

# Anatomie et identification des bois

Dr Benoit Jourez

Université de Liège  
Gembloux Agro-Bio Tech  
Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels

Passage des Déportés, 2  
B-5030 Gembloux

## Dr Benoit Jourez

Service public de Wallonie (SPW)  
Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (D GARNE)  
Département de l'Etude du Milieu Naturel et Agricole (DEMNA)  
Direction du Milieu forestier  
Laboratoire de Technologie du Bois  
Avenue du Maréchal Juin, 23  
B - 5030 GEMBLoux  
E-mail : [Benoit.jourez@spw.wallonie.be](mailto:Benoit.jourez@spw.wallonie.be)

### Remerciements

Ces notes de cours ont été élaborées avec l'aide de Sylviane Sliwinski et Céline Vaïanopoulos

La photographie de la page de couverture provient de Meylan et Butterfield, 1972.

# Table des matières

<b>1. Introduction</b>	<b>6</b>
<b>2. Techniques d'observation</b>	<b>8</b>
<b>2.1. Observations macroscopiques</b>	<b>8</b>
2.1.1. Observation à l'œil nu	8
2.1.2. Observation à la loupe	9
2.1.3. Observation en fluorescence en lumière de Wood	9
<b>2.2. Observations microscopiques</b>	<b>9</b>
2.2.1. Observation au stéréomicroscope	10
2.2.2. Observation au microscope optique	11
2.2.3. Observation au microscope de projection	13
<b>2.3. Observations ultra-microscopiques</b>	<b>13</b>
<b>2.4. Echantillonnage</b>	<b>14</b>
<b>2.5. Plans ligneux</b>	<b>15</b>
2.5.1. Plan transversal	15
2.5.2. Plan radial	15
2.5.3. Plan tangentiel	15
<b>2.6. Technique de préparation des coupes</b>	<b>17</b>
2.6.1. Coupes au microtome	17
2.6.2. Coloration et montage des coupes	17
2.6.3. Dissociation des éléments constitutifs du bois	18
<b>2.7. Techniques de mesures</b>	<b>19</b>
<b>3. Formation du bois</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Développement de l'arbre</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Méristèmes primaires</b>	<b>22</b>
<b>3.3. Méristèmes secondaires</b>	<b>22</b>
<b>3.4. Le bois</b>	<b>25</b>
3.4.1. Couche d'accroissement	27
3.4.2. Bois initial et bois final	29
3.4.3. Texture	31
<b>4. Composition chimique du bois</b>	<b>32</b>
<b>4.1. Constituants élémentaires</b>	<b>32</b>
<b>4.2. Composants principaux</b>	<b>32</b>
<b>4.3. Cellulose</b>	<b>33</b>
<b>4.4. Hémicelluloses</b>	<b>34</b>
<b>4.5. Lignine</b>	<b>35</b>
<b>4.6. Composants mineurs</b>	<b>37</b>
<b>4.7. Inclusions minérales</b>	<b>37</b>
<b>4.8. Eau</b>	<b>38</b>
<b>4.9. Acidité du bois</b>	<b>39</b>
<b>5. Paroi cellulaire</b>	<b>41</b>
<b>5.1. Microfibrilles de cellulose</b>	<b>41</b>

5.2.	Structure de la paroi cellulaire	42
5.3.	Ponctuations	43
6.	<i>Description et rôle des éléments ligneux</i>	49
6.1.	Trachéides	49
6.2.	Fibres	51
6.3.	Vaisseaux	53
6.4.	Parenchyme	57
6.5.	Rayons	59
6.6.	Eléments sécréteurs	64
6.6.1.	Canaux intercellulaires	64
6.6.2.	Cellules sécrétrices	64
6.6.3.	Laticifères	65
6.6.4.	Tubes à tanins	65
6.7.	Espaces intercellulaires	65
7.	<i>Description des plans ligneux des résineux et des feuillus</i>	66
7.1.	Structure du plan ligneux des résineux	68
7.2.	Structure du plan ligneux des feuillus tempérés et tropicaux	69
8.	<i>Modifications dans le plan ligneux</i>	70
8.1.	Modifications avec l'âge	70
8.1.1.	Bois juvénile et bois adulte	70
8.1.2.	Aubier, duramen et bois parfait	71
8.2.	Modifications avec les conditions de croissance	72
8.2.1.	Largeur des cernes	72
8.2.2.	Texture	75
8.2.3.	La dimension des éléments ligneux	75
8.3.	Modifications de l'orientation du fil du bois	76
8.3.1.	Fil tors	76
8.3.2.	Contre fil	77
8.4.	Bois figurés	78
8.4.1.	Bois ondé	78
8.4.2.	Bois madré	78
8.4.3.	Loupe	80
8.4.4.	Broussin	80
9.	<i>Formations ligneuses particulières</i>	81
9.1.	Bois de réaction	81
9.1.1.	Bois de compression	82
9.1.2.	Bois de tension	82
9.1.3.	Contraintes de maturation	82
9.2.	Croissance secondaire anormale	83
9.2.1.	Faux-cerne annuel	83
9.2.2.	Faux cœur	84
9.2.3.	Lunure	84
9.2.4.	Taches médullaires	84
9.2.5.	Liber inclus	84
10.	<i>Propriétés organoleptiques du bois</i>	85
10.1.	Couleur	85

<b>10.2. Odeur</b>	<b>87</b>
<b>10.3. Autres propriétés sensorielles</b>	<b>87</b>
10.3.1. Goût	87
10.3.2. Toucher	88
<b>10.4. Toxicité</b>	<b>88</b>
<b>11. Identification des bois</b>	<b>89</b>
11.1. Classification et dénomination des espèces	89
11.2. Démarche pour l'identification des bois	90
<b>12. Lexique Français/Anglais</b>	<b>92</b>
<b>13. Références bibliographiques</b>	<b>94</b>

## 1. Introduction

Tous les arbres d'aujourd'hui sont à la fois nouveaux et anciens, à l'échelle de l'évolution. Ils descendent des plus anciennes plantes terrestres, mais ils sont également les représentants modernes de leurs groupes botaniques. Les gymnospermes sont apparus les premiers, pendant l'ère primaire, au carbonifère, il y a environ 350 millions d'années. Les angiospermes dicotylédones sont apparues sur la terre pendant la période Jurassique, il y a environ 160 millions d'années. Les **essences feuillues**, appellation courante dans le négoce du bois, appartiennent au sous-embranchement des **angiospermes**. Ils se distinguent principalement des **gymnospermes, conifères ou « bois résineux »**, par la disposition particulière de l'organe femelle de la fleur dont l'ovaire clos protège les ovules, alors qu'ils sont nus chez les gymnospermes. Le bois de ces derniers se caractérise par un plan ligneux plus simple que celui des angiospermes, traduisant par là leur caractère plus primitif.

### Diversité des espèces

Contrairement aux gymnospermes, qui aujourd'hui ne sont plus représentés que par quatre ordres et quelques 600 espèces, les angiospermes fleurissent abondamment sur tout le globe terrestre et de nombreuses espèces ligneuses font l'objet d'une sylviculture, d'une exploitation ou d'un usage particulier.

Les angiospermes dicotylédones se répartissent en 30 ordres et comptent quelques 200 000 espèces, parmi lesquelles 20 000 sont des espèces ligneuses, 2000 sont potentiellement utilisables d'un point de vue technologique et seules environ 200 espèces sont couramment utilisées.

Les angiospermes monocotylédones comptent aujourd'hui sept ordres et environ 30 000 espèces, dont la plupart ne sont pas ligneuses. Néanmoins, quelques genres se développent sous des formes arborescentes (palmier, bambous) et offrent de belles perspectives d'utilisation en construction et ameublement.

Du point de vue de l'anatomiste, du botaniste ou du forestier, le **bois** est un matériau d'origine végétale, formé d'un ensemble de tissus secondaires, à parois lignifiées, résultant du fonctionnement, vers l'intérieur, de l'assise génératrice cambiale.

La vision de l'industriel, de l'ingénieur ou de l'architecte est différente. Le bois est un matériau de construction polyvalent, léger, esthétique, doté d'un rapport poids/résistance très favorable, d'une inertie thermique élevée... mais aussi entaché d'anomalies et faisant preuve d'une constitution et de performances variables.

Dès lors, sa mise en œuvre nécessite une connaissance approfondie de sa structure et de son comportement. Ses caractéristiques sont avant tout celles d'un matériau naturel, renouvelable, recyclable, esthétique, durable (avec certaines restrictions), doté de propriétés, tant physiques que mécaniques, exceptionnelles. La responsabilité en incombe à son anatomie.

Quiconque peut facilement différencier à l'œil nu des morceaux de bois de épicéa, chêne et hêtre, bien que ces deux dernières essences appartiennent à la même famille botanique. Cette faculté à identifier des bois est due aux différences facilement décelables entre les plans ligneux, ceux-ci étant stables à l'intérieur de chaque espèce. L'**anatomie du bois** est une discipline qui a pour objectif de décrire tant qualitativement que quantitativement, les différents tissus, cellules et structures qui composent le bois et d'en étudier ses propriétés physiques, mécaniques et chimiques.

Le caractère d'espèce plus évoluée des feuillus s'illustre dans la structure du bois par une différenciation cellulaire plus poussée, comparativement à la structure uniforme et régulière des résineux. Chez ces derniers, les trachéides remplissent le double rôle de soutien et de conduction alors que chez les feuillus, deux types de cellules se partagent ces fonctions, les vaisseaux pour la conduction et les fibres libriformes pour le soutien.

L'anatomie permet l'identification des bois et de comprendre leurs comportements physiques et mécaniques.

#### Branches de l'anatomie

L'anatomie du bois est une discipline de la **xylogologie**, science qui étudie sa structure et ses propriétés physiques, mécaniques et chimiques.

L'anatomie du bois peut être divisée en trois sous-disciplines :

- l'anatomie générale étudie la formation et l'organisation du bois aux différents niveaux d'observation : étude des tissus et de leur agencement (histologie), étude des cellules qui les constituent (cytologie) et étude des parois de ces cellules (sub-microscopie).
- l'anatomie systématique est la description et l'analyse de la structure des bois de chaque espèce en liaison avec la classification botanique. Elle permet leur comparaison, leur identification et aussi de confirmer, ou parfois de rejeter, leur place dans certaines classifications phylogénétiques des végétaux.
- l'anatomie appliquée tente de dégager des relations d'une part, entre la structure du bois et ses propriétés physiques et mécaniques et d'autre part, entre la physiologie et la structure (cernes d'accroissement, bois de réaction ...).

## 2. Techniques d'observation

L'identification des bois et l'étude de leur structure font appel à des techniques d'observation des plus simples (œil nu, loupe) aux plus sophistiquées (microscope électronique). Il s'agit, en fait, d'investigations successives qui, de par l'augmentation du pouvoir de grossissement de l'outil d'observation utilisé, permettent d'identifier des éléments de plus en plus petits.

Les observations macroscopiques ne doivent néanmoins pas être négligées puisqu'elles fournissent des informations pertinentes, pour un œil averti, qui seront parfois difficiles d'interpréter microscopiquement. Néanmoins, l'identification de certaines espèces ne peut se faire de façon certaine qu'en examinant au microscope une coupe mince. Ainsi, dans le cas des résineux, l'observation microscopique des ponctuations dans les champs de croisement peut être un élément clé pour leur identification. Par ailleurs, la compréhension du comportement du bois au travers d'observations anatomiques peut nécessiter des investigations fines au niveau de la structure de la paroi cellulaire.

Une des difficultés liées à l'identification des bois, outre le très grand nombre d'espèces existantes, est de visualiser une représentation en trois dimensions (3D) des observations microscopiques. Il est non seulement nécessaire de bien voir mais aussi de bien interpréter les observations.

Les techniques d'observation utilisées dépendent avant tout de l'objectif fixé (par exemple, l'identification d'une essence, l'interprétation du comportement mécanique ou l'analyse de la composition pariétale d'une cellule).

### 2.1. Observations macroscopiques

#### 2.1.1. Observation à l'œil nu

Le pouvoir de résolution de l'œil humain ne lui permet pas de distinguer deux points séparés par une distance inférieure à 75  $\mu\text{m}$  pour une vision normale à 25 cm dans les meilleures conditions d'éclairage.

L'œil permet une appréciation globale (grossissement 1x) de l'aspect général du bois et de la disposition des tissus les plus apparents (Figure 1). L'observation de la section transversale est toujours conditionnée par un tranchage correct de la surface avec une lame bien aiguisée ou mieux, avec une lame de rasoir.

L'observation à l'œil nu permet de distinguer, dans le meilleur des cas, la largeur et la régularité des cernes d'accroissement, la présence de larges rayons, la porosité, d'apprécier la texture, la masse de tissus fibreux, la maille du bois, l'inclinaison du fil, l'orientation du débit et la teinte du bois ...



Figure 1 : Observation à l'œil nu et à la loupe (grossissement 10x) de la face transversale d'un épicéa commun, montrant le bois de printemps et le bois d'été à l'intérieur des cernes annuels.

### 2.1.2. Observation à la loupe

La loupe de grossissement 10x est couramment utilisée pour l'examen d'échantillons de bois (Figure 1). Elle est constituée en principe par une lentille convergente à travers laquelle se réfracte la lumière envoyée par un objet. Elle visualise l'image sous un plus grand angle que l'œil nu. Son grossissement indique la mesure du rapport des diamètres apparents de l'image et de l'objet pour la vision distincte d'un œil normal.

L'observation à la loupe nécessite une section bien rafraîchie au rasoir. Elle permet l'identification des différents tissus, la largeur et la variabilité des rayons ligneux, les vaisseaux et leur arrangement, les zones de parenchyme, les canaux sécréteurs ...

### 2.1.3. Observation en fluorescence en lumière de Wood

Il s'agit de l'application au bois d'un phénomène de photo-luminescence instantanée, qui consiste à transformer la lumière reçue en radiations lumineuses de longueur d'onde différente (Normand, 1972). Avec la fluorescence "en lumière noire" ou lumière de Wood, le bois est soumis à l'action de radiations ultraviolettes. L'absorption dans l'ultraviolet fournit une émission visible à l'aide d'une lampe à mercure (Figure 2). Cette technique est utilisée, entre autre, pour différencier l'*Afzelia bipindensis* et de l'*A. pachyloba* qui ne sont pas différenciables sur base de coupes anatomiques. L'*A. bipindensis* dont les rondins présentent souvent des contenus pulvérulents jaune citron dans les fentes de cœur visibles macroscopiquement, prend sous la lampe de Wood par exposition dans l'obscurité pendant quelques minutes, une teinte homogène violet-amarante. L'*A. pachyloba* donne au contraire une teinte souvent hétérogène, par bandes ou plages d'un jaune vif.

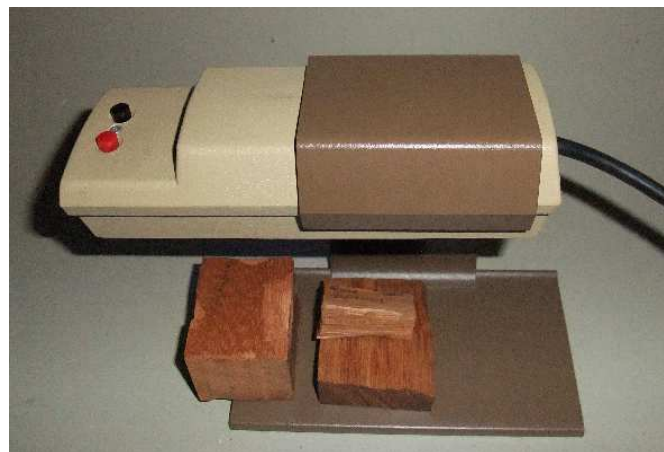


Figure 2 : Observation à la lampe de Wood d'échantillons d'*Afzelia* (Doussié).

## 2.2. Observations microscopiques

L'investigation microscopique est nécessaire pour avoir une certitude quant à l'identification de certaines essences, pour appuyer une appréciation, relative à la qualité, sur des caractéristiques de structure ou de dimension de membranes, pour conclure quant à la présence ou non de certaines anomalies et juger de leur gravité.

Les techniques de microscopie et les différents types de microscope présentent des performances et des avantages divers.

## Grossissement du microscope

Le microscope donne une image agrandie d'un objet. L'objectif projette une image agrandie de l'objet dans le plan dit d'image intermédiaire et l'oculaire grossit ensuite cette image comme une loupe. Le **grossissement optique** est égal au grandissement de l'objet multiplié par le grossissement de l'oculaire.

L'utilisation d'une caméra électronique à la place de l'oculaire pour la projection d'une image sur un écran d'ordinateur ou de télévision induit un **grossissement électronique** qui se calcule par le rapport de la diagonale de l'écran sur la diagonale du capteur de la caméra.

Le grossissement d'ensemble (G) est calculé en multipliant le grossissement optique par le grossissement électronique.

### Exemple

Une ponctuation de 8 µm de diamètre prise en photo avec un objectif de microscope de 100x et une bague d'adaptation de 0,5x de la caméra sur le microscope, une diagonale de l'écran de 61 cm et une diagonale du capteur de la caméra de 5,3 mm :

$$G_{\text{optique}} = 100 \times 0,5 = 50x$$

$$G_{\text{électronique}} = 610 \text{ mm} / 5,3 \text{ mm} = 115x$$

$$G_{\text{d'ensemble}} = G_{\text{optique}} \times G_{\text{électronique}} = 50 \times 115 = 5750x$$

La ponctuation apparaît à l'écran avec un diamètre apparent de 8 µm x 5750 = 46000 µm soit 46 mm de diamètre.

### 2.2.1. Observation au stéréomicroscope

Le **microscope stéréoscopique**, appelé aussi microscope binoculaire ou, improprement, "loupe binoculaire", est un microscope à deux tubes convergents renfermant chacun un système optique complet (objectif et oculaire) et comportant un dispositif de redressement de l'image (De Sloover *et al.*, 1981) (Figures 3 et 4). Chaque œil reçoit ainsi une image légèrement différente du même objet et celui-ci est vu en relief (effet stéréoscopique).

Ce type de microscope permet des observations à des grossissements intermédiaires entre ceux de la loupe et du microscope mais il présente sur ce dernier les avantages suivants :

- l'image de l'objet est droite (comme l'image fournie par la loupe);
- l'objet est normalement observé en lumière réfléchi, il peut être épais et ne nécessite aucune préparation particulière;
- la distance frontale est suffisante pour permettre diverses manipulations de l'objet.

Les stéréomicroscopes utilisés couramment ont un grossissement de 250x, même si celui-ci peut aller jusqu'à 800x pour des stéréomicroscopes fournissant une image en 3D. Ces derniers sont néanmoins rarement utilisés en anatomie du bois.

Avec un tel appareil, la plupart des caractéristiques anatomiques utilisées pour l'identification, même microscopiques, sont accessibles avec un peu d'habitude. Il offre pour l'opérateur un très grand confort de travail. Il fait le "pont" entre la macro et la microscopie.



Figure 3 : Observation au stéréomicroscope.

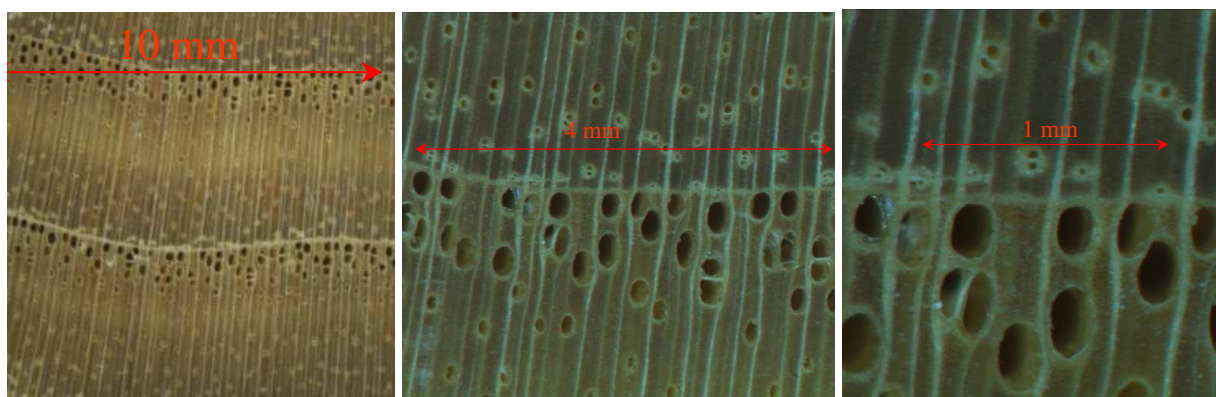


Figure 4 : Observation en épiscopie au stéréomicroscope d'un bloc de Frêne commun à divers grossissements.

### 2.2.2. Observation au microscope optique

La **microscopie optique** est celle qui est la plus facilement abordable et la plus utilisée dans les laboratoires d'anatomie à des fins d'identification des essences (Figure 5). Elle est généralement suffisante pour mettre en évidence l'ensemble des éléments du plan ligneux et leurs caractéristiques.

Le grossissement des microscopes optiques actuellement sur le marché peut aller jusqu'à 1400x mais les microscopes les plus utilisés possèdent un grossissement de 650x. Il existe deux grandes techniques de microscopie qui se différencient sur base du procédé d'éclairage qui entraîne des préparations spéciales du bois :

- la **microscopie classique en lumière transmise** pour laquelle les observations sont réalisées sur des coupes minces de 10 à 25  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La lumière traverse la coupe et arrive dans l'objectif qui donne de l'objet une image agrandie. Elle est la technique la plus répandue.
- la **microscopie en lumière incidente ou épiscopique** pour laquelle l'échantillon de bois massif est éclairé par une lumière réfléchi. Cette technique ne nécessite pas la préparation de coupes microscopiques. La lumière est envoyée sur l'objet opaque soit par des fibres optiques soit en faisceau conique à travers l'objectif, et donne un effet d'ombre réglable sur les détails.

## Techniques microscopiques

A ces deux techniques s'ajoutent d'autres plus spécifiques :

- la **microscopie à contraste de phase** sépare la lumière diffractée, par un objet, de la lumière directement transmise, ce qui n'améliore pas le pouvoir séparateur, mais accentue par différence de phase le contraste d'ombre et de lumière, rendant visible des détails de relief.
- la **microscopie à rayons ultraviolets** nécessite une optique en quartz et permet d'abaisser la résolution à  $0,1 \mu\text{m}$ .
- la **microscopie polarisante** repose sur une technique qui met en œuvre un microscope équipé de lames de polarisation. Par la mesure de l'angle de rotation nécessaire pour obtenir l'extinction de la lumière entre Nicols croisés, une structure cristalline sera identifiable.

Au delà, les techniques font appel à d'autres rayonnements que la lumière, essentiellement des ondes électromagnétiques.

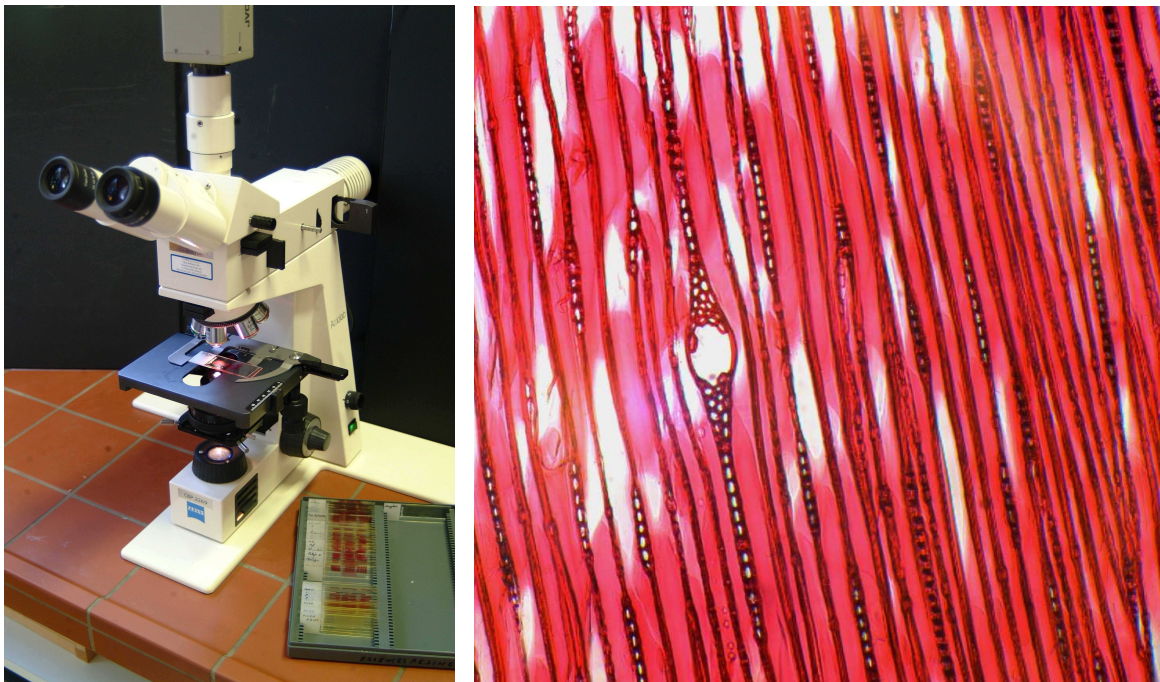


Figure 5 : Observation au microscope optique d'une coupe de bois montée entre lame et lamelle et à droite, coupe tangentielle dans l'épicéa.

### 2.2.3. Observation au microscope de projection

Dans cet appareillage, les oculaires sont remplacés par un écran formé d'un verre dépoli sur lequel l'image est projetée (Figure 6). L'image agrandie (de 50 à 1250x) de l'objet sur l'écran peut être mesurée directement au moyen d'une règle graduée. Il est généralement utilisé pour mesurer les dimensions ou dénombrer des éléments isolés après défibrage d'un bloc de bois. Le microscope de projection permet à plusieurs personnes d'observer l'image sur l'écran.

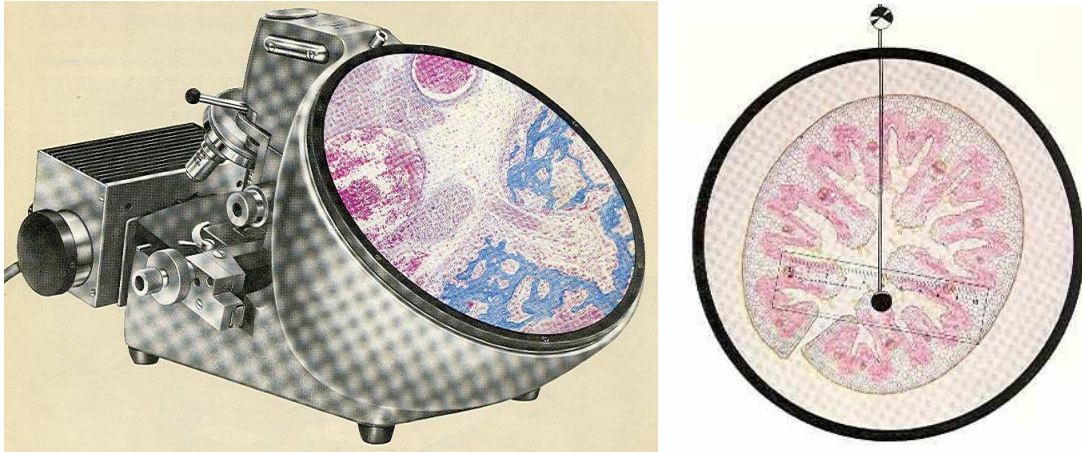


Figure 6 : Observation au microscope de projection d'une coupe anatomique et à droite, mesure au moyen d'une latte graduée (photographie provenant de la notice du Visopan de Reichert).

### 2.3. Observations ultra-microscopiques

Lors des études ultra-microscopiques, des rayons X à très courte longueur d'onde sont utilisés afin d'abaisser le pouvoir séparateur à moins de 100 angströms et d'augmenter le grossissement à plus de 50 000x, l'optique traditionnelle étant remplacée par des dispositifs électroniques et des champs magnétiques (Figure 7). Deux techniques de microscopie sont utilisées pour les observations ultra-microscopiques : la microscopie électronique à transmission ou à balayage.

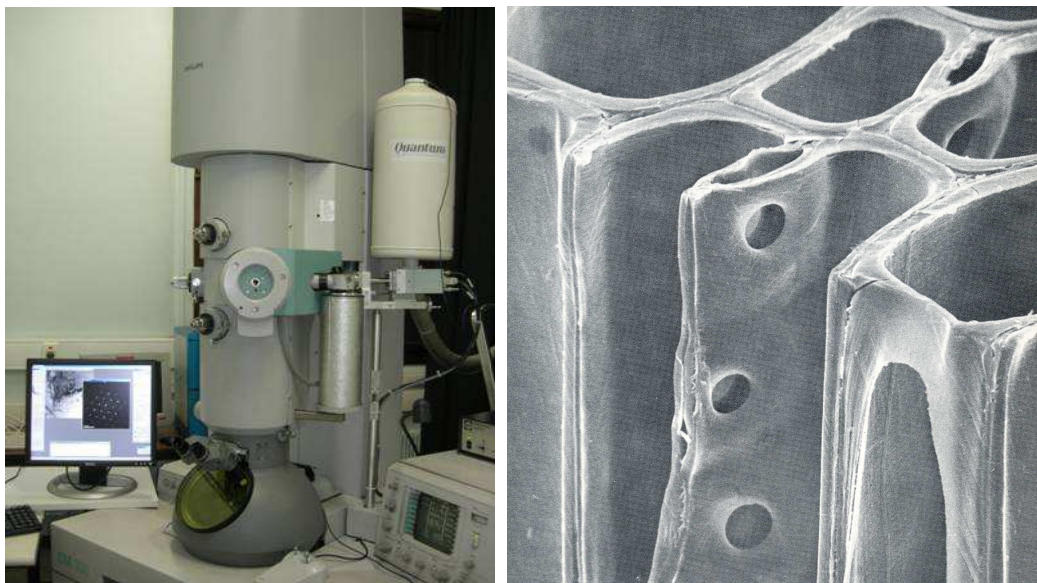


Figure 7 : Observation au microscope électronique à transmission (<http://neel.cnrs.fr>) et à droite, ponctuations aréolées sur les parois radiales de trachéides chez *Pinus radiata* (Meylan and Butterfield, 1972).

## Les microscopes électroniques

La **microscopie électronique à transmission** (MET ou TEM en anglais pour *Transmission Electron Microscopy*) est une technique de microscopie où un faisceau d'électrons est «transmis» à travers un échantillon très mince, nécessitant la préparation de lames ultra-fines. Les effets d'interaction entre les électrons et l'échantillon donnent naissance à une image, dont la résolution peut atteindre 0,8 angström. Les images obtenues ne sont généralement pas explicites, et doivent être interprétées à l'aide d'un support théorique. L'intérêt principal de ce microscope est de pouvoir combiner cette grande résolution avec les informations de l'espace de Fourier, c'est-à-dire la diffraction. Il est aussi possible d'étudier la composition chimique de l'échantillon en étudiant le rayonnement X provoqué par le faisceau électronique. Contrairement aux microscopes optiques, la résolution n'est pas limitée par la longueur d'onde des électrons, mais par les aberrations dues aux lentilles magnétiques.

Ce type de microscopie consiste à placer un échantillon suffisamment mince sous un faisceau d'électrons, et d'utiliser un système de lentilles magnétiques pour projeter l'image de l'échantillon sur un écran fluorescent qui transforme l'image électronique en image optique. Pour les échantillons cristallins, un autre mode d'utilisation consiste à visualiser le cliché de diffraction de l'échantillon.

Les applications de la microscopie électronique couvrent un très vaste domaine, de l'observation d'échantillons biologiques, comme le noyau des cellules, à l'analyse d'échantillons industriels dans la métallurgie ou l'industrie des semi-conducteurs.

La **microscopie électronique à balayage** (MEB ou SEM pour *Scanning Electron Microscopy* en anglais) est une technique de microscopie électronique basée sur le principe des interactions électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.

Le principe du MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface.

Aujourd'hui, la microscopie électronique à balayage est utilisée dans des domaines allant de la biologie aux sciences des matériaux et un grand nombre de constructeurs proposent des appareils de série équipés de détecteurs d'électrons secondaires et dont la résolution se situe entre 0,4 et 20 nanomètres.

### 2.4. Echantillonnage

Suivant l'objectif poursuivi, l'identification peut être réalisée à partir d'un échantillon unique prélevé par exemple sur un objet en bois, une planche, un arbre ... ou à partir d'un lot d'échantillons afin de caractériser l'essence d'où ils proviennent en tenant compte de la variabilité naturelle propre au matériel biologique.

Compte tenu de la dimension microscopique des différents éléments constitutifs du bois, le matériel nécessaire à son identification peut être de dimension relativement petite. Si l'identification porte par exemple sur le bois provenant d'une œuvre d'art, l'échantillon à disposition se résumera sans doute à un prélèvement au scalpel d'un copeau de bois. Si l'identification porte sur un lot de bois (avivé ou grume), l'échantillon prélevé pourra être de dimension nettement plus conséquente.

Pour faciliter les identifications, il est intéressant d'être en possession d'un maximum d'informations relatives à l'origine de l'échantillon de bois.

## 2.5. Plans ligneux

Dans un arbre, les éléments du bois sont orientés préférentiellement suivant un axe de symétrie longitudinal ou axial qui est matérialisé par la moelle. Perpendiculairement à cet axe, il est possible de définir un plan transversal parallèle à une section horizontale du tronc (Figures 8 et 9). Cette section correspond au bois debout. Parallèlement à l'axe de symétrie, les plans longitudinaux, radial et tangentiel, correspondent respectivement au débit sur maille et sur dosse.

### 2.5.1. Plan transversal

Le **plan transversal** est perpendiculaire au fil du bois (direction générale des éléments axiaux).

Ce plan est non seulement important pour l'identification des essences mais aussi pour la détermination de l'âge et de la vitesse de croissance de l'arbre. Il correspond rarement à un plan de débit industriel (exception : plancher en bois debout).

Dans ce plan, il est possible d'observer macroscopiquement les cernes annuels de croissance, de distinguer l'aubier du duramen et de définir si l'échantillon provient d'un résineux ou d'un feuillu. Microscopiquement, il est possible d'observer les limites de cernes annuels, la disposition du parenchyme, l'importance du tissu fibreux et des rayons, et la présence ou non de vaisseaux et leur agencement.

### 2.5.2. Plan radial

Le **plan radial** est orienté suivant une direction allant de la moelle à l'écorce, c'est-à-dire suivant le rayon du tronc. Il correspond au débit sur quartier (sur maille), particulièrement visible sur une essence telle que le chêne.

Macroscopiquement, il est possible d'observer la limite des cernes, ainsi que le passage entre l'aubier et le duramen.

Microscopiquement, il est possible d'observer les rayons et la présence éventuelle de trachéides horizontales, les champs de croisement entre les cellules de rayons et les éléments verticaux, ainsi que la nature des ponctuations.

### 2.5.3. Plan tangentiel

Le **plan tangentiel** est orienté perpendiculairement au rayon et tangent aux cernes d'accroissement. Il correspond au débit sur dosse et au débit par déroulage.

Macroscopiquement, il est possible d'observer l'inclinaison du fil du bois.

Microscopiquement, il est possible d'observer la section transversale des rayons ligneux ainsi que la section longitudinale du parenchyme axial, des vaisseaux, des fibres et des trachéides.

#### Effets de l'inclinaison du fil

Dans la pratique, le sciage peut ne pas être parfaitement aligné suivant les deux plans longitudinaux, ce qui engendre une grande variabilité d'aspect des débits et une réduction de leur résistance mécanique (fibres tranchées).

Le rabotage d'une planche présentant un fil plongeant (fil présentant une inclinaison par rapport à la surface de la pièce) peut entraîner la formation d'arrachements, induisant un mauvais état de surface.

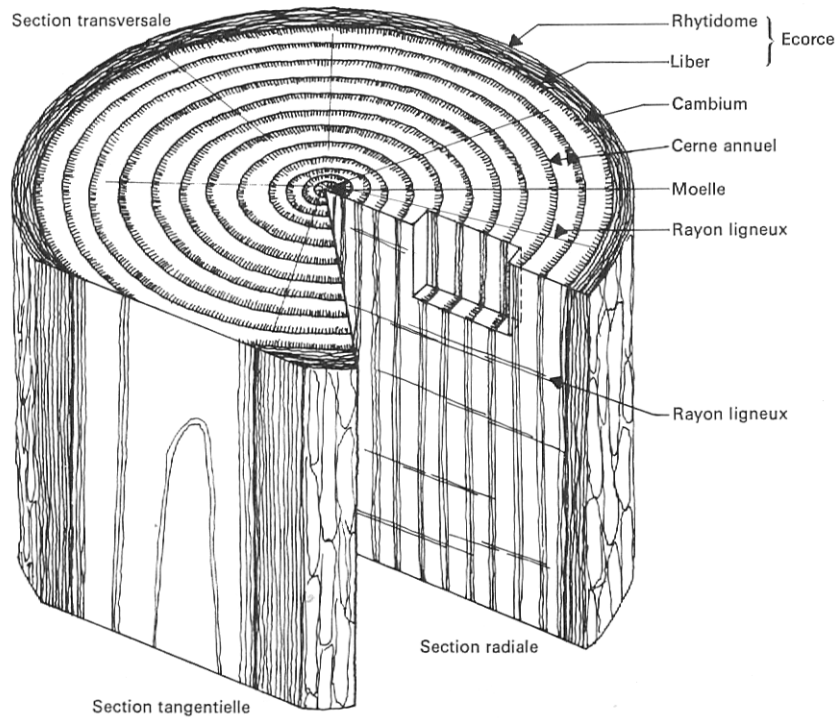


Figure 8 : Plans ligneux d'un résineux, l'épicéa (Anonyme, 1960).

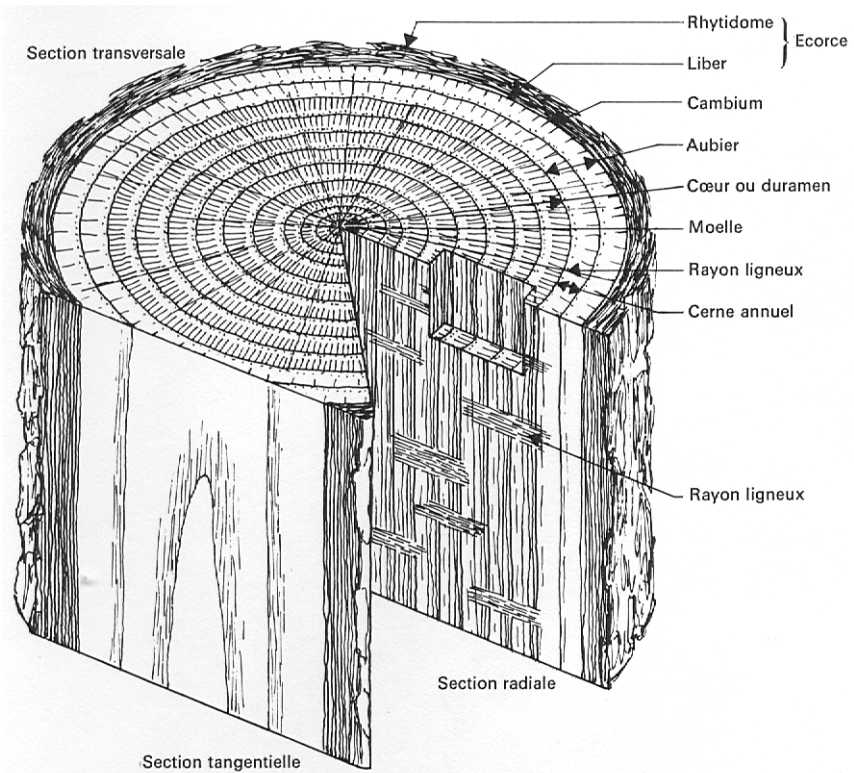


Figure 9 : Plans ligneux d'un feuillu, le chêne (Anonyme, 1960).

## 2.6. **Technique de préparation des coupes**

La préparation des coupes anatomiques à partir d'échantillons de bois (de dimension approximative 15x15x15 mm) pour l'identification par microscopie optique consiste à trancher, suivant les trois plans principaux, une section la plus fine possible appelée coupe mince qui sera, après un traitement approprié, montée entre lame et lamelle. L'ensemble sera placé sur la platine du microscope pour une observation par transparence (diascopie).

### 2.6.1. Coupes au microtome

En règle générale, les bois frais (à l'état vert) se tranchent plus aisément que les bois secs qui nécessitent au préalable d'être ramolli. Ceci est d'autant plus vrai que la dureté du bois est élevée. Ce ramollissement est obtenu par cuisson de l'échantillon dans de l'eau portée à ébullition douce. Cette opération a un double but qui est de chasser l'air des cavités du bois et de ramollir les parois.

Les coupes fines sont réalisées au moyen d'un microtome (Figure 10). L'échantillon est fixé fermement entre les mâchoires de l'étau du microtome et la face à trancher est positionnée dans un plan parallèle au plan de déplacement du couteau. L'opérateur déplace le couteau sur une glissière par un mouvement de va et vient qui forme un angle avec un des côtés de la section à trancher, afin d'attaquer progressivement le bois. La coupe mince est récupérée au moyen d'un pinceau humide et déposée dans un verre de montre.

Dans le cas d'échantillons de bois, l'épaisseur de la coupe mince peut être réglée à partir du microtome entre 12 et 20  $\mu\text{m}$ .

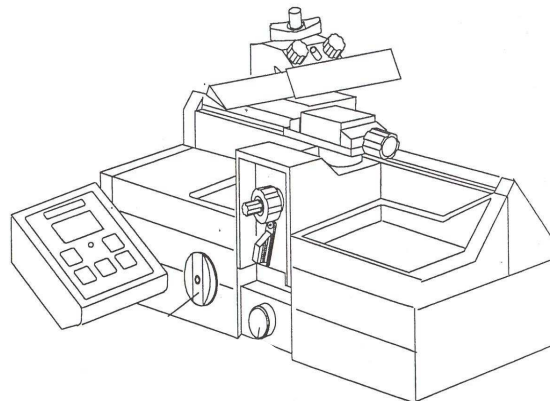


Figure 10 : Schéma d'un microtome à glissière (provenant de la notice MICROM HM440).

Au départ, si l'échantillon a été débité afin que ses faces soient orientées suivant les trois plans, il est possible de réaliser les coupes suivant les trois orientations à partir du même échantillon.

En général, plusieurs coupes sont réalisées suivant chacun des plans et stockées dans de l'eau déminéralisée additionnée de quelques gouttes d'eau de javel pour les observations ultérieures. Dans le cas d'échantillon de bois très petits ou en mauvais état (déchiqueté ou effrité), une inclusion dans la paraffine est nécessaire pour maintenir l'échantillon lors de la réalisation des coupes au microtome.

### 2.6.2. Coloration et montage des coupes

Bien qu'il soit possible d'observer des coupes minces de bois entre lame et lamelle sans préparation, simplement immergées dans de l'eau pour un montage non permanent, il est préférable de les monter dans un milieu qui durcit en séchant et fixe les coupes, par exemple la coumaronne ou le baume du Canada, on parle alors de montage permanent.

Avant d'effectuer ce montage, des étapes de blanchiment, de coloration et de déshydratation sont nécessaires afin de faciliter les observations anatomiques.

Un éclaircissement ou blanchiment des coupes au moyen d'hypochlorite de sodium (eau de javel) est souvent nécessaire afin de dissoudre le contenu cellulaire. Ensuite, les coupes sont généralement colorées par un ou plusieurs colorants qui permettent de mettre en évidence les éléments de la coupe et surtout de les différencier les uns des autres. Les colorants employés ont chacun une affinité particulière pour un élément donné constitutif du bois.

#### Coloration des coupes microscopiques

Le vert d'iode colore en vert les éléments lignifiés.

La safranine colore en rouge les éléments lignifiés et subérisés, ainsi que dans certains cas, le noyau et le nucléole des cellules.

Le Fast Green colore en bleu-vert les parois cellulosesiques et le cytoplasme.

Le bleu de méthylène colore en bleu les éléments lignifiés.

Dans le cas particulier des observations du bois de tension, une double coloration safranine et bleu astra est réalisée afin de colorer en rouge les parois lignifiées et en bleu, la couche gélatineuse (couche G) de nature celluloseique caractéristique des fibres de ce bois.

Après colorations, les coupes microscopiques sont trempées dans des bains successifs à base d'alcool éthylique, de plus en plus concentrés, afin d'éliminer les excès de colorants non fixés aux coupes et de les déshydrater. Le dernier bain est réalisé avec du xylène pour durcir les coupes. Si tous ces « trempages » ne sont pas effectués correctement, la solution finale de xylène vire au blanc laiteux, du fait de la présence résiduelle d'eau. Il est alors nécessaire de recommencer les différents bains à l'alcool.

La dernière étape avant les observations microscopiques consiste au montage permanent des coupes entre lame et lamelle. Les coupes colorées sont ainsi disposées sur une lame porte-objet, une goutte de baume du Canada y est ajoutée et un couvre-objet est ensuite déposé au-dessus des coupes en veillant à ne pas emprisonner des bulles d'air.

Les lames sont ensuite séchées à 50°C sur une plaque chauffante. Une masse de 250 à 300 g est déposée sur le couvre-objet afin d'aplanir la coupe et le tout est laissé ainsi pendant deux à trois jours. Après séchage complet, les lames sont nettoyées au xylène pour éliminer tous les excédants de baume du Canada.

#### 2.6.3. Dissociation des éléments constitutifs du bois

Dans une coupe mince, les cellules sont tranchées transversalement ou longitudinalement suivant le plan considéré, si bien que l'observateur n'a accès qu'à une section des cellules constitutives du plan. Les sections des cellules restent solidaires les unes des autres et il n'est donc pas possible d'observer isolément la forme et les détails de chaque élément. La macération, par attaque chimique, permet d'isoler, les unes des autres, les cellules des tissus ligneux. Il est dès lors possible d'observer les cellules complètes séparément. Des gouttes de macération contenant des cellules en suspension sont déposées entre lame et lamelle pour être observé. Cette technique permet, entre autre, de mesurer la longueur des éléments de trachéides, de fibres, de vaisseaux et de parenchyme (Figure 11).

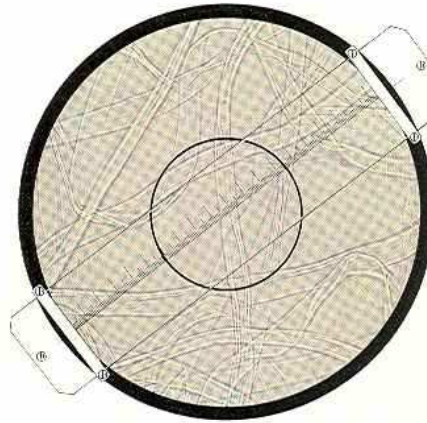


Figure 11 : Mesure au moyen d'un microscope de projection de longueur et de largeur des fibres.

## 2.7. Techniques de mesures

Le but des mesures réalisées sur les coupes microscopiques vise à préciser par des mesures objectives l'impression subjective tirée de l'observation du plan ligneux. Compte tenu de la variabilité des dimensions des éléments ligneux, il est nécessaire de répéter les mesures effectuées afin d'en dégager une valeur moyenne et l'écart type associé. A titre d'exemple, la figure 12 présente pour les feuillus les valeurs moyennes de différentes caractéristiques anatomiques, en terme de dimension et de fréquence.

Suivant la dimension de l'élément que l'on désire mesurer ou la précision qui doit être atteinte, il y a lieu de choisir l'outil (loupe ou microscope), voir l'objectif (2.5, 5, 10, 25 ...), les plus appropriés.

Certaines mesures sont réalisées en coupe transversale comme la largeur des vaisseaux, le nombre de pores par mm<sup>2</sup>, le nombre de rayons par mm, le nombre de lignes tangentielles continues de parenchyme. Des mesures sont effectuées en coupe longitudinale comme la taille des ponctuations intervasculaires, la hauteur et la largeur des rayons, le nombre et la longueur des cellules de parenchyme par file. Enfin, des mesures peuvent se faire sur des éléments ligneux dissociés, telles que les fibres et les vaisseaux.

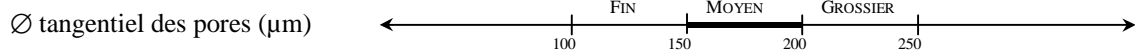
A l'échelle macroscopique, les mesures ou les comptages sont réalisés à l'aide d'un film transparent superposé au plan ligneux. Le transparent comporte différentes formes géométriques qui permettent par comparaison de mesurer ou compter les éléments ligneux d'intérêt. Pour le dénombrement, une forme d'une surface définie permet de compter, par exemple, le nombre de vaisseaux dans 5 mm<sup>2</sup>. La détermination de la largeur des rayons ou des vaisseaux se fait par comparaison avec des traits de différentes épaisseurs. La figure 13 montre l'utilisation de cette technique de mesure.

Pour les mesures microscopiques classiques, on travaille également par comparaison mais cette fois grâce à un oculaire équipé d'un réticule préalablement étalonné pour chaque objectif du microscope au moyen d'une lame micrométrique graduée.

Pour les mesures avec un microscope de projection, l'image est projetée sur un verre dépoli et le caractère anatomique est mesuré au moyen d'une latte graduée préalablement étalonnée et manipulée par l'opérateur.

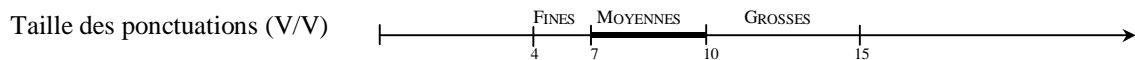
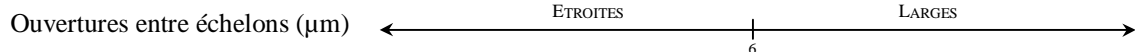
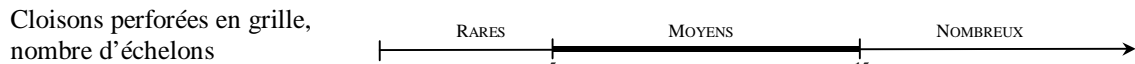
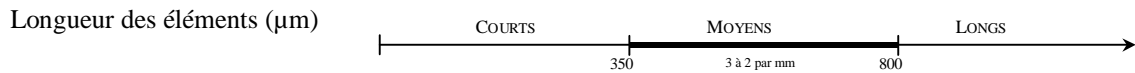
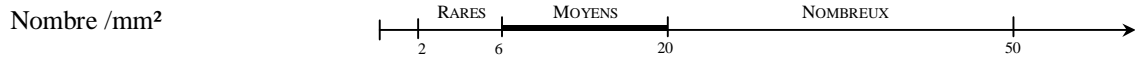
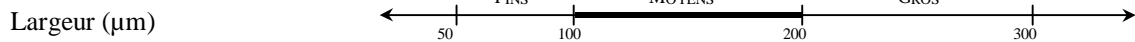
Les méthodes modernes d'observation microscopique utilisent une caméra placée sur un tube oculaire du microscope et affichent l'image sur un écran d'ordinateur. Dans ce cas, une échelle graduée superposée à l'image et préalablement étalonnée pour chaque objectif permet de réaliser les mesures.

**GRAIN**



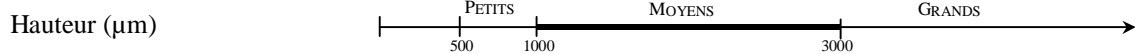
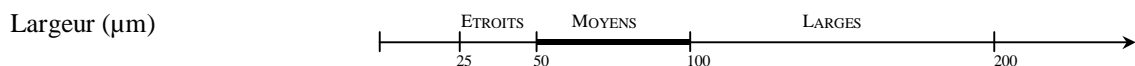
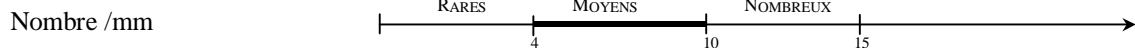
**VAISSEAUX**

5 à 20%



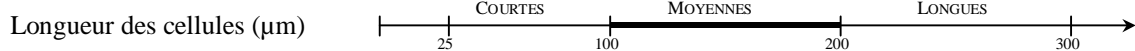
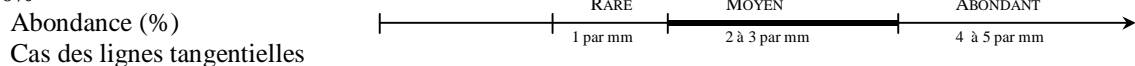
**RAYONS**

10 à 30%



**PARENCHYME**

30 à 40%



**FIBRES**

30 à 80%

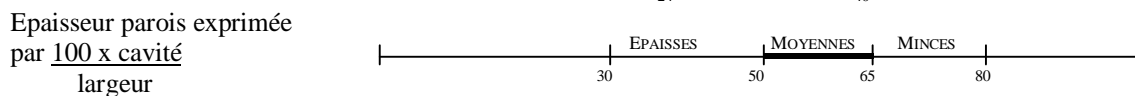
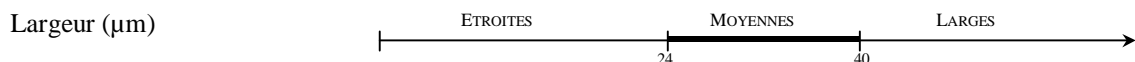
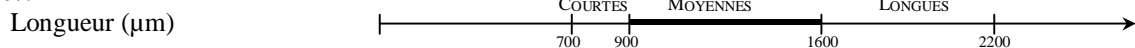


Figure 12 : Valeurs moyennes des caractéristiques anatomiques des bois feuillus (d'après Normand, 1972).

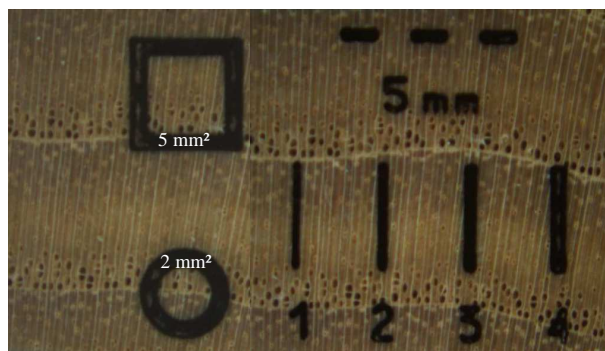


Figure 13 : Utilisation d'une plaquette transparente graduée pour la détermination du nombre et de la largeur des pores et des rayons (d'après Normand, 1972).

### 3. Formation du bois

#### 3.1. Développement de l'arbre

L'arbre se définit comme une plante ligneuse pérenne d'au moins 7 m de hauteur caractérisée par un tronc qui se ramifie en branches formant un houppier (en deçà de cette hauteur, on parle d'arbustes et d'arbrisseaux). Chez les dicotylédones, le tronc constitue l'axe primaire qui se ramifie en branches pour former les axes secondaires et de niveaux supérieurs. La mise en place progressive de l'arbre et de son architecture résulte de l'activité des méristèmes primaires qui assurent la croissance en hauteur par l'allongement des axes et des méristèmes secondaires qui assurent la croissance en diamètre (Figure 14). Cette dernière résulte de la mise en place d'un tissu ligneux appelé le bois à partir de l'activité de l'assise génératrice libéro-ligneuse, le cambium. En fonction de la dimension de la section de l'axe, celui-ci présente une rigidité plus ou moins marquée qui lui est conféré par les tissus ligneux formant le bois.

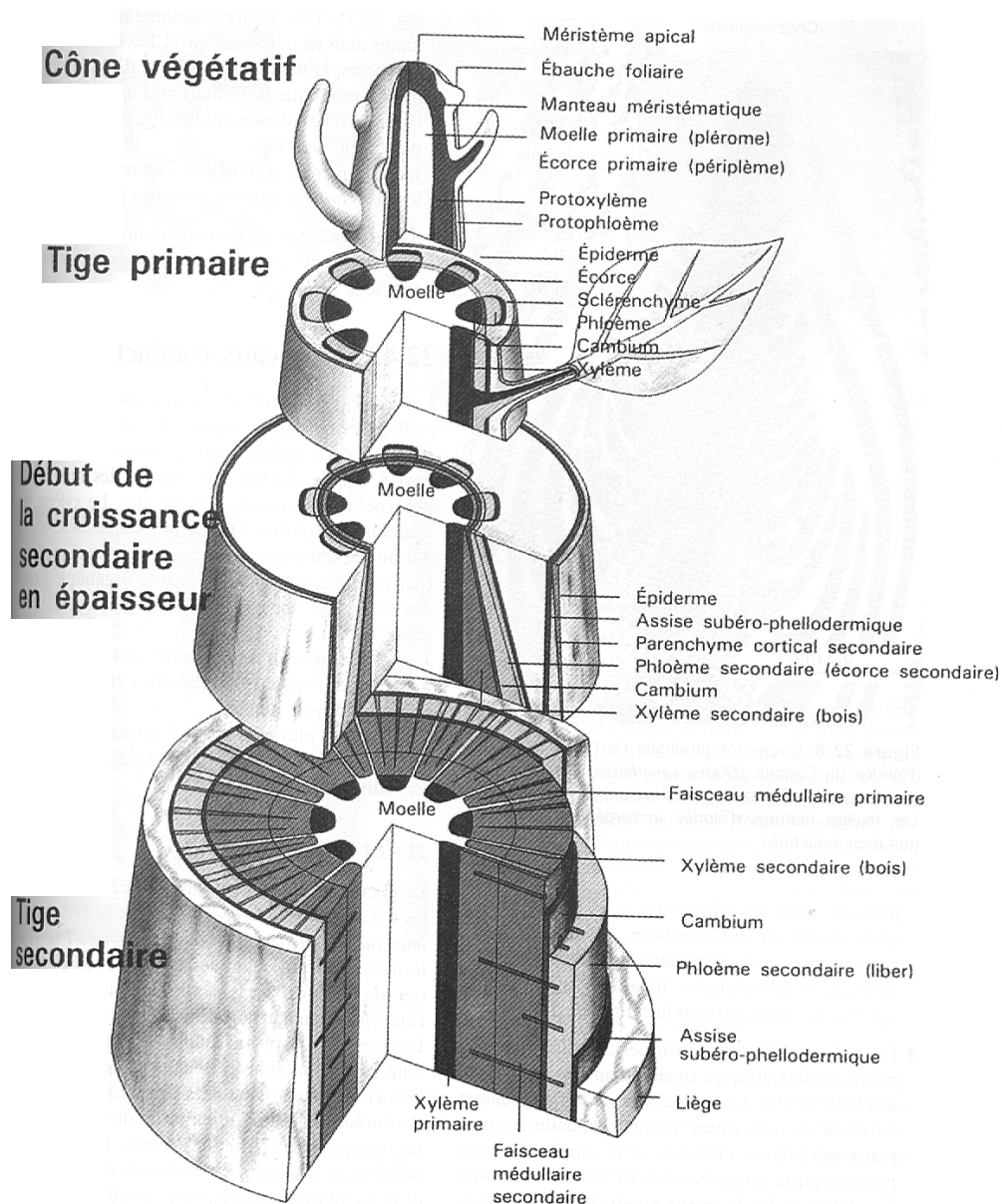


Figure 14 : Modèle tridimensionnel de la tige d'un végétal ligneux montrant des coupes transversales à différents niveaux (Lüttge *et al.*, 2002 ).

### 3.2. Méristèmes primaires

Le **méristème primaire ou apical** est un tissu formé de cellules embryonnaires susceptibles de se diviser indéfiniment et de donner naissance par différenciation aux parties principales de la plante, par exemple, les primordiums foliaires, l'épiderme, les tissus corticaux de la tige et des racines, le mésophylle des feuilles et les tissus vasculaires primaires.

Ce méristème constitue un prolongement de l'embryon.

Il est localisé aux extrémités des axes des parties aériennes et souterraines de l'arbre. Il assure l'allongement des axes et leur ramification, ainsi que la formation du xylème et phloème primaires à partir du procambium (Figure 14).

### 3.3. Méristèmes secondaires

Il existe deux types de **méristèmes secondaires**, d'une part le **cambium** (parfois appelé zone cambiale ou assise génératrice libéro-ligneuse) et d'autre part le **phellogène** (ou assise génératrice subéro-phellogénique) (Figures 14 et 15). Ils sont localisés en périphérie le long des axes de l'arbre et le phellogène est en position externe par rapport au cambium. Ces méristèmes secondaires se développent à partir de tissus matures déjà différenciés et issus de l'activité des méristèmes primaires. Ces tissus matures sont susceptibles de se diviser en assises concentriques pour donner naissance aux tissus secondaires par différenciation. Les divisions périclinales se réalisent suivant un axe radial, tandis que les divisions anticlines se font suivant un axe tangentiel.

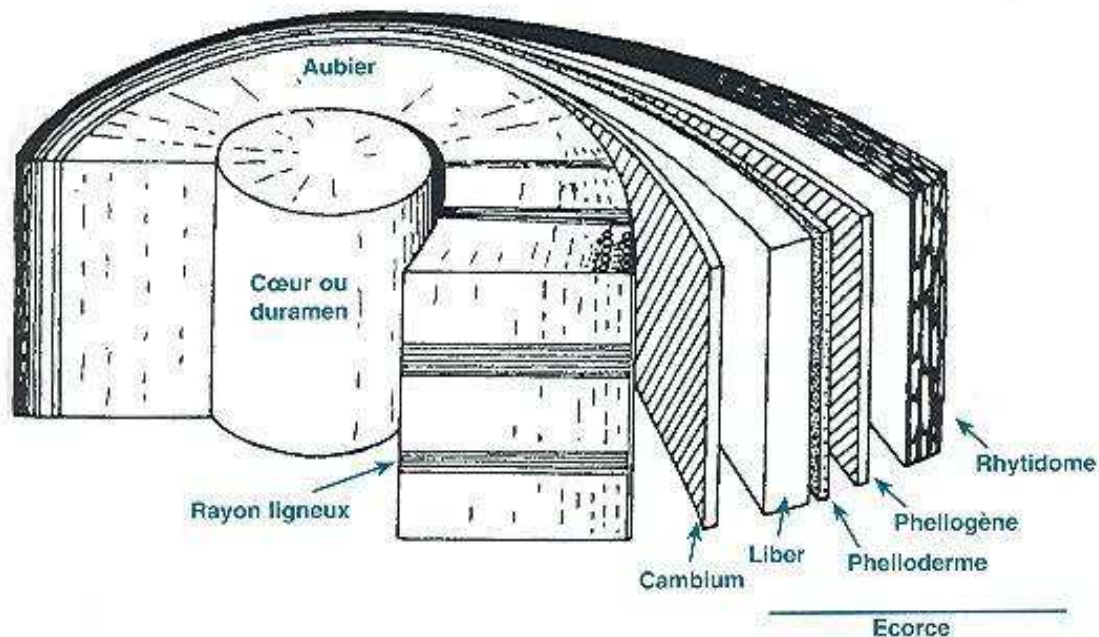


Figure 15 : Les méristèmes secondaires dans la section du tronc (Anonyme, 2009).



Par des cloisonnements longitudinaux péricleins, les cellules du cambium se divisent activement sur leur face externe et interne mettant en place des files radiales de cellules filles. Vers l'intérieur, les cellules filles donnent naissance au **bois ou xylème secondaire** et vers l'extérieur, au **liber ou phloème secondaire** (Figure 18).

L'épaisseur de la zone génératrice cambiale ne grandit pas suite à la différenciation des cellules filles en tissus secondaires. Il en résulte une croissance en épaisseur de l'axe se manifestant de part et d'autre de l'assise cambiale. Néanmoins, le nombre de divisions est plus important vers l'intérieur que vers l'extérieur ce qui conduit à un épaississement plus important du bois que du liber.

Les cloisonnements anticlines des cellules cambiales permettent à cette zone génératrice d'accompagner la croissance en épaisseur des axes (Figures 17 et 18).

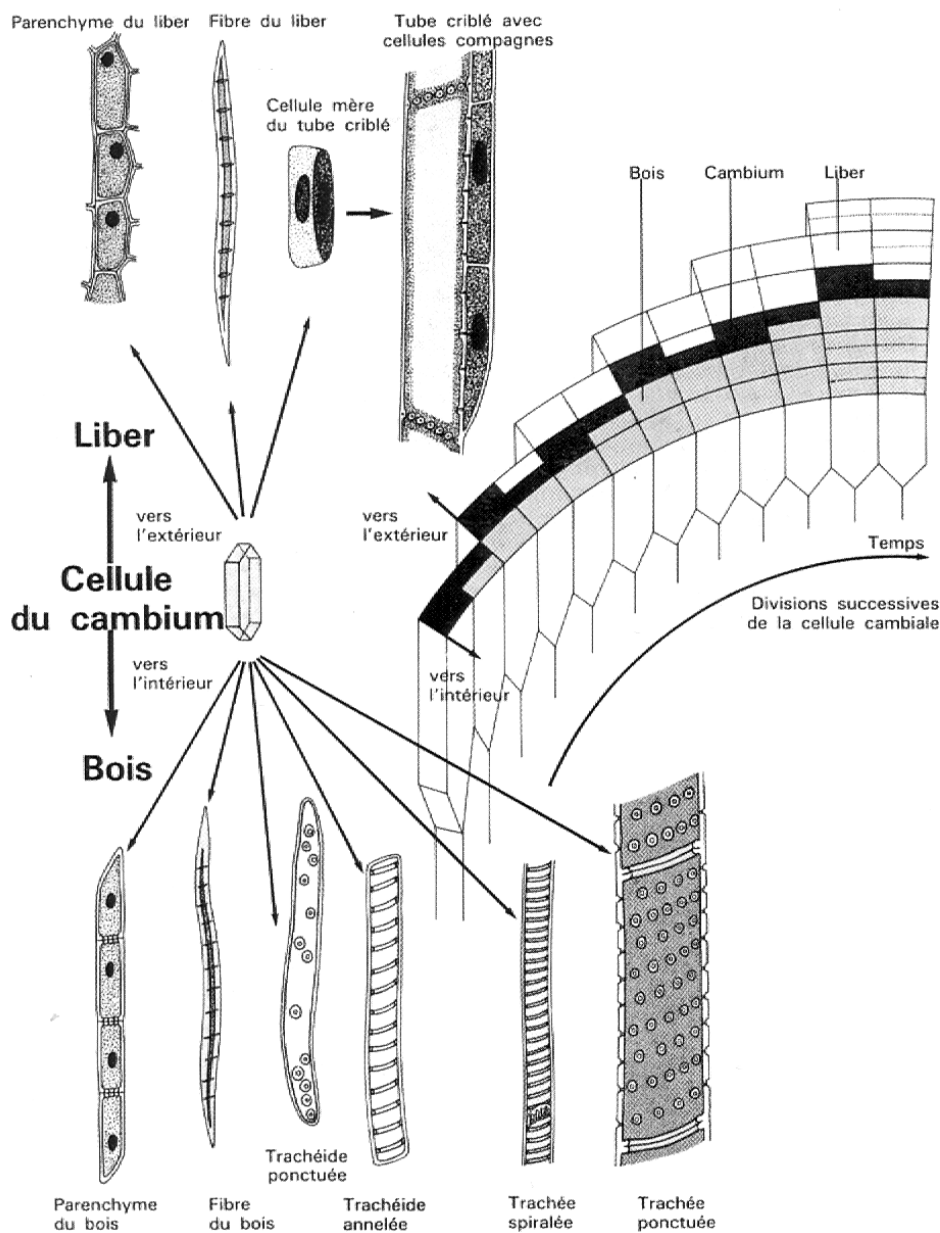


Figure 18 : Le cambium de la tige et ses dérivés. A droite : schéma de la succession temporelle des divisions tangentielles d'une cellule cambiale (en grisé sombre) vers l'intérieur et vers l'extérieur. A gauche : possibilités de différenciation d'une cellule cambiale en différents types de cellules du liber et du bois (Lüttge *et al.*, 2002).

La sève élaborée transporte les assimilats dans le liber, via les **cellules criblées** chez les résineux et via les **tubes criblés** chez les feuillus.

Ces structures sont constituées de cellules vivantes et contiennent un cytoplasme mais sont dépourvues de noyau ce qui les différencie des éléments conducteurs du xylème formé de cellules mortes.

#### Les éléments criblés

Chez les résineux, les cellules criblées correspondent, du point de vue phylogénétique, à la forme primitive des éléments conducteurs du phloème. Ce sont des cellules avec des parois transversales obliques et interconnectées par des aires criblées (zones de dépression de la paroi comportant de nombreux pores par lesquels passe le réticulum endoplasmique). Les éléments conducteurs sont constitués de l'alignement de plusieurs cellules criblées. Chez les feuillus, les tubes criblés sont phylogénétiquement plus évolués que les cellules criblées. Comme ces dernières, ils sont constitués d'éléments allongés assemblés en longues chaînes. Les parois transversales présentent des aires criblées et de plus, les parois longitudinales sont percées de nombreuses ponctuations pour permettre la circulation de la sève.

Le phellogène est localisé à l'extérieur par rapport au cambium. Il se développe à partir de cellules de parenchyme ou de collenchyme. Il donne naissance vers l'extérieur au **liège** (rhytidome ou suber) et vers l'intérieur au **phelloderme** (Figure 15). Au sens botanique du terme, le liège et le phelloderme forme l'**écorce**. Par contre, au sens forestier, l'écorce comprend tout ce qui est extérieur au bois (liber + écorce).

Le **périderme** remplace l'épiderme chez les vieilles tiges et il est constitué du liège, du phellogène et du phelloderme.

#### Épaississement de la tige des monocotylédones

Chez certaines monocotylédones telles que le bananier et le palmier, l'épaississement de la tige se fait à proximité de l'apex et est dès lors considéré comme étant d'origine primaire, et est appelé méristème d'épaississement primaire.

### 3.4. Le bois

Le bois, appelé également xylème secondaire, est un ensemble de tissus résistants regroupant des cellules mortes et vivantes. Il joue un rôle de soutien, un rôle de conduction de la sève brute et un rôle de stockage (Figures 19 et 20). Il est issu du fonctionnement du cambium.

Les cellules filles formées dans la zone cambiale, se différencient en **cellules initiales longues** ou **fusiformes** et en **cellules initiales courtes** ou **de rayons** qui formeront les éléments cellulaires des différents tissus constitutifs du bois.

Les initiales fusiformes du cambium n'atteignent pas tout de suite leur taille caractéristique pour une essence donnée. Elles s'accroissent en diamètre et en longueur pendant les premières années de vie de l'arbre, ce qui correspond à la formation du bois dit juvénile.

Il existe deux systèmes croisés dans le bois : le système vertical (ou axial) comprenant les éléments longs, spécialisés principalement dans la conduction à longue distance et dans le soutien; et le système horizontal (ou radial) constitué de cellules courtes formant les rayons (Figure 21).

Dans le bois des gymnospermes, les trachéides assurent à la fois les fonctions de conduction et de soutien, le bois est dit **homoxylé**. A l'inverse, dans le bois des angiospermes, il y a séparation des fonctions : les fibres assurent le rôle de soutien et les vaisseaux, le rôle de conduction, le bois est dit **hétéroxylé**.

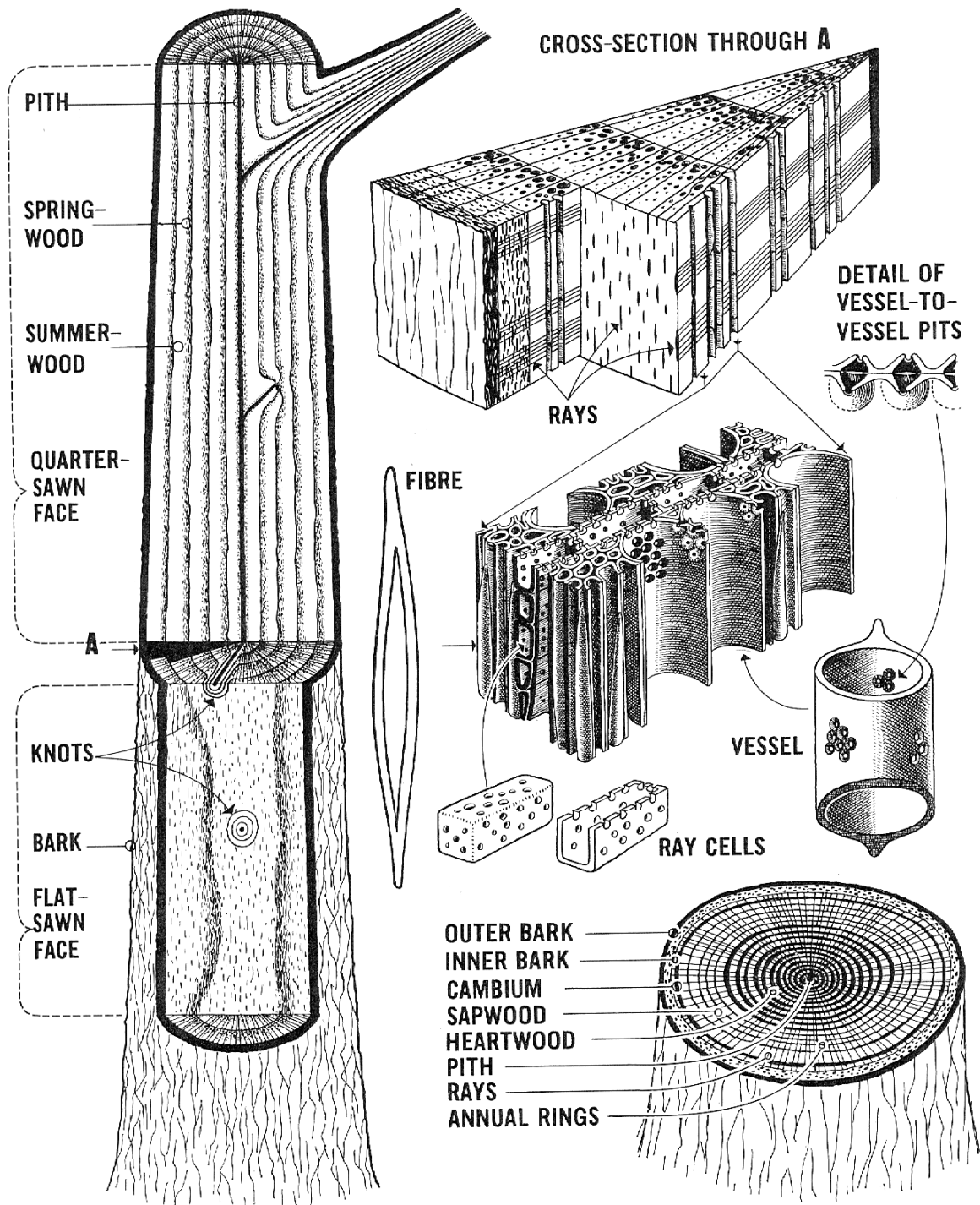


Figure 19 : Structure du bois (Anonyme, 1951).

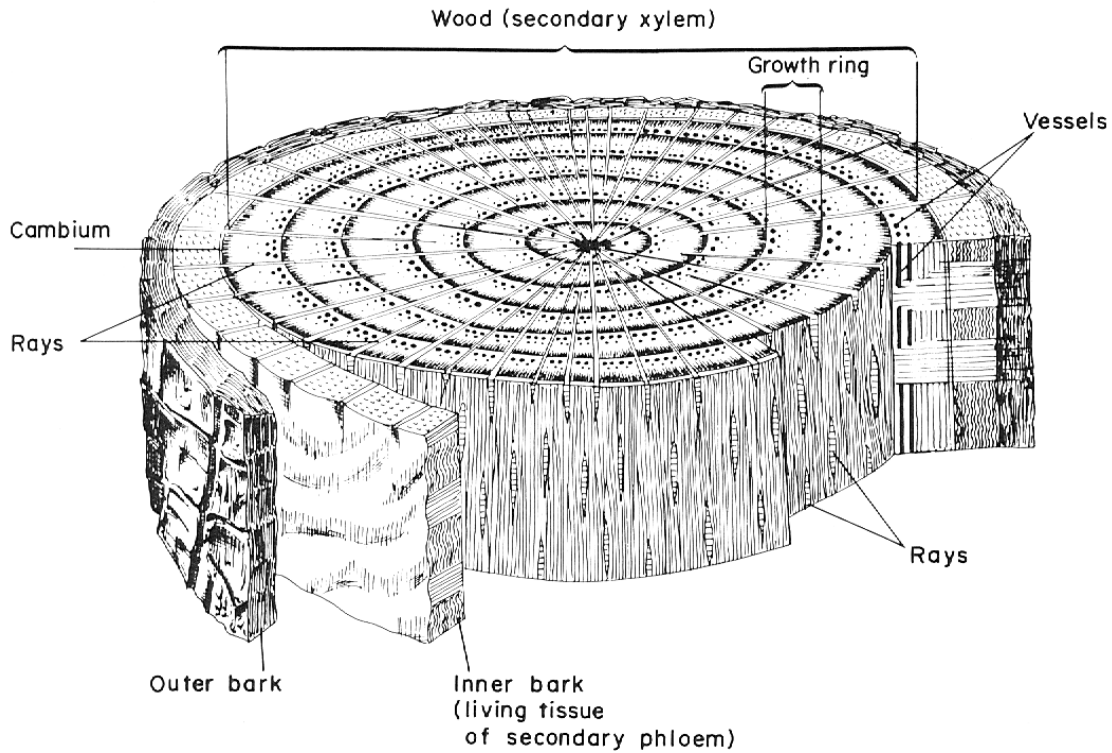


Figure 20 : Section transversale d'un tronc de feuillu (Fahn, 1990).

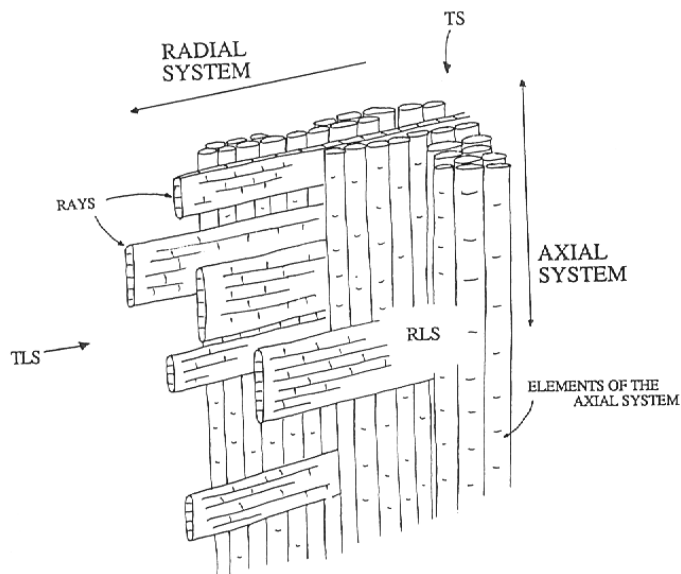


Figure 21 : Le système vertical et horizontal du bois (Hather, 2000).

### 3.4.1. Couche d'accroissement

Une **couche d'accroissement** correspond à la quantité de bois produite pendant une saison de végétation et elle contient tous les éléments caractéristiques du plan ligneux.

Sous nos latitudes caractérisées par un climat tempéré où l'alternance des saisons est bien marquée et où la période de végétation est délimitée dans le temps, la croissance des végétaux ligneux est rythmée par les saisons et conduit à la formation d'une succession

d'accroissements distincts, nommés **cernes annuels**. La limite des cernes est souvent décelable à l'œil nu par la différence marquée entre les tissus du bois final ou bois d'été de l'année précédente de couleur plus accentuée surtout chez les résineux et les tissus de bois initial ou bois de printemps de l'année suivante.

Par contre, dans les zones tropicales et subtropicales où le climat reste uniforme tout au long de l'année, l'activité de la photosynthèse est ininterrompue, et la limite entre couches d'accroissements n'existe pas ou se voit plus difficilement. La croissance est quasi continue et n'est interrompue que lors de la saison sèche qui engendre un arrêt de croissance visible en coupe transversale par la présence d'une ou plusieurs rangées de cellules de parenchyme terminal.

L'analyse de cerne est une « photographie rétrospective » de la vie de l'arbre. Cette méthode est d'un grand intérêt dans des domaines comme la dendrométrie, la climatologie, la physiologie et l'anatomie, et elle complète utilement l'analyse des dimensions relevées sur les arbres sur pied. Elle permet l'étude des rythmes de croissance et l'analyse des réactions des arbres aux paramètres écologiques externes (précipitations, stress hydrique, attaques parasitaires ...) et aux interventions humaines comme les éclaircies (Detienne *et al.*, 1998).

#### Détermination de l'âge d'un arbre

Chez les espèces de climat tempéré, un nouveau cerne est formé chaque année et le comptage de ces cernes permet de déterminer précisément l'âge de l'arbre. Néanmoins, le nombre complet de cernes d'accroissement ne peut être déterminé qu'à la base de celui-ci. En effet, à des niveaux plus élevés, il manque au centre du tronc autant d'années qu'il a fallu à l'arbre pour atteindre cette hauteur.

L'âge d'un arbre peut être déterminé également par le comptage des unités de croissance qui se mettent en place chaque année (Figure 22). Chez les résineux, une unité de croissance correspond à l'espace entre deux verticilles. Ainsi, le nombre total de verticilles correspond à l'âge de l'arbre. Cette détermination est beaucoup plus complexe pour les essences feuillues.

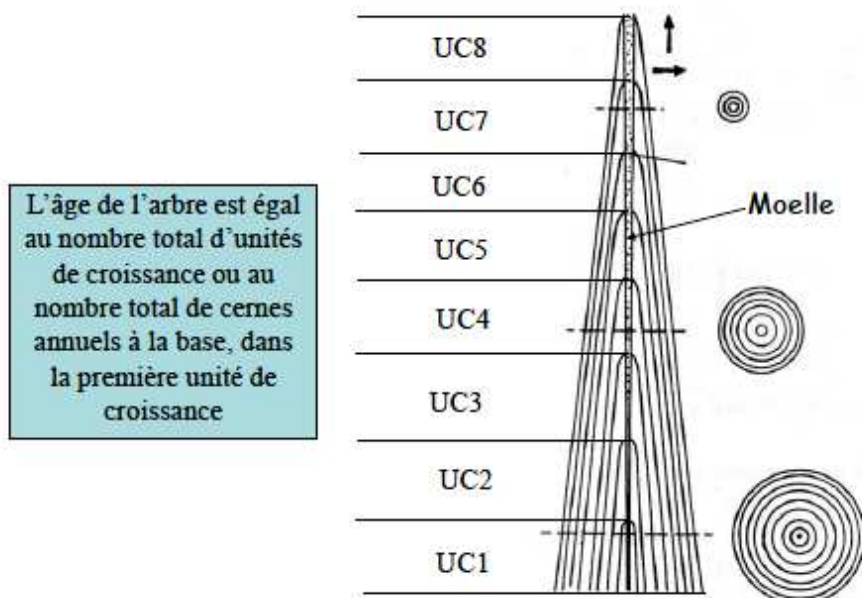


Figure 22 : Empilement des unités de croissance et des couches d'accroissement (<http://ecofog.cirad.fr/fr/enseignement/MasterBiotrop/supports/boismateriauarbreREMIBIOTROP.pdf>).

Toutes les espèces ont un potentiel de croissance qui leur est propre, avec des valeurs extrêmes plus ou moins éloignées. La variabilité est également tributaire de facteurs anthropiques (traitement sylvicole, intensité d'éclaircie, fertilisation ...) et environnementaux (sol, climat ...).

En l'absence de variations de ces facteurs externes, à une hauteur donnée, la largeur de cerne décroît depuis la moelle vers l'écorce. Chez les résineux, cette chute est brutale à la limite du bois juvénile. Pour une année donnée, la largeur du cerne augmente du bas vers le haut.

Les relations qui unissent la largeur des cernes aux propriétés mécaniques ne sont pas identiques pour toutes les espèces. D'autre part, pour une dimension d'exploitabilité donnée, les arbres à cernes larges sont plus jeunes.

La largeur des cernes n'est pas toujours régulière autour de l'arbre. Elle peut être systématiquement supérieure dans une orientation donnée et conduit à terme à un cœur excentré caractéristique des bois de réaction. Lorsque cet épaissement ne se produit pas systématiquement dans la même direction, la tige peut être tout de même circulaire (par exemple, le buis, le cèdre ...).

Au fur et à mesure de la croissance de l'arbre, la surface du cerne augmente. Sur un arbre de 100 ans, les dix derniers cernes produits représentent un volume de bois nettement supérieur à celui des dix premiers cernes.

La notion de cerne de croissance permet un langage commun entre les sylviculteurs et les utilisateurs du bois. Les premiers cherchent pour des raisons économiques à produire du bois le plus rapidement possible, ce qui implique la formation de cernes larges, alors que les seconds, du moins pour ce qui est des bois résineux, sont attentifs aux caractéristiques mécaniques et dès lors recherchent des bois à cernes étroits.

### 3.4.2. Bois initial et bois final

Chez les essences tempérées, le **bois initial** ou **bois de printemps** est la partie de la couche d'accroissement correspondant au bois formé au début de la saison de végétation. Le **bois final** ou **bois d'été** est la partie formée ultérieurement jusqu'à la fin de la saison de végétation.

Le bois initial se compose chez les résineux de cellules courtes, ayant une large section et des parois minces, faiblement résistantes et très déformables. Sa structure légère lui confère une faible densité. Chez les feuillus, le bois initial est marqué par la présence de nombreux et larges vaisseaux (Figure 23).

Le bois final est reconnaissable par la présence de cellules de plus faible section, plus longues, aux parois épaisses (le lumen pouvant être entièrement obstrué) et par conséquent, plus denses, moins déformables et plus résistantes mécaniquement.

Chez les résineux, la différence entre le bois initial et le bois final se marque par une différence de couleur dans le cerne. Le bois final apparaît plus sombre. La transition peut être brutale comme chez le mélèze (Figure 24) ou progressive comme pour l'épicéa.

Chez les feuillus, le bois final se caractérise par des vaisseaux moins nombreux et de plus petit diamètre et par conséquent, une proportion de tissu fibreux plus importante.

Le passage du bois initial au bois final serait conditionné par la production de substances hormonales (auxine) produites dans le méristème apical. Ce passage induit une variation intra-cerne de la masse volumique.

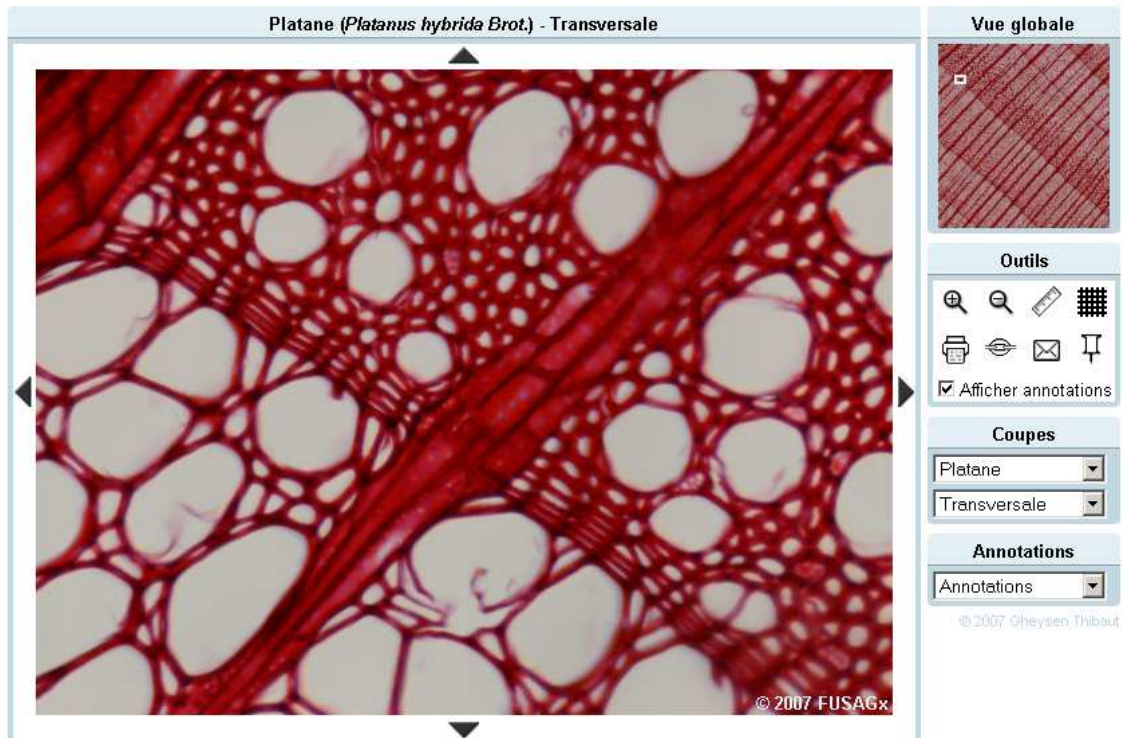


Figure 23 : En coupe transversale, limite de cernes entre deux années chez le platane.



Figure 24 : En coupe transversale, limite de cernes entre deux années chez le mélèze.

### 3.4.3. Texture

La **texture** exprime le rapport entre la largeur du bois final et la largeur totale du cerne. Cette notion n'a de sens que pour les essences feuillues hétérogènes et les résineux chez lesquels on distingue une différence entre le bois initial et le bois final.

La texture et surtout la différence de densité entre le bois initial et le bois final, constituent des critères importants pour juger des qualités mécaniques et technologiques d'un bois.

Chez les feuillus, une croissance lente est synonyme de texture faible (appréciée pour le tranchage, l'ébénisterie et la sculpture). A l'inverse, chez les résineux, une croissance lente est synonyme de texture forte (appréciée pour la structure).

## 4. Composition chimique du bois

Le bois est constitué de composants chimiques élémentaires, lesquels s'associent pour former les macromolécules constituant les parois cellulaires des différents tissus retrouvés dans le bois. A ces éléments viennent s'ajouter l'eau et des minéraux.

### 4.1. Constituants élémentaires

Les **composants élémentaires** du bois sont au nombre de quatre, le **carbone**, l'**oxygène**, l'**hydrogène** et l'**azote**, dans les proportions pondérales suivantes, qui varient peu d'une essence à l'autre :

- Carbone	50%
- Oxygène	43%
- Hydrogène	6%
- Azote	0,5% en moyenne

Le complément provient d'**éléments minéraux** (calcium, potassium, magnésium, carbonates, sulfates, silicates et phosphates) qui représentent entre 0,1 et 1% chez les bois des régions tempérées et jusqu'à 5% chez les bois des régions tropicales. Ils se retrouvent dans les cendres.

### 4.2. Composants principaux

Il est nécessaire de faire une distinction entre les principales macromolécules constituant la paroi cellulaire, la cellulose, les hémicelluloses et la lignine, qui sont présentes dans toutes les essences et les composants mineurs à faible poids moléculaire tels que les matières extractibles et les minéraux qui sont plus spécifiques en terme de quantité et de type en fonction de l'espèce considérée (Figures 25 et 26). Ces composants mineurs, bien qu'ils ne représentent qu'un faible pourcentage de la masse du bois, peuvent avoir une influence importante sur ses propriétés par exemple, son comportement chimique, la prise de la colle et de la peinture et particulièrement sur sa durabilité.

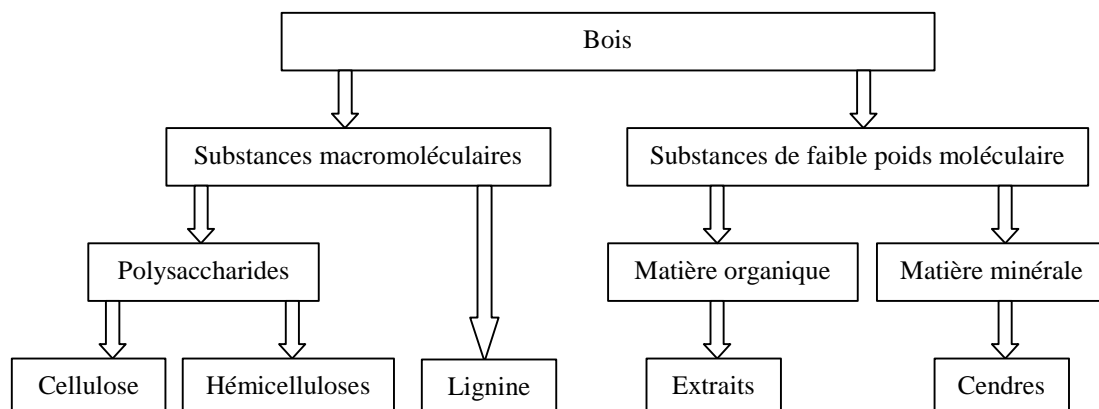


Figure 25 : Schéma général de la composition chimique du bois (d'après Fengel et Wegener, 1989).

Dans les bois des zones tempérées, la proportion des composés à haut poids moléculaire contenus dans la paroi cellulaire représente 97 à 99% du poids du matériau bois anhydre. Chez les arbres tropicaux, cette valeur est plus faible, environ 90%. Les polysaccharides (cellulose et hémicelluloses) représentent environ 65 à 75% du poids du matériau bois anhydre.

Les proportions et la composition chimique de la lignine et des hémicelluloses diffèrent entre les résineux et les feuillus tandis que la proportion de cellulose reste inchangée suivant le bois considéré.

La cellulose et une partie des hémicelluloses forment l'ossature de la paroi cellulaire et la lignine incrustée dans celle-ci forme le liant.

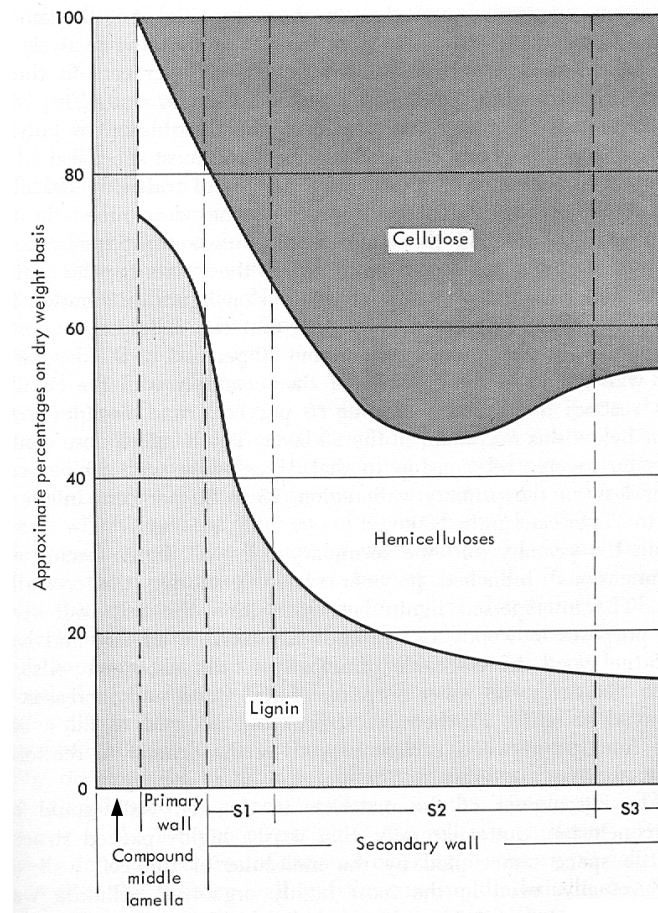


Figure 26 : Proportion de cellulose, hémicelluloses et lignine présentes dans les différentes couches de la paroi cellulaire (Panshin *et al.*, 1964).

### 4.3. Cellulose

La **cellulose** est le composé organique le plus synthétisé sur Terre et le principal constituant chimique des parois secondaires des cellules du bois. Elle représente entre 40 et 50% du poids anhydre du bois.

La cellulose est un polysaccharide comme l'hémicellulose mais elle est constituée d'un seul sucre, le  $\beta$ -D-glucose. La molécule de cellulose est donc un polymère monotone et linéaire dont la formule est  $(C_6H_{10}O_5)^n$ , constitué d'un grand nombre de  $\beta$ -D (1-4) glucose qui sont organisés en chaînes. Deux unités de glucose adjacentes sont liées par élimination d'une molécule d'eau au niveau de leur groupe hydroxyle sur les atomes de carbone 1 et 4, et forment l'unité de base de la molécule de cellulose, appelée **cellobiose** (Figure 27). Une molécule de cellulose compte de 300 à 3 000 sous-unités de glucose.

Les chaînes de cellulose sont allongées, pouvant atteindre une longueur de 4  $\mu$ m et les éléments de glucose sont arrangés dans un seul plan. Les chaînes de cellulose sont associées entre elles pour former les **microfibrilles de cellulose** (voir point 5.1). Ces dernières sont orientées de manière bien déterminée dans les différentes couches de la paroi cellulaire.

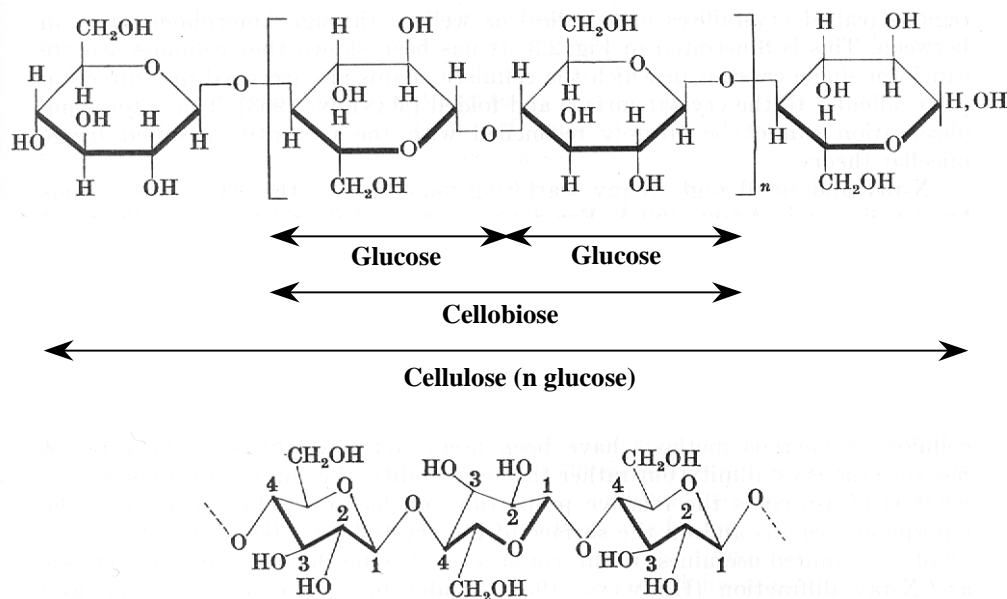
Compte tenu de ses propriétés physiques, la cellulose constitue le principal composé structural de la paroi cellulaire des plantes. La cellulose est synthétisée au niveau des parois primaires et secondaires des cellules.

La cellulose est insoluble dans la plupart des solvants usuels.

Le groupement OH en position C1 a des propriétés réductrices, alors que celui en C4 à l'autre extrémité de la chaîne a un hydroxyle alcoolique non réducteur.

La cellulose sert de matière première industrielle pour la fabrication de nombreux produits (papier, isolant, explosif, liant, matériaux de construction).

Les agents biologiques (champignons et insectes) assurent la réversibilité de la formation de la cellulose. Ces agents de dégradation du bois se nourrissent de la cellulose comme matière énergétique en dégradant grâce à leur arsenal enzymatique les hydrates de carbone.



Vue en 3D d'un segment d'une chaîne de cellulose

Figure 27 : Structure de la cellulose (d'après Kollmann et Côté, 1968).

#### 4.4. Hémicelluloses

Les **hémicelluloses** servent de matière de remplissage dans les vides laissés par les microfibrilles de cellulose. Elles représentent environ 25% du poids anhydre des résineux et 30% des feuillus. Elles se différencient de la cellulose par des unités différentes d'oses, par des chaînes moléculaires beaucoup plus courtes et par des ramifications sur la chaîne principale.

Les hémicelluloses, aussi appelées pseudocelluloses, sont constituées de divers polysaccharides non cellulosiques, de faible poids moléculaire de 180 à 1000.

La chaîne principale d'une hémicellulose peut être constituée d'un, deux ou plusieurs oses différents. Les molécules d'hémicelluloses sont construites principalement à partir de pentosanes (arabinose, xylose), d'hexosanes (fructose, glucose, galactose, mannose, rhamnose) et divers sucres neutres méthylés (Figure 28). De 150 à 300 sucres différents ont été identifiés dans les molécules d'hémicelluloses.

Néanmoins, les hémicelluloses diffèrent entre les feuillus et les résineux, celles-ci étant nettement plus complexes chez ces derniers.

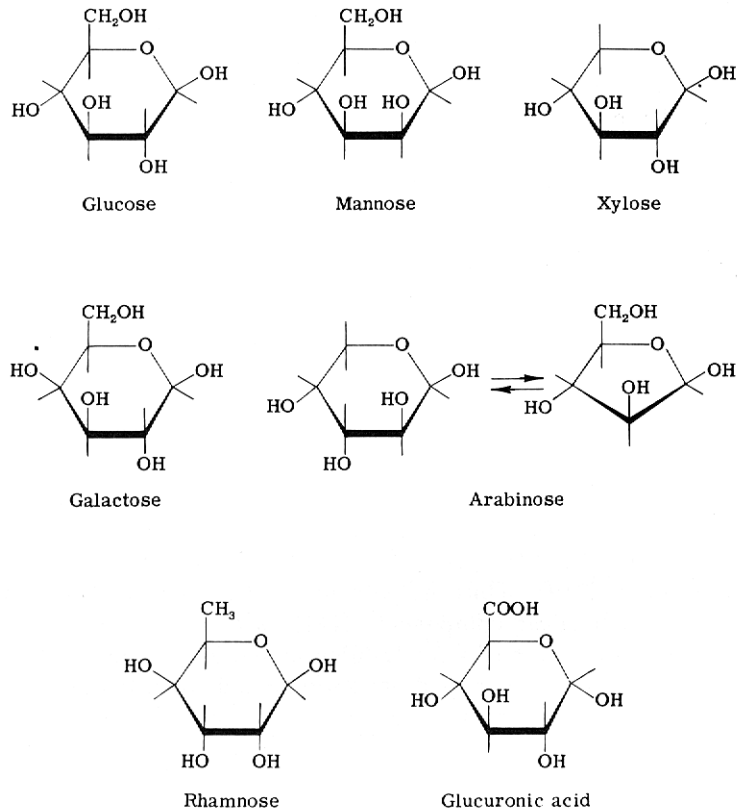


Figure 28 : Structure des monomères constitutifs des hémicelluloses (Wenzl, 1970).

#### 4.5. Lignine

Après la cellulose et les hémicelluloses, la **lignine** constitue le polymère organique le plus abondant dans le bois. La lignine est le composant de la paroi cellulaire qui différencie le bois des autres matériaux cellulotiques produits par la nature.

Le contenu en lignine du bois est plus abondant dans les résineux (25 à 35% ) et les feuillus de régions tropicales que dans les feuillus de régions tempérées (15 à 25%).

La lignine est une substance amorphe, c'est-à-dire non cristalline, molle et sans rigidité, localisée dans la lamelle moyenne et dans les parois primaire et secondaire (Figure26). Elle est incorporée dans les parois à la fin du développement cellulaire par incrustation entre les fibrilles de cellulose. La fin de la lignification de la paroi coïncide avec la disparition du protoplasme et la mort de la cellule.

Les lignines sont des macromolécules tridimensionnelles formées de monomères de phénylpropane (Figure 29). Le monomère de phénylpropane existe sous deux formes caractéristiques différentes. La forme guaiacyl présente deux groupes méthoxyl sur le noyau aromatique, tandis que la forme syringyl présente un seul groupe méthoxyl. La lignine des gymnospermes est constituée uniquement d'unités guaiacyl, tandis que les angiospermes sont constitués à la fois de guaiacyl et syringyl. La polymérisation des monomères peut se réaliser par des liaisons carbone-carbone entre chaînes, entre noyaux ou entre chaîne et noyau (Figure 30). Dès lors, le terme "lignine" fait référence à un ensemble de substances qui ont une composition chimique identique mais qui se différencient par leur structure.

Il est admis aujourd'hui que la lignine n'est pas simplement déposée entre les polysaccharides de la paroi cellulaire mais qu'elle est en partie liée avec eux.

La lignine accroît les propriétés de résistance mécanique du bois et joue également un rôle de barrière de protection contre les attaques fongiques.

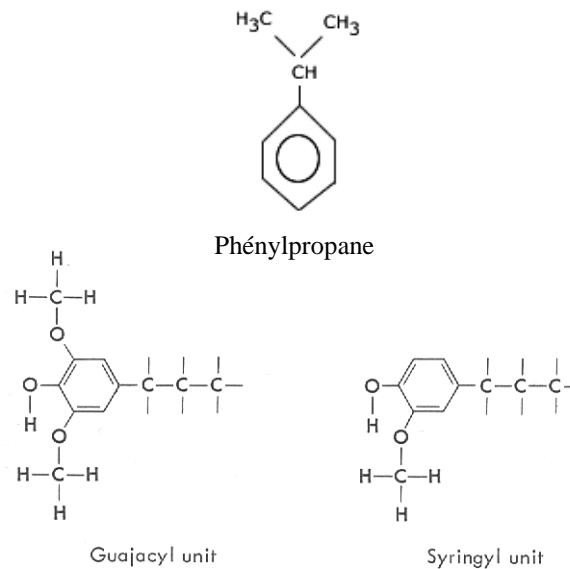


Figure 29 : Le phénylpropane est composé d'un noyau aromatique suivi d'une chaîne à trois carbones et il existe sous deux formes : guaiacyl et syringyl (Panshin *et al.*, 1964).

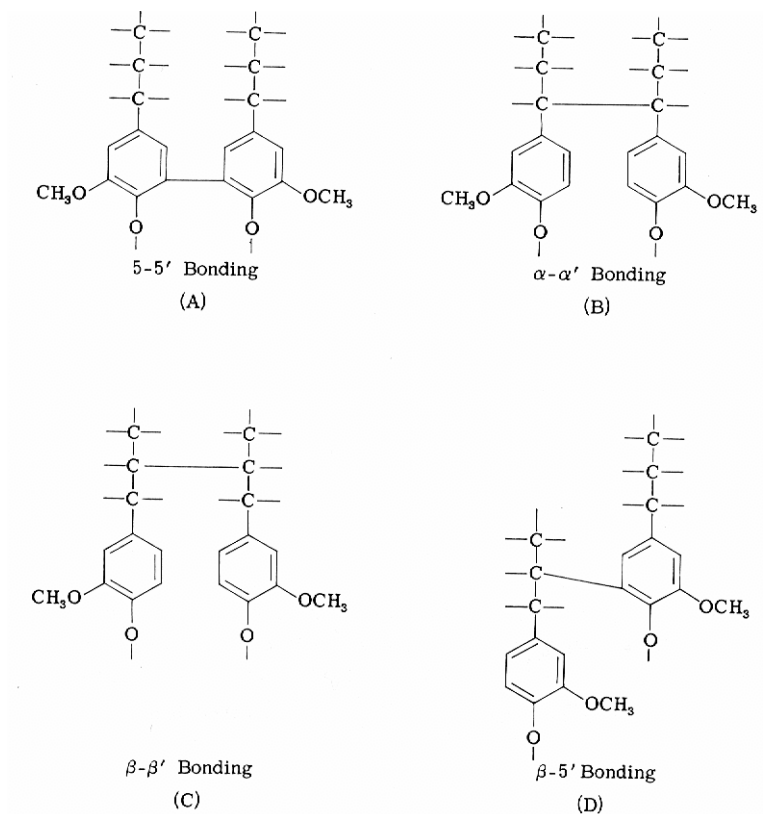


Figure 30 : Types de liaison entre les monomères de phénylpropane : carbone-carbone entre chaînes, entre noyaux ou entre chaîne et noyau (Wenzl, 1970).

#### 4.6. Composants mineurs

Les composants mineurs sont des substances de faible poids moléculaire qui constituent les extraits du bois et les cendres. Bien qu'elles représentent un faible pourcentage de la masse du bois, elles peuvent avoir une influence importante sur les propriétés et les qualités de transformation des bois. D'autres constituants, tels que certains ions métalliques, sont essentiels à la croissance de l'arbre.

Ces substances possèdent des structures chimiques très différentes et par conséquent, il est difficile d'établir une classification claire et compréhensive. Néanmoins, elles peuvent être classées en matière organique et en matière minérale.

Les **matières organiques** représentent les **extraits du bois** et recouvrent un grand nombre de constituants. Certaines substances extractibles peuvent être toxiques pour les bactéries, les champignons et les insectes. D'autres extraits confèrent une couleur ou une odeur au bois. Une partie de ces extraits est parfois repris sous le nom de résine, terme qui ne caractérise pas des constituants chimiques mais plutôt un aspect physique.

On retrouve :

- des composés phénoliques (les tanins, la vanilline, les flavonoïdes, les lignanes et les stilbènes);
- des terpènes;
- des acides aliphatiques (les acides gras);
- des alcools aliphatiques.

Les **matières inorganiques ou minérales** représentent les **cendres** qui sont produites lors de la combustion du bois. Lorsque l'arbre est encore vivant, elles constituent les inclusions minérales. Ces minéraux ne sont pas incorporés dans la paroi cellulaire mais sont déposés dans les cellules parenchymateuses et les fibres libriformes.

Les essences des zones tempérées contiennent essentiellement du potassium, du calcium et du magnésium. Les bois tropicaux contiennent, en plus et de façon prédominante, du silicium sous forme de silice.

#### 4.7. Inclusions minérales

Des dépôts de minéraux peuvent être présents dans les lacunes du bois. D'origine physiologique, ils sont plutôt rares chez les conifères. Néanmoins, de petits cristaux d'oxalate de calcium peuvent être observés dans des cellules de rayons des genres *Abies*, *Cedrus* et *Picea*.

Différentes formes de cristaux sont rencontrées chez les feuillus et tout particulièrement chez de nombreuses essences tropicales. Les **cristaux prismatiques** (rhomboédrique ou octaédrique) sont les plus fréquents. Les druses ou mâcles (*Ginkgo biloba*, *Prunus avium*, iroko), les cristaux aciculaires (*Gmelina arborea*), les rafides (*Vitis vinifera*), les styloïdes (*Terminalia amazonica*) et les cristaux de sable constituent les autres formes de minéraux rencontrées dans le bois (Figure 31).

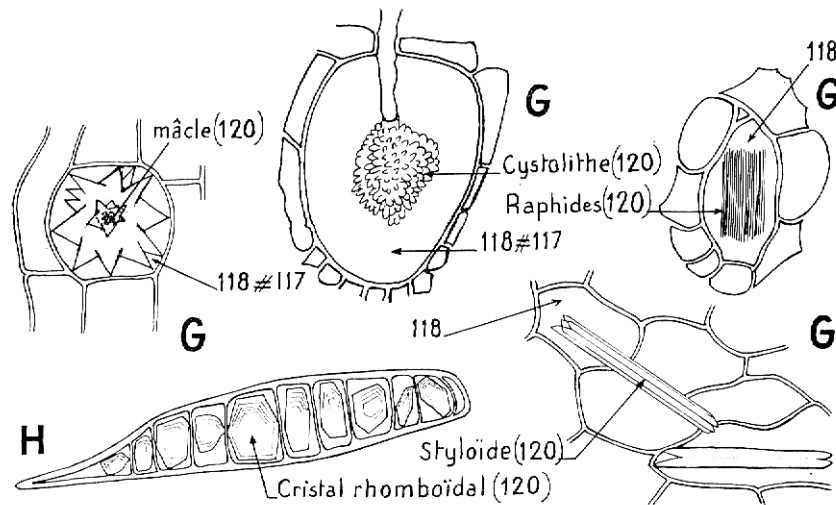
Les **mâcles** sont des agrégats de cristaux de forme étoilée, libres dans la cellule et nommé « cristal en oursin » quand l'agrégat est hérissé en pointes. Les **cristaux aciculaires** sont minces en forme d'aiguille. Les **rafides** sont des cristaux aciculaires qui sont en général rassemblés parallèlement en gerbes. Les **styloïdes** sont des cristaux allongés, en général quatre fois aussi longs que larges, avec des extrémités pointues ou carrées.

La présence de cristaux de silice abrasifs complique le sciage du bois mais par contre, limite les attaques de taret. Des oxalates et carbonates de calcium peuvent aussi précipiter sous forme de cristaux dans le bois.

Ces minéraux s'observent le plus fréquemment dans les cellules de parenchyme vertical et de rayons, ainsi que dans les fibres septées.

Leur présence provoque l'érouissage prématuré des outils de coupe.

Leur présence sert parfois de critère d'identification de certaines espèces.



— G. Cellules cristallifères (118). — H. Cellule cloisonnée de parenchyme cristallifère (119).

117, idioblaste ; 120, différents cristaux

Figure 31 : Différentes formes de cristaux (Normand, 1972).

#### 4.8. Eau

Le bois a des propriétés hygroscopiques, c'est-à-dire qu'il est susceptible d'équilibrer son humidité par absorption ou désorption avec l'humidité de l'atmosphère environnant. Dans le bois, l'eau se retrouve sous forme liquide dans les parois et/ou sous forme vapeur dans les cavités cellulaires. Elle constitue un des composants majeurs du bois et peut représenter chez certaines espèces telle que le peuplier plus de 200% du poids anhydre. L'eau est essentielle au métabolisme de l'arbre.

Le caractère hygroscopique du bois provient de ses composants chimiques principaux : cellulose, hémicellulose et certains extraits qui sont des substances hygroscopiques.

La fixation des molécules d'eau dans la paroi cellulaire par des ponts hydrogènes sur les groupements hydroxyles des chaînes de cellulose forme une couche monomoléculaire d'eau qui induit le gonflement des zones amorphes des microfibrilles de cellulose : le bois commence alors à gonfler. Ensuite d'autres forces d'attractions dites de capillarité agissant sur les molécules d'eau induisent la formation de couches polymoléculaires qui accentuent le gonflement. Cette eau est appelée l'**eau liée**. Lorsque les parois sont gorgées d'eau, le **point de saturation des fibres** est atteint et le taux d'humidité du bois est alors en moyenne de 30% mais varie d'une espèce à l'autre (entre 22 et 40%). Au delà de ce point, l'eau se dépose dans le lumen des cellules et est appelée l'**eau libre**. Celle-ci n'induit pas le gonflement des parois et donc du bois.

La saturation complète d'un morceau de bois est atteinte après une longue immersion. A ce stade, toute l'eau est sous forme liquide. A l'état totalement saturé, le taux d'humidité d'un bois tel que le balsa peut atteindre 1000%.

Dans l'arbre sur pied, le taux d'humidité est extrêmement variable en fonction de l'espèce, de la position dans l'arbre et de la saison considérée ... Généralement, la saturation du bois des arbres sur pied n'est pas complète : si les parois peuvent être saturées, le lumen des cellules n'est que partiellement rempli d'eau, ce stade correspond au bois vert (valable également pour le bois fraîchement abattu). En fonction des saisons, des variations de l'humidité sont observables, le contenu en eau du bois en hiver étant généralement plus élevé. Le duramen des résineux sur pied contient moins d'eau que l'aubier qui peut être presque saturé en eau. L'humidité augmente généralement de la base vers la cime. Chez les feuillus, le taux d'humidité est généralement plus faible, la différence aubier-duramen est moins marquée et parfois même inversée. La distribution verticale dans l'arbre ne montre pas de tendance claire. Après la coupe de l'arbre, le bois exposé à l'air va progressivement sécher, par évaporation en surface. L'eau contenue en profondeur va progressivement migrer suivant un gradient jusqu'au moment où l'humidité du bois est en équilibre avec l'humidité de l'air ambiant. Dans un premier temps, toute l'eau libre va être éliminée pour arriver au stade du point de saturation des fibres. En-deçà de cette limite, le départ de l'eau liée dans la paroi cellulaire va provoquer des variations de volume, le bois se rétracte en séchant. En Europe, à l'équilibre, en fonction des conditions d'ambiance, le taux d'humidité du bois variera entre 6 et 26%. L'état ultime correspond au bois anhydre (0% d'humidité) dans lequel toute l'eau libre et toute l'eau liée ont disparu. Cet état est atteint artificiellement par une exposition dans une étuve chauffée à 103°C jusqu'à poids constant.

L'eau est indispensable à la vie de l'arbre mais les propriétés du bois sont affectées par son taux d'humidité et son caractère hygroscopique constitue la principale limitation à une utilisation plus importante en tant que matériau. Que ce soit sur l'arbre encore vivant ou sur les débits, les problèmes liés à l'eau sont nombreux et variés : développement de pourritures, apparition de gélivures, augmentation du poids de la grume ou de la planche, diminution du pouvoir énergétique, développement de retraits et de déformations liées au séchage, réduction des propriétés mécaniques, complication des opérations de collage et de finition... Au titre des avantages, on notera néanmoins que le sciage, le déroulage ou le tranchage sont rendus plus aisés sur du bois humide.

#### **4.9. Acidité du bois**

L'acidité provient des extraits du bois. Tous les bois sont généralement acides, mais certaines essences le sont plus que d'autres. Ainsi, le chêne peut avoir un pH de 3,5; le douglas de 3,3 et le western red cedar un pH encore moins élevé. Globalement, le pH des bois résineux et feuillus tempérés s'étale entre 3,3 et 6,4 alors que celui des bois tropicaux est compris entre 3,7 et 8,0. Cette acidité est à l'origine de problèmes de réactions avec les métaux qui provoquent des colorations très prononcées (taches de rouille), de réactions négatives avec les colles et de réactions avec les produits de préservation et de finition. Il y a peu de différence entre le pH de l'aubier et celui du duramen. A titre indicatif, le tableau ci-après donne les valeurs de pH de quelques bois indigènes.

Tableau 1 : Acidités comparées de quelques essences tempérées (Roux et Anquetil, 1994).

Essences	Acidité (pH)	Classement
Frêne	6	Essences non ou peu acides
Hêtre	5,5	
Pin sylvestre Pin maritime Sapin Epicéa Peuplier Bouleau	4,5 à 5	
Chêne Châtaignier Douglas Pin d'Orégon	3 à 4	Essences acides
Western red cedar	2,5 à 3	

#### Corrosion chimique

Le bois de certaines essences présente une résistance relativement élevée spécialement aux acides dilués et, en partie aussi, aux bases. Ces bois peuvent ainsi être utilisés pour des constructions et des récipients dans certaines branches de l'industrie chimique.

Les acides fortement concentrés et les vapeurs acides peuvent avec le temps réduire fortement la résistance du bois.

## 5. Paroi cellulaire

### 5.1. Microfibrilles de cellulose

L'architecture de la paroi cellulaire est largement déterminée par la cellulose qui forme sa structure. Une centaine de molécules de cellulose s'associent parallèlement entre elles par des liaisons hydrogènes pour former un **faisceau micellaire** ou **fibrille élémentaire** (Lüttge *et al.*, 2002) (Figure 32).

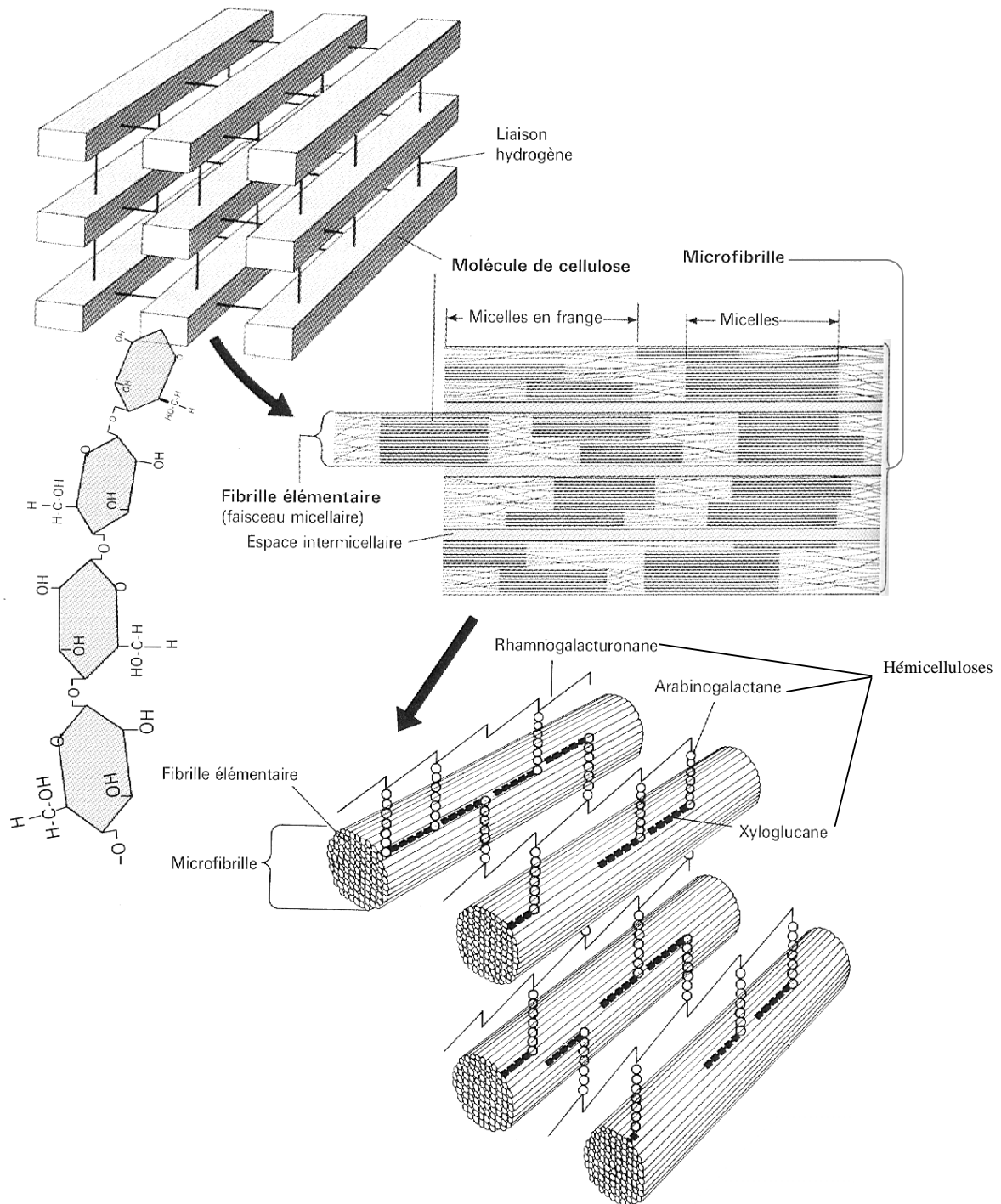


Figure 32 : Structure des fibrilles de cellulose de la paroi cellulaire (Lüttge *et al.*, 2002).

## Faisceau micellaire

Ces ponts hydrogènes maintiennent une disposition constante entre les molécules de cellulose parallèles dans le faisceau micellaire, tout en le stabilisant. Les molécules de cellulose sont ainsi tellement organisées en certains endroits du faisceau micellaire qu'il se forme une **structure cristalline** ; ces zones cristallines sont des **micelles**. Les micelles alternent avec des zones où les molécules de cellulose sont parallèles sans être organisées en structure cristalline, ces zones moins structurées sont alors appelées **micelles en frange**.

Une vingtaine de faisceaux micellaires s'assemblent pour former une **microfibrille de cellulose**. Les espaces entre les faisceaux micellaires sont appelés **espaces intermicellaires** et ont une largeur d'environ 1 nm. Les molécules d'eau et autres petites molécules peuvent pénétrer dans ces espaces. Le diamètre d'une microfibrille est de 20 à 30 nm environ et elle est donc visible au microscope électronique. A leur tour, les microfibrilles peuvent s'assembler en **macrofibrilles** d'un diamètre de 400 nm environ avec des espaces interfibrillaires de 10 nm environ entre les microfibrilles dans lesquels des molécules d'eau, d'hémicelluloses et de lignine peuvent y pénétrer.

La structure cristalline de la cellulose est responsable du comportement anisotrope de la paroi.

### 5.2. Structure de la paroi cellulaire

La paroi cellulaire est un édifice hétérogène constitué par une armature microfibrillaire de cellulose enrobée dans une matrice amorphe composée d'hémicelluloses, pectines et protéines structurales et incrustée de lignines (voir Figure 26). Beaucoup d'autres substances organiques et inorganiques, ainsi que de l'eau, sont présentes dans les parois cellulaires en quantité variable en fonction de la nature de la cellule.

La paroi est composée de trois couches principales, la lamelle moyenne ou couche intercellulaire, la paroi primaire et la paroi secondaire.

La **lamelle moyenne** est le ciment qui lie ensemble les cellules pour former les tissus. Elle est localisée entre les parois primaires de deux cellules adjacentes. A ce titre, elle n'est pas considérée à proprement parler comme une paroi mais plutôt comme une couche intercellulaire. Elle est formée majoritairement (90%) de lignine. Elle est isotrope et dépourvue de cellulose. Son épaisseur varie entre 1 et 4  $\mu\text{m}$ .

La **paroi primaire** est élaborée de la lamelle moyenne vers l'intérieur de la cellule. Son épaisseur est d'environ 0,1  $\mu\text{m}$ . Cette paroi est composée d'une armature de fibres de cellulose (environ 10%), d'hémicelluloses et de chaînes peptidiques, le tout dans un ciment complexe de pectines. Elle a une double spécificité car elle doit être à la fois rigide pour jouer le rôle de squelette (bien qu'elle soit relativement souple par rapport à la paroi secondaire) et assurer une plasticité/élasticité permettant la croissance et la division cellulaire. Ultérieurement, de la lignine s'incruste dans les espaces interfibrillaires.

La **paroi secondaire** se forme lors de la différenciation cellulaire sur la surface interne de la paroi primaire lorsque la cellule a terminé sa croissance. Elle est constituée des mêmes éléments que la paroi primaire dans lesquels s'est insérée de la lignine. Elle est plus rigide que la paroi primaire et ne permet plus la croissance cellulaire. On constate une plus grande proportion de cellulose, dont les microfibrilles sont disposées en hélice et en strate, et le sens de rotation de l'hélice change d'une strate à l'autre.

Dans la majorité des trachéides et des fibres, la paroi secondaire se compose de trois couches (Figure 33) :

- la **couche externe ou S1** est sous jacente à la paroi primaire. Dans cette couche généralement très mince (environ 1  $\mu\text{m}$ ), les microfibrilles de cellulose sont inclinées à 40-45° par rapport à l'axe de la cellule;
- la **couche centrale ou S2** est la plus épaisse (variant entre 1 et 10  $\mu\text{m}$ ). L'angle des microfibrilles de cellulose varie entre 10 et 20°;
- la **couche interne ou S3** est très mince (environ 1  $\mu\text{m}$ ). Les microfibrilles de cellulose présentent une inclinaison similaire à la couche S1.

Dans certains cas, une de ces couches peut être absente de la paroi secondaire (par exemple, absence de S3 dans les cellules de bois de réaction chez le peuplier).

Eventuellement, une paroi dite verruqueuse se dépose sur la face interne de la S3. Les principales formes de ces "ornements" internes sont des granulations très fines ou verrues, fréquentes chez les gymnospermes, parfois chez les dicotylédones (présentes dans les ponctuations dites ornées) et des bourrelets hélicoïdaux appelés épaissements spiralés.

La paroi forme l'enveloppe de la cellule et joue le rôle de support mécanique dans les plantes. L'épaisseur de la paroi diffère fortement en fonction du moment où la cellule est produite pendant la saison de végétation, en d'autre terme en fonction de sa position dans le cerne (bois de printemps et bois d'été).

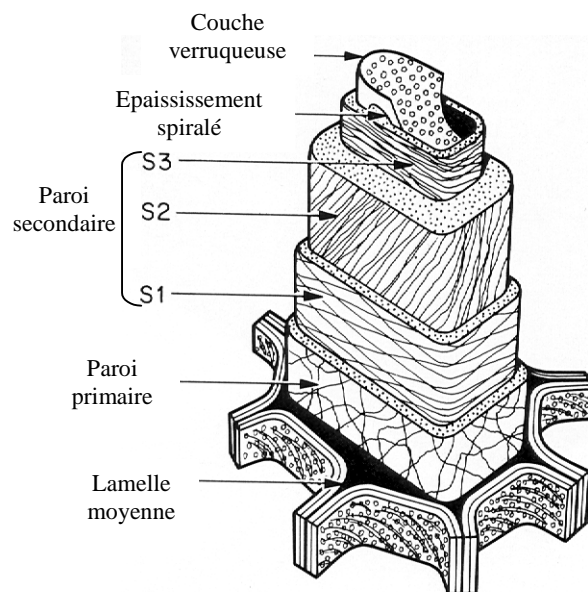


Figure 33 : Composition de la paroi cellulaire (Meylan et Butterfield, 1972).

### 5.3. Ponctuations

Les **ponctuations** sont des dépressions de la paroi secondaire d'une cellule (trachéides, fibres, vaisseaux, parenchyme) qui créent des ouvertures minuscules dans la paroi faisant communiquer des cellules adjacentes. Les ponctuations constituent des voies de passage des substances d'une cellule à l'autre, ces cellules pouvant appartenir à deux tissus différents (par exemple, entre vaisseaux et rayons).

Quand deux ponctuations sont en vis-à-vis dans les parois de deux cellules contiguës, l'ensemble est appelé **couple de ponctuations**. Cependant, le terme "ponctuation" peut être utilisé pour désigner un "couple de ponctuation" pour autant que les deux ponctuations du couple soient de même nature (Figure 36).

Une ponctuation est constituée d'une **cavité** correspondant à l'espace compris à l'intérieur de la ponctuation depuis la **membrane** (constituée de la lamelle moyenne et de la paroi primaire) jusqu'à la **lumière** de la cellule. L'**orifice** de la ponctuation correspond à l'ouverture de la cavité débouchant dans la lumière de la cellule.

Il existe deux grands types de ponctuations :

- les **ponctuations simples** dont la cavité présente un diamètre constant de la membrane jusqu'à son ouverture (Figure 34);
- les **ponctuations aréolées** dont la cavité est plus large au niveau de la membrane qu'à son ouverture débouchant dans la lumière de la cellule (Figure 35). L'ouverture est située au sommet d'un dôme formé par le renflement de la paroi de la trachéide. La cavité ainsi ménagée s'appelle la chambre de la ponctuation. Le canal correspond au passage faisant communiquer la lumière de la cellule avec la chambre de la ponctuation. L'ouverture de la ponctuation peut avoir le même diamètre que le canal ou être étiré en fente (distendu, elliptique ou rétréci). Chez les conifères, le **torus** correspond à la partie centrale, épaissie, d'une ponctuation aréolée. Le diamètre du torus est plus large que l'ouverture de la ponctuation. Le **margo** correspond à la membrane poreuse autour du torus. L'**aréole** est la partie en surplomb de la paroi secondaire de la membrane cellulaire.

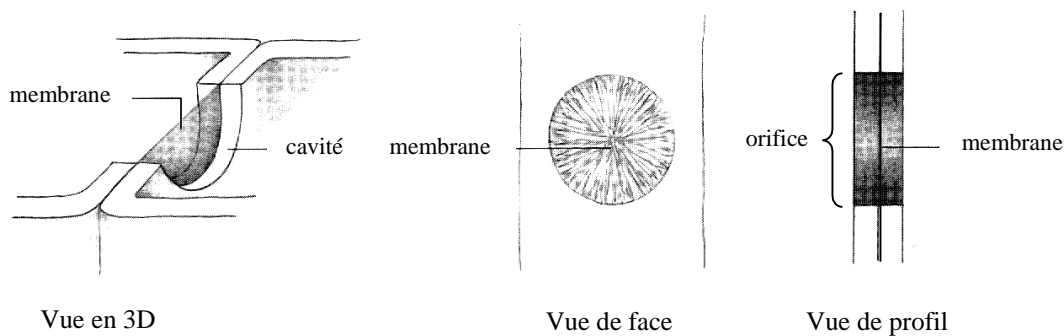


Figure 34 : Composition d'une ponctuation simple (Hoadley, 1990).

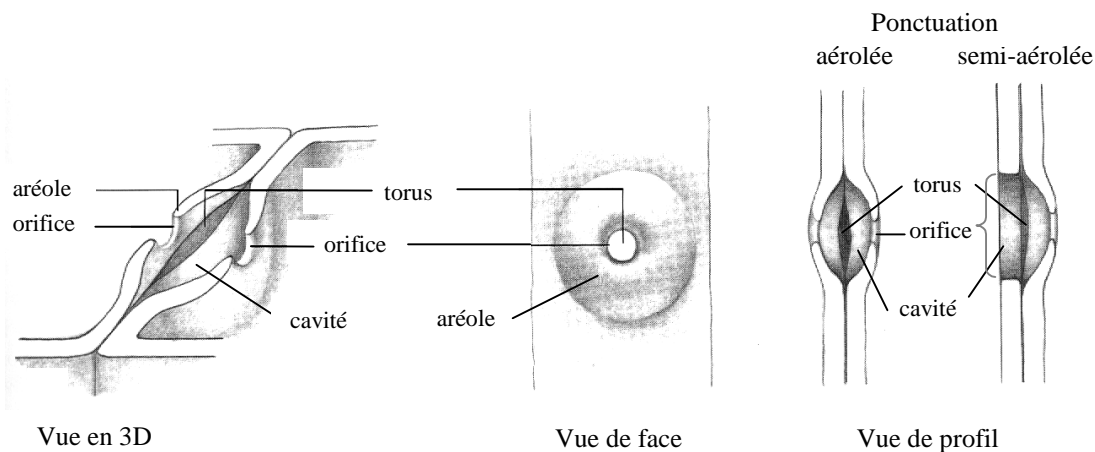


Figure 35 : Composition d'une ponctuation aréolée (Hoadley, 1990).

Les ponctuations peuvent se combiner pour former un couple de ponctuations (Figure 36) :

- **Couple de ponctuations borgnes**, lorsqu'une ponctuation n'a pas de correspondance dans la paroi d'une cellule voisine;
- **Couple de ponctuations semi-aréolées**, lorsqu'une ponctuation simple fait face à une ponctuation aréolée;
- **Couple de ponctuations aréolées**, lorsque ce sont deux ponctuations aréolées;
- **Couple de ponctuations simples**, lorsque ce sont deux ponctuations simples.

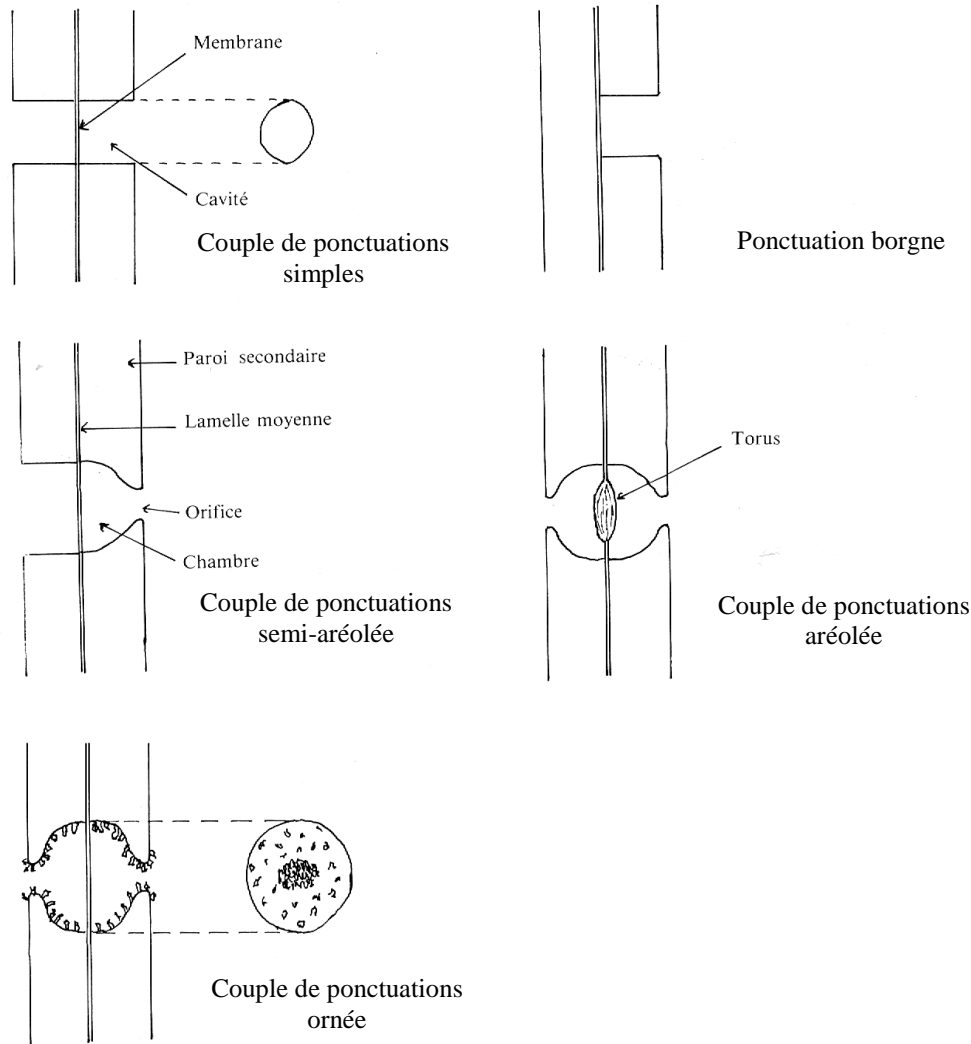


Figure 36 : Types de ponctuations (Detienne, 1988).

Les ponctuations simples se retrouvent généralement dans le parenchyme axial, les fibres libriformes et les rayons ligneux. Les ponctuations aréolées se retrouvent dans les trachéides (y compris dans les trachéides transversales) et les fibres trachéides.

Chez les résineux, en coupe radiale, au niveau des **champs de croisement** (rectangles formés par les parois communes entre les cellules de rayons et les cellules de trachéides axiales), les ponctuations simples peuvent présenter différents faciès (Figures 37 et 38) :

- les **ponctuations pinoïdes** présentent un contour variable allant d'une forme arrondie plus ou moins régulière à celle d'une boutonnière plus ou moins large, observables dans les champs de croisement au niveau du bois initial de diverses espèces de *Pinus*;
- les **ponctuations fenestroides** sont en réalité des grosses ponctuations pinoïdes. Une ou deux ponctuations occupent pratiquement toute la surface du champ de croisement (par exemple, *Pinus sylvestris* et *Pinus strobus*);
- les **ponctuations cupressoides** se retrouvent dans le bois initial et présentent un orifice rétréci, ovoïde qui est relativement plus étroit que l'espace laissé de chaque côté entre l'orifice et l'aréole (par exemple chez les *Cupressus*);
- les **ponctuations picéoides** se retrouvent dans le bois initial et présentent un orifice étroit, souvent légèrement distendu (par exemple *Larix* et *Picea*);
- les **ponctuations taxoïdes** se retrouvent dans le bois initial et présentent un grand orifice rétréci, ovoïde à circulaire qui est plus large que l'espace laissé de chaque côté entre l'orifice et l'aréole (par exemple chez le *Sequoia*). L'aréole est réduite à un double croissant très fin.
- les **ponctuations araucarioïdes** sont typiques des *Araucariaceae*. Ces ponctuations sont principalement de type cupressoïde mais elles sont disposées en quinconce sur des lignes longitudinales (trois ou plus) avec une tendance au regroupement. Ces ponctuations ont souvent un contour polygonal.

Signalons que le type de ponctuation varie en général dans une même couche annuelle pour tendre vers le type picéoïde dans le bois final et c'est pour cette raison qu'il faut les observer dans le bois initial.

Dans le bois initial des trachéides des résineux, les ponctuations aréolées peuvent être parfois bisériées (*Larix* spp.) ou trisériées (*Sequoia sempervirens*) ou rarement quadrisériées (Figure 39).

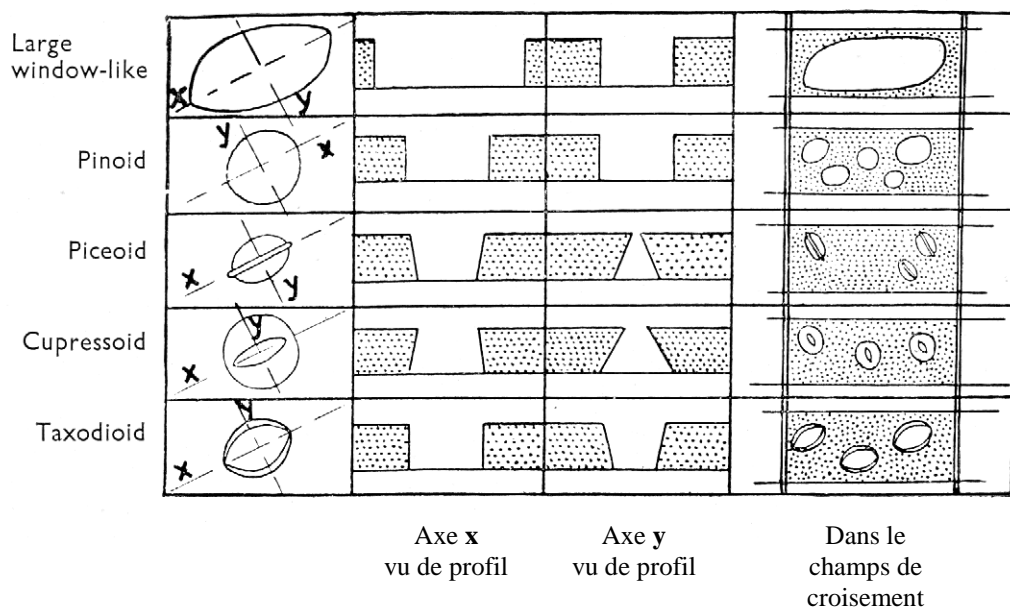


Figure 37 : Représentation schématique des ponctuations chez les résineux (Jane, 1956).

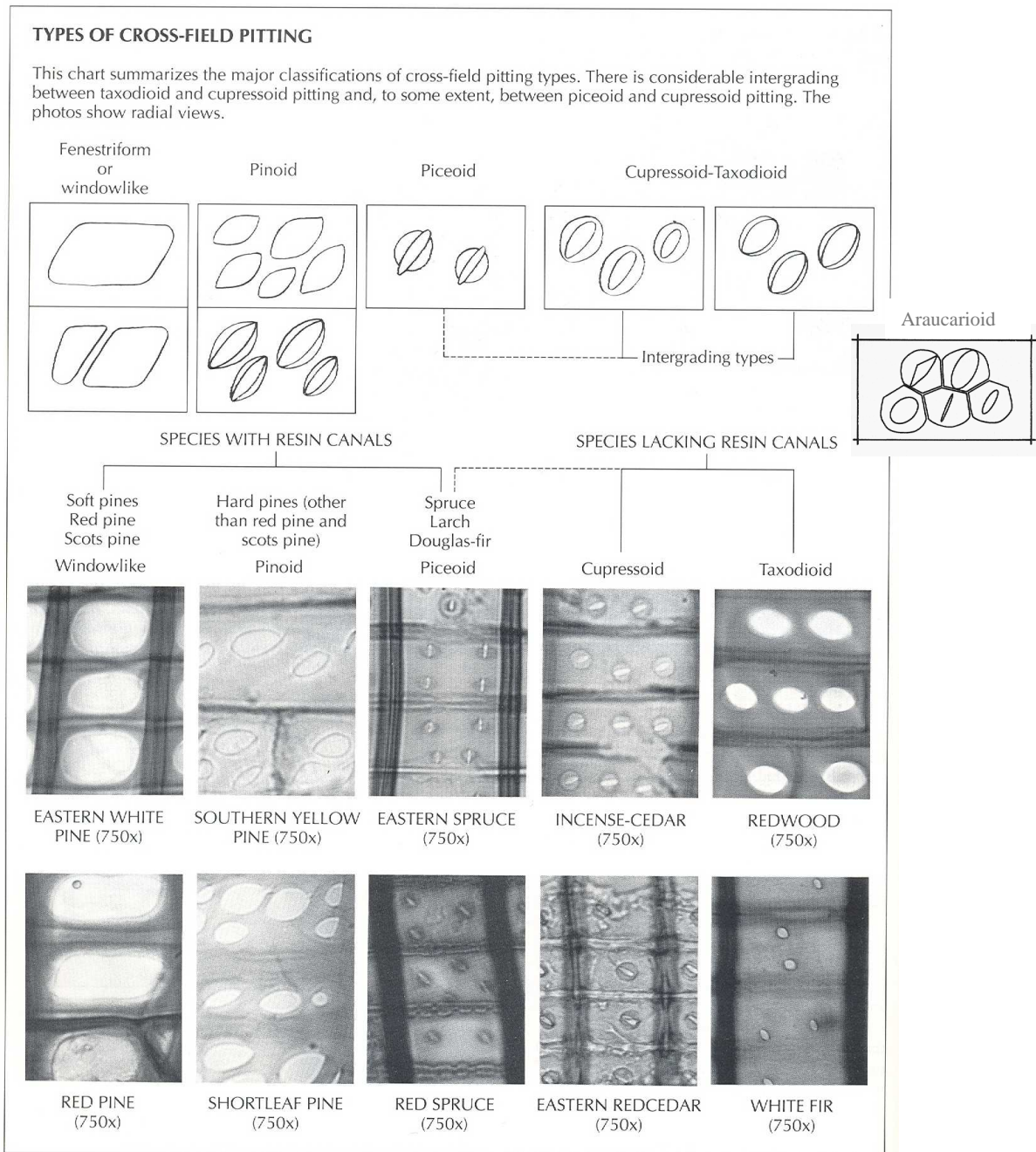


Figure 38 : Types de ponctuation retrouvés chez les résineux dans les champs de croisement (d'après Hoadley, 1990).

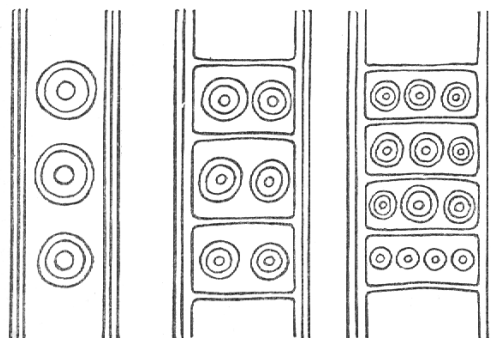


Figure 39 : Ponctuations aréolées uni-, bi-, tri- ou quadrisériées en coupe radiale dans les trachéides des résineux (Desch, 1956).

Chez les feuillus, les ponctuations sont de type aréolée entre vaisseaux et présentent différents agencements : scalariformes, opposées, alternes ou polygonales alternes (Figure 40). Les ponctuations aréolées entre les cellules de vaisseaux et de rayons sont de taille et de forme variées et présentent également des arrangements divers.

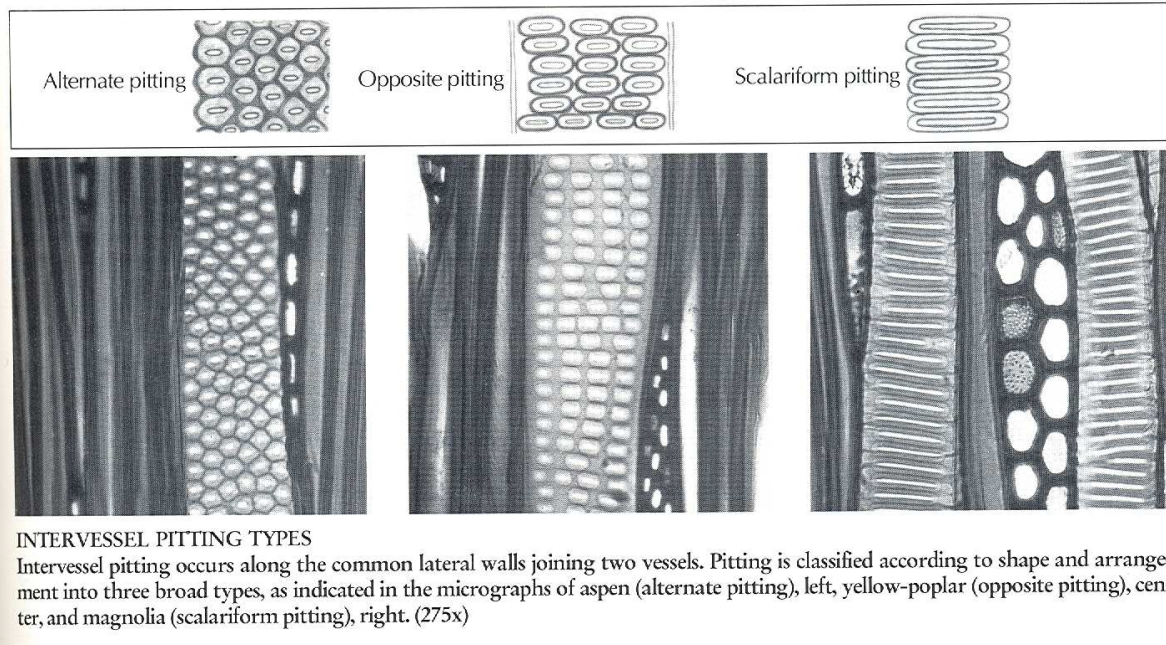


Figure 40 : Types de ponctuation inter-vaisseaux chez les feuillus (Hoadley, 1990).

Par ailleurs, des **crassules ou barres de Sanio** peuvent être observées entre les ponctuations sur la paroi radiale, ce sont des épaissements de la lamelle moyenne et des parois primaires qui séparent les ponctuations (les champs de ponctuation) (Figure 41). Elles sont fréquentes sur les parois radiales des trachéides chez les résineux à l'exception de la famille des *Araucariaceae*. Elles sont aussi visibles dans les vaisseaux et les fibres trachéides de certains feuillus.

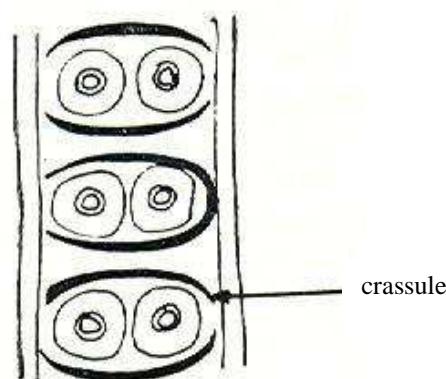


Figure 41 : Crassules au niveau de la paroi radiale d'une trachéide (Normand, 1972).

Dans la paroi cellulaire des vaisseaux, il existe d'autres types d'ouverture que les ponctuations, les perforations, celles-ci sont décrites au point 6.3.

## 6. Description et rôle des éléments ligneux

Les éléments fondamentaux du plan ligneux des essences résineuses et feuillues utiles à l'identification des essences et à la compréhension de leur comportement sont les trachéides, les fibres, les vaisseaux, le parenchyme et les rayons. Les éléments accessoires spécifiques à certaines essences sont les éléments sécréteurs, les trachéides horizontales et juxtavasculaires.

### 6.1. Trachéides

Les **trachéides verticales** du bois des résineux sont des cellules non vivantes à maturité, à parois lignifiées, très allongées par rapport à leur diamètre et orientées dans le sens de l'axe longitudinal de l'arbre (Figure 42). Elles forment la masse du bois chez les résineux tandis que chez les feuillus, elles sont en minorité. Elles forment dans le sens de l'axe de l'arbre des files continues où chaque élément se raccorde en sifflet au précédent. Elles sont non perforées à leurs extrémités et communiquent entre elles par des punctuations aréolées et avec les autres tissus, au moyen de punctuations de différents types. Leur longueur très variable diffère selon les genres, de 2 ou 3 mm (cèdre et certains pins) à 6 ou 7 mm (sequoia). Le diamètre final varie entre 20 et 60  $\mu\text{m}$ . Lors de la différenciation, la paroi radiale s'accroît de manière relativement importante tandis que la paroi tangentielle reste sensiblement de même largeur que l'initial cambial dont elle est issue.

L'épaisseur des parois des trachéides est variable. Chez un grand nombre de conifères, la limite entre le bois final d'une année et le bois initial de l'année suivante est bien distincte à l'œil nu. Ce fait résulte du contraste marqué entre les trachéides formées en début de saison de végétation, à forte section, à paroi mince et à cavité large et les trachéides formées à la fin de la saison, à section aplatie radialement, à paroi épaisse ou très épaisse et, par conséquent, à cavité étroite.

Les dernières couches de trachéides formées avant l'arrêt végétatif sont toujours très aplaties radialement. Ces trachéides présentent des extrémités pointues et des punctuations aréolées ayant des orifices lenticulaires ou en fente. Elles sont nommées **fibre-trachéides** et se rencontrent chez les résineux et les feuillus (Figure 42). Dans certains cas, ces fibre-trachéides présentent de minces parois transversales à travers la lumière, elles sont dites cloisonnées ou septées.

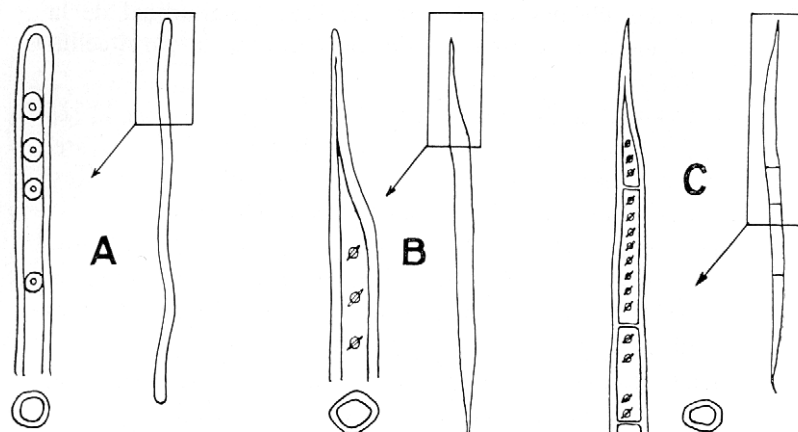


Figure 42 : A. Trachéides verticales; B. Fibre-trachéides; C. Fibre-trachéides septées (Normand, 1972).

Chez les feuillus, des trachéides courtes de forme irrégulière localisées à proximité immédiate des vaisseaux et ne faisant pas partie d'une série axiale définie, sont nommées **trachéides juxtavasculaires** ou **vasicentriques**.

Les trachéides verticales jouent un double rôle d'élément conducteur (tout au moins pendant un certain nombre d'années) et d'élément de soutien. Dans le bois final, elles jouent surtout le rôle d'éléments de soutien.

Les communications entre trachéides sont assurées par les ponctuations aréolées sur la face radiale et par des ponctuations simples de type variable dans les champs de croisement entre les trachéides et les cellules de parenchyme des rayons. Les ponctuations aréolées sont généralement plus larges dans les trachéides du bois initial. Elles apparaissent le plus souvent sur une file mais elles peuvent parfois être couplées ou en disposition alterne (caractéristique des araucaria et des agathis) (voir le point 5.3. sur les ponctuations).

Chez quelques essences (douglas, if, ...), la paroi interne des trachéides présentent des renforts hélicoïdaux : les **épaississements spiralés** (Figure 43). Ils apparaissent tant sur les trachéides longitudinales que sur les trachéides de rayon. Ils s'étendent généralement tout le long de la cellule. D'une espèce à l'autre, ces épaississements peuvent varier en terme de regroupement, espacement, angle d'inclinaison, épaisseur et ramification. Leur présence peut constituer un critère d'identification.

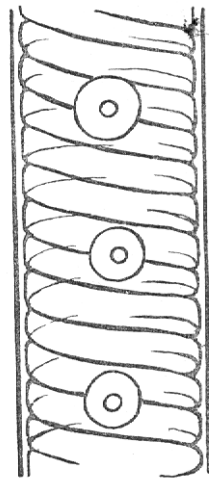


Figure 43 : Trachéides verticales avec épaississements spiralés (Normand, 1972).

Des **trachéides transversales** ou horizontales peuvent se rencontrer chez certains résineux (normalement dans les genres *Larix*, *Picea*, *Pinus*, *Pseudotsuga* et *Tsuga*; sporadiquement chez certains *Abies*; plus rarement chez *Chamaecyparis*, *Juniperus*, *Libocedrus*, *Sequoia*, *Taxodium* et *Tuya*) il s'agit de trachéides orientées horizontalement, associées avec des cellules de parenchyme dans les rayons ligneux (Figure 44). Elles sont beaucoup plus courtes que les trachéides verticales mais néanmoins plus allongées que les cellules de parenchyme avec lesquelles elles sont soit entremêlées soit en position marginale. Ce sont des cellules mortes. Leurs ponctuations sont aréolées et de diamètre plus petit que celui des trachéides verticales. Leurs parois transversales sont parfois minces, un peu onduleuses et lisses, mais le plus souvent elles présentent des sculptures en relief caractéristiques d'un groupe d'espèces. Dans certains cas, ces ornements peuvent arriver à former une sorte de réseau à travers la cavité.

Chez les espèces qui possèdent des trachéides transversales dans les rayons ligneux, une spécialisation est plausible dans le rôle réciproque des deux éléments : les trachéides jouent un rôle de tissu conducteur et le parenchyme, celui de tissu de réserve.

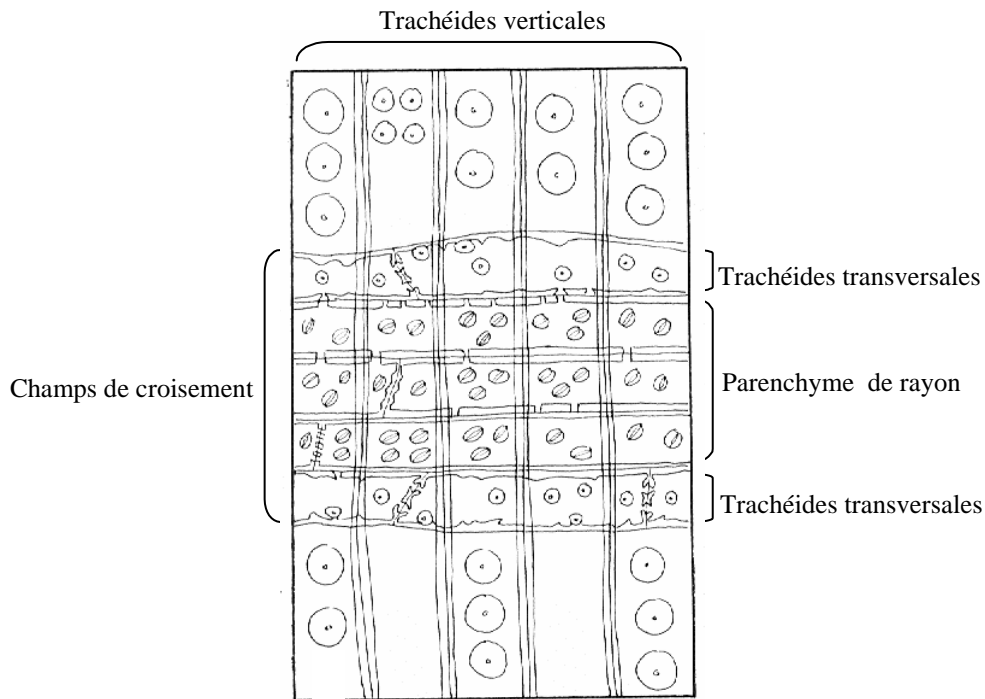


Figure 44 : Champs de croisement avec trachéides transversales (Tsoumis, 1991).

## 6.2. **Fibres**

Les **fibres ligneuses ou libriformes** se rencontrent uniquement chez les feuillus. Les fibres du bois sont des cellules allongées à parois lignifiées et d'épaisseur variable (Figure 45). Les ponctuations sont de type simple et diversement agencées. Les fibres ont des extrémités effilées et plus ou moins sinueuses.

Au cours de la différenciation des tissus, ces cellules s'allongent très sensiblement, suivant le sens axial, par glissement entre les autres éléments. Au cours de cet allongement, lorsqu'elles rencontrent des éléments d'autres tissus, par exemple un rayon, elles peuvent le contourner ce qui explique leur sinuosité, ou bien, dans certains cas, elles peuvent se diviser au contact de l'obstacle pour faire une fourche. Comme les trachéides, les fibres perdent leur protoplasme dès la formation de leur paroi secondaire. Elles atteignent couramment en longueur cinquante fois leur largeur. Leur dimension maximale reste cependant inférieure à celle des trachéides et ne dépasse pas 3 mm.

Les fibres interviennent dans le stockage des matières de réserve et se rapprochent des cellules de parenchyme de par leur structure et leur fonction.

Dans certains cas (certains acajous), les fibres dans l'aubier conservent leur protoplasme après la formation de la paroi secondaire, elles peuvent présenter alors des parois minces transversales à travers leur lumière, elles sont dites septées (Figure 45).

Les fibres peuvent présenter des épaississements spiralés. Ces épaississements se rencontrent chez les essences qui présentent également des épaississements spiralés au niveau de leurs vaisseaux, l'inverse n'étant pas vrai (*Ilex* spp.).

Les fibres existent dans toute la largeur du cerne mais leur importance relative par rapport aux vaisseaux ou au parenchyme, leurs dimensions, l'épaisseur et la structure de leurs membranes, varient au cours de la saison de végétation. Dans les bois à zone poreuse, elles sont moins nombreuses dans le bois de printemps comparé au bois d'été. Dans les bois à porosité diffuse, il peut exister, dans la partie externe de la zone finale, quelques couches de fibres, à paroi épaisse, plus colorée que le reste du cerne, qui soulignent le bord extérieur du cerne (par exemple, *Acer*, *Carpinus*, *Coryolus*, *Crataegus*, *Fagus*, *Ilex*, *Malus*, *Platanus*, *Sorbus* ...).

Les fibres sont des éléments typiques du tissu de soutien; elles ont des parois fréquemment épaissies par les dépôts successifs de lignine. De l'importance du tissu fibreux et de l'épaisseur définitive de la paroi des fibres résultera souvent une densité plus ou moins élevée et, par suite, une plus ou moins grande dureté d'un bois.

A côté de leur rôle essentiel de soutien, les fibres possèdent un faible pouvoir de conduction via les ponctuations simples très fines, comparées aux fibre-trachéides et aux trachéides munies de ponctuations aréolées.

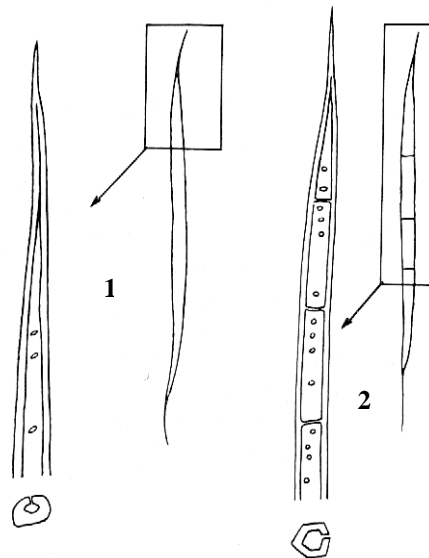


Figure 45 : Fibre libriforme (1); Fibre libriforme septée (2) (Normand, 1972).

#### Spécialisation phylogénétique des trachéides et des fibres

La spécialisation des éléments de trachéides a été concomitante avec la séparation des fonctions de conduction et de soutien dans les plantes vasculaires, qui a eu lieu au cours de l'évolution des plantes terrestres. A l'état le moins spécialisé, les fonctions de conduction et de soutien sont combinées dans les trachéides. Avec l'augmentation de la spécialisation des éléments du bois, le bois a évolué vers la mise en place d'éléments spécialisés dans la conduction, les vaisseaux et d'autres spécialisés dans le soutien, les fibres. Ainsi, à partir des trachéides primitives, deux lignes de spécialisation ont divergé, l'une vers les vaisseaux et l'autre vers les fibres.

### 6.3. Vaisseaux

Si les bois des feuillus sont plus faciles à identifier au moyen d'une loupe de grossissement 10x que les bois des résineux, c'est grâce à la présence des vaisseaux chez les feuillus. La disposition, le groupement, l'abondance et la largeur des vaisseaux constituent des caractères à prendre en compte en priorité, pour identifier une essence, avant de s'attacher aux caractéristiques microscopiques telles que la nature, la disposition, la forme et la taille des perforations qui ornent les parois des éléments de vaisseaux.

Les vaisseaux constituent le tissu de conduction de la sève brute dans le xylème et sont présents dès la formation de la plantule à partir de la graine dans le protoxylème.

Ils forment de véritables conduits par l'empilement de petites cellules allongées ne dépassant pas un millimètre, dans lesquels circulent l'eau et les matières dissoutes. Ces cellules de vaisseaux communiquent axialement entre elles via les perforations qui résultent de la disparition de leurs parois mitoyennes. Le protoplasme de la cellule disparaît avec la formation de ces perforations. Celles-ci peuvent prendre la forme d'un trou unique, on parle alors de **perforations uniques** (dans plus de 80% des essences ligneuses), ou bien présentées des ouvertures multiples, on parle alors de **perforations multiples** (Figure 46). Dans ce dernier cas, il existe trois types de perforations :

- **les perforations scalariformes** lorsque les ouvertures sont sous forme de grilles dont les barreaux sont alignés parallèlement entre eux pour former des échelons (*Aesculus hippocastanum*, *Betula verrucosa*, *Coriulus avelana*, *Entandrophragma spp.*, *Pterocarpus spp.*);
- **les perforations en réseau (ou réticulées)** lorsque les trous simulent les mailles d'un filet (*Iryanthera juruensis*);
- **les perforations foraminées** lorsque les trous sont de forme circulaire ou elliptique comme une passoire (*Ephedra spp.*).

Les extrémités des éléments de vaisseaux successifs peuvent présenter des perforations de type différent.

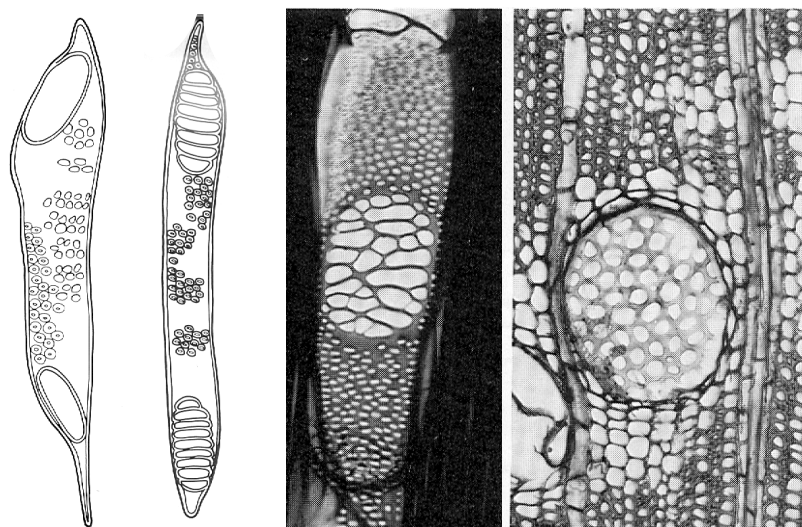


Figure 46 : Types de perforations dans les éléments de vaisseaux. De gauche à droite : perforations simples, scalariformes, réticulées et foraminées (d'après IAWA, 1989 et Schweingruber, 1990).

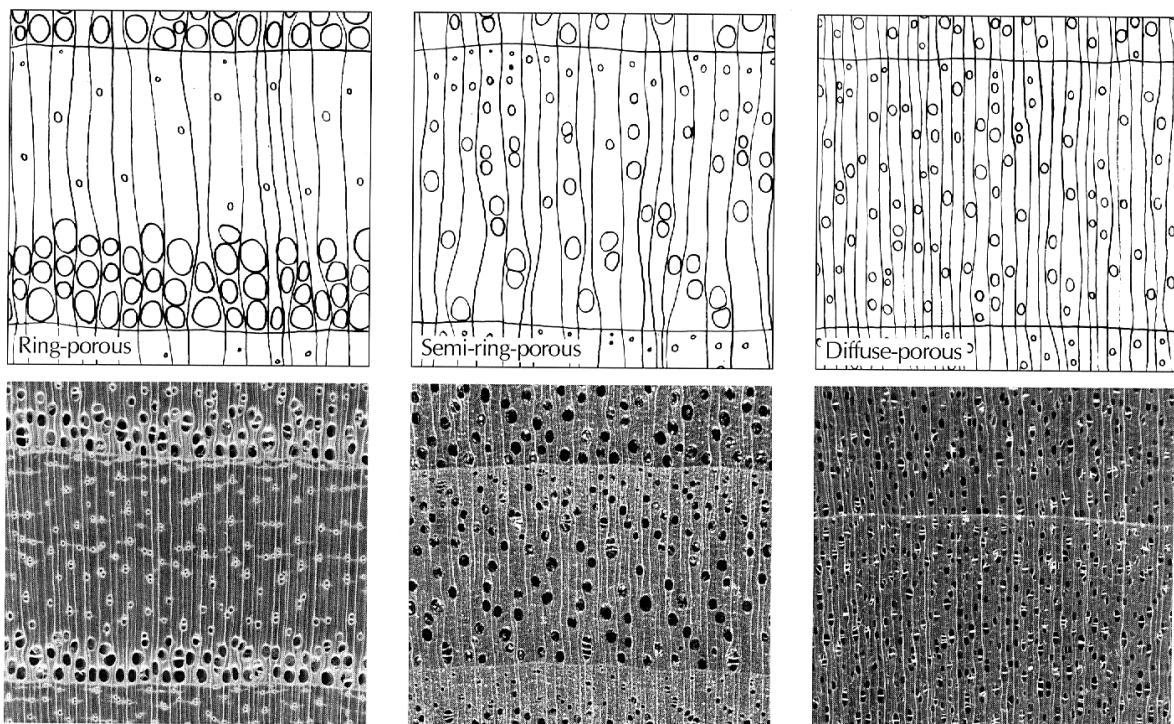
Les ponctuations intervasculaires et les ponctuations rayons-vaisseaux sont de type aréolé et présentent des agencements variés (voir point 5.3.).

Les cellules de vaisseaux ont sensiblement la même longueur que les initiales du cambium mais leur diamètre s'accroît fortement et peut être au final très variable à l'intérieur d'un cerne. La grosseur des vaisseaux est appréciée par la mesure du diamètre tangentiel mesuré en coupe transversale. Celui-ci peut varier en moyenne de moins de 50 µm à plus de 200 µm.

En fonction de la répartition et de la dimension des vaisseaux à l'intérieur du cerne en coupe transversale, différents types de porosité peuvent être définis (Figure 47). C'est un des premiers éléments pris en compte lors de l'observation d'un échantillon de bois aux fins d'identification.

- **Bois à zone poreuse** : caractérisé par des vaisseaux nettement plus grands dans le bois de printemps que dans le bois d'été, formant une zone bien marquée avec une transition abrupte entre les deux types de bois à l'intérieur du cerne (par exemple, *Quercus robur*, *Fraxinus excelsior*).
- **Bois à zone semi-poreuse** : caractérisé soit par des vaisseaux dans le bois de printemps nettement plus larges que ceux dans le bois d'été du cerne précédent et qui montrent une diminution graduelle de leur diamètre à l'intérieur d'un même cerne, ou soit par des vaisseaux sensiblement de même dimension à travers le cerne mais qui dans le bois de printemps, sont étroitement rapprochés (par exemple, *Juglans nigra*, *Prunus avium*).
- **Bois à pores diffus** : caractérisé par une homogénéité du diamètre des vaisseaux à travers tout le cerne (par exemple, *Acer spp.*, *Fagus spp.*, *Platanus spp.*, *Populus spp.*). Ce type de porosité est retrouvé dans la majorité des espèces tropicales et tempérées.

Dans la pratique, la distinction entre ces types de porosité n'est pas toujours aussi bien marquée.

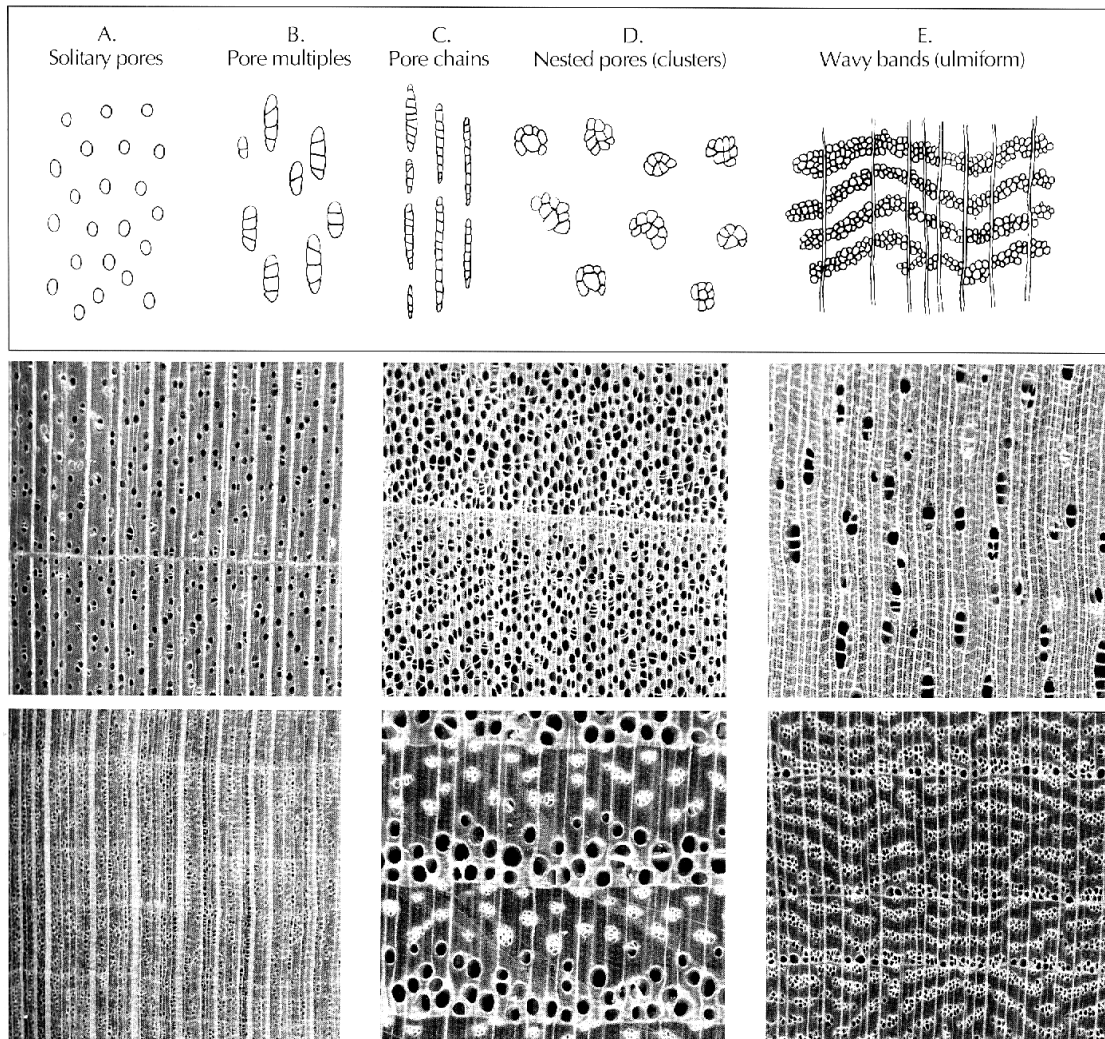


**CLASSIFICATION OF RING POROSITY**

Hardwoods are classified as ring-porous, semi-ring-porous (or semi-diffuse-porous) or diffuse-porous, based on pore size and distribution within a growth ring as viewed with a hand lens in cross section.

Figure 47 : Types de porosité (Hoadley, 1990).

L'arrangement des vaisseaux entre eux peut être aussi un critère d'identification des bois, ceux-ci peuvent être isolés, regroupés et/ou accolés en bande tangentielle, en files radiales, en files obliques, en amas, ou en flamme ... (Figures 48 et 49).



**PORE ARRANGEMENTS IN HARDWOODS**

The drawing above illustrates various pore arrangements, which are described according to the relationship of pores to one another within a growth ring as they appear on a cross section. Examples of each type are shown in the corresponding photographs. Top row: (A) maple, (B) cottonwood and jelutong; bottom row: (C) holly, (D) Kentucky coffeetree, (E) American elm. (15x)

Figure 48 : Arrangements des pores (Hoadley, 1990).

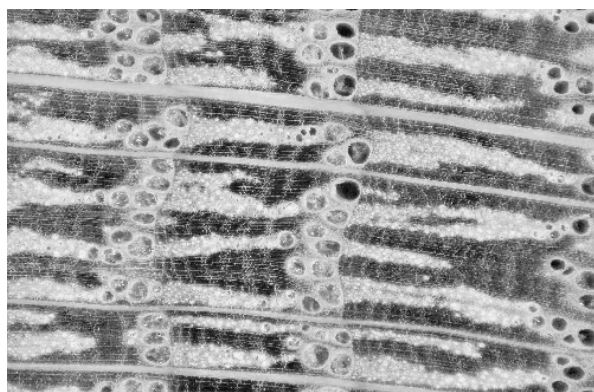


Figure 49 : Disposition flammée des vaisseaux chez le Chêne pédonculé (document J-C. Cerre).

Dans certains bois des régions tempérées, des épaisissements spiralés sont retrouvés sur la face interne des vaisseaux principalement de faible diamètre (*Robinia pseudoacacia*, *Ulmus americana*). Ces épaisissements peuvent se retrouver tout le long des cellules de vaisseaux (*Acer spp.*, *Aesculus spp.*, *Prunus spinosa*, *Tilia spp.*) ou seulement à l'extrémité des cellules. Les épaisissements spiralés peuvent varier en terme d'épaisseur, d'angle d'inclinaison, d'espacement et de bifurcation.

Les **thylles** constituent une autre particularité de certaines espèces de bois de feuillus. Il s'agit d'excroissance (en forme de ballonnet) d'une cellule de rayon ou de parenchyme axial à travers la cavité d'une ponctuation d'un vaisseau adjacent (Figure 50). Les thylles peuvent être rares ou nombreux, à parois minces ou épaisses et contenir ou non de l'amidon, des cristaux, des gommés ... Ils ne se retrouvent généralement pas dans l'aubier et dans le bois de printemps des bois à zone poreuse. La lumière du vaisseau s'en retrouve partiellement ou complètement obstruée, réduisant la perméabilité du bois lors de la formation du duramen. Dans l'aubier, les thylles peuvent apparaître en réponse à une blessure ou une infection. D'un point de vue pratique, ce phénomène a des implications sur le séchage et sur les traitements de préservation des bois en contrariant la circulation et la pénétration des liquides. Il est particulièrement fréquent chez le Robinier et il est rencontré également chez les *Quercus spp.* et *Juglans nigra*.

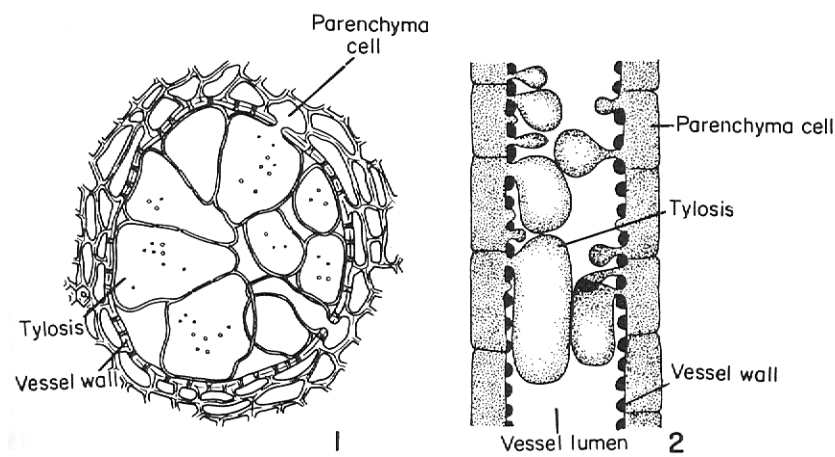


Figure 50 : Développement de thylles dans un vaisseau (Fahn, 1990).

Les vaisseaux du duramen peuvent contenir de la gomme ou d'autres dépôts de coloration très variable. En coupe transversale, le lumen peut apparaître totalement obstrué; en coupes longitudinales, ils remplissent souvent les extrémités des vaisseaux.

Le **grain** du bois se définit comme l'impression visuelle produite par la dimension des éléments du bois et spécialement des vaisseaux. L'appréciation du grain constitue un critère d'identification mais aussi d'utilisation. Un bois à grain fin se dit des essences dont les éléments et spécialement les vaisseaux sont de faible dimension et pas ou peu distincts à l'œil nu (par exemple, *Acer*, *Afromozia*, *Ilex*, *Malus*, *Okoumé*, *Pirus*, *Sorbus*). A l'opposé, un bois à grain grossier se dit des essences dont les éléments et spécialement les vaisseaux sont de dimensions assez fortes et distincts à l'œil nu (par exemple, *Azobé*, *Castanea*, *Iroko*, *Quercus*, *Teck*, *Robinia*). Outre ces deux types de grain, on reconnaît également des bois à grain très fin (par exemple, *Buxus*) et des bois à grain moyen (par exemple, *Sipo*, *Tiama*).

#### 6.4. Parenchyme

Il existe deux types de parenchyme qui diffèrent à la fois par l'origine et par l'orientation de leurs cellules :

- le **parenchyme axial** dont les éléments sont plus ou moins allongés verticalement;
- le **parenchyme radial** ou **parenchyme de rayon** dont les éléments sont orientés horizontalement. Ce dernier est décrit au point 6.5.

Le parenchyme axial dérive des initiales fusiformes du cambium, tandis que les rayons dérivent des initiales de rayons (voir Figure 57 au point 7).

Physiologiquement, tout tissu parenchymateux se compose de cellules vivantes qui gardent leur protoplasme aussi longtemps qu'elles restent actives. Ces cellules peuvent contenir de la gomme, des cristaux et de la silice.

Les parois des cellules de parenchyme sont abondamment ponctuées et moins lignifiées que les membranes des fibres environnantes. Les ponctuations sont de type simple entre les cellules de parenchyme et de type semi-aréolé entre le parenchyme et les fibres-trachéides, et entre le parenchyme et les vaisseaux. Entre le parenchyme et les fibres ligneuses, les ponctuations peuvent être de type simple ou semi-aréolé.

Chez les résineux, le parenchyme axial est plus rare et apparaît sous la forme de quelques cellules dispersées. Il peut être particulièrement abondant chez certaines espèces tropicales.

Le parenchyme accompagne parfois le tissu qu'il enrobe ou constitue à l'intérieur du tissu de soutien des plages ou des bandes d'orientation plus ou moins régulières visibles à la loupe au grossissement 10x. Le parenchyme peut aussi se localiser à la limite des cernes qu'il souligne, formant une zone plus ou moins mince souvent de couleur légèrement différente du reste du cerne (par exemple, *Alnus*, *Betula*, *Populus*, *Salix* et *Tilia*).

Par les images très variées qu'il donne, par son abondance ou sa rareté, le parenchyme contribue à caractériser le plan ligneux de chaque essence.

La distribution du parenchyme dans le bois, observée en coupe transversale, permet d'identifier trois grands types de parenchyme axial (Figure 51) :

- **Parenchyme apotrachéal** quand les cellules de parenchyme ne sont pas associées aux vaisseaux et se localisent dans le tissu fibreux. Ce type se subdivise en :
  - apotrachéal **diffus** quand les cellules de parenchyme sont isolées et dispersées dans le tissu fibreux (*Alnus glutinosa*);
  - apotrachéal **diffus en agrégats** quand les cellules de parenchyme sont groupées en courtes lignes discontinues obliques ou tangentielles (*Tilia* spp.).
- **Parenchyme paratrachéal** quand les cellules de parenchyme sont étroitement associées aux vaisseaux (Figure 51).  
Ce type de parenchyme se subdivise en :
  - paratrachéal "**scanty**" sous forme de quelques cellules isolées, disposées autour des vaisseaux;
  - paratrachéal **unilatéral** quand il est distribué uniquement d'un côté du vaisseau;

- paratrachéal **vasicentrique** sous forme de manchon cylindrique mince ou épais autour du vaisseau;
  - paratrachéal **aliforme**, quand les cellules de parenchyme entourent ou sont disposées sur un côté du vaisseau et forme des extensions latérales;
    - paratrachéal **aliforme en losange** quand les extensions latérales sont courtes et rappelle la forme d'un diamant;
    - paratrachéal **aliforme en ailes** quand les extensions latérales sont longues et étroites;
  - paratrachéal **confluent** ou **anastomosé**, lorsque les parenchymes vasicentrique ou aliforme entourant plusieurs vaisseaux entrent en contact et forment des bandes irrégulières.
- **Parenchyme en bandes** quand les cellules de parenchyme forment des bandes continues dans le bois. Ce type de parenchyme se subdivise en :
- en bandes étroites jusqu'à trois cellules de large;
  - en bandes de plus de trois cellules de large;
  - **réticulé** quand les bandes espacées régulièrement ont la même largeur que les rayons et forment un réseau. La distance entre les rayons est approximativement égale à la distance entre les bandes de parenchyme;
  - **scalariforme** quand les bandes espacées régulièrement sont sensiblement plus étroites que les rayons et prennent avec eux l'apparence d'une échelle. La distance entre les rayons est plus grande que la distance entre les bandes de parenchyme;
  - **marginal** quand les bandes de parenchyme forment une couche plus ou moins continue d'épaisseur variable en limite de cerne.

Le parenchyme est un tissu de réserve des hydrates de carbone et permet leur re-distribution. Il semble jouer un rôle dans les propriétés et le comportement du matériau bois mais reste encore méconnu à ce jour.

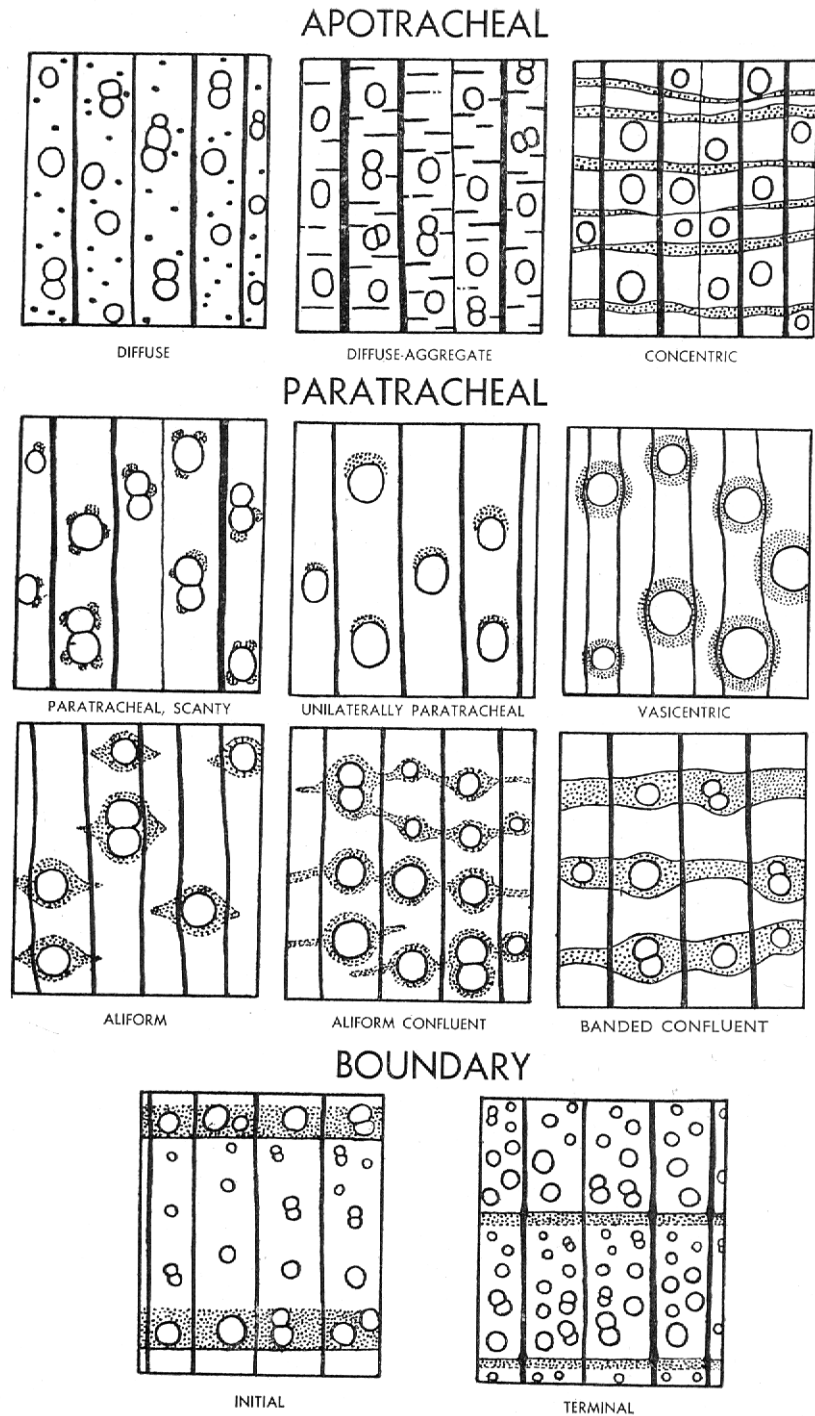


Figure 51 : Types de parenchyme axial (Jane, 1956).

### 6.5. Rayons

Un **rayon ligneux** est un groupement de cellules principalement parenchymateuses, peu lignifiées, sous forme de lames de section lenticulaire, de hauteur et de largeur variables, orientées radialement. Les rayons sont présents chez toutes les espèces et constituent un élément d'identification important

Les cellules de rayons dérivent d'agrégats de cellules mères du cambium. Le nombre de ces agrégats par unité de surface est stable, aussi de nouveaux apparaissent-ils au fur et à mesure de la croissance de l'arbre : par une division anticline, une initiale fusiforme va donner une

cellule fille "mère de rayons" qui va ensuite se diviser dans deux plans, transversales et radiales, pour former un nouvel îlot de cellules mères.

Ces cellules mères ont des formes différentes : les cellules isodiamétriques, petites ou grosses, vont produire soit des cellules allongées horizontalement (cellules couchées), soit des cellules carrées; les cellules allongées verticalement donnent des cellules dressées. Au cours de leur différenciation, les cellules filles édifient une paroi secondaire généralement mince, peu lignifiée et abondamment ponctuée. Ces ponctuations établissent des communications entre des cellules d'un même rayon mais aussi avec tous les autres éléments du bois.

Tout comme le parenchyme axial, le parenchyme de rayon peut contenir des cristaux.

D'un point de vue dimensionnelle, la largeur et la hauteur des rayons doivent être envisagées. Un rayon est **unisérié** s'il est constitué d'une seule cellule en largeur ou **plurisérié** s'il est constitué de plusieurs cellules en largeur (jusqu'à 30 cellules pour *Quercus robur*). Dans une même essence, il est possible de retrouver à la fois des rayons uni- et plurisériés. Chez les résineux, les rayons sont généralement unisériés parfois bisériés sauf dans le cas où ils contiennent un canal résinifère..

La hauteur des rayons est aussi un critère important lors de l'identification des bois et il est nécessaire de compter le nombre de cellules en hauteur (chez certains chênes, ils peuvent atteindre plusieurs centimètres de haut).

Chez les feuillus, un **rayon homogène** est constitué de cellules d'un seul type morphologique, (cellules carrées, couchées ou dressés) (Figures 52 et 53). Dans un **rayon hétérogène**, plusieurs types morphologiques peuvent coexister et en fonction de l'arrangement de ces différents types, Kribs propose le classement suivant (Figure 52 et 53) :

- rayon hétérogène exclusivement unisérié composé de cellules dressées et couchées;
- rayon hétérogène de type I : la hauteur totale des cellules dressées est plus grande que celle des cellules couchées. Les rayons unisériés sont composés exclusivement de cellules dressées;
- rayon hétérogène de type II : la hauteur totale des cellules dressées est plus petite que celle des cellules couchées. Les rayons unisériés sont composés exclusivement de cellules dressées;
- rayon hétérogène de type III : il y a une seule couche de cellules dressées en position marginale. Les rayons unisériés sont composés soit de cellules dressées soit de cellules couchées.

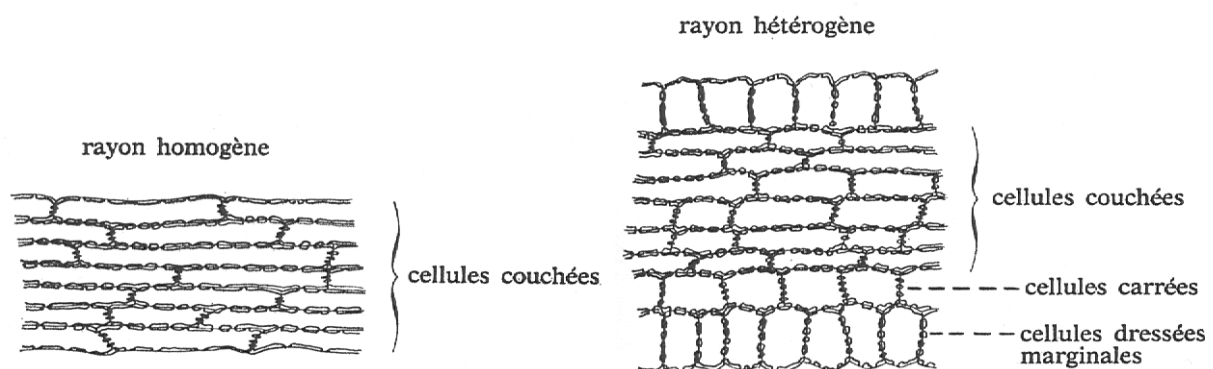
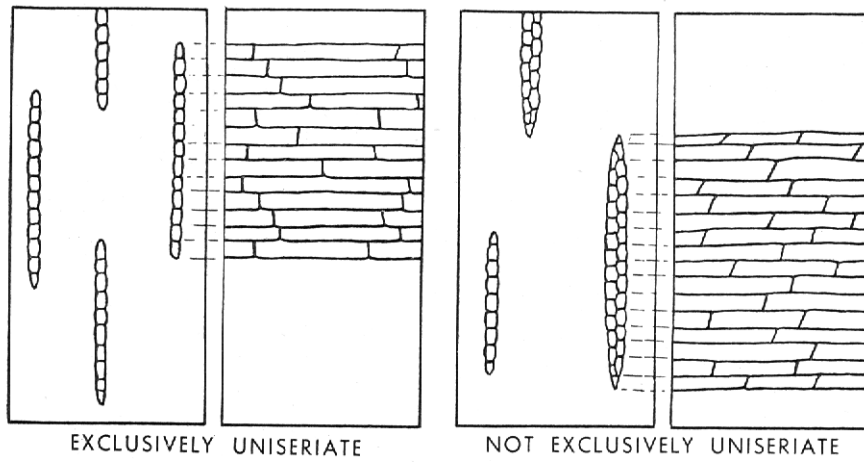


Figure 52 : Rayons homogène et hétérogène (Jacquot *et al.*, 1973).

## HOMOGENEOUS



## HETEROGENEOUS

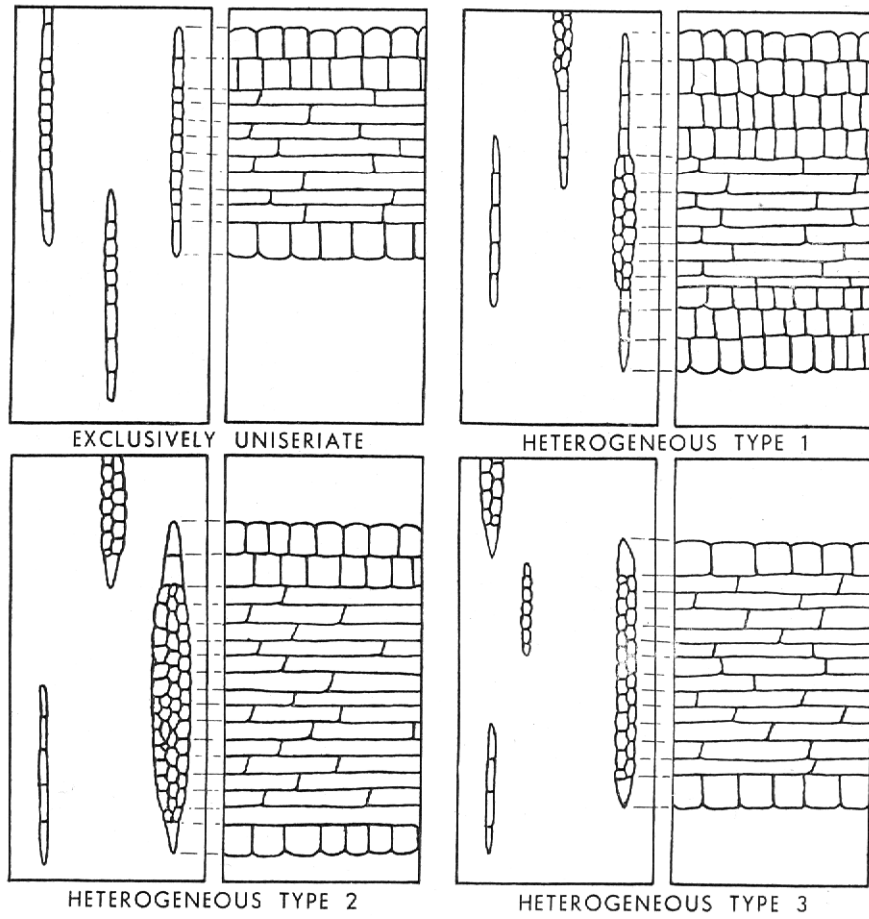


Figure 53 : Types de rayons homogène et hétérogène (Jane, 1956).

### Cellules palissadiques et bordantes de rayons

Dans certaines espèces de quatre familles (Bombacacées, Malvacées, Sterculiacées et Tiliacées), des cellules de rayon d'un autre type morphologique sont rencontrées : **les cellules palissadiques**. Ces cellules, apparaissant généralement par files radiales, sont caractérisées par leur forme étroite et par l'absence de dépôts organiques dans leur lumière. On distingue les cellules palissadiques de type "Durio", dont la hauteur n'excède pas celle des cellules couchées et les cellules palissadiques de type "Pterospermum" plus hautes que les cellules couchées.

Il existe une dernière catégorie de cellules entrant dans la composition des rayons hétérogènes : les **cellules bordantes**, carrées ou dressées, qui tendent à former une gaine autour des cellules couchées (par exemple, *Ceiba pentandra*).

En coupe tangentielle, certaines essences feuillues présentent une **structure étagée** (alignées horizontalement) (Figure 54). L'étagement peut concerner tous les rayons ou seulement certains, le parenchyme axial et/ou les éléments de vaisseaux ainsi que les fibres. L'arrangement peut parfois s'écarter de l'horizontale pour prendre une direction oblique ou sous forme de vague.

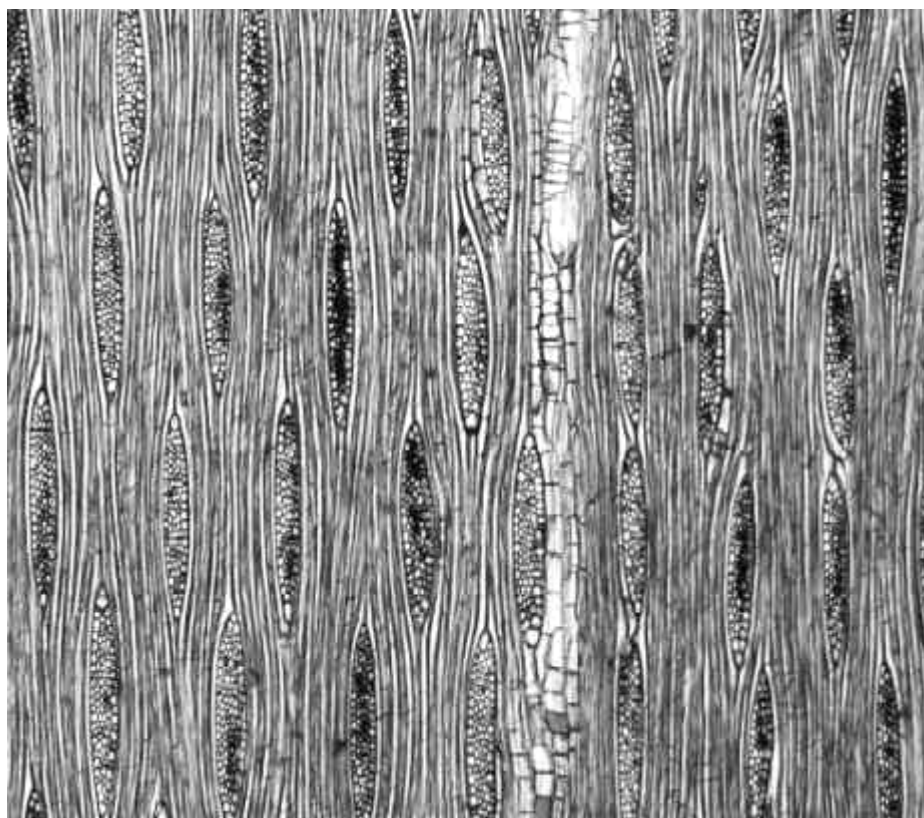


Figure 54 : Structure étagée des rayons en coupe tangentielle chez *Entandrophragma cylindricum* - Sapelli (sur le site Inside Wood de l'IAWA).

Dans le cas des résineux uniquement, les rayons peuvent être constitué d'une seul type de tissu, le parenchyme, le rayon est alors qualifié d'**homocellulaire** mais si celui-ci contient également des trachéides transversales, il est qualifié d'**hétérocellulaire**.

Les ponctuations sont des éléments essentiels pour l'identification des bois. Chez les résineux, dans les champs de croisement, les ponctuations simples peuvent être de type pinoïde, fenestroïde, cupressoïde, piceoïde, taxodioïde et araucarioïde (conférer point 5.3). Chez les feuillus, les ponctuations sont toujours simples dans les champs de croisement. Elles peuvent être rondes ou hexagonales et petites, de même diamètre que les ponctuations intervasculaires; grosses, rondes ou ovales ou en forme d'haricot; ou très étirées, en balafres horizontales, nommées alors scalariformes.

Chez les résineux, les parois cellulaires des rayons peuvent prendre différents aspects en coupe radiale. Les rayons sont lisses quand les parois, généralement fines, ne possèdent pas d'ornementation, comme c'est le cas chez *Pinus strobus*. Les rayons sont qualifiés de dentés lorsque les parois, d'épaisseur variable, portent des protrusions internes en forme de dents sur les parois cellulaires supérieure et inférieure, qui sont généralement plus nombreuses dans le bois final (très fréquent chez *Pinus sylvestris* et *Pinus ponderosa*). Les rayons peuvent être aussi réticulés lorsque les parois, généralement fines, portent de nombreuses, étroites et pointues protrusions internes en forme de dents sur la paroi supérieure et inférieure, reliées par des cloisons transversales qui donnent une apparence réticulée caractéristique (chez *Pinus taeda*).

Chez les résineux, des **indentures** peuvent aussi être observées en coupe radiale (Figure 55). Ce sont des dépressions dans les parois horizontales des cellules de rayons à leur jonction avec les parois verticales. Elles peuvent être observées dans toutes les familles de conifère excepté chez les *Araucariaceae* et elles sont importantes pour le diagnostic d'essences de la famille des *Cupressaceae*.

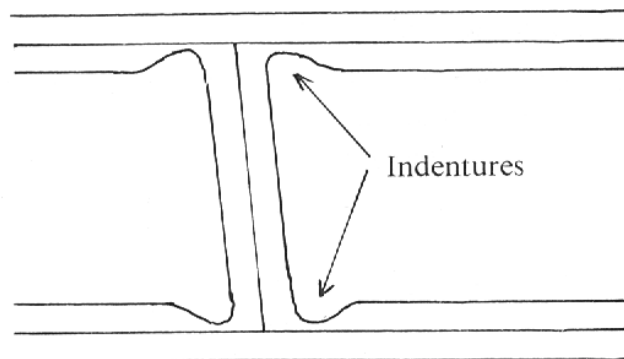


Figure 55 : Indentures en coupe radiale dans une cellule de rayon (Detienne, 1988).

Chez certains résineux, des **canaux sécréteurs transversaux** peuvent être présents dans les rayons (*Larix*, *Picea*, *Pinus* et *Pseudotsuga*) (voir point 6.6).

Chez certaines espèces (*Alnus*, *Carpinus*, *Corylus*), le terme de "**faux rayons**" désigne un regroupement de rayons fins qui, par illusion d'optique, peuvent être considéré erronément comme un gros rayons. En coupe transversale, ils apparaissent de longueur très inégale et disparaissent brutalement.

Le rôle des rayons semblent être double. Ils servent d'une part, de voie de communication entre les parties internes du bois et le liber et d'autre part, comme le parenchyme axial, de tissu de réserve pendant la période de repos végétatif.

Les rayons ligneux ont un rôle important en matière d'esthétique. En effet, ils présentent souvent une différence de couleur et d'éclat par rapport aux autres tissus adjacents, cette différence est plus marquée en section radiale. Leur figuration à la surface du bois des essences feuillues (**maille du bois**) est tantôt recherchée, tantôt peu appréciée. Parfois plus clair, parfois plus foncé que le reste du bois, leur éclat en section radiale est presque toujours plus brillant que celui du reste du bois. Un exemple frappant est celui des chênes indigènes dont la maille est particulièrement visible sur un débit sur quartier du fait de la couleur des rayons mais aussi de leurs dimensions (largeur et hauteur). Chez les résineux bien que présente, la maille est nettement moins visible du fait que leurs rayons sont principalement unisériés, parfois bisériés.

## 6.6. Eléments sécréteurs

### 6.6.1. Canaux intercellulaires

Les **canaux intercellulaires** sont des conduits entourés d'un épithélium dans lesquels sont véhiculés des produits secondaires sécrétés par les **cellules épithéliales** (Figure 56). L'épithélium est une couche unique de cellules adjacentes au canal. Ces cellules épithéliales sont des cellules de parenchyme spécialisées qui déversent leurs sécrétions dans le canal. L'épaisseur de leur paroi et leur nombre autour de leur canal sont des critères d'identification d'une espèce.

Les canaux intercellulaires se rencontrent chez les résineux (**canaux résinifères**). Ils sont orientés axialement dans le tissu ligneux au milieu des trachéides ou radialement à l'intérieur des rayons et forment un réseau interconnecté. Ils sont limités à quelques genres de la famille des *Pinaceae* (*Larix*, *Picea*, *Pinus* et *Pseudotsuga*). Ils sont le plus souvent solitaires mais aussi occasionnellement par paire (*Pseudotsuga* et *Larix*) ou en petits groupes tangentiels. La présence de canaux résinifères radiaux va toujours de paire avec les canaux résinifères axiaux, l'inverse n'étant pas vrai. Une **poche de résine** est une cavité lenticulaire dans le bois qui contient de la résine. Cette poche se forme suite à la rupture d'un canal résinifère à la suite d'un choc ou d'un effort de compression excessif.

Chez les feuillus, les canaux intercellulaires (**conduits à gomme ou à résine**) peuvent se répartir en longues lignes tangentielles (plus de cinq canaux alignés), en courtes lignes tangentielles (de deux à cinq canaux alignés), être isolés ou dans un rayon.

En plus de ces canaux intercellulaires normaux, il existe également des **canaux intercellulaires traumatiques** formés en réponse à une blessure et agencés en bandes tangentielles. Ils sont généralement plus larges et de contour plus irrégulier. Leur présence n'est pas limitée aux espèces qui présentent des canaux normaux.

### 6.6.2. Cellules sécrétrices

Chez les feuillus, des cellules spécialisées de parenchyme qui secrètent de l'huile ou du mucilage, sont retrouvées associées au parenchyme des rayons, au parenchyme axial ou dans le tissu fibreux. Elles se distinguent plus ou moins facilement des autres cellules de parenchyme soit par la couleur de leur contenu (orangé dans la famille des *Myrsinaceae*), soit par leur forme différente ou leur taille plus grande. Elles se rencontrent chez les gymnospermes qui ne possèdent pas de canaux intercellulaires normaux (*Cedrus*, *Juniperus* et *Taxodium*).

### 6.6.3. Laticifères

Les **laticifères** sont des cellules ou des séries de cellules tubulaires de longueur indéterminée, contenant du latex et s'étendant horizontalement dans les rayons ou verticalement dans le tissu fibreux. Elles sont observées dans les bois de certains genres d'*Apocynaceae*, d'*Euphorbiaceae* et des *Moraceae*. Les bois de certaines *Apocynaceae*, *Euphorbiaceae*, *Loganiaceae* et *Melastomastaceae* présentent des canaux intercellulaires d'un type particulier : ce sont des cavités très grandes, souvent disposées en rangées horizontales et remplies par les restes desséchés d'un tissu non lignifié. Elles sont appelées traces à laticifères ou alvéoles à laticifères.

### 6.6.4. Tubes à tanins

Les **tubes à tanin** sont des séries de cellules tubulaires remplies de tanin brun rougeâtre formant de longues lignes radiales, ayant une hauteur égale à celle des cellules couchées des rayons. Ils ne se rencontrent que dans les rayons des bois de la famille des *Myristicaceae*.

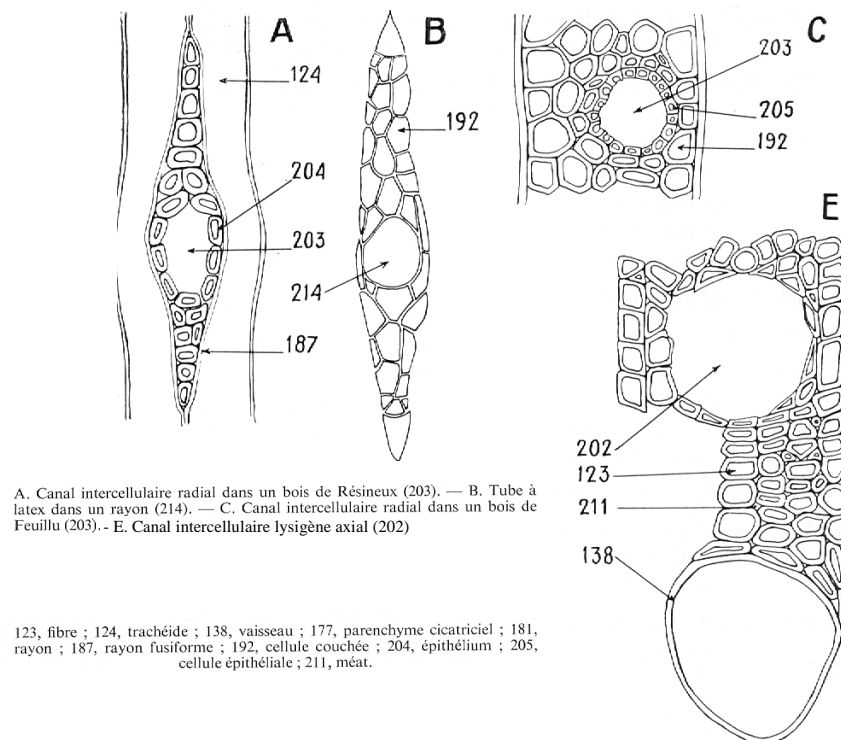


Figure 56 : Type de canaux intercellulaires (Normand, 1972).

## 6.7. **Espaces intercellulaires**

Les espaces intercellulaires sont des espaces entre les cellules d'un tissu. Ils sont de deux types :

- les **espaces intercellulaires sécréteurs** comprenant les canaux et les cavités intercellulaires. Ils peuvent être d'origine schizogène (formé à la suite d'un décollement de la paroi entre deux cellules adjacentes) ou d'origine lysigène (formé à la suite d'une dissolution des cellules) (Figure 56);
- les **espaces intercellulaires non-sécréteurs** ou méats qui sont des espaces vides ménagés entre des cellules adjacentes, par exemple dans le bois de compression des résineux.

## 7. Description des plans ligneux des résineux et des feuillus

Les bois de résineux se distinguent clairement de ceux des feuillus, apparus plus tard dans l'histoire phylogénétique. Le plan ligneux des résineux est plus élémentaire, les trachéides assurent à la fois les rôles de soutien et de conduction. Les feuillus présentent un plan ligneux plus élaboré dans lequel le rôle de soutien est assuré par les fibres et les fibres trachéides, tandis que le rôle de conduction est assuré par les vaisseaux. Dans les deux cas, le parenchyme assure le stockage des matières de réserve (Figure 57).

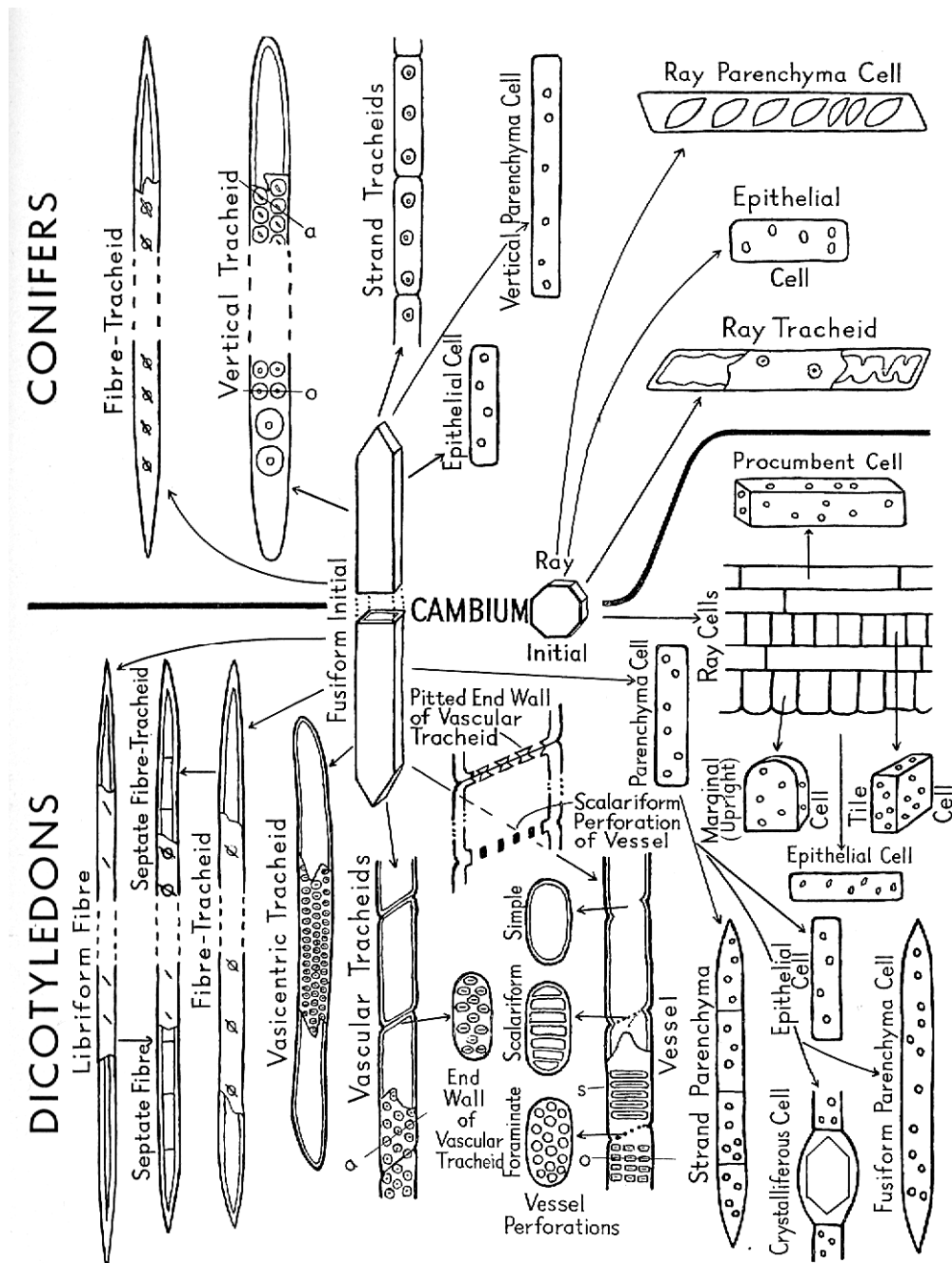


Figure 57 : Schéma des initiales cambiales et des éléments secondaires qui en dérivent (Jane, 1956).

Tant au niveau macroscopique que microscopique, le plan transversal des feuillus présente une plus grande variabilité du fait de la diversité des éléments ligneux et de leurs arrangements (Figure 58).

La description détaillée de chaque élément constitutif des plans ligneux est repris au point 6. Les informations reprises ci-après sont destinées à aider à visualiser et distinguer les plans ligneux des essences résineuses et feuillues.

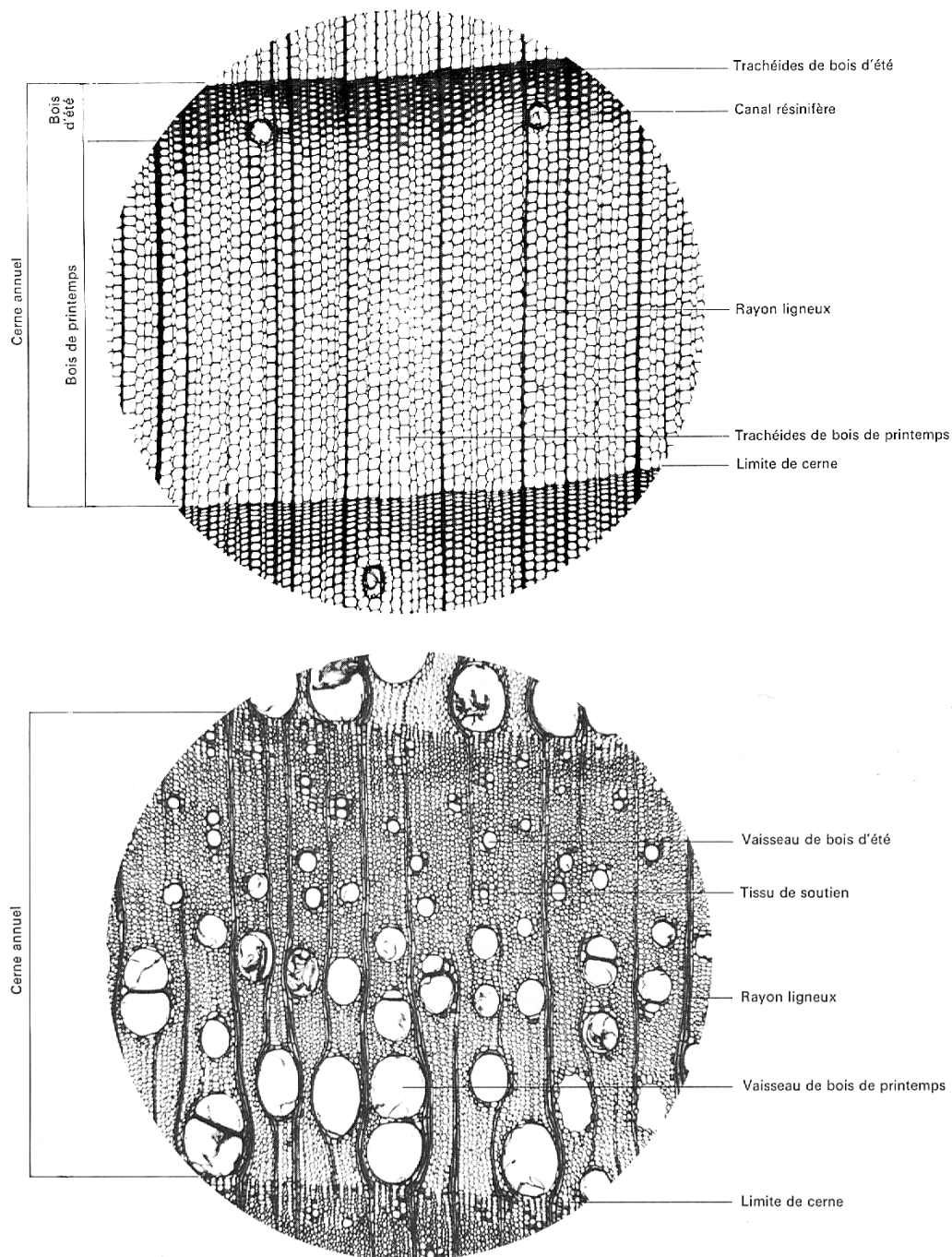


Figure 58 : Coupe transversale d'un épicéa (en haut) et d'un frêne (en bas) (Anonyme, 1960).

Etant fixé génétiquement, le plan ligneux des bois ne varie pas à l'intérieur d'une espèce et apparaît généralement sous la même forme à l'intérieur d'une même famille botanique. Cette **fixité du plan ligneux** permet de distinguer et reconnaître un bois de chêne, de châtaignier ou de sapelli ... Cette fixité signifie que pour une espèce déterminée, un **schéma robot** caractéristique de cette espèce est toujours retrouvé. Le schéma robot correspond aux particularités anatomiques d'un échantillon spécialement choisi pour représenter le type moyen de structure du bois de l'espèce. Ce schéma tient compte d'un ensemble de

caractéristiques anatomiques qui, par expérience, sont toujours liées entre elles, quelle que soit l'ampleur des variations enregistrées chez l'essence suivant l'âge, la provenance ou le traitement sylvicole (Normand, 1972).

### 7.1. Structure du plan ligneux des résineux

Les bois des résineux sont des **bois homoxylés** présentant une structure extrêmement simple. Parmi les cellules qui forment le bois, deux catégories sont distinguées (Figure 59).

Les éléments fondamentaux, toujours présents et constituant la presque totalité de la masse du bois :

- les trachéides;
- les rayons, généralement unisériés et quelquefois bisériés.

Les éléments accessoires, présents chez certaines espèces :

- les trachéides transversales, spécifiques aux résineux;
- les cellules de parenchyme axial;
- les canaux intercellulaires (résinifères) axiaux et/ou radiaux dans les rayons.

Chez la grande majorité des résineux, la limite entre le bois final et le bois initial de l'année suivante est très tranchée et les limites de cernes apparaissent très distinctement.

Par contre, à l'intérieur du cerne, la transition entre le bois de printemps et le bois d'été peut être soit brusque (Mélèze, Douglas, Pin sylvestre) soit progressive (Epicéa commun) et cela constitue un critère d'identification des essences résineuses.

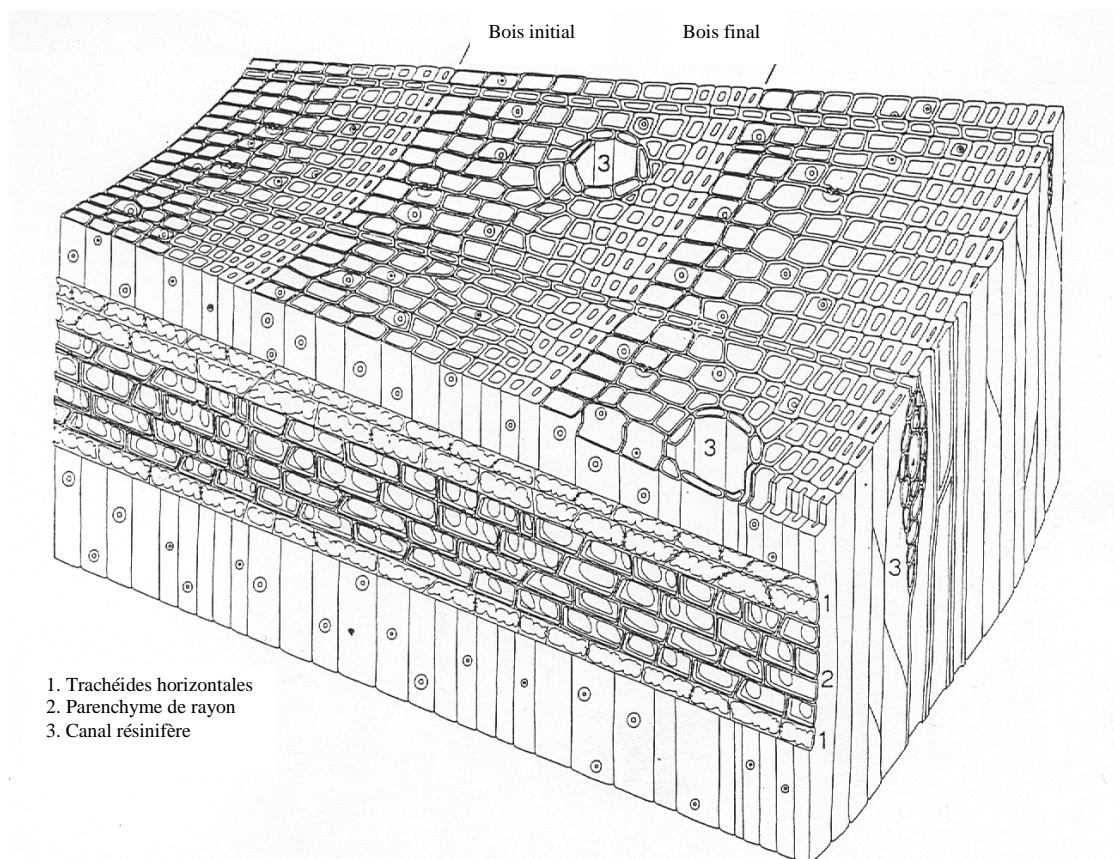


Figure 59 : Schéma d'ensemble du plan ligneux d'un pin sylvestre (Giodano, 1976).

## 7.2. Structure du plan ligneux des feuillus tempérés et tropicaux

Les bois des feuillus sont des **bois hétéroxylés** présentant une structure plus compliquée. Les éléments constitutifs des tissus sont plus variés en terme de groupement, de dimension, de structure et d'ornementation de la paroi (Figure 60).

Les éléments fondamentaux, toujours présents :

- les vaisseaux;
- les fibres;
- le parenchyme axial;
- les rayons.

Les éléments accessoires, présents chez certaines espèces :

- les trachéides juxtavasculaires;
- les canaux axiaux et radiaux à oléorésines;
- les cellules sécrétrices à huile et mucilage;
- les laticifères et les tubes à tanins;
- les taches médullaires;
- le liber inclus.

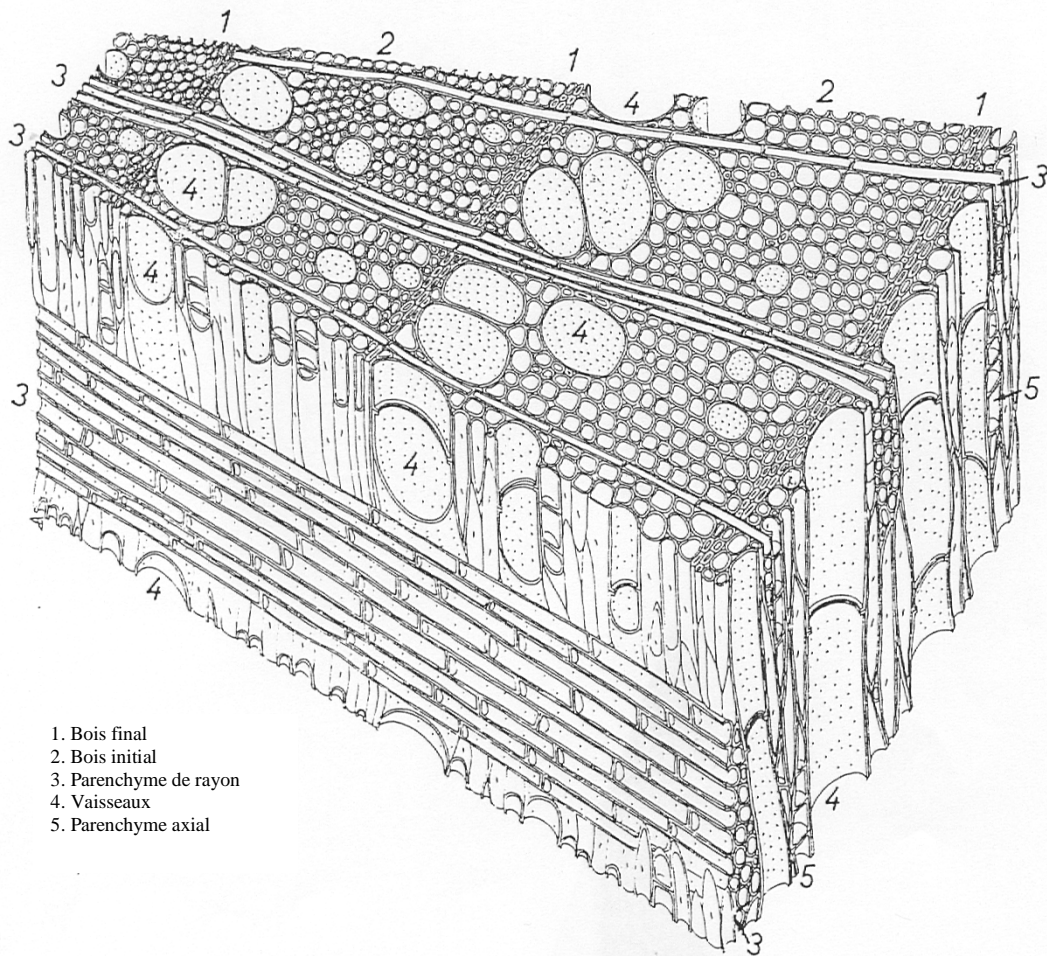


Figure 60 : Schéma d'ensemble du plan ligneux d'un frêne (Giordano, 1976).

## 8. Modifications dans le plan ligneux

Les caractères anatomiques du plan ligneux des bois sont spécifiques de l'espèce et génétiquement constants. Cette fixité du plan ligneux permet d'identifier un schéma robot représentatif de la structure du bois d'une espèce. Mais la formation du bois est influencée par des facteurs internes tel que l'âge et par des facteurs externes, notamment le climat, l'altitude et la latitude, le sol, la position de l'arbre dans le peuplement et le traitement sylvicole, susceptibles d'induire des variations plus ou moins marquées dans le plan ligneux. Ces modifications anatomiques d'origine physiologique permettent d'expliquer les variations observées, au sein d'une espèce voire au sein d'un individu, des propriétés physiques et mécaniques.

### 8.1. Modifications avec l'âge

#### 8.1.1. Bois juvénile et bois adulte

Le **bois juvénile** est le bois formé par un cambium jeune ou immature, tandis que le **bois adulte** est produit par un cambium mature (Figure 61). Quelque soit l'âge de l'arbre, le bois juvénile correspond au bois des premiers cernes formés autour de la moelle tout le long de l'arbre et concerne les 5 à 20 premiers cernes chez les résineux et les 20 à 40 premiers cernes chez les feuillus. Il est généralement admis que le bois juvénile est celui formé dans le houppier vivant de l'arbre.

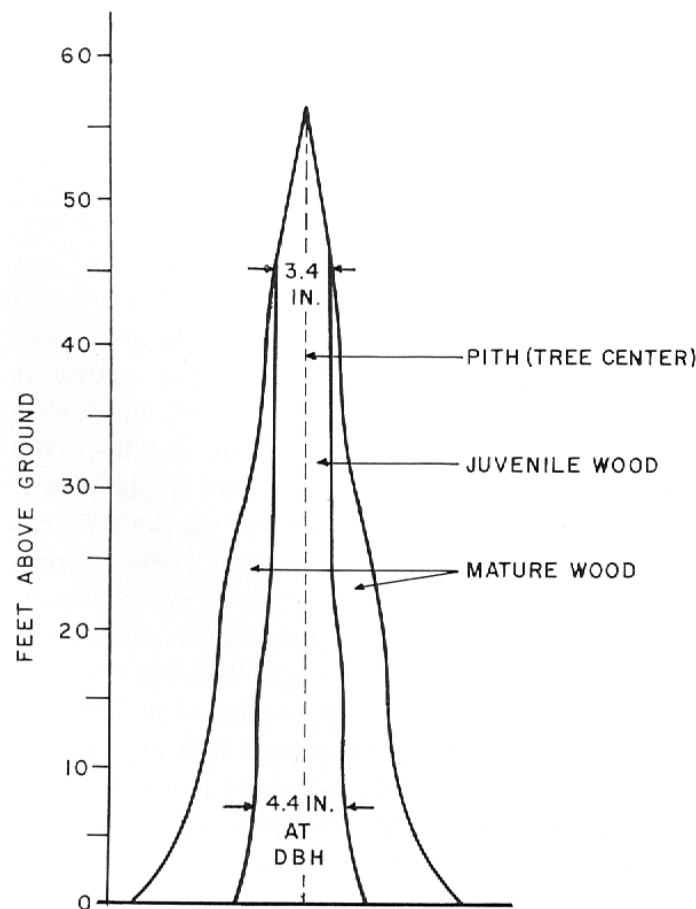


Figure 61 : Répartition du bois juvénile et adulte dans une coupe longitudinale d'un résineux (Zobel et Van Buijtenen, 1989).

Le bois juvénile se caractérise par des éléments ligneux plus courts avec des lumens plus importants, des parois plus fines, un angle de microfibrilles plus important, des rayons de structure plus hétérocellulaire et du parenchyme vertical plus abondant, des contenus en lignine plus importants, des densités plus faibles, une résistance plus faible, un retrait longitudinal plus élevé, des retraits transversaux plus faibles et plus de bois de réaction. Ces propriétés particulières s'expliqueraient par la proximité des méristèmes primaires producteurs d'hormones. Chez les résineux, la présence de bois juvénile représente sans doute la plus grande cause de variation des propriétés au sein d'un individu. Le passage du bois juvénile au bois adulte est un processus progressif.

Dans le bois adulte, on considère que les caractères anatomiques et les propriétés n'évoluent plus en fonction de l'âge mais dépendent plutôt de la largeur des cernes et des conditions du milieu.

La manière la plus adéquate pour réduire l'impact négatif du bois juvénile consiste à réduire la proportion du volume qu'il occupe dans la grume en reculant l'âge de la récolte.

### 8.1.2. Aubier, duramen et bois parfait

L'**aubier** constitue la partie fonctionnelle de la tige formée des cernes d'accroissement les plus récents où circulent la sève brute. Il est constitué de cellules vivantes physiologiquement actives, dans lesquelles s'accumulent des substances de réserve hydrocarbonées à la fin de la période de végétation. Son épaisseur est relativement stable du bas vers le haut de l'arbre, excepté au niveau des empâtements. Si le nombre de cernes concernés est relativement constant chez un individu ou chez une espèce, il existe de grandes variations entre espèces (aubier étroit chez le châtaignier et le robinier; aubier large chez l'araucaria, le pin maritime et le tiama).

Il découle de cela que la largeur de l'aubier dans une grume dépend de la vitesse de croissance de l'arbre. Elle dépend également de l'âge pour un même nombre de cernes d'aubier. Ainsi, chez les sujets jeunes, l'aubier est plus large que chez les arbres âgés, la largeur des cernes diminuant avec l'âge.

Généralement de couleur claire, moins foncé que le duramen, l'aubier est non durable et est facilement dégradé par les champignons lignivores et les larves d'insectes xylophages. Il est imprégnable ce qui permet de lui conférer une durabilité artificielle qui autorise son emploi dans certains usages. En ébénisterie et menuiserie à base de feuillus, il est généralement éliminé pour des raisons esthétiques (différence de couleur avec le duramen). En menuiserie intérieure, l'aubier des bois résineux est admis.

Le **duramen** forme la partie centrale du bois qui ne contient plus de cellules vivantes. Les cellules devenues non fonctionnelles en terme de conduction et de stockage, perdent leurs matières de réserve (amidon ...), les transforment ou les remplacent par des substances du **bois parfait** (résines, tanins, pigments ...). La formation du duramen pourrait constituer un procédé par lequel la plante évacue de la zone de croissance, vers l'intérieur ou l'extérieur, des substances inhibitrices ou toxiques via les rayons. L'accumulation de ces substances entraînerait à terme la mort des cellules. Au fur et à mesure de la croissance de l'arbre, la limite entre aubier et duramen est repoussée vers l'extérieur. La duraminisation est plus ou moins précoce selon l'espèce et il s'en suit que la largeur de l'aubier varie avec l'espèce.

Habituellement plus coloré que l'aubier, le duramen n'est toutefois pas toujours différenciable de ce dernier, on parle alors de bois parfait. C'est le cas chez l'aulne, le bouleau, le charme,

l'épicéa, l'érable, le hêtre, le peuplier ou encore le sapin ... Il est plus durable et fait preuve de propriétés physiques et mécaniques légèrement supérieures à celles de l'aubier. Par contre, il est généralement peu ou pas imprégnable.

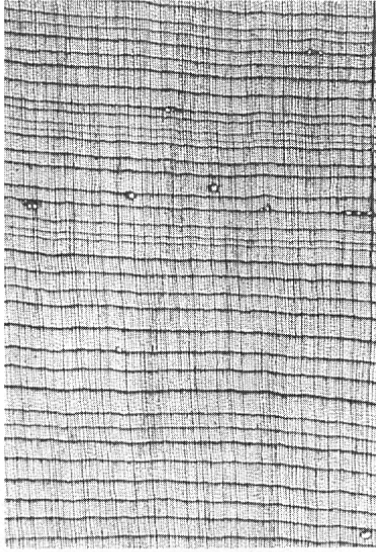
La transformation de l'aubier en duramen peut-être brusque ou progressive. Dans ce dernier cas, il existe une zone de transition dans laquelle les caractéristiques du bois changent progressivement.

## **8.2.        *Modifications avec les conditions de croissance***

### **8.2.1. Largeur des cernes**

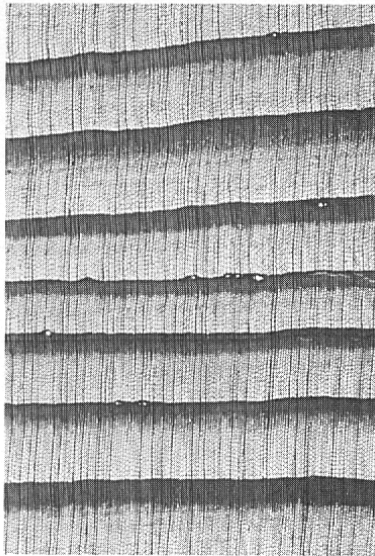
La largeur des cernes est directement fonction de la vitesse de croissance de l'arbre, elle-même dépendante de facteurs multiples, comme la sylviculture appliquée au peuplement, les conditions climatiques et stationnelles (Figures 62 et 63). Ainsi, une sylviculture dynamique produira des cernes larges, alors qu'une sylviculture conservatrice produira des cernes étroits. En outre, une même essence qui croît en altitude présentera des cernes nettement plus étroits que si elle avait crû en plaine. Dans le même ordre d'idée, sur une station bien approvisionnée en eau (sans excès), l'arbre formera des cernes plus larges que sur une station présentant un déficit hydrique.

La largeur des cernes a un impact non négligeable sur les caractéristiques du matériau de par la modification de la texture qu'elle engendre (voir point suivant). Il y a lieu cependant de faire la distinction entre les bois résineux et feuillus.



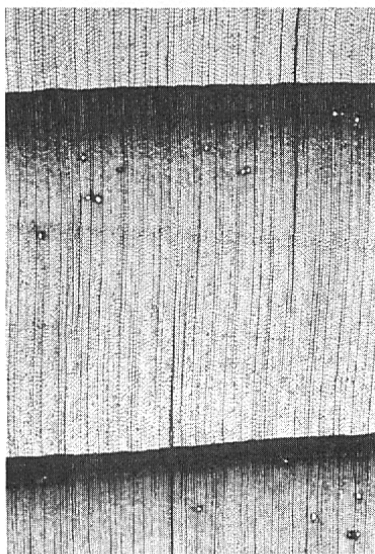
Mélèze à cernes très étroits, provenant de la limite supérieure des forêts

Par suite de la période de végétation très courte, du climat rude et du sol pauvre, les arbres vivant à la limite supérieure des forêts forment des cernes extrêmement étroits, avec une très faible proportion de bois d'été. Comme la résistance du bois dépend directement de la proportion du bois d'été, ce bois est léger, tendre et moyennement résistant.



Mélèze à cernes de largeur moyenne

En règle générale, le bois de résineux à cernes de largeur moyenne présente une proportion relativement forte de bois d'été, une densité élevée et une grande résistance.



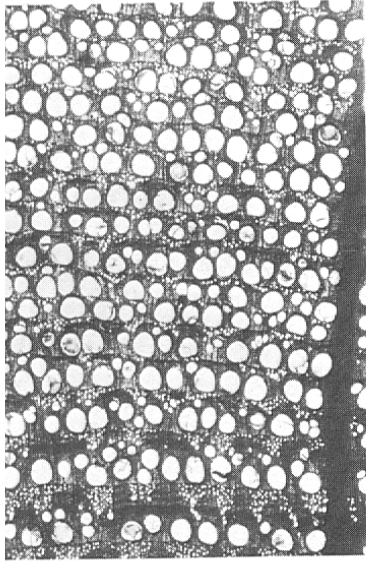
Mélèze à larges cernes

Le bois de résineux à larges cernes présente souvent une proportion de bois d'été plus faible que les bois à cernes d'épaisseur moyenne. Dans ce cas, il a une densité plus faible et une résistance moyenne.

Agrandissements 8 : 1

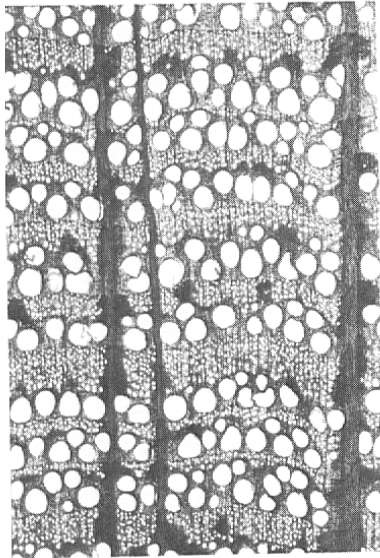
Photos: Institut fédéral de recherches forestières

Figure 62 : Largeur des cernes chez les résineux (Anonyme, 1960).



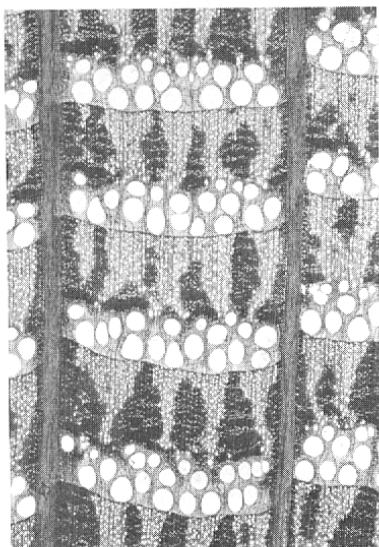
#### Chêne

Arbre très âgé, zones de croissance extérieures très étroites. Les cernes sont constitués pour une grande part de bois de printemps poreux. La résistance est faible.



#### Chêne à cernes étroits

Le bois de feuillu à zones poreuses et cernes étroits présente une faible proportion de bois d'été. C'est pourquoi il est moins résistant que le bois à zones poreuses et larges cernes.



#### Chêne à larges cernes

Le bois de feuillu à zones poreuses et larges cernes contient une forte proportion de bois d'été. Il est plus résistant que le bois à zones poreuses et cernes étroits.

Agrandissements 8 : 1

Photos: Institut fédéral de recherches forestières

Figure 63 : Largeur des cernes chez les feuillus (Anonyme, 1960).

## 8.2.2. Texture

De par la dynamique de la sylviculture menée, le forestier peut agir sur la largeur des cerne de l'arbre, ce qui induit un changement des caractéristiques du matériau en modifiant la **texture** du bois (Tableau 2). La notion de texture a été définie au point 3.4.3. La texture ne peut être étudiée que chez les bois à zones initiale et finale bien différenciées, c'est-à-dire chez les feuillus à zone poreuse distincte (à bois hétérogène) et chez les résineux.

Globalement, les feuillus ont une proportion de bois initial dans le cerne qui reste stable quelle que soit la vitesse de croissance de l'arbre. A l'inverse, chez les résineux, la largeur du bois final reste stable. Dès lors, une faible vitesse de croissance chez un feuillu produit du bois plus léger (plus tendre), alors que chez un résineux, elle produit du bois plus dense. Inversement, une accélération de la vitesse de croissance chez un feuillu produit un bois plus dense, tandis que chez un résineux, elle produit un bois plus léger. Ainsi, il existe en général une corrélation assez étroite entre la texture et la densité, et par conséquent entre la texture et les propriétés mécaniques du bois.

Tableau 2 : Impacts de la vitesse de croissance sur les propriétés du bois.

<b>Résineux</b>	(proportion bois final constante)	<b>Feuillus</b>	(proportion bois initial constante)
Croissance rapide	$\frac{\text{bois initial}}{\text{largeur cerne}} = \text{élevé}$ Bois tendre, cerne large	Croissance rapide	$\frac{\text{bois final}}{\text{largeur cerne}} = \text{élevé}$ Bois dur, cerne large
Croissance lente	$\frac{\text{bois initial}}{\text{largeur cerne}} = \text{faible}$ Bois dur, texture forte, cerne étroit	Croissance lente	$\frac{\text{bois final}}{\text{largeur cerne}} = \text{faible}$ Bois tendre, texture faible, cerne étroit

## 8.2.3. La dimension des éléments ligneux

La variation des dimensions des éléments ligneux de la moelle vers l'écorce permet dans une certaine mesure de déterminer la limite entre le bois juvénile et le bois adulte. Pour les conifères, l'angle des microfibrilles, le retrait longitudinal, la dimension tangentielle des trachéides et la densité minimale dans le cerne diminuent progressivement avec l'âge dans le bois juvénile pour se stabiliser dans le bois adulte. Inversement, la longueur des trachéides augmente dans le bois juvénile pour se stabiliser dans le bois adulte. Chez les feuillus, l'angle des microfibrilles et le retrait longitudinal diminuent avec l'âge dans le bois juvénile, tandis que la longueur des fibres et la surface des vaisseaux augmentent dans celui-ci et se stabilisent dans le bois adulte (Figure 64).

Il y a aussi une variation de longueur des fibres dans un même anneau ligneux. Ainsi, chez l'*Eucalyptus gigantea*, les fibres du bois final sont environ 60% plus longues que les fibres du bois initial. La variation progressive de la longueur des fibres suit une courbe caractéristique qui se répète à travers les différents cerne.

Chez les essences présentant un bois à zone poreuse, il y a une relation étroite entre la dimension des cellules (aussi bien des fibres que des vaisseaux) et les conditions de croissance, car la croissance chez de telles essences démarre brutalement au début de la saison d'activité végétative. Les fibres du bois final peuvent être deux à trois fois plus longues que celles du bois initial mais elles atteignent cette dimension beaucoup moins progressivement que chez les essences à pores disséminés.

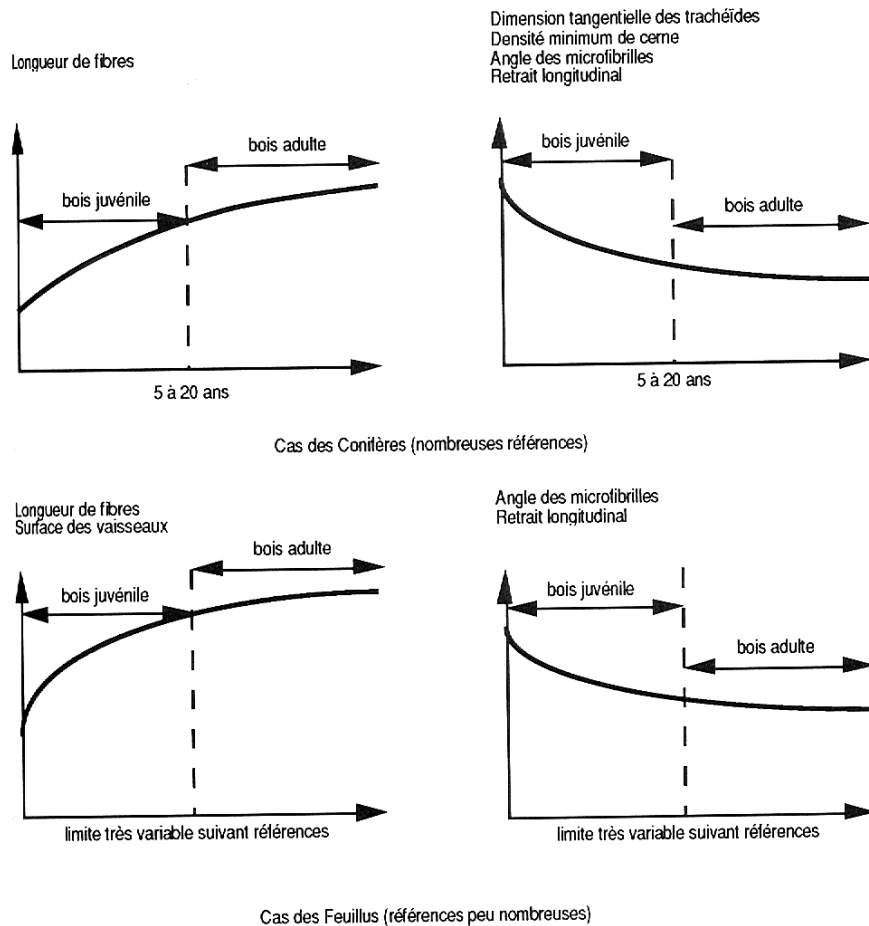


Figure 64 : Evolution de certaines propriétés du bois en fonction de l'âge depuis la moelle (Jodin, 1994).

### 8.3. Modifications de l'orientation du fil du bois

Le **fil du bois** est la direction générale axiale des éléments allongés du bois (fibres et trachéides). La rectitude du fil (ou fil droit) est un gage de stabilité du matériau et d'un bon état de surface. Dans le cas des feuilles de placage, la rectitude du fil est indispensable pour obtenir une planéité et une surface parfaites. Lorsque le fil du bois s'écarte de l'orientation idéale, le comportement du bois peut devenir incertain (fil tors) et sa mise en œuvre compliquée (contre fil) ce qui le déprécie fortement. Les problèmes de mauvais état de surface résultant de l'orientation du fil du bois peuvent apparaître lorsque l'orientation des faces longitudinales d'un débit forme un angle avec l'orientation du fil du bois même si celui-ci est parfaitement droit dans l'arbre.

Les modifications de la rectitude du fil du bois peuvent parfois être synonymes de plus-value (bois figurés, voir point 8.4.). Les causes à l'origine de ces modifications du fil du bois ne sont pas connues.

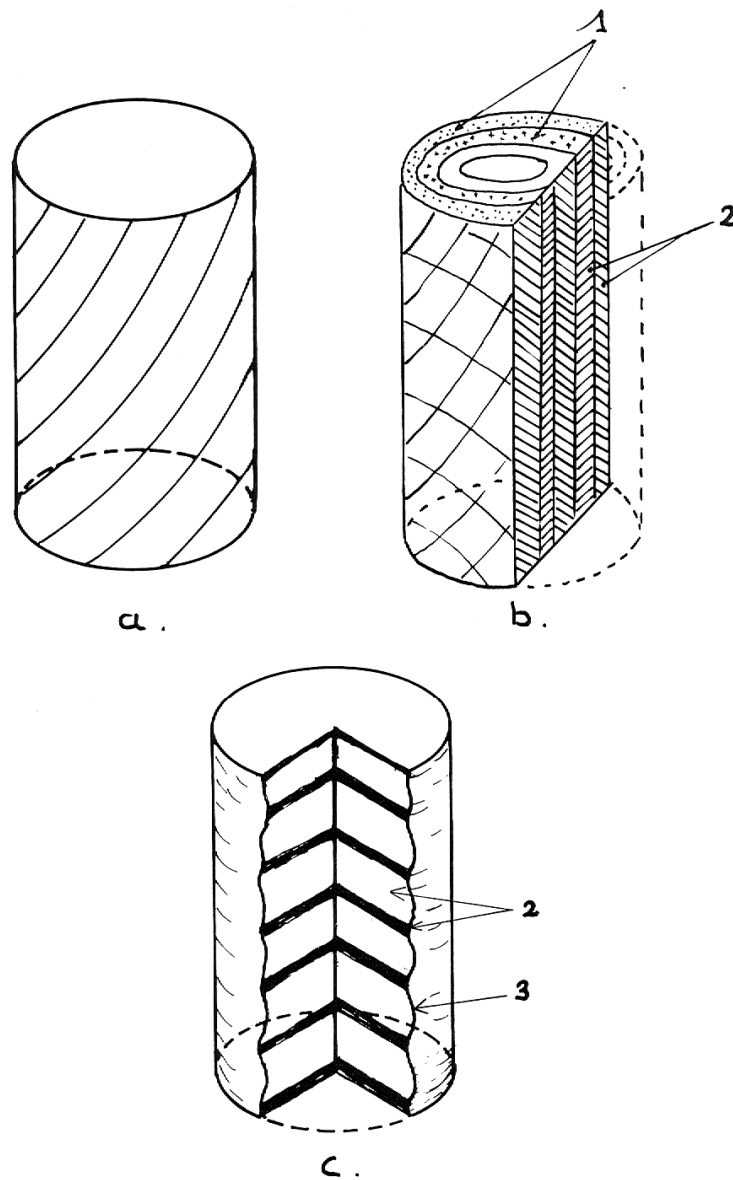
#### 8.3.1. Fil tors

Le **fil tors** ou **fibre torse** correspond à un bois dont les éléments allongés (fibres et trachéides) suivent un trajet torsadé (en spirale) par rapport à l'axe de l'arbre, en restant parallèle entre eux (Figure 65). Le terme bois vissé est parfois utilisé pour caractériser ces arbres. Il s'agit d'un défaut important qui limite fortement les possibilités de valorisation du bois du fait des déformations qui apparaissent au séchage et de la présence de fibres tranchées au sciage résultant du non-alignement du fil du bois avec la direction longitudinale du trait de scie.

### 8.3.2. Contre fil

Le **contre fil** est caractéristique d'un bois dont les éléments allongés (fibres et trachéides) suivent un trajet torsadé par rapport à l'axe de l'arbre mais dont le sens de la spirale s'inverse (Figure 65).

Lors de l'opération de rabotage, suivant le sens de la spirale, le fil est soit couché soit relevé par le fer de l'outil. Il s'en suit un mauvais état de surface au niveau du fil relevé qui nécessite un ponçage ultérieur. Néanmoins, cela donne chez certaines essences tropicales une figuration dite rubanée donnant des jeux de lumière intéressants (par exemple, le sapelli).



*Anomalies de rectitude du fil*

- a. — Fil tors.
- b. — Contrefil.
- c. — Fil ondulé (ondes axiales).
  - 1. Orientations du sens du fil différentes.
  - 2. Zones différentes quant au poli et à l'éclat.
  - 3. Ondulation du fil.

Figure 65 : Modifications de l'orientation du fil du bois (Venet, 1986).

## 8.4. Bois figurés

L'aspect d'un **bois figuré**, qui peut être plus ou moins marqué, résulte de l'enchevêtrement des fibres entre elles (Figure 66). Le bois est alors qualifié de pommelé, moiré, moucheté, ondé, rubané, cordé... en fonction de l'apparence qu'il prend. L'aspect figuré apparaît au niveau des fourches, de la naissance des branches, des empattements ou peut être généralisé dans toute la grume, surtout dans les bois tropicaux.

### 8.4.1. Bois ondé

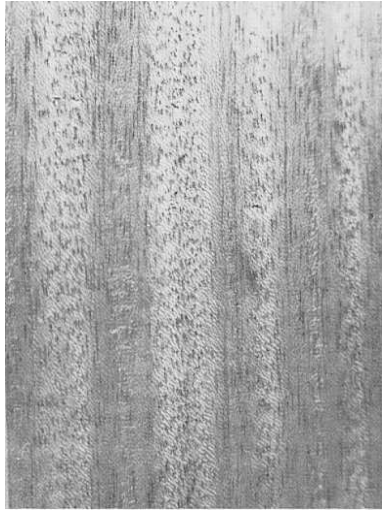
Le **bois ondé** résulte d'un fil ondulé soit dans le plan tangentiel, soit le plus souvent dans le plan radial (Figures 65 et 66). La figuration ondé qui apparaît à la surface des débits est souvent recherchée pour son aspect décoratif. Ainsi, les érables ondes sont recherchés pour la fabrication des instruments de musique à cordes. Cette anomalie du fil se rencontre également chez le frêne et chez certains bois tropicaux.

### 8.4.2. Bois madré

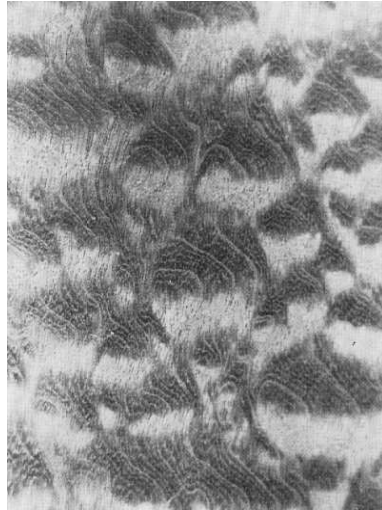
Le **bois madré** est un bois dont les éléments sont irrégulièrement sinueux et enchevêtrés (Figure 66). Il se retrouve à la base du fût, à la naissance des grosses branches, dans les tissus de cicatrisation des blessures, au voisinage des loupes et des broussins. Ce "défaut" donne des débits déformables et de finition très difficile.

Le bois madré recouvre toute une série de combinaisons de modification du fil du bois (inclinaison et ondulation). L'intérêt de ces modifications réside dans la figuration particulière, parfois très esthétique, que donnent chacune d'elles et par conséquent, très recherchée en placage pour la décoration et l'aménagement.

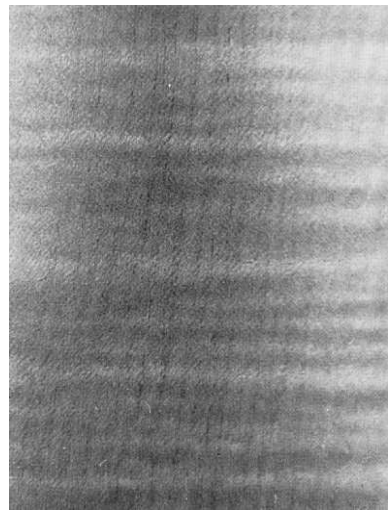
- **Bois pommelé** : présence de dessins arrondis souvent un peu allongés horizontalement, autour desquels l'effet de la lumière sur le fil forme une zone plus colorée et plus sombre. Cette figuration relève d'un cas complexe d'ondulation du fil dans le plan radial et tangentiel, associée à une certaine irrégularité dans le fonctionnement du cambium.
- **Bois moiré** : présence de petits dessins en ailes d'abeilles ou des marbrures claires et foncées résultant d'une combinaison complexe du contre-fil, de l'ondulation radiale et tangentielle, ces dernières étant parfois irrégulières.
- **Bois cordé** : il s'agit d'un bois moiré présentant en plus un fil tors avec un mouvement d'ondulation radiale irrégulier et des figurations redressées.
- **Ronce** : figure en éventail obtenue par tranchage au niveau d'une fourche. Cette figuration est très recherchée pour les compositions de portes en acajou, donnant des aspects de flamme.
- **Bois moucheté** : aspect de petites dépressions coniques du fil visible sur dose ou sur tranchage, résultant de la présence de petits nœuds preventifs rapprochés.
- **Bois rubané** : la présence de contre fil donne naissance à une figuration rayonnée ou rubanée suivant la largeur des bandes, qui donnent lieu à des jeux de lumière.



Tiama rubané



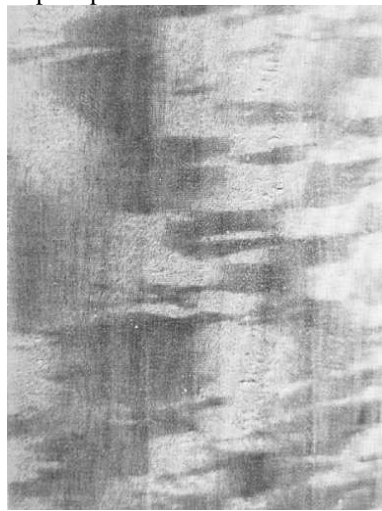
Sapelli pommelé



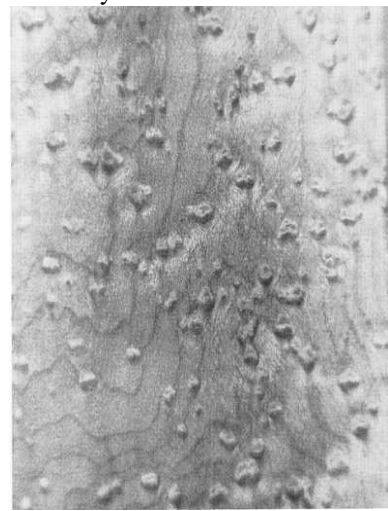
Erable sycomore ondé



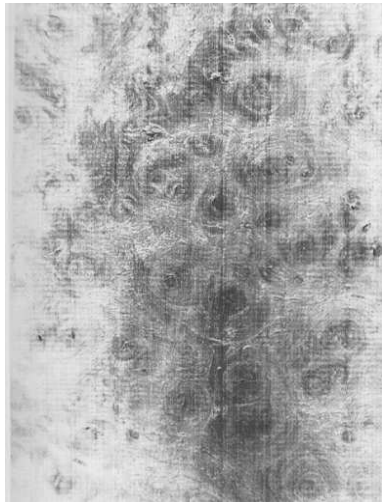
Izombé cordé



Kotibé moiré



Erable du Canada moucheté



Loupe de Maïdou

Figure 66 : Bois figurés (Detienne *et al.*, 1998).

#### 8.4.3. Loupe

La **loupe** est une tumeur ligneuse en forme d'excroissance globuleuse à écorce lisse à la surface d'une tige et qui est formée de tissus à fibres enchevêtrées et tourmentées (bois madré) (Figure 66). Les loupes peuvent atteindre de très fortes dimensions. La loupe résulte d'une prolifération anarchique de l'assise cambiale suite à son excitation provoquée par une blessure, une piqûre d'insecte ou un agent pathogène. Cette anomalie est très recherchée par les trancheurs pour son utilisation en marqueterie ou en placage.

#### 8.4.4. Broussin

Le **broussin** est une excroissance à la surface d'une grume résultant de la prolifération de gourmands. Sur un débit, il apparaît en surface sous forme d'une plage de picots (petits nœuds < 10 mm) au milieu d'un tissu fibreux enchevêtré. Il est préjudiciable en menuiserie mais recherché en ébénisterie et en placage.

## 9. Formations ligneuses particulières

### 9.1. Bois de réaction

Le **bois de réaction** est un bois qui présente des caractéristiques anatomiques distinctes. Il se forme typiquement dans les portions de tiges penchées ou courbées et dans les branches. En produisant du bois de réaction, le végétal s'efforce de rétablir un état d'équilibre. Ce tissu s'accompagne d'un niveau anormalement élevé de contraintes de croissance qui auront tendance à induire des déformations des pièces de bois. La stratégie élaborée par les gymnospermes pour lutter contre ce déséquilibre diffère de celle des angiospermes. Les premiers ont opté pour des modifications anatomiques sur la face inférieure d'un axe incliné, d'où la notion de **bois de compression** et les seconds, pour des modifications sur la face supérieure, d'où la notion de **bois de tension** (Figure 67).

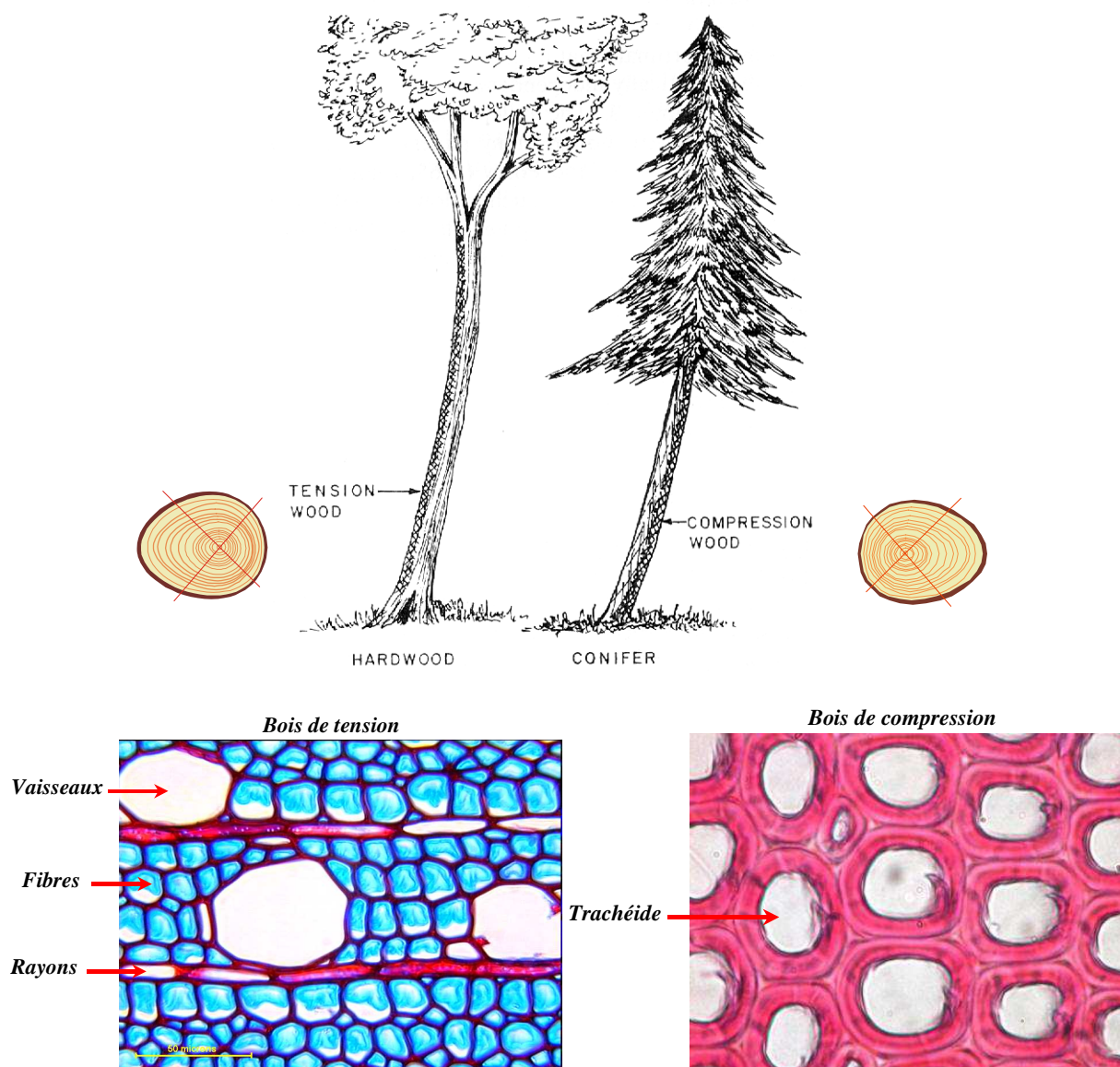


Figure 67 : Localisation et caractéristiques anatomiques du bois de réaction des feuillus et des résineux.

### 9.1.1. Bois de compression

C'est le bois de réaction typiquement formé à la partie inférieure des branches et des tiges penchées ou recourbées des conifères. Il se caractérise anatomiquement par des trachéides fortement lignifiées qui apparaissent circulaires en section transversale et possèdent des fentes spiralées dans leur paroi longitudinale (Figure 67). Les zones de bois de compression sont typiquement plus denses et plus foncées que le bois normal. Leur rétractibilité longitudinale est anormalement élevée ce qui tend à provoquer des déformations et des fentes.

### 9.1.2. Bois de tension

C'est le bois de réaction typiquement formé à la partie supérieure des branches et des tiges penchées ou recourbées des dicotylédones. Il se caractérise anatomiquement par la présence d'une couche interne gélatineuse dans la lumière des fibres (Figure 67). La présence de ce tissu donne un aspect pelucheux au débit, induit des différences de coloration et provoque des déformations des pièces débitées.

### 9.1.3. Contraintes de maturation

Les cellules du bois sont issues de divisions périclines centripètes de cellules mères au niveau du cambium. Après leur différenciation dans la zone cambiale, les nouvelles cellules accolées à leurs voisines vont entrer dans la phase de maturation et vont voir leurs dimensions transversales se fixer, leur grand axe montrer une tendance à se raccourcir légèrement et leur paroi se lignifier, induisant ainsi le développement de **contraintes de maturation**. Ce raccourcissement est contré par le fait qu'elles adhèrent à la couche de cellules formées précédemment. Ceci a pour conséquence de mettre progressivement le centre de l'arbre en compression et l'extérieur en tension et d'assurer ainsi une certaine rigidité de l'édifice. Dans le bois de réaction, les contraintes de maturation ne sont pas uniformes sur toute la périphérie de l'arbre. Dans le bois de tension, la tendance au raccourcissement sur la face supérieure d'un axe incliné est nettement plus marquée et le niveau de contraintes de maturation plus important par rapport au bois formé sur la face inférieure. Dans le bois de compression, la tendance à l'allongement des trachéides sur la face inférieure d'un axe incliné va également induire un niveau de contraintes anormales. Ce différentiel de niveau de contrainte sur les deux faces opposées de l'arbre permet la stabilisation, voire le redressement des axes.

L'angle des microfibrilles de cellulose conditionne les mouvements de raccourcissement ou d'élongation lors de la maturation des fibres et des trachéides (augmentation de l'angle des microfibrilles dans le bois de réaction, gonflement de la matrice de cellulose par incrustation de la lignine ou cristallisation des microfibrilles de cellulose lors de la phase de maturation des cellules).

Ces contraintes sont l'explication du rôle mécanique du bois de réaction qui soutient l'architecture de l'arbre lorsque celui-ci s'écarte de sa position d'équilibre. Malheureusement, lors de la transformation de l'arbre en produits utilisables, ces contraintes vont être relâchées et induire des déformations parfois non négligeables dans les pièces débitées. Le relâchement des contraintes va produire chez certaines espèces l'éclatement de la base du tronc lors de l'abattage (*Eucalyptus*) et moins spectaculaire mais parfois tout aussi dépréciatif pour la grume, des fentes longitudinales pouvant se propager sur plusieurs mètres (*Fagus* et *Populus*). Dans le cas du hêtre, un préfondage devant le ruban de la scie à grume est conseillé pour les pièces de grande largeur. L'expression du relâchement des contraintes se produit parfois plus tard lors du séchage ou du stockage (pièces déformées).

## 9.2. Croissance secondaire anormale

### 9.2.1. Faux-cerne annuel

Un **faux-cerne** désigne une structure plus ou moins normale située dans un accroissement annuel qui, à un examen rapide, pourrait faire penser à une structure rencontrée en limite d'accroissement (Figures 68 et 69). Le fait qu'il ne soit pas continu sur toute la circonférence permet de le discerner. Sa présence résulte souvent d'une courte période défavorable survenant au cours de la saison de croissance et d'une reprise ultérieure des divisions cellulaires, lorsque les conditions redeviennent favorables. La reprise est généralement progressive ce qui se traduit par un retour graduel à des cellules à parois minces. Ce cas de figure diffère d'une limite de cerne entre deux années de croissance, caractérisée par un passage abrupte entre une couche de cellules à parois très épaisses et les couches de cellules du bois initial à parois minces de l'année suivante. Les conditions défavorables susceptibles de provoquer la formation d'un faux-cerne peuvent être, par exemple, une défoliation très précoce dans la saison de végétation avec formation d'une seconde feuille ou un stress hydrique important pendant la période de divisions cellulaires.

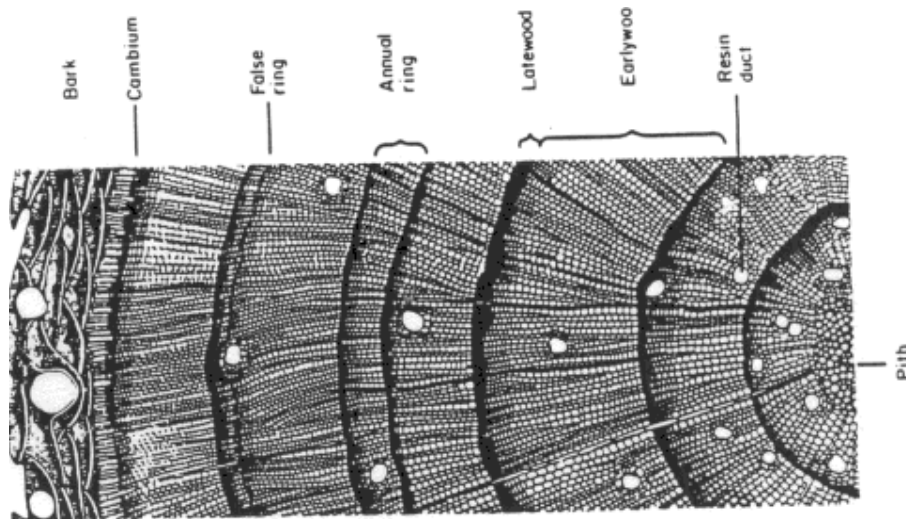


Figure 68 : Coupe transversale d'une tige d'un jeune conifère montrant un faux-cerne dans la structure de la tige (Fritts *et al.*, 1979).

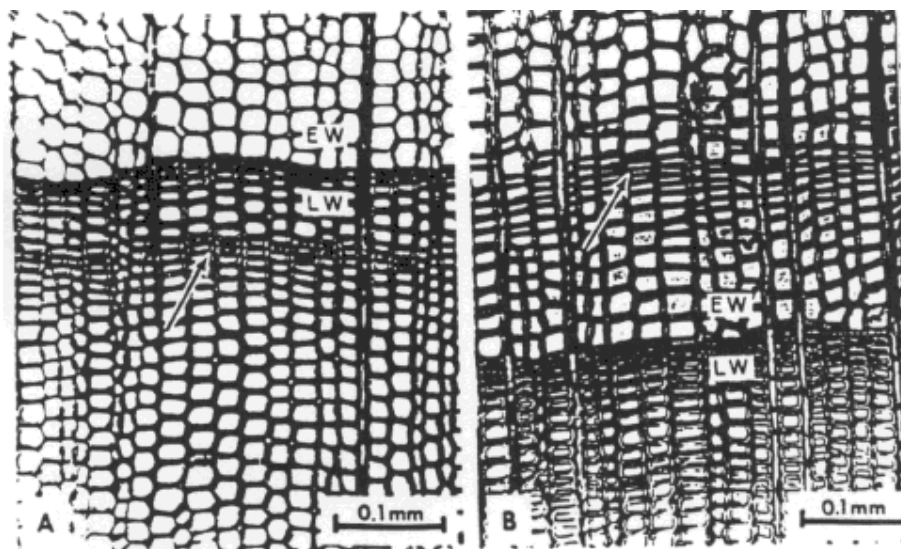


Figure 69 : Cernes de croissance annuels montrant le bois initial (Earlywood : EW), bois final (Latewood : LW) et un faux-cerne (flèche) (Fritts *et al.*, 1979).

### 9.2.2. Faux cœur

Chez certaines essences, un **faux cœur** ou **faux-duramen** peut être observé dans la partie centrale du bois parfait. Il forme une zone de forme irrégulière avec une coloration anormale, plus ou moins prononcée. Il s'agit d'une réaction physiologique à certains facteurs du milieu (par exemple, des grands froids, des attaques fongiques ...) ou une simple manifestation de sénilité qui entraîne une modification chimique du bois. La constitution du bois n'est pas altérée. En outre, il présente généralement une densité et le plus souvent une dureté plus grandes que celles du bois qui l'entoure. Chez les essences sans aubier distinct, la coloration simule un duramen, chez les essences à aubier distinct le duramen change de couleur et le contour irrégulier de ce faux duramen permet de le distinguer.

Ce faux cœur est fréquent chez le frêne (cœur noir), les fruitiers et les peupliers. Par contre, chez le hêtre, une coloration anormale peut affecter les arbres âgés ou croissant dans des stations défavorables. Ce cœur rouge serait déclenché par une réaction à une attaque cryptogamique de l'arbre sur pied en partant du sol. Il ne constitue pas à proprement parler un faux cœur.

En fonction de l'espèce (cœur rouge du chêne, du hêtre, cœur gris du hêtre, cœur noir du frêne ...), les conséquences sont variables mais conduisent généralement à une dépréciation du bois.

### 9.2.3. Lunure

La **lunure** ou **double aubier** se présente sous forme d'une lentille ou d'un anneau complet de quelques centimètres de largeur enclavé dans le duramen, plus clair, formé d'aubier non duraminisé. Bien que les cellules qui la constituent soient mortes, cette zone a conservé tous les caractères de l'aubier : présence d'amidon, absence de pigments et de tanins, absence de thylls dans les vaisseaux et, par suite, elle demeure altérable. Particulier aux essences feuillues, ce défaut est plus fréquent chez le chêne et le châtaignier. La lunure résulte de la non duraminisation de l'aubier suite à l'action d'un grand froid.

La lunure est souvent retrouvée sur toute la longueur de la grume.

La lunure est difficilement compatible avec une valorisation en tranchage ou en ébénisterie, en fait partout où l'aubier est exclu par les conventions commerciales. Sa présence conduit donc, souvent, à un déclassement de la grume.

### 9.2.4. Taches médullaires

Les **taches médullaires** sont de petites zones brunâtres relativement riches en tanins, noyées dans la masse du bois. Elles sont formées par des amas de cellules de parenchyme anormal souvent cicatriciel, produit en réaction à des piqûres d'insectes au niveau du cambium. Ces taches se forment lorsque l'arbre est jeune et que son écorce est fine. Elles sont caractéristiques de certaines essences feuillues et peuvent ainsi être utilisées comme critère d'identification (par exemple, *Alnus*, *Betula*, *Crataegus*, *Salix* et *Sorbus*).

### 9.2.5. Liber inclus

Le **liber inclus** est une zone de liber incluse dans le bois (xylème) de certaines dicotylédones. Cette anomalie est la conséquence d'un dysfonctionnement du cambium. Ce liber inclus peut être esthétiquement gênant.

## 10. Propriétés organoleptiques du bois

Les propriétés sensorielles des bois font référence à leur couleur et leur odeur mais également au toucher et au goût. Avec le temps, ces propriétés évoluent et ont tendance à s'estomper. Dès lors, il peut-être nécessaire de les rafraîchir en rabotant ou en grattant le bois.

### 10.1. Couleur

Le bois est un matériau qui offre une palette de couleurs et d'aspects extrêmement riche, depuis le blanc jusqu'au noir en passant par tous les intermédiaires. Les substances de base, la lignine et la cellulose, sont peu colorées. La couleur est due à la présence de substances incrustées dans la paroi cellulaire ou dans le lumen des cellules du duramen. Il est à noter que certains extraits du bois sont utilisés comme teinture. L'aubier est généralement de couleur claire, allant du blanc au jaune-crème en passant par toutes les nuances.

La couleur est propre à chaque espèce et peut être influencée dans une certaine mesure par l'âge du bois, l'environnement, la station, par la présence d'une anomalie, l'époque d'abattage, l'exposition à l'air, à la lumière, à la chaleur, l'étuvage et le séchage.

#### Couleur de l'amarante

Au moment du sciage de l'amarante, le bois parfait, fraîchement coupé est presque blanc. Il vire rapidement au violet par oxydation à l'air et fonce rapidement à la lumière. Avec le temps, sa couleur s'assombrit passant d'une teinte violet rose bien soutenue à un violet sombre presque brun. Cette évolution est par contre extrêmement lente. Il existe différentes méthodes permettant de préserver la couleur vive du bois. Un traitement à l'acide nitrique dilué ou des applications de vernis spéciaux atténuant l'assombrissement du bois permettent de conserver dans une certaine mesure la teinte violacée caractéristique. Un traitement composé en partie de citron vert est susceptible de maintenir sa teinte originelle indéfiniment.

<http://ecole.pagespro-orange.fr/redris/HTML/prevoteau6.htm>

Exposés à la lumière, les bois clairs ont tendance à foncer, tandis que les bois foncés ont tendance à s'éclaircir. La couleur du bois peut être également modifiée par un traitement chimique (par exemple, un traitement à l'ammoniac fonce le bois tandis qu'un traitement au peroxyde d'hydrogène le blanchit).

Chez les espèces à duramen différencié, il y a lieu de considérer la couleur de l'aubier et du duramen. Le duramen présente chez ces espèces une teinte plus foncée produite par les phénomènes de duraminisation (mort des cellules). Chez les essences à duramen non différencié, l'aubier et le duramen montrent généralement une couleur claire.

Des colorations anormales peuvent apparaître. Elles sont d'origine physiologique ou pathologique et entraînent des modifications de la composition chimique des membranes et du contenu cellulaire. Ces colorations peuvent avoir pour origine des dégâts de frotures, d'échauffures, la présence de bois de réaction, la formation d'un faux duramen ou la présence de nœuds recouverts.

Chez les résineux, la couleur est pâle ou d'intensité moyenne, rarement très foncée, et il existe au sein de chaque cerne une différence de couleur marquée entre le bois initial et le bois final qui est plus sombre.

Certains bois présentent une particularité de coloration intéressante, appelée "veine" (on dit parfois le "veinage"). Il s'agit de plages colorées, axiales et, en même temps, grossièrement tangentielles, mais ne suivant pas exactement le contour des cernes (sans rapport avec la

couleur particulière éventuelle du bois d'été). Beaucoup de bois tropicaux présentent aussi ce caractère d'identification intéressant.

En première approche, la prise en compte de la couleur du bois permet d'orienter l'identification d'un échantillon de bois. La couleur s'examine à la lumière du jour, en faisant varier l'angle d'incidence des rayons lumineux, afin de faire ressortir les différences éventuelles d'éclat entre les diverses catégories de tissus composant le bois. Ceci est particulièrement important pour étudier les mailles en sections radiales brutes de fente.

Des essences telles que l'acajou, l'amarante, l'ébène, ou l'érable, ont une valeur décorative notable en raison, entre autre, de leur couleur, bien que l'appréciation de la couleur soit une question de mode et de culture. La couleur peut également revêtir une signification très pratique dans certaines utilisations. Par exemple, dans la fabrication d'emballages, la blancheur du bois de peuplier est une exigence pour des questions de visibilité des motifs commerciaux imprimés. Dans la plupart des cas d'utilisation de bois précieux, l'homogénéité de la couleur est recherchée. Cette homogénéité est d'ailleurs un critère de classement d'aspect des parquets haut de gamme.

#### Influence du sol sur la couleur

La couleur du hêtre peut varier, suivant les provenances, d'un blanc presque pur, dans certaines stations en sols calcaires de l'Est de la France, à une coloration rose rougeâtre, dans certaines stations montagnardes ou en sols acides ou mouilleux.

Sans qu'il y ait d'atteinte pathologique, la couleur de l'orme champêtre varie, elle aussi, suivant les provenances, du blanc-grisâtre au brun rouge clair.

Le merisier est parfois de teinte jaunâtre, sur sols argileux et brun-rose clair, sur sols calcaires. La couleur du chêne rouvre varie du jaune paille au brun jaune clair, mais certains crus bien connus ont une couleur jaune rosâtre.

*D'après Venet, 1986*

#### Les classes de couleur du bois

Grossièrement, les couleurs des bois se répartissent en cinq groupes :

- 1) les bois blancs, crème ou gris clair, du type *Carya* : charme, houx, érable sycomore, marronnier, *Celtis*, lierre, etc.;
- 2) les bois jaune pâle, jaune citron, jaune d'or ou jaune brun clair, du type bouleau : *Elkova*, *Planera*, *Ficus*, *Liriodendron*, *Sophora*, *Citrus*, *Ailantus*, *Buxus*, *Evonymus*, *Ligustrum*, *Paulownia*, *Sambucus*, etc.;
- 3) les bois brun clair, brun verdâtre, brun foncé, brun violacé ou noirs, du type Juglans : *Quercus*, *Castanea*, *Morus*, *Laurus*, *Robinia*, *Cytisus*, *Cercis*, *Hippophae*, *Eieagnus*, *Myrtus*, *Olea*, *Catalpa*, *Diospyros*, etc.;
- 4) les bois rosâtres ou rougeâtres, clairs, du type *Alnus* : *Cerasus*, *Sorbus torminalis*, *Gymnocladus*, *Gleditschia*, *Cornus*, etc. ;
- 5) les bois rose vif, rouge, brun rosé, brun rougeâtre, du type *Ostrya* : *Liquidambar*, *Sorbus domestica*, *Pirus*, *Ceratonia*, *Melia*, *Pistacia lentiscus*, *Rhus pentaphylla*, *Zizyphus*, *Arbutus*, *Erica*, *Viburnum tinus*, etc.

*D'après Venet, 1986*

## 10.2. Odeur

Certains bois ont une odeur caractéristique qui peut être plus ou moins agréable. L'odeur résulte de la présence de composés volatiles (dans les extraits) au niveau du duramen ou de l'action de champignons, bactéries ou moisissures. Cette odeur est généralement plus prononcée sur du bois frais. Chez les résineux, l'odeur résulte de la présence de résine tant dans l'aubier que dans le duramen.

Certaines familles telles que les *Lauraceae*, les *Myristicaceae*, les *Santalaceae*, ou le cèdre pour les conifères émettent des composés aromatiques qui donnent à leur bois une odeur persistante et agréable. Cette odeur intervient parfois comme critère d'identification. Souvent l'odeur s'estompe avec le temps ou lorsque le bois sèche, mais elle peut aussi rester perceptible très longtemps (par exemple, cèdre).

L'odeur participe au charme du matériau. Elle peut être un atout ou un handicap lors de l'utilisation du bois pour un usage donné. Par exemple, le bois de l'arbre à camphre (*Cinnamomum camphora* L.) ou le genévrier de Virginie (*Juniperus virginiana* L.) ont un effet répulsif sur les insectes.

### Les odeurs spécifiques du bois

Parmi les bois odorants, citons les *Juglans* (odeur de brou), l'orme et le sapin frais (odeur rance), le laurier (odeur analogue à celle de ses feuilles), le poirier et les *Cerasus* (odeur de coumarine), l'eucalyptus, le cèdre (odeur aromatique), les genévriers (évoquent l'odeur des crayons), les pins, le douglas, les mélèzes, l'épicéa frais (odeur de résine), le tilleul (odeur de moisi), le cyprès de Lawson (odeur de citron), etc. Avec une certaine habitude, l'odeur du pin sylvestre peut être différenciée de celle du pin maritime (plus aromatique), ou du pin pignon (plus épicé). Beaucoup de bois tropicaux ont aussi des odeurs très caractéristiques.

*D'après Venet, 1986*

## 10.3. Autres propriétés sensorielles

### 10.3.1. Goût

Le goût est fortement lié à l'odeur du bois et est probablement dû aux mêmes substances. La combinaison de l'odeur et du goût peut être une aide dans l'identification de bois mais ces propriétés doivent être utilisées avec prudence car elles sont décrites de façon subjective, dépendant de l'expérience personnelle de l'individu.

Le sens du goût est utilisé comme critère subsidiaire pour certains bois : le genévrier (bois utilisé dans la fabrication des crayons), le calocèdre (goût piquant) et le cyprès de Lawson (goût amer).

Toutefois, en ce qui concerne l'étude de ce caractère chez les bois tropicaux, il convient de se méfier de certaines essences toxiques.

Le choix des bois utilisés dans la fabrication de contenants alimentaires ou d'objets en contact direct avec les aliments est restreint à des bois qui ne leur confèrent pas de goût ni d'odeur prononcés. Citons par exemple, le bois de hêtre utilisé pour la confection de couverts en bois, de bâtons de glace, de pics à brochettes, de cures dents... ou, le bois de peuplier utilisé pour la fabrication d'emballages légers tels que les cagots à fruits, les boîtes à fromage, les bourriches

à huîtres. *A contrario*, dans le cas de la fabrication des barriques à vin, le chêne est choisi en raison de ses potentialités organoleptiques.

#### Sécurité alimentaire

La sécurité alimentaire est un sujet de préoccupation majeure et les matériaux à base de bois qui sont susceptibles d'être au contact d'aliments sont nombreux et variés. En ce qui concerne la réglementation, la directive européenne 89/109 énonce le principe d'inertie qui est un principe fondamental à respecter quelque soit le matériau considéré. Selon ce principe, les matériaux doivent être inertes, c'est-à-dire que dans des conditions normales de leur emploi, ils ne doivent pas céder aux denrées alimentaires des constituants en quantité susceptible de présenter un danger pour la santé humaine, d'entraîner une modification inacceptable de la composition ou une altération des caractères organoleptiques de ces denrées.

#### 10.3.2. Toucher

Le toucher de certains bois est rendu "gras" par la présence de résine (pin d'Alep, pins jaunes du sud-est des Etats-Unis, parfois pin maritime). Chez les bois tropicaux, le toucher "gras" du niangon ou du teck est très caractéristique.

Certains bois à grain fin présentent après polissage un toucher lisse (bruyère, buis, olivier, poirier, sorbier ... et chez les résineux, *Callitris*, *Cupressus*, if, *Juniperus* ...). La notion de "grain", qui est un critère habituellement visuel (grain fin ou grossier), prend parfois un autre sens. Dans le cas des hêtres à placages des bonnes provenances présentant un grain "doux" au toucher, le grain est une référence tactile.

#### 10.4. Toxicité

La poussière représente le principale facteur de toxicité lors du travail du bois, quelle que soit l'essence concernée. Les extraits et les contenus cellulaires de certains bois peuvent également poser problème lors de leur mise en œuvre et, dans des cas extrêmes, engendrer des maladies chez le travailleur telles que des dermatites et des affections respiratoires.

#### Toxicité des bois

Des allergies cutanées ou respiratoires dues aux bois usinés sont fréquemment observées, en particulier avec les bois tropicaux. Ainsi, l'Iroko (*Milicia excelsa*), le palissandre du Brésil (*Dalbergia nigra*), le bois satiné (*Chrophora swietenia*) et l'Acajou d'Afrique (*Khaya* spp.) provoquent des dermatoses. L'Albizia (*Albizia* spp.), le Muninga (*Pterocarapus angolensis*) et le Samba (*Triplochiton scleroxylon*) peuvent causer des affections respiratoires telles que l'asthme suite à l'inhalation des poussières du bois. Le Makoré (*Tieghemella* spp.) et le Tali (*Erythrophleum* spp.) produisent des poussières irritantes. L'Espenille (*Fagota flave*) peut même occasionner des allergies mortelles à cause de ses composantes chimiques et surtout d'une alcaloïde provoquant une paralysie du cœur. Notons que les bois tempérés peuvent, eux aussi, être la source de poussières allergisantes : c'est le cas de l'aulne, du chêne et de l'if.

## 11. Identification des bois

Comme tous les organismes vivants, les arbres portent un nom identifié dans un système de classification, qui dépend du degré de ressemblance ou de différence avec les autres espèces. Ces différences ou ressemblances sont à la base de l'élaboration des clés d'identification qui sont des outils permettant de déterminer le nom d'une essence.

### 11.1. Classification et dénomination des espèces

Au 18<sup>ème</sup> siècle, le botaniste suédois Linné est à l'origine d'une classification du règne végétal, toujours en vigueur aujourd'hui, qui est basée sur un classement des arbres à partir de leur organe sexuel (fleur). Après avoir créé deux grandes **Classes**, les Gymnospermes (conifères) et les Angiospermes (feuillus), Linné a continué la subdivision en **Ordres**, puis en **Familles**, lesquelles ont été séparées en **Genres**, pour aboutir aux **Espèces**. Le couple « Genre + espèce » suivi du nom de l'auteur qui l'a décrit et nommé (appelé parrain), qualifie ainsi très précisément une essence et constitue la **dénomination scientifique** de celle-ci.

Soucieux de produire un travail universel, Linné a utilisé la langue internationale de l'époque, à savoir le latin, qu'il a émaillé de Grec ancien. Ainsi, le nom de chaque espèce est composé de deux parties : le nom générique suivi d'un « adjectif spécifique ». Par exemple, le genre *Pinus* renferme les espèces *Pinus cembra*, *P. pinaster*, *P. strobus*, *P. sylvestris*, *P. taeda* ...

A partir de ces fondements, une classification botanique de type hiérarchique a été constituée. En d'autres termes, une espèce appartient à un seul genre, un genre appartient à une seule famille ...

Une famille regroupe les genres qui ont le plus de ressemblances entre eux, ils ont des caractères généraux en commun. Les noms des familles finissent en *-aceae* et tout nom de famille comprend le nom de l'un des genres qui en font partie, ou au moins son radical. Le noisetier (*Corylus*) fait ainsi partie de la famille des *Betulaceae*. Dans cette famille, se retrouvent aussi le bouleau (*Betula* spp.), le charme (*Carpinus* spp.), l'aulne (*Alnus* spp.)...

Le « Genre » est le premier terme de la nomenclature binomiale. Il regroupe toutes les sortes de noisetiers sous un même terme qui est *Corylus*. Ce nom est donc en latin, il porte une majuscule et ne contient pas d'accent.

L'espèce est le deuxième terme de la nomenclature binomiale selon Linné. Il s'écrit en minuscule, en latin et ne comporte pas d'accent. Au sein du genre *Corylus*, plusieurs espèces peuvent être différenciées sur base de caractéristiques telles que la forme de leurs feuilles, leur port mais aussi leurs fruits, elles n'ont souvent pas la même origine géographique :

- *Corylus avellana* – Noisetier commun, coudrier...
- *Corylus maxima* – Noisetier de Lombardie, noisetier franc...
- *Corylus colurna* – Noisetier de Bysance (arbre)
- ...

Au cours du temps, cette classification a été affinée en respectant les affinités et les différences réelles entre les plantes et plus spécialement entre leur organe reproducteur, ainsi qu'en tenant compte des liens de parenté avec les ancêtres communs éventuels.

Les espèces sont connues sous d'autres **appellations**, dites **vernaculaires**, qui ont été données par les populations locales, bien antérieurement à la classification établie par Linné. Ces

appellations sont encore usitées aujourd'hui mais peuvent être source de confusion du fait qu'elles ne sont pas normalisées. Une même espèce peut donc porter plusieurs noms suivant la région d'origine. On reconnaît également le **nom pilote** qui a été choisi, parmi les noms vernaculaires, de manière arbitraire par des instances internationales telles que l'ATIBT (Association Technique Internationale des Bois Tropicaux) et l'AFNOR (Association Française de Normalisation).

Enfin, dans certains cas, plusieurs espèces sont regroupées sous un même vocable qui est utilisé dans les échanges commerciaux. Ainsi, le méréanti regroupe en fait plusieurs dizaines d'espèces différentes.

Seul le nom scientifique permet un langage commun au niveau mondial. Ce nom qui qualifie un arbre sert également à dénommer son bois.

#### Exemple de dénomination d'une espèce

LIMBA - FRAKE

Nom scientifique : *Terminalia superba* Engl. et Diels (famille des *Combrétaceae*)

Noms pilotes : LIMBA (ATIB.T. – Congo, Zaïre), FRAKE (Côte-d'Ivoire, Cameroun), AFARA (Grande-Bretagne, Nigeria).

Noms locaux : Sierra Leone et Libéria : Kojagéi  
Côte-d'Ivoire : Fraké  
Ghana : Ofram  
Nigeria : Afara  
Cameroun et Guinée Equatoriale : Akom  
République Centrafricaine : N'ganga  
Congo, Zaïre : Limba  
Cabinda : Limba

### **11.2. Démarche pour l'identification des bois**

Avant d'entamer les analyses, il est nécessaire de déterminer le degré de précision souhaité (détermination du genre ou plus précisément de l'espèce) et de collecter le maximum d'informations relatives à l'origine de l'échantillon.

L'identification peut porter sur une grume, un lot d'avivés, un petit échantillon de bois, voire un copeau prélevé au scalpel. Dans certains cas, l'identification est réalisée *in-situ*, par exemple sur une œuvre d'art.

Dans bien des cas, pour un observateur expérimenté, une grume ou un lot de bois scié peut être décrit sur base de son aspect extérieur, de sa couleur ou de la disposition des tissus les plus apparents pour identifier le genre auquel il appartient. Sur le terrain, il peut être nécessaire de recourir à une observation macroscopique à la loupe d'un échantillon de bois afin de mettre en évidence plus finement la disposition des tissus. Si ces observations ne sont pas suffisantes, des observations microscopiques en laboratoire seront nécessaires pour identifier avec certitude le genre et l'espèce de l'échantillon ligneux. Les observations sur coupes anatomiques, aux différents grossissements et suivant un, deux ou trois plans,

permettent de mettre en évidence les éléments ligneux caractéristiques. Dans certains cas, des mesures de fréquence et de dimension de certains éléments peuvent être nécessaires pour différencier deux espèces proches.

Lors des observations macroscopiques à la loupe et des observations microscopiques, les caractéristiques anatomiques visibles sont listées. A partir de ces caractéristiques et grâce à une clé de détermination, il est possible d'identifier l'essence. Des outils informatiques peuvent apporter une aide à l'identification sur base d'une liste des caractères observés à l'échelle microscopique.

Néanmoins, une identification exacte n'est pas toujours possible et dans ce cas, le recours à une description botanique de l'essence permet de lever toute ambiguïté, quand le matériel est disponible.

## 12. Lexique Français/Anglais

Compte tenu qu'une partie non négligeable de la littérature relative à l'anatomie et à la description des essences est en langue anglaise, le lexique ci-après est donné pour en faciliter la compréhension.

<b>Français</b>	<b>Anglais</b>
Aubier	Sapwood
Barres de Sanio	Bars of Sanio
Bois à pores diffus	Wood diffuse-porous
Bois à zone poreuse	Wood ring-porous
Bois à zone semi-poreuse	Wood semi-ring-porous
Bois de compression	Compression wood
Bois de conifères	Softwood
Bois de feuillus	Hardwood
Bois de tension	Tension wood
Bois final	Latewood
Bois initial	Earlywood
Canal d'une ponctuation	Pit canal
Canal intercellulaire	Intercellular canal
Canal résinifère	Resin canal
Cellule épithéliale	Epithelial cell
Cellules à huile	Oil cells
Cellules à mucilage	Mucilage cells
Cellules bordantes	Sheath cells
Cerne annuel	Annual ring
Cerne de croissance	Growth ring
Champ de croisement	Cross-field
Couche d'accroissement	Growth layer
Couche intercellulaire	Intercellular layer
Couple de ponctuations	Pit-pair
Couple de ponctuations aréolées	Pit-pair bordered
Couple de ponctuations simples	Pit-pair simple
Couple de ponctuations semi-aréolées	Pit-pair half-bordered
Crassules	Crassulea
Cristal	Crystal
Duramen	Heartwood
Élément de vaisseau	Vessel member or element
Épaississements spiralés	Spiral thickening
Etagé	Storied (storeyed)
Faux rayon	Aggregated ray
Fibre	Fibre or fiber
Fibre libriforme	Libriform fibre
Fibres septées	Septate fibres
Fibre-trachéide	Fibre-tracheid
Laticifères	Laticifers
Membrane d'une cellule	Cell wall
Multisériel	Multiseriate
Orifice de ponctuation	Pit aperture
Parenchyme	Parenchyma

<b>Français</b>	<b>Anglais</b>
Parenchyme aliforme	Parenchyma aliform
Parenchyme anastomosé	Parenchyma confluent
Parenchyme apotrachéal	Parenchyma apotracheal
Parenchyme circumvasculaire	Parenchyma vasicentric
Parenchyme dispersé	Parenchyma diffuse
Parenchyme en bandes	Parenchyma banded
Parenchyme en chaînettes	Parenchyma diffuse-in-aggregated
Parenchyme juxtavasculaire	Parenchyma scanty
Parenchyme paratrachéal	Parenchyma paratracheal
Parenchyme réticulé	Parenchyma reticulate
Parenchyme scalariforme	Parenchyma scalariform
Paroi primaire	Primary wall
Paroi secondaire	Secondary wall
Paroi tertiaire	Tertiary wall
Parois dentées	Shaped walls
Perforation	Perforation, vessel
Ponctuation	Pit or pitting
Ponctuation aréolée	Bordered pit
Ponctuation borgne	Blind pit
Ponctuation linéaire	Linear pit
Ponctuation simple	Simple pit
Ponctuations cuprèsoïdes	Cupressoid pits
Ponctuations en disposition scalariforme	Pitting scalariform
Ponctuations en files obliques (alternes)	Pitting alternate
Ponctuations en rangées horizontales (opposées)	Pitting opposite
Ponctuations en tamis	Pitting sieve
Ponctuations picéïdes	Piceoid pits
Ponctuations pinoïdes	Pinoid pits
Ponctuations taxoïdes	Taxodioid pits
Pore	Pore
Pore isolé	Solitary pore
Pores accolés	Pore multiple
Pores en files	Pore chain
Rayon	Ray
Rayons homogènes	Homogeneous rays
Rayons hétérogènes	Heterogeneous rays
Thylle	Tylosis
Trachéide	Tracheid
Trachéide juxtavasculaire	Vasicentric tracheid
Trachéide transversale	Ray tracheids
Trachéide vasculaire	Vascular tracheid
Unisérié	Uniseriate
Vaisseau	Vessel

### 13. Références bibliographiques

Anonyme 1951. Canadian Woods, their properties and uses. Forestry Branch, Ottawa, 367p

Anonyme 1960. Documentation Bois : bases technologiques. Tome 1 bois massif/Matériaux dérivés du bois. Lignum, Zurich

Anonyme 1975. Wood structure and proprieties. Reprinted from Journal of Microscopy, Vol 104 Part 1. Echlin P., Ralph B. and Weibel E.R. (eds), ISBN 063200438X, 106p

Anonyme 2009. L'arbre, un être vivant! Weyrich édition, Belgique, ISBN 978-2-87489-0475, 292p

Boullard B. 1988. Dictionnaire de botanique. Ellipses, Paris, ISBN 2-7298-8845-4, 398p

Bucket E. 2001. Exploitation forestière - Scierie - Emballage. Le bois au contact alimentaire : les connaissances scientifiques face aux exigences de la réglementation. CTBA INFO 89: 12-16

Collardet J. et Besset J. 1988. Bois commerciaux, tome 1, Les résineux (Conifères). H. Vial & Centre technique du bois et de l'ameublement (eds), ISBN 2-85 101-018-2, 277p

Collardet J. et Besset J. 1992. Bois commerciaux, tome 2, Feuillus des zones tempérées. H. Vial & Centre technique du bois et de l'ameublement (eds), ISBN 2-85 101-027-1, 400p

De Sloover J.R., Waterkeyn M. et Iserantant R. 1981. Eléments de botanique : Manuel de travaux pratiques. Syllabus, Louvain-la-neuve, 79p

Desch H.E. 1956. Timber, its structure and properties. St Martin's press, New York, 350p

Detienne P. 1988. Cours illustré d'anatomie du bois. Centre technique forestier tropical, France, ISBN 2-85411-006-4, 47p

Detienne P., Oyono F., Durrieu de Madron L., Demarquez B. et Nasi D. 1998. L'analyse de cernes : application aux études de croissance de quelques essences de peuplements naturels de forêt dense africaine. CIRAD-forêt, 36p

Esau K. 1977. Anatomy of seeds plants. Wiley J. and Sons (eds), USA, ISBN 0-471-24520-8, 550p

Fahn A. 1990. Plant anatomy. Pergamon Press, ISBN 0-08-037491-3, 588p

Fays R. 2008. Des forêts ... Des bois ... ISBN 2-930398-12-4, 1022p

Fengel D. and Wegener G. 1989. Wood, Chemistry, ultrastructure, reactions. De Gruyter (ed.), Berlin, ISBN 3-11-012059-3, 613p

Fritts H.C., Lofgren G.R. and Gordon G.A. 1979. Variations in climate since 1602 as reconstructed from tree rings. Quaternary Research 12(1): 18-46

- Giordano G. 1971. Tecnologia del legno, volume 1, la materia prima. Unione Tipografico-Editrice Torinese, Torino, 1086p
- Giordano G. 1976. Tecnologia del legno, Volume terzo : Le prove ed I legnami di più frequente impiego; Unione Tipografico – Editrice Torinese; 1354 p
- Gorenflot R. 1998. Biologie végétale, Plantes supérieures : appareil végétatif. Masson, Paris, ISBN 2-225831424, 286p
- Hather J.G. 2000. The identification of the Northern European Woods. Archetype Publications Ltd, London, ISBN 1 873132 47 6, 187p
- Hébert J., Herman M. et Jourez B. 2002. Sylviculture et qualité du bois de l'épicéa en Région wallonne. ASBL Forêt wallonne (ed.), ISBN 2-9600251-1-3, 157p
- Hoadley R.B. 1980. Understanding Wood. The Taunton Press, U.S, ISBN 0-918804-05-1, 256p
- Hoadley R.B. 1990. Identifying Wood. The Taunton Press, U.S, ISBN 0-942391-04-7, 223p
- IAWA Committee 1989. IAWA list of microscopic features for Hardwood identification. IAWA Bulletin n.s. 10(3): 219-332
- IAWA Committee 2004. IAWA list of microscopic features for Softwood identification. IAWA Journal 25(1): 1-70
- Jacquot C. 1955. Atlas d'anatomie des bois des Conifères. Centre technique du bois, Paris, 133p
- Jacquot C., Trenard Y. et Dirol D. 1973. Atlas d'anatomie des bois des Angiospermes. Centre technique du bois, Paris, 175p
- Jane F.W. 1956. The structure of wood. A. and C. Black (eds), London, 427p
- Jodin P. 1994. Le bois, matériau d'ingénierie (ouvrage collectif, texte rassemblé par P. Jodin). A.R.BO.LOR., Association pour la recherche sur le bois en Lorraine (ed), Nancy, France, ISBN 2-907086-07-3, 433p
- Kollmann F.F.P. and Côté W.A. 1968. Principles of Wood Science and Technology, Volume I : Solid Wood. Springer-Verlag (ed.), ISBN 3-540-04297-0, 592p
- Leclercq A. et Seutin A. 1989. Les ennemis naturels du bois d'œuvre. Les Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique, ISBN 2-87016-034-8, 140p
- Lüttge U., Kluge M. et Bauer G. 2002. Traité fondamentale de Botanique. Lavoisier (ed.), Paris, ISBN 2-7430-0412-6, 604p
- Méto A. 1975. Dictionnaire forestier multilingue. Conseil international de la langue française, ISBN 2-85319-018-8, 432p

Meylan B.A. and Butterfield B.G. 1972. Three-dimensional Structure of Wood. Syracuse University Press, New York, ISBN 0-8156-5030-2, 80p

Normand D. 1972. Manuel d'identification des bois commerciaux, Tome 1 Généralités. Centre technique forestier tropical (ed.), France, 171p

Panshin A.J., De Zeeuw C. and Brown H.P. 1964. Textbook of wood technology, volume 1- Structure, identification, use, and properties of the commercial of the United States. McGraw-Hill (ed), 643p

Riou-Nivert P. 1996. Les résineux, tome 1 : Connaissance et reconnaissance. Institut pour le développement forestier (IDF), France, ISBN 2-904740-46-5, 255p

Rodd T. et Stackhouse J. 2009. Les arbres. Milan (ed.), Toulouse, France, ISBN 978.2.7459.3531.1, 304p

Roland J-C et Roland F. 1995. Atlas de biologie végétale, Tome 2 Organisation des plantes à fleurs. Masson, Paris, ISBN 2-225-84722-3, 133p

Roux M.L et Anquetil F. 1994. Finition des ouvrages en bois dans le bâtiment. Centre technique du bois et de l'aménagement, Paris, ISBN 2856840183, 121p

Schweingruber F.H. 1990. Anatomie microscopique du bois. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et les paysages, 3<sup>ème</sup> édition, Suisse, ISBN 3-905620-02-2, 226p

Schweingruber F.H. 1990. Anatomy of European woods. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et les paysages, and Paul Haupt Publishers (eds), Berne and Stuttgart, ISBN 3-258-04258-6, 799p

Tsoumis G. 1991. Science and Technology of Wood, Structure, Properties, Utilization. Van Nostrand Reinhold (ed.) New York, ISBN 0-442-23985-8, 494p

Venet J. 1986. Identification et classement des bois français. Ecole nationale du génie rurale, des eaux et des forêts (ENGREF), France, ISBN 2-85710-020-5, 308p

Wagenführ R. 1988. Anatomie des Holzes. VEB Fachbuchverlag Leipzig (ed), ISBN 3-343-00455-3, 334p

Wagenführ R. und Scheiber C. 1989. Holzatlas. VEB Fachbuchverlag Leipzig (ed), ISBN 3-343-00459-6, 720p

Wenzl H.F.J. 1970. The chemical technology of wood. Academic press, London, 692p

Zobel B.J. and Van Buijtenen J.P. 1989. Wood variation, its causes and control. Springer-Verlag (ed), Berlin, ISBN 3-540-50-298-X, 363p