Compression et absorption d'énergie**

Le comportement des mousses est intimement lié à la courbe de compression (Fig. VII.2), très caractéristique, qui représente un plateau de déformation à contrainte constante et autorise une utilisation pour l'absorption d'énergie.

Pour l'usage d'une mousse métallique en absorption d'énergie (crash), la valeur de contrainte plateau reste la caractéristique la plus importante puisqu'elle pilote l'énergie absorbable pour un volume de mousse donné. Cette valeur est généralement exprimée en fonction de la nature et de la densité de la mousse, souvent sur la base d'essais de compression.



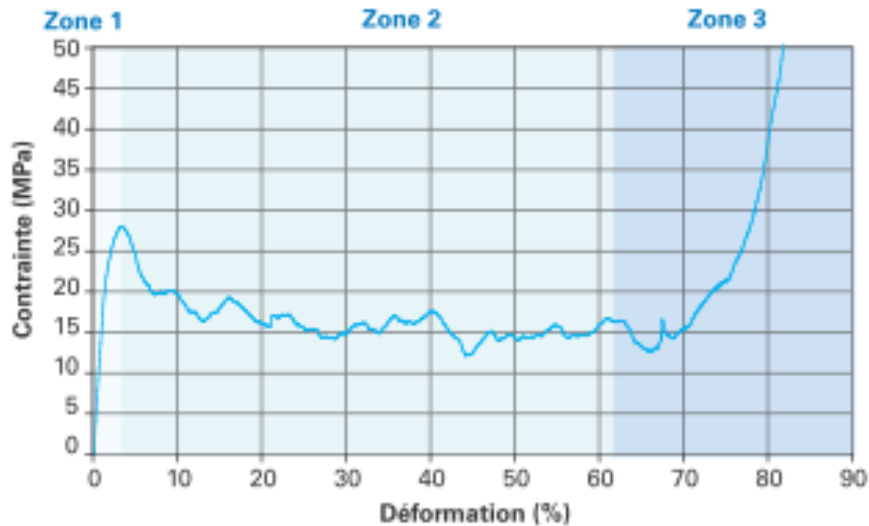


Figure VII.2 : Courbe de compression type d'une mousse métallique

### Effet de la structure (ouverte ou fermée)

Pour un même matériau, la structure de la mousse influe sur le comportement en compression. Les structures fermées (mousses) présentent généralement des valeurs supérieures à celles ouvertes (éponges). La valeur de contrainte du plateau reste pilotée principalement par la densité relative de la mousse.

$$\sigma_p = 0.3\sigma_{ys} \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^m \text{ avec } m = 1,6$$

$\sigma_p$  : Valeur de contrainte du plateau

$\sigma_{ys}$  : Valeur de contrainte limite élastique en compression du matériau de base

$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^m$  : Densité relative de la mousse

### Effet de la nature du matériau

Le matériau constitutif de la mousse influe fortement sur le type du comportement, fragile ou ductile, ainsi que sur les caractéristiques attendues. De plus, pour des structures anisotropes, le sens de la compression impacte également les caractéristiques en compression. Ces tendances sont présentées en (Fig. VII.3) avec l'illustration du comportement fragile (alliage AlSi7Mg) ou élastoplastique (acier inoxydable 304L et aluminium pur), ainsi que l'effet de l'anisotropie sur deux directions pour l'acier 304L.

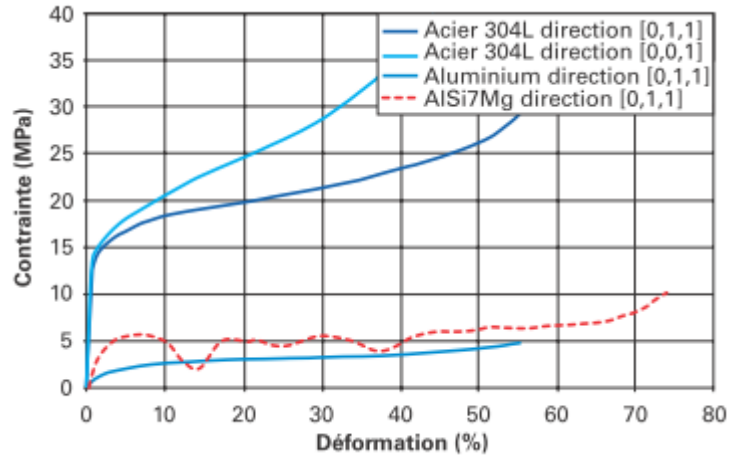


Figure VII.3 : Influence du matériau, et de la direction de compression

### Effet de la taille et la forme des cellules

La Figure VII.4 montre un exemple de mousses polymères (a) à base de polyéthylène avec une structure à porosité fermée et (b) à base de polyéthylène et polypropylène (50-50) à porosité ouverte.

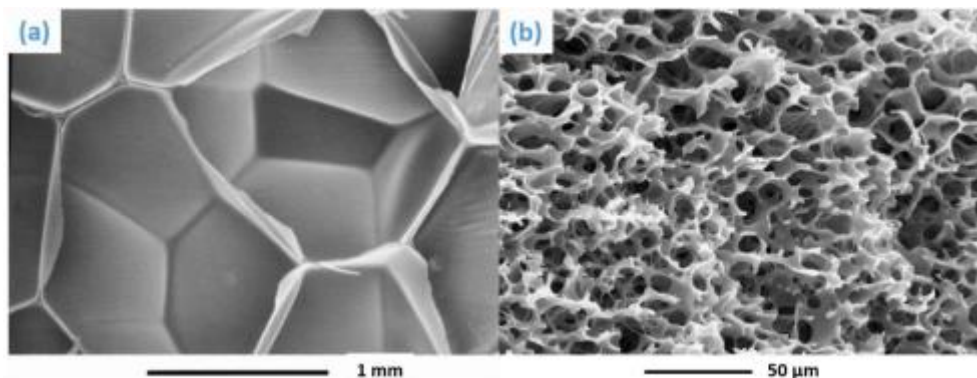


Figure VII.4 : Mousses à base de polyéthylène avec une porosité (a) fermée et (b) ouverte.

Sur la Figure VII.4 (a), le pore est isolé de ses voisins par un film mince continu. Sur la Figure VII.4(b) le pore est connecté à ses voisins par des « fenêtres », appelée interconnexions, présentes au milieu du film mince qui définit la limite avec ses voisins.

D'après la définition IUPAC on distingue trois catégories de pores selon leur taille :

- Les micropores dont la taille est inférieure à 2 nm.
- Les mésopores dont la taille est comprise entre de 2 nm et 50 nm.
- Les macropores dont la taille est supérieure à 50 nm.

Il existe des matériaux à porosité « hiérarchisée » c'est-à-dire des matériaux possédant différents types de pores.

La variation de taille des cellules stochastiques à structure ouverte a une incidence sur le comportement en compression. L'augmentation de la taille des cellules conduit à :

- Des variations plus importantes de la valeur plateau lors de la compression, pour un matériau de type fragile ;
- Valeur du pic plus élevée, en début de compression ;
- Valeur du plateau plus basse.

### Effet de la vitesse de sollicitation

Négligeable dans le cas des mousses légères à structure fermée jusqu'à des vitesses de déformation de  $50\text{s}^{-1}$ , la vitesse de sollicitation peut devenir très sensible dans le cas de structures ouvertes plus denses comme l'illustre la figure ci-dessous. L'évolution entre une compression quasistatique, à une vitesse de  $1\text{mm.s}^{-1}$ , et un crash, à une vitesse de  $7,5\text{m.s}^{-1}$ , se traduit, pour une même mousse d'aluminium de porosité relative de 70 %, par une élévation de la valeur du plateau. La quantité d'énergie absorbée (aire sous la courbe) reste la même. La déformation observée est moins importante et la valeur de plateau plus élevée (voir Fig. VII.5).

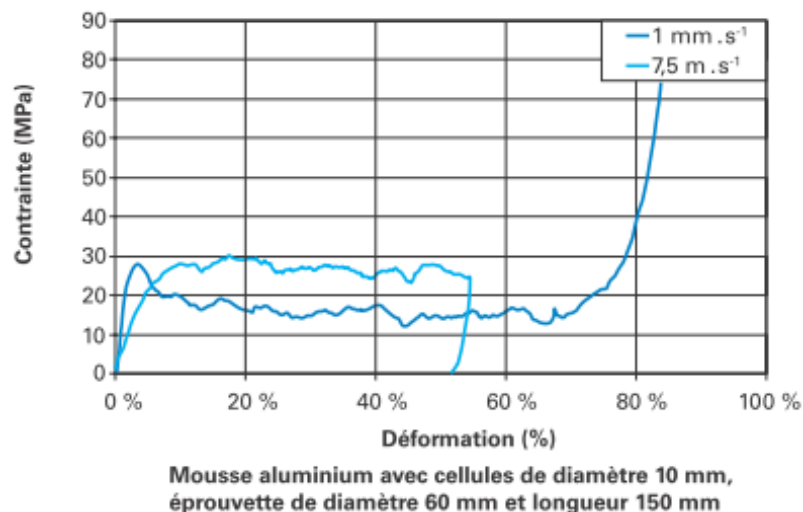


Figure VII.5 : Evolution des courbes entre compression isostatique et crash

## Caractéristiques clés

L'aluminium est logiquement le matériau le plus souvent utilisé, du fait de sa relative facilité de mise en forme pour réaliser la mousse métallique. Des fabricants de mousse de nickel font également état de l'emploi de leurs produits en absorption d'énergie. Enfin, l'acier, bien que plus difficile à mettre en œuvre, est un matériau très intéressant du fait de son comportement ductile et de sa valeur plateau élevée.

Le tableau VII.1 récapitule les principales caractéristiques, nécessaires pour un dimensionnement en crash, de plusieurs mousses métalliques utilisables. Ces informations sont issues de publications ou fournies par les fabricants.

Plus généralement, les caractéristiques mécaniques de la mousse sont données par rapport au matériau constitutif de base et à la densité relative du matériau. Outre la valeur plateau  $\sigma_p$  définie précédemment, on peut retenir pour les valeurs du module d'élasticité  $E$ , du module de cisaillement  $G$  et du coefficient de Poisson  $\nu$  :

$$E = \alpha_2 E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^n$$

$$G = \frac{3}{8} \alpha_2 G_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^n$$

$$\nu = 0.3$$

où  $n$  a une valeur comprise entre 1,8 et 2,2, et  $\alpha_2$  entre 0,1 et 4, ces valeurs dépendant de la structure de la mousse.

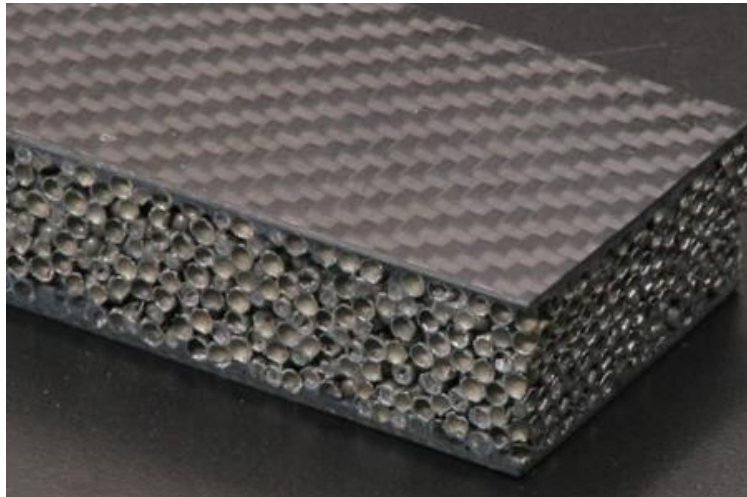
**Tableau VII.1** : Caractéristiques clés des principales mousses métalliques

Matériau	Densité relative	Rp0,2 mousse (en MPa)	Valeur plateau (en MPa)	Module d'Young E (en GPa)
Acier 304L	0,15	11	20	6,8
Al	0,09	1,6 - 1,8	2,3	0,4 - 1
Al	0,1 - 0,35	2 - 20	1,9 - 14	1,7 - 12
Al	0,05 - 0,1	0,9 - 2,7	0,9 - 3	0,06 - 0,3
Al	0,06	-	0,9	0,01
Al	0,22 - 0,32	-	9	-
Al	0,15	1,2	3,5	0,14
Al Si7Mg	0,3	22	17	1,5
Al Si7Mg	0,15	3,5	5	0,4
Al SiC	0,02 - 2	0,04 - 7	0,04 - 7	0,02 - 2
Al SiC	0,2 - 0,4	-	1,5 - 2	-
AlMg1SiCu	0,2	-	12	-
AlSi6Cu4	0,14 - 0,2	-	9,5 - 24	-
AlSi6Cu4	0,125	-	10,8	-
Ni	0,03 - 0,04	0,6 - 1,1	0,6 - 1,1	0,4 - 1
Ni (nano)	0,022	-	3,9	-
Ta	0,2	-	50	1,5 - 3
Ti	0,33	-	157	1,9

## Choc balistique

### *Matériaux employés*

Les mousses métalliques en composites évoluées sont utilisées en balistique (Fig. VII.6), généralement sous forme de composites intégrant des mousses d'aluminium à pores fermés sont composées d'une âme en mousse entourée de feuilles plus résistantes, souvent en acier, présentent des possibilités intéressantes pour les applications pare-balles. Une structure de ce type permet, à masse égale, des performances supérieures à celles qu'offre une plaque monolithique.



**Figure VII.6 :** Matériau en mousse légère peut stopper des balles perforantes aussi efficacement que l'acier

L'armure a été fabriquée à partir de ses mousses métalliques composites éprouvées. La figure VII.7 montre le du test où une balle M2 de 7,62 x 63 mm a été tirée conformément aux procédures de test standard établies par l'Institut national de la justice. Les résultats confirment que la balle lorsqu'elle entre en contact avec l'armure en mousse métallique se réduit en poussière.



**Figure VII.7 :** La balle se transforme en «poussière» à l'impact avec les mousses métalliques composites évoluées

Dans ce domaine d'application, les mousses métalliques sont également utilisées comme absorbeur d'énergie cinétique, elles entrent donc également en compétition avec les structures à base de nids d'abeille. L'objectif final est de déterminer quelle est la structure sandwich qui apporte le meilleur gain par rapport aux plaques monolithiques entourant l'âme. Les études comparatives mettent en évidence, que, pour de faibles épaisseurs de plaques externes, la mousse plus ductile est significativement supérieure à la mousse plus cassante.

Dans la compétition avec les structures en nid d'abeille, seule la mousse plus ductile prend le dessus.

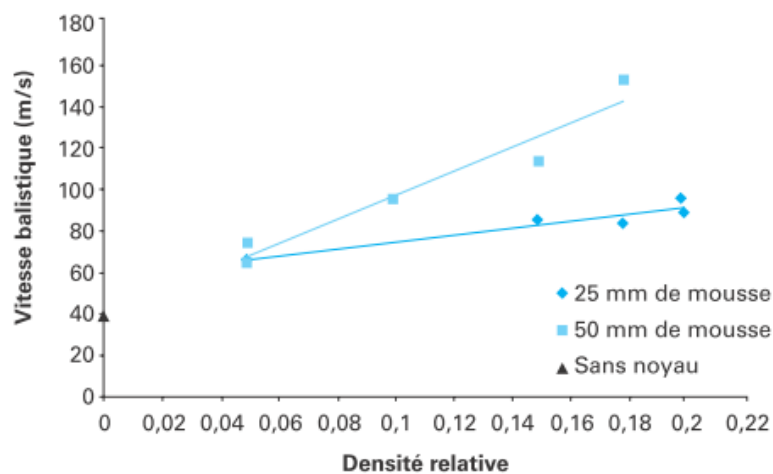
Le ratio d'enfoncement considère, au regard de l'enfoncement mesuré, une plaque monolithique en acier de masse équivalente à celle du sandwich mis en œuvre.

Enfin, ces structures sandwichs doivent faire face à de nombreuses autres solutions composites plus ou moins conventionnelles (fibres synthétiques, mousses polyuréthane, fibres de verre...).

- *Caractéristiques clés*

Comme il s'agit d'une structure composite, c'est l'ensemble du sandwich qui est considéré. Dans la structure composite, la mousse métallique a pour objet d'absorber tout ou partie de l'énergie cinétique du projectile.

Les matériaux les plus répandus sont constitués de tôles d'acier ou d'alliage d'aluminium, d'épaisseur millimétrique variable, et de mousses métalliques d'épaisseur centimétrique et de densité relative variables.



**Figure VII.8 :** Courbes indiquant l'influence de la densité relative sur la limite balistique du composite pour différentes épaisseurs

La figure VII.8 montre l'incidence de l'épaisseur de l'âme en mousse sur la limite balistique d'un projectile (vitesse minimale à atteindre pour perforer la structure).

Les composites testés sont composés de deux tôles de 0,6 mm d'alliage d'aluminium (type AlMg1) collées sur une mousse de densité relative 0,18 correspondant à une porosité de 82 %.



Le comportement réel du matériau sandwich lors d'un impact balistique est complexe, car il est fonction de la morphologie et de la composition du composite, mais également des caractéristiques de l'impact. On peut schématiquement résumer les paramètres influents par :

– Propriétés sandwich :

- matériau mousse (mousses d'aluminium, autres) ;
- épaisseur mousse ;
- liaison mousse/tôle (moulée, collée, plaquée, etc.) ;
- précontraintes imposées aux tôles externes.

Propriétés impact :

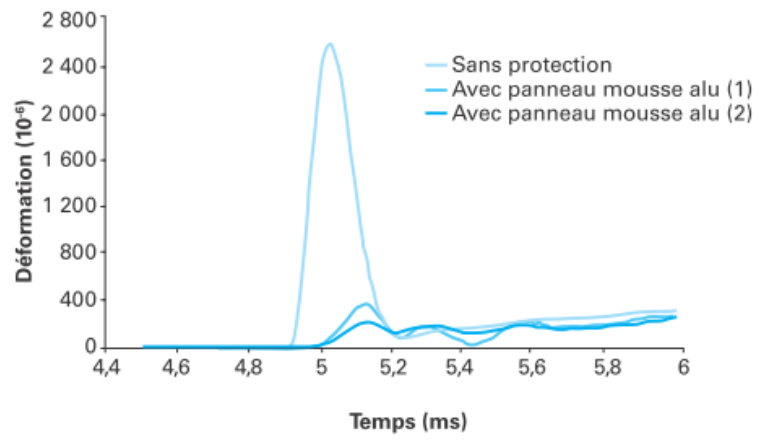
- énergie du projectile (vitesse et masse) ;
- forme (conique, hémisphérique, plat).

### ***Matériaux employés***

On retrouve ici, comme en balistique, des composites de même nature qu'évoquée précédemment. Les études menées sur ces matériaux indiquent de bonnes propriétés d'absorption de l'âme en mousse qui limite fortement les déformations. La figure **VII.9** montre l'efficacité d'une protection en mousse d'aluminium de 50mm d'épaisseur.

Les paramètres qui pilotent la pression résiduelle transmise aux structures protégées par ces sandwichs sont :

- l'épaisseur de mousse et sa densité ;
- les propriétés de la tôle du sandwich ;
- l'existence de multicouches de mousses dans la structure.



**Figure VII.9** : Déformations induites par une explosion sur panneaux avec et sans protection

## Références bibliographiques:

1. D. Guitard, "Mécanique du matériau bois et composites, Cépadues Ed.
2. M.F. Ashby. "Matériaux. 2. Microstructure et mise en œuvre", Dunod
3. J. Bodig, B.A. Jayne, "Mechanics of Wood and Wood composites", Van Nostrand Reinhold.
4. J.M. Dinwoodie, "Timber, its Nature and behavior", Van Nostrand Reinhold.
5. H.E. Desch, Timber, its Structure, Properties, and utilization". Macmillan.
6. D. Gay, "Matériaux composites", Hermès.
7. N.C. Hillyard, "Mechanics of Cellular Plastics" Ap. Sc. Publishers.
8. M. Grayson, "Encyclopedia of Composite Materials and Components".