

Matériaux bois

Structure et caractéristiques

par **Marie-Christine TROUY-TRIBOULOT**

Ingénieur, Docteur de l'université Henri-Poincaré, Nancy 1

Diplômée en xylologie fondamentale, Paris VI

Chef de travaux pratiques ENSAM à l'ENSTIB, École nationale supérieure des technologies et industries du bois

et **Pascal TRIBOULOT**

Ingénieur, Docteur-ingénieur de l'université de technologie de Compiègne

Professeur à l'ENSTIB

1. Interaction forêt, bois et environnement.....	C 925 - 2
2. Structure anatomique.....	— 3
2.1 Formation et rôle du bois dans l'arbre	— 3
2.2 La paroi cellulaire	— 5
2.3 Du microscopique au macroscopique	— 5
2.4 Résineux et feuillus dans la classification botanique, appellations commerciales.....	— 5
2.5 Le plan ligneux des résineux.....	— 6
2.6 Le plan ligneux des feuillus	— 9
2.7 Bois tropicaux	— 11
2.8 De l'anatomie aux propriétés physico-mécaniques du bois.....	— 12
3. Composition chimique	— 13
3.1 Les constituants chimiques du bois.....	— 13
3.2 Le comportement photochimique et thermoplastique	— 14
3.3 Compatibilité chimique	— 15
4. Paramètres pertinents à prendre en compte dans l'utilisation du bois	— 15
4.1 Densité	— 15
4.2 Interaction eau/bois.....	— 16
4.3 Température	— 20
5. Classement des bois de structures.....	— 23
Pour en savoir plus.....	Doc. C 927

Le bois, matériau de toujours

Plus que tout autre, le matériau bois évoque **le temps et l'âge** : le temps parce que sa production est assurée par la croissance des arbres qui deviennent récoltables après une période assez longue, variable selon l'espèce et la station ; l'âge, parce qu'il est, dans l'histoire, celui qui est utilisé par l'homme depuis le plus longtemps. C'est sans doute parce que la dépense d'énergie nécessaire à sa transformation est particulièrement faible (il suffit de rompre les branches, de couper, de scier...) par comparaison avec l'élaboration des métaux ou l'exploitation des minéraux qu'il a été mis en œuvre très tôt par l'homme, que ce soit pour se défendre, pour chasser, construire ou s'abriter. C'est aussi parce que dès l'origine des temps la forêt a joué son rôle de « forêt-abri » et de « forêt nourricière », que l'homme y a trouvé refuge et matière première en abondance.

C'est cette rencontre entre l'homme et la forêt qui fit naître à l'aube de l'humanité une « filière bois » de l'arbre au matériau. Cette filière s'organisa immédiatement autour de trois axes principaux :

- filière biens d'équipement et construction (armes, outils, huttes...);
- filière agroalimentaire (cueillette de baies, champignons...);
- filière bois-énergie (le feu...).

À l'aube du 3^e millénaire un défi immense se pose à l'humanité : nourrir et protéger plus de 6 milliards d'individus. La réussite de ce challenge passe par l'adéquation permanente entre agriculture, matières premières-industrie et environnement. Dans ce contexte, la forêt en tant qu'élément régulateur de l'environnement et fournisseur de matière première et d'énergie, joue un rôle majeur.

La science des matériaux ne travaille pas sur un seul axe (par exemple la recherche d'une propriété mécanique élevée), elle cherche au contraire et en permanence un compromis optimal entre plusieurs propriétés souvent contradictoires (un matériau à la dureté élevée et au comportement non fragile, un composite artificiel à module d'élasticité très élevé et à coût modéré, etc.). Dans cette stratégie, le bois occupe dans la majorité des cas une position toujours optimisée.

Si l'âge du bronze, l'âge du fer sont à ce jour dépassés, l'âge du bois est d'une telle évidence d'actualité que les experts s'efforcent de l'ignorer. Depuis l'origine, les arbres et le bois représentent l'un des succès majeurs de l'évolution des espèces [7], ils nous sont devenus si familiers, que nous ne réalisons plus à quel point il y a là un matériau ultraperfectionné à la structure ingénieuse et optimisée : un matériau composite naturel et renouvelable, vraie réponse aux problématiques du siècle qui s'avance et vraie réponse à l'ensemble des problèmes des sociétés et civilisations qui nous ont précédés.

Le bois, matériau de toujours : c'est, dans ce contexte, la définition la plus pertinente que l'on puisse lui donner. L'architecture et les acteurs de la construction retrouvent aujourd'hui avec le bois un matériau tout à la fois traditionnel, résolument contemporain et pleinement futuriste.

Cet article se compose de trois parties. La première [C 925] présente une étude détaillée des structures microscopique et macroscopique du bois selon les différentes essences, ainsi que les caractéristiques mécaniques, physiques, chimiques qui en découlent. Elle se termine par la présentation des critères, essentiellement visuels, de classement des bois de structure. La seconde [C 926] est consacrée à l'étude des agents biologiques de dégradation du bois, à la durabilité qui en découle, ainsi qu'aux traitements de préservation et de finition. Dans le « Pour en savoir plus » [Doc. C 927], sont passés en revue, succinctement, les points concernant l'économie forestière, les dernières grandes tempêtes, ainsi que la déforestation dans les régions tropicales. On y trouve également une liste d'ouvrages de référence, de normes et d'organismes.

1. Interaction forêt, bois et environnement

■ Le bois, un matériau biologique

Le bois est un tissu végétal qui assure le rôle de conduction de la sève brute des racines jusqu'aux feuilles et le rôle de soutien mécanique de la plante. Les végétaux sont autotrophes : ils sont capables de fabriquer leur propre nourriture à partir de composés minéraux puisés dans le sol ou prélevés dans l'atmosphère.

La réaction de photosynthèse permet à la plante de produire, à partir du gaz carbonique atmosphérique et de l'eau puisée dans le sol et grâce à l'énergie solaire, les sucres nécessaires à son métabolisme et notamment à la fabrication du bois. La réaction de photosynthèse produit de l'oxygène gazeux. Si l'énergie solaire peut être considérée comme inépuisable, il n'en est pas de même des matières premières, à savoir le carbone, l'eau, les sels minéraux, etc. Dans les milieux naturels, les éléments sont recyclés. La

fabrication et le recyclage du bois s'inscrivent dans le cycle naturel du carbone.

■ Le bois, le cycle du carbone, l'accentuation de l'effet de serre

Aujourd'hui, on note des bouleversements rapides du cycle du carbone : l'utilisation des combustibles fossiles et la déforestation ont pour conséquence une augmentation du taux de gaz carbonique atmosphérique qui était de 280 ppm avant la révolution industrielle, en 1750, et atteint en 2000 plus de 360 ppm. Le gaz carbonique est le principal responsable de l'accentuation de l'effet de serre. Dans l'avenir, le choix des matériaux et des technologies ne pourra plus se faire sans une prise en compte des impacts sur l'environnement. L'émission de gaz carbonique généré au cours du cycle de vie d'un produit sera un critère important. **La fabrication du bois ne génère pas de gaz carbonique, elle en consomme.** Le bois est un matériau de qualité qui se fabrique et se recycle naturellement sur Terre depuis des centaines de millions d'années. Il est donc amené à jouer un rôle primordial dans l'industrie future, notamment dans le domaine de la construction.

Le bois est composé d'environ 50 % de carbone, 43 % d'oxygène, 6 % d'hydrogène et 1 % d'azote. Tout le carbone contenu dans le bois provient du CO₂ atmosphérique utilisé par l'arbre par photosynthèse. Construire en bois, c'est stocker du carbone. Un mètre cube de bois mis en œuvre (700 kg), c'est 350 kg de carbone en moins dans l'atmosphère ou encore plus de 1 200 kg de CO₂. L'utilisation du bois permet ainsi de retarder le moment où le carbone fixé par photosynthèse sera rejeté par décomposition ou combustion. Elle répond à la nécessité actuelle de réagir rapidement, étant donné la longue durée de séjour du gaz carbonique dans l'atmosphère (50 à 200 ans). D'autre part utiliser de préférence du bois, c'est utiliser moins de matières plastiques, moins de métaux, moins de béton, matériaux non renouvelables dont la fabrication dégage du CO₂. Le tableau 1 positionne le bois dans cette approche environnementale.

Tableau 1 – Effet environnemental des matériaux de construction

Matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Procédé de fabrication et mise en œuvre	
		Dégagement de CO ₂ (kg/m ³)	Fixation de CO ₂ (kg/m ³)
Acier	7 200	5 000	0
Béton	2 300	375	0
Ciment	1 600	2 500	0
Bois feuillus	700	Prise en compte des procédés industriels ≈ 200	1 000 (1)

(1) Le bois est constitué de C = 50 %, O = 43 %, H = 6 %, N = 1 % :
700 kg de bois contiennent 350 kg de C ;
1 mole de C = 12 g ; 1 mole de O₂ = 32 g ⇒ 1 mole de CO₂ = 44 g ;
⇒ pour 350 kg de C : (350/12) × 44 = 1283 kg de CO₂ arrondi à **1 tonne de CO₂ par m³ de bois utilisé**.

■ Le bois, un matériau à faible coût énergétique

La fabrication et l'exploitation du matériau bois, loin d'être polluantes, permettent le stockage du carbone et l'entretien des massifs forestiers. Par ailleurs, le bois, comme toutes les matières organiques naturelles, est biodégradable. Quelle que soit l'essence considérée, le bois sera à plus ou moins long terme réintégré dans le cycle naturel du carbone. C'est là un avantage incontestable du matériau. Il s'inscrit dans le fonctionnement naturel de la biosphère : toute matière organique naturelle est amenée à disparaître pour permettre la réutilisation perpétuelle des éléments. Cette décomposition est réalisée par des organismes que l'on appelle les détritivores (bactéries, champignons) et dans des conditions particulières qui sont par exemple présentes au niveau de l'humus forestier.

Pour augmenter la durabilité du bois, on peut avoir recours à des produits de préservation dont l'impact environnemental devra être pris en compte mais, avant tout, il faut essayer de placer le bois en dehors des conditions de biodégradabilité, grâce à des précautions architecturales et une conception réfléchie. Par ailleurs, les essences de bois sont variées et présentent des durabilités naturelles différentes qui les rendent plus ou moins aptes à telle ou telle utilisation. Une bonne connaissance du matériau, de ses propriétés et des règles de mise en œuvre est ici d'une absolue nécessité. De nombreux exemples montrent que la durabilité d'un ouvrage en bois peut alors être de plusieurs siècles sans apport de produit de préservation. L'une des plus anciennes constructions en

bois, symbole de savoir-faire, de technicité, d'architecture et de durabilité, n'est autre que le vieux sanctuaire bouddhiste Horyu-ji près de Nara au Japon. Témoin de l'architecture du VII^e siècle, il entre sans encombre dans le 3^e millénaire.

Au-delà des avantages évidents du bois, il en existe d'autres mis en évidence grâce aux écobilans comparés, appelés également analyse des cycles de vie (LCA : *Life Cycle Assessment or Life Cycle Analysis*). Ceux-ci prennent généralement en compte l'impact environnemental des étapes suivantes de la vie d'un produit : élaboration et extraction des matériaux bruts, transformation, transport, installation, performances à l'usage, élimination (déconstruction, recyclage).

Ces notions sont récentes et les informations encore fragmentaires. Cependant, le bois apparaît nettement comme le choix « écologiquement responsable ». On peut citer, à titre d'exemple, quelques-uns de ses nombreux points forts :

- l'exploitation forestière est beaucoup moins polluante que l'extraction des autres matériaux ;

- le bois est un matériau disponible pratiquement partout sur la planète et permet dans la plupart des cas un approvisionnement de proximité. De plus, son transport présente un risque minimal ;

- la transformation du bois nécessite moins d'énergie que celle d'autres matériaux. Par exemple : la production d'une tonne de bois de construction nécessite 10 à 50 fois moins d'énergie que celle d'une tonne d'acier et de 50 à 100 fois moins que celle d'une tonne d'aluminium ;

- la transformation du bois nécessite moins d'eau que celle d'autres matériaux ;

- la valorisation énergétique des sous-produits de l'industrie du bois rend les entreprises autosuffisantes en énergie. L'usage du bois comme source d'énergie est par ailleurs en plein développement. Le bois-énergie est neutre sur le plan de la production de CO₂ puisque l'on rejette par combustion le carbone fixé par l'arbre au cours de sa croissance.

Le bois permet donc de stocker une partie du carbone qui a été rejeté par l'activité industrielle passée mais également de participer à la réduction des émissions de gaz carbonique en tant qu'alternative aux matériaux non renouvelables qui induisent des coûts énergétiques que notre planète ne peut que difficilement supporter.

2. Structure anatomique

2.1 Formation et rôle du bois dans l'arbre

Les tissus végétaux sont formés à partir de tissus spécialisés dans la division cellulaire, les **méristèmes**, composés de cellules indifférenciées :

- les méristèmes primaires situés à l'extrémité des tiges et des racines assurent la croissance en longueur des plantes en formant des massifs de cellules ne présentant pas d'arrangement ordonné ;

- les méristèmes secondaires, qui apparaissent dans le végétal à partir de la deuxième année, se présentent sous forme de couches continues de cellules, appelées assises, et assurent la croissance en diamètre en produisant des cellules alignées dans le prolongement de la cellule méristématique qui leur a donné naissance.

Le bois, ou xylème secondaire, est un tissu issu du fonctionnement vers l'intérieur de l'assise génératrice libéro-ligneuse, appelé également **cambium**, située sous l'écorce. Dans les régions tempérées, le cambium ne fonctionne que pendant la saison de végétation au printemps et en été. Il produit chaque année une couche de bois, appelée cerne annuel, dans laquelle on peut

parfois distinguer le bois formé au printemps (bois initial) et le bois formé en été (bois final).

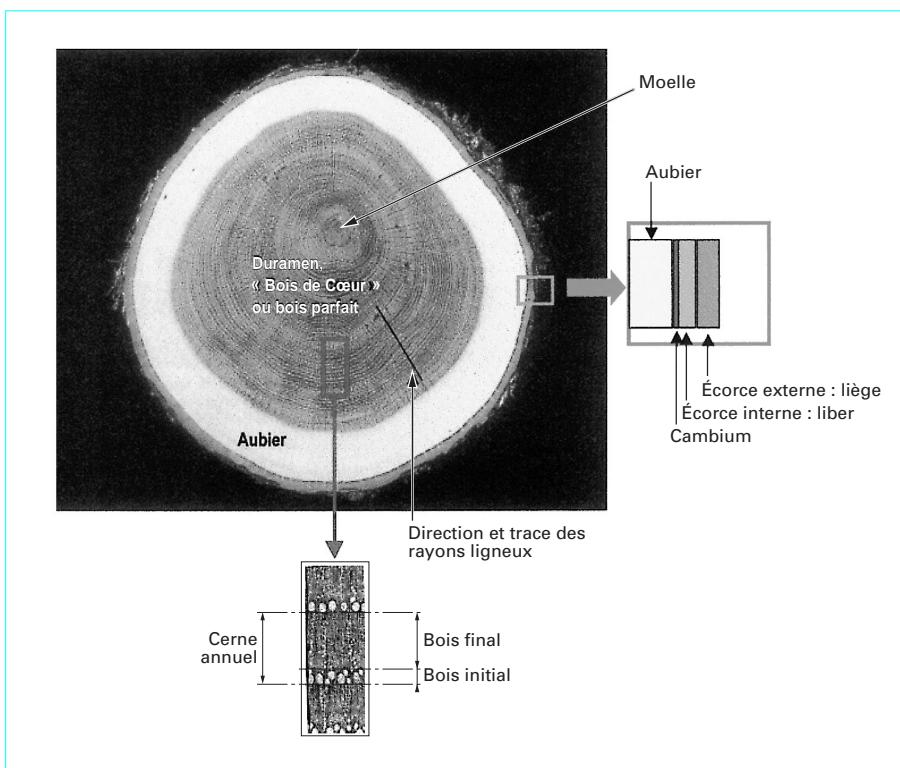
Le bois est un tissu conducteur à l'intérieur duquel circule la sève brute, ou sève ascendante. Composée d'eau et de sels minéraux elle est puisée dans le sol par les racines et monte jusqu'aux feuilles. Le principal moteur de la montée de sève est la transpiration. Le bois contient des éléments conducteurs qui se prolongent dans les racines et dans les feuilles et forment autant de petites colonnes d'eau. Celles-ci présentent une telle cohésion qu'un départ d'eau par transpiration au niveau des feuilles est compensé par une entrée d'eau au niveau des racines.

Les cellules de bois sont caractérisées par la **lignification des parois cellulaires**. Elle a lieu à la fin de la différenciation des cellules et entraîne leur mort pour la grande majorité d'entre elles en limitant les possibilités d'échanges intercellulaires. Les seules cellules vivantes du bois sont les cellules de **parenchyme** qui doivent assurer un rôle de stockage et de déstockage des réserves (généralement de l'amidon) et d'élaboration de substances. Les rôles de conduction et de soutien mécanique sont remplis par des cellules mortes, vidées de leur contenu et dont ne subsistent plus que les parois. La lignine rigidifie les parois des cellules ligneuses. Grâce à la lignification des parois de ces cellules, le bois est rigide, relativement hydrophobe et résistant à la biodégradation par rapport aux autres tissus végétaux. Ainsi les couches de bois formées au cours de la vie de l'arbre sont conservées et forment un cylindre sur lequel vient s'appliquer chaque année un nouveau cerne de diamètre supérieur. L'arbre se dote ainsi chaque année d'une quantité d'éléments conducteurs nouveaux qui croît en même temps que ses besoins en sève brute.

Les couches de bois les plus profondes ne sont plus fonctionnelles ; elles forment le **bois parfait** et ne contiennent plus que des cellules mortes. Le bois fonctionnel, correspondant aux dernières couches formées, est appelé **aubier**. Chez certaines essences, dites

essences à aubier différencié, le bois parfait est coloré et nettement distinct de la couronne d'aubier périphérique : il a subi une transformation que l'on appelle la **duraminisation** et il est alors appelé **duramen**, ce terme devant donc être strictement réservé aux bois parfaits ayant effectivement subi une duraminisation. La duraminisation est provoquée et contrôlée par les seules cellules vivantes présentes dans l'aubier, les cellules de parenchyme. On note par exemple l'élaboration de substances qui vont imprégner le bois et lui conférer sa couleur et une certaine résistance naturelle vis-à-vis des champignons ou des insectes ravageurs. Les voies de circulation de la sève sont fermées (fermeture des ponctuations aréolées des trachéides de résineux) ou bouchées (bouchage des vaisseaux de feuillus par des expansions membranaires appelées thylles ou par des substances obstruantes), ce qui a pour effet de rendre le bois parfait duraminisé imperméable. **La duraminisation explique en grande partie certaines caractéristiques essentielles des essences, à savoir la durabilité naturelle et l'imperméabilisation.**

La zone vitale de l'arbre est donc une couche périphérique dans laquelle se trouvent les assises génératrices, les tissus conducteurs (l'aubier et le liber, partie interne de l'écorce dans laquelle circule la sève élaborée, contenant les sucres produits par photosynthèse) et protecteur (liège). La partie centrale du tronc n'est pas vitale pour l'arbre, elle peut même manquer suite à une dégradation biologique dans le cas des arbres creux. Il est intéressant de noter que dans l'arbre sur pied, l'aubier, grâce à son parenchyme vivant et réactif, est moins souvent attaqué que le bois parfait, bois mort et inerte, même lorsque celui-ci est duraminisé. Par contre, dans le cas d'un arbre abattu ou du bois mis en œuvre, l'aubier résiste nettement moins bien que le duramen car ce dernier contient des substances protectrices élaborées au moment de la duraminisation, notamment des tanins. La figure 1 illustre cette structure du tronc des arbres.



**Figure 1 – Structure du tronc dans l'arbre.
Exemple du chêne, essence à aubier différencié**

2.2 La paroi cellulaire

Parce que la plupart des cellules de bois ne sont plus que des parois délimitant des vides, la structure fine d'une paroi cellulaire ligneuse permet de comprendre et d'expliquer de nombreuses propriétés physiques et mécaniques du bois.

Lorsque la cellule de cambium se divise pour former une cellule de bois, les deux cellules sont dans un premier temps séparées par une couche intercellulaire contenant des composés pectiques. Elle sera fortement chargée en lignine au moment de la lignification.

Sur cette couche intercellulaire, s'appuie la paroi primaire de chacune des cellules. Sa structure extensible est compatible avec l'élongation de la cellule qui a lieu au moment de la différenciation. La paroi secondaire, non extensible, est fabriquée et déposée sur la paroi primaire par la cellule de bois lorsque l'élongation est terminée. Les parois primaire et secondaire contiennent une armature formée de microfibrilles de cellulose, dans une matrice contenant des hémicelluloses et la lignine déposée à la fin de la différenciation de la cellule.

Les microfibrilles peuvent être comparées à des cordes fabriquées à partir de fils, les fils étant ici de longues molécules de cellulose, polymère linéaire de β -glycopyranose (glucose cyclique). Les hémicelluloses sont des polymères ramifiés de sucres. La lignine est un polymère tridimensionnel de nature phénolique.

Dans la paroi primaire, les microfibrilles de cellulose sont enchevêtrées et forment un réseau lâche.

La paroi secondaire est composée de plusieurs couches :

- dans la couche S₁, les microfibrilles de cellulose sont disposées en hélices d'orientations variables et alternées. L'angle des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule varie de 60° à 80° ;

- la couche S₂ est la plus épaisse. C'est souvent elle qui impose son comportement à l'ensemble de la paroi. Les microfibrilles sont toutes parallèles et présentent un angle par rapport à l'axe de la cellule de 5° à 30° ;

- la couche S₃ souvent considérée comme une paroi tertiaire peut être comparée à S₁, quoique plus mince.

La figure 2 précise l'organisation de la paroi cellulaire.

2.3 Du microscopique au macroscopique

La nature et la disposition des cellules de bois formées par le cambium constituent le plan ligneux. Il est propre à chaque essence et son étude permet l'identification des espèces. Certains caractères sont perceptibles à l'œil nu ou à la loupe à main, ils permettent une reconnaissance à l'échelle macroscopique. D'autres ne sont accessibles qu'avec l'aide d'une loupe à fort grossissement ou d'un microscope. La reconnaissance microscopique s'avère souvent nécessaire pour différencier des espèces voisines.

Dans le cambium, on distingue deux types de cellules : les cellules initiales fusiformes qui en se divisant produisent des cellules de bois allongées dans la direction longitudinale (parallèle à l'axe de l'arbre) et les cellules isodiamétriques ou cellules initiales des rayons qui sont à l'origine des cellules de bois allongées dans la direction radiale (perpendiculaire à l'axe de l'arbre et passant par son centre structurel, qui ne correspond pas toujours à son centre géométrique).

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

- le plan transversal, perpendiculaire à l'axe de l'arbre (bois de bout) ;
- le plan radial, parallèle à l'axe et passant par le centre structurel de l'arbre (débit sur quartier) ;
- le plan tangentiel, tangent aux cernes de croissance (débit sur dosse).

Ces trois plans sont illustrés sur la figure 5 (§ 2.8).

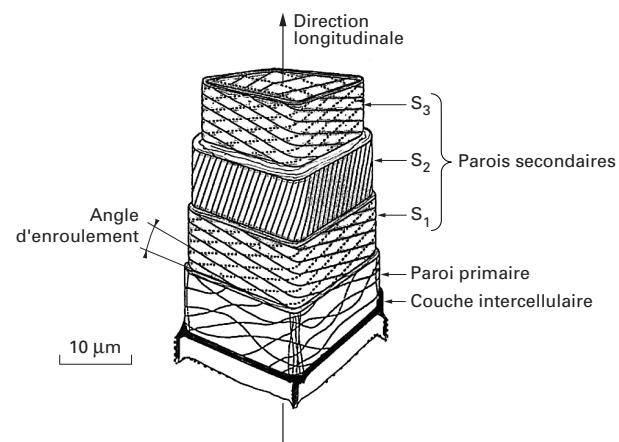


Figure 2 – Définition de la paroi cellulaire

2.4 Résineux et feuillus dans la classification botanique, appellations commerciales

Les essences de bois sont généralement classées en deux grands groupes, désignés sous le nom de **résineux** et de **feuillus**. Du point de vue de la systématique (science de la classification des êtres vivants) les végétaux possédant un cambium et produisant du bois appartiennent tous au sous-règne des vasculaires (plantes possédant des éléments conducteurs) et à l'embranchement des spermaphytes (plantes à graines). Cet embranchement comprend deux sous-embranchements : les **gymnospermes** (plantes à graines nues, non incluses dans un fruit fermé) et les **angiospermes** (plantes à graines enfermées dans un fruit fermé).

Les **résineux** (ou conifères) constituent une classe à l'intérieur du sous-embranchement des gymnospermes. Les conifères sont tous des arbres ou arbustes. Ils sont apparus il y a environ 270 millions d'années, au carbonifère.

Les **feuillus** appartiennent à la classe des dicotylédones (deux feuilles embryonnaires dans la graine) à l'intérieur du sous-embranchement des angiospermes. Toutes les dicotylédones ne sont pas ligneuses, on trouve dans cette classe beaucoup de plantes herbacées.

Les autres angiospermes appartiennent à la classe des monocotylédones (une feuille embryonnaire dans la graine) ; on trouve dans cette classe par exemple les graminées et les palmiers. Les monocotylédones n'ont pas de cambium et ne produisent donc pas de bois au sens botanique du terme. On ne doit donc pas parler de « bois de palmier », ce matériau présentant une structure et des propriétés bien différentes de celles du véritable bois. Les angiospermes sont apparus il y a environ 100 millions d'années, au crétacé.

L'appellation scientifique universelle permettant de désigner clairement, avec le moins de confusion possible, une essence de bois est exprimée en latin. Chaque bois est désigné par un nom de genre écrit avec une majuscule et un nom d'espèce écrit avec une minuscule, parfois suivi du nom ou de l'abréviation du nom du ou des botanistes qui ont baptisé l'arbre. Les genres sont regroupés en familles.

Exemple : le pin sylvestre (*Pinus sylvestris L.*) appartient au genre *Pinus* et à l'espèce *sylvestris*, il a été décrit par Carl von Linné, célèbre botaniste suédois, initiateur de la classification des êtres vivants (abréviation : L.). Il fait partie de la sous-famille des Pinoïdées dans la famille des Pinacées. Les provenances nordiques sont généralement vendues sous le nom de « sapin » rouge du Nord.

De nombreuses appellations commerciales improches sont utilisées. Plusieurs nomenclatures officielles tentent d'imposer l'utilisation de noms pilotes (norme française NF-B50-001, nomenclature ATIBT pour les bois tropicaux). Le décret n° 86-583 du 14 mars 1986 concernant le commerce de l'ameublement comporte l'article 9 suivant : « Dans le commerce des objets d'ameublement, il est interdit de désigner une essence de bois par le nom d'une essence d'une autre famille botanique que celle à laquelle elle appartient. Il est également interdit de représenter ou d'évoquer sous quelque forme que ce soit une essence, une matière, un matériau, une finition ou un procédé décoratif qui n'ont pas été utilisés dans la fabrication de ces objets, sauf si la nature exacte de l'essence, de la matière, du matériau, de la finition ou du procédé décoratif employé est précisée ou si le mot « imitation » précède immédiatement le nom de l'essence, de la matière, du matériau, de la finition ou du procédé imité ou accompagne leur présentation ». Une circulaire du 2 octobre 1989 complète ce texte par une liste des désignations proscrites.

Quelques exemples figurent dans le tableau 2.

On peut être surpris par l'acceptation de la désignation « Western Red Cedar » pour une espèce appartenant au genre *Thuya* (famille des Cupressacées), « Cedar » signifiant cèdre (famille des Pinacées). L'appellation commerciale est devenue tellement courante qu'il semble peut-être difficile d'imposer maintenant un autre nom, ce bois étant par ailleurs bien connu et bien identifié par les acteurs de la filière bois.

2.5 Le plan ligneux des résineux

Les trachéides longitudinales

Les résineux sont des végétaux plutôt primitifs. Les cellules de bois sont peu spécialisées et le plan ligneux est simple. Environ 90 % du volume du bois de résineux est constitué de trachéides longitudinales. Une trachéide est une cellule allongée issue d'une cellule initiale fusiforme du cambium. C'est une cellule morte dont ne subsiste plus que la paroi. Elle remplit à la fois un rôle de conduction de la sève brute et de soutien mécanique. Elle mesure en moyenne 3 mm de long et porte à ses extrémités et sur les faces radiales des **ponctuations aréolées**. Les trachéides se chevauchent au niveau des extrémités, les ponctuations permettant la communication et donc le passage de sève brute d'une trachéide à l'autre. Les ponctuations sont dites aréolées car à leur niveau la

paroi secondaire percée et décollée forme une sorte de petit cratère, présentant de face un aspect d'aurore. Les ponctuations aréolées peuvent être comparées à de petites valves qui se ferment de façon irréversible lors de la duraminisation ou au cours du séchage (cas de l'épicéa). La fermeture des ponctuations aréolées explique la non-imprégnabilité des bois parfaits duraminisés et de certaines essences à aubier non différencié (épicéa). Chez certaines essences (douglas, if), la dernière couche de la paroi, celle qui se trouve vers l'intérieur de la cellule, porte des ornements sous forme d'épaissements spirals.

Relation entre vitesse de croissance et densité chez les résineux (notion de texture)

Dans les régions tempérées, le cambium ne forme pas des trachéides identiques tout au long de la saison de végétation. Les trachéides formées au printemps sont de section carrée (de l'ordre de $30 \times 30 \mu\text{m}$) et à parois minces ; elles peuvent conduire de grandes quantités de sève pour répondre aux besoins importants de l'arbre au moment de la reprise d'activité. Les trachéides formées en été et en automne sont de section rectangulaire (de l'ordre de $30 \times 10 \mu\text{m}$) et à parois épaisses. Elles jouent nettement, en plus du rôle de conduction de la sève, un rôle de soutien mécanique de l'arbre. À l'échelle macroscopique, les résineux qui ont poussé dans une région au climat tempéré se caractérisent par la succession de bois de printemps ou bois initial, clair et tendre, et de bois d'été ou bois final, plus foncé et plus dense. Une couche de bois de printemps et une couche de bois d'été forment un cerne annuel. À quelques exceptions près (douglas, mélèze), la largeur du bois d'été, dense, reste constante quelle que soit la vitesse de croissance, autrement dit quelle que soit la largeur de cerne. Ainsi, une croissance plus rapide entraîne une formation plus importante de bois de printemps, peu dense. **Les résineux à croissance rapide (à cernes larges) sont donc moins denses que les résineux à croissance lente (cernes étroits).** D'un point de vue commercial, les seconds ont une valeur marchande supérieure, leur homogénéité d'aspect et leurs bonnes propriétés mécaniques les réservant aux emplois les plus nobles (charpente, ébénisterie, menuiserie), les premiers étant plutôt destinés à la Trituration, au coffrage ou à la caisserie.

Le rapport largeur du bois d'été sur largeur totale du cerne est la **texture**. Elle est directement liée à la densité. Quand la texture augmente, la densité augmente. Ce raisonnement quantitatif n'est valable qu'à l'intérieur d'une même essence, à qualité de bois de printemps et de bois d'été égale. En effet, l'if, par exemple, est un bois à texture faible (son bois d'été est toujours très étroit) et pourtant c'est un des bois résineux les plus denses car, même dans le bois de printemps, les trachéides de l'if sont à faible section et à parois épaisses.

Tableau 2 – Désignations commerciales et improches des bois (exemples)

Désignations correctes	Familles	Désignations improches correspondantes	Familles correspondantes
Résineux			
Western Red Cedar (ou thuya)	Cupressacées	Cèdre rouge	Pinacées
Parana (ou araucaria)	Araucariacées	Pin de Parana	Pinacées
Feuillus			
Aulne de l'Orégon	Bétulacées	Merisier du Canada	Amygdalacées
Eucalyptus	Myrtacées	Chêne de Tasmanie	Fagacées
Bétē	Sterculiacées	Noyer d'Afrique	Juglandacées
Ipé	Bignoniacées	Ébène verte	Ébénacées

■ Les rayons ligneux

Le bois est parcouru de lames radiales de cellules, appelées rayons ligneux. Les cellules de rayons ligneux sont issues de la division des îlots de cellules initiales des rayons du cambium. Les rayons ligneux sont composés soit uniquement de parenchyme radial (rayon homogène) soit de parenchyme radial et de trachéides radiales (rayon hétérogène). Le parenchyme a pour rôles le stockage des réserves ou des déchets, la restitution des réserves, l'élaboration de substances. Dans l'aubier, lorsque l'arbre est sur pied, les cellules de parenchyme sont vivantes. Les trachéides radiales associés au parenchyme radial chez certaines essences le secondent en quelque sorte dans la conduction radiale. Les rayons ligneux de résineux sont pratiquement toujours larges d'une seule cellule, la hauteur étant variable (d'une cellule à plusieurs dizaines). Pour cette raison, ils sont difficilement perceptibles à l'œil nu sauf sur une coupe radiale, où, coupés dans le sens de la longueur, ils offrent une plus grande surface au regard. L'aspect macroscopique des rayons ligneux est appelé la **maillure**.

■ Les ponctuations de champ de croisement

Les ponctuations qui permettent la communication entre le parenchyme radial et les trachéides longitudinales sont appelées ponctuations de champ de croisement (un champ de croisement est une zone d'intersection entre une cellule de parenchyme radial et une trachéide longitudinale) : l'observation au microscope sur une coupe radiale de leurs forme, nombre et disposition est un critère important de reconnaissance microscopique des résineux. On distingue les ponctuations de type **picéoïde** (comme chez le genre *Picea*, les épicéas), **cupressoïde** (comme chez le genre *Cupressus*, les cyprès), **taxodioïde** (comme chez le genre *Taxodium*, les « cyprès » chauves), et **pinoïde** (comme chez le genre *Pinus*, les pins [11] (voir tableau 4).

■ Le parenchyme longitudinal

Certains résineux contiennent du parenchyme longitudinal. Les bois ayant une odeur prononcée différente de celle de la résine en possèdent généralement beaucoup : c'est le cas des bois de la famille des Cupressacées (cyprès : odeur de citron, genévrier : odeur de crayon...) et des Taxodiacées (*taxodium* : odeur rance...). Au microscope, le parenchyme longitudinal se présente sous forme de files de cellules cloisonnées, une file ayant été formée par une cellule initiale cambiale fusiforme.

■ Les canaux résinifères

Certains résineux contiennent des canaux résinifères, qui peuvent être longitudinaux (issus des initiales fusiformes du cambium) ou radiaux (issus des initiales des rayons), les deux types coexistant toujours. Les canaux résinifères radiaux sont toujours inclus à l'intérieur d'un rayon ligneux. Les canaux résinifères sont des cavités tubulaires tapissées de cellules sécrétrices. Les canaux résinifères dits normaux font partie du plan ligneux de l'essence et sont formés chaque année par le cambium (cette production peut avoir lieu plutôt à la fin de la saison de végétation). Les canaux résinifères normaux ne se trouvent que chez quatre genres : *Pinus* (pins), *Larix* (mélèzes), *Pseudotsuga* (douglas) et *Picea* (épicéas). Les canaux résinifères sont bordés de cellules sécrétrices à parois minces chez *Pinus* et à parois épaisses chez les trois autres genres. Les canaux résinifères sont visibles à l'œil nu sur une face radiale ou tangentielle rabotée sous forme de stries fines et sur une face transversale sous forme de points. Les pins possèdent les canaux résinifères les plus gros, les plus nombreux et donc les plus visibles. Par contre, les canaux résinifères de l'épicéa, rares et petits sont plus difficiles à percevoir et cette essence est souvent confondue avec le sapin, qui ne possède pas de canaux résinifères normaux.

Des canaux **traumatiques** peuvent être formés par le cambium chez d'autres résineux suite à une blessure, une attaque

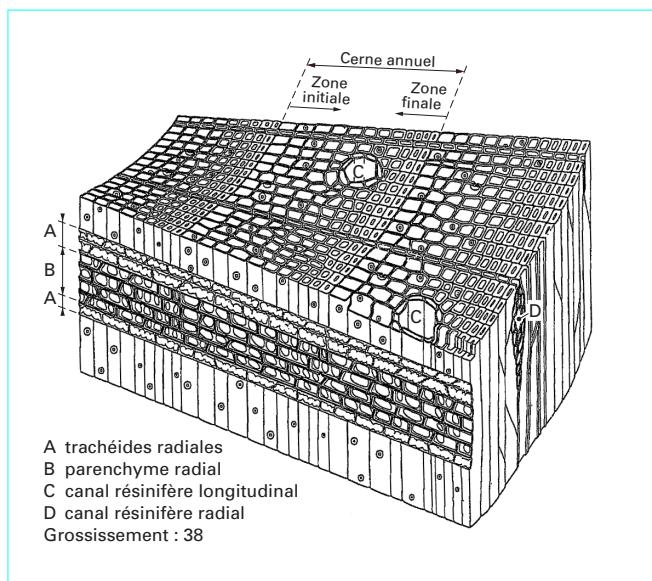


Figure 3 – Exemple d'un plan ligneux de résineux (pin sylvestre)

d'insectes... Les canaux traumatiques se reconnaissent facilement car ils sont présents en grande quantité dans un endroit bien localisé. À l'œil nu, ils forment ce que l'on appelle les poches de résine. Celles-ci doivent être considérées comme des éléments accidentels et ne sont d'aucun secours pour l'identification des essences.

La figure 3 illustre le **plan ligneux caractéristique des résineux**.

■ Reconnaissance macroscopique des résineux

La reconnaissance macroscopique des résineux est un exercice difficile pour deux raisons :

- La première est la simplicité du plan ligneux qui laisse peu de place à la variété : tous les bois résineux sont constitués de trachéides longitudinales et de rayons ligneux unisériés (larges d'une seule cellule). Le parenchyme longitudinal n'est pas visible à l'œil nu. Les canaux résinifères sont les seuls éléments anatomiques qui peuvent aider à l'identification. Nous devons nous contenter de critères peu fiables et sujets à variation : passage du bois de printemps au bois d'été progressif ou brutal, couleur, odeur, densité...

- La deuxième est l'importance de l'influence de la station, c'est-à-dire de l'endroit où a poussé l'arbre dont est issu le bois observé. Le tableau 3 donne quelques critères de reconnaissance des résineux à l'échelle macroscopique. D'après celui-ci, on voit qu'aucun critère objectif ne permet de différencier à l'œil nu le douglas du mélèze. Il faut pour s'en convaincre mettre côté à côté des plaquettes de douglas des Vosges, de « pin » d'Oregon (douglas importé de la côte pacifique des États-Unis), de mélèze des Vosges et de mélèze de Briançon ou d'Autriche. Le douglas et le mélèze des Vosges se ressemblent énormément et il semble impossible de les identifier. Les douglas ne se ressemblent pas entre eux, ni les mélèzes. On peut donc dire que **des espèces différentes** (ceci est surtout vrai pour le douglas et le mélèze) **ayant poussé dans les mêmes conditions se ressemblent plus que des individus appartenant à la même espèce mais ayant poussé dans des conditions de sol, de climat, d'altitude et de peuplement différentes**. La mémoire visuelle, tactile et olfactive de certains professionnels leur permet de reconnaître les essences sans qu'ils soient d'ailleurs en mesure de l'expliquer. Cependant, en l'absence de critères fiables, le risque d'erreur demeure. **Une reconnaissance à l'échelle microscopique s'avère souvent indispensable.**

Tableau 3 – Critères de reconnaissance macroscopique des résineux

Canaux résinifères	Aubier	Couleur du bois parfait	Particularités	Nom commercial
Pas de canaux résinifères normaux	Aubier distinct	Rouge orangé	Densité toujours forte (0,65 à 0,85) Bois final toujours étroit et largeur de cernes souvent irrégulière	If
		Gris brun rougeâtre mat	Odeur poivrée Densité toujours faible (0,30 à 0,35)	Western Red Cedar
	Aubier non distinct	Blanc crème mat	Odeur aigre à l'état frais	Sapin
Canaux résinifères petits et peu nombreux	Aubier non distinct	Blanc crème brillant	Faible odeur de résine	Épicéa
Canaux résinifères moyens et moyennement nombreux	Aubier distinct (peu épais pour le mélèze)	Brun orangé rougeâtre	Largeur du bois final souvent proportionnelle à la largeur de cerne.	Mélèze
			Odeur de résine (un peu critique pour le douglas)	Douglas (« pin » d'Oregon)
Canaux résinifères gros et nombreux	Aubier distinct souvent large	Brun orangé rougeâtre	Maillure incolore Odeur de résine	Pin sylvestre
			Maillure rougeâtre Odeur de résine	Pin maritime

Tableau 4 – Critères de reconnaissance microscopique des résineux

Canaux résinifères normaux	Trachéides radiales	Type de ponctuations de champ de croisement	Particularités	Nom commercial
Absents	Absent	Taxodioïde	Cristaux parallélépipédiques d'oxalate de calcium souvent présents dans le parenchyme radial	Sapin
		Cupressoïde	Épaississements spiralés sur les parois des trachéides	If
		Taxodioïde et cupressoïde	Parenchyme longitudinal disséminé	Western Red Cedar
Présents, bordés de cellules sécrétrices à parois minces	Présentes, à parois fortement dentelées	Pinoïde, 1 ponction quadrangulaire par champ de croisement		Pin sylvestre
	Présentes, à parois légèrement dentelées	Pinoïde, 1 à 4 ponctuations ovales-aiguës par champ de croisement		Pin maritime
Présents, bordés de cellules sécrétrices à parois épaisses	Présentes, à parois lisses	Picéoïde	Épaississements spiralés sur les parois des trachéides	Douglas (« pin » d'Oregon)
			Passage bois de printemps – bois d'été progressif	Épicéa
			Passage bois de printemps – bois d'été brutal	Mélèze

■ Reconnaissance microscopique des résineux

La reconnaissance microscopique se fait généralement à l'aide d'un microscope photonique. Des coupes épaisses de 15 à 25 µm sont réalisées avec un microtome ou parfois avec une simple lame de rasoir ou de scalpel. Les coupes doivent être **parfaitement orientées**.

• La coupe **transversale** permet d'observer le passage bois de printemps - bois d'été et les canaux résinifères longitudinaux en section.

• La coupe **radiale** permet de déterminer le type des ponctuations de champ de croisement, de déceler la présence des trachéides radiales et des épaississements spiralés.

• La coupe **tangentielle** permet surtout de voir la hauteur et la largeur des rayons ligneux, les canaux résinifères radiaux en section et les épaississements spiralés.

Le tableau 4 donne quelques critères de reconnaissance microscopique des résineux.

2.6 Le plan ligneux des feuillus

Les feuillus sont des végétaux plus évolués que les résineux. Le bois est plus complexe, les cellules plus spécialisées, les plans ligneux plus variés et l'identification des essences généralement plus facile. Les rôles de conduction de la sève et de soutien mécanique sont principalement assurés par des cellules différentes, respectivement les **vaisseaux** et les **fibres**.

■ Les vaisseaux et la notion de grain

Un vaisseau est formé d'un empilement d'éléments de vaisseau, un élément de vaisseau correspond à une cellule formée par une cellule fusiforme initiale. Les éléments de vaisseau sont des cellules mortes vides. Au niveau du contact entre deux éléments de vaisseau empilés, la paroi, appelée cloison terminale, est plus ou moins résorbée et forme une perforation qui est de type scalariforme chez les espèces primitives (la cloison subsiste sous forme de barres qui dessinent une sorte d'échelle) ou de type simple (ou unique) chez les espèces évoluées (la cloison est pratiquement complètement résorbée, elle reste visible sous forme d'un bourrelet périphérique). La sève brute circule à travers les perforations à l'intérieur des vaisseaux. Les parois latérales des vaisseaux portent des ponctuations pour permettre la communication avec les rayons ligneux (ponctuations de champ de croisement), avec les vaisseaux accolés (ponctuations intervaskulaires) ou avec le parenchyme longitudinal.

Chez certaines essences, le cambium forme des vaisseaux de taille et de concentration plus importantes au printemps. Ce sont les bois dits à **zone initiale poreuse** (chêne, châtaignier, orme, frêne, robinier, teck...). Les petits vaisseaux du bois d'été présentent généralement des dispositions particulières sur une coupe transversale (disposition en flammes chez le chêne, en Y chez le châtaignier, en vagues tangentielles chez l'orme, en petits îlots rares chez le frêne).

La majorité des feuillus sont dits **homogènes** car on ne distingue pas nettement le bois formé au printemps de celui formé en été (hêtre, platane, bouleau, peuplier, saule, buis, poirier, charme, aulne...).

Un groupe intermédiaire comprend le noyer (parce que le diamètre des vaisseaux varie à l'intérieur du cerne) et le merisier (parce que les vaisseaux sont nettement plus nombreux en début de cerne). Ce sont les feuillus à **zone semi-poreuse**.

Chez les feuillus homogènes et à zone semi-poreuse, le diamètre des vaisseaux permet de caractériser le grain. Ainsi, les feuillus ayant des vaisseaux d'un diamètre largement inférieur à 50 µm sont des bois à grain très fin (buis, olivier) alors qu'un bois comme le noyer, qui a des vaisseaux d'un diamètre pouvant aller de 50 à 300 µm, est considéré comme un bois à grain grossier.

Les vaisseaux peuvent être bouchés par des expansions membranaires appelées **thylles** qui sont formées par le parenchyme voisin, radial ou longitudinal, et qui pénètrent à travers les ponctuations. Les thylles sont produits plutôt dans les vaisseaux de gros diamètres, au moment de la duraminisation ou localement suite à une blessure ou une attaque de champignons. Ils rendent certains bois imperméables et accessoirement aptes à la fabrication des tonneaux (chênes sessile et pédonculé).

■ Les rayons ligneux

Chez les espèces feuillues, les rayons ligneux sont de dimensions variées. Le peuplier et le châtaignier, par exemple, possèdent des rayons ligneux de mêmes dimensions que ceux des résineux, à savoir des rayons unisériés et pratiquement imperceptibles à l'œil nu, alors que le chêne a des rayons larges de plus de 10 cellules et hauts de plusieurs centimètres. L'aspect macroscopique des rayons ligneux forme la **maillure**.

Certaines essences présentent ce que l'on appelle des **faux rayons** ou rayons agrégés ou encore rayons agglomérés. Cette par-

ticularité anatomique, que l'on trouve souvent chez le charme et l'aulne, correspond à des zones de concentration de rayons fins qui, à l'œil nu, apparaissent comme des rayons ligneux larges mais donnent cependant une maillure irrégulière assez facilement reconnaissable.

■ Les fibres et la relation entre la vitesse de croissance et la densité chez les feuillus

Les fibres sont des cellules allongées, aux parois généralement épaisses et aux ponctuations réduites. Elles sont issues des cellules initiales fusiformes. Ce sont des cellules mortes. Elles jouent nettement un rôle de soutien mécanique et permettent d'expliquer les différences de densité entre les bois tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif.

Les bois denses possèdent des fibres à section étroite et à parois épaisses alors que les bois moins denses ont des fibres à lumen plus large et à parois plus fines.

À l'intérieur d'une même espèce, c'est-à-dire à qualité de fibres relativement égale, le bois le plus dense sera celui qui contient proportionnellement le plus de tissu fibreux.

En ce qui concerne l'influence de la vitesse de croissance sur la densité, les feuillus à **zone initiale poreuse** ont un comportement opposé à celui des résineux car dans leur cas c'est la largeur du bois initial, poreux et léger, qui reste constante quelle soit la vitesse de croissance. Un chêne à croissance rapide (**cernes larges**) est donc plus dense qu'un chêne à croissance lente (**cernes étroits**). D'un point de vue commercial, le premier a une valeur marchande inférieure au second car un chêne dense est plus nerveux et plus difficile à travailler. Les plus belles qualités sont utilisées en ébénisterie, en tonnellerie et pour la fabrication de placages décoratifs.

Pour les bois feuillus homogènes, il n'existe pas de loi de comportement générale valable pour tous les bois. Le hêtre se comporte comme les résineux : les arbres à croissance lente donnent les bois les plus denses.

■ Le parenchyme longitudinal

Chez les feuillus, le parenchyme longitudinal peut parfois être vu à l'œil nu ou à la loupe à main. Il constitue un critère de reconnaissance macroscopique important pour les essences tropicales, chez lesquelles il peut être très abondant. Il est généralement constitué de cellules plus larges et à parois moins épaisses que les fibres, c'est pourquoi les zones parenchymateuses apparaissent plus claires que le tissu fibreux environnant. Sur les préparations microscopiques, au contraire, si les coupes n'ont pas été préalablement traitées à l'eau de Javel, les cellules de parenchyme conservent leur contenu cellulaire et apparaissent plus foncées que les vaisseaux et les fibres qui sont des cellules vides.

On distingue le parenchyme disposé de façon indépendante des vaisseaux (parenchyme apotrichéal) et le parenchyme associé aux vaisseaux (parenchyme parachéal). Sa description est faite à partir de l'observation d'une coupe transversale. Le parenchyme longitudinal apotrichéal peut être diffus, en chaînettes (= courtes lignes discontinues), en lignes ou en bandes tangentielles. Le parenchyme parachéal est dit « circumvasculaire » s'il entoure complètement le vaisseau, « en losange » s'il dessine un losange autour du vaisseau, « aliforme » s'il forme des expansions faisant penser à des ailes de part et d'autre du vaisseau, « aliforme confluent » (ou « anastomosé ») si les zones de parenchyme aliforme entourant les vaisseaux se rejoignent d'un vaisseau à l'autre.

Au microscope, les files de cellules de parenchyme se reconnaissent grâce à la présence de cloisons (ou septes) mais chez les espèces les plus évoluées, la cellule initiale cambiale peut donner naissance à une cellule courte de parenchyme longitudinal qui ne se cloisonne pas.

■ Les autres éléments anatomiques

D'autres éléments anatomiques peuvent se rencontrer chez certaines essences : trachéide irrégulière, fibre septée (élément intermédiaire entre fibre et parenchyme longitudinal), fibre ouverte (élément intermédiaire entre fibre et élément de vaisseau), fibre-trachéide (élément intermédiaire entre fibre et trachéide)...

Certains bois feuillus contiennent des canaux sécrétateurs, qui peuvent être résinifères ou à gommes, longitudinaux ou radiaux, normaux ou traumatiques.

Chez les fruitiers (arbres de la famille des Rosacées), l'aulne, ou le bouleau, il est fréquent d'observer des taches médullaires : ce sont des taches allongées dans la direction longitudinale, d'une largeur d'un à quelques millimètres (dans la direction tangentielle) et d'une longueur de plusieurs centimètres. Elles correspondent à des îlots de parenchyme cicatriciel, formé par le cambium en réponse au développement de larves mineuses sous l'écorce.

La figure 4 illustre le plan ligneux des feuillus.

■ Reconnaissance macroscopique des feuillus des zones tempérées

Le tableau 5 donne les principaux critères de reconnaissance macroscopique des feuillus à zone initiale poreuse. Tous ces bois présentent des densités voisines, de 0,650 à 0,800.

Le tableau 6 donne les principaux critères de reconnaissance macroscopique des feuillus homogènes et des feuillus à zone semi-poreuse.

■ Reconnaissance microscopique des feuillus des zones tempérées

La reconnaissance macroscopique des feuillus est relativement facile car chaque essence présente généralement des caractères propres bien marqués. Cependant, dans certains cas, une analyse

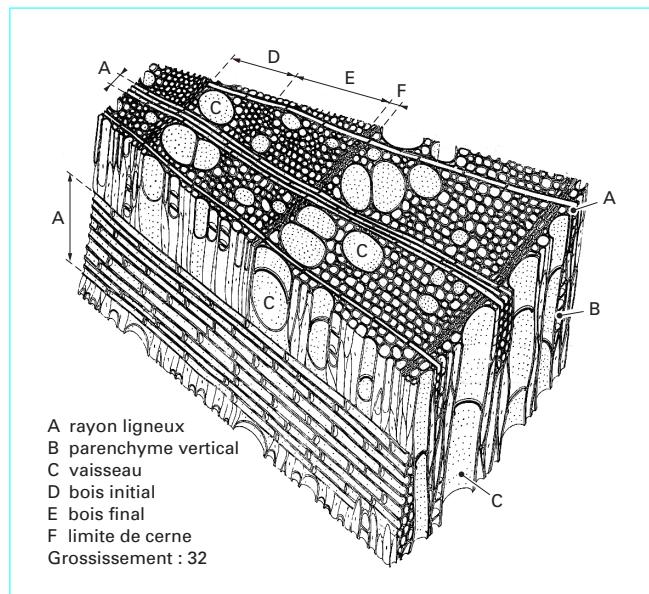


Figure 4 – Plan ligneux des feuillus (frêne : feuillu hétérogène)

au microscope doit compléter l'observation macroscopique. Le tableau 7 donne quelques critères microscopiques pouvant être utiles.

Tableau 5 – Critères de reconnaissance macroscopique des feuillus à zone initiale poreuse

Aubier	Couleur du bois parfait	Rayons ligneux	Disposition des vaisseaux du bois d'été	Particularités	Nom commercial
Différencié	Brun clair	Rayons larges et hauts + rayons unisériés	En flammes radiales	Thylles dans les gros vaisseaux Parenchyme longitudinal en lignes tangentielles	Chêne blanc
	Brun clair un peu rosé			Pas de thylles Parenchyme longitudinal en lignes tangentielles	Chêne rouge d'Amérique
	Brun-rouge	Rayons petits mais bien colorés donnant un aspect pointillé	En vagues tangentielles	Thylles parfois présents dans les gros vaisseaux	Orme
Différencié, très mince	Brun clair	Rayons unisériés, non visibles à l'œil nu	En lignes radiales à obliques (se terminent en « Y »)	Thylles dans les gros vaisseaux	Châtaignier
	Brun doré verdâtre	Rayons fins donnant une petite maillure foncée	En îlots ou en vagues tangentielles discontinues	Thylles très abondants présents dans tous les vaisseaux	Robinier
Non différencié	Blanc crème	Rayons fins, maillure peu apparente	En petits îlots rares ou en petites vagues tangentielles	Pas de thylles Parfois une coloration grisâtre du cœur (faux duramen)	Frêne

Tableau 6 – Critères de reconnaissance macroscopique des feuillus homogènes et à zone semi-poreuse

Aubier	Couleur du bois parfait	Rayons ligneux	Densité	Particularités	Nom commercial
Non différencié	Blanc crème parfois rosé	Larges, bien visibles	0,65 à 0,80	Rayons plus nombreux chez le platane	Hêtre Platane
	Blanc crème	Petits et bien colorés donnant un aspect pointillé	0,65 à 0,80	Limites de cernes foncées	Érable
	Blanc crème grisâtre	Présence de faux rayons	> 0,8	Limites de cernes ondulées Parenchyme longitudinal en lignes tangentielles	Charme
	Rose clair	Présence de faux rayons	0,35 à 0,5	Taches médullaires fréquentes	Aulne
	Blanc crème	Unisériés, non visibles	0,35 à 0,5	Aspect fibreux	Peuplier
Différencié	Jaune	Fins	> 0,8	Grain très fin	Buis
	Brun-rouge	Fins	0,65 à 0,8	Grain fin Taches médullaires fréquentes	Poirier
	Brun rougeâtre doré	Fins, nombreux, donnant une impression d'irrégularité sur la coupe transversale	0,5 à 0,8	Concentration de vaisseaux en début de cerne	Merisier
	Brun clair, veines noires	Peu visibles	0,5 à 0,8	Évolution de la taille des vaisseaux à l'intérieur du cerne Parenchyme longitudinal en lignes tangentielles	Noyer

Tableau 7 – Critères de reconnaissance microscopique des feuillus

Nom commercial	Largeur des rayons ligneux (nombre de cellules)	Type de perforations des vaisseaux	Épaissements spiralés dans les vaisseaux
Chêne	1 ou plus de 10	Simple	Non
Orme	De 4 à 10	Simple	Oui
Châtaignier	1	Simple	Non
Robinier	De 4 à 10	Simple	Oui
Frêne	De 1 à 10	Simple	Non
Hêtre	De 1 à plus de 10	Scalariforme ou simple	Non
Platane			
Érable	De 1 à 10	Simple	Oui
Charme	De 1 à 7	Simple	Oui
Aulne	1	Scalariforme	Non
Peuplier	1	Simple	Non
Buis	De 1 à 3	Scalariforme	Non
Poirier	De 1 à 4	Simple (parfois scalariforme)	Non
Merisier	De 1 à 5	Simple	Oui
Noyer	De 1 à 5	Simple	Non

2.7 Bois tropicaux

Avec plus de 10 000 espèces répertoriées et plus de 300 noms commerciaux courants, les bois tropicaux constituent un vaste domaine, qui ne pourra être traité ici.

La reconnaissance des bois tropicaux se fait surtout grâce à l'observation d'une coupe transversale. Dans la plupart des Atlas concernant les essences tropicales, figurent pour chaque bois une photo d'une coupe transversale grossie 10 à 20 fois [1]. La taille, la répartition, la quantité de vaisseaux, la taille des rayons ligneux et surtout la disposition du parenchyme longitudinal permettent souvent de reconnaître l'essence. La comparaison avec des échantillons de référence parfaitement identifiés est d'un grand secours. On se méfiera toujours de la couleur qui est un caractère variable d'un arbre à l'autre et en fonction du temps d'exposition à la lumière.

Certains bois tropicaux présentent une particularité propre aux espèces les plus évoluées : l'étagement. Il s'observe au microscope sur une face tangentielle : les éléments anatomiques (éléments de vaisseau, fibres, files de parenchyme longitudinal, rayons ligneux) sont de même taille et disposés en étage. Parfois, l'étagement est partiel et ne concerne qu'une partie des éléments. L'étagement est perceptible à l'œil nu : on a l'impression que le bois a été « dessiné » sur du papier millimétré. C'est le cas par exemple du bété, de l'angélique (basralocus), de l'ipé, du padouk d'Afrique, du wengé, de l'obéché, du movingui...

La reconnaissance microscopique des essences tropicales nécessite des ouvrages de référence [10] [6]. Des logiciels et des cédroms rassemblent des bases de données internationales [3] [13] [14].

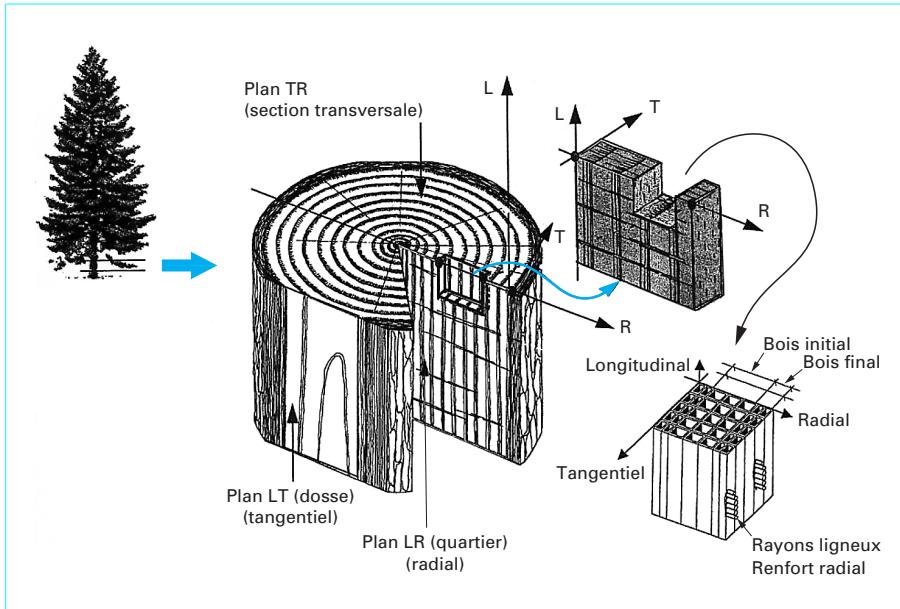


Figure 5 – De l'arbre aux caractéristiques d'anisotropie du bois

2.8 De l'anatomie aux propriétés physico-mécaniques du bois

L'ensemble des caractéristiques et propriétés physico-mécaniques du bois résulte de cette structure de matériau composite alvéolaire multicouche. Cette structure confère au matériau un caractère **anisotrope et hétérogène**.

De par son anatomie et sa structure particulière (accroissement de l'arbre en hauteur et augmentation annuelle du diamètre), le matériau présente trois directions privilégiées, distinctes et perpendiculaires entre elles. Dans ce repère ainsi choisi, l'orthotropie repose sur : la **direction longitudinale**, notée L dans le sens des fibres, la **direction radiale** notée R et correspondant à la direction de croissance en diamètre, enfin sur la **direction tangentielle** notée T et tangente aux cernes annuels. Dans ce repère, l'orthotropie génère trois plans de symétrie (LT, LR, TR). Le plan LT correspond à un débit dit « débit sur dosse », le plan LR à un « débit sur quartier », le plan TR correspondant à une utilisation dite en bois « de bout ». La figure 5 illustre le passage de l'arbre au matériau composite orthotrope qu'est le bois.

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

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

L'hétérogénéité repose, quant à elle, sur les caractéristiques définies préalablement : distinction entre bois initial et bois final dans le cerne, cernes de croissance d'épaisseurs variables, présence d'aubier et de duramen, direction des fibres pas toujours parallèle à l'axe du tronc ou à l'axe longitudinal de l'élément, présence des singularités, etc.

Le tableau 8 donne les propriétés mécaniques moyennes des feuillus et résineux mesurées sur petits échantillons sans défauts [8], il ne s'agit pas des valeurs utilisables en calcul de structure, ces valeurs techniques sont données dans le paragraphe 5.

Tableau 8 – Caractéristiques mécaniques du bois considéré comme orthotrope

Caractéristiques	Feuillus (densité moyenne = 0,65)	Résineux (densité moyenne = 0,45)
Modules d'élasticité (MPa)		
E_L Longitudinal	14 400	13 100
E_R Radial	1 810	1 000
E_T Tangentiel	1 030	636
E_L / E_R	8	13
E_L / E_T	14	21
E_R / E_T	1,8	1,6
Modules de cisaillement (MPa)		
G_{TL}	971	745
G_{LR}	1 260	861
G_{RT}	366	84
G_{LR} / G_{RT}	3,5	8,9
G_{TL} / G_{RT}	2,6	10,3
Coefficients de Poisson		
ν_{RT}	0,67	0,51
ν_{LT}	0,46	0,43
ν_{LR}	0,39	0,39
ν_{TR}	0,38	0,31
ν_{RL}	0,048	0,030
ν_{TL}	0,033	0,020

L'anisotropie transverse caractéristique des directions R et T est liée à la présence des rayons ligneux, éléments tubulaires qui viennent renforcer la structure du composite dans cette direction radiale. La structure tubulaire orientée du composite bois explique également la différence de comportement traction/compression

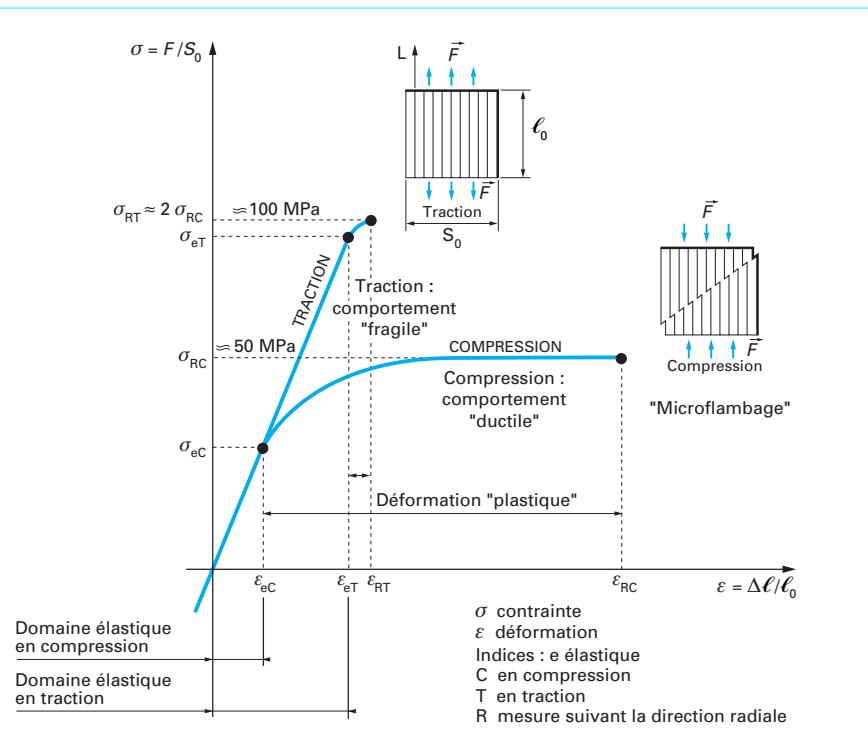


Figure 6 – Comportement du bois en traction/compression dans la direction longitudinale

pour une sollicitation dans la direction L. La figure 6 montre le caractère fragile du matériau en traction et son caractère ductile en compression. En compression les éléments tubulaires sont soumis à du microflambement expliquant les différences de résistance traction/compression.

3. Composition chimique

3.1 Les constituants chimiques du bois

Les composés structuraux du bois sont la **cellulose**, les **hémicelluloses** et la **lignine**. À ces trois constituants principaux viennent s'ajouter des substances mineures, extractibles de nature organique et cendres.

La cellulose

La cellulose est la molécule organique la plus abondante sur Terre. C'est un polymère linéaire d'unités de glucose cyclique de configuration β (le groupement hydroxyle fixé au premier atome de carbone, à l'endroit où le cycle se ferme, est situé au dessus du plan du cycle), reliées par des liaisons (1-4). L'amidon, qui est également un polymère de glucose, est constitué d'unités de glucose cyclique de configuration α . Si beaucoup d'êtres vivants possèdent les enzymes capables d'hydrolyser l'amidon (amylases), très peu synthétisent les enzymes nécessaires à la digestion de la cellulose (cellulases). C'est le cas de quelques champignons, quelques mollusques, quelques larves de coléoptères et des micro-organismes qui vivent dans la panse des ruminants ou des termites.

En réalité, le monomère de la cellulose est le cellobiose, d'une longueur de 1,03 nm, construit à partir de deux molécules de glu-

cose cyclique β , dont l'une est tournée de 180° par rapport à la première.

Dans le bois, le degré de polymérisation de la cellulose (poids moléculaire de la cellulose/poids moléculaire du glucose) est compris entre 5 000 et 10 000. Un degré de polymérisation de 10 000 correspond à une chaîne d'une longueur de 5 μm .

La formation de structures supramoléculaires est possible grâce aux groupements hydroxyles de la cellulose entre lesquels s'établissent des liaisons hydrogène intra- et intermoléculaires. Des liaisons hydrogène peuvent également s'établir entre les chaînes de cellulose et l'eau. Les chaînes moléculaires de la cellulose forment des faisceaux appelés microfibrilles. Les microfibrilles de cellulose présentent des zones cristallines et des zones amorphes. Le degré de cristallinité de la cellulose du bois est de l'ordre de 60 à 70 %.

Au niveau des zones amorphes, désordonnées, l'eau peut pénétrer, d'autant plus qu'elles sont étroitement associées aux hémicelluloses, dont la capacité d'absorption d'eau est encore plus importante que celle de la cellulose. L'adsorption d'eau écarte les chaînes de cellulose et produit le gonflement du bois. Un départ d'eau au contraire provoque le rapprochement des chaînes de cellulose et le retrait du bois.

Les bois contiennent 40 à 60 % de cellulose.

Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont, comme la cellulose, des polysaccharides (polymères de sucres). Ces deux constituants forment la fraction désignée sous le nom de holocellulose. Les hémicelluloses sont construites à partir de plusieurs unités différentes de sucres. Leurs chaînes sont plus courtes que celle de la cellulose et elles portent des ramifications. On distingue les pentosanes et les hexosanes.

Les pentosanes ont une chaîne principale constituée de sucres à 5 carbones (xylose) : ce sont surtout les xylanes.

Les hexosanes ont une chaîne principale constituée de sucres à 6 carbones (glucose, mannose) : ce sont surtout les glucomannanes.

Les feuillus contiennent environ 25 % de xylanes et 5 % de glucomannanes.

Les résineux contiennent environ 10 % de xylanes et 15 à 20 % de glucomannanes.

Les arabinogalactanes sont propres au mélèze (5 à 35 %).

D'autres polysaccharides mineurs peuvent être présents : ce sont les pectines (galacturonanes, galactanes, arabinanes) présentes à des concentrations inférieures à 1 %.

■ La lignine

La lignine est la deuxième molécule organique la plus abondante sur Terre après la cellulose. Elle rigidifie la paroi cellulaire et c'est grâce à elle que les records de taille du monde vivant sont atteints par des végétaux terrestres.

La lignine est un polymère tridimensionnel amorphe de nature phénolique. Elle diffère d'une essence à l'autre, notamment de par sa teneur en unités guaiacyles et syringyles.

Les feuillus contiennent environ 25 % de lignine et les résineux 30 %.

■ Les extractibles

Le terme d'extractibles recouvre de nombreux composés qui peuvent être extraits du bois par des solvants polaires ou apolaires. La teneur et la composition des extractibles varient fortement d'une essence à l'autre, les essences tropicales en contenant généralement plus que les bois issus des zones tempérées.

Les tannins sont des extractibles qui ont la propriété de réagir avec les protéines pour former des complexes insolubles, propriété mise à profit lors du tannage des peaux animales pour obtenir le cuir. On distingue les tannins hydrolysables ou galliques et les tannins condensés ou catéchiques. Les tannins ont une grande influence sur la qualité des vins et des eaux de vie élevés en tonneaux de chêne.

La résine contient les extractibles suivants : terpènes, lignanes, stilbènes, flavonoïdes et d'autres composés aromatiques. D'autres extractibles sont présents : lipides, cires, acides gras...

L'odeur, la couleur et la résistance aux agents de dégradation biologique sont en grande partie dépendantes des substances extractibles.

Sur le bois mis en œuvre sans finition, l'eau liquide peut former des taches sur certaines essences par lessivage des extractibles colorés.

■ Les composés minéraux

Les composés minéraux sont analysés dans les cendres après combustion totale du bois à 600-850 °C. La teneur des bois des zones tempérées est de 0,2 à 0,5 % et celle des bois tropicaux généralement plus élevée (3,4 % chez l'iroko). Les principaux composés minéraux sont le potassium, le calcium et le magnésium. Certains bois tropicaux contiennent de la silice.

3.2 Le comportement photochimique et thermoplastique

■ L'influence de la lumière solaire

La dégradation du bois sous rayonnement solaire en extérieur n'affecte que les parties superficielles du matériau exposé. C'est principalement la dégradation de la lignine qui conduit à un changement d'aspect qui se traduit par une évolution de l'état de surface et par une évolution de la couleur (en absence de traitement). Toutes essences confondues et en extérieur, l'exposition solaire et les effets climatiques font tendre le matériau vers une

couleur grise (du gris argenté au gris noir). **Les propriétés mécaniques du bois ne sont pas affectées par ce changement de couleur.**

La photodégradation est un phénomène normal spécifique des polymères, qu'ils soient artificiels ou naturels. Il faut distinguer deux cas : les bois en intérieur protégé, et les bois en extérieur du type bardage.

- **En intérieur**, l'effet de la lumière fait tendre tous les bois non protégés vers un jaunissement caractéristique. De manière générale, on retiendra que ce jaunissement est plus rapide sur les essences claires et en particulier chez les résineux.

- **En extérieur**, les mécanismes sont plus complexes. Les modifications photochimiques sont plus fortement promues par l'humidité que par la température, il s'agit d'un effet combiné de la photodégradation et de micro-organismes de type bleuissement du bois. Les produits du catabolisme de la lignine pourraient avoir une action fongicide et ainsi empêcher la croissance de ce bleuissement [12]. Le vieillissement peut être considéré comme un phénomène superficiel, les changements de couleur ayant été mesurés au maximum jusqu'à 2 mm de profondeur. Le tableau 9 rassemble les éléments liés au processus de vieillissement du bois en extérieur.

Les cinétiques de changement de couleur montrent que l'évolution de la couleur en extérieur a lieu principalement au cours des premiers mois pour tendre ensuite vers une stabilisation.

Tableau 9 – Processus de vieillissement du bois en extérieur

	Phénomène	Causes	Résultats
1	Désintégration de la lignine superficielle	<ul style="list-style-type: none"> — Rayonnement UV — Présence d'oxygène — Réaction photochimique 	Jaunissement puis brunissement de la surface (pour les essences claires) Brunissement pour les façades non exposées à la pluie
2	Délavage de la lignine désintégrée (pour les façades exposées)	<ul style="list-style-type: none"> — Pluie battante — Eau ruisselante 	Perte de la couleur originelle
	Lente désintégration photochimique de la cellulose	<ul style="list-style-type: none"> — Rayonnement UV 	Blanchiment du bois, la couleur blanchâtre de la cellulose apparaît
3	Érosion Apparition de fentes	<ul style="list-style-type: none"> — Réaction photochimique — Pluie battante — Eau ruisselante 	
	Apparition du bleuissement	<ul style="list-style-type: none"> Température et humidité optimales de 25° C et $H > 30\%$ pour le bleuissement (<i>Pullularia pullulans</i>) 	La surface devient grise bleuâtre à grise noire Les façades protégées deviennent brunes

■ Le comportement thermoplastique

Les hémicelluloses et la lignine sont les deux composés amorphes intervenant dans le ramollissement du bois par élévation de la température. La température de ramollissement diminue lorsque l'humidité du bois augmente. Ainsi la température de ramollissement de la lignine est de 195 °C à l'état sec et de 50 °C à partir de 20 % d'humidité du bois. La température de ramollissement des hémicelluloses chute encore plus nettement lorsque l'humidité

augmente. En dessous de 100 °C, le bois ne subit pas de modification irréversible de sa composition chimique. Cette propriété est mise en pratique lors du cintrage. Un traitement à la chaleur humide permet de ramollir la lignine et les hémicelluloses. Les microfibrilles de cellulose, sous l'action d'une contrainte mécanique, peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres. En refroidissant et en séchant, la lignine et les hémicelluloses reviennent à leur état initial, « recimentent » les microfibrilles de cellulose et figent le bois dans sa nouvelle forme.

3.3 Compatibilité chimique

Le pH

Le pH du bois est généralement mesuré à partir de son extrait aqueux. Les bois ont un pH plus ou moins acide donné dans le tableau 10 pour quelques essences.

Tableau 10 – pH des essences résineuses et feuillues

pH de résineux		pH de feuillues	
Sapin	5 à 6	Chêne	3,3 à 4
Épicéa	4,5 à 5	Châtaignier	3,6
Mélèze	4	Robinier	5,3
Pin sylvestre	4 à 4,5	Orme	6 à 7,2
Western Red Cedar	2,9 à 4	Peuplier	5,8

Les phénomènes de corrosion vis-à-vis des métaux (pointes, vis, quincailleries) se manifestent surtout pour les bois aux pH inférieurs à 4,4. Les feuillus à réaction acide sont souvent riches en tannins comme le duramen de chêne qui réagit avec le fer pour former des taches bleu-noir. Le tableau 11 donne les compatibilités et incompatibilités chimiques courantes.

4. Paramètres pertinents à prendre en compte dans l'utilisation du bois

4.1 Densité

La densité d'un bois est un paramètre très important. La plupart des propriétés mécaniques et technologiques en dépendent

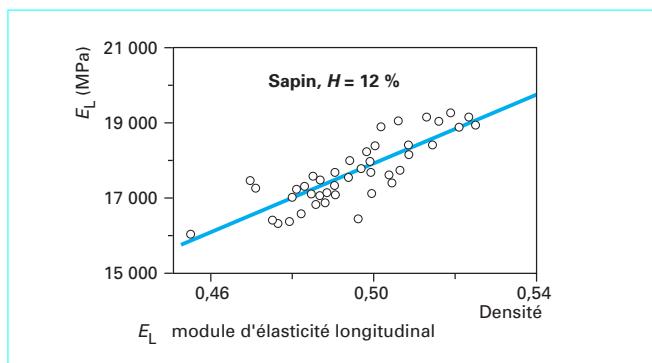


Figure 7 – Effet de la densité sur les propriétés mécaniques à l'intérieur d'une même essence

directement. Sa facilité de mesure ou d'estimation en fait donc un critère qualitatif de choix. La densité du bois représente une grandeur particulière dans la mesure où le matériau est poreux, hétérogène et hygroscopique. La densité vraie de la matière ligneuse dépend assez peu de l'essence considérée. Elle est toujours voisine de 1,53. Le rapport de la densité apparente à la densité vraie mesure la porosité du bois. Sauf à l'état anhydre, le bois contient toujours de l'eau (eau libre et eau liée). Cette présence d'eau a une influence directe sur la masse de l'échantillon mais également sur ses dimensions (phénomènes de retrait et de gonflement). La densité d'un bois sera toujours précisée pour un degré d'humidité donné :

$$d_H = M_H / V_H$$

M_H et V_H étant la masse et le volume de l'échantillon à l'humidité H (voir § 4.2). De manière générale on se réfère à la densité apparente à 12 % d'humidité.

De plus, le bois présente dans la direction radiale une très grande hétérogénéité de densité due à l'alternance bois initial - bois final à l'intérieur du cerne annuel. Sauf indication contraire, la densité du bois est comprise au sens de la densité moyenne donnée pour une humidité de référence.

Chez les résineux, l'accroissement de la largeur de cerne, à âge égal, se traduit par une diminution de densité. Chez les feuillus à zone initiale poreuse (cas du chêne), l'augmentation de largeur de cerne à âge égal se traduit par une augmentation de densité (cf. § 2).

La densité du bois est donc très variable selon les espèces : de 0,1 à plus de 1, et à l'intérieur d'une même essence.

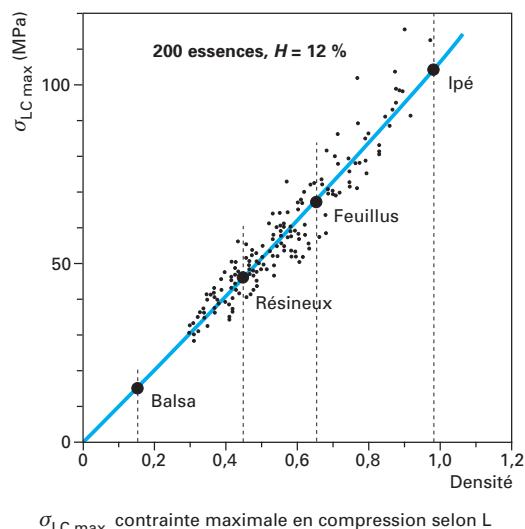
Les figures 7 et 8 illustrent cette variabilité et l'effet densité sur quelques propriétés mécaniques.

Tableau 11 – Compatibilités chimiques des matériaux en contact

Type de bois	Zinc	Cuivre	Aluminium	Plomb	Acier inox	Acier galvanisé	Acier
Bois traités avec des produits organiques en solvant pétrolier ou hydrodispersables (classes de risque 1, 2, 3)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Bois traités avec des sels métalliques hydrosolubles (classes de risque 3, 4)	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Réserve	Réserve
Chêne, châtaignier	Non		Non	Non	Non	Non	Oui
Western Red Cedar			Non				

Tableau 12 – Effet densité sur la dureté de surface des bois

Classes de densité et de dureté	Densité	Dureté (échelle Chalais-Meudon)	Essences
Bois très lourds et très durs	> 0,85	> 9	Azobé, ipé
Bois lourds et durs	0,70 à 0,85	5 à 9	Charme, movingui, chêne dur
Bois mi-lourds et mi-durs	0,56 à 0,70	2,5 à 5	Niangon, iroko, châtaignier, chêne tendre, pins
Bois légers et tendres	0,45 à 0,55	1,25 à 2,5	Framiré, douglas, épicea, sapin, pins
Bois très légers et très tendres	< 0,45	< 1,25	Western Red Cedar, séquoia, peuplier

**Figure 8 – Effet de la densité sur les propriétés mécaniques sur l'ensemble des essences**

De manière générale toutes les propriétés mécaniques du bois sont bien corrélées avec la densité. Le tableau 12 illustre ces résultats sur les caractéristiques de dureté de surface des bois. L'échelle de dureté est exprimée selon la norme NF B 51-013. La dureté représente le principal critère technique de sélection d'une essence pour une utilisation en revêtement de sol par exemple.

À la démarche traditionnelle qui consiste à relever dans la bibliographie de manière aléatoire les propriétés mécaniques de telle ou telle essence, il est préférable d'estimer les propriétés mécaniques de base à partir des correctifs en densité. Les modèles prévisionnels reportés dans le tableau 13 constituent des données statistiquement réalisables [8].

4.2 Interaction eau/bois

L'eau, élément indispensable à la croissance des végétaux, est très présente dans le bois. Quand l'arbre meurt ou est abattu pour être transformé en bois d'œuvre, le matériau retient une certaine quantité d'eau en équilibre avec les conditions de température et

d'humidité du milieu ambiant. La quantité d'eau présente dans l'arbre varie également avec l'essence, la zone considérée (aubier ou duramen), la zone de bois initial ou de bois final dans le cerne.

Tableau 13 – Effet densité sur les propriétés mécaniques des bois

Module	Valeur des modules (MPa) en fonction de la densité d	
	Feuillus à $H = 12 \%$ $0,1 < d < 1,2$ (1)	Résineux à $H = 12 \%$ $0,3 < d < 0,6$ (1)
E_L	$= 14\ 400 (d / 0,65)^{1,03}$	$= 13\ 100 + 41\ 700 (d - 0,45)$
E_R	$= 1\ 810 (d / 0,65)^{1,3}$	$= 1\ 000 + 2\ 370 (d - 0,45)$
E_T	$= 1\ 030 (d / 0,65)^{1,74}$	$= 636 + 1\ 910 (d - 0,45)$
G_{TL}	$= 971 (d / 0,65)^{1,26}$	$= 745 + 989 (d - 0,45)$
G_{LR}	$= 1\ 260 (d / 0,65)^{1,14}$	$= 861 + 2\ 080 (d - 0,45)$
G_{RT}	$= 366 (d / 0,65)^{1,74}$	$= 83,6 + 228 (d - 0,45)$

(1) Plage de validité des modèles.

Tableau 14 – Comparaison des caractéristiques admissibles (états limites)

	Acier S355	Béton B30	Bois lamellé collé GL28
Propriétés de résistance (MPa)			
Flexion	270	18	12,3
Traction axiale	270	2,4	8,6
Traction perpendiculaire	270	2,4	0,2
Compression axiale	270	18	12,3
Compression perpendiculaire	270	18	2,4
Cisaillement	213	1,8	1,3
Propriétés de rigidité (MPa)			
Module axial moyen	210 000	11 500	12 600
Module transversal moyen	210 000	11 500	1 020
Module de cisaillement moyen	8 100	4 800	790

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

La comparaison des propriétés mécaniques du bois avec celles d'autres matériaux de construction sur la seule base du module d'élasticité ou de la contrainte de rupture, par exemple, aboutit à des conclusions sans appel. Le tableau 14 présente cette comparaison sur les trois matériaux de base de la construction. Sur ces critères classiques et en dehors de tout contexte, le bois présente des niveaux de performance faibles.

Cette comparaison est seulement réaliste à partir du contexte d'utilisation et en intégrant en particulier la densité et l'usage ou la fonction.

À titre d'exemple, nous traiterons ici des **poteaux porteurs**, configuration courante de mise en œuvre des matériaux dans la construction. Le concepteur s'attache à rechercher le matériau le plus léger possible (facilité de mise en œuvre), résistant en compression et ne présentant pas de risque de flambement. La charge limite F , susceptible de provoquer le flambement est donnée par l'expression d'Euler :

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

avec E module d'élasticité du matériau,
 I inertie de la section droite,
 L hauteur du poteau chargé,
 k constante qui dépend des conditions de liaison du poteau au sol.

Pour une géométrie de section droite du poteau donnée, à partir de la densité d (ou masse volumique ρ) du matériau, la masse du poteau prend la forme :

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

Cette expression revient à rechercher pour m minimal, un rapport en d/\sqrt{E} qui soit minimal ou un rapport inverse en \sqrt{E}/d qui soit maximal. Ce rapport représente alors le critère de qualité pour un matériau mis en œuvre sous forme de poteau, colonne ou pilier. Le tableau 15 donne les valeurs obtenues pour quelques matériaux de construction [7].

Dans d'autres configurations du type « **panneaux** », le flambement ne peut se produire que perpendiculairement au plan du panneau, une même démarche conduit à la recherche d'un critère de qualité qui s'exprime dans ce contexte en $\sqrt[3]{E}/d$. Dans ces deux configurations, les résultats obtenus avec les résineux sont nettement supérieurs par rapport à ce qui se fait de plus classique, l'acier, le béton, l'aluminium mais également en comparaison avec les matériaux composites artificiels (fibres de verre, fibres de Kevlar...) (tableau 15). Ces chiffres traduisent alors correctement le niveau de performance du matériau bois. La religion du progrès qui veut que les matériaux les plus nouveaux, les plus artificiels soient forcément les meilleurs a occulté cette réalité mécanique.

Par ailleurs, on comprend à travers ces chiffres pourquoi le bois issu des arbres les plus hauts du monde (à l'exemple des séquoias de Californie dont la hauteur peut être supérieure à 100 m) est en général à densité faible.

Dans la majorité des usages constructifs ce sont donc les différentes formes des ratios propriétés / densité liées aux configurations de mise en œuvre qui doivent être prises en compte.

Tableau 15 – Critères de performance des matériaux

Matériaux	Module d'élasticité E (MPa)	Densité d	Critère de qualité pour une colonne \sqrt{E}/d	Critère de qualité pour un panneau $\sqrt[3]{E}/d$
Acier	210 000	7,8	58	7
Aluminium	75 000	2,6	105	16
Béton	11 500	2,6	41	9
Matériau composite artificiel	75 000	1,5	182	28
Résineux	10 000	0,4	250	54
Feuillus	13 000	0,7	162	33

Le bois est un matériau hygroscopique : il peut fixer ou libérer des molécules d'eau gazeuse en fonction du degré d'hygrométrie de l'air dans lequel il se trouve. La fixation de l'eau se fait sur les groupements chimiques hydroxyles (composés d'un atome d'hydrogène et d'un atome d'oxygène) qui ont une grande affinité pour l'eau avec laquelle ils établissent des liaisons faibles : les liaisons

hydrogène. La cellulose et les hémicelluloses comportent de nombreux groupements hydroxyles et ont donc de bonnes capacités d'adsorption. Des liaisons hydrogène existent aussi entre les différentes molécules, cellulose et hémicelluloses. Lorsque l'eau vient se fixer sur les chaînes de cellulose, celles-ci sont éloignées les unes des autres. C'est ce qui produit le gonflement du bois, observé lorsque l'humidité de l'air augmente. L'adsorption d'eau augmente la largeur des microfibrilles mais pas leur longueur. Dans la couche S2 de la paroi secondaire (cf. figure 2), les microfibrilles de cellulose sont presque parallèles à l'axe de la cellule, qui correspond à la direction longitudinale sur une pièce de bois (sens du « fil » du bois). Le mouvement des microfibrilles de cellulose de la couche S2 va surtout avoir lieu perpendiculairement à cette direction longitudinale. Comme la couche S2 est la plus épaisse, c'est elle qui impose son mouvement à l'ensemble : on observe effectivement que le bois subit des variations dimensionnelles très faibles, voire négligeables, dans la direction longitudinale.

Par convention et pour une plus grande facilité de mesure, la quantité d'eau présente dans le bois est exprimée comme un pourcentage de la masse anhydre (après séchage à 103 °C jusqu'à obtention d'une masse constante). Elle s'exprime par la formule suivante :

$$H(\%) = \frac{M_H - M_0}{M_0} \times 100$$

avec M_H masse (ou poids) à l'humidité H ,
 M_0 masse anhydre,
 $H(\%)$ taux d'humidité du bois.

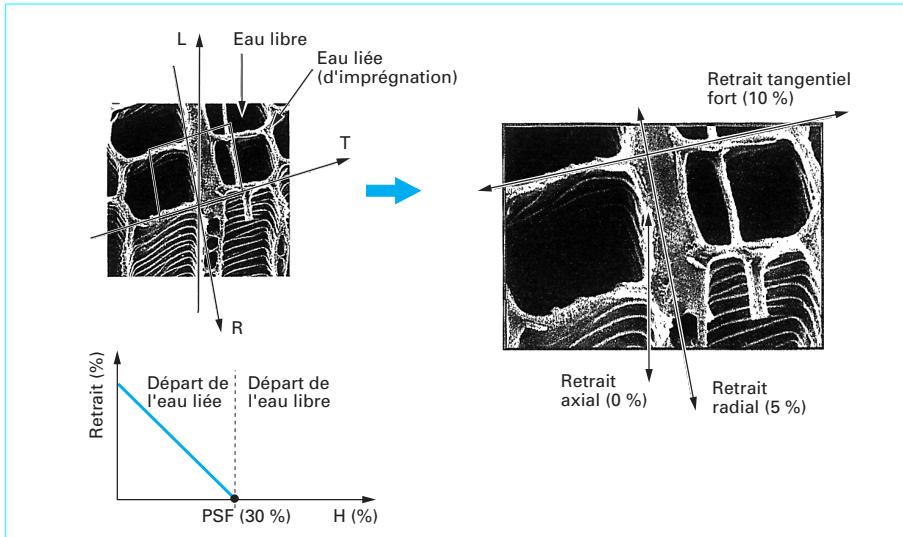


Figure 9 – Interaction eau-bois

Cette détermination dite par « double pesée » est la seule permettant d'obtenir une précision suffisante à des fins techniques ou scientifiques. La plupart des hygromètres mesurent la résistivité du bois avec une précision de 2 % dans une plage d'humidité comprise entre 7 et 30 %. Les mesures ne sont plus fiables au-delà.

Au moment de l'abattage, le taux d'humidité du bois peut varier entre 40 et plus de 200 % (dans certains peupliers par exemple).

L'eau dans le bois est présente sous deux formes : l'eau « **libre** » retenue dans les vides, lumens des fibres, trachéides et vaisseaux, et l'eau « **liée** » présente dans les parois cellulaires. Pour évaporer l'eau libre, il suffit de fournir la chaleur latente d'évaporation normale. Pour évaporer l'eau liée, il faut fournir une énergie additionnelle ou énergie de sorption pour rompre les liaisons avec les constituants chimiques du bois.

Lorsque le bois ne contient plus que de l'eau liée, il a atteint « le point de saturation des fibres » (les parois cellulaires sont saturées en eau, toute l'eau libre est évaporée). Ce point de saturation des fibres est de l'ordre de 30 % pour pratiquement toutes les essences. Il est particulièrement important car les variations dimensionnelles se manifestent uniquement en dessous de cette valeur et l'ensemble des propriétés mécaniques évoluent de 0 à 30 % pour rester stables au-delà.

■ Retrait et gonflement

Le retrait et le gonflement sont directement proportionnels à la diminution ou à l'augmentation du taux d'humidité du bois dans la plage 0 à 30 %. L'amplitude des variations dimensionnelles observées dépend :

- de la direction d'anisotropie (L, T ou R) ;
- de l'essence ;
- du nombre de points d'humidité perdus ou repris dans la plage 0 à 30 %.

Chaque essence est caractérisée par trois coefficients de rétractabilité qui expriment les variations dimensionnelles d'une pièce de bois pour une variation d'humidité de 1 %, selon chacune des trois directions :

- le retrait axial ;
- le retrait radial (débit sur quartier) ;
- le retrait tangential (débit sur dosse).

Le retrait est très fortement anisotrope. Le retrait axial est faible, il est en général négligé. C'est dans le sens tangentiel que le retrait est le plus important, il est environ 1,5 à 2 fois plus élevé que le retrait radial. L'anatomie du bois et la présence des rayons ligneux

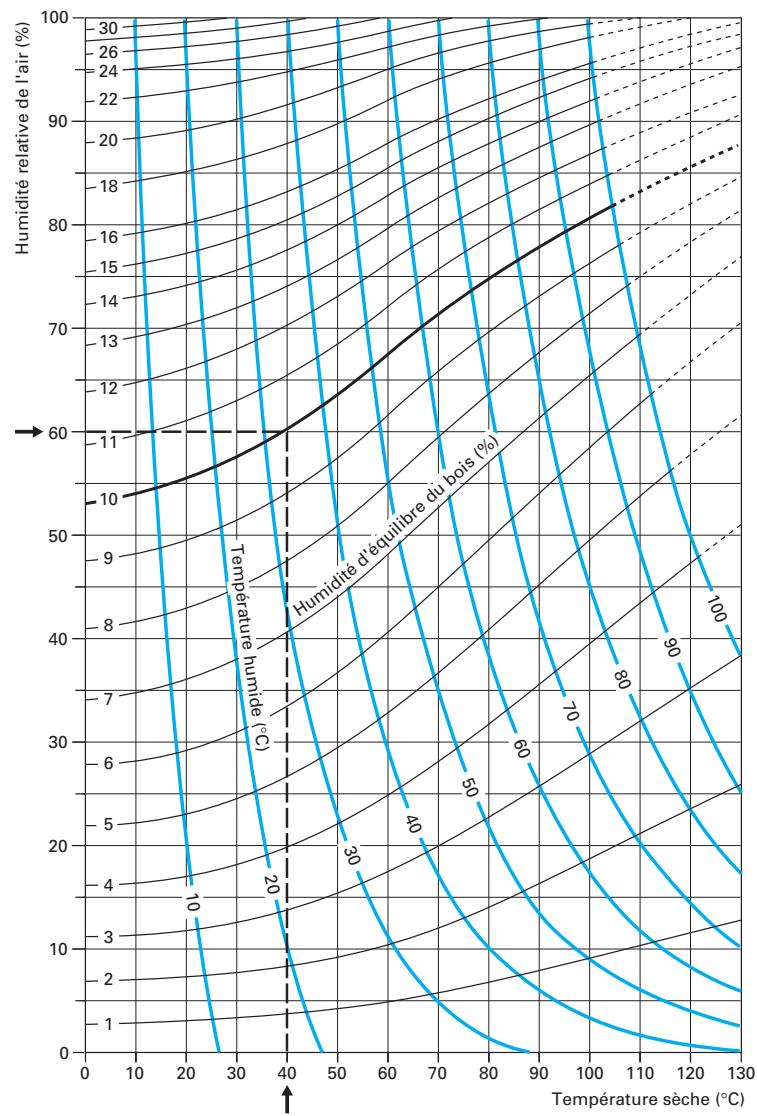
venant bloquer le déplacement selon R expliquent cette différence. La figure 9 illustre l'interaction eau-bois et l'anisotropie de retrait.

Le tableau 16 rassemble les valeurs de retrait mesurées sur quelques essences courantes.

Pour quelques rares essences, le retrait radial et le retrait tangentiel sont presque identiques : ces essences seront moins sensibles aux fentes de séchage directement liées au retrait différentiel. De la même manière, une finition extérieure sera plus sollicitée sur un support en bois à fort retrait débité sur dosse (retrait tangentiel), que sur un élément en bois à retrait faible ou moyen débité sur quartier (retrait radial).

Tableau 16 – Valeurs de quelques essences

Essences	Retrait tangentiel total (%)	Retrait radial total (%)	Retrait volumique total (%)
Retrait fort			
Chêne	10	5	15
Hêtre	12	6	18
Azobé	11	8	19
Merisier	10	5	15
Retrait moyen			
Sapin	8	4	12
Épicéa	9	4	13
Mélèze	9	5	14
Peuplier	9	5	14
Retrait faible			
Sipo	6	5	11
Iroko	6	4	10
Noyer	7	5	12
Doussié	5	3	8

**Exemple :**

Température sèche de l'air = 40 °C, humidité relative de l'air = 60 %, d'où l'humidité d'équilibre du bois = 10 %

Figure 10 – Courbes d'équilibre hygroscopique des bois

■ Équilibre hygroscopique

En fonction de la température et surtout de l'humidité de l'air ambiant, le bois se stabilise à une humidité d'équilibre, dite équilibre hygroscopique, qui est indépendante de l'essence.

Sous les climats tempérés (France) pendant la période la plus sèche, les conditions atmosphériques sont de l'ordre de 20 °C et 70 % d'humidité relative de l'air (HR), ce qui correspond à un équilibre hygroscopique du bois d'environ 13 %.

Pendant la période la plus humide, les conditions atmosphériques sont en moyenne de 0 à 5 °C et 85 % HR, ce qui correspond à un équilibre hygroscopique du bois de l'ordre de 19 %.

Ainsi, un ouvrage en bois situé à l'extérieur (fenêtres, volets, bardages) verra son humidité tendre vers 13 % en été, et vers 19 % en hiver. Pour que les variations dimensionnelles du bois soient mini-

males, il faut que son humidité de mise en œuvre se situe au milieu de la fourchette de variation, soit 15 à 16 %. En finition extérieure, il faudra par ailleurs tenir compte des phénomènes de point de rosée qui peuvent modifier considérablement l'humidité de la surface du bois.

De même, un bois situé à l'intérieur d'une maison chauffée verra son humidité varier selon les saisons. En été, les conditions de température et d'humidité relative de l'air sont voisines des conditions extérieures : l'équilibre hygroscopique du bois est de l'ordre de 12 à 13 %. En revanche, en hiver, la température est de 20 °C et l'humidité relative de l'air est voisine de 30 % : l'humidité d'équilibre se situera autour de 7 %. L'humidité moyenne des bois lors de la fabrication des ouvrages intérieurs (parquets, lambris, portes) doit donc être voisine de 10 %. Les courbes d'équilibre hygroscopique des bois (figure 10) permettent de déterminer

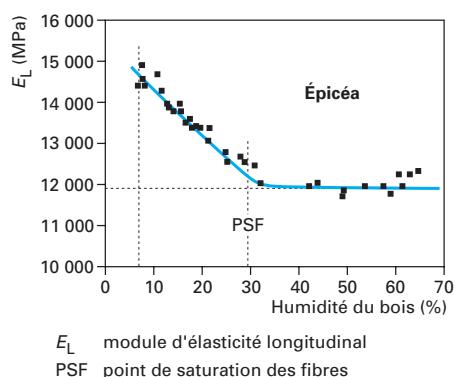


Figure 11 – Influence du taux d'humidité du bois sur son module d'élasticité longitudinal

l'humidité vers laquelle tend le bois placé dans des conditions de température et d'humidité relative de l'air données. Les cinétiques de stabilisation reposent principalement sur l'importance des sections de bois mises en œuvre.

Taux d'humidité et propriétés mécaniques

Le caractère hygroscopique du bois et la variation du taux d'humidité affectent pratiquement toutes les propriétés physico-mécaniques du matériau, mais de manière non homogène. Les valeurs de référence actuelles sont données pour le bois à un taux d'humidité de 12 %. À titre d'exemple, la figure 11 montre l'évolution du module d'élasticité du bois en fonction du taux d'humidité. Il est à noter qu'au-delà du point de saturation des fibres (30 %), l'ensemble des propriétés physico-mécaniques restent constantes.

Cette baisse des propriétés mécaniques est liée à la nature des composants polymériques du bois présents dans les parois cellulaires. La lignine, la cellulose et les hémicelluloses, constituants du composite bois, voient leurs températures de transition vitreuse baisser avec l'augmentation du taux d'humidité. Un taux d'humidité de 20 % est susceptible d'abaisser la température de transition vitreuse des hémicelluloses jusqu'aux températures ambiantes en provoquant ainsi la diminution des propriétés mécaniques (cf. § 3).

Sur le plan pratique, pour des fluctuations dans une plage de taux d'humidité comprise entre 6 et 20 %, on peut adopter les correctifs donnés dans le tableau 17 [8].

Tableau 17 – Correctifs des modules d'élasticité en fonction de l'humidité

$E_L^H = E_L^{12} \left[1 - 0,015(H - 12) \right]$	$G_{RT}^H = G_{RT}^{12} \left[1 - 0,030(H - 12) \right]$
$E_R^H = E_R^{12} \left[1 - 0,030(H - 12) \right]$	$G_{TL}^H = G_{TL}^{12} \left[1 - 0,030(H - 12) \right]$
$E_T^H = E_T^{12} \left[1 - 0,030(H - 12) \right]$	$G_{LR}^H = G_{LR}^{12} \left[1 - 0,030(H - 12) \right]$

Séchage

Afin d'éviter que le bois ne subisse des retraits après mise en œuvre (figure 12), ce qui pourrait entraîner des désordres notamment dans les assemblages, il est indispensable de le sécher avant tout usinage et utilisation en construction et de mettre le bois en œuvre au plus près de ce qui sera son humidité d'équilibre.

Ce séchage peut être réalisé naturellement en stockant le bois sous abri, en piles ventilées, avec litelage entre chaque rangée de planches. Cette méthode a l'inconvénient d'immobiliser les stocks de bois pendant plusieurs mois. Elle ne permet pas d'atteindre les taux d'hygrométrie exigés pour certaines applications : parquets, lamellé-collé, etc.

Le séchage artificiel pallie les inconvénients du séchage naturel. Le séchage est conduit de façon que l'eau enlevée par évaporation en surface soit remplacée au fur et à mesure par celle provenant de l'intérieur des pièces de bois pour en diminuer les déformations.

Si l'évaporation est trop rapide, il se produit un glaçage de la surface, la **cémentation**, qui empêche la migration de l'eau vers l'extérieur.

Un écart trop important d'humidité entre les parties extérieure et intérieure d'une même pièce provoque, par suite du retrait différentiel, des contraintes internes et superficielles rendant le bois totalement ou partiellement inutilisable.

On devra donc veiller en permanence à ne pas trop augmenter la vitesse d'évaporation. Pour certaines essences, un retrait anormal, provenant de l'application d'une trop forte température, peut entraîner un effondrement localisé des cellules du bois (collapse).

La conduite du séchage dépend notamment de l'essence du bois, de sa qualité, de son humidité initiale, de l'épaisseur des pièces... À titre indicatif, pour amener de 50 à 12 % des sciages avivés de 27 mm d'épaisseur, il faut environ 20 jours pour du chêne et seulement 3 jours pour du sapin. Les qualifications commerciales normalisées des bois en fonction du taux d'humidité sont données dans le tableau 18.

Tableau 18 – Qualifications normalisées des bois en fonction du taux d'humidité (NF B51-002)

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

4.3 Température

Le bois est tout à la fois un matériau combustible, mauvais conducteur thermique, à faible dilatation thermique et au comportement mécanique hautement sécurisant en cas d'incendie dans les constructions.

Basses températures

Contrairement à la plupart des matériaux de construction, le bois présente la particularité de voir ses propriétés mécaniques augmenter et de ne pas tendre vers un comportement fragile aux très basses températures. La contrainte de rupture en compression augmente de plus de 100 % entre 0 et -180 °C. Là encore les interactions eau-bois sont prépondérantes et conduisent à l'élaboration d'un composite complexe bois-glace.

Températures ambiantes

Les avantages liés à l'utilisation du bois dans la construction reposent en grande partie sur les propriétés thermiques du matériau dans une plage de température normale de -25 à +60 °C ;

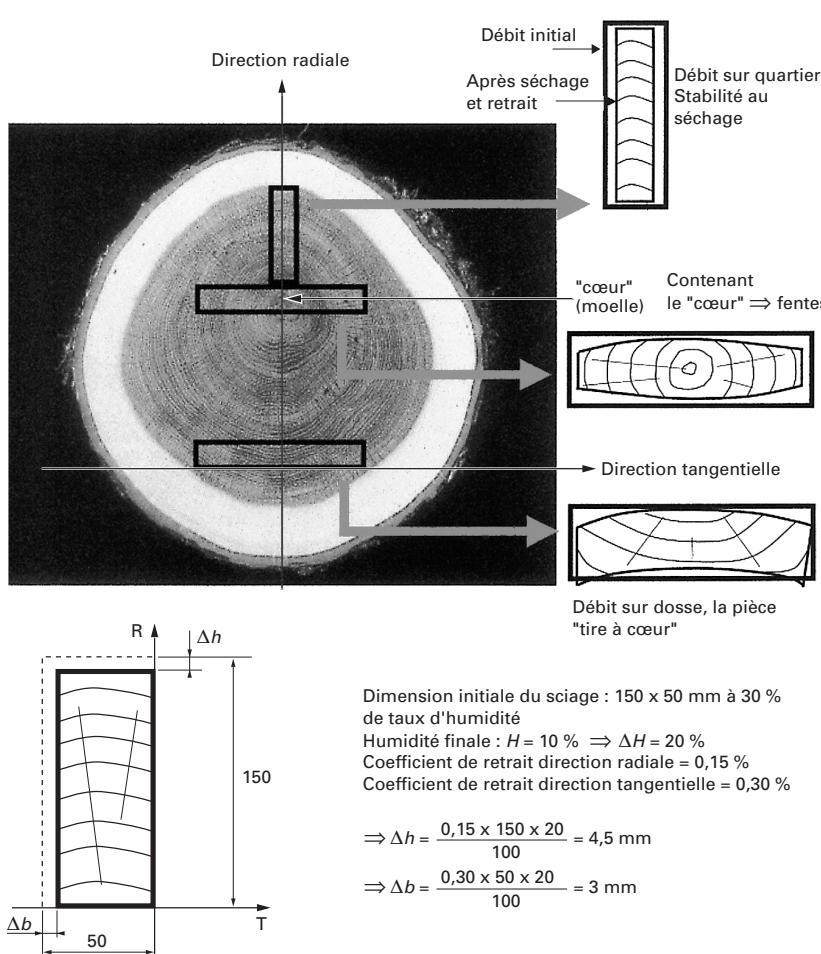


Figure 12 – Retrait et déformation du bois au cours du séchage

● Coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique linéique α_t caractérise l'augmentation relative de longueur d'un élément pour un échauffement de 1 °C. Dans le cas du bois, les déformations contraires à la dilatation sont particulièrement prononcées. Dans les conditions normales de température, le bois accuse un retrait sous l'action de la chaleur ; cependant la dilatation thermique reste dans tous les cas plus faible que le rétrécissement dû à la perte d'humidité. Cette faible dilatation thermique est très utile par exemple en cas d'incendie, les points d'appuis restant efficaces. La dilatation thermique du bois dans les ouvrages ne joue donc aucun rôle et n'est prise en considération que dans des cas exceptionnels. Le tableau 19 rassemble les valeurs de coefficients de dilatation thermique de quelques matériaux ce qui permet une comparaison avec le bois.

● Conductivité thermique

Compte tenu de son anatomie, la conductivité thermique du bois dépend directement de sa densité, du taux d'humidité et de la direction considérée, soit parallèlement aux fibres (direction L), soit perpendiculairement à celles-ci (directions R et T). Même en tenant compte du taux d'humidité possible à la construction, les valeurs de conductivité thermique du bois et de ses dérivés sont largement inférieures à celles de la plupart des matériaux de construction utilisés en structure. En l'absence de données sur les conductivités

thermiques d'essences particulières (cf. tableau 19), on pourra appliquer le correctif suivant, fonction de la densité à 12 % (taux d'humidité) et concernant les directions transverses :

$$\lambda = 0,62 d - 0,15$$

avec λ en $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,
 d densité à $H = 12\%$.

■ Hautes températures

La relation entre le bois et le feu est en général mal perçue. L'idée préconçue suivante est profondément ancrée dans les mœurs : le bois est un combustible utilisé pour se chauffer, et les incendies, notamment ceux de forêts, sont des déchaînements formidables et incontrôlés de la nature.

Aussi les matériaux à base de bois sont-ils difficiles à situer dans la réglementation incendie et alimentent continuellement ce sujet de recherche, qui reste paradoxalement très limité.

Le bois soumis à la chaleur dégage des gaz combustibles qui combinés à l'air brûlent à la surface du bois. La couche superficielle extérieure se transforme en charbon de bois riche en carbone. Les cendres résiduelles représentent de 0,5 à 2 % du volume de bois sec, elles contiennent principalement des oxydes de calcium, potassium, silicium (silice), phosphore et magnésium.

Tableau 19 – Coefficient de dilatation thermique et conductivité thermique

Matériaux	Coefficient de dilatation thermique α_t [μm/(m · °C)]	Conductivité thermique λ [W/(m · °C)]	
Béton armé	12	1,5	
Acier	12	50	
Aluminium	24	175	
Laine minérale		0,035	
Bois		$H = 12\%$	$H = 35\%$
Chêne (d = 0,65)			
Direction L.....	3 à 6	0,3	0,34
Directions R et T	–	0,2	0,16
Épicéa (d = 0,45)			
Direction L.....	3 à 6	0,2	0,25
Directions R et T	–	0,13	0,12
Panneaux de fibres de bois isolant		0,045	

● Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique du bois se détermine selon la norme relative à la caractérisation des combustibles solides. Il dépend principalement de l'essence (densité et composés chimiques) et il est directement lié, toutes essences confondues, au taux d'humidité (tableau 20).

● Réaction au feu

La réaction au feu caractérise la facilité d'inflammation et la rapidité de propagation de la flamme. Les mesures concernant les matériaux rigides (bois) sont faites à partir de l'essai par rayonnement (norme NF P 92-501). À partir des indices mesurés sur cet essai, les matériaux sont classés en cinq catégories, le tableau 21 liste le bois dans cette classification.

En jouant sur l'épaisseur et la nature des matériaux dans des configurations sous forme de multicouches, il est possible, sans traitement d'ignifugation, d'obtenir pour le bois la classification M2, voire M1, seuls les essais permettant de garantir ces classifications.

Tableau 20 – Pouvoir calorifique du bois

Pour les bois anhydres		
Pouvoir calorifique supérieur feuillus	(kJ/kg)	18 000 à 20 000
Pouvoir calorifique supérieur résineux	(kJ/kg)	19 000 à 21 000
Pouvoir calorifique inférieur feuillus	(kJ/kg)	16 700 à 18 700
Pouvoir calorifique inférieur résineux	(kJ/kg)	17 700 à 19 700
Pour les bois humides		
Correction du PCI en fonction du taux d'humidité H(%)		$\text{PCI}_H = \text{PCI}_0 \% [100/(100 + H)] - 2 250[H/(100 + H)]$

● Résistance du bois au feu

La résistance au feu définit le temps pendant lequel les éléments de construction peuvent jouer le rôle qui leur est dévolu (résistance mécanique, résistance thermique ou les deux cumulées) malgré l'action d'un incendie « normalisé ». Ce critère est fondamental en matière de construction car il permet de prévoir l'intégrité structurelle de l'ouvrage et d'assurer la sécurité et l'évacuation des personnes.

Les éléments de la construction sont classés en degrés, avec des tranches de temps comprises entre 15 minutes et 6 heures.

Le degré est alors déterminé d'après le temps t pendant lequel l'élément répond à un ou plusieurs des critères suivants :

1) **Résistance mécanique** : concerne dans tous les cas la tenue propre de l'élément et s'il y a lieu la stabilité de la construction pour qu'elle continue à remplir son office.

2) **Isolation thermique** : mesurée par l'échauffement moyen et l'échauffement maximal de la face non exposée au feu.

3) **Étanchéité aux flammes** : définie par la non-inflammabilité d'une nappe de coton située à 2 ou 3 cm en arrière des fentes ou orifices éventuels qui peuvent se produire.

4) **Absence d'émission de gaz inflammable** hors de la face exposée de l'élément.

Les éléments classés **stables au feu (ST)** sont les éléments pour lesquels le **critère 1** (résistance mécanique) est le seul requis.

Les éléments classés **pare-flamme (PF)** sont les éléments pour lesquels les **critères 1, 3 et 4** sont requis.

Les éléments classés **coupe-feu (CF)** sont les éléments pour lesquels les **critères 1, 2, 3 et 4** sont requis.

Tableau 21 – Classification des bois vis-à-vis de la réaction au feu

Classification	Désignation	Bois concernés
M0	Incombustible	Pouvoir calorifique supérieur < 2 500 kJ/kg
M1	Non inflammable	Bois agglomérés ignifugés dans la masse à la fabrication Bois ignifugés par traitement en autoclave
M2	Difficilement inflammable	Bois et matériaux dérivés ignifugés par traitement de surface
M3	Moyennement inflammable	Feuillus, épaisseur > 14 mm Résineux, épaisseur > 18 mm
M4	Facilement inflammable	Épaisseurs inférieures

La résistance au feu des éléments en bois massif ou lamellé-collé de grandes dimensions est très satisfaisante, la zone carbonisée périphérique joue un rôle protecteur lié à sa faible conductivité thermique (la conductivité thermique du charbon de bois est 6 fois plus faible que celle du bois massif). Le dimensionnement des éléments porteurs permet d'assurer la stabilité des ouvrages en respectant les durées prescrites. Contrairement aux autres matériaux de construction, il n'y a pas lieu de prendre en compte une chute des propriétés mécaniques (modules, contraintes de rupture...) en fonction de l'élévation de température, seule la section critique intervient dans le dimensionnement. On admet une relation linéaire entre la profondeur de bois carbonisé et le temps d'exposition au feu. Les vitesses de combustion à prendre en compte sont rassemblées dans le tableau 22.

Tableau 22 – Vitesse de combustion moyenne du bois à prendre en compte dans le calcul de la structure (taux d'humidité de mise en œuvre inférieur à 17 %)

Bois de construction	
Bois massif	
Sapin, épicéa, pin sylvestre, pin noir, pin laricio, pin maritime, hemlock, peuplier, châtaignier, chêne, douglas, etc.	$\beta_0 = 0,7 \text{ mm/min}$
Bois lamellés-collés ou aboutés	
Sapin, épicéa, pin sylvestre, pin maritime, douglas, peuplier, etc.	$\beta_0 = 0,7 \text{ mm/min}$
Bois de menuiserie intérieure (Classe A, B, C NF B 53-510)	
Essences dures	
Chêne, doussié, sipo, teck, makoré, etc.	$\beta_0 = 0,5 \text{ mm/min}$
Autres essences feuillues ou résineuses	$\beta_0 = 0,6 \text{ mm/min}$
Coefficient d'influence	
Les valeurs ci-dessus doivent être multipliées par les facteurs K_1 et K_2 en fonction des situations suivantes	
La face exposée au feu est verticale ($> 45^\circ$)	$K_1 = 1$
La face exposée au feu est horizontale ou inclinée au-dessus du feu ($\leq 45^\circ$)	$K_1 = 1,6$
La face exposée au feu est horizontale en dessous du feu	$K_1 = 0,7$
Le début de l'exposition au feu est compris entre 0 et 15 min	$K_2 = 1$
Le début de l'exposition au feu est à $t > 15$ min (cas de la disparition de l'écran protecteur)	$K_2 = 1,3$

● Ignifugation du bois

Les ignifugeants chimiques permettent de ralentir les effets du feu ; mais ils ne jouent qu'un rôle limité sur la résistance au feu. Deux techniques sont développées pour les bois massif : soit par imprégnation sous vide et pression en autoclave, soit par traitement de surface. L'efficacité du traitement en autoclave dépend des caractéristiques d'imprégnabilité de l'essence et de l'épaisseur des bois (cf. § 2 et § 1 [C 926]) ; les produits utilisés sont principalement des sels hydrosolubles qui peuvent poser des problèmes de délavage et limitent donc les utilisations en extérieur. Pour l'ignifugation en surface, on utilise des vernis ou peintures intumescents ou des produits moussants qui ralentissent la décomposition thermique du bois par isolation.

Exemple de comportement au feu : le mur à ossature bois

Le mur à ossature bois est un complexe de bois / laine minérale / plaques de plâtre particulièrement résistant à condition que l'on ait un mur à cavité fermée (DTU Bois Feu 88).

Les essais réalisés au CSTB et au CTBA montrent que :

— au bout d'un quart d'heure, la plaque de plâtre de 13 mm est détruite ;

— l'humidité dégagée par cette plaque (30 % de son poids d'origine) imprègne la laine minérale, le panneau de contreventement extérieur et la paroi des montants d'ossature. Elle évite ainsi une propagation rapide du feu en constituant un front humide ;

— en même temps, la laine minérale forme une sorte de « bouclier » par sa vitrification du côté du feu et elle protège le côté des montants d'ossature ;

— au bout d'une demi-heure, le montant d'ossature est légèrement consumé, sur sa tranche seulement, sur environ 5 mm, ce qui n'affecte pas la solidité de l'édifice.

Il faut bien rappeler que l'on utilise exclusivement des laines minérales dans les ossatures, ce qui rend ces constructions beaucoup moins dangereuses en cas d'incendie qu'un mur en parpaing revêtu d'un composé collé polystyrène / plaque de plâtre.

5. Classement des bois de structures

Le matériau bois issu des arbres présente de fait une très grande variabilité dans ses propriétés. Cette variabilité, qui peut déconcerter l'ingénieur habitué aux matériaux artificiels, homogènes et isotropes, résulte de l'histoire de la pièce de bois de structure, elle dépend de la génétique, de la sylviculture, du milieu (climat, sol, altitude...), elle est le résultat des facteurs structuraux liés à l'anatomie du bois (aubier, duramen, bois initial, bois final...), elle dépend enfin de l'histoire des traitements éventuels appliqués au matériau (séchage, reprise d'humidité...). Cette variabilité n'est pas seulement effective d'une essence à l'autre (variabilité interspécifique), elle l'est également au sein d'une même essence (variabilité intraspécifique) et également d'un même arbre.

En l'absence de classement, les variations de propriétés physiques ou mécaniques peuvent être importantes, à titre d'exemple, le tableau 23 donne une illustration de cette variabilité et montre la nécessité absolue du classement, garant de la fiabilité du matériau utilisable dans la construction.

Tableau 23 – Variabilité des propriétés des bois

Essence	Propriétés	Minimum	Maximum
Épicéa commun	Largeur de cerne (mm)	1	8
Pin maritime	E_L (éprouvette sans défaut) (MPa)	6 000	15 000
	Contrainte de rupture en compression (éprouvette sans défaut) (MPa)	34	65
	Contrainte de rupture en flexion (pièce de structure) (MPa)	7	80

Les procédés de transformation de la grume en pièces de structure à sections généralement rectangulaires font que les singularités du bois (nœuds, pente de fil, poches de résine...) jouent un rôle de plus en plus important sur les propriétés mécaniques au fur et à mesure de la diminution de section.

Traditionnellement, le classement des bois de structure (limité ici aux essences résineuses) se fait à partir de l'examen visuel de ces singularités et de l'évaluation de la densité par le biais de la mesure des largeurs de cernes. Il convient de distinguer :

- le **classement d'aspect** : c'est l'apparence du bois sur des critères d'esthétisme qui est pris en compte, ce classement doit se limiter aux usages non travaillant (bardages par exemple). Sur le plan européen, les critères de classement sont définis dans la norme NF EN 1611-1 ;

- le **classement structure** : il peut être réalisé soit à partir de la méthode visuelle soit à partir de méthodes de classement par machine.

Classement par la méthode visuelle

Le tableau 24 reprend les mesures et les critères à prendre en compte pour classer les sciages résineux par la méthode visuelle (classement structure, d'après la norme NF B 52-001, déc. 1998). Les éléments relatifs au classement sont définis sur la figure 13. Chacune de ces trois classes visuelles est associée en France à une classe de résistance.

Les bois de structure sont répartis en classes de résistance désignées chacune par une lettre :

- C pour les résineux et le peuplier ;
- D pour les feuillus ;
- GL pour le bois lamellé collé.

Le nombre suivant la ou les lettres indique la valeur caractéristique de résistance caractéristique en flexion en MPa (ou en N/mm²).

Exemple : un bois classé C22 correspond à une pièce de structure en peuplier ou résineux ayant une résistance caractéristique en flexion de 22 MPa.

Les classes de résistance du bois massif (résineux) sont les suivantes :

C14, C16, **C18**, C22, **C24**, C27, **C30**, C35, C40.

Elles peuvent être obtenues par classement machine conforme à la norme NF EN 519 ou par classement visuel selon les principes définis dans la norme NF EN 518 que la norme NF B 52-001 applique aux bois français et dont les critères sont définis dans le tableau 24.

Pour le bois massif utilisé en structure, les classes visuelles sont celles définies dans ce même tableau :

- la classe **C18** représente l'essentiel du bois utilisé en charpente traditionnelle ;
- la classe **C24** correspond surtout à la majorité des bois utilisés dans les fermettes industrialisées ou dans le bois lamellé-collé normal ;
- la classe **C30** est une classe de haute résistance affectée à du lamellé-collé extrêmement trié et de haute technicité.

Remarque : un C18 classé visuellement n'a pas exactement les mêmes propriétés mécaniques qu'un C18 classé mécaniquement. La plupart des bois sont sous-classés visuellement par rapport au classement mécanique : un C18 classé visuellement correspond plutôt à un C22 classé mécaniquement, sauf pour le pin [9].

Classement par machine

Ces méthodes permettent un classement objectif et précis et une bonne optimisation de la matière. Elles permettent de sérier les pièces directement dans les différentes classes, dont celles supérieures à C30, en mesurant les caractéristiques mécaniques individuelles de chaque pièce de structure par contrôle non destructif.

Différentes techniques existent aujourd'hui.

- Machine de classement **par flexion** (*Stress Grader*) : chaque pièce est sollicitée en flexion, la mesure porte soit sur la réaction à un déplacement imposé, soit sur la flèche à chargement imposé ; à partir des valeurs obtenues de module d'élasticité local, les pièces sont marquées et ventilées dans les différentes catégories.

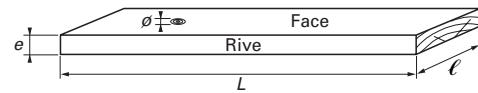


Figure 13 – Éléments pris en compte dans le classement des bois

- Classement **par ultrasons** (type *Sylvatest*) : la mesure de la vitesse de propagation des ondes acoustiques sur la longueur L de la pièce de bois permet de déterminer là encore un module d'élasticité caractéristique du comportement mécanique de l'échantillon. Les mesures peuvent se faire sur les grumes, les avivés ou sur site pour des travaux de restauration par exemple.

- Classement **par vibration** (type *Bing système*) : la vibration est provoquée par un choc, le signal récupéré par microphone est numérisé, l'analyse des données combinées à la masse et à la section des bois permet d'accéder au module d'élasticité de la pièce de bois.

- Classement **par rayonnements** : dans les techniques par rayonnements (rayons X, rayons gamma, micro-ondes), une partie des rayons est absorbée. Cette absorption est fonction de la densité du bois, de l'humidité (donc des propriétés mécaniques, cf. § 4), ainsi que de la taille et de la présence des nœuds (à densité généralement plus élevée).

Ces méthodes de classement des bois sont communes aux deux méthodes de calcul des structures en bois. La réglementation en matière de dimensionnement fait aujourd'hui référence à deux méthodes qui cohabitent.

- La méthode de calcul « **aux contraintes admissibles** » utilisée dans les règles CB71 ; elle applique les coefficients de sécurité aux seules résistances du matériau et de ses assemblages, avec des paramètres de base considérés comme non aléatoires.

Cette méthode peut se révéler insuffisante pour garantir une sécurité convenable et homogène entre les différents éléments d'un ouvrage. En particulier, elle risque de présenter des inconvénients graves dans les cas où les contraintes ne sont plus proportionnelles aux sollicitations, ce qui est notamment le cas de la flexion composée. Par ailleurs, les règles CB71, déjà anciennes, se sont révélées largement insuffisantes pour traiter de problèmes complexes. Le dimensionnement aux contraintes admissibles utilise un coefficient de sécurité de 2,275.

Exemple : bois résineux de classe C24, contrainte admissible en flexion :

$$\sigma = 24 / 2,275 = 10,5 \text{ MPa} \text{ (tableau 25)}$$

- La méthode de calcul « **aux états limites** », utilisée dans l'Eurocode 5 (norme P 21-711) : elle applique des coefficients de sécurité partiels, d'une part aux résistances, d'autre part aux actions (et donc aux sollicitations). Les paramètres de base sont considérés comme aléatoires : c'est une méthode de calcul semi-probabiliste avec coefficients de sécurité partiels. Les **résistances caractéristiques** sont définies comme correspondantes au fractile de 5 % : sur un lot testé mécaniquement, seulement 5 % des pièces ont une valeur de résistance inférieure. Il y a dans cette démarche de classement un intérêt technologique et économique évident permettant de contourner les problèmes de fiabilité du matériau liés à la grande variabilité de ses propriétés.

Le tableau 25 rassemble les grandeurs mécaniques en fonction des différentes classes de résistance. L'ensemble de ces données est disponible dans la norme NF EN 338.

Seulement limité par le diamètre initial des arbres et les technologies de 1^{re} transformation, il est possible d'obtenir pratiquement toutes les sections en bois massif (débits sur liste). Dans un souci évident de standardisation, les sections les plus courantes sont rassemblées dans le tableau 26 [5].

Tableau 24 – Classement structure des bois résineux

Classe visuelle : (ST = structure)		ST-I	ST-II	ST-III		
Classe de résistance mécanique associée (selon NF EN 338)		C30	C24	C18		
Essences		Critères (1) Largeur des cernes d'accroissement (mm)				
Sapin, Épicéa, Pins		≤ 6	≤ 8	≤ 10		
Douglas		≤ 8	≤ 10	≤ 12		
Diamètre des noeuds						
Sapin, Épicéa, Douglas	Sur la face	Ø ≤ $\ell/6$ et ≤ 30 mm	Ø ≤ $\ell/2$ et ≤ 50 mm	Ø ≤ $3\ell/4$ et ≤ 100 mm		
	Sur la rive	Ø ≤ $2/3$ de l'épaisseur de la rive Ø ≤ 40 mm				
Pins	Sur la face	Ø ≤ $\ell/10$ et Ø ≤ 15 mm	Ø ≤ $\ell/3$ et Ø ≤ 50 mm	Ø ≤ $2\ell/3$ et Ø ≤ 100 mm		
	Sur la rive	Ø ≤ $e/3$ et Ø ≤ 15 mm	Ø ≤ $e/2$ et Ø ≤ 30 mm	Ø ≤ $e/2$ et Ø ≤ 30 mm		
Fentes						
	Traversantes	Longueur ≤ 2ℓ		Longueur ≤ 600 mm		
	Non traversantes	Longueur ≤ $L/2$		Non limitée		
Grosse poche de résine						
Toutes essences		Non admise	Admise si < 80 mm			
Entre-écorce						
Toutes essences		Non admise				
Pente de fil (en fraction)						
Toutes essences	Locale	1 : 10	1 : 4			
	Générale	1 : 14	1 : 6			
Flaches						
Toutes essences	Longueur	Non admises	< $L/3$ et < 1 000 mm			
	Largeur	Non admises	< $e/3$			
Altérations biologiques						
Toutes essences	Bleu – traces de gui	Admis				
	Piqûres noires	Admises si elles apparaissent sur une seule face				
	Échauffure	Non admise				
Déformation maximale en mm pour une longueur de 2 m						
Toutes essences	Flèche de face (mm)	< 10		< 20		
	Flèche de rive (mm)	< 8		< 12		
	Gauchissement	1 mm/25 mm de largeur		2 mm/25 mm de largeur		
	Tuilage	Pas de restriction				

(1) Pour ℓ , e , L : voir figure 13.

Tableau 25 – Caractéristiques mécaniques pour le calcul de structures bois. Valeurs pour $H = 12\%$

	Notation EC5	Classes de résistance NF EN 338 (extraits)				
		C14	C18	C24	C30	C40
Contraintes caractéristiques (Contraintes admissibles) (MPa)						
Flexion	$f_{m,k}$	14	18 (8)	24 (10,5)	30 (13,2)	40
Traction axiale (L)	$f_{t,0,k}$	8	11 (5)	14 (6)	18 (9)	24
Traction perpendiculaire (R ou T)	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5 (0,13)	0,5 (0,2)	0,6 (0,2)	0,6
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	16	18 (8,5)	21 (9)	23 (10,5)	26
Compression perpendiculaire	$f_{c,90,k}$	2	2,2 (2,1)	2,5 (2,3)	2,7 (2,5)	2,9
Cisaillement	$f_{v,k}$	1,7	2 (0,9)	2,5 (1,1)	3 (1,3)	3,8
Module de déformation au fractile de 5 % (Module moyen) (MPa)						
Module axial (L)	$E_{0,05}$ $E_{0,moyen}$	4 700	6 000 (9 000)	7 400 (11 000)	8 000 (12 000)	9 400
Module perpendiculaire (R ou T)	$E_{90,moyen}$		(300)	(370)	(400)	
Module de cisaillement	G_{moyen}		(560)	(680)	(750)	
Densité moyenne						
	d_{moyen}		0,38	0,42	0,46	

Tableau 26 – Sections standardisées des essences résineuses, pour $H = 20\%$

Épaisseur e (mm)	Largeur ℓ (mm) (1)											
	27	40	63	75	100	115	125	150	160	175	200	225
15												
18												
22												
27												
32												
38												
50												
63												
75												
100												
115												
125												
150												
200												
225												
	Sections standards NF EN1313-1						Sections standards en France					

(1) Écarts admissibles : $\ell \leqslant 100^{+3}_{-1} \text{ mm}$; $\ell \geqslant 100^{+4}_{-1} \text{ mm}$.