



**HAL**  
open science

## De nouveaux matériaux à base de bois : un contexte, des exemples

Alain Celzard, J.M. Leban

### ► To cite this version:

Alain Celzard, J.M. Leban. De nouveaux matériaux à base de bois : un contexte, des exemples. Innovations Agronomiques, 2012, 18, pp.17-29. hal-02642004

**HAL Id: hal-02642004**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02642004>**

Submitted on 28 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## De nouveaux matériaux à base de bois : un contexte, des exemples

Celzard A.<sup>1</sup>, Leban J.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut Jean Lamour – UMR CNRS 7198, ENSTIB, 27 rue Philippe Séguin, BP 1041, 88051 Epinal Cedex 9

<sup>2</sup> Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (ENSTIB), 27 rue Philippe Séguin, BP 1041, 88051 Epinal Cedex 9

Correspondance : [Alain.Celzard@enstib.uhp-nancy.fr](mailto:Alain.Celzard@enstib.uhp-nancy.fr), [Jean-Michel.Leban@enstib.uhp-nancy.fr](mailto:Jean-Michel.Leban@enstib.uhp-nancy.fr)

### Résumé

S'inscrivant dans une démarche de développement durable, le bois s'impose de plus en plus comme un matériau à dimension environnementale et s'ancre dans le paysage français. Encore discrètes, de nombreuses innovations sortent peu à peu des laboratoires et trouvent des applications commerciales. Celles-ci bénéficient d'un soutien politique fort et sont plébiscitées par le grand public, qui y voit des alternatives plus respectueuses de l'environnement aux produits synthétiques dérivés de la pétrochimie, ou dont la production nécessite de lourdes dépenses énergétiques. Après une brève introduction portant sur le bois en tant que source de matériaux et de produits nouveaux, quelques exemples d'innovations seront donnés dans cet article. Les matériaux de structure, puis les matériaux de fonction, seront traités à la lumière de travaux récents réalisés dans des laboratoires français.

**Mots-clés** : Bois; Construction; Chimie verte; Matériaux de structure; Matériaux fonctionnels

### Abstract: New wood-based materials: context and examples

In the framework of sustainable development, wood increasingly establishes itself as an environment-friendly material and progressively becomes more anchored in the French industrial scene. A number of still inconspicuous inventions come out of the laboratories and find commercial applications. The latter enjoy a strong political support and find favourable welcoming from the mass market, as they are seen as environment-friendly alternatives to classical synthetic products derived from the petrochemical industry, or whose production requires high energy expenditures. After a short introduction dealing with wood as a source of new materials and products, a few examples of innovations will be given in this paper. Structural materials, followed by functional materials, will be considered in the light of recent works carried out in French laboratories.

**Keywords**: Wood ; Building ; Green chemistry ; Structural materials ; Functional materials

## Le bois, une source de matériaux nouveaux

### Contexte

Le Grenelle de l'environnement a fixé trois objectifs majeurs d'ici 2020 : améliorer de 20% l'efficacité énergétique, réduire d'au moins 20% les émissions de gaz à effet de serre et porter à 23% la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale.

Ces objectifs vont impacter durablement la filière bois, et l'intérêt marqué du grand public pour le matériau bois est déjà avéré. Le bois s'inscrit en effet dans une démarche vers un développement durable, et s'impose clairement comme un matériau à dimension environnementale.

L'engouement pour le bois est donc bien perceptible et il ne devrait pas se démentir comme en atteste, dans le domaine de la construction : (i) l'intérêt de grands groupes comme Vinci, Eiffage ou Bouygues, qui proposent à présent une offre BOIS substantielle dans leurs catalogues, et (ii) le soutien des pouvoirs publics qui incitent fortement au développement de cette filière.

A l'heure actuelle, la récolte commercialisée de la forêt française approvisionne trois principaux secteurs [SESSI-INSEE, 2008] :

- le bois d'œuvre, pour la construction, l'ameublement, la menuiserie ou l'emballage bois (78% de l'utilisation),
- le bois d'industrie, pour la fabrication des panneaux et pâtes à papier (15% de l'utilisation),
- le bois énergie, essentiellement pour le chauffage (7% de l'utilisation – la ressource disponible est théoriquement en augmentation mais l'accessibilité reste un problème).

Bien que le secteur de la construction soit le principal débouché des produits de la forêt, la France reste pourtant en retard avec un taux d'incorporation de bois dans la construction qui stagne à 10%, tandis qu'il est de 15% en Allemagne et de 35% en Scandinavie et en Amérique du Nord.

Dans les domaines autres que la construction, la biomasse apparaît comme la nouvelle ressource à partir de laquelle la Chimie Verte commence à se développer. La matière lignocellulosique est en effet une alternative crédible aux produits de la pétrochimie, à même d'offrir de nouvelles molécules et de nouveaux produits dérivés. L'enjeu est de pouvoir transformer les papeteries, qui ont offert les premiers produits industriels matures dérivés de ressources naturelles, en bioraffineries. En plus des désormais traditionnelles applications en tant que combustible et en tant que sources de fibres, la biomasse une fois transformée chimiquement permet déjà de formuler de nouveaux plastiques, résines, adhésifs, composites, principes actifs, solvants, tensioactifs, etc.

Le bois, étant abondant et renouvelable en tant que tel mais aussi en tant que déchet d'autres industries, tient la première place pour devenir le substitut aux matières premières fossiles. Dans un contexte global dominé par la nécessité d'économiser les ressources non renouvelables, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de limiter l'empreinte carbone, les industriels de la filière forêt bois ont donc tout intérêt à développer et/ou renouveler des produits utilisant la biomasse comme matière première. Une feuille de route a d'ailleurs été rédigée en ce sens par Agenda 2020 Technology Alliance (USA) en collaboration avec le département américain de l'énergie.

Compte tenu de l'ampleur du sujet, et tant les possibilités d'obtenir des produits dérivés sont nombreuses, seuls quelques exemples seront donnés ici.

La Figure 1 regroupe quelques produits phares à l'horizon 2020, répartis dans les secteurs du bois-énergie, bois massif, bois-fibres et bois-chimie.

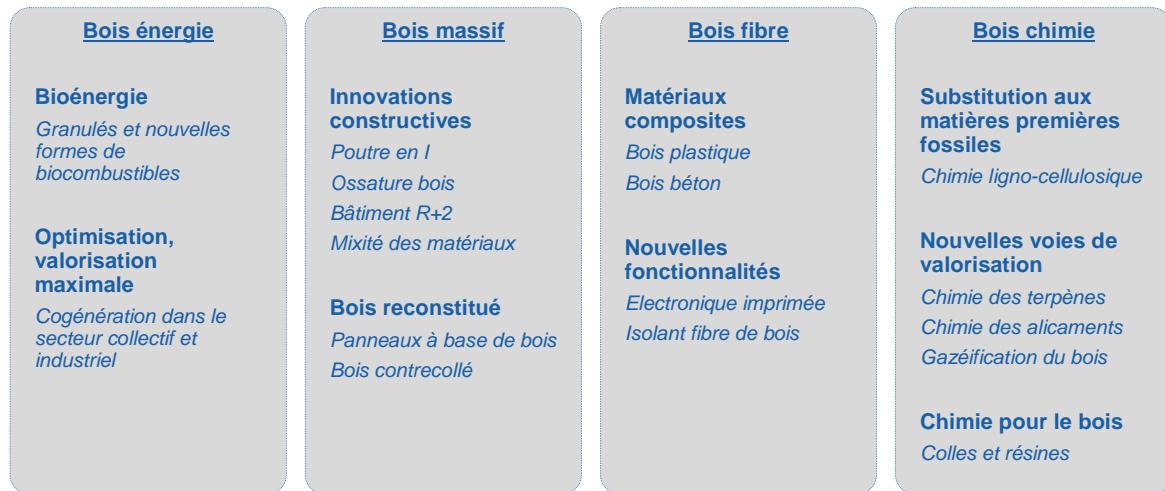


Figure 1 : Identification des principaux produits phares issus du bois à l'horizon 2020. Source : Cabinet ALCIMED, 2011.

### *Les différents types de produits bois*

De ces quatre domaines c'est le secteur de la construction qui connaît actuellement une mutation importante au travers de l'augmentation bien visible de l'usage du bois.

### *Qu'entend-t-on par « nouveaux produits » ?*

Sous l'angle de l'innovation par rapport à l'entreprise et au marché, on distingue généralement six types de produits :

- Les produits entièrement nouveaux qui créent un nouveau marché.
- Les gammes de nouveaux produits qui permettent à une entreprise d'entrer pour la première fois sur un marché déjà établi.
- Les extensions des gammes existantes de produits qui ajoutent de nouveaux produits.
- Les modifications ou les améliorations apportées aux produits existants de l'entreprise. Ils remplacent les produits existants, car ils sont plus performants ou ont une valeur perçue comme plus élevée.
- Les produits repositionnés, c'est-à-dire des produits existants dirigés vers de nouveaux marchés ou d'autres segments du marché.
- Les produits dont les coûts sont réduits. La qualité de ces produits existants est maintenue, mais ils sont offerts à un prix moindre.

Il s'agit donc de tous les produits innovants, c'est-à-dire non existants aujourd'hui sur le marché ou en cours de développement et s'adressant à des utilisations et marchés nouveaux, mais également de tous les produits arrivant, pour certains, à maturité et pouvant faire l'objet de diversifications susceptibles de nouveaux développements et d'engendrer une croissance économique (Huppé, 2003). Ces produits peuvent être classés selon quatre catégories comme indiqué sur la Figure 2.

L'étude se concentre donc sur la création de valeur, qu'elle soit issue de produits innovants ou plus traditionnels mais qui sont de véritables moteurs de la filière bois, ainsi que sur la création d'emplois permise grâce à ces nouveaux produits (ALCIMED-PIPAME, 2011). Dès lors, entrent dans le champ :

- Les catégories de bois « classiques » (bois massifs, reconstitués, etc.) dans la mesure où des innovations pourraient ouvrir de nouveaux débouchés ;

- Les nouveaux matériaux : bois traités thermiquement, composites, etc. ;
- Les nouvelles utilisations des composantes du bois : molécules pour la chimie, la pharmacie, etc. ;
- Les phénomènes possibles de substitution du bois à d'autres matériaux et inversement.

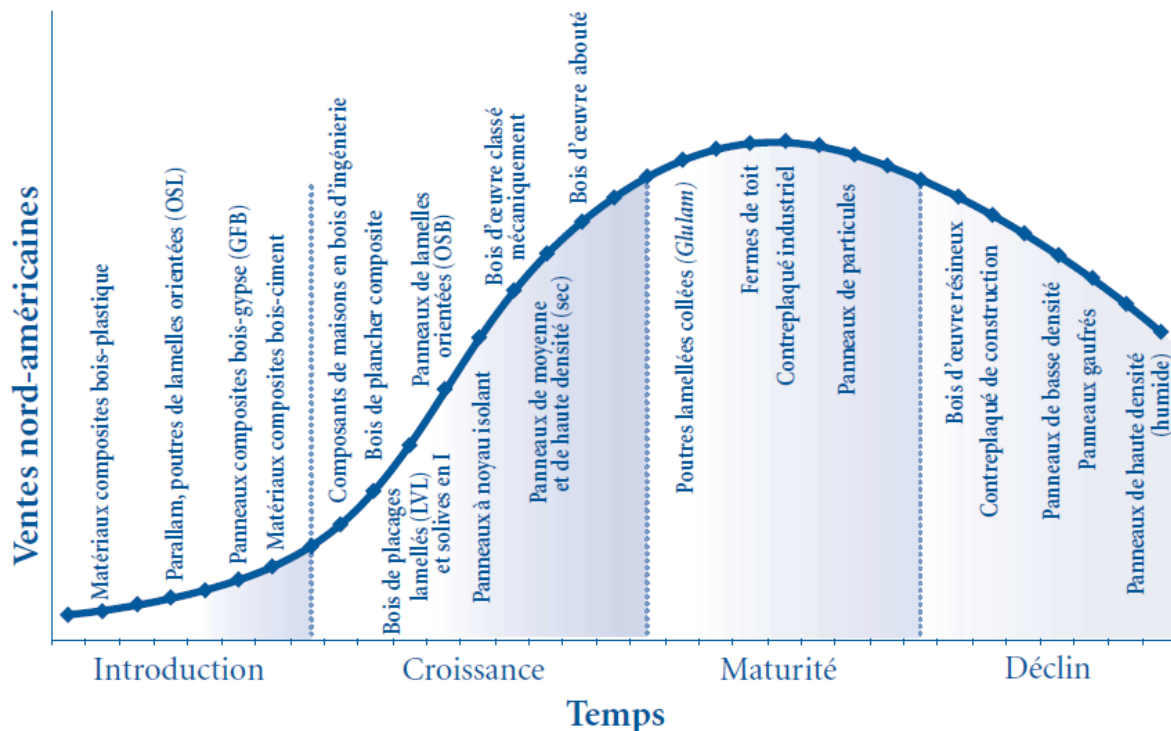


Figure 2 : Cycle de vie des produits du bois. Source : graphique de base de USDA Forest Service, Nexfor et ajouts par le ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 2002.

Ainsi, par exemple, le bois d'œuvre classé visuellement va être progressivement remplacé par le bois d'œuvre classé mécaniquement ou par tomographie RX. C'est donc le même produit qui sera obtenu en introduisant dans les processus de transformation des technologies visant à évaluer simultanément, et de manière plus fiable, les propriétés mécaniques et d'aspect. Au travers de ces nouvelles technologies, la détermination plus précise du niveau de propriétés mécaniques conduira à réduire les coefficients de sécurité et conduira à une meilleure utilisation de ces bois en structure, ce qui ouvre une nouvelle voie de croissance.

## Nouveaux matériaux à base de bois : quelques exemples

### *L'essor de la construction bois*

La redécouverte récente du bois dans le secteur de la construction est sans doute le virage le plus perceptible pour le grand public. Ce matériau ne manque en effet pas d'atouts techniques et économiques : caractéristiques thermiques, stockage de carbone (une tonne de carbone par m<sup>3</sup> de bois), délais de construction courts, etc. Michel Perrin, Directeur opérationnel du Comité National pour le Développement du Bois (CNDB), explique : « Malgré des carnets de commande en baisse, les entreprises de construction bois ont mieux résisté que les entreprises de maçonnerie. L'engouement

pour le bois est bel et bien réel ». Et il ne devrait pas se démentir. Les pouvoirs publics incitent aussi fortement au développement de la filière bois-construction.

Le décret n° 2010-273 modifiant le décret n°2005-1647 du 26 décembre 2005 relatif à l'utilisation du bois dans la construction neuve, a été publié au journal officiel du 15 mars 2010. Il stipule que, pour les immeubles à usage d'habitation, le volume minimal de bois à incorporer pourra être, en 2012, jusqu'à dix fois supérieur à celui en vigueur actuellement, soit 35 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> SHON. Pour un bâtiment à usage industriel, le volume ne pourra pas être inférieur à 5 dm<sup>3</sup> en 2012, et pour tous les autres bâtiments, la quantité de bois sera fixée à 10 dm<sup>3</sup>.

Cependant, pour parvenir à ces objectifs, la filière devra relever un double défi : l'industrialisation et la standardisation des procédés. Ainsi, la construction bois pourra devenir compétitive.

### *Des innovations dans la construction*

Les entreprises de la filière Forêt-Bois connaissent depuis quelques années des changements en profondeur. Certains produits traditionnels sont progressivement remplacés par de nouveaux. Par exemple, au Québec, le contreplaqué de résineux est de plus en plus remplacé par le panneau de lamelles orientées (OSB) et le bois d'œuvre classé visuellement l'est, dans certaines utilisations, par le bois d'œuvre classé mécaniquement (MSR).

L'industrie doit en effet constamment s'adapter aux nouvelles réalités et elle est en compétition maintenant avec des matériaux à base de plastique, de béton, d'acier et de nouvelles sources de fibres. C'est ainsi que, par exemple, les produits et procédés suivants ont pu voir le jour récemment.

#### Deux exemples d'innovation incrémentale

Dans le secteur de la construction, les innovations portent principalement sur les améliorations de produits existants sans innovation de rupture. La tendance générale vise la standardisation au travers de la production de différents types de panneaux à base de bois reconstitués à partir d'éléments de base de différentes tailles, les panneaux de fibres, de copeaux pressés, de lamelles de bois, de placages déroulés et contrecollé selon différentes orientations mais également de bois massifs reconstitués à partir de sciages.

Le nouveau contreplaqué UPM Grada (Figure 3) s'appuie sur une technologie qui permet de modeler les panneaux par chauffage, puis de les laisser refroidir.



Figure 3 : Contreplaqué UPM Grada (<http://www.upmgrada.com/>)

Le chauffage et le façonnage peuvent également être appliqués à une partie spécifique du panneau pour former à faible coût des objets de très grandes dimensions. La matière première servant à la fabrication du contreplaqué est un bois certifié et, en fin de vie, ce nouveau produit peut être recyclé ou utilisé comme source d'énergie. Enfin, l'adhésif employé ne contient ni formaldéhyde ni aucun autre composant nocif.

Cet exemple illustre une perspective d'une nouvelle phase de croissance pour un produit existant qui est en phase de déclin.

Un deuxième exemple concerne la production en usine d'éléments structuraux dans le but d'une mise en œuvre rapide sur chantier. Il s'agit d'un type de caisson constitué d'éléments de bois massif, panneaux et nervures, assemblés par collage. Ce type de produit est adapté aux bâtiments à ossature bois, en dalle de toiture (20 mètres de portée), ainsi qu'en plancher (9 mètres de portée) (Figure 4).



**Figure 4** : Eléments structuraux préfabriqués en usine à base de panneaux bois (KERTO, <http://www.finnforest.fr/menuiseriesindustrielles/gammedeproduitsetdeservices/Pages/Kerto.aspx>).

### Quelques procédés innovants récents

**Wood Protect** : En termes de protection du bois, et afin d'en augmenter la durée de vie, le procédé Wood Protect mérite d'être cité. Il s'agit d'«une méthode 100% naturelle éco-compatible, donc sans effet nocif pour l'homme et l'environnement » selon leurs inventeurs : le Laboratoire de Chimie Agro-industrielle (LCA) de Toulouse en association avec Lapeyre.

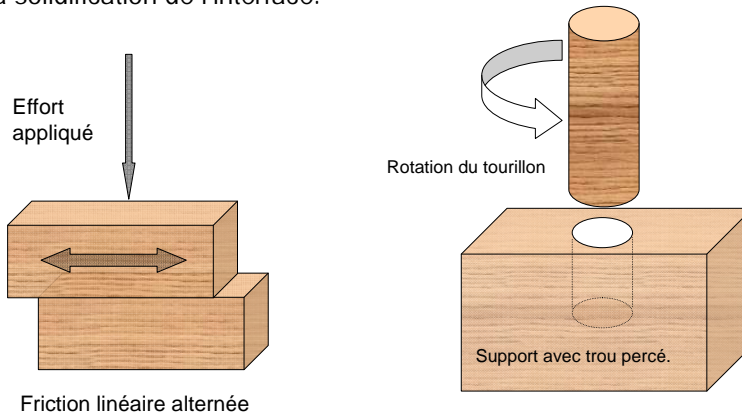
La méthode consiste à imprégner le bois à cœur par une substance dérivée d'huiles végétales. Ce traitement donne à des essences de bois ordinaires une trentaine d'années de durée de vie, c'est-à-dire l'équivalent de celle des bois exotiques. "Cela permet donc de réduire la déforestation en Asie ou en Afrique", explique Marie-Elizabeth Borredon, directrice du LCA.

Ces travaux en collaboration avec Lapeyre ont été couronnés en mars 2007 par le Prix Pierre Potier, décerné par le Ministère de l'Industrie aux innovations françaises les plus marquantes issues de la chimie verte. L'étude a été financée par Lapeyre à hauteur de 300 000 euros en contrepartie de la

détention du brevet. L'industriel a d'ailleurs lancé dès septembre 2006 avec un beau succès sa nouvelle gamme de volets en sapin Wood Protect. D'autres produits, tels portes ou fenêtres, devraient suivre.

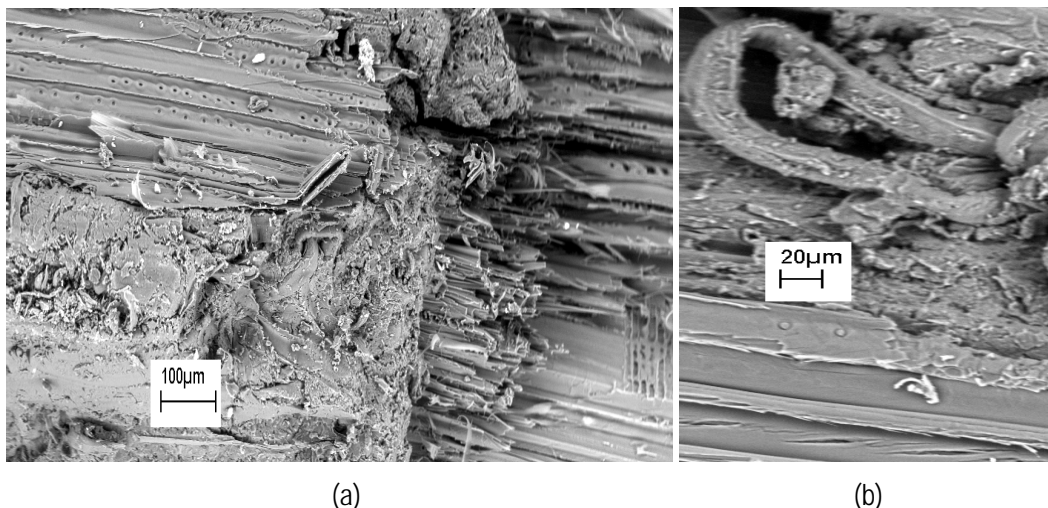
**Bois soudé :** Un autre exemple emblématique, lié cette fois à l'assemblage, est le procédé dit de "soudage" du bois qui permet l'adhésion de pièces de bois entre elles par la mise en œuvre d'un procédé de friction linéaire ou rotative (Figure 5).

La chaleur nécessaire à la fusion des deux pièces de bois est générée en pressant les échantillons à assembler l'un contre l'autre tout en leur appliquant un mouvement relatif. La chaleur ainsi générée provoque la fusion des matériaux de l'interface de contact en quelques secondes. Le mouvement de vibration ou de rotation est alors stoppé et les échantillons sont maintenus en contact sous pression jusqu'à la solidification de l'interface.



**Figure 5.** Les deux types d'opérations de soudage par friction.

Le soudage du bois est basé sur la fusion et l'écoulement des constituants des parois des fibres du bois, principalement la lignine mais également les hémicelluloses. Pendant la friction des deux pièces de bois entre elles, les températures élevées (plus de 180 °C) atteintes en quelques secondes à l'interface provoquent la fusion de ces polymères amorphes. Cela conduit à la formation d'un enchevêtrement de fibres qui sont localement fortement comprimées et dont la fusion des parois produit, après solidification sous charge, une adhésion des pièces entre elles. Le joint soudé ainsi obtenu est constitué d'une matrice de polymère à base de lignine fondue (Figure 6).

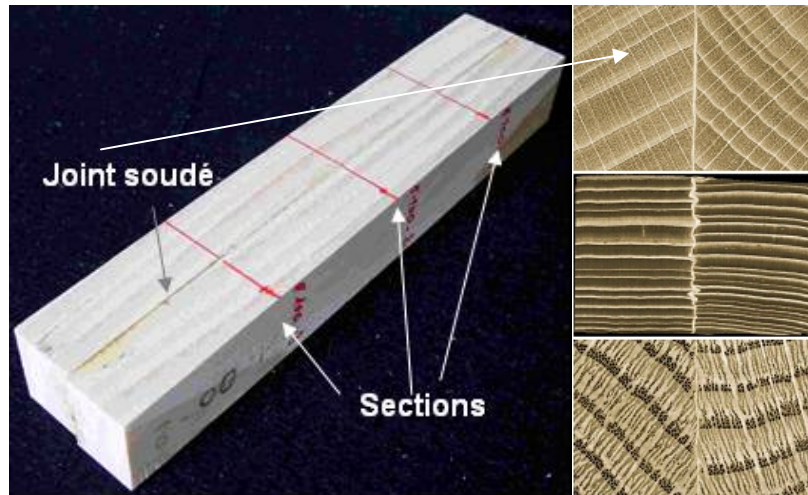


**Figure 6 :** Bois soudé : (a) En haut à gauche des trachéides intactes. Sur la partie inférieure gauche on observe le matériau fondu qui constitue le liant du joint soudé duquel émerge un faisceau de fibres arrachées lors de l'ouverture du joint. (b) En bas détail de fibre intacte. Dans la partie supérieure on observe du bois fondu et une fibre trachéide fortement courbée dont la surface présente un faciès de fusion (Images réalisées par Christophe Rose sur le MEB LEO 1450 VP de l'UMR EEF de l'INRA Champenoux, Pizzi et al., 2006, Leban et al., 2006)



Les principaux paramètres de ce procédé sont l'amplitude du mouvement et sa fréquence, la pression de friction ainsi que la pression et la durée du maintien après arrêt du mouvement. Ces paramètres sont interdépendants, et il est nécessaire de définir expérimentalement les jeux de paramètres optimaux.

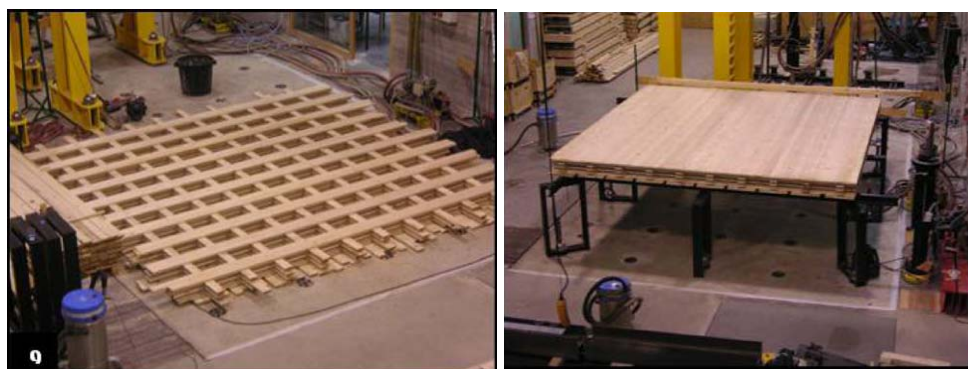
Cette démarche prend une importance toute particulière pour le matériau bois (Figure 7). Il faut tenir compte de la variabilité naturelle de ce matériau d'origine biologique (Leban et al., 2004), dont les plans ligneux peuvent être soit homogènes (hêtre) soit très hétérogènes (chênes et résineux).



**Figure 7** : Sur la gauche deux échantillons de bois soudés. Les lignes rouges représentent la localisation des sections transversales que l'on prélève par sciage pour l'analyse de la qualité du joint soudé. Sur la partie droite sont représentées trois sections transversales. Elles illustrent les différentes formes du joint soudé obtenues pour trois essences : du haut vers le bas, le hêtre, l'épicéa commun et le chêne (Photo et radiographies P. Gelhaye, Lerfob, INRA Nancy).

Le procédé par friction linéaire requiert des machines dont le coût élevé limite jusqu'à présent le développement d'applications industrielles. Par contre le procédé de soudage par rotation nécessite de simples perceuses pour la mise en place de tourillons soudés.

La conception et la réalisation d'un plancher de quatre mètres de côté (Figure 8) a permis de vérifier expérimentalement la faisabilité de ce type d'assemblage et de montrer que la structure obtenue satisfaisait les exigences réglementaires définies par l'Eurocode 5 (Bocquet et al. 2007), ce qui ouvre la perspective d'applications industrielles encore à venir.



**Figure 8** : Illustration du plancher assemblé par soudage rotatif : à gauche en cours de construction, à droite le plancher est achevé et prêt à être testé (Bocquet et al. 2007).

### Nouveaux matériaux fonctionnels non cellulosiques dérivés du bois

Le bois est un composite naturel que l'on peut considérer en première approximation comme constitué de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et d'extractibles. Dans ce composite, la cellulose est le renfort, alors que les hémicelluloses et la lignine en sont la matrice. Ces substances macromoléculaires sont présentes dans toutes les essences. Par opposition, les extractibles sont des molécules de faible poids moléculaire, en général spécifiques à certaines essences. Elles se trouvent dans la structure poreuse du bois et peuvent être extraites par différents solvants, selon leur nature, d'où leur nom. Les extractibles sont responsables des principales différences entre les bois : couleur, odeur, durabilité, propriétés acoustiques, etc. Parmi les grandes familles d'extractibles, on peut distinguer les cires, les sucres, les terpènes et les composés phénoliques. En termes d'application, ces ressources naturelles ont un intérêt croissant : arômes, huiles essentielles, insecticides, colorants, lubrifiants, adhésifs, émulsifiants, antiseptiques, antifongiques, antioxydants, antalgiques, etc. Les composés phénoliques, en particulier la lignine et les tannins condensés (catéchiques), sont des précurseurs inhabituels de matériaux dont quelques exemples sont donnés ici.

#### Matériaux dérivés de lignine

Résidu de l'industrie papetière, la lignine est un sous-produit très mal valorisé. Pourtant, son traitement thermique en présence de sels alcalins bien choisis conduit aisément à des charbons actifs très bon marché et extrêmement performants. Les charbons actifs sont des matériaux produits et utilisés en quantité industrielle au quotidien pour purifier l'air ou l'eau. Pour ce faire, ils doivent présenter des surfaces d'échange considérables avec le milieu dans lequel ils sont placés, de l'ordre de 1000 m<sup>2</sup> par gramme pour les matériaux commerciaux. Les charbons actifs de lignine ont une surface jusqu'à 3 fois plus élevée, avec des vitesses de piégeage des polluants encore plus grandes. Le secret tient à la composition chimique de la lignine et de son état de division initial. Les carbones résultants sont si performants qu'ils surpassent tous leurs concurrents pour des applications de concentration de vapeurs toxiques. C'est ainsi que des microsystèmes de détection de traces de benzène dans les bulles des boissons gazeuses ont pu être développés : rapidité d'analyse et sélectivité du polluant à doser sont au rendez-vous (Figure 9).

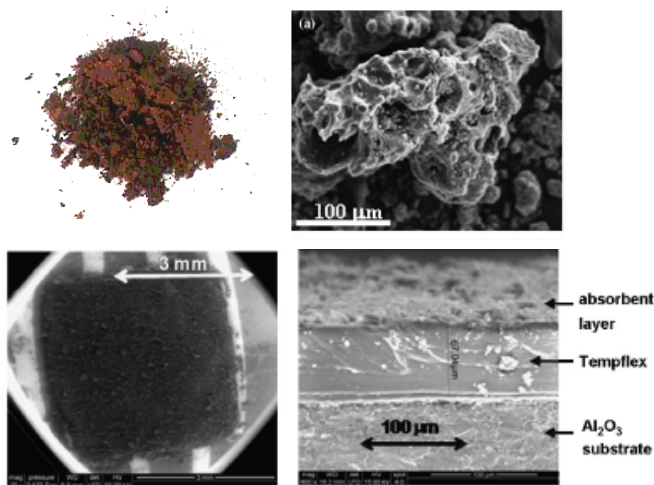
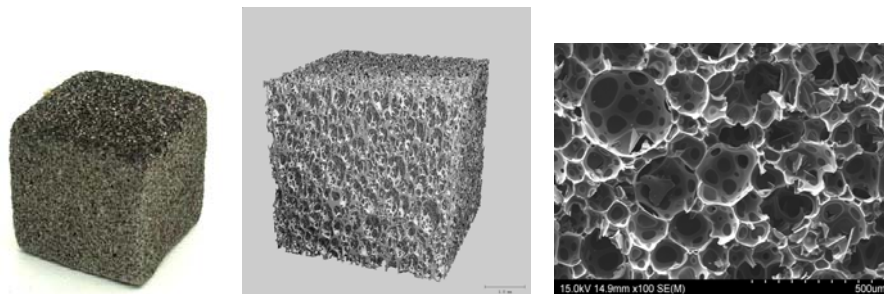


Figure 9 : Lignine (à gauche), charbon actif de lignine (à droite, microscope électronique à balayage, Fierro et al. 2006), et détails du préconcentrateur de gaz (en bas, Blanco et al. 2008).

## Matériaux dérivés de tannins

Bien connus pour le traitement du cuir, les tannins sont des extractibles particulièrement intéressants. En effet, ils sont chimiquement proches du phénol et du résorcinol, deux molécules synthétiques et toxiques mais d'importance majeure en chimie, auxquelles ils peuvent donc se substituer pour la préparation de résines et d'adhésifs. Ils sont peu coûteux à produire, puisqu'ils sont le plus souvent extraits d'écorces par de l'eau chaude. Mélangés à de l'eau, à un durcisseur et à un agent moussant, les tannins produisent des mousses rigides extrêmement légères. Leurs propriétés remarquables, similaires et même supérieures aux mousses phénoliques commerciales actuellement utilisées en aéronautique et marine, combinent résistance mécanique, isolation thermique, incombustibilité et infusibilité. Voici donc un matériau écologique, à 95% naturel, non toxique, excellent isolant, qui ne brûle pas (Celzard et al. 2011) ni ne dégage de fumées toxiques, et très bon marché. Un tel produit pourrait devenir un concurrent très sérieux de la laine de verre de nos maisons (Tondi et al. 2009a) (Figure 10).



**Figure 10** : Mousse rigide de tannin de densité  $0.06 \text{ g/cm}^3$  : échantillon de 2 cm de côté (à gauche) ; structure par tomographie aux rayons X (au centre) ; vue au microscope électronique à balayage (à droite).

Placés dans d'autres conditions, les tannins polymérisent pour donner des gels. Ces derniers sont alors séchés dans des conditions particulières (dites supercritiques) pour donner des gels secs, rigides, tellement légers qu'on les qualifie parfois de « fumée solide » ou « aérogels » (Szczyrek et al. 2011). A densité équivalente à celle des mousses rigides, ce sont des matériaux dont la porosité est 1000 fois plus fine qui sont obtenus. On ne parle alors plus d'isolants mais de « superisolants » thermiques. Les concurrents directs de tels solides ultra-légers sont les aérogels de silice, très onéreux et issus d'une chimie toxique. Les aérogels de tannins sont plus légers, moins chers, non irritants et opaques, ce qui les rend encore meilleurs en transmettant peu l'infrarouge (Figure 11).



**Figure 11** : Tannins en poudre (à gauche), et aérogels de tannin (densité  $0.07 \text{ g/cm}^3$ , à droite)

La pyrolyse de ces deux familles de matériaux : mousses et gels, conduit à leurs homologues en carbone vitreux (Tondi et al. 2009b). La structure poreuse de départ est conservée, mais la résistance mécanique est améliorée avec le traitement thermique, en même temps que la résistance aux chocs thermiques (Figure 12) et l'inertie chimique. Une autre propriété d'intérêt est apparue : la conductivité

électrique. Non contents de conserver les applications de leurs précurseurs organiques (composites sandwich, isolation thermique et phonique, absorption des chocs, filtration de fluides corrosifs ou de métaux fondus), les mousses de carbone dérivées peuvent maintenant aussi être utilisées comme électrodes poreuses, pour le blindage électromagnétique, la catalyse hétérogène, l'adsorption, ... Les aérogels de carbone ex-tannins (Figure 13) ont par ailleurs d'excellentes performances en tant qu'électrode de supercondensateurs. Ces dispositifs, qui servent de puissance électrique d'appoint dans les tramways, TGV et autres véhicules électriques ou hybrides, sont appelés à se développer et exigent des caractéristiques d'inertie chimique et de porosité que les gels de carbone sont en mesure d'apporter. Environ 10 à 15 fois moins chers que leurs homologues dérivés du résorcinol, les aérogels de carbone ex-tannins sont des concurrents sérieux pour le stockage d'énergie électrochimique.

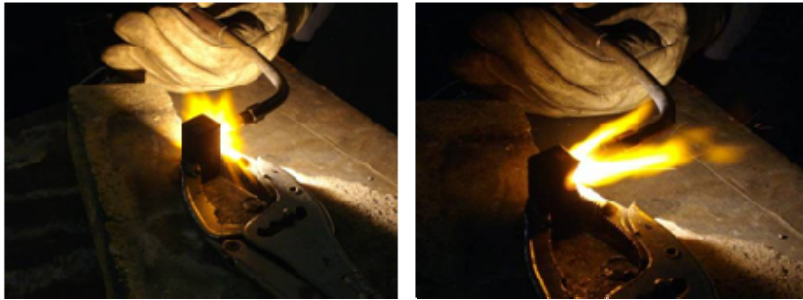


Figure 12 : Résistance thermique d'une mousse de carbone vitreux dérivée de tannins (flamme à 2800°C).

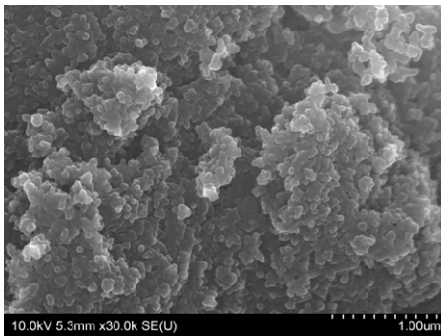


Figure 13 : Microstructure d'un aérogel de carbone (microscopie électronique à balayage).

### Matériaux fonctionnels dérivés de déchets de bois

Dans certains cas, il peut être intéressant d'utiliser la biomasse sans en avoir préalablement séparé les constituants. Ainsi, la gazéification est un procédé moderne de production d'énergie. Porté à haute température, le bois produit, entre autres, de l'hydrogène, du méthane et de la vapeur d'eau. Des goudrons et du charbon de bois sont également obtenus. Il a ainsi été possible de montrer l'intérêt de recycler ce charbon dans le procédé lui-même (Dufour et al. 2008). Le charbon va en effet servir de « catalyseur » pour augmenter le rendement en hydrogène. En offrant une surface de contact élevée avec les gaz (à l'image des charbons actifs mais dans une moindre mesure), le charbon va permettre le craquage des goudrons et du méthane en carbone ... plus hydrogène ! Ce phénomène est connu avec les catalyseurs au nickel et au fer déjà employés pour cet usage. Mais ces derniers se désactivent rapidement par ce dépôt de carbone qui les rend *in fine* inactifs. Dans le cas du charbon (Figure 14), le carbone déposé est plus réactif, et se gazéifie continuellement en réagissant avec la vapeur d'eau présente dans les gaz de pyrolyse. On produit ainsi encore d'avantage d'hydrogène tout en régénérant la surface du charbon. Au final, le catalyseur déjà gratuit au départ, dure très longtemps et est donc produit en excès. Cet excès est alors utilisé comme combustible pour alimenter en énergie le procédé lui-même, dont on aura doublé le rendement en hydrogène !

Les particules de bois peuvent également être valorisées à peu de frais, en particulier lorsqu'elle sont considérées comme un déchet. A ce titre, elles acquièrent ainsi un « coût négatif », car le producteur doit payer son enlèvement et/ou son retraitement. C'est par exemple le cas des panneaux de particules en fin de vie : -70€ par tonne. Ces résidus peuvent pourtant être valorisés énergétiquement

au travers d'un processus de pyrolyse étagée, avant d'être convertis en charbon actif. Cette opération est très rentable puisque, outre l'énergie récupérée, le prix de revient du traitement final compense plus ou moins le coût négatif initial ! C'est un charbon actif à coût zéro qui est produit, dont les performances dans la rétention de micropolluants dans l'eau sont démontrées (Girods et al., 2009).

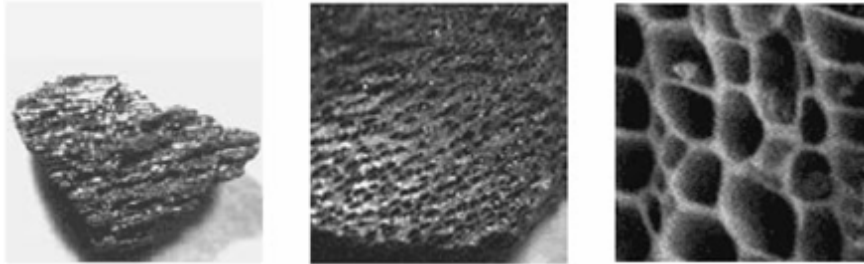


Figure 14 : Charbon de bois vu à différentes échelles.

## Conclusion

Pour ce qui est de matériaux de structure, des innovations en termes de produits mais aussi de procédés ont récemment vu le jour, et permettent de réenvisager le bois et ses dérivés sous un jour nouveau. Des progrès considérables ont en effet été accomplis pour faire émerger de nouveaux matériaux répondant aux exigences du confort moderne, aux normes et aux rythmes industriels actuels, tout en offrant de nouvelles possibilités : formes possibles, durabilité accrue, moindre recours aux composants toxiques, etc.

Pour ce qui est de matériaux de fonction, d'excellents adsorbants peuvent être obtenus à partir de bois seul, mais plus judicieusement à partir de ses constituants après séparation. D'autres matériaux peuvent être préparés et présentent des propriétés remarquables : extrême légèreté, résistance mécanique, infusibilité et complète ininflammabilité, conductivité thermique exceptionnellement basse. Toutes ces qualités font de ces nouveaux matériaux des concurrents sérieux, écologiques et biosourcés, de nombreux produits plus onéreux et d'origine synthétique. Après pyrolyse, des propriétés supplémentaires apparaissent, les rendant utilisables comme filtres dans des conditions sévères, catalyse, et stockage électrochimique par adsorption d'ions.

En conclusion, et contrairement aux idées reçues, un dérivé végétal peut devenir un précurseur de matériaux de haute technologie ! Son côté "vert" et son innocuité le rendent plus acceptable que nombres de produits synthétiques, et son faible coût en fait un concurrent sérieux d'autant plus que les performances sont là. Ce nouveau paradigme est un phénomène mondial, encore hésitant mais en phase d'accélération.

## Références bibliographiques

Agenda 2020 Technology Alliance – US Department of Energy (USA), 2006. Forest Products Industry Technology Roadmap, June 2006.

ALCIMED-PIPAME., 2011. Prospective sur le marché actuel des nouveaux produits issus du bois et des évolutions à échéance 2020, 161 pages

Blanco F., Vilanova X., Fierro V., Celzard A., Ivanov P., Llobet E., Cañellas N., Ramírez J.L., Correig X., 2008. Fabrication and characterisation of microporous activated carbon-based pre-concentrators for benzene vapours. *Sensors and Actuators B: Chemical* 132, 90-98

Bocquet J.F., Pizzi A., Resch L., 2007. Full-scale industrial wood floor assembly and structures by welded-through dowels. *Holz als Roh-und Werkstoff* 65, 149–155.

- Celzard A., Fierro V., Amaral-Labat G., Pizzi A., Torero J., 2011. Flammability assessment of tannin-based cellular materials. *Polymer Degradation and Stability* 96, 477-482.
- Dufour A., Celzard A., Fierro V., Martin E., Broust F., Zoulalian A., 2008. Catalytic decomposition of methane over a wood char concurrently activated by a pyrolysis gas. *Applied Catalysis A: General* 346, 164-173.
- Fierro V., Torné-Fernández V., Celzard A., 2006. Kraft lignin as a precursor for microporous activated carbons prepared by impregnation with ortho-phosphoric acid: synthesis and textural characterization. *Microporous and Mesoporous Materials* 92, 243-250.
- Girods P., Dufour A., Fierro V., Rogaume Y., Rogaume C., Zoulalian A., Celzard A., 2009. Activated carbons prepared from wood particleboard wastes: characterisation and phenol adsorption capacities. *Journal of Hazardous Materials* 166, 491-501.
- Huppé S., 2003. Cycle de vie des produits forestiers, 2003. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers Mai 2003, 22 pages.
- Leban J.M., Pizzi A., Wieland S., Zanetti M., Properzi M., Pichelin F., 2004. X-Ray Microdensitometry Analysis of Vibration-welded Wood. *J.Adhesion Sci. Technol.* 18, 673-685.
- Leban J.M., Pizzi A., Properzi M., Pichelin F., Gelhaye P., Rose C., 2005. Wood Welding, A challenging alternative to conventional wood gluing. *Scand. J. For. Res.*, 20(6): 534-538.
- Pizzi A., Leban J.M., Ganne-Chedeville C., Properzi M., Delmotte L., Pichelin F., 2006. Le soudage du bois par friction. *Techniques de l'Ingénieur*, 04/IN59:1-7
- Szczurek A., Amaral-Labat G., Fierro V., Pizzi A., Masson E., Celzard A., 2011. The use of tannin for preparing carbon gels. Part I. Carbon aerogels. *Carbon* 49, 2773-2784.
- Service des études et des statistiques industrielles (SESSI) – INSEE, 2008. Panorama de l'industrie par grands secteurs d'activité - Édition 2008.
- Tondi G., Zhao W., Pizzi A., Du G., Fierro V., Celzard A., 2009a. Tannin - based rigid foams: a survey of chemical and physical properties. *Bioresource Technology* 100, 5162–5169.
- Tondi G., Fierro V., Pizzi A., Celzard A., 2009b. Tannin-based carbon foams. *Carbon* 47, 1480-1492.