



OUTILS POUR UNE GESTION
RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS

Tiré à part de la revue **Forêt.Nature**

La reproduction ou la mise en ligne totale ou partielle des textes
et des illustrations est soumise à l'autorisation de la rédaction

foretnature.be

Rédaction : Rue de la Plaine 9, B-6900 Marche. info@foretnature.be. T +32 (0)84 22 35 70

Abonnement à la revue Forêt.Nature :
librairie.foretnature.be

Abonnez-vous gratuitement à Forêt.Mail et Forest.News :
foretnature.be

Retrouvez les anciens articles de la revue
et d'autres ressources : **foretnature.be**

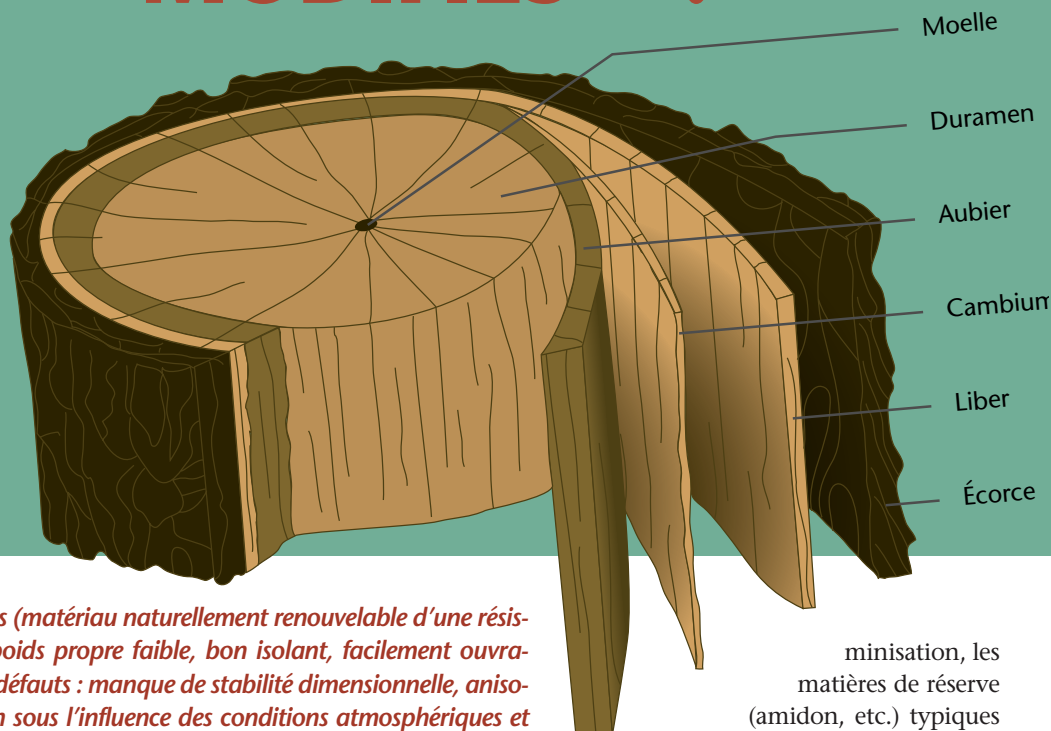
ET POURQUOI PAS DES BOIS « MODIFIÉS » ?

DOMINIQUE LANGENDRIES

PIERRE LARDINOIS

TOMAS AVELLA

(Unité des Eaux et Forêts, UCL)



À côté de ses avantages bien connus (matériau naturellement renouvelable d'une résistance mécanique élevée pour un poids propre faible, bon isolant, facilement ouvrageable...), le bois présente certains défauts : manque de stabilité dimensionnelle, anisotropie, faible résistance à l'abrasion sous l'influence des conditions atmosphériques et facilité d'attaque par les champignons et les insectes. Sa propension à être hydrophile le rend en effet particulièrement sensible aux attaques biologiques et aux phénomènes de gonflement ou de retrait, gênants pour le constructeur lors de la mise en œuvre de grandes surfaces de parquets par exemple, ou encore pour le jeu des assemblages dans une structure. Le bois est donc un matériau de construction idéal, mais pas dans tous les cas : il présente des faiblesses manifestes par rapport à d'autres matériaux.

En agissant de manière externe ou sur la structure même du matériau bois, divers procédés de stabilisation permettent de palier en partie ses inconvénients : plusieurs d'entre eux agissent chimiquement sur les cellules et ont un impact favorable sur certaines propriétés mécaniques des éléments traités, tout en permettant le plus souvent d'améliorer leur durabilité. En outre, ils ont également généralement l'avantage d'être respectueux de l'environnement.

Ces procédés ont donc un bel avenir devant eux pour donner un droit de réponse au bois quant à ses « faiblesses » si souvent mises en avant par ses détracteurs. C'est pourquoi il semble judicieux de les analyser de plus près dans cet article.

PETITS RAPPELS D'ANATOMIE ET DE CHIMIE DU BOIS

Lorsqu'on opère une coupe transversale dans une pièce de bois, on observe,

de l'extérieur vers l'intérieur, cinq zones clairement distinctes :

- ◆ l'écorce, elle-même divisée en deux sous-couches : l'écorce externe ou écorce proprement dite, enveloppe souvent rugueuse constituée de cellules mortes et protégeant les tissus en formation et l'écorce interne ou liber, par où circule la sève descendante ;
- ◆ le cambium, tissu d'une épaisseur de quelques microns qui produit vers l'intérieur le xylème ou bois proprement dit et, vers l'extérieur, le liber ;
- ◆ l'aubier, couche de bois épaisse de quelques centimètres, est la région du bois correspondant aux couches les plus récemment formées et est constitué en partie de cellules vivantes. Il est particulièrement apprécié des agents biologiques destructeurs du bois : il ne résiste jamais aux champignons lignivores et aux larves d'insectes xylophages. Il est par contre facilement imprégnable ;
- ◆ le duramen forme la partie centrale du bois et ne contient plus de cellules vivantes. Lors du processus de dura-

minisation, les matières de réserve (amidon, etc.) typiques des cellules vivantes y sont transformées en substances de bois parfait (tanins, résines, etc.). Souvent plus durable que l'aubier, le duramen fait également preuve de propriétés physiques et mécaniques supérieures. Sa durabilité naturelle et son imprégnabilité varient suivant les essences ;

- ◆ la moelle est un cylindre de faible diamètre au centre de la tige, formé d'un tissu parenchymateux plutôt mou et spongieux.

À échelle microscopique, nous remarquons que l'unité de base élémentaire du bois est la cellule. Il en existe différents types, assurant chacun une ou plusieurs des fonctions fondamentales à la croissance de l'arbre¹ :

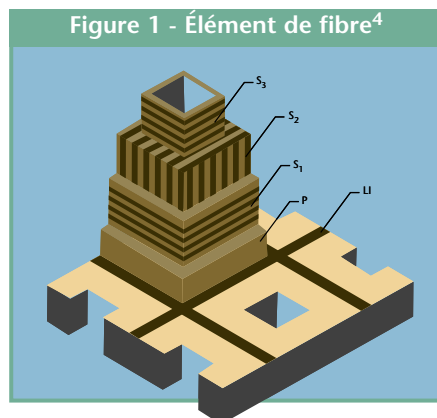
- ◆ les cellules parenchymateuses ont une fonction de réserve et accumulent de nombreuses substances utiles à la croissance future de l'arbre (amidon, sucres...). Elles ont la particularité de rester vivantes tant qu'elles demeurent dans la partie d'aubier du tronc. Les rayons, dirigés de la moelle vers la périphérie du tronc, sont principalement constitués de ce type de cellules. Dans les feuilles principalement, on trouve également des cellules de parenchyme orientées dans le sens vertical de l'arbre (parenchyme axial) ;
- ◆ typiques des feuillus, les éléments des vaisseaux assurent la fonction de

conduction de la sève minérale depuis les racines jusque dans la cime de l'arbre. Connectés axialement, ils forment de longues « canalisations » appelés vaisseaux ou pores. Les cellules de cette famille meurent directement après leur mise en place ;

- ◆ les *fibres* (ou *trachéïdes* dans le cas des résineux) assurent le soutien et la solidité de la structure du bois. Elles sont de loin le type de cellules le plus courant dans un cerne ; elles sont effilées, aux parois épaisses et disposées selon un axe vertical. Contrairement aux vaisseaux, elles n'ont pas de fonction de conduction et sont fermées à leur extrémité.

La résistance intrinsèque des fibres est conférée par la *cellulose*, polymère du glucose, dont les chaînes s'organisent en fibrilles élémentaires, puis en microfibrilles, longs filaments en partie cristallins. La cellulose représente entre 40 et 50 % du poids du bois.

Une paroi cellulaire de bois est constituée d'une paroi primaire lignifiée (P) et de trois couches secondaires dont la centrale (S₂), la plus épaisse, contient des microfibrilles de cellulose orientées quasi parallèlement à l'axe de la fibre. Dans les deux autres couches, les microfibrilles se disposent plus ou moins perpendiculairement à l'axe, renforçant ainsi l'anisotropie du bois (Figure 1).³



Les *hémicelluloses* servent de matière de remplissage dans les vides laissés par les microfibrilles. Elles sont également des polymères dérivés de différents sucres (glucose, galactose, mannose et arabinose). Elles représentent respectivement 25 % et 30 % du poids des bois résineux et feuillus.

La *lignine* est définie comme la matière « incrustante », liant les éléments du

bois entre eux. « Ciment cellulaire », elle est un polymère amorphe de nature phénolique*. Elle est présente à travers toute l'épaisseur de la paroi cellulaire, mais sa concentration maximale se trouve dans la zone intercellulaire, appelée lamelle mitoyenne ou intermédiaire (LI). La proportion de lignine du bois varie entre 25 et 35 % pour les résineux, et 15 et 25 % pour les feuillus.

Le bois est donc un matériau composite naturel constitué par un réseau interpénétrant de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. Outre ces substances macromoléculaires, il contient, en nettement plus petites proportions, des substances de poids moléculaire faible : matières extractibles (tanins, résines...) et composés inorganiques (Tableau 1).

Tableau 1	Résineux	Feuillus
Cellulose	42 ± 2 %	45 ± 2 %
Hémicelluloses	27 ± 2 %	30 ± 5 %
Lignine	28 ± 3 %	20 ± 4 %
Extraits	3 ± 2 %	5 ± 3 %

La forte proportion de cellulose et d'hémicelluloses qu'il renferme fait de lui un matériau hygroscopique ; il s'équilibre rapidement avec l'état hygrométrique de l'ambiance dans laquelle il est placé. La cellulose est en effet un polymère linéaire, formé d'unités de glucose possédant chacune 3 groupements hydroxyles présentant une forte propension à se lier aux molécules d'eau (Figure 2).⁵

Au-dessus du Point de Saturation en eau des Fibres (PSF), correspondant en moyenne à une humidité du bois de l'ordre de 30 %, l'absorption de molécules d'eau par le bois provoque une dilatation de ses parois cellulaires et se traduit macroscopiquement par un gonflement du matériau. À l'opposé, l'évaporation d'eau successive au séchage du bois est liée à une rupture des liaisons hydrogènes décrites ci-dessus et se traduit par

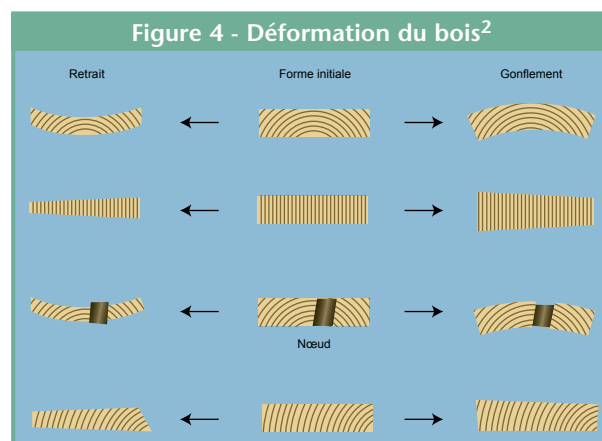
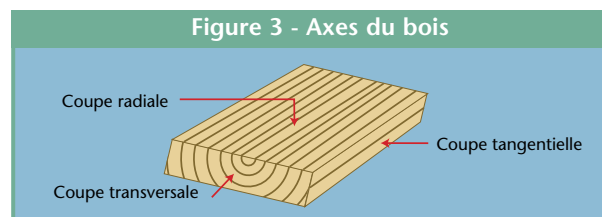
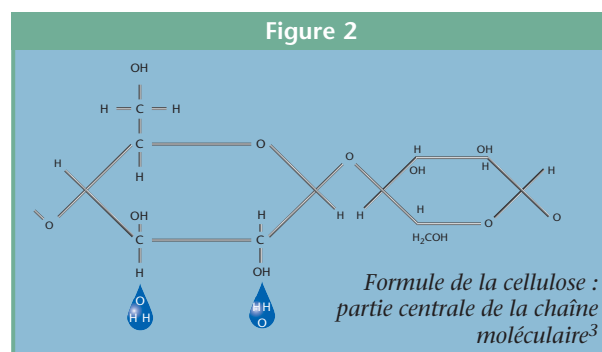
une contraction du matériau. En effet, au-dessous du PSF, l'eau libre contenue dans les vides cellulaires et les méats intercellulaires est évacuée et toute perte ou gain supplémentaire d'humidité se fait au dépend de l'eau liée qui imprègne les parois cellulaires, en modifiant leur volume.

L'amplitude des variations dimensionnelles est fonction de la structure et de la composition des membranes cellulaires : elle varie donc selon l'espèce ligneuse considérée, la composition des fibres et leur orientation.

On peut noter les fourchettes suivantes de gonflement pour un bois passant de l'état « sec au four » jusqu'à son PSF : de 0,1 à 0,2 % pour le sens longitudinal à des écarts nettement plus conséquents pour le sens radial (de 2 à 8 %) ou tangentiel (de 4 à 14 %).⁵

D'une essence à l'autre, les variations entre les coefficients de rétractibilité sont également très sensibles (Tableau 2).²

Ces écarts de variation entre les directions longitudinale, radiale et tangentielle



* La dissolution de ce ciment intercellulaire est le procédé à la base de l'industrie papetière.

Tableau 2				
Qualité de bois	Essence	Densité	Coefficient de rétractabilité (% par variation d'humidité de 1 %)	
			Radiale	Tangentielle
Bois peu nerveux	Acajou	0,45 à 0,59	0,11 à 0,15 %	0,17 à 0,22 %
	Érable	0,61 à 0,66	0,10 à 0,20 %	0,22 à 0,23 %
	Teck	0,60 à 0,75	0,13 à 0,15 %	0,24 à 0,29 %
Bois nerveux	Douglas	0,51 à 0,58	0,15 à 0,19 %	0,24 à 0,31 %
	Épicéa	0,43 à 0,47	0,15 à 0,19 %	0,24 à 0,31 %
	Mélèze	0,45 à 0,62	0,14 à 0,18 %	0,25 à 0,36 %
	Pin sylvestre	0,51 à 0,55	0,15 à 0,19 %	0,25 à 0,36 %
	Peuplier	0,43 à 0,49	0,15 %	0,28 %
Bois très nerveux	Chêne	0,65 à 0,76	0,18 à 0,22 %	0,28 à 0,35 %
	Hêtre	0,70 à 0,79	0,19 à 0,22 %	0,38 à 0,44 %
	Azobé	0,95 à 1,10	0,30 à 0,32 %	0,40 %

tielle, rendent les bois sciés particulièrement sensibles aux déformations, en particulier pour les pièces de grande section utilisées en architecture extérieure (Figure 4).

Ces effets peuvent causer des dommages importants lorsqu'on utilise pour la construction un bois encore trop vert ou, au contraire, lorsqu'on veut le sécher trop rapidement. Il est donc important de mettre en œuvre un bois séché dans des conditions optimales et à un taux d'humidité compatible avec son utilisation et avec l'état hygrométrique de l'air ambiant (Tableau 3).

Tableau 3	
Menuiserie extérieure	15 à 18 %
Lamellé-collé	12 à 15 %
Fermettes	18 à 22 %
Charpente traditionnelle	13 à 20 %
Menuiserie intérieure	10 à 15 %
Lambris	8 à 14 %
Parquet contrecollé	8 à 14 %
Parquet traditionnel	8 à 12 %
Parquet mosaïque	8 à 12 %

Outre les problématiques de variation dimensionnelle, les méfaits d'un bois trop humide peuvent se manifester dans la mauvaise adhésion des colles, la mauvaise tenue des revêtements, la déformation des ouvrages, la chute des propriétés

mécaniques (2 à 4 % par augmentation de 1 % de l'humidité du bois) ou l'augmentation des phénomènes de fluage* (accélérés par les variations d'humidité au sein du matériau).

L'hydrophilie du bois a également des conséquences fâcheuses sur sa résistance aux attaques des agents biologiques. En effet, un bois sec à l'abri des intempéries est en classe de risque basse par rapport aux dangers d'attaque par des champignons lignivores. Un bois constamment humide ($H > 20$ % en permanence) sera par contre dans une classe de risque élevée.

Pour donner une longévité naturelle satisfaisante à un ouvrage en bois, on évite donc l'emploi d'espèces ligneuses peu durables, ou insuffisamment durables, ou l'on veille à leur assurer une durabilité artificielle via des traitements de préservation. Malheureusement, ceux-ci ne sont pas efficaces sur toutes les essences et sont souvent nuisibles pour l'environnement. Ces précautions limitent donc les concepteurs dans le choix des essences à mettre en œuvre.

Comme nous pouvons le voir, les enjeux liés à la maîtrise du taux hygrométrique du bois sont nombreux.

Tableau 4 : Classes de risque d'attaque biologique [EN 335]		
Classe	Exposition	Humidité du bois en service
1	Hors contact du sol, à l'abri (toujours sec)	Toujours < 20 %
2	Hors contact du sol, à l'abri (humidification possible)	Occasionnellement > 20 %
3	Hors contact du sol, exposé aux intempéries ou à la condensation	Fréquemment > 20 %
4	En contact permanent avec le sol ou l'eau douce	> 20 % en permanence
5	Immergé dans l'eau salée	> 20 % en permanence

Tableau 5 : Classes de durabilité naturelle [EN 350]		
Classe	Description	Exemples
1	Très durable	Robinier
2	Durable	If, thuya, châtaignier, chêne
3	Moyennement durable	Douglas, mélèze, noyer
4	Faiblement durable	Pin, épicéa, sapin, orme
5	Non durable	Érable, frêne, hêtre, peuplier, tilleul

* Évolution avec le temps de la déformation irréversible d'une pièce de bois soumise à une charge.

PANORAMA DES PROCÉDÉS

Le moyen le plus immédiat pour contrer les effets de l'humidité sur le bois consiste bien sûr à maîtriser le taux d'humidité du bois à mettre en œuvre en fonction de l'ambiance dans laquelle il sera utilisé. On peut également chercher à stabiliser le climat dans lequel il est placé : cette méthode est d'usage courant dans des musées.

Ces conditions idéales ne sont cependant pas toujours réalisables et, depuis de nombreuses années, les technologues du bois recherchent des parades à ce désavantage majeur qui en limite l'utilisation.

L'effet de barrière

En recouvrant la surface du bois par une couche hydrophobe, on déjoue en principe le problème d'absorption ou d'évaporation des molécules d'eau dans le bois. C'est ce rôle que jouent les peintures, vernis et cires de protection couramment utilisés pour le bois.

Cependant, s'ils sont souvent étanches à l'eau liquide, ils restent néanmoins tous perméables dans diverses proportions à la vapeur d'eau. Ils exercent donc une action régulatrice au passage de la vapeur d'eau (ils protègent des brusques montées d'humidité ou des pics de sécheresse) sans pour autant constituer des barrières totales empêchant l'absorption ou l'évaporation de l'eau.

En outre, ils sont sensibles aux agressions climatiques et nécessitent un fréquent entretien.

Le blocage mécanique

Il est possible également de contrer les mouvements du bois en lui imposant une contrainte mécanique extérieure : cette technique s'est particulièrement développée avec l'apparition des nouvelles formes d'adhésifs au début du siècle. Le cas le plus souvent rencontré est le procédé du contre-plaqué, où l'on colle perpendiculairement l'une à l'autre des feuilles de placage pour constituer un panneau particulièrement résistant et stable dans ses deux grandes dimensions. La dilatation dans le sens perpendiculaire aux fibres d'une première couche est ainsi contrecarrée par la stabilité des fibres dans le sens longitudinal de la seconde couche.

L'adhésif utilisé dans la fabrication de ces panneaux doit bien sûr présenter une résistance mécanique suffisante pour faire face à ces tensions.

Le blocage stérique

Ce type d'action consiste à intervenir sur la structure moléculaire du bois en gorgeant les cavités du tissu ligneux d'une substance non volatile, de manière à provoquer un gonflement irréversible du bois.

Quantité de produits ont déjà été utilisés, menant jusqu'à une efficacité anti-retrait* avoisinant les 100 %. De manière générale, l'efficacité obtenue varie en raison inverse de la taille des molécules de l'agent de blocage utilisé. En effet, plus celles-ci sont petites, plus elles remplissent de manière parfaite les cavités.

Parmi ces agents, on retrouve certains sels minéraux, des sucres, le glycérol ou les polyéthylène-glycols (PEG). Ces derniers ont donné les meilleurs résultats. En effet, d'une masse moléculaire assez faible, ils sont totalement hydrosolubles et peuvent se substituer presque complètement à l'eau présente dans le bois humide. Ils sont typiquement utilisés par diffusion pour le traitement du bois à l'état vert, état facilitant le passage à l'état sec : au séchage, ils demeurent en place et s'opposent au retrait du bois. Malheureusement, leur hygroscopicité complique par la suite les opérations de finition et restreint leur utilisation aux climats secs.⁵

Outre ces substances faites de macromolécules organiques, d'autres procédés basés sur l'injection de tanins ou de macromolécules synthétiques analogues ont été développés, permettant de traiter des éléments jusqu'à 50 millimètres d'épaisseur.⁵

Le procédé « Boucherie » travaille également dans ce sens, en permettant en outre de dépasser les limitations de la taille des éléments à traiter : il consiste à imprégner des grumes fraîchement abattues ou des bois ronds encore verts

par un processus de déplacement de la sève au profit d'une solution aqueuse de sulfate de cuivre injectée en autoclave.

Ce procédé, initié dans les établissements français Beaumartin en 1889 sur base d'une innovation du docteur Boucherie, avait permis à cette entreprise de gagner la confiance des compagnies de chemin de fer, d'électricité, de téléphone, du Génie rural ou encore des Mines et Charbonnages. Malheureusement, à partir des années 1980, le ralentissement des installations téléphoniques et des consommations de traverses de bois pour le chemin de fer entraîna le ralentissement puis la fermeture des chantiers Boucherie et ce procédé fut abandonné. Outre les problèmes écologiques qu'il générerait, il était devenu industriellement inexploitable (faible rendement, grand besoin de main d'œuvre...)⁶

Les bois issus tant du procédé Boucherie que des autres principes de blocage stérique, peuvent en sus être traités par un processus de préservation classique, tel que l'imprégnation aux sels de cuivre, destinée à assurer la fixation des tanins et ainsi encore renforcer la durabilité.⁵

La plastification

En évolution des procédés de blocage stérique se situe la technique de plastification. Elle consiste à imprégner le bois d'une substance polymérisée *in situ*, de manière à obtenir un réseau polymérique intégré dans la structure du bois, insoluble dans l'eau : on crée ainsi un nouveau matériau composite aux propriétés distinctes de celles du bois d'origine.

De nombreuses substances ont été employées, parmi lesquelles les résines urée-formol (UF) utilisées dès 1920, ou les résines phénoliques apparues dès 1940 ayant permis la production de bois « bakéliné »** de couleur brune. Aux environs des années 1960, d'autres combinaisons bois-plastique ont été créées, basées sur l'imprégnation du bois par des monomères vinyliques.

Plusieurs monomères comprenant une double liaison ont ainsi été injectés dans le bois et polymérisés. Le plus employé durant les années 1975-76 fut le méthacrylate de méthyle*** (MMA) grâce à sa facilité de polymérisation, suivi du styrène, moins coûteux mais se polymérisant en plusieurs jours et laissant une odeur résiduelle. La Finlande a également commercialisé des composites bois-plastique obtenus à partir de mélanges polyester-styrène. Et enfin, citons le copolymère du styrène et de l'acrylonitrile (SAN) ayant donné lieu à des produits plus souples mais faisant perdre au bois ses qualités esthétiques.⁷

Bien que les matériaux bois-plastique aient tous une densité à peu près égale, le poids du monomère introduit dans le bois peut varier entre 40 et 120 % du poids initial du bois selon le monomère choisi et l'espèce traitée. Les essences les plus utilisées sont le hêtre et le chêne en Europe et le bouleau et l'érable aux États-Unis et au Canada. Elles sont préférées aux résineux et aux bois durs plus difficilement imprégnables (seul le pin a été utilisé avec succès en Scandinavie).⁷

Outre l'aspect attrayant des éléments traités, l'avantage de la plastification est de réduire l'hétérogénéité du bois, d'augmenter sa densité, d'améliorer ses propriétés de surface (sa dureté, sa résistance à l'eau) et d'accroître sa durabilité face aux insectes. Par contre, la résistance aux champignons est juste satisfaisante, l'appétit au collage est diminuée et le bois fortement irradié est très friable.⁷

Le type de monomères injectés étant de poids moléculaire réduit, on peut traiter efficacement des pièces de bois ayant jusqu'à quelques dizaines de millimètres d'épaisseur. Malheureusement, la polymérisation totale des résines injectées est rarement atteinte et il reste toujours dans les matériaux obtenus un faible pourcentage de monomères non polymérisés, le plus souvent toxiques.⁵ De plus, ils ne pénètrent pas forcément à l'intérieur de la structure du bois mais se contentent quelquefois de remplir les vides cellulaires (et d'éventuellement en tapisser les parois).⁷

L'application de ce procédé est restée limitée à des éléments de parquets, aux manches d'outils... En outre, le coût important de sa mise en œuvre à l'échel-

* Deux paramètres sont couramment utilisés dans la littérature pour comparer les procédés de stabilisation dimensionnelle du bois⁵ :

• le Weight Percent Gain (WPG) ou gain relatif de poids consécutif à ces traitements ;

• l'Antishrink efficiency (ASE) ou efficacité anti-retrait : $ASE = \frac{(Ro - Rt)}{Ro} \times 100$ où R symbolise le retrait mesuré sur bois natif (Ro) ou traité (Rt).

** La bakélite est une résine synthétique obtenue par condensation d'un phénol avec l'aldéhyde formique et employée comme succédané de l'ambre, de l'écaille, etc. [LAROUSSE, 2000]

*** Plexi-glass.

le industrielle a petit à petit écarté les chercheurs de cette piste de travail visant à polymériser la masse entière du bois.

Par contre, l'incorporation de polymères en couche mince de 1 à 2 millimètres sur le bois pourrait être une voie plus prometteuse de progrès dans le domaine de la plastification. Ce processus suffirait déjà à éliminer ou pour le moins réduire les échanges d'humidité entre le bois et l'air extérieur, limitant les phénomènes de mouvement du bois ou les risques de dégradation biologique. Par cette technique, un bois classé peu durable (peuplier, bouleau...) pourrait accéder à une classe de durabilité supérieure. Le traitement se justifie également pour les autres essences, car la présence d'aubier, toujours périssable, reste un risque pour toutes les applications en construction. Le laboratoire forestier de l'Université catholique de Louvain développe actuellement une recherche sur le sujet.⁸

Les traitements de modification chimique du bois

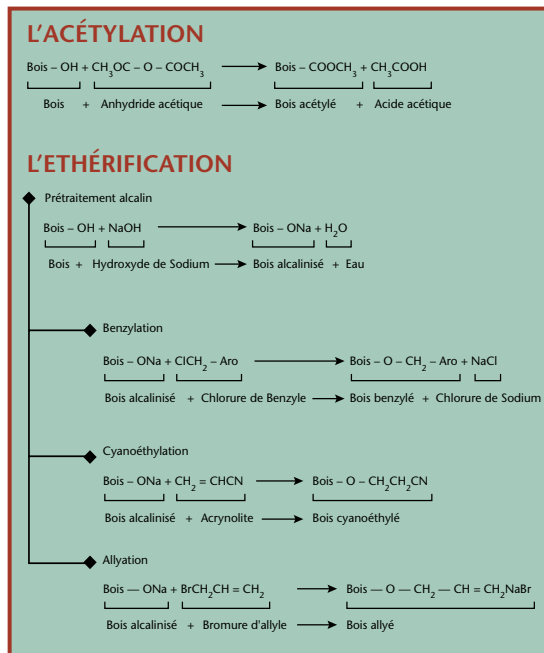
Le principe général de ces traitements consiste à remplacer les groupements hydroxyles du bois par des groupements chimiques hydrophobes. En effet, comme ces groupements OH sont susceptibles de réagir avec de nombreuses autres substances que l'eau, on peut chercher à bloquer chimiquement ces sites et ainsi diminuer l'affinité du bois pour l'eau.

Diverses techniques de ce type ont été développées ces dernières années : oxydation, silylation, esterification, acétylation, étherification...

L'acétylation

La réaction d'estérification la plus courante est l'acétylation. Elle consiste à faire réagir de l'anhydride acétique avec les fonctions hydroxyles du bois, de manière à former des groupes acétyles hydrophobes ainsi que de l'acide acétique.

L'avantage de ce procédé réside dans son aspect respectueux de l'environnement. En effet, des groupes acétyles



sont naturellement présents dans le bois ; l'acétylation ne fait donc qu'augmenter leur concentration. D'un contenu initial de 2 à 5 %, on passe à une concentration de 10 à 25 %, intensifiant la protection naturelle de l'arbre. Comme le bois non traité, le produit obtenu est composé des seules molécules de carbone, hydrogène et oxygène : en fin d'utilisation, un bois d'œuvre issu de ce procédé peut donc être recyclé de la même manière qu'un bois non traité.⁹

Les bois issus de ce traitement deviennent plus lourds et plus secs. Ils sont donc moins sensibles aux variations dimensionnelles et aux attaques de champignons, leur durabilité est augmentée, leur résistance aux UV est accrue et leur dureté est légèrement supérieure. On peut noter qu'avec un WPG de 15 %, le bois obtient une durabilité comparable à un bois de classe I.¹⁰

L'efficacité anti-retrait est en outre très élevée (gonflement et retrait réduits de 50 à 85 % pour le hêtre, le pin, le peuplier ou l'épicéa). Les bois traités sont dès lors moins sensibles aux déformations et fissures. Les finitions ont une meilleure tenue.⁹ Leur module d'élasticité et leur module de rupture sont peu affectés (respectivement de 10 % et 6 %).⁵ Ils sont par contre assez cassants et résistent mal aux efforts de cisaillement.⁸

La méthode d'acétylation du bois est actuellement développée par le Stichting Hout Research de Wageningen

(Pays-Bas). Cette institution travaille depuis 1993 sur un projet visant à donner à des bois dits de qualité inférieure, des propriétés équivalentes aux meilleures essences tropicales, en collaboration avec le Laboratorium voor Houttechnologie de l'Université de Gand.⁹

Les premières études concernant l'acétylation du bois ont démarré en 1936. Les réflexions sur l'environnement allant en augmentant ces dernières années et les considérations négatives quant aux bois tropicaux ou aux bois traités avec des substances toxiques étant en progression constante, les recherches sur les bois modifiés se sont intensifiées cette dernière décennie aux Pays-Bas. L'ensemble des caractéristiques prometteuses de ces produits a mené au montage d'une coopérative d'entreprises issues du secteur de la menuiserie (Acetyleer Kennis B.V.) avec pour objectif de les rendre disponibles sur le marché dans le courant de l'année 2001.⁹⁻¹⁰

L'éthérification* : la benzyltion, la cyanoéthylation ou l'allylation

En première étape d'une réaction d'éthérification, on fait subir au bois un prétraitement alcalin.

Le bois est ensuite mis en contact avec un produit tel que le chlorure de benzyle, l'acrylonitrile ou le bromure d'allyle, formant des liens éthers. L'ensemble de l'opération, nommée benzyltion, cyanoéthylation ou allylation suivant les cas, permet de bloquer les sites OH du bois et de réduire ainsi son affinité pour l'eau.

L'ASE obtenu peut atteindre 70 à 80 % et le WPG est de l'ordre de 20 à 30 %. La benzyltion réduit la résistance à la photodégradation, la cyanoéthylation donne un bois plastifié peu résistant à l'eau.⁵

Les traitements thermiques

Ces procédés consistent à détruire les sites actifs du bois sans introduire cette fois de substance étrangère dans sa structure et tout en essayant d'affecter le moins possible les autres propriétés du bois. N'étant fabriqué sans aucun réactif ni solvant, le produit obtenu a le grand avantage de pouvoir être recyclé,

* Une éthérification est la réaction de formation d'un éther à partir d'un alcool.

transformé ou incinéré sans effet négatif sur l'environnement.

Les procédés de traitement thermique se sont développés de par le monde depuis les années 1950, avec comme résultat majeur la baisse de l'hygroscopicité du bois, mais avec d'autres effets indésirables comme une certaine perte de résistance mécanique des éléments traités.

Durant cette dernière décennie diverses équipes de recherche européennes se sont penchées plus intensément sur le sujet et certaines d'entre elles ont déjà vu sortir leurs techniques des laboratoires pour en voir les premières applications industrielles. Parmi celles-ci, citons l'application du Bois rétifé en France ou du Plato-hout aux Pays-Bas. Des recherches sont également en cours en Finlande sous le nom de Thermowood, ou encore à l'université de Gand en Belgique et au BHF de Hambourg en Allemagne.¹⁰⁻¹¹

Le principe général consiste à chauffer le bois dans des conditions de température, de pression et d'atmosphère rigoureusement contrôlées. On diminue ainsi le degré d'humidité du bois en dessous de son niveau constitutionnel et l'on réduit l'effet des ponts hydrogènes et des forces de Van der Waals* entre les constituants du bois.⁸

Le bois traité présente une ASE de minimum 50 %. Même un bois très peu durable à l'origine voit sa classe de durabilité augmenter, la rendant comparable à celle du chêne ou à celle de bois tropicaux comme le wengé. Il est transformé dans sa totalité, et peut donc être scié et profilé sans que cela ne porte atteinte à sa durabilité.¹²

La réтификаction

Les premiers essais de torréfaction du bois ont débuté il y a un grand nombre d'années déjà, mais sous des formes et des objectifs sensiblement différents des applications actuelles. En effet, les travaux sur l'amélioration de certaines propriétés du bois par chauffage avaient déjà commencé dès avant la seconde guerre dans un certain nombre de laboratoires. Vers la fin des années 1970 cependant, en pleine crise énergétique, l'École des Mines de Paris fit faire un bon en avant à cette technique

en mettant au point une pyrolyse du bois alternative à la technologie du charbon de bois. Une usine fut d'ailleurs mise sur pied à l'époque, en collaboration avec le CIRAD-Forêt et des industriels français pour produire du bois torréfié.

C'est seulement au début des années 1990 que des chercheurs du CIRAD-Forêt, du CTBA ou de l'École des Mines de Saint-Étienne (E.M.S.E.) commencèrent à étudier les propriétés physico-chimiques de ce nouveau produit-bois : on lui remarquait une diminution de son hygroscopicité et, par là même, une amélioration de son comportement face aux champignons lignivores (le procédé permet l'utilisation en classe 3 ou 4 de bois non durables), mais un mauvais comportement face aux insectes.¹³

Les chercheurs désirèrent bien sûr tirer parti des nouvelles propriétés ainsi acquises par le bois. C'est ainsi qu'est né le bois rétifé obtenu par un traitement du bois à haute température en l'absence d'oxygène. Introduit dans un réacteur, il y est chauffé à 250-280 °C, et balayé par un gaz caloporteur approprié. À cette température s'opère une transformation électrochimique de ses composants : comme pour du plastique, ceux-ci se polymérisent.¹³

Le néologisme réтификаction trouve donc son origine dans la contraction des mots « réticulation », qui désigne la formation de nouvelles liaisons entre les molécules au cours de la polymérisation et du mot « torréfaction ». Il est en passe de devenir le terme usuel pour le traitement à haute température du bois.

La littérature renseigne que la pyrolyse de l'hémicellulose a lieu entre 150 et 180 °C, celle de la lignine à partir de 280 °C et celle de la cellulose entre 280 et 350 °C. L'enjeu de la torréfaction est donc d'éviter la dégradation de la cellulose (prépondérante dans la résistance mécanique) tout en permettant celle des hémicelluloses. C'est pourquoi on essaye de maintenir la température des réacteurs en dessous de 280 °C.¹¹

La première étape permettant l'homogénéisation hygrothermique se déroule entre 20 et 150 °C : elle correspond au séchage du bois, à l'évacuation de l'eau



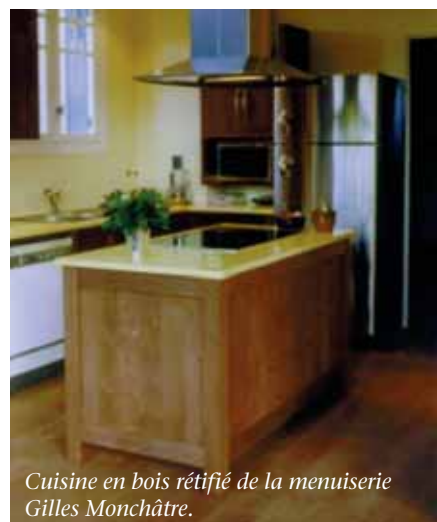
Chaise en bouleau rétifé.

© NOW s.a.



Armoire de cuisine en bois rétifé de la menuiserie Gilles Monchâtre.

© NOW s.a.



Cuisine en bois rétifé de la menuiserie Gilles Monchâtre.

© NOW s.a.

libre et de l'eau liée de ses cellules. Entre 180 et 250 °C, le bois subit d'importantes réactions chimiques : on assiste à la thermolyse des hémicelluloses et à la réticulation des lignines (c'est la phase de transition vitreuse, la réтификаction proprement dite). À partir de 250 °C, la transformation devient fortement exothermique et le bois évolue vers la carbonisation, avec dégagement de CO₂ et de composés pyrolytiques. C'est la phase de condensation-stabilisation.

* Forces électrochimiques liant les constituants d'une matière entre-eux.



© NOW s.a.

Bord de piscine en peuplier rétifé.

Le premier brevet du procédé de rétifification a été déposé par l'École des Mines de Saint-Étienne sous la direction de René Guyonnet en 1985. Son équipe a défini précisément le domaine thermique et l'atmosphère qui assureraient le meilleur résultat, essence par essence, et surtout, a permis de reproduire le processus à l'échelle industrielle. Depuis 1996, le bois rétifé est commercialisé par la S.A. Now de Jonzac. Cette technique permet de valoriser des bois communs européens (sapin,

épicéa, pin sylvestre, pin maritime, hêtre, frêne, châtaignier et peuplier). Elle s'applique sur des avivés secs (chevrons, planches, lames, à 12 % d'humidité).¹³⁻¹⁴

Le bois sort de ce traitement « bronzé » (il est coloré dans la masse, de blond à chocolat suivant les essences), avec une légère odeur de pain d'épice (témoin de la caramélisation des amidons). Ce traitement permet la dégradation des composés du bois facteurs d'absorption d'humidité et sensibles aux agents biologiques : le produit obtenu voit son hygroscopie baisser par rapport au bois d'origine, sa stabilité dimensionnelle nettement améliorée (ASE entre 30 et 60 %) et une diminution importante de sa sensibilité aux champignons.

Le traitement thermique n'affecte pas le module d'élasticité. En revanche, on note une diminution de 10 % de la masse volumique ainsi qu'une baisse notable de 45 % de la contrainte à la rupture. On constate par contre un accroissement de la dureté Brinell* de l'ordre de 30 %.¹⁵

La grande stabilité dimensionnelle obtenue permet un meilleur maintien des peintures (avec un léger éclaircissement cependant des éléments revêtus de finitions en phase aqueuse).¹⁴⁻¹⁵

Matériau stable, il a une meilleure affinité avec le plastique que le bois naturel. Il serait en outre recommandé pour la fabrication des châssis extérieurs ou de différents composites, bien qu'étant plus fissile que son homologue naturel. La

manutention des profilés et le placement des quincailleries sont délicats.¹¹⁻¹³ Une réflexion sur des systèmes d'assemblages par collage, clipsage, clouage ou vissage avec pré-perçage permettrait cependant de contourner ces difficultés.

Les mauvais résultats concernant les propriétés mécaniques empêchent toute utilisation en structure. Par contre, les résultats particulièrement favorables quant à l'augmentation de la classe de durabilité des bois traités montrent que les applications en bardage semblent être un des débouchés les plus prometteurs : en effet, le bois rétifé permet d'augmenter sensiblement la durabilité du bois exposé à des conditions humides ou en contact avec le sol. Il s'avère également résistant vis-à-vis du capricorne, mais se révèle être très attaqué par les termites ! Constatation gênante pour de nombreuses régions du sud de la France où les ravages des termites sont de plus en plus conséquents.¹⁵

Citons enfin le plancher de l'Opéra de Lyon comme exemple remarquable d'application de frêne rétifé. Dans ce projet, le bois a été tout d'abord soumis à un traitement de torréfaction et ensuite injecté de résine. Il serait ainsi paraît-il prévu pour résister à toutes les agressions : depuis le poinçonnage par des talons effilés à l'hypothétique inondation !

La platonisation

Comme pour la rétifification, lors de la platonisation l'hémicellulose est fragmentée puis liée à la lignine, ce qui provoque l'apparition d'une structure réticulaire. La lignine est également modifiée. En final, les composants nutritifs du bois sont donc moins reconnaissables par les champignons et moins accessibles. D'autre part, comme dans tous les procédés vus précédemment, la transformation de l'hémicellulose provoque la déshydratation du bois : le taux d'équilibre hygroscopique du bois platonisé ne dépasse plus 17 %, même lorsque l'humidité relative de l'air atteint 97 % !¹²

Si l'hémicellulose et la lignine sont fragmentées, la structure cellulaire de la cellulose reste pratiquement intacte : le bois conserve donc son aspect typique et ses propriétés mécaniques ne sont réduites que de 10 à 20 %. S'il



© NOW s.a.

Bardage en Pin maritime au Cap Ferré. Une fois les persiennes posées, on aura l'impression d'une surface unie comme pour un séchoir à tabac.

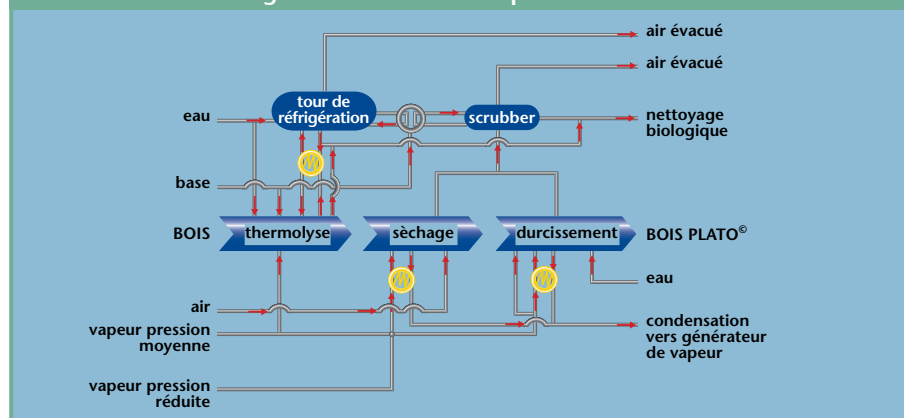


© E.M.S.E.

Premier four industriel d'une capacité de 8 m³ permettant la rétifification du bois. Il est localisé à Soustons (dans les Landes) à environ 150 km de Bordeaux. Ce four a été racheté par la société HTT pour pouvoir entre autres en faire une plateforme d'essais et de formation. Il conserve toutefois son activité de production.

* Mesure de la dureté des bois obtenue par pression d'une bille d'acier, le nombre de Brinell étant le rapport du poids appliqué à la bille, à la surface enfoncée par celle-ci.

Figure 5 - Processus de platonisation¹⁶



est prévu dans un premier temps pour un usage en mobilier de jardin, en bardage ou en menuiserie extérieure, il peut également être utilisé pour des usages structurels. Il convient en outre pour des applications en contact avec le sol.

Le processus se déroule en trois phases : la thermolyse, le séchage et le durcissement.

Lors de la thermolyse, le bois est chauffé à une température de 150 à 200 °C sous haute pression en milieu aqueux. La seconde phase consiste en un séchage conventionnel. Lors du durcissement, le bois est une nouvelle fois porté à 150-200 °C, dans une ambiance pauvre en oxygène.

De nombreuses espèces de bois peuvent être traitées. Parmi elles : l'érable, le douglas, le pin, le peuplier ou le bouleau. Le bois platonisé est produit en sciages d'une épaisseur de 50 millimètres maximum et permet toutes les opérations d'usinage : rabotage, clouage, collage, finitions... La première production à échelle industrielle (50 000 m³) a démarré en mai 2000 dans une usine des Pays-Bas. À terme, cette usine devrait pouvoir produire jusqu'à 150 000 m³ de bois platonisé par an. À l'avenir, ce procédé pourrait également être appliqué aux particules de bois utilisées pour la fabrication des panneaux hydrofuges.¹²

La densification

L'objectif principal du bois densifié est d'améliorer sa stabilité dimensionnelle mais également son module de Young*, sa dureté de surface et sa résistance au cisaillement transversal.

Le traitement consiste en deux modes d'action complémentaires :

- ◆ la réduction des espaces vides des cellules (lumens) par compression des éléments dans la direction radiale par rapport aux fibres ;
- ◆ le remplissage des lumens par des polymères.

Le système de bois solide compressé a été initié en Allemagne en 1930 sous le nom de Lignostone et est toujours utilisé en Suisse. Ce procédé thermomécanique consiste à placer une vingtaine de pièces de bois de 50 x 50 x 500 millimètres entre deux plaques chauffant jusqu'à 140 °C durant deux heures et à les presser à 25 MPa dans la direction radiale. Malheureusement, ce type de transformation n'est pas stable et le bois retrouve sa forme initiale lorsqu'il est remis dans des conditions sévères d'humidité. Pour contrer cet effet, il est possible d'imprégner le bois de substances chimiques avant sa compression, mais cela altère son côté positif pour l'environnement.

Une méthode suisse plus récente élaborée par l'École polytechnique fédérale de Lausanne et l'École d'ingénieurs de Bienne vise à contrer cet aspect négatif du procédé par un procédé physique : un traitement thermo-hygro-mécanique (THM).

Des petites éprouvettes de hêtre, d'érable et de pin maritime de 30 x 30 x 40 millimètres ont été densifiées dans leur direction transversale cette fois, sous différentes températures et sous conditions de saturation d'eau. Les résultats ont montré pour les échantillons traités une augmentation de leur masse volumique de plus du double par rapport à la valeur initiale, et une amélioration de leur résis-

tance au cisaillement, de leur module de Young et de leur dureté de surface, tout en montrant une sensibilité aux variations hygrométriques nettement moins grande.¹⁷

CONCLUSIONS

Les méthodes de conservation du bois ont toujours existé, mais même les plus anciennes ou les plus « artisanales » d'entre elles pouvaient être toxiques pour l'environnement : l'enfouissement des bois dans les marais par exemple, pratiqué à l'époque de construction des monastères, châteaux ou cathédrales, avait un effet extrêmement toxique sur le milieu, au point de modifier son équilibre écologique. En effet, l'application de ce genre de méthodes dites « naturelles » il y a une dizaine d'années en Allemagne a montré que les tanins et autres substances toxiques intrinsèques du matériau se répandaient de façon négative dans l'entourage des bois immergés.

Les produits de préservation appliqués de manière externe sur le bois sont quant à eux toxiques par définition ; dans le cas contraire, ils n'assureraient aucune protection.¹⁸

Pour maintenir et diversifier l'utilisation du bois d'une manière respectueuse pour l'environnement, les laboratoires s'orientent actuellement dans deux directions. La première piste de recherche consiste à se pencher sur des produits de préservation inoffensifs pour l'environnement (substances non délavables, concentration limitée en composants toxiques...). La seconde se penche sur le substrat bois lui-même, pour lui afférer de nouvelles propriétés physico-chimiques et le rendre ainsi moins sensible aux variations hygrométriques et donc plus stable et plus durable.

Les premiers développements concernant les bois modifiés ont eu lieu dès les années 1930 dans différents pays. Qu'il s'agisse de modifications chimiques ou de traitements thermiques, ils n'étaient alors que difficilement productibles à des coûts commercialement acceptables. Les produits qui en résultaient n'ont donc jamais été vus comme de véritables « bois d'ingénierie ». Depuis que plusieurs d'entre eux ont été produits à échelle industrielle ces dernières années, les mentalités changent.

* Module d'élasticité.

Par ces procédés, les propriétés des bois tendres tels que l'épicéa ou le pin sont nettement modifiées : ils voient leur stabilité dimensionnelle croître et bien souvent leur durabilité s'améliorer. Malheureusement, dans le cas des traitements thermiques par exemple, ils peuvent par contre voir aussi changer leurs propriétés mécaniques et s'avérer moins résistants ou plus friables.

De nombreuses améliorations sont donc encore à apporter tant pour abaisser leur coût de production que pour généraliser l'application de ces techniques à l'ensemble des usages habituels du bois (emplois structurels notamment). Malgré tout, les résultats actuels de ces procédés de modification du bois sont des plus prometteurs : bien souvent, devenu résistant dans la masse, le bois n'a plus besoin de produit externe pour être protégé. Même le fragile peuplier, dont l'usage est plus généralement limité aux allumettes ou aux boîtes de camembert, ou encore

l'épicéa, dans lequel les produits de préservation ont du mal à pénétrer, deviennent imputrescibles ! Au même titre que les nouveaux dérivés du bois (MDF, OSB, LVL...), les bois modifiés se situeront très certainement en bonne place comme matériaux du troisième millénaire ! ■

Bibliographie

- ¹HERMAN M. [1999]. *Éléments d'anatomie du bois*. Conférence pour le cours « Bois dans la construction », Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 6-8 mai 1999.
- ²GAUZIN-MÜLLER D. [1999]. *Construire avec le bois*. Éditions du Moniteur, 312 p, Paris.
- ³AVELLA T. [1999]. *Chimie et ultrastructure du bois*. Conférence pour le cours « bois dans la construction », Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 6-8 mai 1999.
- ⁴ARGÜELLES R., ARRIAGA F. [1996]. *Estructuras de mader, diseño y calculo*. AITIM, Madrid, 663 p.
- ⁵VAN LEEMPUT M. [1999]. *Procédés de stabilisation dimensionnelle du bois*. Conférence pour le cours « bois dans la construction », Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 22 octobre 1999.
- ⁶www.chartherm.com
- ⁷AVELLA T. [1976]. Les copolymères bois-matières plastiques. *Bulletin de la Société Royale Forestière de Belgique*, pp. 342-350, novembre-décembre.

- ⁸LARDINOIS P. [2000]. Conversation au laboratoire forestier de l'UCL, décembre 2000.
- ⁹BECKERS E. [1998]. Le bois acétylé. *Le courrier du Bois n°120*, Asbl Bois, pp. 43-44, Bruxelles, 1^{er} Trimestre 1998.
- ¹⁰HORMAN W., TJEERDSMA B., BECKERS E., JORISSEN A. [2000]. *Structural and other properties of modified wood*. Proceedings of the 6th timber conference on Timber Engineering, paper n° 3.5.1, juillet 2000.
- ¹¹DIROL D. [1999]. *Amélioration de la qualité des bois par le procédé de torréfaction*. Conférence pour le cours « bois dans la construction », Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 22 octobre 1999.
- ¹²VAN BREUKEL W. [2000]. La « platonisation » du bois. *Le courrier du Bois n° 128*, Asbl Bois, pp. 47-49, Bruxelles, 1^{er} Trimestre 2000.
- ¹³www.emse.fr
- ¹⁴www.fours-rey.fr
- ¹⁵LRBB, CTBA, ÉCOLE SUPÉRIEURE DES MINES DE SAINT-ÉTIENNE [2000]. *Étude de caractérisation du pin maritime rétifé*. www.aquitaine.drir.gouv.fr, 27 p., avril 2000.
- ¹⁶Le courrier du Bois 128, 2000
- ¹⁷TOMME F. PH., GIRARDET F., GFELLER B., NAVI P. [1998]. *Densified Wood : an innovative product with highly enhanced characters*. Proceedings of the 5th World conference on Timber Engineering, Presses polytechniques et universitaires romandes, pp. 640-647, Lausanne, août 1998.
- ¹⁸HERY J.-S. [2000]. Lettre du 04 août 2000 (société Beaumartin - hery@thermya.com).
- ¹⁹JOUREZ B. [1999]. *Anatomie, défauts et mise en œuvre du bois*. Conférence pour le cours « bois dans la construction », Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 6-8 mai 1999.

LA FORÊT DANS LES LIVRES



HERVÉ BRÉDIF
& PIERRE BOUDINOT
**QUELLES FORÊTS
POUR DEMAIN ?**
Éd. L'Harmattan, Format
215 x 135, 250 pp.,
ISBN 2-74-75-0114-0

Autant la notion de développement durable est une invitée obligée de tous les discours et débats interna-

tionaux relatifs à l'environnement, autant cette notion est mal partagée dans sa signification et sa portée opérationnelle. Partant de ce constat et de la diversité des représentations et attentes des parties concernées par les forêts, les auteurs éclairent la crise de référence du monde forestier. Qu'est-ce que bien gérer la forêt, en effet, pour les propriétaires forestiers publics ou privés, pour les industriels, les élus territoriaux, les promeneurs et naturalistes, les O.N.G., les citadins ou les ruraux... les politiques, la société ? Qui est légitime dans ce débat, et comment se dénoue-t-il ?

Au terme d'une enquête passionnante et rigoureuse « explicitant l'implicite » comme l'exprime dans la préface de l'ouvrage Serge Antoine, co-organisateur du Congrès de Rio, les auteurs s'inquiètent du mouvement dominant d'imposition de normes prescriptives qui disqualifient l'engagement des hommes vis-à-vis des forêts et menacent ainsi l'économie et l'écologie forestière. Ils y opposent un schéma d'ouverture reposant sur le contrat négocié, seul à même de restaurer les dimensions humaines, organisationnelles et stratégiques de la gestion durable.



RENÉE KAYSER & PIERRE BALLOUHEY
**COPAIN DES BOIS, LE GUIDE DES PETITS
TRAPPEURS**
Éd. Milan, Format 250 x 185, 285 pp., ISBN 2-7459-0081-1

« Tu aimes observer l'écureuil, faire sortir le scarabée de son trou. Tu regrettes de ne pas savoir donner leur nom aux arbres et aux fleurs que tu rencontres, de ne pas connaître les bons champignons. Tu voudrais savoir lire une carte, repérer la nuit l'étoile polaire. Tu as surtout envie de construire une vraie bonne cabane solide et habitable. Pour tout cela, et pour bien d'autres choses, ton inséparable « Copain des bois » est là pour t'aider. »

Ce livre est étonnant par la quantité d'information qu'il peut donner sur la nature (plantes et animaux mais aussi roches ou météo), les nombreuses anecdotes sur tous ces sujets et les 1001 activités proposées pour découvrir les petits trucs de la nature en s'amusant.

LUDOVIC NEF & R. PERRIN
**DAMAGING AGENTS IN EUROPEAN
FOREST NURSERIES, PRACTICAL HAND-
BOOK**

Éd. Commission Européenne, Format 240 x 180, 352 pp.,
ISBN 92-828-2803-4

Destiné aux professionnels de la pépinière forestière, cet ouvrage présente les dommages les plus couramment observés sur les jeunes plants. Après une série de rappels sur les différents agents, biotiques ou abiotiques, capables de provoquer des dégâts, une clé reprend essence par essence les types de dégâts pouvant être observés et leur cause, et renvoie à une fiche descriptive. Ces fiches exposent alors en détail et avec maintes illustrations les cycles des parasites, les moyens de lutte... Enfin, un chapitre entier est consacré aux méthodes de lutte intégrée

