



# INNOVATIONS DANS LES MATÉRIAUX À BASE DE BOIS

Programme national de recherche PNR 66 **Ressource bois**

Ingo Burgert et Oliver Klaffke



FONDS NATIONAL SUISSE  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**Ressource bois**  
Programme national de recherche PNR 66

## **Les résultats et recommandations du PNR 66 sont publiés dans quatre rapports qui font écho à chacune des synthèses partielles.**

Le comité de direction du PNR 66 a partagé le domaine de recherche en quatre plates-formes de dialogue thématiques. Celles-ci portent sur les principaux domaines de la chaîne de valeur forêt-bois et englobent respectivement entre 4 et 11 projets de recherche sur les 30 projets du PNR 66. Dans le cadre du PNR 66, près de 200 représentantes et représentants des milieux économiques, des associations et des autorités ont participé aux 17 dialogues organisés par les équipes de recherche.

Les quatre synthèses partielles rendent compte des projets de recherche et de leurs principaux résultats ainsi que du dialogue mené avec les acteurs de terrain.

- Synthèse de la plate-forme de dialogue « Avancées dans la construction en bois »
- Synthèse de la plate-forme de dialogue « Nouvelles voies dans le bioraffinage du bois »
- Synthèse de la plate-forme de dialogue « Innovations dans les matériaux à base de bois »
- Synthèse de la plate-forme de dialogue « Approvisionnement et utilisation durable du bois »

Fondé sur les quatre synthèses partielles, le résumé du programme rend compte des principaux résultats et recommandations du PNR 66 dans une forme aisément accessible.

# TABLE DES MATIÈRES

5	Éditorial
6	Partie générale
13	Modification du bois et de la surface du bois
23	Optimisation des panneaux
29	Nanocellulose
35	Recommandations sur les mesures à prendre
37	Bibliographie
40	Le PNR 66 en bref



# ÉDITORIAL



Salle de bains équipée d'un lavabo en bois hydrofuge, voitures plus légères grâce à des éléments en bois sécurisés dans les pièces automobiles, meubles à base de bois ou éléments de construction hybrides entiers tout droit sortis de l'imprimante 3D, mousses et plastiques ou textiles de qualité supérieure à partir de fibres de bois – voilà un échantillon des applications bientôt réalisables grâce au bois, matière première renouvelable aux multiples facettes.

Les acteurs du PNR66 ont délibérément mis l'accent sur le domaine des «Innovations et nouvelles applications dans les matériaux à base de bois», persuadés que des avancées visant à remplacer les matériaux à base de pétrole sont la clé de voûte d'une politique durable en matière de ressources. À cet égard, le bois peut et doit jouer un rôle déterminant. Dans le cadre du PNR66, huit équipes de recherche ont abordé les diverses problématiques liées aux nouvelles applications du bois. Les résultats sont encourageants: la nanocellulose, par exemple, présente un vaste potentiel en tant qu'élément de renforcement de tous types de matériaux composites. Les systèmes de mousses et colles à base de bois offrent également de bonnes perspectives dans la production de panneaux en bois. La modification du bois et les traitements écologiques des surfaces en bois font par ailleurs l'objet de méthodes novatrices.

Toutes ces innovations ne sont toutefois pas prêtes à être mises sur le marché, loin de là. Nombre d'entre elles nécessitent encore des travaux complémentaires conséquents sur le plan du développement des technologies de processus appropriées afin d'être applicables à l'échelle industrielle. Il était toutefois très réjouissant de constater le vif intérêt de certains partenaires commerciaux, extérieurs ou non à l'industrie du bois, pour nos projets de recherche et rencontres de dialogue.

Comment continuer notre avancée dans le domaine des matériaux à base de bois en Suisse? De nombreux éléments nous sont nécessaires dans cette optique: tout d'abord, il faut impérativement poursuivre la recherche dans ce domaine; ensuite, il importe que l'industrie consolide ses partenariats de R&D afin de mettre en place des procédés de fabrication et de transformation compétitifs pour les divers produits; enfin, il serait judicieux de réunir les diverses compétences en une plate-forme commune accessible aux entreprises intéressées. C'est pourquoi nous lançons l'idée d'un centre de recherche et de développement «Innovation Bois Suisse» à l'issue de notre PNR.

En effet, le PNR66 n'est que le début d'un long voyage. Continuons à avancer ensemble! Je tiens à remercier chaleureusement toutes celles et ceux qui ont pris part aux travaux de recherche, aux rencontres de dialogue et à l'élaboration de ce rapport de synthèse.

**Dr Martin Riediker**

Président du comité de direction du PNR66 Ressource bois

# PARTIE GÉNÉRALE

Le bois est le matériau d'avenir par excellence et la Suisse possède les ressources nécessaires pour exploiter pleinement son potentiel économique. Dans le cadre de la plate-forme de dialogue 3 du PNR66 «Innovations et nouvelles applications dans les matériaux à base de bois», la présente synthèse met en lumière les atouts et opportunités, mais énonce aussi clairement les défis à relever pour aller de l'avant.

Dans cette perspective, l'établissement d'un centre de recherche et de développement en Suisse est une étape déterminante si l'on veut assurer un transfert économique réussi de l'innovation dans les matériaux à la réalisation de produits de qualité à base de bois.

En tant que ressource naturelle renouvelable absorbant le CO<sub>2</sub>, le bois joue un rôle capital dans le développement d'une société durable. Issu des arbres, le bois est un matériau qui présente des propriétés très diversifiées. La ressource bois fait partie intégrante d'un grand nombre de matériaux innovants qui sont mis au point et optimisés par la recherche fondamentale. Grâce à ces travaux, l'industrie du bois nationale est en mesure d'élaborer des produits de qualité et de conquérir de nouveaux marchés. C'est ainsi que se crée une nouvelle dynamique dans l'un des plus anciens secteurs économiques implantés en Suisse. Dans la filière bois, les débouchés s'annoncent prometteurs si les résultats du PNR66 sont mis en œuvre.

Le bois est l'une des principales ressources naturelles de la Suisse mais son potentiel demeure encore largement inexploité. Il s'agit d'un matériau durable et très polyvalent une fois transformé et traité. Dans le cadre du PNR66, les équipes de recherche se sont attachées à améliorer les propriétés du bois et à développer des techniques de traitement efficaces: structures en bois massif et en placage, panneaux en bois, mais aussi matériaux fonctionnels à partir de nanocellulose. Grâce aux résultats du PNR66, les entreprises suisses de transformation du bois peuvent élaborer des produits innovants qui sont d'ores et déjà convoités sur le marché et le seront encore à l'avenir. Dans la construction par exemple, elles peuvent ainsi

contribuer à étendre l'utilisation du bois en tirant parti de la grande fiabilité et des propriétés esthétiques de ce matériau. Elles participent également à la fabrication de meubles très légers qui sont de plus en plus prisés par le commerce en ligne. Par ailleurs, les concepts de matériaux innovants ouvrent la voie à d'importants progrès qui sont utiles aux secteurs d'avenir misant sur la protection de l'environnement ou œuvrant dans le domaine des techniques médicales.

Le présent document résume les travaux de recherche menés dans les trois champs thématiques que sont transformations du bois, panneaux en bois et nanocellulose. Les rapports de projet individuels des différents secteurs sont précédés d'une introduction thématique afin de les inscrire dans un contexte. À la fin de chaque bloc thématique, on évaluera l'impact scientifique et économique des travaux de recherche présentés. En conclusion, cette synthèse recommande la mise en place d'un centre de recherche et de développement d'envergure en Suisse. Il s'agit là d'un élément indispensable à l'application économique des innovations au niveau des matériaux pour la création de produits de qualité à base de bois.

## Le bois, matériau d'avenir

Matériau d'avenir par excellence, le bois peut contribuer de manière déterminante à la mise en place d'une société et une économie durables. Si l'on veut bâtir une société pérenne, il est essentiel de mieux exploiter la ressource bois, laquelle fait partie intégrante de notre économie: au départ de la chaîne de valorisation durable des matériaux à base de bois, les arbres absorbent du CO<sub>2</sub> et produisent de l'oxygène, représentant ainsi une ressource renouvelable dont le bilan climatique est positif. Lors de l'utilisation du bois, ce sont les procédés technologiques de pointe déployés pour la transformation et la valorisation du matériau qui jouent un rôle décisif. On peut ainsi remplacer nombre de matériaux dont la fabrication nécessite beaucoup d'énergie à partir des ressources fossiles, mais il faut pour cela que l'économie et la science adoptent une démarche stratégique et ciblée. Si elles y parviennent, on verra l'avènement de l'ère des biomatériaux au XXI<sup>e</sup> siècle.

La ressource naturelle bois offre d'excellentes conditions pour initier ce grand changement dans le domaine des matériaux. C'est effectivement un matériau de construction léger, doté de très bonnes propriétés mécaniques et d'une esthétique naturelle unique. La recherche doit encore progresser dans le développement des matériaux afin d'améliorer les caractéristiques du bois et de permettre ainsi une utilisation encore plus diversifiée et plus moderne d'un point de vue technique. Telle est la vocation du PNR66: encourager des projets qui visent à multiplier les utilisations du bois dans les champs d'application actuels ou à trouver de nouveaux domaines d'application grâce à des combinaisons de matériaux innovantes.

Outre l'amélioration des propriétés du bois, la fiabilité des produits à long terme et une production industrielle aussi simple et écologique que possible revêtent également une grande importance. Les avancées actuelles révolutionnaires en matière d'automatisation de la production présentent un fort potentiel qui pourrait s'avérer utile à l'optimisation des procédés dans le secteur du bois. À cet égard, les matériaux hybrides à base de bois s'imposeront, notamment les associations à base de biopolymères et de minéraux adaptés, ou encore les alliages de matériaux permettant une sépara-

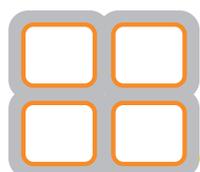
tion facile des composants à la fin de leur cycle d'utilisation. Ces propriétés indispensables à une utilisation en cascade sont la condition sine qua non d'une économie durable.

### Utilisation en cascade – mieux utiliser les matières premières

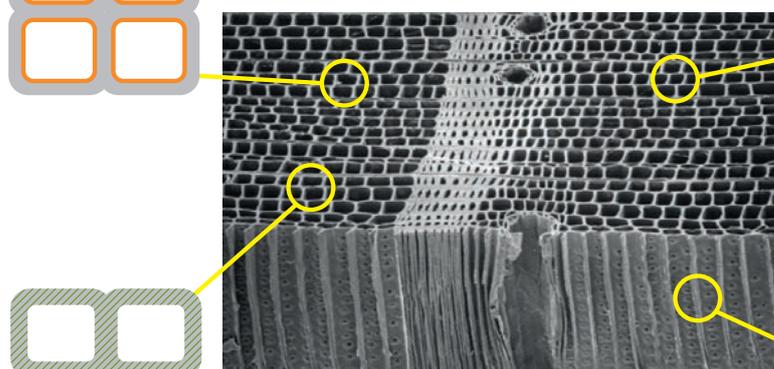
Utiliser puis jeter, c'était monnaie courante dans l'économie d'hier mais ingérable à terme en raison du gaspillage de précieuses ressources. Recycler, revaloriser, réutiliser à plusieurs reprises les composants avant de les incinérer pour produire de l'énergie est un concept que l'on connaît déjà pour le papier, le métal ou le verre qui sont récupérés pour en réutiliser certains éléments. Les équipes de recherche s'efforcent actuellement d'améliorer l'utilisation en cascade du bois, afin qu'il puisse être utilisé dans une société durable.

Dans cette perspective, ses composants doivent d'abord être utilisés aussi longtemps que possible dans divers produits en entrant dans diverses catégories de matériaux en bois: tout d'abord comme produit en bois massif, puis comme panneau d'aggloméré ou de fibres, pour enfin produire de l'énergie via l'incinération du produit en fin de cycle de vie.

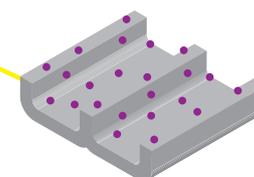
a) « Décoration » de la surface de la paroi cellulaire menant au lumen des cellules



b) Remplissage simple du lumen



c) Modification de la paroi cellulaire



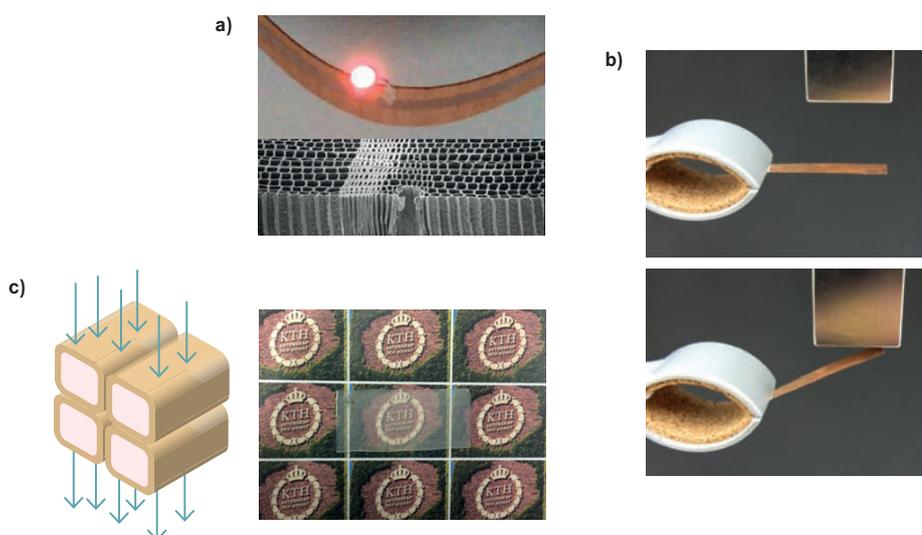
d) Modification de la surface du bois

III. 1 Représentation générale des mesures d'amélioration des propriétés du bois. Les modifications peuvent porter sur divers niveaux de la structure hiérarchique, a) « décoration » de la surface de la paroi cellulaire menant au lumen des cellules, b) remplissage simple du lumen, c) modification de la paroi cellulaire et d) de la surface du bois (remerciements à Etienne Cabane).

En ce qui concerne les produits en bois massif et en placage, la construction en bois dans l'espace urbain constitue à la fois un défi et une opportunité. La construction de logements en bois de plusieurs étages est très à la mode et de nombreuses villes prévoient même de bâtir ainsi de grands immeubles. Actuellement, le projet le plus spectaculaire et visionnaire en la matière est un gratte-ciel de 80 étages sur 300 mètres de hauteur, auquel travaille l'Université de Cambridge pour la City de Londres. Ce concept de tour innovante a vocation à introduire un changement de paradigme dans le bâtiment urbain, avec une construction en bois offrant un nouveau design et de nouvelles possibilités. Or, si l'on veut que la construction en bois s'impose véritablement au XXI<sup>e</sup> siècle, il importe de continuer les recherches afin d'améliorer encore les propriétés du bois. Qu'il s'agisse de stabilité dimensionnelle, de durabilité, de combustibilité ou encore de protection UV, il faut pouvoir utiliser le bois sans mesures structurales de protection supplémentaires. C'est particulièrement le cas pour la sécurité incendie des immeubles à plusieurs étages. À l'heure actuelle, les constructions en bois sont recouvertes de Placoplatre, perdant ainsi de leur esthétique et de leur charme. Par ailleurs, de nombreuses solutions de protection directe du bois impliquant des substances chimiques sont de plus en plus critiquées voire déjà interdites. Il importe donc de pouvoir avoir recours à des méthodes écologiques telles que la minéralisation du bois avec des silicates ou d'autres composés minéraux. Les progrès technologiques en matière de traitement

de surface sont déterminants, car ils confèrent aux bâtiments en bois leur apparence unique sur la durée. Un traitement du bois est donc nécessaire pour le protéger efficacement et durablement des influences météorologiques, notamment des rayons UV ou de l'humidité, tout en préservant l'esthétique de sa surface. L'altération naturelle est perçue comme dérangeante et désagréable à l'œil, constituant souvent une raison de ne pas utiliser le bois; d'où l'importance de faire appel aux progrès fulgurants en nanotechnologie et en sciences des matériaux pour apporter des modifications ciblées au bois et promouvoir ainsi la construction en bois au XXI<sup>e</sup> siècle.

En intérieur aussi, la protection contre la décoloration des surfaces en bois ainsi que la stabilité dimensionnelle sont des thèmes importants. Cela s'applique tout autant aux meubles qu'aux revêtements de sol, aux placages décoratifs dans les avions, bateaux, tramways ou trains, ou encore dans les voitures. Dans les segments haut de gamme, on constate en outre un engouement pour les fonctionnalisations du bois possédant de toutes nouvelles propriétés, telles que la conductivité électrique, la magnétisation ou encore la transparence (Li et al. 2016; Merk et al. 2014; Trey et al. 2012; Wan et al. 2017; Zhu et al. 2016). Elles ouvrent la voie à de nouveaux concepts de matériaux et de design dans le secteur du bois et vont conduire au remplacement des matières synthétiques et des métaux à grande échelle.



III. 2 La fonctionnalisation permet de conférer au bois de nouvelles propriétés telles que a) la conduction électrique (remerciements à Huizhang Guo) ou b) des caractéristiques magnétiques (Merk et al. 2014) et c) optiques (transparence, Li et al. 2016). Cela ouvre la voie à de nouvelles applications de la ressource bois.

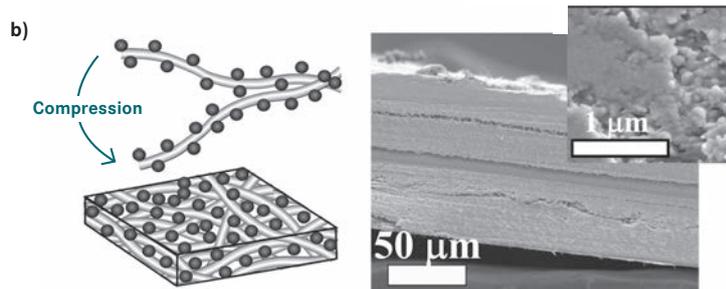
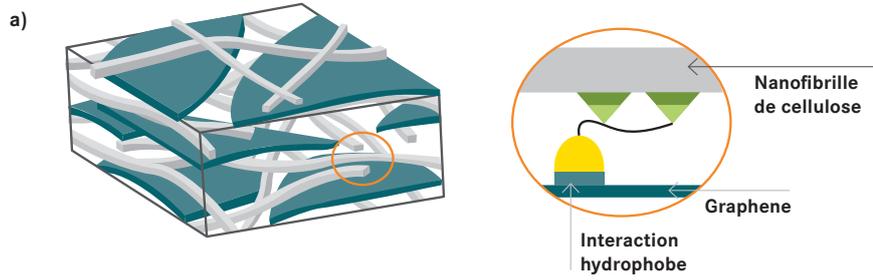


**III. 3** Les matériaux ligneux tels que les copeaux ou fibres de bois peuvent être transformés en panneaux aux structures et propriétés diverses. Images de gauche: panneau OSB et copeaux correspondants; images au centre: panneau traditionnel en aggloméré et copeaux correspondants; images de droite: panneau MDF et fibres correspondantes (remerciements à Heiko Thömen).

La réduction de la densité et de la colle utilisée est décisive pour le développement futur des panneaux. Grâce à l'amélioration de la technique des procédés, les panneaux en bois peuvent gagner en légèreté. L'utilisation de moins de matériaux permet de réaliser des économies et de mettre au point de nouveaux concepts et produits, notamment dans la fabrication de meubles, dans le domaine des emballages et dans la construction automobile. L'utilisation de colle pour l'assemblage des panneaux constitue un autre aspect important à considérer. Il faut avoir à l'esprit qu'à terme, on n'utilisera plus de panneaux en bois agglomérés avec des colles contenant du formaldéhyde, et que les autres produits adhésifs synthétiques seront aussi remis en question à l'avenir. On peut les remplacer par des biocolles, qui doivent toutefois encore être caractérisées de manière approfondie et optimisées pour l'utilisation spécifique en milieu sec et humide afin de répondre aux normes actuelles.

Les composants structurels et chimiques isolés en bois présentent également un riche potentiel. Ils sont dotés de propriétés fonctionnelles spécifiques et employés dans des produits haut de gamme. À l'heure actuelle, dans ce domaine, la fonctionnalisation de la nanocellulose est clairement au premier plan. On privilégie des procédés de transformation relativement simples et en partie à base d'eau (oxydation, acétylation, silanisation), car ils sont déjà bien connus dans l'industrie. Dans le

domaine des techniques d'isolation, de transformation et de déshydratation ou d'association avec d'autres matériaux, d'importants progrès ont été réalisés qui devraient conduire à de nouveaux profils de propriétés et concepts de matériaux, et ainsi à de nouvelles possibilités d'application. Les processus nécessaires de croissance dans ce domaine bénéficient des avancées rapides dans l'impression en 3D, dans le cadre de laquelle on utilise de plus en plus de biopolymères issus du bois. La généralisation de leur utilisation dans des procédés de fabrication modernes permettra l'avènement d'une nouvelle génération de matériaux à base de bois.



**III. 4** La fonctionnalisation et l'impression en 3D de la nanocellulose permettent de créer de nouveaux matériaux et donc de nouveaux champs d'application. On peut notamment citer a) les hybrides nanocellulose-graphite (après Laaksonen et al. 2011), b) le nanopapier magnétique (Olsson et al. 2010), c) les éponges hydrofuges absorbant le pétrole (remerciements à Tanja Zimmermann), et d) les structures à base de cellulose destinées au domaine biomédical (Markstedt et al. 2015).

## Situation actuelle et défis posés à la recherche dans le domaine du bois en Suisse

En Suisse, la recherche axée sur le bois et les matériaux à base de bois est réalisée dans les hautes écoles et dans diverses entreprises de l'industrie du bois. Dans le milieu académique, les sites de recherche sont nombreux, tels que l'EPF Zurich, l'Empa ou encore la Haute école spécialisée de Bienne pour ne citer que les plus grandes unités.

Des activités déterminantes axées sur des problématiques spécifiques sont menées à l'Université de Fribourg (Institut Adolphe Merkle), à l'EPFL ainsi qu'à l'Université de Bâle. La Haute école spécialisée de Bienne est toutefois la seule à proposer un cursus en technique du bois (bachelor: technique du bois; master: wood technology). Contrairement à ses voisins autrichiens et allemands, la Suisse ne possède aucun programme universitaire spécifique sur le bois.

À défaut, le regroupement des activités scientifiques dans le cadre du PNR66 a permis d'améliorer la visibilité de la recherche suisse sur le bois à l'échelle mondiale et de tisser un réseau international de relations. Ce dernier peut contribuer à augmenter la visibilité de ce thème de recherche, sans quoi il risque d'être marginalisé sur la scène scientifique mondiale, étant donné que la taille de la communauté scientifique devient un facteur de plus en plus déterminant pour des publications fructueuses. Si l'on veut accroître l'intérêt pour le bois, il est indispensable de multiplier les coopérations avec d'autres disciplines scientifiques et d'enthousiasmer de nombreux talents issus d'autres milieux pour la recherche sur le bois. Il importe en outre de mieux ancrer le thème du bois dans des domaines scientifiques plus vastes tels que la chimie ou la science des matériaux.

Par ailleurs, le réseau thématique national S-WIN, soutenu par la CTI, constitue une excellente plateforme pour créer des passerelles entre les sciences, l'économie et la politique dans le domaine du bois. De cette manière, on arrive plus rapidement à de nouveaux développements de matériaux, innovations et définitions de problématiques. Grâce à S-WIN, on travaille actuellement à l'élaboration d'une Feuille de route 2030 qui intégrera directement les résultats du PNR66. Elle constitue la base d'un accord formel entre les milieux scientifiques, économiques et le secteur public, en vue d'accorder au bois l'importance nécessaire dans ces trois domaines. Cela commence bien sûr par la forma-

tion universitaire et professionnelle, pour ensuite continuer dans la recherche, la formation et l'application économique. À cet égard, les associations telles que Lignum, Holzbau Schweiz ou encore Industrie du bois suisse jouent un rôle déterminant, car elles favorisent le développement de réseaux, mettent à disposition des informations importantes sur le thème du bois et assument un rôle de coordination et de représentation des intérêts pour les entreprises du secteur du bois.

La Confédération et les cantons considèrent les impératifs économiques liés au bois dans l'optique de la composition des forêts et de l'exploitation efficace et durable des ressources, en plus du renforcement du site économique. L'encouragement de projets de la part de la Confédération est aussi axé dans cette direction (p. ex. OFEV: plan d'action bois, fonds pour les recherches forestières et l'utilisation du bois). L'objectif est d'exploiter le potentiel renouvelable du bois brut et de favoriser sa valorisation matérielle. Dans ce cadre, on met l'accent sur la valorisation des feuillus, dont la part continuera d'augmenter dans les forêts suisses.

La transition vers les feuillus représente un grand défi tant au niveau économique que scientifique, car, compte tenu des propriétés de ce type de bois et des processus optimisés jusqu'ici pour la transformation des résineux, il ne peut pas être intégré tel quel dans la chaîne de valorisation actuelle.

Comme la composition des forêts suisses change, il importe de prendre les devants. Il est essentiel de choisir des approches qui exploitent tout le potentiel de l'essence concernée, en particulier pour l'utilisation du hêtre comme matière première.

### Bois de feuillus – la forêt change

Dans les forêts suisses, la part de feuillus est en constante augmentation. Il y a surtout bien plus de hêtres qu'il y a encore quelques années. Selon les estimations des experts, cette tendance devrait perdurer au cours des 60 prochaines années avant que la population de hêtres ne commence à décliner en raison du réchauffement climatique. Ils seront alors remplacés par d'autres essences de feuillus mieux adaptés aux nouvelles conditions climatiques, comme le chêne, l'érable ou encore le peuplier. Pour l'économie du bois, la recrudescence de feuillus représente un vrai défi, car leur transformation reste actuellement plus complexe que celle des résineux. Au cours des prochaines décennies, il faudra donc trouver des solutions économiquement viables pour utiliser judicieusement le bois de feuillus. (<http://www.wsl.ch/lud/portree/download.ehtml>)

Dans leurs activités de recherche, les scientifiques et les entreprises suisses se concentrent sur certains thèmes spécifiques, car il n'est guère judicieux de concurrencer d'autres pays en examinant tous les domaines de recherche et d'exploitation du bois. Cette focalisation est d'autant plus pertinente que les entreprises actives dans le secteur de la construction en bois et les scieries sont généralement de petite taille dans notre pays. Les panneaux en placage déroulé, en fibres et en aggloméré ainsi que la fabrication de revêtements de sol en bois constituent d'autres champs d'activité économique. Autre secteur très représenté dans l'économie suisse: l'élaboration et la production de colles ainsi que l'enduction, étroitement liée aux entreprises du bois en particulier dans la construction.

Quelques projets phare menés à la convergence des domaines scientifiques et économiques ont récemment révélé les avantages écologiques et matériels qu'offre le bois. Le NEST Modul Vision Wood et l'ETH House of Natural Resources en sont deux exemples éloquentes.

Les entreprises n'investissent dans la fabrication de nouveaux matériaux à base de bois que si ceux-ci offrent un réel potentiel de marché. En effet, l'établissement de nouveaux procédés technologiques de pointe dans les entreprises du secteur du bois nécessite d'importants investissements, qui ne peuvent être réalisés qu'avec la garantie préalable d'une application industrielle. Or, cette preuve ne

peut être apportée que de façon conditionnelle aujourd'hui en Suisse; c'est là le problème essentiel que l'on rencontre au niveau du transfert économique des innovations dans le secteur des matériaux, d'où la recommandation centrale présentée en conclusion à cette synthèse, visant l'établissement d'un centre de recherche et développement de grande envergure en Suisse.

### Les projets de recherche

La partie consacrée aux projets de recherche est divisée en trois grands blocs thématiques.

- Modifications du bois (matériau et surface)
- Optimisation des panneaux (densité et colle)
- Nanocellulose (nanofibrilles de cellulose et nanocristaux de cellulose)

Les points forts des travaux de recherche sont définis pour chaque bloc thématique.



III. 5 Deux projets phare ayant permis de tester les modifications du matériau dans des conditions réelles: (à gauche) le module « Vision Wood » du bâtiment expérimental NEST à l'Empa, Dübendorf, et (à droite) le bâtiment expérimental de l'EPFZ « House of Natural Resources » sur le campus Höggerberg.

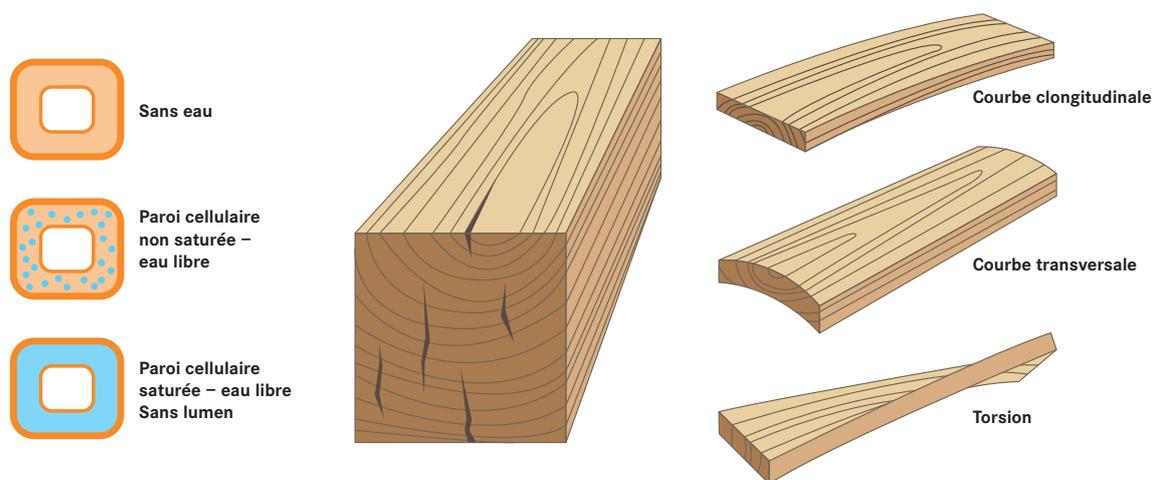
# MODIFICATION DU BOIS ET DE LA SURFACE DU BOIS

**Des procédés physiques, chimiques ou biologiques permettent d'améliorer de manière ciblée les propriétés matérielles du bois et d'ainsi multiplier les applications possibles – voilà l'approche adoptée dans le large domaine de recherche des modifications du bois. Les démarches sont axées sur une amélioration de la stabilité dimensionnelle et de la durabilité, mais aussi sur un renforcement des surfaces des produits en bois.**

## Contexte scientifique et aspects économiques

Les modifications du bois visent essentiellement à changer les propriétés de la matière pour lesquelles une amélioration fondamentale est nécessaire en vue d'une utilisation plus intensive du matériau final. Cette démarche porte en particulier sur la capacité de dilatation et de contraction, la durabilité, l'inflammabilité et les caractéristiques de la surface du bois quant à la résistance aux rayons UV et à l'eau.

Au cours des dernières décennies, les équipes de recherche se sont attachées à améliorer la stabilité dimensionnelle du bois, ce qui a permis de mettre en œuvre quelques procédés à des fins commerciales. Il s'agit notamment du traitement thermique ainsi que de la modification chimique, dont l'acétylation en premier lieu (Fuchs 1928; Hill 2006; Kumar 1994; Militz 1991; Pfeffer et al. 2012; Rowell 2006; Tarkow 1949; Tarkow et al. 1946; Tjeerdsma et al. 1998).



**III. 6** Le bois étant hygroscopique, la pénétration d'eau dans la paroi de la cellule ligneuse jusqu'au point de saturation des fibres entraîne une dilatation suivie d'une contraction lorsque la matière est sèche. C'est ainsi que le bois régule son taux d'humidité. Or, comme le bois gonfle et se rétracte plus ou moins fortement (anisotropie), des déformations et fissures peuvent apparaître. Déformations dans la figure à droite; dessins retravaillés (Original : Edition Europa Lehrmittel).

## L'acétylation rend le bois plus stable et plus durable

Un procédé relativement simple permet de bloquer, dans la paroi cellulaire de bois, les groupes hydroxyles responsables de l'absorption d'humidité et, partant, de la dilatation et de la contraction du bois. Résultat de longues années de recherche et de développement, le bois Accoya® a été mis au point en particulier pour un usage en extérieur. L'acétylation réalisée dans des conditions techniques optimisées donne un bois de haute qualité, très stable et durable.

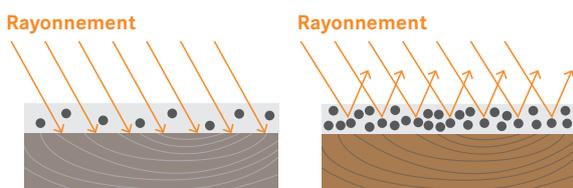
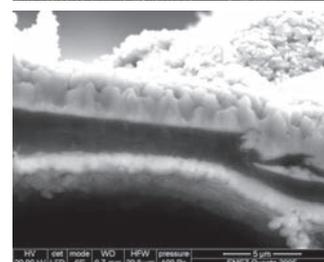
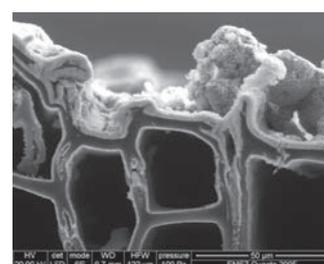
<http://www.neueholzbau.ch/fr/produkte/accoya/>

On peut également améliorer la durabilité du matériau en ayant recours à certaines substances toxiques pour les champignons et les insectes (Stirling et Temiz 2014). Cette méthode de protection chimique a fait l'objet de nombreuses recherches et d'une bonne commercialisation, mais elle est de plus en plus critiquée du fait de la toxicité des substances employées et du problème de leur élimination. Depuis peu, les nano- et microparticules de cuivre, regroupées sous le terme de «cuivre micronisé», sont de plus en plus utilisées pour la protection du bois (Civardi et al. 2016). Il existe également des approches très prometteuses utilisant des antagonistes naturels pour prévenir l'apparition de champignons et, ce faisant, renoncer aux mesures conventionnelles de protection du bois (Ribera et al. 2017).

L'un des problèmes les plus urgents en matière de traitement du bois demeure la protection de la sur-

face du bois contre le rayonnement UV et les intempéries. Un revêtement qui, à défaut d'empêcher l'altération de la couleur sur une longue durée, la réduit considérablement est actuellement à l'étude. Les enduits pour le bois comportent généralement des éléments organiques (HALS) ou inorganiques (particules ZnO et TiO<sub>2</sub>) d'absorption des UV (Allen et al. 2002; Evans et al. 2013; Forsthuber and Grull 2010; Grüneberger et al. 2015; Salla et al. 2012). Divers travaux de recherche fondamentale publiés récemment proposent des méthodes de protection contre les UV au moyen de structures d'oxyde métallique ou d'enduits directement appliqués sur la surface, permettant de préserver en grande partie les propriétés esthétiques du bois (Fu et al. 2015; Guo et al. 2016; Yao et al. 2016). Une autre approche consiste à éliminer préalablement la lignine, qui résiste mal aux UV, à la surface du bois. Le bois grisaille mais sa couleur demeure nettement plus stable (entreprise Schilliger, produit biood®). Les scientifiques cherchent à savoir si la surface appauvrie en lignine peut être stabilisée mécaniquement.

Le secteur économique s'intéresse largement aux nouveaux matériaux à base de bois, car la construction en milieu urbain a besoin d'un matériau très fiable et extrêmement performant. Par ailleurs, multiplier les domaines d'applications du bois peut mener à la conquête de nouveaux marchés, tels que la construction automobile ou l'équipement intérieur des avions. Voilà un aspect qui promet une augmentation significative de la création de valeur ajoutée dans le secteur du bois.



III. 7 Une surface en bois non protégée se décolore sous l'effet de la lumière ou du rayonnement UV. Cela concerne aussi bien l'usage intérieur qu'extérieur, mais l'eau représente un facteur supplémentaire affectant l'apparence du bois en extérieur. L'application de vernis contenant des agents organiques ou inorganiques (à base d'oxydes métalliques) d'absorption des UV permet de réduire considérablement la décoloration (remerciements à Wolfram Selter, Bossard + Co. SA; Guo et al. 2016).

## Projets sur la modification du bois

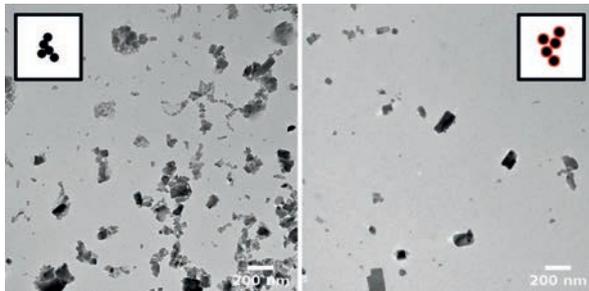
### La nanotechnologie au service de la conservation du bois

Alke Fink (Institut Adolphe Merkle, Université de Fribourg),  
Thomas Volkmer, Bernard Grobéty et Barbara Rothen-Rutishauser

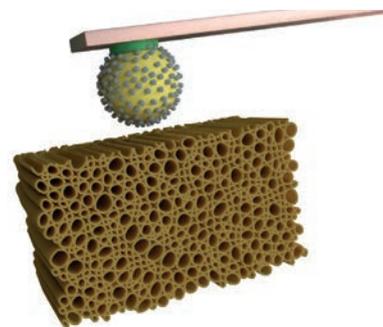
Le projet d'Alke Fink et de son équipe visait à mieux comprendre les principes élémentaires de dépôt de nanoparticules dans la structure du bois, menant à d'importantes découvertes sur leur utilisation pour la protection de ce matériau. Les scientifiques ont donc élaboré des nanoparticules modèles dont ils ont imprégné le bois, étudiant alors en détail le dépôt et le schéma de répartition des nanoparticules dans les structures du bois grâce à diverses méthodes de caractérisation. L'un des axes de recherche portait sur les propriétés des nanoparticules et sur leur interaction avec la structure du bois. Partant de la connaissance précise de cette interaction et des processus qui entrent en compte dans l'imprégnation du bois, on devrait parvenir à créer de meilleures conditions pour optimiser les systèmes existants et mettre au point de nouveaux moyens pour protéger le bois à l'aide de nanoparticules.

Il est possible d'améliorer la durabilité du bois en recourant à des composés biocides organiques ou inorganiques, lesquels freinent voire empêchent, dans le meilleur des cas, la dégradation du bois par des champignons ou des insectes. Toutefois, le bois libère en partie ces substances au fil du temps, ce qui présente un grand danger pour l'environnement et réduit par ailleurs la protection.

Ainsi, l'objectif de la recherche est de mettre au point des moyens de protection du bois à la fois très efficaces et aussi peu polluants que possible. À cet égard, les nanoparticules peuvent jouer un rôle déterminant du fait de leurs propriétés de surface spécifiques et de leur potentiel de fonctionnalisation. Aujourd'hui déjà, certains produits de protection de ce genre sont utilisés, notamment le cuivre micronisé, qui comporte toute une gamme de particules de tailles variées et une part importante de nanoparticules. L'analyse approfondie d'échantillons de cuivre micronisé au microscope a révélé que les particules ne sont pas réparties de façon homogène, rendant impossible la caractérisation de la répartition des particules selon leur taille. L'étude de la répartition des tailles et de la forme des particules a pu voir le jour grâce à un nouveau



III. 8a Comparaison de clichés pris au microscope électronique à transmission de particules avec et sans albumine de sérum bovin pour une analyse simplifiée des nanoparticules.



III. 8b Représentation schématique d'une bille de polystyrène recouverte de nanoparticules de dioxyde de silicium et fixée sur un levier AFM sans pointe. Le schéma présente le principe de mesure de l'interaction de surface des nanoparticules avec un échantillon de bois.



III. 8c Analyse de la répartition des nanoparticules dans le bois de pin à l'aide d'un spectroscope à rayons X à dispersion d'énergie. Les nanoparticules de dioxyde de silicium se trouvent dans les zones colorées en rose.

procédé ayant recours à l'albumine bovine. Cette méthode convient à l'analyse des produits de protection du bois à base de particules et trouve un écho favorable au sein de la communauté de recherche sur les nanoparticules.

Au début du projet, diverses nanoparticules modèles ont été élaborées : celles-ci se distinguent clairement par leur taille et leur composition chimique de surface. Des échantillons de bois ont été imprégnés de ces nanoparticules modèles pour étudier l'interaction entre les particules et la structure du bois. Pour ce faire, des méthodes de caractérisation à haute résolution ont été employées. Le recours à la diffusion Raman exaltée de surface a mis en évidence de façon très précise le dépôt de très faibles quantités de nanoparticules modèles. Par conséquent, cette méthode optimisée pour la caractérisation du bois peut servir à étudier l'imprégnation du bois avec des produits de protection comportant des nanoparticules métalliques comme le cuivre.

Une deuxième approche de recherche a consisté à imprégner le bois de nanoparticules de différentes tailles à titre de comparaison. On a ainsi pu montrer qu'une particule inférieure à 100 nm a une influence sur la quantité d'imprégnation visée. Les recherches ont en outre mené à l'identification d'un seuil supérieur pour l'imprégnation de nanoparticules dans le bois de feuillus et de résineux.

Une troisième étude sur la protection chimique du bois a abordé l'interaction de nanoparticules présentant diverses propriétés de surface avec la paroi cellulaire du bois. Des mesures réalisées à l'aide d'un microscope à force atomique ont permis de déterminer la force d'adhérence des nanoparticules à la paroi cellulaire du bois, remplaçant ainsi des expériences de lixiviation très chronophages mais néanmoins très courantes actuellement.

Sur la base de ces résultats, il est désormais possible de caractériser de façon précise et rapide les nanoparticules potentiellement utilisables pour la protection du bois. On peut déterminer la profondeur d'imprégnation exacte ainsi qu'adapter et optimiser en conséquence la taille, la répartition des tailles et les propriétés de surface des nanoparticules. Cela facilitera la recherche fondamentale, conduite par les chercheurs et les entreprises, sur les produits de protection à base de nanoparticules et sur leur interaction avec la structure du bois.

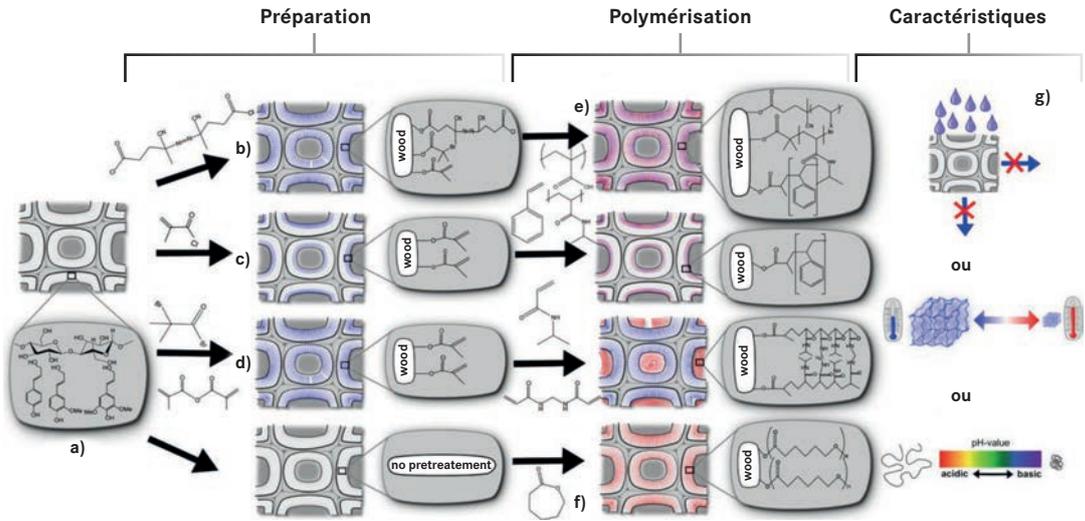
## Profils de propriétés du bois améliorés pour les ouvrages en bois

Ingo Burgert (EPFZ et Empa), Hans Jürgen Herrmann, Falk Wittel, Emanuela DelGado

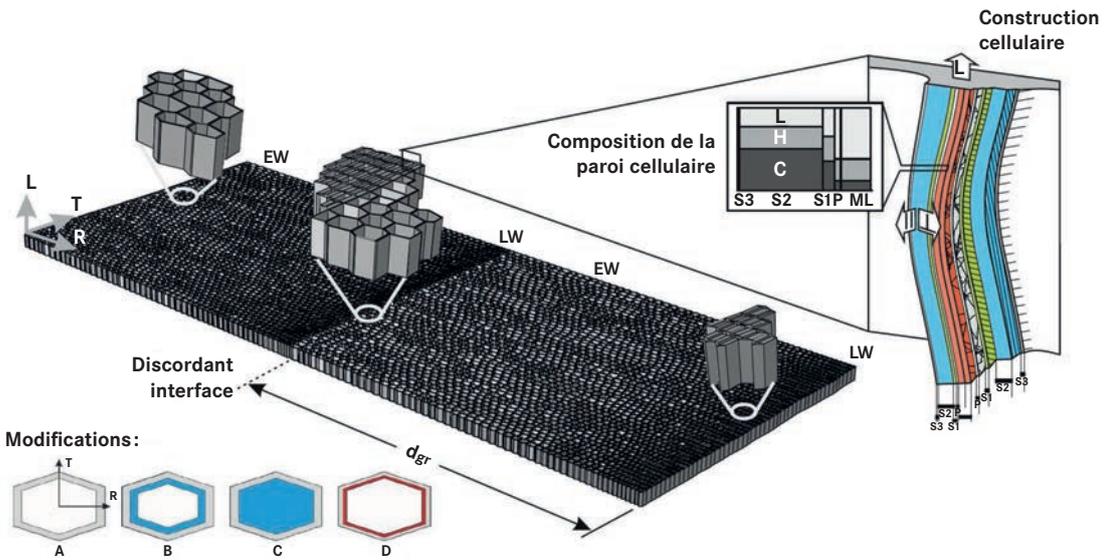
Ce projet avait pour objectif de développer des méthodes novatrices de modification et de fonctionnalisation pour améliorer les propriétés du bois et lui en conférer de nouvelles. Cette démarche poursuit l'idée suivante : au lieu de chercher à rendre le bois aussi « inerte » que possible en neutralisant chimiquement les groupes hydroxyles favorisant la rétention d'eau, utiliser au contraire ces groupes chimiques pour une fonctionnalisation ciblée du bois. Les méthodes de modification ont ainsi vocation à être aussi modulaires que possible, c'est-à-dire qu'elles permettent l'association de monomères dotés de diverses propriétés chimiques grâce à un processus de polymérisation in situ à deux étapes, générant ainsi divers profils de propriétés lors de la modification du bois.

Dans le cadre de ce projet, l'équipe de recherche a mis au point des méthodes de polymérisation modulaire in situ dans la cellule et la paroi cellulaire du bois. La première étape a consisté à établir des liaisons covalentes au niveau des groupes hydroxyles du bois avec, notamment, un initiateur de polymérisation radicalaire et les précurseurs moléculaires bifonctionnels que sont l'anhydride d'acide méthacrylique et le chlorure de méthacryloyle. On peut alors ancrer dans la paroi cellulaire des polymères hydrophobes tels que le styrène mais aussi des systèmes de polymères « capables de répondre à un stimulus ». Autre axe méthodologique central du projet : la caractérisation du bois ainsi modifié pour évaluer la réussite de la modification de manière aussi précise que possible. À cette fin, la microscopie Raman a été largement utilisée pour révéler le dépôt et la répartition des substances chimiques dans la paroi des cellules. En parallèle, des mesures de l'évolution de l'interaction bois-eau ont été réalisées.

Les polymérisations in situ ainsi effectuées ont réduit nettement l'absorption d'eau et amélioré la stabilité du bois. La modularité de l'approche a également permis de rendre le bois réactif aux variations de température grâce à l'ajout d'un polymère « capable de répondre à un stimulus », c'est-à-dire de modifier son hygroscopicité de manière ciblée. Les scientifiques sont en outre parvenus à contrôler la répartition des polymères dans la paroi cellulaire grâce à diverses réactions cinétiques, de façon à pouvoir travailler avec des schémas de répartition spécifiques aux propriétés et applications.



III. 9a Schéma des stratégies de modifications modulaires à l'aide de polymères – a) groupes hydroxyles propres au bois, b) intégration d'initiateurs de polymérisation aux groupes hydroxyles, c) réaction des groupes hydroxyles associés au chlorure de méthacryloyle, d) réaction des groupes hydroxyles associés à l'anhydride d'acide méthacrylique, e) polymérisation in-situ de divers monomères tels que le styrène, l'acide méthacrylique et le N-isopropylacrylamide, f) polymérisation par ouverture de cycle de l' $\epsilon$ -caprolactone, g) propriétés possibles du bois modifié: stabilité dimensionnelle accrue ou réactivité à la température et au pH par exemple (Burgert et al. 2016).



III. 9b Modèle de bois hiérarchisé avec bois initial (EW) et bois tardif (LW), constitution des parois cellulaires avec couche intercellulaire (ML), parois cellulaires primaires (P) et secondaires (S1-S3), et leur composition chimique faite de lignine (L), d'hémicellulose (H) et de cellulose (C). On observe les trois modifications génériques des couches de la paroi cellulaire (B), le remplissage du lumen (C) et la modification de la couche S2 (D).

Les activités expérimentales ont été complétées par une modélisation des propriétés des matériaux modifiés grâce à un système hiérarchique à plusieurs échelles pour le bois d'épicéa. Cette modélisation a permis de simuler les effets des modifications sur les propriétés physiques du bois à diverses échelles. L'analyse prend en compte la surface des anneaux de croissance sous la forme d'éléments de volume représentatifs (EVR). Avec ce système, les échantillons peuvent faire l'objet de simulations par ordinateur pour tester leur résistance à la traction, à la pression, au cisaillement et à la dilatation en fonction du type de modification. Les changements les plus nets des propriétés mécaniques se révèlent dans l'étude des paramètres des composantes de poussée. La modélisation a ainsi permis de comprendre les transformations des propriétés inhérentes à la modification et d'effectuer des simulations à grande échelle. Cela permet d'étendre les modifications de manière ciblée, ce qui a été réalisé pour des placages à l'aide d'un réacteur expérimental.

Ces travaux de recherche offrent de nouvelles opportunités de développement des matériaux fonctionnels à base de bois. Des modifications ciblées des placages pour améliorer le profil de propriétés présentent un intérêt pratique, notamment pour des applications dans les matériaux de décoration d'intérieur utilisés dans les voitures, les yachts ou encore les avions. Pour l'instant, les méthodes mises au point nécessitent encore l'emploi de solvants organiques, ce qui va à l'encontre d'une application dans des produits innovants à base de bois. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour étudier comment rendre les procédés de modification plus écologiques à l'avenir.

## Projets sur la modification de la surface

### Autoprotection contre les UV des surfaces de bois grâce aux fibres de cellulose

Thomas Volkmer (Haute école spécialisée bernoise BFH),  
Martin Arnold, Francis W. M. R. Schwarze

La couleur et la qualité de la surface du bois changent lorsque le matériau est utilisé en extérieur. Le rayonnement UV entraîne une détérioration de la lignine, qui est ensuite lessivée par la pluie, ce qui donne à la surface une couleur grisée. La présence de champignons et les dépôts de poussière dans la couche de surface restante, où prédomine la cellulose, peuvent alors engendrer des traces sombres et souvent très irrégulières. Le bois perd ainsi tout son attrait esthétique tel qu'on le conçoit aujourd'hui. Appliquer un vernis de protection du bois ne représente pas une solution durable puisque les polymères se décomposent au bout d'un certain temps sous l'effet des ultraviolets, la couche protectrice s'écaille et on doit finalement recommencer. À cause de cela, l'entretien des façades en bois est fastidieux et coûteux. L'idée de Thomas Volkmer et son équipe est donc la suivante : constituer une couche riche en cellulose de bois à la surface, ce qui préviendra une dégradation photochimique du matériau et évitera ainsi de devoir recourir à d'autres systèmes de protection contre les UV. Grâce à cette couche protectrice naturelle, on stoppe l'altération du bois due aux intempéries. Dans le cadre de ce projet, l'équipe de recherche s'est penchée sur les moyens de stabiliser cette couche protectrice. L'objectif était ainsi de maintenir la couleur et l'homogénéité originelle de la surface du bois sur une durée de 20 à 30 ans. Cette solution pourrait améliorer la compétitivité du bois face aux autres matériaux sur le plan du coût du cycle de vie, et favoriser l'utilisation d'épicéa et de mélèze comme éléments de façade.

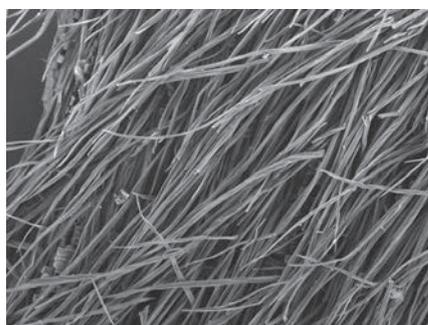
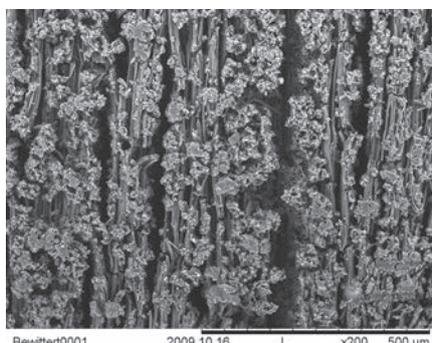
L'équipe a ensuite mis au point des techniques de délignification de la couche supérieure du bois. Cette étape consiste à extraire la lignine, ne laissant à la surface qu'une couche de fibres riche en cellulose et protégeant les couches inférieures des rayonnements UV. En effet, les fibres de cellulose reflètent la lumière et protègent le bois en profondeur. Les chercheurs ont ainsi testé trois méthodes de délignification de la surface : a) décomposition photochimique de la surface lors du processus naturel ou artificiel d'altération par les intempéries ; b) décomposition chimique de la lignine ; ou c) champignons causant, du fait d'enzymes correspondantes, une délignification biologique.

Les caractéristiques de la délignification et le paramètre d'une optimisation du procédé ont été pris en compte dans les séries d'essais. L'examen des modifications chimiques inhérentes à la décomposition de la lignine a été réalisé via des mesures spectrales IRTF à intervalles déterminés et à différentes profondeurs. Par ailleurs, des tests micromécaniques ont permis d'évaluer la perte de résistance mécanique des couches proches de la surface. On a pu déterminer l'énergie de surface et la rugosité en mesurant l'angle de contact, c'est-à-dire le profil de rugosité. L'analyse des paramètres esthétiques tels que la couleur et la brillance a été réalisée à l'aide de colorimètres à diverses durées d'altération par les intempéries.

La deuxième phase du projet a consisté à étudier des méthodes envisageables pour la stabilisation mécanique de la surface ainsi modifiée. Il s'agit d'une étape nécessaire, car la surface délignifiée protège certes du rayonnement UV, mais elle est mécaniquement instable et fortement hygroscopique, ce qui favorise l'apparition de champignons.

Par conséquent, la protection contre l'eau constitue une priorité en matière de stabilisation de la surface, ce qui devrait pouvoir être accompli grâce à l'utilisation de différents polymères en premier lieu. Les chercheurs ont utilisé ici des systèmes acryliques ainsi que des huiles naturelles et synthétiques et des substances fonctionnalisantes. La stabilisation de la surface peut parfaitement s'effectuer au moyen d'une dispersion acrylique pure, sans qu'il soit nécessaire de recourir à des additifs spéciaux pour la protection UV.

La mise en œuvre de cette technique à l'échelle industrielle représenterait une grande avancée et ouvrirait la voie à une utilisation accrue du bois en extérieur. Le problème de l'aspect disgracieux inhérent à l'effet délétère des intempéries ne se poserait plus, et il n'y aurait donc plus aucun obstacle à la multiplication des applications. Cette approche est actuellement en cours d'étude dans le cadre d'un projet industriel abordant l'optimisation des étapes évoquées (délignification, stabilisation) en vue d'une application dans l'industrie.



**III. 10a** Cliché au microscope électronique à balayage d'un échantillon de robinier après plusieurs années d'exposition aux intempéries (exposition à l'ouest). La lignine des couches intercellulaires est complètement dégradée et la surface est couverte de particules de poussière et de spores (à gauche). Après nettoyage de l'échantillon, il reste une couche de fibres ligneuses au niveau de la surface (à droite).



**III. 10b** Altération d'échantillons de résineux suite aux intempéries au cours d'une année avec exposition sud et inclinaison à 45°. La partie inférieure des échantillons a été nettoyée, ce qui donne une surface délignifiée et homogène.

## Traitement des surfaces en bois à l'aide de photo-initiateurs

### Traitement des surfaces en bois à l'aide de photo-initiateurs

Grütmacher Hansjörg (EPFZ), Tanja Zimmermann, Martin Arnold

Pour appliquer un revêtement sur du bois massif et des particules de bois ou les coller à d'autres matériaux, il est préférable que les surfaces impliquées présentent une réactivité chimique élevée. Dans le cadre de ce projet, les chercheuses et les chercheurs ont développé à cet effet des méthodes inédites de photoactivation des surfaces en bois ; ils ont ainsi lié de nouveaux groupes fonctionnels aux surfaces en bois pour les rendre plus réactives à la lumière et leur conférer de nouvelles propriétés, ce qui facilite le revêtement ou l'association à d'autres matériaux.

Les travaux de recherche de ce projet étaient axés sur les traitements de surface de deux matériaux lignocellulosiques distincts : les nanofibres de cellulose (NFC), composantes structurales du bois de type fibreux, et les surfaces de bois massif à l'état naturel. Les différents types de surfaces ainsi que les divers champs d'application des deux matériaux ont permis aux scientifiques d'étudier différentes stratégies de modification. Le traitement des NFC visait à mieux coordonner les propriétés des surfaces entre elles, par exemple pour renforcer leur adhérence ou mieux les intégrer dans les matrices polymères des matériaux composites.

Deux procédés de production photochimique de matériaux composites à partir de composants de cellulose et de polymères organiques ont été développés avec succès. Le premier consistait à améliorer les propriétés des nanofibrilles de cellulose grâce à l'acryloyle. Après oxydation au peroxyde d'hydrogène, des groupes photoactifs se sont formés à la surface de la nanocellulose, constituant le socle de la polymérisation des monomères à la surface. Le second procédé de production consistait à produire des polymères photoactifs pour ensuite les lier aux groupes hydroxyles à la surface de la nanocellulose. Les deux procédés ont permis une augmentation de 400% de la polymérisation du méthacrylate de méthyle (MMA). Ces résultats ont ainsi ouvert la voie à la fabrication ciblée et à l'étude d'autres matériaux composites, permettant par ailleurs d'adapter la réactivité ou la fonctionnalité des surfaces en bois aux besoins. Les modifications de surface de ce type présentent un fort potentiel d'innovation et sont particulièrement im-

portantes pour les applications haut de gamme à base de bois, telles que les revêtements extérieurs, les matériaux utilisés dans la construction ou encore les matériaux composites bois-polymère.

## Synthèse des projets : conséquences et potentiel d'application

Les projets conduits sur le thème de la modification du bois et de sa surface ont permis d'importants progrès en vue de revaloriser l'utilisation de la ressource bois. Étant donné que tous les projets de ce domaine thématique visaient à établir une base de connaissances, des recherches complémentaires sont nécessaires en vue d'une mise en œuvre technologique, l'objectif étant d'atteindre des niveaux de maturité technologique (TRL) situés autour de 3 ou 4 à la fin du programme d'encouragement.

Le futur développement scientifique et commercial de ce thème sera fortement marqué par d'autres avancées dans les domaines des nanotechnologies et de la chimie des matériaux. Celles-ci permettront de continuer à améliorer les profils de propriétés du bois et faciliteront une application à grande échelle.

À l'avenir, il faudra que les systèmes de nanoparticules puissent être mieux contrôlés et ajustés quant à la taille, la répartition des tailles et la fonctionnalité, afin de répondre de façon plus précise aux exigences en matière de protection du bois. À cet égard, il importe de prendre en compte les aspects liés à l'environnement, au recyclage et à la santé, tout particulièrement quand il s'agit d'utiliser des nanoparticules. Divers projets ont d'ailleurs été réalisés dans le cadre du PNR64 « Opportunités et risques des nanomatériaux ».

Les modifications de la paroi cellulaire permettront l'apport de diverses fonctionnalités et pourront être encore améliorées du point de vue des procédés techniques, tout particulièrement en vue d'abandonner le recours aux solvants organiques qui font obstacle à une généralisation de ces méthodes. En ce qui concerne la modification de la surface, la recherche fondamentale s'attachera à intégrer de nouveaux polymères fonctionnels à la surface du bois, afin d'améliorer la stabilité aux ultraviolets ou permettre de contrôler de manière ciblée l'interaction de la surface avec divers liquides. À cet égard, il importera que les modifications soient assez robustes du point de vue aussi bien chimique que mécanique, afin de répondre dura-

blement aux exigences élevées en matière d'application.

Outre les développements additionnels dans la synthèse des matériaux, des progrès déterminants seront réalisés sur le bois en tant que matériau et sa caractérisation. À l'avenir, le génie biologique et les modifications génétiques permettront d'améliorer encore les propriétés du bois : il sera plus facile d'en extraire la lignine mais aussi de préparer une utilisation ciblée des champignons ou des systèmes d'enzymes pour d'autres modifications.

### Des arbres aux propriétés modifiées

La culture ciblée et le génie génétique permettent déjà d'influencer considérablement le bois pendant sa croissance. Pendant longtemps, l'accélération de la croissance est demeurée au premier plan, mais désormais, grâce au développement fulgurant du génie génétique, on peut modifier la structure voire la chimie du bois. Actuellement, on met l'accent sur une dégradabilité plus aisée et spécifique de la lignine, car il s'agit d'un aspect déterminant pour la production de cellulose et de biocarburant. À l'avenir, les opportunités que présentent les biotechnologies pourront être de plus en plus utilisées pour le développement de matériaux à base de bois. De la sorte, on pourra d'emblée faire pousser des arbres de façon stratégique en vue d'une modification ou fonctionnalisation optimisée du bois.

La mise en œuvre économique des résultats des projets sur les thèmes du bois massif, du placage et des surfaces dépend toutefois de la possibilité de transformer en technique de production industrielle les procédés testés jusqu'ici en laboratoire. Le vaste potentiel de ces méthodes est reconnu et doit être exploité, d'où la création de deux start-up dans ce domaine. La première, «Myco Solutions», utilise des antagonistes pour une protection du bois plus efficace et plus écologique. La seconde, «Swiss Wood Solutions», s'occupe de la mise au point de placages de haute qualité dotés de propriétés améliorées et destinés à l'usage intérieur, ainsi que de la substitution du bois exotique pour la fabrication d'instruments de musique.

### Spin-off MycoSolutions

MycoSolutions est une société issue du Laboratoire de recherche appliquée sur le bois de l'Empa, à Saint-Gall. L'équipe de MycoSolutions se concentre sur l'élaboration et la commercialisation de produits s'inscrivant dans le cadre d'une protection végétale intégrée. Ainsi, certains champignons peuvent empêcher la putréfaction du bois des poteaux téléphoniques par exemple.

### Spin-off Swiss Wood Solutions

La société Swiss Wood Solutions AG a été fondée à l'automne 2016, avec la participation de plusieurs collaborateurs de l'EPFZ/Empa spécialisés dans les sciences des matériaux à base de bois. Cette start-up suit trois axes principaux : ennoblement des placages pour des applications haut de gamme en intérieur, densification du bois local pour la fabrication d'instruments de musique, et services aux entreprises de la filière bois. Il est prévu que Swiss Wood Solutions entreprenne une production en collaboration avec diverses entreprises, notamment de l'industrie suisse du bois.

## Recommandations

- Les équipes de recherche doivent approfondir les analyses des procédés et matériaux afin d'arriver à mieux appréhender les mécanismes élémentaires des modifications du bois.
- L'importance du bois et de la cellulose comme composants structuraux, issus de la biosynthèse des arbres, doit être mieux mise en avant dans les sciences en tant que concept d'avenir, et aller de pair avec le développement de matériaux hybrides présentant des propriétés novatrices et améliorées.
- Il est indispensable de créer de nombreuses passerelles à grande échelle entre la recherche sur les matériaux et la recherche sur la construction en bois. En effet, les bâtiments urbains à plusieurs étages exigent une performance maximale du matériau de construction, ce qui peut être facilité par des modifications de la structure et de la surface du bois.
- Les entreprises, généralement de petite taille, de la filière bois doivent être en mesure d'appliquer, à l'échelle industrielle, les développements réalisés dans les matériaux dans des produits innovants. Pour cela, il faut établir un centre de recherche et développement de grande envergure en Suisse (voir Recommandation à la fin du document).
- Il importe en outre de mieux impliquer les entreprises, extérieures au secteur du bois mais pouvant profiter du potentiel économique de cette ressource renouvelable, dans les activités de développement de la filière bois. Cela concerne notamment le bâtiment et l'industrie chimique, mais aussi d'autres secteurs tels que l'horlogerie ou les technologies de filtrage. C'est là que le réseau S-WIN a vocation à intervenir, favorisant les liens grâce aux contacts directs et aux manifestations.

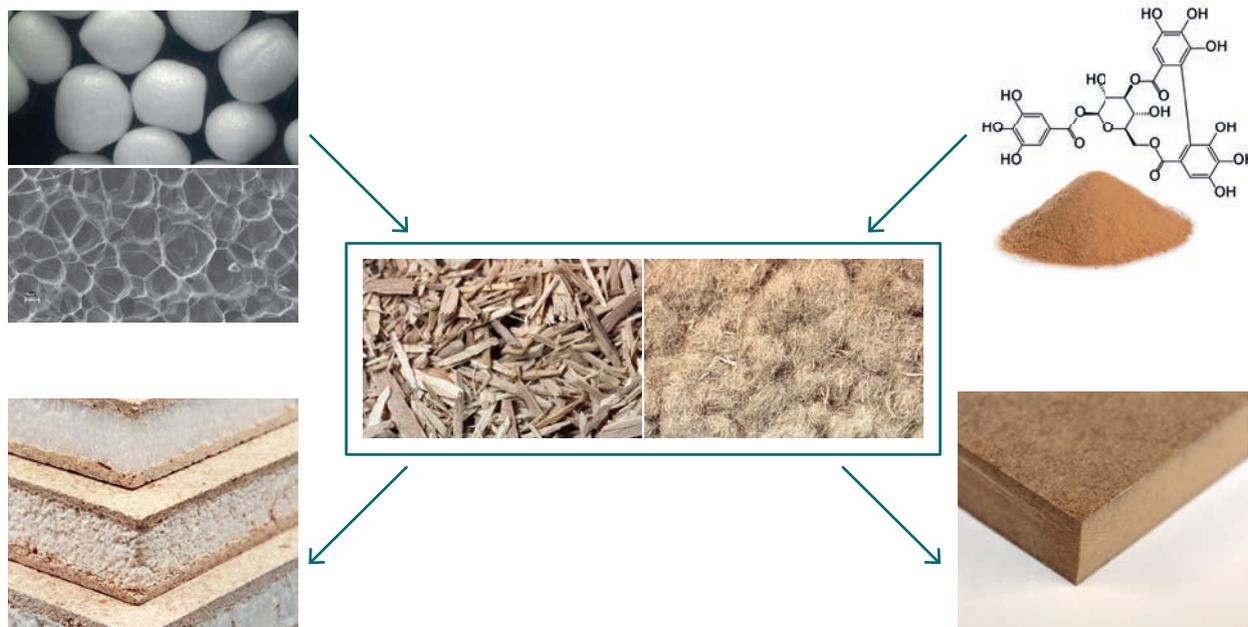
# OPTIMISATION DES PANNEAUX

Les panneaux en bois figurent parmi les matériaux les plus utilisés en menuiserie d'intérieur ainsi que dans l'industrie de l'ameublement et de la décoration. Néanmoins, les colles conventionnelles sont sous le feu de la critique, et on aspire de plus en plus à un allègement des matériaux ainsi qu'à une utilisation plus raisonnée des ressources. Ces problématiques, parmi d'autres, nécessitent donc des optimisations dans le domaine des panneaux à base biologique et ligneuse.

## Contexte scientifique et aspects économiques

Depuis des dizaines d'années, les panneaux en bois font l'objet d'intenses activités de recherche, aussi bien dans le domaine des sciences que de l'industrie, ce qui a permis d'atteindre un haut niveau de contrôle de fabrication. À cet égard, la composition matérielle des panneaux (essence

de bois, écorce, vieux bois, agent liant) et la technique de pressage jouent un rôle non négligeable. Dans le cadre de l'optimisation des panneaux, l'effort porte sur un allègement important et une économie de matériaux au niveau des produits en aggloméré, surtout pour le secteur de l'ameublement. On peut notamment citer à titre d'exemple la technique Kaurit-Light ([http://www.kauritlight.com/cm/internet/Kaurit\\_Light/](http://www.kauritlight.com/cm/internet/Kaurit_Light/)) pour l'élaboration



III. 11 Dans le domaine des panneaux en bois (agglomérés/fibres), la recherche est axée sur la mise au point de panneaux plus légers avec cœur poreux en mousse et de colles à base biologique (remerciements à Heiko Thömen).

de panneaux en aggloméré très légers, consistant à remplacer une partie du bois par des billes de polystyrène pré-expansé dans le cœur du panneau (BASF). Mentionnons également le Balance Board qui consiste à ajouter des granulés de biomasse à base de plantes annuelles (entreprise Pfeleiderer) ([https://www.pfleiderer.com/PM/Produkte\\_und\\_Anwendungen/BalanceBoard](https://www.pfleiderer.com/PM/Produkte_und_Anwendungen/BalanceBoard)). Autre possibilité: réduire nettement le poids grâce à l'utilisation de polymères expansés dans le processus de fabrication (brevet: Leichtbau-Holzwerkstoffplatte, EP 2117792 B1, Université de Hambourg). Les composants finaux doivent donc être élaborés de sorte que la température de ramollissement de la mousse corresponde approximativement à celle de durcissement de l'adhésif de la couche supérieure. L'un des projets du PNR66 visait précisément à réaliser ce processus avec un précurseur de mousse à base biologique.

L'emploi d'adhésif représente un défi supplémentaire: depuis longtemps, les scientifiques cherchent à le réduire autant que possible sans porter atteinte à la qualité du panneau. Compte tenu des orientations politiques et des tendances actuelles quant aux critères d'autorisation, il est urgent de trouver des alternatives aux colles à base de formaldéhyde, jusqu'ici majoritaires (<http://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinflusse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/formaldehyd>) (Lavoue et al. 2005). L'une des approches possibles consiste à se détourner complètement des agents liants synthétiques pour privilégier des substances issues des arbres, comme les tannins (Pizzi et al. 1997; Stashevski et Deppe 1973), dont l'application à l'échelle industrielle nécessite toutefois encore des recherches.

Les entreprises Swiss Krono et Pavatex sont deux grands producteurs suisses de panneaux et de matériaux isolants qui pourraient bénéficier des découvertes du PNR66. À l'international, les entreprises de l'industrie du meuble et les producteurs de panneaux, et particulièrement celles d'envergure mondiale, comptent parmi les principaux moteurs de l'innovation dans le secteur des matériaux en bois. Ces géants du mobilier visent une production plus durable tout en minimisant autant que possible les ressources utilisées. L'allègement des panneaux est actuellement un sujet central dans l'ameublement; il s'agit d'une exigence inhérente au changement de comportement de la clientèle, mais aussi à l'importance croissante du commerce en ligne.

## Projets d'optimisation des panneaux

### Panneau en bois ultraléger à base bio et au cœur de mousse

**Heiko Thoemen** (Haute école spécialisée bernoise BFH),  
**Christopher Plummer** (EPFL), **Jan-Anders E. Månson** (EPFL),  
**Tanja Zimmermann** (EMPA)

En ameublement, la tendance est à des matériaux plus légers présentant un grand nombre d'avantages, aussi bien au niveau de la transformation, du transport, que de l'usage pour le client. Dans le cadre du projet du PNR 66, les scientifiques ont mis au point des panneaux en aggloméré ultralégers grâce à un cœur en mousse à base de biomatériaux. Bien que plus légers que les panneaux agglomérés conventionnels, ils possèdent les mêmes propriétés en matière de stabilité.

L'une des stratégies employées pour réduire le poids des panneaux était la construction en sandwich: une couche centrale, légère, et deux couches supérieures similaires à de l'aggloméré. Jusqu'à présent, l'élaboration de ces panneaux nécessite de réunir les trois épaisseurs fabriquées séparément, ce qui entraîne des coûts relativement élevés et cantonne la distribution à des marchés de niche. L'objectif des chercheurs dans le cadre de ce projet était de mettre au point un procédé de fabrication de panneaux agglomérés ultralégers (ultra light weight particleboard, ULPB, densité < 350 kg/m<sup>3</sup>) composés d'un cœur en mousse à base biologique. La technique élaborée commence par une étape de compression et de durcissement des couches supérieures, suivie d'une phase d'expansion de la mousse pour la couche centrale. La définition des paramètres de ce procédé représentait un enjeu de taille, car ils devaient pouvoir être adaptés simultanément à la fois aux couches supérieures et au cœur. Un précurseur de mousse solide se révélait donc indispensable, mais il fallait alors que la durée et la température de traitement correspondent au durcissement de l'adhésif dans les couches supérieures.

La première phase du projet était ainsi axée sur l'optimisation simultanée du procédé de fabrication des panneaux et de la formulation d'un précurseur de la mousse à base biologique, composé de poly-(DL)-lactide amorphe (PDLLA) et de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) mélangés à l'état fondu. L'ajout de PMMA au PDLLA permettait ainsi un réglage exact de la température de transition vitreuse allant de 60°C à plus de 80°C sans perte de compatibilité avec l'agent d'expansion physique CO<sub>2</sub>. Un modèle de diffusion a également été créé

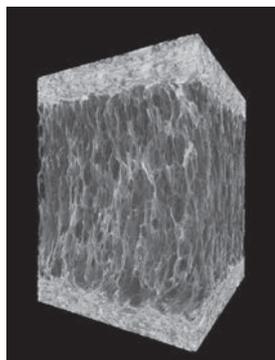
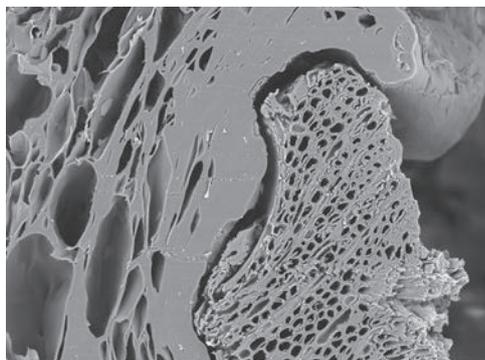
pour l'optimisation du processus d'imprégnation. De cette manière, la teneur en CO<sub>2</sub> du précurseur de la mousse a pu être ajustée de façon à permettre une expansion aux températures nécessaires à la formation des couches supérieures.

Après avoir envisagé divers systèmes d'adhésifs pour celles-ci, les chercheurs ont fini par opter pour une résine urée-formaldéhyde avec un agent durcissant de persulfate d'ammonium afin d'assurer un durcissement à moins de 100 °C. Les panneaux ainsi élaborés présentent une densité d'environ 325 kg/m<sup>3</sup>.

L'impact environnemental de l'ULPB a été comparé à celui des panneaux agglomérés conventionnels et panneaux biosourcés avec cœur en mousse par le biais d'une analyse de cycle de vie (ACV). Les matières premières et l'utilisation à la fin du cycle de vie sont les éléments exerçant la plus grande influence sur les indicateurs environnementaux. Remplacer les panneaux conventionnels par des ULPB avec un cœur à base de PLA réduit de 25% les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, compte tenu des procédés agricoles inhérents à la fabrication de la mousse polylactide (PLA), les panneaux qui en sont composés présentent un taux d'écotoxicité défavorable.

Dans la deuxième phase du projet, l'équipe de recherche s'est penchée sur le potentiel que représente l'ajout de fibres de bois en tant qu'additif au précurseur de la mousse à base de PLA. Les tests ont également porté sur la possibilité d'utiliser la cellulose microcristalline (microcristalline cellulose, MCC). Les premiers résultats révèlent une nette augmentation de la rigidité avec l'ajout croissant d'additif (1 à 20% proportionnellement au volume de PLA). Jusqu'à 10% d'ajout d'additif, la diffusion de CO<sub>2</sub> dans le matériau est comparable à celle que l'on observe dans le PLA pur. L'humidité résiduelle introduite dans les fibres de bois et la MCC a toutefois engendré un affaiblissement de la matrice au cours du mélange. Reste à voir si cet inconvénient peut être compensé par le choix des composants chimiques.

Dans le cadre de ce projet, les scientifiques ont démontré la faisabilité d'un procédé de fabrication continu de panneaux d'aggloméré ultralégers et à base biologique, grâce à l'ajustement précis de la plage de traitement de chacune des couches. Une adaptation aux panneaux agglomérés conventionnels semble envisageable mais doit faire l'objet de recherches complémentaires.



**III. 12a** Cliché au microscope électronique à balayage d'un copeau de bois (partie droite de l'image) à la jonction avec la mousse (partie gauche de l'image) et cliché microtomographique d'un panneau en aggloméré avec cœur en mousse (image de droite).



**III. 12b** Nouveau panneau mis au point avec cœur en mousse (à gauche) comparé à un panneau conventionnel en aggloméré.

## Extraction de tanins de l'écorce de résineux indigènes

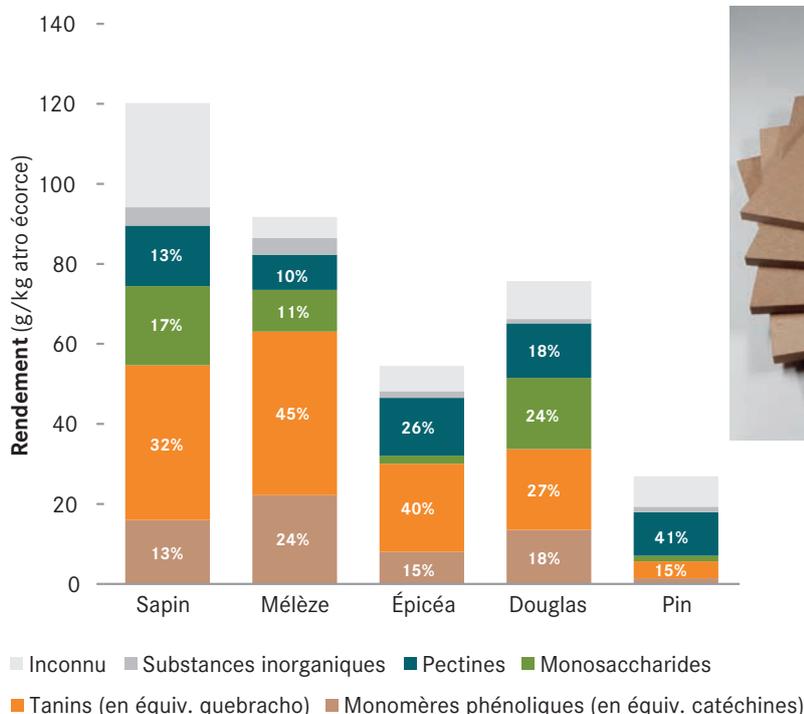
Frédéric Pichelin (Haute école spécialisée bernoise BFH),  
Ingo Mayer, Ivana Kroslovakova, Hans Vettiger

Le projet visait à mettre au point un procédé adapté à l'extraction de tanins des résineux poussant sur le territoire national et pouvant être intégré aux processus existants dans les scieries et l'industrie de transformation du bois. Les chercheurs ont également étudié la formulation des colles sans formaldéhyde sur la base des tanins extraits et évalué les propriétés physiques et mécaniques des dérivés du bois ainsi fabriqués.

Les tanins issus d'essences de bois suisses peuvent entrer dans la composition des systèmes de colle lors de la fabrication de produits dérivés du bois comme les panneaux. Jusqu'à présent, les tanins commercialisés proviennent du bois ou de l'écorce d'essences tropicales ou subtropicales telles que le quebracho ou le mimosa; ils sont extraits au moyen de procédés industriels nécessitant l'emploi de solutions alcalines aqueuses puis distribués dans le monde entier sous forme de poudre. À ce

jour, l'écorce des résineux européens n'a pas servi à l'extraction commerciale du tanin, bien que des expériences en laboratoire aient montré que certains tanins, notamment ceux extraits de l'écorce d'épicéa (teneur en tanins ~10%), se prêtaient bien à la fabrication de systèmes de colle.

Dans la perspective d'une utilisation des tanins dans les dispositifs adhésifs, ce projet de recherche a abordé les processus d'extraction de tanins condensés à partir de l'écorce de résineux suisses. Les chercheurs ont commencé par analyser en détail la composition chimique des extraits à l'eau chaude de sapin, d'épicéa, de pin, de mélèze et de douglas, puis la structure des tanins et hydrates de carbone ainsi extraits. Les principales composantes des extraits à l'eau chaude étaient les tanins, les monomères phénoliques, les monosaccharides et la pectine, dont la part respective variait considérablement d'une essence à l'autre. Dans tous les extraits, on a trouvé une quantité non négligeable d'hydrates de carbone. Par rapport aux extraits de mimosa et de quebracho commercialisés, ceux d'écorce de résineux suisses présentent un rendement d'extraction inférieur et une teneur



III. 13 Composition chimique des extraits d'écorce de résineux suisses (à gauche) et MDF produit en laboratoire d'essai avec utilisation de colles à base de tanins d'écorce de résineux (à droite).

supérieure en hydrates de carbone. Par conséquent, les chercheuses et chercheurs en charge du projet ont mis en place un procédé d'extraction en deux étapes, dans le but d'obtenir des extraits plus riches en tanins. Ils ont d'ailleurs observé une différence entre les tanins de bois suisse et ceux de bois tropical au niveau de leur structure chimique et leur réactivité en tant qu'adhésif.

Une période prolongée de stockage à l'air libre avant extraction suscitait en outre un net changement de la composition des extraits à l'eau chaude d'écorce d'épicéa, les substances solubles dans l'eau étant évacuées par la pluie. Une extraction préalable à l'eau froide des composés hydrosolubles permettait donc de réduire l'impact de la durée d'entreposage sur la composition des extraits à l'eau chaude. Par la suite, cette constatation a permis d'obtenir des extraits à l'eau chaude plus riches en tanins, mais la teneur en pectine est restée suffisamment importante pour conserver son effet délétère sur la colle.

Les étapes suivantes ont consisté à développer des formules adhésives à partir de tanins d'écorce d'épicéa et à les utiliser pour une fabrication à moindre échelle de panneaux en fibres de bois. Les dispositifs adhésifs à base d'extraits d'écorce d'épicéa présentaient des propriétés de résistance légèrement inférieures aux solutions classiques de colles à base de tanins de mimosa. Les principales causes identifiées étaient l'effet diluant des hydrates de carbone présents dans les extraits analysés, ainsi que la faible réticulation inhérente à l'empêchement stérique des tanins d'écorce d'épicéa à la structure complexe.

La part d'éléments non extractibles demeurant très élevée, le potentiel matériel des particules d'écorce après extraction est significatif. Les propriétés des systèmes d'adhésifs à base d'extraits d'écorce d'épicéa à forte proportion tanin/hydrates de carbone permettront peut-être de développer des colles à durcissement rapide, à faible apport d'additif, et reposant sur l'emploi de tanins d'essences suisses. Ce genre de systèmes de colle est à l'étude dans le cadre d'un projet sur la fabrication de contreplaqué (CTI Tannin Plywood). Les chercheurs continueront en outre leurs travaux en vue d'élaborer une formule permettant d'utiliser l'extrait de tanin dans la production de pièces en 3D (CTI Impression 3D d'éléments à base de bois).

## Synthèse des projets : conséquences et potentiel d'application

À l'avenir, les techniques d'allègement du matériau faisant appel à des polymères à base de pétrole ou de matières premières aussi employées pour la production alimentaire seront de plus en plus controversées. Les travaux de développement en la matière s'orienteront donc presque exclusivement sur des systèmes de mousse à base biologique destinés à la couche centrale des panneaux et pouvant être intégrés aussi facilement que possible dans les procédés actuels de fabrication. En ce qui concerne les agents liants aussi, la recherche fondamentale se concentrera fortement sur la mise au point de systèmes adhésifs à base biologique pure et à faible impact écologique. De ce fait, les techniques d'extraction auront aussi un rôle important à jouer. Les deux projets encouragés dans le cadre du PNR 66 ouvrent la voie au développement scientifique continu de ce champ thématique. Toutefois, la mise en œuvre à grande échelle demande encore d'optimiser les processus, ce qui se reflète d'ailleurs dans le niveau de maturité technologique de 4.

Les recherches portant sur les tanins issus d'écorce de résineux ont permis une grande avancée vers l'exploitation d'une source de matière première renouvelable, jusqu'ici négligée en sciences des matériaux. Les résultats obtenus pour l'extraction de tanins à partir de résineux européens constituent une étape déterminante vers la substitution des agents liants actuels qui posent problème dans la fabrication de matériaux dérivés du bois. En effet, nombre de colles utilisées de nos jours à l'échelle industrielle sont classées comme dangereuses au point que leur usage sera restreint voire complètement interdit à l'avenir. Si l'on parvient à fractionner et donc homogénéiser suffisamment les matériaux de base dans le cadre de procédés efficaces, ce sera là une étape décisive. Effectivement, la mise au point de techniques économiquement viables dans ce domaine permettrait aux entreprises suisses d'occuper une place importante sur le marché mondial des tanins.

La filière du bois a fortement besoin de tanins et de colles à base de tanins. Or, cette demande est aujourd'hui principalement couverte par des fournisseurs extrayant les tanins de bois tropicaux. Pourtant, les résultats de la recherche ont montré qu'il était possible d'exploiter les tanins issus de bois suisse dans la même mesure, ce dernier représentant donc une bonne source de matière première. Si l'on part du principe que la Suisse dispose d'un volume d'épicéa et de sapin de 850 000 m<sup>3</sup> (sans

compter le bois de chauffage), on pourrait transformer environ 94400 m<sup>3</sup> d'écorce. Un rendement d'extraction de 5% permettrait ainsi de produire 2125 tonnes de tanins par an.

Les travaux sur l'allègement des panneaux en aggloméré vont également dans la bonne direction, même si l'harmonisation des techniques entre l'opération de pressage des couches supérieures et l'expansion de la mousse du cœur doit encore être améliorée. Actuellement, le coût de production des panneaux en aggloméré avec cette nouvelle technique demeure encore supérieur à celui des méthodes conventionnelles; en outre, les produits ainsi développés ne présentent pas de propriétés mécaniques ou fonctionnelles supérieures permettant d'en faire des «produits de choix». Par conséquent, la mise en œuvre commerciale des procédés fondés sur une couche centrale à base de mousse doit encore faire l'objet d'une intense phase d'optimisation.

L'économie suisse du bois a déjà subi par le passé une forte pression de la part des prestataires étrangers très compétitifs qui travaillent avec des volumes de production plus importants et donc des coûts unitaires considérablement plus faibles. Toutefois, l'industrie suisse des panneaux à base de bois pourrait bénéficier là d'une vaste opportunité si un savoir-faire voyait le jour en matière de produits optimisés sur le plan technique et que les droits de propriété intellectuelle étaient protégés. L'emploi de panneaux en aggloméré extrêmement légers grâce à leur cœur en mousse pourrait entraîner une forte réduction du poids des produits, ce qui présente un énorme potentiel économique, particulièrement dans le secteur du mobilier en kit.

## Recommandations

- Il importe que les scientifiques étudient et développent, pour la couche centrale des panneaux en aggloméré, des matériaux de base issus de substances biologiques n'entrant pas en concurrence avec la chaîne alimentaire.
- Une fois l'optimisation de la conduite des procédés terminée à l'échelle du laboratoire, il serait judicieux que les chercheurs et les entreprises intègrent aussi vite que possible une installation pilote dans la production existante de panneaux en aggloméré, afin de favoriser la mise en œuvre dans les techniques de production industrielles.
- Dans le domaine des tanins, il faudrait que les chercheurs et les entreprises travaillent en collaboration à la formulation de colles dont la composition serait exclusivement d'origine biologique. Il s'agit là de la seule manière de poser des bases d'argumentation solides justifiant le remplacement des systèmes existants.
- S'appuyant sur son économie forestière, ses entreprises de la filière bois et son industrie de la colle, la Suisse devrait développer des chaînes logistiques efficaces en matière de tanins, de l'accumulation des matières premières à la production de colle en passant par les divers aspects de la valorisation, afin que le produit soit compétitif sur le marché.

# NANOCELLULOSE

**Dans les milieux scientifiques comme économiques, la nanocellulose fait de plus en plus figure de matériau biologique de pointe. Les fibrilles et nanocristaux de cellulose ouvrent un vaste horizon d'applications possibles, de la production de matière synthétique et de mousse à des composés très performants, sans oublier la fabrication de colles, d'enduits et de textiles ainsi que les applications médicales telles que les implants et pansements.**

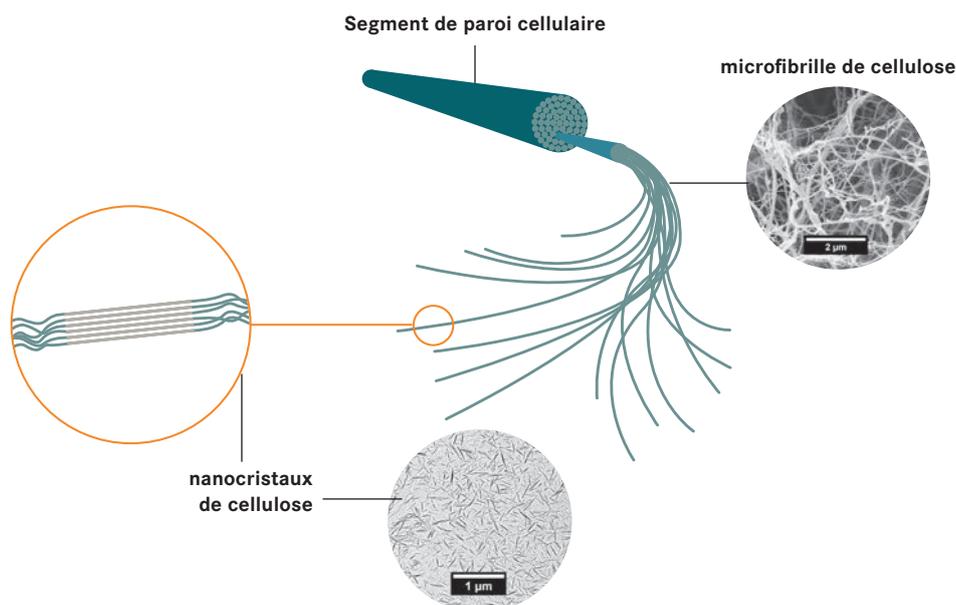
## Contexte scientifique et aspects économiques

La recherche dans le domaine de la nanocellulose a connu une évolution fulgurante, en particulier au cours de la décennie écoulée. La vaste surface spécifique qu'engendre le processus de décomposition offre les conditions nécessaires à une multitude de fonctionnalisations des plus efficaces.

De nombreuses activités de recherche sont actuellement en cours dans les pays leaders du bois, au Japon, en Amérique du Nord et en Scandinavie. Dans les autres pays européens comme en France ou en Autriche, les groupes de recherche sont gé-

néralement de petite taille et se concentrent sur des fonctionnalisations ou applications spécifiques.

À cet égard, les sphères de recherche dominantes sont parfaitement représentées dans les deux projets du PNR 66. La micro- et nanofibrille de cellulose contiennent des domaines cristallins amorphes et se distingue par sa structure allongée (fibrillaire) et irrégulière qui forme des structures réticulaires et peut ainsi être fonctionnalisée grâce à des méthodes nanotechnologiques pour divers profils de propriétés et applications. Parmi le vaste champ d'activités de recherche, citons les thèmes les plus représentatifs, notamment la mise au point de nanopapier magnétique ou résistant à l'eau (Olsson et al. 2010),



III. 14 Structure de la microfibrille de cellulose (NFC) et des nanocristaux de cellulose (CNC) basée sur son extraction à partir de la paroi cellulaire des fibres de cellulose (remerciements à Tanja Zimmermann et Christoph Weder).

de matériaux composites de cellulose et de graphite (Laaksonen et al. 2011), ou encore d'éponges de nanocellulose superhydrophobes et absorbant le pétrole (Jin et al. 2011; Zhang et al. 2014).

Comme leur nom l'indique, les nanocristaux de cellulose sont de nature cristalline et possèdent une forme serrée et compacte présentant un potentiel de liaison physique nettement inférieur à celui des nanofibrilles de cellulose (CNF). Par conséquent, les chercheurs utilisent de préférence les nanocristaux de cellulose comme agent rigidifiant dans les matrices polymères (Pei et al. 2011), mais aussi de plus en plus pour obtenir des effets optiques particuliers (Dumanli et al. 2014).

Les applications possibles de la nanocellulose sont nombreuses: fabrication de substrats souples, de matériaux composites pour l'industrie automobile, ou encore de produits poreux tels que des membranes, éponges ou aérogels permettant de lier ou de séparer des substances liquides ou gazeuses. Mentionnons aussi les applications biomédicales et biomécaniques telles que le traitement des brûlures ou l'élaboration de vaisseaux sanguins artificiels. Les propriétés absorbantes de la nanocellulose sont également très prometteuses et intéressantes pour le remplacement de disques vertébraux ou encore pour la filtration des métaux lourds et autres polluants de l'eau. La nanocellulose peut en outre servir à la production de papier barrière tel qu'il est utilisé dans les emballages alimentaires, de matériaux biomédicaux pour implants, de polymères enrichis en cellulose et de matériaux à mémoire de forme.

À l'heure actuelle, ce domaine thématique connaît une forte progression liée à l'impression en 3D qui marquera beaucoup l'évolution future (Siqueira et al. 2017). Disponibles en grandes quantités grâce à la ressource bois, les biopolymères permettront l'élaboration de nouveaux concepts de matériaux et de fabrication ainsi que de produits novateurs. À cet égard, les encres à base de nanocellulose servent d'ores et déjà à la production de structures complexes dans l'impression 3D.

En termes d'applications, il existe une proximité thématique avec certains éléments précédemment évoqués, à savoir les traitements de surface du bois et le renforcement mécanique des couches centrales à base de mousse dans la production de panneaux légers en aggloméré. Ce rapprochement est mis à profit de manière très pertinente dans le travail en réseau des équipes de recherche au sein du PNR 66 et se reflète dans la description de projet suivante.

## Projets sur la nanocellulose

### Nanofibrilles de cellulose dans les revêtements pour surfaces en bois

Tanja Zimmermann (EMPA), Tina Künniger

Outre ses nombreuses utilisations dans les nouveaux matériaux à base de cellulose (captage de CO<sub>2</sub> ou éponges absorbant le pétrole p.ex.), la nanofibrille de cellulose (NFC) peut également servir à optimiser la capacité des systèmes conventionnels de protection du bois. Ce projet vise ainsi à améliorer la stabilité aux UV, la NFC utilisée comme additif favorisant une meilleure répartition et liaison des substances absorbant les ultraviolets. Dans ce cadre, l'équipe de recherche s'est concentrée sur l'accroissement de la capacité et de la durabilité des revêtements du bois en extérieur par le biais de l'ajout de NFC. Il était en outre indispensable d'explorer de manière approfondie le potentiel de la NFC comme additif biologique novateur et renouvelable, ainsi que son interaction avec les agents liants et les éléments absorbant les UV.

Le bois est un matériau de construction populaire en extérieur, mais sa fiabilité réduite empêche souvent une utilisation plus généralisée. Les rayons ultraviolets, la pluie et l'humidité, mais aussi les facteurs mécaniques et les micro-organismes, peuvent donner au bois un aspect disgracieux ou limiter sa fonctionnalité à long terme. C'est pourquoi on a généralement recours à des revêtements protégeant la surface du bois. Or, ces produits peuvent encore être largement améliorés, surtout quant à leur transparence, ce qui demande de vastes recherches au niveau des composants et de leur structure.

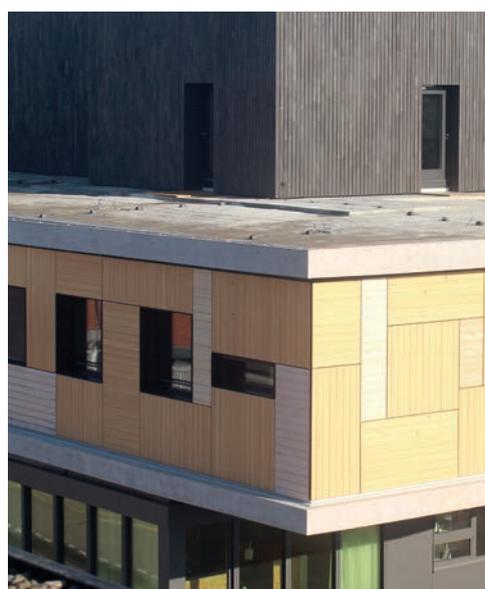
Les scientifiques ont appuyé leurs travaux sur les systèmes liants acryliques et/ou alkydes, testés avec 2,5% en masse de NFC puis une adjonction d'agents inorganiques (nanoparticules de ZnO) ou organiques d'absorption des UV. Dans ce cadre, la NFC non modifiée révélait déjà une bonne compatibilité avec les systèmes aqueux de liants acryliques et alkydes. Suite à l'ajout de NFC, le comportement fluide newtonien initial de l'excipient s'est mué en comportement rhéofluidifiant. La viscosité du liant modifié dépendait largement de la concentration de NFC et peut donc être utilisée de façon ciblée pour certaines applications spécifiques. Cela permet ainsi de recourir à la NFC non modifiée comme agent épaississant dans le revêtement du bois. On a également observé que l'ajout de NFC avait un impact sur la formation du film des systèmes liants, ce qui doit être examiné dans les projets suivants.

Avec les revêtements séchant à la surface du bois, l'adjonction de NFC entraîne un changement de la structure: la couleur et la transparence restent inchangées, mais la surface perd de son éclat.

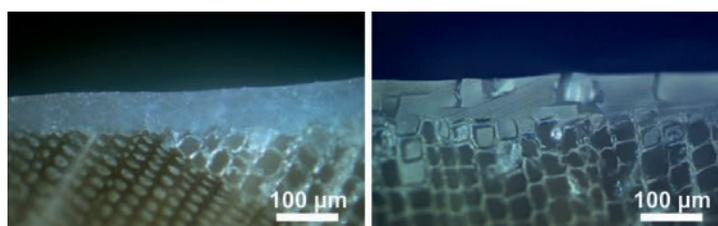
On a étudié l'effet de la NFC sur la protection UV des surfaces en bois en observant l'interaction des nanoparticules absorbant les UV avec les absorbeurs organiques du liant. Le constat était le suivant: la NFC sert à la fois de substance porteuse et d'agent de dispersion pour les nanoparticules de ZnO, ce qui engendre une répartition homogène des particules dans le revêtement et empêche la coagulation pendant la formation du film. La NFC a également pu servir de substance porteuse pour les agents organiques absorbant les UV.

Par ailleurs, l'ajout de NFC a permis de modifier les propriétés du film du revêtement, le vieillissement ayant un effet visiblement délétère sur les agents liants. L'effet produit était très positif: la présence de NFC réduisait nettement la fissuration, aussi bien lors du durcissement que sous l'effet des facteurs climatiques. Cependant, les essais reproduisant artificiellement les intempéries ont révélé que la NFC non modifiée n'améliorait

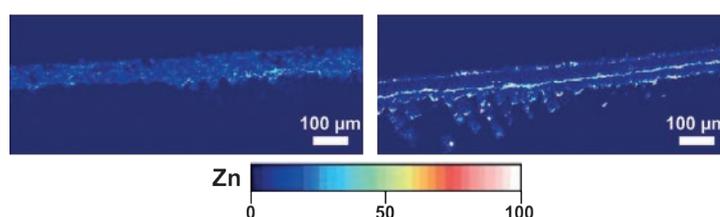
pas la stabilité de la couleur des surfaces en bois. L'accroissement de la stabilité aux UV via la fonctionnalisation de la NFC au moyen de substances absorbant les ultraviolets était d'ailleurs moins important que ce que les chercheurs espéraient: les concentrations d'UV envisagées jusqu'ici sur les nanofibrilles sont trop faibles et doivent donc être encore augmentées. Si l'on y parvient lors d'autres études et que les revêtements de surface résistent non seulement aux tests d'intempéries artificielles mais aussi à l'épreuve du temps, cette méthode de modification pourrait alors constituer une protection efficace contre les UV basée sur des systèmes de liants existants. Dans la logique d'une première utilisation pratique, on a appliqué un vernis à base de NFC modifiée sur les façades en bois du module «Vision Wood» du bâtiment expérimental NEST ([www.empa.ch/next](http://www.empa.ch/next)), ce qui permettra ainsi d'étudier l'évolution de ce revêtement à long terme.



III. 15a Suivi à long terme des revêtements de surface comprenant des NFC, utilisés sur le module «Vision Wood» du bâtiment expérimental NEST de l'Empa à Dübendorf.



III. 15b Réduction de la fissuration dans le revêtement comprenant des NFC (à gauche) par rapport à un revêtement sans NFC (à droite); cliché microscopique en coupe d'une surface en bois avec revêtement.



III. 15c La NFC comme substance vectrice et agent de dispersion pour les nanoparticules de ZnO qui absorbent les UV: répartition homogène des particules de ZnO dans le revêtement avec NFC (à gauche) et sédimentation des particules de ZnO sans NFC (à droite).

## Nouvelles méthodes de production de nanocomposites à base de cellulose

Christoph Weder (Université de Fribourg)

Les nanocristaux de cellulose présentent un grand intérêt pour le secteur des matériaux, car le procédé permettant de les isoler est relativement simple, faisant appel à l'hydrolyse acide de la biomasse. Les propriétés qu'ils possèdent correspondent, voire dépassent en partie, celles que l'on rencontrait jusqu'alors essentiellement dans les matériaux synthétiques. Des caractéristiques mécaniques attrayantes, notamment une grande rigidité et une forte résistance à la traction, font des nanocristaux de cellulose un matériau particulièrement intéressant pour de multiples applications. Les cristaux de nanocellulose s'utilisent déjà à l'échelle des laboratoires en association avec des matières synthétiques. Il manque cependant des méthodes permettant de reproduire ces procédés de fabrication de matériaux à l'échelle industrielle. Dans le cadre de ce projet, l'objectif était de mettre au point des techniques modulables et robustes pour la production de nanocomposites à base de matières synthétiques techniquement adaptées et de nanocristaux de cellulose (cellulose nanocristaux, CNC) issus du bois. Cela devrait permettre à l'économie suisse du bois d'avancer sur la voie de la production industrielle de matériaux à base de nanocristaux de cellulose.

La démarche adoptée était particulièrement centrée sur l'élaboration de matériaux composites,

puisque les agents de renfort nanoparticulaires permettent d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques des polymères et des matières plastiques. Or, la nanocellulose s'y prête très bien compte tenu de ses excellentes propriétés mécaniques, de son importante surface spécifique et de sa légèreté.

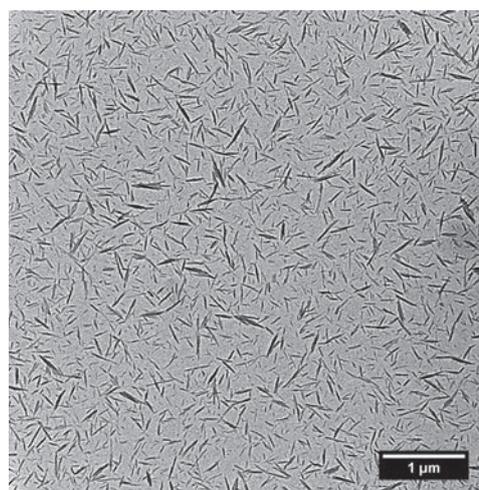
Une large palette de nanocomposites à base de matières synthétiques et CNC avait déjà été produite par le passé, mais les procédés de fabrication de ces matériaux mis au point en laboratoire se révélaient difficilement applicables à l'échelle commerciale. C'est pourquoi ils présentaient jusqu'ici un faible intérêt technologique et n'étaient pas utilisés dans d'importantes applications industrielles.

Ainsi, ce projet de recherche a permis de poser les bases scientifiques qui devraient mener au développement de processus robustes, universels et facilement modulables pour la fabrication de nanocomposites à partir de nanofibres provenant de la cellulose, et de polymères technologiquement utilisables. Tout d'abord, les chercheurs ont étudié différents procédés qui permettent d'élaborer des mélanges homogènes des deux composants avec des propriétés mécaniques optimales.

Ensuite, ils ont analysé les moyens d'éviter la détérioration thermique ou mécanique de la nanocellulose inhérente aux températures et forces de cisaillement élevées des procédés conventionnels de thermoformage. Puis, l'étape suivante a consisté



III. 16a Boîtes de pétri contenant des matériaux dérivés du bois utilisés pour la fabrication des nanocomposés: CNC (à gauche sur l'image, avec un échantillon élaboré à base de CNC) et alcool polyvinylique (PVA, à droite sur l'image, avec un échantillon de PVA pur).



III. 16b Nanocristaux de cellulose au microscope électronique à transmission.

à recouvrir la nanocellulose d'un compatibilisant universel facilitant le mélange des diverses matières synthétiques.

Les chercheuses et les chercheurs ont alors étudié plus en détail les effets typiques des mélanges sur la morphologie et les propriétés mécaniques des CNC dans les matériaux ainsi obtenus, utilisant pour cela des nanocomposites de polyacétate de vinyle (PVAc) et de nanocristaux de cellulose (CNC) comme matériaux d'essai. L'analyse de ces matériaux composites a servi de base pour expliquer comment les différentes méthodes de mélange affectent leur morphologie et leurs propriétés structurales.

Les résultats ont révélé un lien entre les forces de cisaillement, la dégradation des CNC et les propriétés mécaniques des matériaux. En effet, dans les mélanges à faible cisaillement, les matériaux présentaient des propriétés mécaniques optimales, car les CNC bien dispersés n'étaient pas dégradés et conservaient leur morphologie initiale. Les conclusions de cette étude ont pu être appliquées avec succès pour fabriquer des nanocomposites à partir de CNC, de polyéthylène (LDPE) et de divers polyuréthanes. On a ainsi démontré qu'il était possible d'aboutir à un renforcement mécanique substantiel grâce à l'utilisation modulable de mélanges à faible cisaillement.

Les résultats du projet ont conduit à une meilleure compréhension des liens entre le processus de mise en forme, la structure et les propriétés des nanocomposites de cellulose. Dans un projet ultérieur, cela pourrait permettre de mettre en place de nouveaux procédés de fabrication pour des concepts de matériaux, dont ceux étudiés ici. À toutes les étapes du processus, les progrès réalisés étaient de taille, au point que la production industrielle de matériaux composites à l'aide de nanocellulose semble nettement plus à portée de main.

### Synthèse des projets et potentiel d'application

Les recherches menées dans le cadre du PNR66 ont permis de dégager des connaissances fondamentales en matière de fabrication, de propriétés et de fonctionnalisation de la nanocellulose, ce qui offre de nouvelles opportunités à la filière bois en Suisse. Dans les projets ayant atteint un niveau de maturité technologique de 4 ou 5, il a été notamment possible de démontrer que la nanocellulose pouvait être employée pour améliorer les proprié-

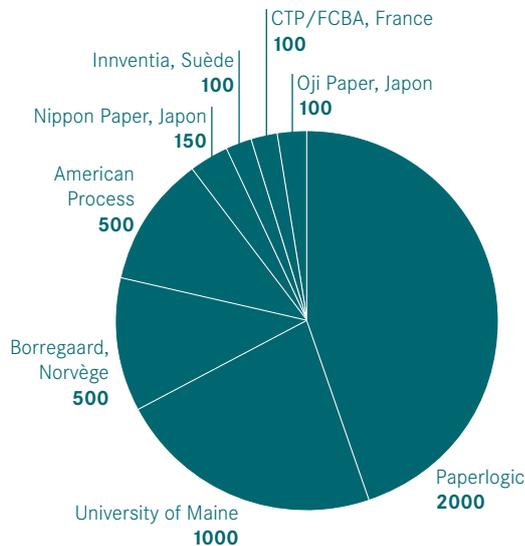
tés des matériaux composites et des revêtements du bois. La suite des développements scientifiques ayant trait à la nanocellulose ira vers une spécialisation dans certains domaines d'application. Cette situation présente un bon potentiel pour les groupes de recherche relativement petits en Suisse, qui ont d'ailleurs déjà très bien commencé à tirer parti de cet essor. Soulignons ici la démarche claire et anticipée de la recherche en termes de mise en œuvre technologique, qui se distingue sur la scène internationale. C'est le moment de mettre à profit cette avancée scientifique touchant quelques domaines d'application (éponges absorbant le pétrole p.ex.) pour favoriser la réalisation économique.

Par le passé, la faible disponibilité de la nanocellulose était un frein au développement économique de ce domaine. Aujourd'hui, le marché dispose de diverses formes de cellulose – nanofibrille, bactérienne ou cristalline –, ce qui élimine le problème des quantités mises à disposition du côté de l'offre. En Scandinavie plus qu'ailleurs, l'industrie de la cellulose et du papier est très active dans la production et l'utilisation de nanocellulose, s'inscrivant dans la perspective de compenser la baisse des ventes de papier classique.

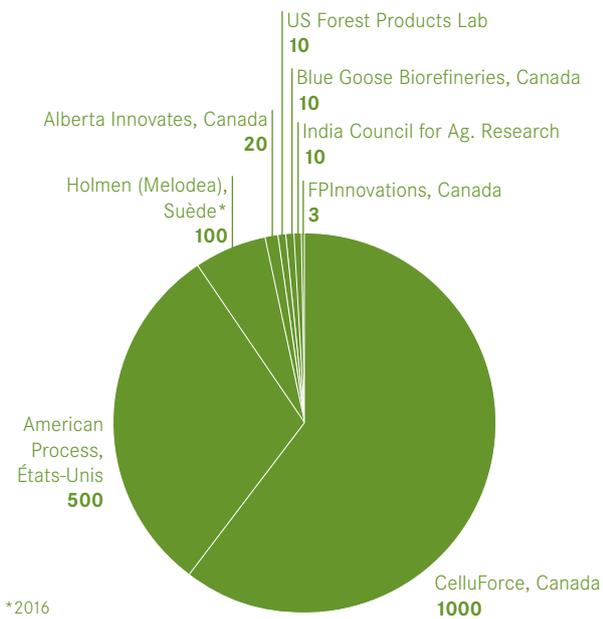
Toutefois, les coûts de production relativement élevés de la nanocellulose demeurent un véritable obstacle à la percée de ce nouveau matériau. À cet égard, le coût du personnel, l'énergie, la logistique, l'efficacité des procédés de fabrication, les coûts inhérents au respect des normes de qualité ainsi que les conditions générales de l'implantation du site de production constituent des aspects déterminants. La mise au point de techniques de production permettant une baisse radicale des coûts de fabrication sera cruciale. On réalise actuellement de grands progrès à ce niveau. Ainsi, les chercheurs développent de nouveaux procédés (p.ex. au centre de recherche technique VTT en Finlande) visant à réduire considérablement les coûts énergétiques afin que la nanocellulose puisse devenir une alternative économiquement viable aux matériaux conventionnels à base de pétrole.

En Suisse, le groupe Weidmann de Rapperswil (SG) se distingue dans la production et l'utilisation de nanocellulose, faisant figure de pionnier quant à l'emploi de la nanocellulose comme matériau dans l'industrie. Une installation de production de nanocellulose voit actuellement le jour, ce qui devrait permettre au groupe d'être autonome sur le plan de l'approvisionnement en matière première.

**Production déclarée de nanofibrille de cellulose (NFC)  
en kg par jour pour l'année 2015**



**Production déclarée de nanocristaux de cellulose (CNC)  
en kg par jour pour l'année 2015**



III. 17 Production commerciale de nanocellulose à travers le monde (source: <http://www.tappinano.org/media/1114/cellulose-nanomaterials-production-state-of-the-industry-dec-2015.pdf>).

**Production dans le groupe Wicor**

Depuis 1877, le groupe Wicor (Weidmann International Corporation), dont le siège est à Rapperswil (SG), transforme des fibres naturelles en produits pour l'industrie électronique. Outre les filiales existantes que sont Weidmann Electrical Technology et Weidmann Medical Technology, la dernière-née Weidmann Fiber Technology se développe au siège de Rapperswil depuis 2016. Elle a pour but de produire de la cellulose microfibrillée (MFC) en quantité industrielle et conçue spécifiquement pour l'application envisagée. La première phase de développement de la nouvelle usine de fibres naturelles entrera en fonction en 2017 avec une capacité de 150 t/a.

**Recommandations**

- Il faut continuer d'approfondir les relations avec les procédés de fabrication tels que l'impression 3D pour mieux contrôler l'adaptation d'échelle et établir des composants dérivés du bois dans les techniques de production.
- La recherche sur la micro-/nanofibrille de cellulose et les composites de nanocellulose doit viser une plus grande diversification des champs d'application et créer des passerelles avec la biomédecine, l'environnement et avec les industries de la chimie, des matières plastiques, des emballages ou encore du papier.
- L'investissement des producteurs dans le contrôle des procédés, la caractérisation et la normalisation doit aller croissant afin de garantir une qualité toujours régulière. Il faut donc définir les normes de qualité de la MFC/CNF avec plus de précision, en prenant en compte notamment la viscosité, la surface spécifique, l'homogénéité et le degré de polymérisation.
- Les politiques d'encouragement de la recherche en production de nanocellulose représentent un aspect-clé dont dépend la perspective économique des produits en nanocellulose en Suisse.
- Actuellement la pénétration du marché nécessite une stratégie à deux volets, visant tant les applications à grande échelle, dans le secteur du papier par exemple, que diverses applications de niche faisant appel à de la nanocellulose spécialement fonctionnalisée. Enfin, un emploi de cette dernière en biomédecine notamment pourrait déboucher sur une création de valeur élevée.

# RECOMMANDATIONS SUR LES MESURES À PRENDRE

Compte tenu du changement climatique à l'échelle planétaire et de l'exploitation des ressources, la Suisse doit jouer un rôle de premier plan en matière de développement nécessaire à l'avènement d'une société durable; en cela, l'utilisation intensive et planifiée de la ressource bois, renouvelable et absorbant le CO<sub>2</sub>, est absolument incontournable. À cet égard, le Programme national de recherche PNR66 a servi de «facilitateur» en posant les bases d'une utilisation complète de la ressource bois dans le domaine des matériaux. Il importe maintenant de ne pas attendre pour tirer parti de ces conditions favorables dynamisant la recherche et l'économie du bois en Suisse, afin de développer de manière systématique le rôle prépondérant du bois dans la bioéconomie.

Une collaboration étroite et coordonnée entre la recherche, l'économie et la politique devient ainsi essentielle si l'on veut donner l'impulsion suffisante aux résultats obtenus et accorder au bois l'importance scientifique et économique nécessaire. Par ailleurs, les entreprises souvent petites de ce secteur doivent pouvoir bénéficier de meilleures opportunités de porter à maturité les matériaux mis au point par la recherche et d'en faire des produits commercialisables. L'établissement en usine de nouvelles technologies de modification s'avère extrêmement complexe dans le domaine du bois: les processus de développement comportent leur lot de coûts très élevés et de risques multiples, nécessitant souvent bien plus de temps que les périodes habituelles de soutien financier.

Dans l'objectif de pouvoir rapidement mettre en œuvre les résultats scientifiques et limiter les obstacles à l'investissement, la Suisse a besoin d'un centre de recherche et de développement de grande

envergure dans le domaine du bois. À Gand, en Belgique, une usine pilote nommée Bio Base Europe a vu le jour dans le cadre d'une stratégie similaire (<http://www.bbeu.org/pilotplant/#primary>). Dans les installations à grande échelle, on développe et généralise les procédés de mise en œuvre de la biomasse en produits biochimiques, biomatériaux ou encore biocarburants, afin d'accélérer le développement de produits pour les innovations à base biologique. Or, ce qui manque dans ce concept et qui pourrait permettre à la Suisse de se démarquer, ce sont le maintien de la structure de la ressource naturelle qu'est le bois, et l'assemblage structurel de composants en bois via l'élaboration d'additifs, l'impression 3D par exemple, pour les matériaux fonctionnels à base biologique.

Le centre de recherche et développement Innovations Bois Suisse pourrait réunir de façon idéale, sous un même toit, les deux solutions d'adaptation d'échelle. Le développement de procédés en masse pour les modifications et les fonctionnalisations du bois massif et des placages, ainsi que leur surface, permet d'amener à maturité, rapidement et à moindre coût, des produits dérivés du bois de haute qualité, en particulier pour la construction innovante mais aussi pour de nouveaux champs d'application. En ce qui concerne la mise au point de matériaux à partir de composés dérivés du bois, comme la nanocellulose ou la lignine, le centre de recherche et développement pourrait mettre à disposition des procédés d'assemblage et une impression 3D à grande échelle. Ce concept peut servir d'accélérateur marquant pour le développement et l'introduction sur le marché de produits à base de bois et de biomatériaux, et ce grâce aux priorités du PNR66 ouvrant la voie à une multitude d'initiatives de recherche et d'application (voir notamment l'élaboration d'additifs).

Ce centre permettrait d'aborder préalablement les atouts, les défis et le potentiel d'optimisation des nouvelles technologies tout au long de la chaîne de valorisation du bois, afin que les entreprises acquièrent des connaissances importantes sur l'application industrielle des procédés avant d'investir massivement dans des installations de production destinées à un nouveau produit du bois. Cela conduirait ainsi à réduire les risques, fédérer les intérêts communs et limiter les obstacles à une commercialisation fructueuse. En outre, cette situation déboucherait sur un développement plus rapide des technologies en Suisse, et donc sur les dépôts de brevets correspondants.

Un tel centre présenterait par ailleurs l'avantage non négligeable d'une visibilité accrue attirant les capitaux risques. Pour l'économie suisse du bois, qui est presque entièrement constituée de PME, le besoin de capital pour les installations de production et la mise sur le marché de nouveaux produits en bois est très fort et représente un enjeu de taille. Par conséquent, démontrer au préalable et de façon claire la possibilité d'appliquer les technologies à échelle industrielle faciliterait grandement la prise de contact avec les investisseurs.

Dans le cadre d'une action concertée, il serait judicieux de suivre les étapes suivantes dans la perspective de création d'un centre de recherche et de développement *Innovations Bois Suisse*:

- Les entreprises et associations professionnelles de la filière bois devraient manifester clairement leur engagement à participer aux activités d'un centre de recherche et développement axé sur les modifications et la fonctionnalisation du bois ainsi que sur les procédés d'assemblage à base biologique (notamment impression 3D), et l'étayer avec leur propre identification des besoins et analyses de potentiel.
- Il faudrait que les institutions de recherche (en particulier les centres de compétences actuels, tels que ceux de l'EPFZ, de l'Empa et de la Haute école spécialisée bernoise) définissent de leur côté les grands axes de la recherche fondamentale et appliquée dans le secteur des innovations liées au bois, et collaborent avec l'industrie pour identifier les principaux obstacles à la mise en œuvre et les lacunes de la recherche.
- Dans la perspective de l'exploitation durable des ressources, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) devrait encourager davantage le développement de matériaux innovants dérivés

du bois et orienter ses activités de recherche et programmes d'action dans ce sens.

- Il serait par ailleurs souhaitable que le secteur public mette à profit les instruments de promotion économique (p. ex. soutien cantonal/régional ou aide de la Nouvelle politique régionale NPR) et d'encouragement de la recherche de façon ciblée en faveur d'un futur centre de recherche et développement.
- Un processus participatif devrait ainsi mener tous les acteurs mentionnés à l'élaboration d'un plan d'action reposant sur les piliers suivants:
  - définition d'objectifs scientifiques et économiques;
  - concept/cahier des charges et business plan pour le centre de R&D;
  - définition de l'organisation, du siège, de l'administration et du financement, y compris du plan d'application correspondant.

# BIBLIOGRAPHIE

- Allen NS, Edge M, Ortega A, Liauw CM, Stratton J, McIntyre RB (2002) Behaviour of nanoparticle (ultra-fine) titanium dioxide pigments and stabilisers on the photooxidative stability of water based acrylic and isocyanate based acrylic coatings. *Polym. Degrad. Stabil.* 78: 467–478
- Burgert I, Merk V, Keplinger T (2016) Holzbasierte Materialien – Forschungsansätze für die erweiterte Nutzung des Werkstoffs, *Holztechnologie* 57: 38–43
- Civardi C, Van den Bulcke J, Schubert M, Michel E, Butron MI, Boone MN, Dierick M, Van Acker J, Wick P, Schwarze F (2016) Penetration and Effectiveness of Micronized Copper in Refractory Wood Species. *PLoS One* 11
- Dumanli AG, van der Kooij HM, Kamita G, Reisner E, Baumberg JJ, Steiner U, Vignolini S (2014) Digital Color in Cellulose Nanocrystal Films. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 6: 12302–12306
- Evans PD, Gibson SK, Cullis I, Liu CL, Sebe G (2013) Photostabilization of wood using low molecular weight phenol formaldehyde resin and hindered amine light stabilizer. *Polym. Degrad. Stabil.* 98: 158–168
- Forsthuber B, Gröll G (2010) The effects of HALS in the prevention of photo-degradation of acrylic clear topcoats and wooden surfaces. *Polym. Degrad. Stabil.* 95: 746–755
- Fu YC, Fu WS, Liu YZ, Zhang GZ, Liu YX, Yu HP (2015) Comparison of ZnO nanorod array coatings on wood and their UV prevention effects obtained by microwave-assisted hydrothermal and conventional hydrothermal synthesis. *Holzfor-schung* 69: 1009–1014
- Fuchs W (1928) Information on genuine lignine, I the acetylation of fir wood. *Berichte Der Deutschen Chemischen Gesellschaft* 61: 948–951
- Grüneberger F, Kunniger T, Huch A, Zimmermann T, Arnold M (2015) Nanofibrillated cellulose in wood coatings: Dispersion and stabilization of ZnO as UV absorber. *Prog. Org. Coat.* 87: 112–121
- Guo HZ, Fuchs P, Cabane E, Michen B, Hagendorfer H, Romanyuk YE, Burgert I (2016) UV-protection of wood surfaces by controlled morphology fine-tuning of ZnO nanostructures. *Holzfor-schung* 70: 699–708
- Hill CAS (2006) *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other processes.* John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex
- Jin H, Kettunen M, Laiho A, Pynnönen H, Paltakari J, Marmur A, Ikkala O, Ras RHA (2011) Superhydrophobic and Superoleophobic Nanocellulose Aerogel Membranes as Bioinspired Cargo Carriers on Water and Oil. *Langmuir* 27: 1930–1934
- Kumar S (1994) CHEMICAL MODIFICATION OF WOOD. *Wood Fiber Sci.* 26: 270–280
- Laaksonen P, Walther A, Malho JM, Kainlahti M, Ikkala O, Linder MB (2011) Genetic Engineering of Biomimetic Nanocomposites: Diblock Proteins, Graphene, and Nanofibrillated Cellulose. *Angew. Chem. -Int. Edit.* 50: 8688–8691
- Lavoue J, Beaudry C, Goyer N, Perreault G, Gerin M (2005) Investigation of determinants of past and current exposures to formaldehyde in the reconstituted wood panel industry in Quebec. *Ann. Occup. Hyg.* 49: 587–602
- Li YY, Fu QL, Yu S, Yan M, Berglund L (2016) Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance. *Biomacromolecules* 17: 1358–1364
- Merk V, Chanana M, Gierlinger N, Hirt AM, Burgert I (2014) Hybrid Wood Materials with Magnetic Anisotropy Dictated by the Hierarchical Cell Structure. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 6: 9760–9767
- Militz H (1991) The improvement of dimensional stability and durability of wood through treatment with non-catalyzed acetic-acid anhydride. *Holz Als Roh- und Werkst.* 49: 147–152
- Olsson RT, Samir M, Salazar-Alvarez G, Belova L, Strom V, Berglund LA, Ikkala O, Noguez J, Gedde UW (2010) Making Flexible Magnetic Aerogels and Stiff Magnetic Nanopaper Using Cellulose Nanofibrils as Templates. *Nat. Nanotechnol.* 5: 584–588

- Pei AH, Malho JM, Ruokolainen J, Zhou Q, Berglund LA (2011) Strong Nanocomposite Reinforcement Effects in Polyurethane Elastomer with Low Volume Fraction of Cellulose Nanocrystals. *Macromolecules* 44: 4422–4427
- Pfeffer A, Mai C, Militz H (2012) Weathering characteristics of wood treated with water glass, siloxane or DMDHEU. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 70: 165–176
- Ribera J, Gandia M, Marcos JF, delCarmen Bas M, Fink S, Schwarze FW (2017) Effect of Trichoderma-enriched organic charcoal in the integrated wood protection strategy. *PlosOne* 12: e0183004
- Pizzi A, Stracke P, Trosa A (1997) Industrial tannin/hexamine low-emission exterior particleboards. *Holz als Roh- und Werkst.* 55: 168–168
- Rowell RM (2006) Acetylation of wood – Journey from analytical technique to commercial reality. *Forest Products Journal* 56: 4–12
- Salla J, Pandey KK, Srinivas K (2012) Improvement of UV resistance of wood surfaces by using ZnO nanoparticles. *Polym. Degrad. Stabil.* 97: 592–596
- Siqueira G, Kokkinis D, Libanori R, Hausmann MK, Gladman AS, Neels A, Tingaut P, Zimmermann T, Lewis JA, Studart AR (2017) Cellulose Nanocrystal Inks for 3D Printing of Textured Cellular Architects. *Advanced Functional Materials*, 27: 1604619.
- Stashevski AM, Deppe HJ (1973) Application of tannin resins as adhesives for wood particle board. *Holz als Roh- und Werkst.* 31: 417–419
- Stirling R, Temiz A (2014) Fungicides and Insecticides Used in Wood Preservation. In: Schultz TP, Goodell B, Nicholas DD (eds) *Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials*. Amer Chemical Soc, Washington, pp 185–201
- Tarkow H (1949) The swelling and shrinking of wood, paper and cotton textiles and their control. *Tappi* 32: 203–211
- Tarkow H, Stamm AJ, Erickson ECO (1946) Acetylated wood. Report. United States Forest Products Laboratory: 15 pp.
- Tjeerdsma BF, Boonstra M, Pizzi A, Tekely P, Militz H (1998) Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz Als Roh- und Werkst.* 56: 149–153
- Trey S, Jafarzadeh S, Johansson M (2012) In situ Polymerization of Polyaniline in Wood Veneers. *Applied Materials and Interfaces* 4: 1760–1769
- Wan J, Song J, Yang Z, Kirsch D, Jia C, Xu R, Dai J, Zhu M, Xu L, Chen C, Wang Y, Wang Y, Hitz E, Lacey SD, Li Y, Yang B, Hu L (2017) Highly Anisotropic Conductors. *Advanced Materials*, DOI: 10.1002/adma.201703331
- Yao QF, Wang C, Fan BT, Wang HW, Sun QF, Jin CD, Zhang H (2016) One-step solvothermal deposition of ZnO nanorod arrays on a wood surface for robust superamphiphobic performance and superior ultraviolet resistance. *Sci Rep* 6
- Zhang Z, Sebe G, Rentsch D, Zimmermann T, Tingaut P (2014) Ultralightweight and Flexible Silylated Nanocellulose Sponges for the Selective Removal of Oil from Water. *Chem. Mat.* 26: 2659–2668
- Zhu MW, Song JW, Li T, Gong A, Wang YB, Dai JQ, Yao YG, Luo W, Henderson D, Hu LB (2016) Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites. *Adv. Mater.* 28: 5181–5187



# LE PNR 66 EN BREF

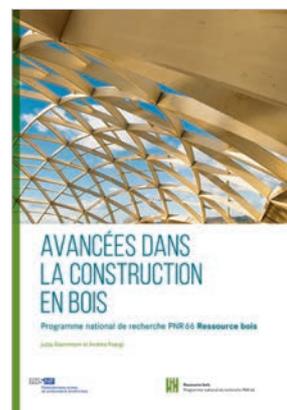
Les programmes nationaux de recherche PNR fournissent des contributions scientifiques étayées pour remédier à des problèmes urgents d'envergure nationale. Ils sont réalisés sur mandat du Conseil fédéral et sous la direction du Fonds national suisse pour la recherche. Les PNR sont rattachés à la division IV « Programmes » ([www.fns.ch](http://www.fns.ch)).

## Programme national de recherche « Ressource bois »

Dans le cadre d'un dialogue avec les représentants des milieux économiques et des autorités, le programme national de recherche « Ressource bois » (PNR66) a élaboré des bases scientifiques et des solutions pour optimiser la disponibilité et l'utilisation du bois en Suisse. Le programme coordonné par la Commission pour la technologie et l'innovation CTI disposait d'une enveloppe budgétaire de 18 mio fr. Les travaux de recherche se sont échelonnés de 2012 à fin 2016. 30 équipes de recherche de Suisse y ont participé.

Les **30 projets de recherche du PNR66** reflètent l'éventail des nouvelles approches de l'exploitation du bois et indiquent les voies à suivre pour améliorer la disponibilité des ressources et inscrire le management du cycle de matière dans une perspective durable. Fin 2013, le comité de direction a défini quatre dialogues thématiques. Ceux-ci portent sur les principaux domaines de la chaîne de valeurs forêt/bois et ont été développés de concert avec les représentants des milieux économiques, des associations et des autorités dans le cadre des plates-formes de dialogue. Les résultats des travaux de recherche et des plates-formes de dialogue sont résumés dans les quatre synthèses partielles.

Pour plus d'informations cf. [www.pnr66.ch](http://www.pnr66.ch)



## Plate-forme de dialogue et synthèse 1: avancées dans la construction en bois

### Bois de hêtre en placage stratifié pour structures porteuses

Frangi Andrea, EPF Zurich

### Assemblage assisté par robot de structures porteuses complexes en bois

Kohler Matthias, EPF Zurich

### Construction de planchers en bois dur à l'acoustique optimisée

Krajčič Lubos, Soundtherm GmbH

### Assemblage par collage d'éléments de structures porteuses en bois de feuillus

Niemz Peter, EPF Zurich

### Ouvrage porteur en bois résistant aux séismes pour bâtiments à plusieurs étages

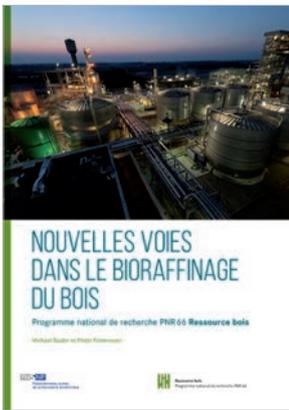
Steiger René, Empa, Dübendorf

### Dimensionnement des assemblages par collage dans la construction en bois

Vasilopoulos Anastasios, EPF Lausanne

### Bois et béton de bois allégé: les matériaux de demain ?

Zwicky Daia, École d'ingénieurs et d'architectes, Fribourg



## Plate-forme de dialogue et synthèse 2 : nouvelles voies dans le bioraffinage du bois

**L'épuration des gaz à chaud améliore la rentabilité de la transformation du bois en gaz**

Biollaz Serge, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen

**Division de la lignine pour former des composés aromatiques**

Corvini Philippe, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz

**Transformation simultanée du bois en produits chimiques de base**

Dyson Paul, EPF Lausanne

**Wood2CHem: une plateforme informatique pour le développement de bio-raffinerie**

Maréchal François, EPF Lausanne

**Génération d'hydrogène de grande pureté à partir de bois**

Müller Christoph, EPF Zurich

**Chaudières à grille optimisées pour combustibles ligneux**

Nussbaumer Thomas, Hochschule Luzern

**Fabrication combinée de carburants et de produits chimiques à partir de bois**

Rudolf von Rohr Philipp, EPF Zurich

**Optimisation des processus de synthèse du gaz naturel issu de bois**

Schildhauer Tilman, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen

**Mise au point de protéines synthétiques pour optimiser l'exploitation chimique du bois**

Seebeck Florian, Université de Bâle

**De l'éthanol pour remplacer l'essence: comment produire efficacement du carburant à partir du bois**

Studer Michael, Haute école spécialisée bernoise, Zollikofen

**Les radicaux libres dans la lignine: la clé de la fabrication de substances chimiques «vertes»**

Vogel Frédéric, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen



## Plate-forme de dialogue et synthèse 3 : innovations dans les matériaux à base de bois

**Profils de propriétés du bois améliorés pour les ouvrages en bois**

Burgert Ingo, EPF Zurich

**La nanotechnologie au service de la conservation du bois**

Fink-Petri Alke Susanne, Université de Fribourg

**Traitement des surfaces en bois à l'aide de photo-initiateurs**

Grützmaker Hansjörg, EPF Zurich

**Extraction de tanins de l'écorce de résineux indigènes**

Pichelin Frédéric, Haute école spécialisée bernoise, Bienne

**Panneau en bois ultraléger à base bio et au cœur de mousse**

Thoemen Heiko, Haute école spécialisée bernoise, Bienne

**Autoprotection contre les UV des surfaces de bois grâce aux fibres de cellulose**

Volkmer Thomas, Haute école spécialisée bernoise, Bienne

**Nouvelles méthodes de production de nanocomposites à base de cellulose**

Weder Christoph, Université de Fribourg

**Nanofibrilles de cellulose (NFC) dans les revêtements pour surfaces en bois (MoNaCo)**

Zimmermann Tanja, Empa, Dübendorf



## Plate-forme de dialogue et synthèse 4: approvisionnement et utilisation durable du bois

**MOBSTRAT: stratégies de mobilisation du bois issu des forêts suisses**

Brang Peter, Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf

**Exploitation écologique des ressources de bois en Suisse**

Hellweg Stefanie, EPF Zurich

**Analyse économique du marché du bois en Suisse**

Olschewski Roland, Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf

**Comprendre le marché du bois: entre approvisionnement et multifonctionnalité**

Zarin-Nejadan Milad, Université de Neuchâtel

# IMPRESSUM

## **Auteur:**

Prof. Ingo Burgert, EPF Zurich  
Oliver Klaffke, Really fine ideas GmbH

## **Citation recommandée:**

Ingo Burgert, Oliver Klaffke (2017): Innovations dans les matériaux à base de bois, synthèse thématique dans le cadre du programme national de recherche PNR 66 « Ressource bois », Fonds national suisse pour la recherche, Berne.

Synthèse thématique élaborée et publiée avec le soutien du Fonds national suisse pour la promotion de la recherche scientifique dans le cadre du programme national de recherche PNR 66 « Ressource bois ».



**Ressource bois**  
Programme national de recherche PNR 66



**FONDS NATIONAL SUISSE**  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## **Comité de direction:**

Dr Martin Riediker (président); Prof. Charlotte Bengtsson, Skogforsk (the Forestry Research Institute of Sweden), Uppsala, Suède; Prof. Alain Dufresne, École d'ingénieurs en sciences du papier, de la communication imprimée et des biomatériaux, PAGORA, Institut Polytechnique de Grenoble, France; Prof. Birgit Kamm, Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme, Teltow, Allemagne; Prof. Jakob Rhyner, Université des Nations Unies (UNU), Bonn, Allemagne; Prof. Liselotte Schebek, Institut IWAR, Technische Universität Darmstadt, Allemagne; Prof. Alfred Teischinger, Institut für Holzforschung, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Autriche; Prof. Philippe Thalmann, Laboratoire d'économie urbaine et de l'environnement, EPF Lausanne.

## **Coordinateur de la synthèse et de la plate-forme de dialogue « Innovations dans les matériaux à base de bois »:**

Thomas Bernhard, IC Infraconsult, Berne

## **Membres du groupe de suivi et du comité consultatif de la présente synthèse partielle:**

Frédéric Pichelin (BFH), Tanja Zimmermann (EMPA), Achim Schaffer (BAFU), Ernest Schilliger (Schilliger Holz AG), Tobias Wolfinger (Wicor), Wolfram Selter (Bosshard +Co. AG), Philipp Hunziker (Omya).

## **Déléguée de la division IV du Conseil national de la recherche:**

Prof. Nina Buchmann, EPF Zurich (jusqu'à fin 2015);  
Prof. Claudia Binder, EPF Lausanne (à compter de 2016)

## **Représentant de la Confédération:**

Rolf Manser, Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne

## **Coordinatrice du programme:**

Dr Barbara Flückiger Schwarzenbach, Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS), Berne

## **Chargé du transfert de connaissances et de technologies:**

Thomas Bernhard, IC Infraconsult, Berne; Dr Krisztina Beer-Toth, IC Infraconsult, Berne (de mai 2015 à février 2017)

## **Mise en page et illustrations:**

cR Kommunikation, Zurich;  
Alber Visuelle Kommunikation, Zurich

## **Traduction:** Trad8, Delémont

## **Protographies:**

Francois Gribi (photo de couverture);  
chercheuses du PNR 66

Les équipes de recherche respectives sont responsables des résultats mentionnés, les auteurs sont responsables des synthèses et des recommandations. Leurs points de vue ne doivent pas nécessairement correspondre à ceux du Fonds national suisse de la recherche scientifique, des membres du comité de direction ou des groupes de suivi.



En tant que matière première renouvelable, le bois a vocation à jouer un rôle déterminant dans le remplacement progressif des produits à base de pétrole. Le présent rapport de synthèse du PNR 66 Ressource bois donne un aperçu de l'état de la recherche en Suisse quant aux nouveaux matériaux à base de bois, et met en avant leur potentiel pour une vaste palette d'applications. Des progrès supplémentaires demeurent toutefois indispensables sur le plan des processus de fabrication afin que les produits correspondant à ces innovations puissent trouver une place sur le marché. Dans cette perspective, la recherche et l'économie sont sollicitées à part égale.