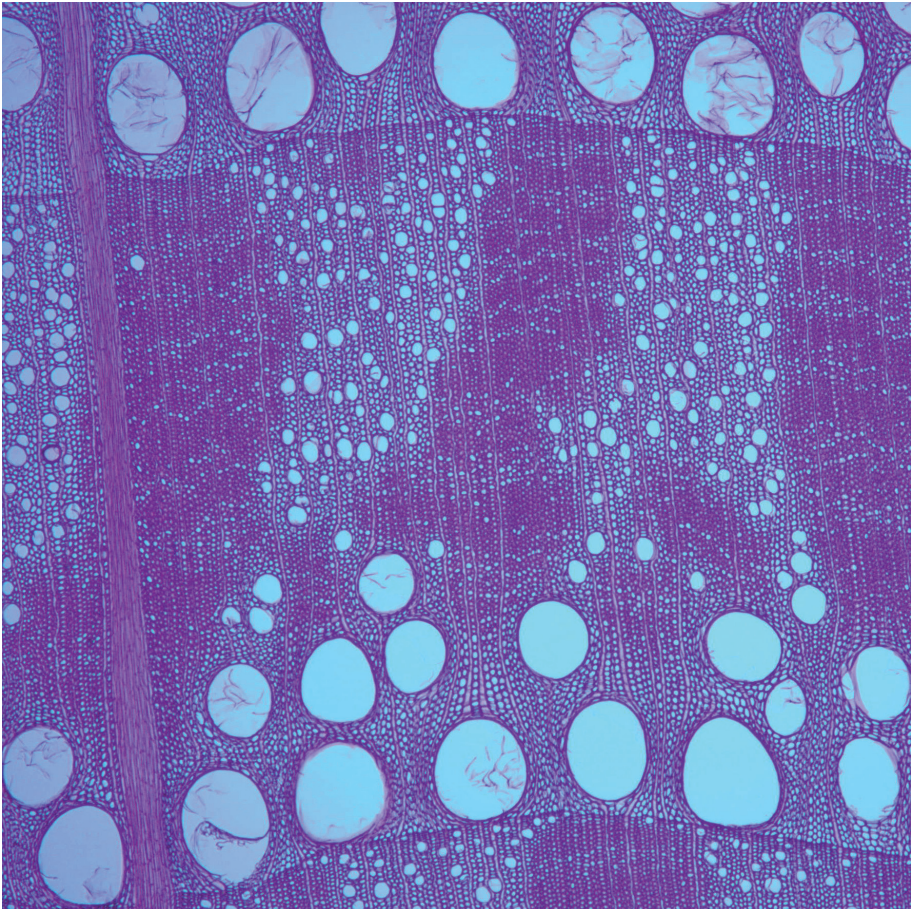


Synthèses

Anatomie du bois

Formation, fonctions
et identification

Marie-Christine Trouy



éditions
Quæ

Anatomie du bois

Formation, fonctions et identification

Anatomie du bois

Formation, fonctions et identification

Marie-Christine Trouy

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex

Collection Synthèses

Restaurer la nature pour atténuer les impacts du développement

Analyse des mesures compensatoires pour la biodiversité

H. Levrel, N. Frascaria-Lacoste, J. Hay, G. Martin, S. Pioch

2015, 320 pages

Comprendre l'amélioration des plantes

Enjeux, méthodes, objectifs et critères de sélection

A. Gallais

2015, 240 p.

Parasites et parasitoses des poissons

P. de Kinkelin, M. Morand, R.P. Hedrick, C. Michel

2014, ePub

La reproduction animale et humaine

M. Saint-Dizier, S. Chastant-Maillard, coord.

2014, 800 p.

Une ville verte

Les rôles du végétal en ville

M. Musy, coord.

2014, 200 p.

Ingénierie écologique

Action par et/ou pour le vivant ?

F. Rey, F. Gosselin, A. Doré, coord.

2014, 174 p.

À la mémoire de Jean-Luc

Table des matières

Remerciements	X
Avant-propos	XI
1. De la biologie de l'arbre à la politique de promotion du bois de construction	1
D'amour et d'eau fraîche, ou presque... ..	1
Besoin de personne ?	2
À boire et à manger : les flux de sève	3
Le bois de toute une vie	3
Carbone en stock	4
Les mille et un bois.....	5
2. La croissance des arbres et la formation du bois	7
L'arbre, jeune et vieux à la fois	7
L'âge de l'arbre	7
L'âge du cambium.....	8
L'âge d'un cerne de bois.....	8
La jeunesse au bout des branches	9
Une couche de plus chaque année	10
La croissance en longueur	10
La structure primaire.....	10
La différenciation des tissus conducteurs primaires.....	12
La montée de sève brute	12
Lignine, du latin <i>lignum</i> , le bois.....	13
La croissance en largeur	15
Le cambium	15
Le phellogène	15
Comme un gant.....	16
Une histoire gravée dans le bois.....	16
Les cellules formées par le cambium	17
La mise en place du cambium dans la racine	18
Directions et plans de référence dans le bois.....	20

La formation du bois.....	21
La paroi.....	21
La différenciation cellulaire.....	26
Les initiales cambiales.....	28
Les divisions cambiales.....	30
Les anomalies d'orientation du fil.....	33
Les bois d'un arbre.....	33
Le bois multi-fonctions.....	33
Le bois juvénile.....	39
Le bois de réaction.....	40
Aubier, bois parfait et duramen.....	42
3. L'anatomie du bois de résineux.....	47
Le jeu des 7 familles.....	47
Un bois tout simple.....	48
Les trachéides longitudinales.....	50
Les ponctuations aréolées.....	51
Deux types de ponctuations aréolées.....	53
Les épaissements spiralés dans les trachéides.....	57
Le cerne annuel.....	57
Relation entre anatomie et densité.....	60
Les rayons ligneux.....	61
De fines lames.....	61
Des parois épaisses et ponctuées ou minces et lisses.....	63
Homocellulaires ou hétérocellulaires.....	66
Les ponctuations de champ de croisement : des yeux, des œufs et des fenêtres... ..	67
Le contenu cellulaire des rayons ligneux.....	72
La maillure.....	73
Le parenchyme longitudinal.....	73
Des cloisons lisses ou nodulaires.....	74
Le contenu cellulaire du parenchyme longitudinal.....	76
Les canaux résinifères.....	76
Normaux ou traumatiques.....	78
Bordés de cellules à parois épaisses ou minces.....	78
Longitudinaux ou radiaux.....	79
Les bizarreries.....	82
Les trabécules.....	82
Les crassules ou barres de Sanio.....	83
Les files de trachéides.....	83

Reconnaissance macroscopique des résineux.....	85
Reconnaissance microscopique des résineux.....	86
4. L'anatomie du bois de feuillus.....	89
Un groupe botanique plus récent, un bois plus complexe.....	89
Classification phylogénétique.....	89
Exemple du bois de robinier (<i>Robinia pseudoacacia</i>).....	93
Les bases de données.....	95
Les vaisseaux.....	97
Les dimensions d'un vaisseau.....	99
La répartition des vaisseaux.....	102
Les perforations.....	107
Les ponctuations dans les vaisseaux.....	109
Les épaisissements spiralés dans les vaisseaux.....	114
Les thylles et les gommés.....	117
Les trachéides.....	122
Les trachéides vasculaires.....	122
Les trachéides juxtavasculaires ou vasicentriques.....	122
Les fibres.....	123
Les fibres libriformes et fibres-trachéides.....	124
Les fibres septées.....	124
Les épaisissements spiralés dans les fibres.....	125
Les fibres et la densité.....	125
Le parenchyme longitudinal.....	127
Les files et les cellules fusiformes de parenchyme longitudinal.....	128
Le parenchyme apotrachéal et le parenchyme paratrachéal.....	129
Le contenu cellulaire du parenchyme longitudinal.....	135
Les ponctuations du parenchyme longitudinal.....	135
Les taches médullaires.....	136
Les rayons ligneux.....	138
Les dimensions d'un rayon ligneux.....	138
Homocellulaires ou hétérocellulaires.....	140
Les ponctuations dans les rayons ligneux.....	140
Le contenu cellulaire des rayons ligneux.....	141
Les rayons agrégés.....	143
Les canaux résinifères.....	144
Reconnaissance macroscopique des feuillus.....	145
Reconnaissance microscopique des feuillus.....	147
Références bibliographiques.....	151

Remerciements

Ce projet a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n°ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'excellence ARBRE), et de l'Association pour la recherche sur le bois en Lorraine (Arbolor).

Avant-propos

Parce que le bois est à la fois un tissu et une ressource, l'anatomie du bois est le point de rencontre des biologistes de l'arbre et des spécialistes du matériau bois. Le bois est un tissu complexe qui assure de nombreuses fonctions dans la plante : conduction de sève, soutien mécanique, contrôle de la posture, stockage de réserves, défense. Il a été l'objet au cours de l'évolution de nombreuses innovations adaptatives qui ont induit de multiples variations. Bien au-delà des différences sensibles comme la densité, l'odeur ou la couleur, une observation des bois à l'échelle de la cellule et de la paroi révèle une diversité insoupçonnée, en particulier chez les feuillus, où l'identification d'une espèce à partir de caractères anatomiques spécifiques est presque toujours possible. L'anatomie du bois est un outil performant d'identification des bois pour laquelle l'expertise humaine reste à ce jour le point de départ essentiel car seul le cerveau humain est capable d'identifier les caractéristiques anatomiques ayant une valeur diagnostique. Au-delà des intérêts de la discipline en biologie, l'identification des bois peut être nécessaire dans le cadre d'expertises judiciaires, de litiges commerciaux, d'enquêtes policières, de problématiques industrielles, d'études historiques ou archéologiques. Par ailleurs, l'anatomie du bois est un prérequis aux autres disciplines dans l'étude du matériau bois. Les propriétés physiques et mécaniques des bois s'expliquent au niveau cellulaire et même pariétal. Enfin, la connaissance de l'anatomie native du bois est nécessaire pour savoir déceler au niveau microscopique les changements microstructuraux qui surviennent suite à des altérations de la matière, ou aux modifications thermique et chimique qui font l'objet de nombreux développements industriels actuels. Le chapitre 1 est une introduction sous forme de grand écart entre la biologie de l'arbre et la politique de promotion du bois de construction qui s'inscrit dans la lutte contre les changements climatiques. Le chapitre 2 est une plongée dans la matière ligneuse : sa formation et ses fonctions dans l'arbre. Le chapitre 3 est consacré à la description des bois de résineux et à leur identification, pas toujours aisée du fait d'une faible diversité des caractères anatomiques. Le principe de la classification phylogénétique est présenté en ouverture du chapitre 4 consacré aux bois de feuillus. Pour l'identification des bois de feuillus, la base de données mondiale, INSIDEWOOD, qui rassemble plus de 6 000 descriptions anatomiques est un outil précieux. Les critères permettant d'interroger la base, définis par l'IAWA (*International Association of Wood Anatomists*), sont des points d'ancrage de ce chapitre, où ils sont décrits et largement illustrés. De nombreuses photos, toutes originales, ont été réalisées en microscopie photonique (MP) sur des coupes minces, ou en microscopie électronique à balayage (MEB) avec des surfaces obtenues par fendage ou à la lame de rasoir, métallisées ou non métallisées. L'étude de l'anatomie du bois passe par une visualisation en

trois dimensions de l'agencement cellulaire, à partir d'images en deux dimensions. Le repérage dans l'espace impose un travail d'observation du bois selon des plans de références bien définis. Et si on ne se perd pas dans le bois (et que le loup n'y est pas), on peut prendre plaisir à découvrir cet univers microscopique, à la fois squelette et muscle, fait de cavités secrètes, de portes et de couloirs, lieu de vie cellulaire déserté dans lequel circulaient sèves et substances, indispensables à la vie des géants du monde vivant que sont les arbres.

Chapitre 1

De la biologie de l'arbre à la politique de promotion du bois de construction

Dans ce chapitre, le lien est établi entre la biologie de l'arbre, plus précisément son mode de nutrition, et la politique actuelle de promotion du bois de construction dans le cadre de la lutte contre l'accentuation de l'effet de serre.

» D'amour et d'eau fraîche, ou presque...

Les végétaux sont des organismes autotrophes : ils peuvent se nourrir sans consommer de matières organiques provenant d'autres êtres vivants car ils sont capables de produire leur propre nourriture organique à partir de constituants minéraux prélevés dans leur environnement, principalement le dioxyde de carbone CO₂ de l'atmosphère et l'eau du sol.

Plus précisément, les végétaux sont photoautotrophes. L'énergie nécessaire à la fabrication de leur nourriture est fournie par le rayonnement solaire capté par le pigment chlorophylle. La réaction de conversion de l'énergie solaire en énergie chimique est appelée photosynthèse. Grâce à cette réaction, les végétaux sont des producteurs de matière organique, à la base des chaînes alimentaires (ou trophiques) terrestres.

Au niveau des océans, les producteurs peuvent être photoautotrophes, ce sont les algues et bactéries photosynthétiques du phytoplancton, ou chimioautotrophes, ce sont les bactéries qui vivent dans l'obscurité des fonds marins, à proximité des cheminées hydrothermales, et qui élaborent des matières organiques en utilisant l'énergie produite par oxydation de substances minérales. Ces bactéries chimioautotrophes sont à la base d'une chaîne alimentaire comprenant : vers, crustacées, mollusques, poissons... Une vie sans lumière que l'on n'a découverte qu'en 1979...

►► Besoin de personne ?

L'eau et le dioxyde de carbone fournissent à l'arbre des éléments essentiels : le carbone, l'oxygène et l'hydrogène. Le dioxyde de carbone est l'unique source de carbone du végétal.

Un autre élément essentiel est l'azote, que la plante absorbe principalement sous forme d'ions nitrates dissous dans l'eau du sol. Ces ions nitrates proviennent de la décomposition des déchets organiques et des organismes morts, ou de la fixation de l'azote atmosphérique par des bactéries fixatrices d'azote.

Certains végétaux abritent au sein même de leur système racinaire ces bactéries pourvoyeuses d'azote.

Les végétaux de la famille des Fabacées (légumineuses), comme le trèfle, le haricot ou le robinier vivent en symbiose avec des actinomycètes (bactéries filamenteuses) du genre *Rhizobium*, abritées dans des nodosités formées au niveau du système racinaire végétal.

Des végétaux d'autres familles, comme l'aulne, présentent aussi des nodosités racinaires, suite à leur association symbiotique avec des bactéries actinomycètes du genre *Frankia*. Ces végétaux sont qualifiés d'actinorhiziens.

Grâce à son association avec des bactéries fixatrices d'azote, l'aulne est une essence pionnière qui peut coloniser des sols pauvres. C'est l'engrais vert des forestiers comme certaines Fabacées (trèfle, luzerne, lupin) sont des engrais verts pour le jardinier ou l'agriculteur. Des espèces arbustives de la famille des Fabacées sont qualifiées d'arbres fertilisants et utilisées en agroforesterie tropicale.

D'autre part, 95 % des végétaux terrestres sont associés à des champignons de mycorhize (du grec ancien *mukês* : champignon et *rhiza* : racine) dont les hyphes (filaments microscopiques formant l'appareil végétatif du champignon) prolongent le système racinaire végétal et facilitent l'absorption de l'eau et des minéraux indispensables : azote, potassium, phosphore, magnésium, calcium, soufre, chlore, fer, bore, manganèse, cuivre, ... Le champignon apporte également une protection vis-à-vis des agents pathogènes du sol. Dans cette association symbiotique « gagnant-gagnant », le champignon bénéficie d'un approvisionnement en sucres photosynthétisés par la plante. Le champignon de mycorhize le plus connu est sans doute la truffe, cultivée sous des chênes ou des noisetiers.

Des chercheurs français ont inoculé en pépinière des plants de douglas (arbre d'origine nord-américaine) avec des souches sélectionnées, américaine et française, de champignon mycorhizien. Ils ont observé une augmentation de 60 % de la production de bois par rapport aux arbres non inoculés mais mycorhizés naturellement¹.

1. Selosse *et al.*, 2000.

» À boire et à manger : les flux de sève

On distingue la sève brute et la sève élaborée.

La sève brute est l'eau puisée dans le sol par les racines. Elle circule dans un tissu conducteur appelé xylème et monte jusqu'aux feuilles.

La sève élaborée contient des sucres, elle circule dans le tissu conducteur appelé phloème et chemine d'un organe source à un organe cible, par exemple des feuilles où les sucres sont photosynthétisés jusqu'aux racines qui ont besoin d'être nourries pour croître. En hiver, dans les régions tempérées, de nombreux arbres perdent leurs feuilles et vivent au ralenti en mobilisant des réserves stockées sous forme d'amidon. À la sortie de l'hiver, la sève élaborée circule alors des tissus de stockage de réserves vers les cellules des bourgeons pour permettre la production de nouvelles feuilles.

Dans les tiges et les racines âgées de moins d'un an, le xylème et le phloème sont primaires, produits lors de la croissance en longueur des extrémités du végétal. Dans les organes plus âgés, ils sont relayés par le xylème secondaire ou bois, et le phloème secondaire ou liber, partie interne de l'écorce. La production de bois et de liber par une assise cellulaire génératrice appelée cambium, située entre bois et écorce, provoque la croissance en largeur des végétaux. La croissance des arbres et la formation du bois sont détaillées dans le chapitre 2, ainsi que la formation du liège par une deuxième assise génératrice à l'origine de l'écorce externe.

Chaque année, l'arbre se dote d'une nouvelle couche cylindrique de bois qui vient se superposer aux couches précédemment formées. Ce sont les cernes annuels ou anneaux de croissance que l'on peut distinguer, et même compter pour connaître l'âge de l'arbre, sur les souches ou les extrémités des arbres abattus. La circulation de la sève brute est cantonnée aux derniers cernes de bois formés, juste sous l'écorce.

En pleine saison de végétation, la sève brute monte dans le bois, des racines jusqu'aux feuilles, où a lieu la photosynthèse. La sève brute circule dans le bois à l'intérieur de cellules mortes dont ne subsiste plus que la paroi. Ces cellules mises bout à bout font office de conduits sous forme de tubes creux : trachéides chez les résineux et vaisseaux chez les feuillus.

Les sucres photosynthétisés sont distribués à l'ensemble des cellules vivantes de l'arbre *via* le flux de sève élaborée descendant qui circule dans le liber. Les cellules conductrices de sève élaborée sont des cellules vivantes : cellules criblées chez les résineux et éléments de tubes criblés chez les feuillus.

» Le bois de toute une vie

Alors que les nouvelles couches de liber formées par le cambium repoussent les anciennes couches vers l'extérieur, qui peuvent alors être finalement éliminées par un mécanisme comparable à la desquamation, les nouvelles couches de bois se superposent aux anciennes, « à jamais » enfermées dans le tronc... Elles sont cependant susceptibles de disparaître dès l'introduction de champignons de

pourriture suite à une blessure qui, sans la protection du liège ou de l'aubier², les aura exposées aux agressions. La disparition de la partie centrale du tronc n'est pas fatale pour l'arbre car toutes les parties vitales sont situées en périphérie : assises génératrices, tissus conducteurs et protecteurs. D'un point de vue mécanique, la partie centrale du tronc n'est pas fondamentale non plus.

Pour les arbres qui ont conservé le bois de toute une vie en échappant à l'appétit des décomposeurs lignivores, la masse de bois accumulée donne aux heureux êtres humains un matériau de choix pour la construction et la production de biens d'équipement performants. Grâce à cette accumulation de bois et à ses propriétés mécaniques exceptionnelles, les arbres sont les plus grands êtres vivants de la planète.

►► Carbone en stock

La composition élémentaire approximative du bois anhydre (l'état anhydre est atteint lorsque le bois, placé dans une étuve à 103° C, présente une masse constante) en pourcentages masse/masse est la suivante :

- 50 % de carbone ;
- 43 % d'oxygène ;
- 6 % d'hydrogène ;
- 1 % d'azote.

Il y a d'autres éléments présents dans le bois en quantité moindre et variable selon les essences. L'important ici est de noter la forte teneur en carbone du bois. Or, la seule source de carbone pour les végétaux est le dioxyde de carbone atmosphérique. Tout le carbone contenu dans le bois provient du dioxyde de carbone prélevé dans l'atmosphère lors de la photosynthèse. Au cours de sa vie, l'arbre a absorbé des quantités importantes de carbone dont une partie est retournée dans l'atmosphère par respiration ou par décomposition des feuilles, fruits et branches tombés, mais ce carbone n'a pas besoin d'être intégré dans le raisonnement qui concerne le stockage du carbone dans le bois.

À l'heure où l'on peine à limiter les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, l'arbre qui produit un matériau performant en retirant de l'atmosphère du dioxyde de carbone mérite toute notre attention. D'autant plus que le bois est également une source d'énergie !

Le bois est un stock de carbone issu du dioxyde de carbone atmosphérique. Mais c'est également le cas du pétrole. En effet, le pétrole et les autres combustibles fossiles proviennent de l'accumulation et de la maturation dans des conditions particulières de débris de végétaux et d'animaux, aboutissant à la production d'hydrocarbures. De même, le ciment provient du calcaire, souvent fossilifère, produit par sédimentation dans le fond des océans de coquilles, carapaces ou squelettes d'organismes marins (plancton, coraux, oursins, bivalves). Là encore, le carbone libéré sous forme de CO₂

2. L'aubier est constitué des couches de bois récemment formées à la périphérie de l'arbre et contenant, associées aux cellules mortes de conduction et de soutien, des cellules vivantes capables de se défendre chimiquement en réponse à une agression physique ou biologique.

lors de la fabrication (par ailleurs très consommatrice d'énergie) du ciment à partir du calcaire (décarbonatation) provient du CO₂ prélevé dans l'atmosphère par des producteurs photosynthétiques, mais c'était il y a bien longtemps...

L'intérêt du bois est sa nature renouvelable à l'échelle humaine. Alors que l'on consomme rapidement un pétrole qui se forme lentement, on peut parfaitement imaginer qu'un homme, au cours de sa vie, voit pousser les arbres qui couvriront les besoins en bois de ses enfants. À terme, le carbone contenu dans le bois retournera dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone lors de sa biodégradation — par respiration des décomposeurs — ou lors de sa combustion. Mais tant que le bois est dans l'arbre vivant ou mis en œuvre dans la structure d'un bâtiment, le carbone est séquestré.

Cependant, la séquestration du carbone dans le bois finira par atteindre une limite même si l'on imagine couvrir la Terre de maisons en bois perchées dans les arbres... Finalement, l'effet levier réside surtout dans la substitution par le bois des énergies fossiles et des matériaux dont la fabrication dégage de grandes quantités de gaz à effet de serre.

Lorsqu'il est produit dans le cadre d'une gestion durable de la ressource, le bois énergie est neutre du point de vue du CO₂. Le CO₂ dégagé lors de la combustion du bois a été retiré de l'atmosphère quelques années ou décennies auparavant par l'arbre vivant. Ce CO₂ sera à nouveau absorbé par la photosynthèse des arbres en croissance. Le cycle émission/absorption se réalise à l'échelle humaine.

L'effet positif tient du fait que le bois énergie se substitue aux énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) dont la combustion émet du carbone retiré de l'atmosphère par des végétaux il y a des dizaines de milliers d'années. Emprisonné dans les gisements, ce carbone était hors cycle depuis longtemps. Son déstockage massif bouleverse l'équilibre de la planète.

La forêt doit donc être exploitée, dans le cadre d'une gestion durable, pour approvisionner les différentes filières bois, notamment celles de l'énergie et de la construction, et peut-être bientôt celle de la chimie biosourcée. Les arbres arrivés à maturité sont récoltés et remplacés par de jeunes individus en pleine croissance. La récolte du bois n'empêche pas l'augmentation ou le maintien du volume sur pied si elle ne dépasse pas l'accroissement biologique.

Cependant l'exportation de biomasse signifie également l'exportation de sels minéraux. Le risque d'appauvrissement des sols forestiers doit être pris en compte.

La gestion durable des forêts est garantie par des systèmes de certification forestière.

►► Les mille et un bois

Au-delà de l'intérêt d'utiliser du bois pour lutter contre l'accentuation de l'effet de serre (rappelons que l'effet de serre est un phénomène naturel sans lequel ni l'eau liquide ni la vie n'existeraient sur Terre), il convient de préciser que le bois est un matériau performant, et donc intéressant à plus d'un titre. Au regard de sa faible densité, il présente des propriétés mécaniques exceptionnelles.

La grande diversité des bois, de leurs propriétés et aptitudes, permet de répondre à de nombreuses contraintes. Même si on semble redécouvrir ce matériau, l'homme l'a toujours utilisé et a su tirer profit de cette diversité d'essences, sélectionnant les bois les plus adaptés à telle ou telle utilisation : le chêne pour les charpentes et les tonneaux, le frêne pour les manches d'outil, l'if pour les arcs, ...

De nos jours, le bois est surtout utilisé sous forme de matériaux dérivés : poutres lamellées-collées, panneaux contrecollés (CLT : *cross laminated timber*), panneaux contreplaqués, poutres lamibois (LVL : *laminated veneer lumber*), panneaux de particules, panneaux OSB (*oriented strand board*), panneaux de fibres,... Incontournables en construction, ils permettent des réalisations que n'autorise pas le bois massif (grandes portées, formes courbes, légèreté...). Ils contribuent à une exploitation plus rationnelle de la ressource forestière en donnant des débouchés aux bois de petites dimensions et/ou de faible qualité.

L'outil ACV (analyse du cycle de vie) permet de vérifier les effets d'un produit sur l'environnement pendant toute la durée de son cycle de vie, en tenant compte de l'impact écologique de l'obtention des matières premières, de la fabrication, du transport, des performances à l'usage et de l'élimination finale. Il permet de comparer des produits réalisés avec des matières premières et des procédés différents, et d'identifier des voies d'amélioration. Bien que les produits en bois bénéficient d'un avantage initial considérable (une fabrication du bois par les arbres, non seulement « gratuite », mais qui retire du CO₂ de l'atmosphère !), les autres étapes font l'objet d'innovations constantes, notamment dans le domaine des adjuvants (produits de collage, de finition et de préservation).