



AVANCÉES DANS LA CONSTRUCTION EN BOIS

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

Jutta Glanzmann et Andrea Frangi



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	Vers une généralisation de la construction en bois
10	Des innovations tout au long du processus de construction
18	Un premier bilan en vue de développements futurs
21	Options destinées à la recherche comme à la pratique
25	Annexe : aperçu des sept projets
35	Bibliographie
36	Le PNR 66 en bref

ÉDITORIAL



La construction en bois a le vent en poupe – de la campagne à la ville, du pavillon à l'immeuble, des nouvelles constructions aux transformations. En Suisse, nous sommes presque quotidiennement témoins de l'activité intense qui caractérise ce secteur. Elle se manifeste notamment sous la forme de lotissements modernes, de superstructures et d'extensions ingénieuses ou encore de bâtiments commerciaux de prestige.

Tout cela est fort bien, mais une politique des ressources durable exige d'aller encore plus loin. Dans le bâtiment, le bois peut largement concurrencer la pierre, le béton ou l'acier. Et le PNR 66 aborde justement les manières d'y parvenir. Des progrès rapides se révèlent nécessaires, notamment dans les techniques de collage et d'assemblage du bois, et se doivent d'être associés à une utilisation accrue du bois de feuillus dans le bâtiment. La construction hybride et le recours à de nouveaux matériaux composites s'avèrent par ailleurs très prometteurs. Tout cela doit aller de pair avec des optimisations, par exemple en matière d'isolation acoustique et de protection parasismique ou de traitement et de modification des surfaces.

Les avancées réalisées en termes de matériaux comme de structures porteuses ne pourront cependant pas s'imposer dans la pratique si la construction en bois suisse ne progresse pas également au niveau industriel. Les techniques numériques de planification et de production, robotique comprise, se doivent d'accompagner ces développements. Les programmes «Industrie 4.0» et «BIM» (Building Information Modeling) décideront bientôt de la faisabilité des projets architecturaux envisagés.

Mon rêve ? Évidemment, que le bois occupe une place bien plus importante dans le bâtiment en Suisse. Que les promoteurs, maîtres d'œuvre, bureaux d'études et architectes soient toujours plus nombreux à envisager le bois comme matériau de construction. Et que les entreprises de la filière bois soient compétitives et actives en Suisse tout en étant présentes sur la scène internationale. Certaines peuvent d'ores et déjà commercialiser leurs idées et techniques à l'étranger. Voilà qui est encourageant, car je suis convaincu que la construction en bois demeure une approche intelligente et productive, ici comme ailleurs.

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont pris part aux travaux de recherche, aux nombreuses manifestations de dialogue et à l'élaboration de ce rapport de synthèse.

Dr Martin Riediker

Président du comité de direction du PNR 66 Ressource bois

VERS UNE GÉNÉRALISATION DE LA CONSTRUCTION EN BOIS

Le matériau bois constitue un défi de par la haute technicité qu'il requiert, mais il se révèle également prometteur et extrêmement intéressant. L'identification des contextes d'application ainsi que le dialogue entre la recherche et la pratique contribuent à faire progresser la construction en bois.

Longtemps irremplaçable, le bois compte parmi les matières premières et les matériaux les plus anciens et les plus importants dans l'histoire de l'humanité. Son utilisation dans le bâtiment est une tradition qui remonte à la nuit des temps. Avec la pierre, il était le premier matériau utilisé pour bâtir des ponts et il a autrefois révélé son plein potentiel dans la construction navale (Steurer, 2006). L'inflammabilité du bois l'a toutefois amené à être progressivement délaissé dans le monde entier au profit de matières moins inflammables. Au cours des dernières décennies, de nombreux pays – dont la Suisse – ont néanmoins revu leurs prescriptions en matière de protection contre les incendies sur la base de travaux de recherche et de développement approfondis, si bien que les domaines d'application du bois ont pu être élargis.

Le bois présente en effet plusieurs avantages comme matériau de construction: il est léger, possède de bonnes propriétés thermiques et mécaniques et se travaille facilement. Le bois étant une matière première renouvelable, son utilisation dans le bâtiment permet un captage durable du dioxyde de carbone absorbé par les arbres durant leur croissance. Après déduction de toutes les émissions inhérentes à la production, près de 45 millions de tonnes de CO₂ sont ainsi fixées dans le bois au sein du parc immobilier suisse (Lignum, 2012). La fabrication de la plupart des produits à base de bois nécessite de plus nettement moins d'énergie que celle d'autres produits. Du fait de l'efficacité énergétique liée à la transformation du bois, les constructions légères faisant appel à ce matériau induisent moins d'énergie grise et génèrent moins d'émissions de gaz à effet de serre

que les bâtiments en béton armé (Glanzmann et al. 2012; Heeren et al. 2013).

Au cours des dernières années, le bois s'est libéré de son aspect marginal (considéré comme chaleureux et rustique, il était au mieux envisagé pour la construction d'une maison individuelle) pour devenir un matériau innovant présentant un riche potentiel d'avenir. Les multiples qualités du bois comme matériau de construction sont désormais aussi appréciées dans le contexte urbain (TEC21, 2016b). Une constatation s'impose de plus en plus: les opportunités encore inexploitées de la construction en bois se révéleront indispensables pour édifier les bâtiments durables du futur. Divers défis restent toutefois à relever pour avancer sur la voie de la généralisation.

Un matériau techniquement exigeant

L'anisotropie du bois comme matériau de construction se traduit par des caractéristiques à dépendance directionnelle qui présentent une forte variabilité du fait de la croissance naturelle. Les branches et les irrégularités de la pousse induisent par ailleurs des modifications très prononcées de la structure et de l'orientation des fibres. Par conséquent, les propriétés de ce matériau de construction varient énormément et les branches et irrégularités de croissance affectent souvent la résistance des éléments structurels. Il n'est donc guère étonnant que les très bonnes propriétés mécaniques du bois régulier n'aient pas été exploitées jusqu'à présent.

Le bois est aussi un matériau hygroscopique: l'humidité de la matière varie en fonction de l'humidi-

té relative de l'air et de la température ambiante. Ainsi, lorsque l'humidité de l'air ou la température varie, le volume des éléments en bois varie également (phénomène dit de contraction et de dilatation du bois qui dépend entre autres de la direction des fibres). En outre, les propriétés mécaniques du bois dépendent également de l'humidité du matériau et de la durée de la contrainte imposée. Un fort taux d'humidité accroît le risque de putréfaction et menace donc la durabilité des éléments structurels en bois (Niemz et Sonderegger, 2017).

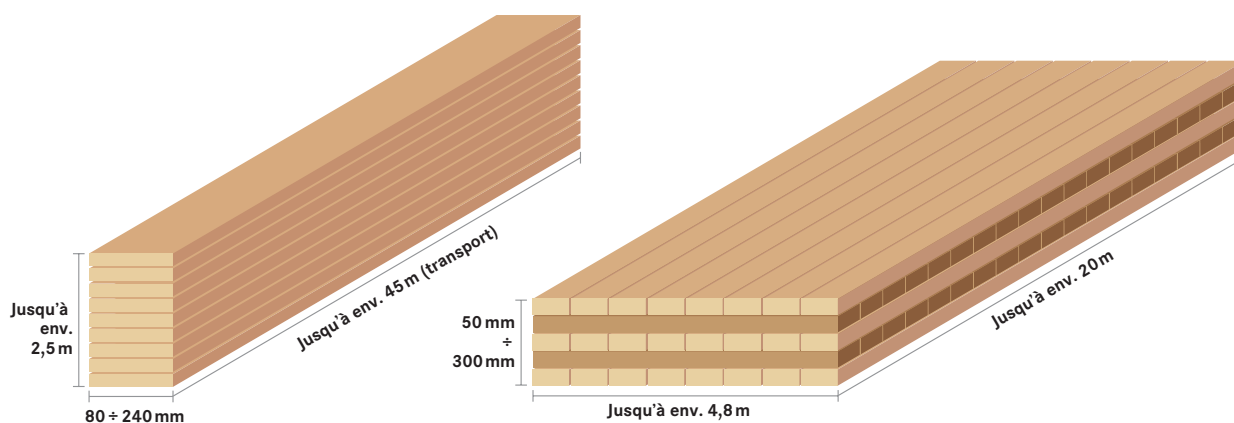
Le comportement à la rupture des matériaux et éléments de construction constitue un autre aspect déterminant du point de vue technique. Par rapport aux matériaux concurrents comme l'acier ou le béton armé, le bois s'avère cassant (sauf à la pression) et présente des propriétés très limitées en termes de ductilité (capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre) et de déplacements de charge. Associé aux variations de ses propriétés et à son caractère cassant, son comportement complexe incite par conséquent les ingénieurs à adopter une approche prudente, voire conservatrice, quant à son utilisation pour les éléments porteurs.

Des composants et structures porteuses efficaces grâce aux techniques de collage et d'assemblage

Les techniques modernes de collage et d'assemblage ont permis de créer divers matériaux dérivés du bois et elles ont ouvert de nouvelles opportunités et dimensions à la construction en bois qui étaient jusque-là fermées au bois massif. Ces matériaux résultent du collage de pièces de bois massif, de planches, de placages ou de panneaux de fibres ou de copeaux qui sont assemblés et pressés (à chaud) et s'agglomèrent lors du durcissement de l'adhésif.

Les éléments structurels assemblés par collage tels le lamellé-collé et le contreplaqué présentent d'ailleurs de nombreux avantages par rapport aux pièces en bois massif (Schickhofer et al. 2010). En effet, leurs propriétés mécaniques varient moins, leur forme est plus stable et ils permettent un choix totalement libre des dimensions. Ces atouts en ont fait des produits-phares dans la construction en bois. Bien que leur fabrication fasse l'objet d'importants efforts en matière de garantie qualité, elle n'en présente pas moins un énorme potentiel d'optimisation lorsqu'il s'agit d'accroître la rentabilité de ces matériaux par rapport à des produits concurrents en acier ou en béton.

Les assemblages ont fortement marqué le développement de la construction en bois. Essentiels dans ce domaine, ils demeurent toutefois un facteur contraignant pour ce secteur. Les clous, vis, chevilles, tourillons et baguettes en acier profilées et collées sont des instruments d'assemblage mécanique typiques de la construction en bois qui peuvent être utilisés de diverses manières en fonction des besoins (Herzog et al. 1991). Les essais réalisés révèlent que les assemblages se rompent presque toujours aux points de jonctions qui présentent une contrainte locale plus importante du fait de la diminution de section et de la répartition inégale des forces. La conception, le dimensionnement et la réalisation d'assemblages font donc l'objet d'une grande attention. Dans l'objectif d'un emploi optimal, l'utilisation commerciale du bois et des matériaux qui en sont issus nécessite des assemblages présentant une portance suffisamment grande (SAH, 2000). Malgré l'étendue des efforts accomplis dans la recherche et le développement, les assemblages recèlent encore un vaste potentiel d'optimisation.



III. 1 Représentation schématique d'éléments en bois collés : poutre en lamellé-collé (gauche) et planche de surface en contreplaqué (droite)

Protection incendie et insonorisation fiables pour de nouvelles utilisations

Au cours des dernières années, un désir accru de recourir au bois comme matériau de construction, en particulier dans les bâtiments d'habitation, s'est manifesté dans la société. Garantir une protection incendie suffisante constitue à cet égard une condition déterminante. La certitude d'habiter un logement protégé contre les incendies contribue largement au sentiment de sécurité. L'inflammabilité des éléments structurels a fortement influencé les choix effectués dans le bâtiment, raison pour laquelle les concepts traditionnels de protection contre les incendies donnent la préférence aux matériaux incombustibles (béton armé, brique). Pourtant, une planification et une réalisation rigoureuses de la structure porteuse et des détails de construction permettent désormais de bâtir des édifices en bois tout aussi sûrs de ce point de vue-là. Les directives suisses en matière de protection incendie éditées par l'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie tiennent d'ailleurs compte de cet aspect : les prescriptions 2003 (AEAI, 2003) autorisent l'utilisation de bois dans les habitations, les écoles et les bureaux comprenant jusqu'à six étages. En outre, au vu des expériences positives réalisées au cours des dix dernières années, les prescriptions de 2015 (AEAI, 2015) ont éliminé les limites qui subsistaient jusqu'alors pour l'utilisation du bois. Les éléments structurels en bois peuvent désormais être employés pour toutes les catégories de bâtiments et pour toutes utilisations (Lignum, 2017). Les possibilités d'application du bois s'en trouvent donc nettement élargies.

En ce qui concerne la protection contre le bruit, le bois est soumis aux mêmes exigences et méthodes d'évaluation que les constructions en dur (béton armé, brique). Toutefois, les constructions légères connaissent une problématique particulière liée à la propagation des basses fréquences, surtout celles inhérentes aux bruits de pas (Bartlomé, 2013). Outre la diffusion acoustique directe à travers les éléments de séparation, les bruits transmis par les éléments latéraux et les points de jonction constituent un problème de premier plan. En effet, dans ce type de construction légère, il n'est pas rare que la transmission indirecte par les parties contiguës prenne le pas sur la transmission directe. Dans un cas comme dans l'autre, la propagation du son dépend largement du principe de construction et des détails de l'ouvrage.

Vers une meilleure rentabilité grâce à la construction préfabriquée

La construction moderne en bois se caractérise par une planification minutieuse, un degré élevé et précis de préfabrication et une phase de réalisation très rapide (Kolb, 2010). Même si les coûts bruts des matériaux en bois sont supérieurs à ceux du béton armé, il demeure possible de bâtir à prix raisonnable avec le bois. En effet, la construction préfabriquée nécessite de prendre les principales décisions en amont, ce qui évite d' coûteuses modifications lors de la réalisation du gros œuvre et du second œuvre. En outre, la brièveté des travaux permet de réduire les intérêts ou les coûts inhérents aux intérêts bancaires et de percevoir des revenus locatifs plus tôt. En cas d'agrandissement ou de surélévation de bâtiments à capacité portante limitée, la construction en bois offre également des solutions avantageuses. En général, le coût des fondations est plus faible, car les structures en bois présentent un poids propre moins important. Cela permet une réelle économie lorsqu'il s'agit de bâtir sur un terrain en pente ou présentant de mauvaises propriétés mécaniques. Qui dit structure plus légère, dit aussi inertie plus faible en cas de tremblement de terre et donc réduction des mesures nécessaires à l'absorption des forces horizontales dues aux secousses sismiques. De nos jours, les bâtiments en bois atteignent des coefficients d'isolation élevés qui se traduisent par une baisse de la consommation d'énergie et d'importantes économies sur les frais d'exploitation. Par ailleurs, la construction à ossature en bois permet d'intégrer directement l'isolation dans les parois, ce qui permet un gain d'espace habitable grâce à des cloisons plus minces. Aujourd'hui, outre les simples coûts de construction, les coûts de cycle de vie sont de plus en plus souvent pris en compte dans les décisions d'investissement. Selon Glanzmann et al. (2012), la construction elle-même ne représente la plupart du temps que la moitié des coûts et les bâtiments en bois Minergie-P-Eco diffèrent très peu des ouvrages en béton armé ou en brique de même qualité quant aux coûts liés à leur cycle de vie. Il s'agit là d'un fait encore trop peu connu des investisseurs, qui explique pourquoi la construction en bois reste (encore) perçue comme désavantageuse lors du développement de projets et des recherches de financement.

La plate-forme de dialogue 1 : faire progresser la construction en bois

L'objectif du PNR66 Ressource bois était d'élaborer des bases scientifiques afin de répondre entre autres

à certaines questions posées par la construction en bois et de développer des solutions novatrices, qui ont été mises en œuvre aussi bien lors de la phase de recherche (2012 à 2016) qu'ensuite dans le cadre de l'étroite collaboration et du dialogue engagés avec les partenaires industriels. Cette démarche visait à établir la ressource bois comme une solution standard compétitive sur le marché suisse du bâtiment.

La plate-forme de dialogue 1 «Avancées technologiques dans l'utilisation du bois dans la construction» comprenait donc sept projets qui ont abordé divers aspects de la construction en bois et de son développement en vue d'utilisations futures, tant au niveau du matériau (p.ex. bois de feuillus) et des structures correspondantes que de la production en tenant en compte des problématiques de physique du bâtiment (p.ex. isolation phonique). À cet égard, les résultats de ces sept projets de recherche contribuent notablement à favoriser l'innovation en vue d'établir la construction en bois comme un standard permettant la réalisation des projets les plus divers en Suisse. Les découvertes qui en découlent viennent compléter les bases existantes dans une vision d'ave-

nir et permettront par ailleurs de faire progresser la construction en bois dans le secteur du bâtiment suisse, à condition que les résultats et le message qu'ils contiennent trouvent un écho favorable auprès des investisseurs et décideurs responsables.

Le présent rapport de synthèse s'adresse à un public varié: aux spécialistes de la filière bois, mais aussi aux personnes intéressées évoluant dans le domaine de l'économie ou de la politique et ne disposant pas de connaissances approfondies dans ce domaine. Les chapitres 2 et 4 sont accessibles à un très large public. Le potentiel d'innovation résultant de chacun des projets et les éventuelles questions apparaissant lors du processus de construction (planification, production et montage) seront dans un premier temps abordés. À titre de synthèse, les implications de ces travaux pour la formation, la recherche et la normalisation seront présentées en conclusion et mises en perspective. L'annexe est consacrée aux divers projets de recherche de la plate-forme de dialogue 1 et à leur intégration dans le contexte scientifique et industriel, elle est donc plutôt destinée à un public de spécialistes.



III. 2 Conçue par le bureau bernois Bürgi Schärer Architektur und Planung, l'auberge de jeunesse de Gstaad Saanenland, qui a ouvert ses portes en 2014, est une interprétation moderne des chalets traditionnels de la région. Il s'agit d'une construction hybride alliant béton, maçonnerie et bois. Les façades et le toit sont constitués d'éléments en bois préfabriqués assurant une excellente isolation thermique. (crédit photo: BÜRGI SCHÄRER Architektur und Planung AG, Alexander Gempeler)

DES INNOVATIONS TOUT AU LONG DU PROCESSUS DE CONSTRUCTION

Avec le processus de construction en ligne de mire, les résultats de recherche de la plate-forme de dialogue 1 sont axés sur les matériaux, la planification et la fabrication. En parallèle, ces projets ont permis d'établir des liens avec des partenaires économiques et de mettre ainsi d'ores et déjà en application certaines des découvertes issues de la recherche. Si l'on parvient à tirer parti des synergies et à conjuguer les processus, le secteur de la construction bois effectuera dans son ensemble un grand pas en avant.

Au regard du processus de construction, les projets de recherche de la plate-forme de dialogue 1 « Avancées technologiques dans l'utilisation du bois dans la construction » apportent de nouvelles connaissances déterminantes dans chacun des domaines examinés. Les principaux axes de recherche portent sur le matériau et son assemblage (bois de feuillus, bois et colle), la planification (nouveaux éléments structuraux, isolation phonique, étages multiples/planchers) ainsi que la fabrication (avec assistance robotique). Entre octobre 2015 et avril 2016, les synergies existantes entre chacun des projets et les avantages que peuvent présenter les résultats de recherche pour la pratique ont notamment fait l'objet de trois ateliers organisés dans le cadre de la plate-forme de dialogue 1. Ce dialogue entre recherche et industrie a connu un premier développement (voir encadré page 16) lors du lancement de la phase de synthèse à Olten en avril 2016. De même, la discussion a donné lieu à des points de contact avec des projets de recherche d'autres plates-formes de dialogue du PNR 66 : dans le domaine de l'approvisionnement en bois (gestion des forêts, scieries), d'autres transformations et utilisations du bois (comme la production de papier et carton ou l'élaboration de produits chimiques) ou du recyclage (transformation du vieux bois pour la production d'énergie). Quelques premières lacunes ou déficits des projets de recherche ont pu par la même occasion être identifiés.

Bois et types d'assemblage

L'utilisation industrielle du bois et des matériaux en bois nécessite des assemblages très performants. L'objectif consiste à utiliser entièrement la section transversale du bois afin que la résistance portante de l'assemblage corresponde à celle des éléments joints. Or, ces conditions idéales ne peuvent être atteintes qu'avec des assemblages collés, par exemple au moyen d'une enture dentelée droite pour les lamelles destinées au lamellé-collé. Par contre, le collage ne convient pas à l'assemblage de tiges en bois, notamment en ce qui concerne les éléments de jonction des charpentes, si bien que l'on recourt habituellement à des assemblages mécaniques pour ces utilisations. Contrairement à un assemblage mécanique, la rigidité d'un assemblage collé fait qu'il lui est quasiment impossible d'absorber l'effet des différentes déformations inhérentes aux variations d'humidité. C'est là qu'entre en jeu le projet *Vasilopoulos* (voir page 27) qui visait à générer des données fondamentales afin de développer de nouveaux assemblages collés bois-bois. La résine acrylique s'est avérée le produit adhésif présentant le plus fort potentiel pour un assemblage ductile (bien dilatable, déformable). Une ductilité élevée est déterminante pour absorber l'effet des diverses déformations inhérentes aux variations d'humidité. Les résultats des essais de traction ef-

fectués sur les assemblages bois-bois avec résine acrylique ont révélé une ductilité très prometteuse. Il reste à déterminer si cette constatation s'applique également aux éléments de jonction des charpentes. Les assemblages collés exigent une préparation du bois des plus rigoureuses et supposent donc des conditions industrielles correspondantes avec assurance et contrôle qualité. S'il reste encore bien du chemin à parcourir avant de disposer d'assemblages bois-bois fiables et durables, les premiers pas accomplis ont été couronnés de succès.

Le type d'assemblage joue également un rôle déterminant quant à la fabrication automatisée d'éléments structurels à l'aide de la robotique. La production robotisée de charpentes en bois entraîne en effet de nouvelles exigences à l'égard des assemblages. Soit on accorde la priorité à des assemblages simples et rapides en acceptant une faible portance éventuelle, soit on privilégie – à l'instar du génie civil classique – des assemblages plus complexes, mais moins nombreux dotés d'une forte capacité de charge. Comme le montre le projet *Kohler* (voir page 33), il semblerait que les assemblages conventionnels offrent peu de solutions satisfaisantes pour ces utilisations. L'équipe de recherche a donc exploré une nouvelle approche en privilégiant des colles injectées ultrarapides afin d'optimiser la technique d'assemblage en vue d'une fabrication automatisée. À l'occasion de l'atelier organisé à Bienne (voir encadré page 16) réunissant des représentants de la recherche et de

l'industrie, il est apparu clairement que la question de l'assemblage collé du bois constitue un objectif certes ambitieux, mais qui présente indubitablement un potentiel de mise en œuvre. Les prochains défis résident dans la mise au point de solutions de montage aussi efficaces que possible et l'optimisation de la rentabilité des assemblages (nombre et coûts des jonctions, etc.).

Des produits de grande qualité en bois de feuillus

Dans les forêts suisses, la part de feuillus a augmenté d'environ un cinquième au cours des 25 dernières années, un phénomène qui s'explique par le changement climatique, mais aussi une gestion des forêts plus proche de la nature. Au cours de la même période, la population de résineux a largement diminué. En Suisse comme ailleurs, ce changement de composition des forêts confère au hêtre une importance considérable en tant que matière première forestière. Aujourd'hui, un bon tiers du bois de feuillus coupé en Suisse est utilisé pour la production d'énergie, c'est-à-dire brûlé sans avoir préalablement été utilisé comme matériau (Krackler et al. 2010). C'est le bois de résineux qui est privilégié dans la construction en bois actuelle. En raison de ses propriétés mécaniques nettement supérieures à celles du bois de résineux habituel, le bois de feuillus devrait ouvrir la voie à de nouvelles applications de la construction en bois, qui sont aujourd'hui occupées par le béton armé et l'acier. Il ne se positionne donc pas comme un substitut



III. 3
Nouveau bâtiment à l'EPF Zurich
(House of Natural Resources) construit
avec des éléments structurels en bois
de feuillus (frêne et hêtre)
(crédit photo: EPF Zurich / Marco
Carocari)

au bois de résineux, mais vient plutôt compléter et élargir l'éventail des solutions disponibles pour la construction en bois. Ce type de bois peut également permettre de réaliser des assemblages plus résistants au niveau des jonctions. D'un point de vue économique, ce sont les bâtiments à plusieurs étages (immeubles d'habitation et autres) et les structures couvertes qui offrent les meilleures opportunités pour une utilisation accrue du bois de feuillus. Les essais réalisés révèlent en effet que si l'on compare, par exemple, les performances et les prix de piliers en béton armé hautement résistants à ceux de piliers en hêtre de même qualité, ces derniers sont tout à fait compétitifs.

Toutefois, des collages fiables sont indispensables si l'on veut pouvoir utiliser le bois de feuillus pour la construction. Les techniques établies pour le bois de résineux ne peuvent cependant pas être étendues au bois de feuillus, ce qui requiert une compréhension approfondie des mécanismes physiques fondamentaux entrant en jeu dans le collage de ce type de bois. D'où l'intérêt du projet Niemz (voir page 25), qui pose les bases d'une modélisation et d'une optimisation fiables des assemblages collés pour le bois de feuillus. Le modèle ainsi mis au point permet en outre d'élaborer et d'optimiser des composants hybrides, tel ceux obtenus par collage de lamelles de différentes essences de bois (par exemple de hêtre et d'épicéa) et utilisés dans la House of Natural Resources de l'EPFZ (cf. Illustration 3). Le professeur Niemz poursuit ses recherches en collaboration avec plusieurs parte-

naires économiques (comme Collano SA, Henkel SA et Neue Holzbau AG). En parallèle se poursuivent notamment le projet financé par l'OFEV intitulé «Lamellé-collé en hêtre» (sous la direction de René Steiger de l'Empa, en collaboration avec l'EPF Zurich et la BFH) et l'initiative de Fagus Jura pour la construction d'un centre de production destiné à l'usinage de lamellé-collé en hêtre. Pour la première fois, le secteur de la construction en bois disposera de produits de haute qualité en hêtre (lamellé-collé, contreplaqué) ou de sections hybrides qui favoriseront particulièrement le marché des bâtiments à plusieurs étages, s'inscriront dans la tendance actuelle des immeubles en bois et pourront aussi être exportés (Frangi et Steiger, 2015).

Composé de fins placages collés, le placage stratifié de hêtre est nouveau sur le marché. Il possède des propriétés mécaniques et un effet homogénéisant supérieurs à ceux du lamellé-collé en hêtre, offrant ainsi une fiabilité élevée. L'utilisation de couches transversales lui confère en outre une très bonne stabilité de forme. Dans le cadre du projet *Frangi* (voir page 29), l'équipe de recherche a mis au point des structures innovantes à partir de placage stratifié de hêtre. Des bases de calcul définies grâce aux expériences réalisées ont permis de dimensionner des assemblages mécaniques fiables et ductiles des barres en treillis améliorant la robustesse de la charpente. Grâce aux excellentes propriétés mécaniques du placage stratifié en hêtre, des structures couvertes de grande envergure peuvent être conçues et réalisées avec peu de matériaux.



III. 4
Construction du bâtiment de production destiné au secteur Construction en bois d'Implenia à Rümlang, avec charpente en placage stratifié de hêtre (crédit photo: Implenia Suisse SA / Construction en bois)

Le professeur Frangi collabore avec divers partenaires économiques (tels Implenia Suisse SA/ Construction en bois et WaltGalmarini AG) qui sont en mesure de mettre en pratique les résultats de la recherche. En 2016, Implenia a ainsi utilisé du placage stratifié de hêtre pour la structure porteuse de son nouveau bâtiment de production de Rümliang, qui est précisément destiné au secteur de la construction en bois (cf. illustration 4).

Nouveaux éléments et systèmes de construction

Plusieurs projets de la plate-forme de dialogue 1 étaient consacrés aux constructions novatrices et à leurs implications au niveau de la statique et de la physique du bâtiment. Trois projets concernaient plus particulièrement la mise au point de nouveaux systèmes de planchers comme alternative aux dalles en béton armé qui prédominent actuellement sur le marché. Les planchers sont en effet des éléments-clés de la structure porteuse d'un bâtiment. Ils doivent répondre à diverses exigences en matière de statique, d'isolation phonique, de protection incendie, de coûts, de domotique, etc. Ils exercent en outre une influence déterminante sur les coûts et les délais de construction du gros œuvre. Pour les immeubles en particulier, les critères de protection contre le bruit sont plus stricts

que pour les bâtiments à un étage ou les maisons individuelles. Pour pouvoir y répondre, les constructions à planchers en bois doivent souvent recourir à une conception multicouche qui induit une complexité et un alourdissement supplémentaires. Relativement épais, les planchers obtenus se révèlent plus onéreux et donc moins compétitifs que les structures conventionnelles en béton armé. L'autre problématique couramment rencontrée avec les planchers en bois concerne l'isolation insuffisante des basses fréquences de moins de 200 Hz, qui sont notamment générées lorsque les occupants marchent ou sautent, écoutent de la musique en Dolby Surround ou utilisent leur home cinéma, etc. Les structures en bois de hêtre lamellé tourillonné avec chape flottante et plafond suspendu mises au point dans le cadre du projet *Krajčič* (voir page 30) présentent de bonnes propriétés quant aux bruits d'impacts, même dans les basses fréquences, et sont à cet égard comparables aux dalles conventionnelles en béton armé. L'utilisation de papiers élastiques correctement dimensionnés réduit la propagation des sons dans les éléments latéraux et permet simultanément d'abaisser les coûts liés à l'insonorisation complexe des bruits d'impact.

Grâce à la synergie du bois et du béton, les planchers composites présentent de bonnes propriétés de statique, d'insonorisation, mais aussi de



III. 5

Planches en placage stratifié de hêtre comme coffrage et armature pour les planchers composites bois-béton dans la House of Natural Resources de l'EPFZ, Zurich Höggerberg (Frangi, 2014)
(crédit photo: EPF Zurich / IBK)

protection incendie, et conviennent de nos jours à de multiples usages en tant que planchers massifs pour les bâtiments à étages. Toutefois, malgré leurs nombreux avantages, ces structures composites ne s'avèrent pas encore assez compétitives par rapport aux dalles en béton armé, en raison notamment des coûts plus élevés du bois. Le projet *Franzi* a donc débouché sur la mise au point d'un nouveau type de plancher composite bois-béton: l'emploi de fines planches en placage stratifié de hêtre, qui servent à la fois de coffrage et d'armature pour le béton, permet de réduire considérablement les coûts du bois. L'ensemble des coûts des planchers composites bois-béton développés avec des planches en hêtre relèvent ainsi du même ordre de grandeur que ceux des dalles en béton armé, mais avec un avantage écologique non négligeable puisque la part de ciment et d'acier est bien plus faible. Ces planchers novateurs ont été utilisés pour la première fois dans la House of Natural Resources de l'EPFZ (cf. illustration 5) (Franzi, 2014). Issue de l'EPFZ, la société Swiss Timber Solutions SA a vu le jour afin de commercialiser cette technologie et d'autres tout aussi innovantes. De nouveaux bâtiments sont déjà planifiés. Par ailleurs, un nouveau projet CTI a été lancé en collaboration avec Implenia Suisse SA / Construction en bois et le bureau d'études WaltGalmarini AG. Il est axé sur l'optimisation des planchers composites bois-béton avec planches en hêtre, afin de pouvoir systématiquement les présenter aux acteurs de la pratique comme une alternative aux dalles en béton armé. Spécialisé dans la construction bois, le

bureau d'ingénieurs Pirmin Jung AG réalisera en 2017 un grand complexe résidentiel à Berlin avec les structures composites bois-béton ainsi développées. L'intérêt manifesté vis-à-vis de ces planchers composites et les premières expériences positives réalisées à l'échelle industrielle sont révélateurs de leur fort potentiel d'application.

Le projet *Zwicky* (voir page 28) portait sur la formulation, les propriétés thermiques et mécaniques, et le dimensionnement des bétons de bois allégés. Les résultats obtenus ont révélé une grande capacité de stockage de la chaleur et des propriétés d'isolation thermique comparables à celles d'autres bétons allégés. La principale découverte est un nouveau béton de bois allégé susceptible d'être coulé, autocompactant, léger et rentable, idéal pour les chapes. Impliqué dans le projet, le partenaire économique Erne AG Holzbau se chargera de mettre en application ce nouveau matériau composite dont les premières utilisations sont déjà prévues.

Les prescriptions 2015 en matière de protection incendie autorisent désormais la construction de cages d'escaliers en bois comme voies d'évacuation verticales (elles devaient auparavant être réalisées en béton armé). Sur l'important marché des immeubles, on s'attend ainsi à une recrudescence future de logements, bureaux et écoles de hauteur moyenne (trois à huit étages) entièrement construits en bois. Cela permettra donc de rationaliser et d'accélérer le processus de construction,



III. 6

Installation du balancier pour les tests de vibration sur une construction à ossature en bois de trois étages (crédit photo : Empa)

mais aussi d'améliorer encore la rentabilité des ouvrages en bois. Les structures porteuses classiques de plusieurs étages doivent toutefois encore être peaufinées, en particulier afin d'optimiser le comportement des éléments de renforcement horizontaux et leur dimensionnement face aux sollicitations inhérentes aux séismes et aux vents violents. D'où l'intérêt du projet *Steiger* (voir page 32), qui pose les bases d'une modélisation et d'une optimisation fiables de la structure de renforcement pour les constructions à plusieurs étages. L'étroite collaboration avec le partenaire économique Pirmin Jung AG a permis de conduire des tests de vibration sur une construction de plusieurs étages à ossature bois et planchers composites bois-béton (cf. illustration 6). Compte tenu des données issues des études expérimentales sur les assemblages, les éléments muraux et les bâtiments, les ingénieurs pourront à l'avenir évaluer de façon plus fiable les paramètres de rigidité, de capacité de charge et de capacité de déformation lors du calibrage statique. La structure de renforcement développée et optimisée pour les bâtiments à plusieurs étages, la standardisation des assemblages ainsi que le perfectionnement des méthodes de calcul contribuent largement à améliorer la compétitivité de la construction en bois. Cette meilleure rentabilité s'accompagne également d'une plus grande sécurité de planification et d'une fiabilité accrue. Il s'agit désormais de diffuser ces nouvelles connaissances et les normes correspondantes au niveau national et international afin que tout le secteur de la construction en bois puisse en bénéficier.

Planifier et construire à l'aide du numérique

Grâce à l'introduction de machines contrôlées par ordinateur dans les années 80, la construction en bois a gagné en importance. Le recours à la technologie numérique permet en effet d'améliorer l'efficacité de la planification, de la fabrication et la qualité d'une construction, mais aussi de réaliser des ouvrages aux formes architectoniques complexes. Le Pôle de recherche national (PRN) Fabrication numérique a été lancé en 2014 avec l'objectif de mettre au point des processus de construction à l'architecture novatrice reposant à la fois sur une conception assistée par ordinateur et sur une technique robotique. Les travaux expérimentaux et numériques réalisés dans le cadre du projet *Kohler* (voir page 33) ont fourni les données élémentaires destinées à une conception assistée par ordinateur et à un assemblage robotisé de structures porteuses complexes en bois. Ces fondements sont déterminants pour toute la filière du bois, car ils ouvrent la voie à de nouvelles applications, d'autant plus qu'ils ne portent pas seulement sur les assemblages d'éléments en bois au moyen des colles injectées à prise ultrarapide évoquées plus haut, mais apportent également de nouvelles connaissances dans ce domaine. La technique de charpente novatrice mise au point pour le nouveau bâtiment de l'Arch_Tec_Lab de l'Institut de technologie dans l'architecture (ITA) à l'EPF Zurich (TEC21, 2016a) (cf. illustration 7) met en évidence le potentiel résultant de l'association de



III. 7

La charpente séquentielle, Zurich, 2010–2016: charpente de couverture en bois fabriquée numériquement pour le nouveau bâtiment de l'Arch_Tec_Lab de l'Institut de technologie dans l'architecture à l'EPF Zurich, mise au point par les professeurs d'architecture et de fabrication numérique et réalisée par l'entreprise Erne AG Holzbau (TEC21, 2016a) (crédit photo: Andrea Diglas / ITA / Arch-Tec-Lab AG).

techniques de planification numérique et de fabrication robotique et de matériaux de construction durables et locaux comme le bois. Composée de 168 pans individuels, cette charpente de forme libre couvre 2308 m². L'usinage robotisé des 48 624 sections assemblées en éléments porteurs a permis ici une réalisation efficace de la géométrie libre de cette toiture.

Ces questions ont entre autres été abordées lors du troisième atelier de la plate-forme de dialogue 1 (voir encadré). Ce dernier était en effet consacré à la synergie nécessaire au succès qui résulte de l'alliance entre créativité humaine, tradition de construction, technique et processus correspondants. Le devant de la scène était ce faisant occupé par les processus industriels. Le conflit apparent entre vouloir que chaque projet de construction soit planifié et mis en œuvre individuellement et aspirer à des processus de construction standardisés ne doit pas être considéré comme une contradiction. Il importe en effet de minimiser les activités non productives et non créatrices de valeur et d'élaborer (ou de perfectionner) des processus innovants et durables. En cela, tous les acteurs du bâtiment ont un rôle à jouer.

Exploiter les synergies grâce à un dialogue transversal

Voici en résumé les contributions à l'innovation des projets de la plate-forme de dialogue 1, rapportées au contexte des processus de construction et des exigences qui en découlent pour la pratique. Lorsque l'on considère les résultats obtenus à l'aune des cinq objectifs de la politique de la Confédération concernant la ressource bois (voir encadré), mais aussi de l'orientation formulée dans le plan d'action bois en faveur d'une augmentation de la part du bois dans le génie civil (bâtiments de grande ampleur, transformations, constructions en bois de feuillus, nouvelles utilisations et processus optimisés), il apparaît clairement que les projets de recherche de la plate-forme de dialogue 1 apportent une contribution essentielle à l'atteinte des buts fixés et au perfectionnement des méthodes développées. La condition sine qua non demeure toutefois que les synergies existant entre les différents projets – au-delà de ce champ de dialogue – puissent être exploitées et les résultats ancrés dans des solutions concrètes.

Dialogue avec la pratique

Dans la perspective du transfert de connaissances et de technologie, trois ateliers s'inscrivant dans le cadre de la plate-forme de dialogue 1 « Avancées technologiques dans l'utilisation du bois dans la construction » ont eu lieu entre octobre 2015 et avril 2016 et réuni des représentants de la pratique et de divers secteurs sur les thèmes suivants:

Atelier 1 sur le thème des assemblages collés « Innovative Concepts for Glued Connections in Timber Constructions »

Haute école spécialisée bernoise, Architecture, bois et génie civil, Biel/Bienne, 15 et 16 octobre 2015

Atelier 2 sur le thème « Le bois de feuillus dans la construction »

EPF Zurich, Institut pour l'analyse des structures et de la construction IBK, 28 janvier 2016

Atelier 3 sur le thème « Fabrication industrielle »

Ecole polytechnique fédérale Lausanne (EPFL), 6 avril 2016

En ce qui concerne les rapports et les documentations des ateliers cf. www.pnr66.ch

Politique des ressources et plan d'action bois

Cinq objectifs

1. Utiliser entièrement le potentiel de production de bois durablement exploitable des forêts suisses en s'appuyant sur une économie forestière performante.
2. Accroître la demande intérieure de produits en bois (bois-matière), en particulier celle portant sur les produits fabriqués à partir de bois issu de forêts domestiques.
3. Développer le bois-énergie, en veillant à une exploitation durable ainsi qu'à une valorisation efficace et propre.
4. Renforcer la capacité d'innovation de la filière bois.
5. Faire en sorte, grâce à une coordination optimale, que la politique de la ressource bois contribue de façon importante à la réalisation des objectifs d'autres politiques sectorielles.

(Source: Plan d'action bois, Atelier du 16 mars 2016, présentation de Rolf Manser, chef de la division Forêt)



III. 8 Immeuble de cinq étages à La Tour (Valais), datant de 1958. (crédit photo : JHG Photography)

UN PREMIER BILAN EN VUE DE DÉVELOPPEMENTS FUTURS

L'avenir de la construction en bois s'appuie sur deux leviers importants : l'industrialisation et la numérisation. Les synergies entre matériaux et processus de construction offrent un vaste potentiel encore inexploité, aussi bien au niveau de la planification et de la production que du montage. Qualité, précision et efficacité sont d'autres atouts de ce mode de construction durable qui établissent de bonnes conditions pour la révolution numérique.

Progrès technologique

Les projets de recherche se révèlent très prometteurs dans les domaines des **techniques d'assemblage et de collage**. Les éléments collés en bois de feuillus posent les fondements nécessaires à une utilisation accrue de cette essence en tant que matériau de construction de haute qualité. Alliés à une fabrication numérique, ils permettront d'envisager des techniques de fabrication complètement nouvelles et très différentes ainsi que des solutions de conception formelles à base de bois, si ces innovations réussissent à franchir le cap de la pratique.

Le potentiel du **bois de feuillus** se situe principalement dans des domaines où le bois n'est pas encore utilisé aujourd'hui. Les projets de recherche présentent des démarches intéressantes qui demandent encore à être peaufinées et il sera à ce titre nécessaire de faire preuve d'imagination. Les résultats désormais disponibles pour le hêtre, par exemple en ce qui concerne les planchers composites, valent également en partie pour l'épicéa. Les approches similaires à celles adoptées dans la construction aéronautique afin de perfectionner l'utilisation d'un matériau ne manquent pas non plus d'intérêt.

Les résultats obtenus dans le domaine des **constructions de planchers** sont également très

prometteurs. À l'heure actuelle, il existe sur le marché une grande diversité de systèmes, ce qui représente un inconvénient par rapport à la construction en béton armé. Un choix plus restreint de systèmes de planchers constituant des solutions standard constituerait donc un réel progrès. Si le développement effectif de ce genre de solutions n'incombe pas à la recherche, tester leur potentiel relève bien de la mission des scientifiques. À cette fin, il est par conséquent nécessaire que les échanges entre la recherche et l'industrie s'intensifient.

La **structure porteuse en bois**, optimisée spécialement pour les régions de faible à moyenne sismicité et à vents modérés, représente un pas de plus vers la généralisation de la construction en bois et se révèle particulièrement intéressante pour les ouvrages de grande envergure et les bâtiments à plusieurs étages.

Exploiter les synergies et intensifier le dialogue

Les projets de la plate-forme de dialogue 1 «Avancées technologiques dans l'utilisation du bois dans la construction» suivent des approches intéressantes quant aux assemblages, composants et procédés et ouvrent également la voie à des synergies. Ce potentiel réside non seulement dans les problématiques et solutions individuelles (voir projets 1

à 7 en annexe), mais aussi dans l'association entre matériaux et processus de construction.

Dans le secteur de la construction en bois, la recherche et l'industrie ne fonctionnent pas indépendamment l'une de l'autre. C'est ce que les discussions menées lors des trois ateliers parallèles à la plate-forme de dialogue 1 ont clairement mis en lumière: soit l'industrie a déjà une idée en tête et la recherche l'aide à trouver une possibilité de la mettre en œuvre, soit la recherche est confrontée à des problèmes fondamentaux qu'elle soumet aux entreprises. Il n'est pas rare que de nouvelles solutions voient le jour de façon quasiment fortuite, ou que de nouveaux thèmes et problématiques apparaissent et orientent alors la réflexion.

Une solution favorisant la densification urbaine

Entre 2009 et 2014, l'utilisation du bois pour les bâtiments collectifs a augmenté de 73% en Suisse. Au cours des deux dernières années, près de 500 nouveaux logements collectifs recourant à la construction en bois ont vu le jour (TEC21, 2016b). Situés pour la plupart dans les grandes villes et les agglomérations, ils confirment que le bois fait une percée en ville, même si seulement 6% des logements collectifs sont construits avec ce matériau (cf. illustration 9).

Compte tenu de la pénurie de ressources foncières, il est inévitable que population et constructions se densifient dans les agglomérations. Bâtir en ville présente des défis de taille quant à la logistique et

au processus de construction, qui doit se dérouler sans perturber les activités quotidiennes et générer aussi peu de bruit et de poussière que possible. Le taux élevé de préfabrication et les avantages de durabilité que présente le bois rendent ce mode de construction plus que compétitif pour les nouveaux ouvrages, mais surtout pour la modernisation des bâtiments existants. La majeure partie du parc immobilier suisse est composée d'immeubles construits dans les années 1980. Ils sont très gourmands en énergie et ne répondent plus aux exigences croissantes de qualité d'habitation. Toutefois, le taux de modernisation (enveloppe des bâtiments, aménagements intérieurs, etc.) demeure très faible, entre autres du fait que les propriétaires reportent les coûts énergétiques sur leurs locataires. Les surélévations permettent pourtant d'accroître la valeur immobilière et les revenus locatifs, lesquels peuvent à leur tour être investis dans la modernisation du bien (cf. illustration 10). Les transformations et surélévations de bâtiments existants continueront de se multiplier. La construction en bois peut également offrir des solutions avantageuses dans ces domaines. Tel est le message qui doit être plus fortement ancré auprès des investisseurs, d'autant plus que le choix du type de construction leur revient généralement, sans oublier les arguments pertinents en matière de société, d'économie et d'écologie. Les projets de recherche du PNR66 menés dans le domaine des «Avancées technologiques dans l'utilisation du bois dans la construction» fournissent des solutions intéressantes aux questions de matériaux, de fabrication ou de construction qui peuvent étayer une argumentation en ce sens.



III. 9
Lotissement Freilager à Zurich Albisrieden, l'un des plus grands projets d'immeubles d'habitation inaugurés en 2016 dans la ville de Zurich (crédit photo: Lignum / Michael Meuter, Zurich)



III. 10
Supertanker: transformation et surélévation (2007) en bois d'un entrepôt existant à Zurich Binz (crédit photo: Stücheli Architekten AG)

Généralisation grâce à la révolution numérique

La compétitivité passe aussi par l'optimisation des processus. La révolution numérique prendra la relève des structures et processus conventionnels et ouvrira la voie à une démarche optimisée en matière de planification, de réalisation et d'exploitation des bâtiments. La modélisation numérique des données du bâtiment (BIM, Building Information Modeling) se trouve ainsi au cœur de cette approche. Elle consiste à rassembler, associer et modéliser toutes les données pertinentes (composants, pièces, matériaux, mesures, coûts, délais, procédés de travail, etc.) en un modèle numérique de bâtiment en 3D. Il ne faut toutefois pas confondre visualisation en 3D et méthode BIM. Le potentiel de la modélisation BIM ne s'exploite que grâce à l'association, à la réutilisation et à l'interchangeabilité des données du bâtiment. Cela vaut tout particulièrement pour la modernisation de structures existantes dans la mesure où il devient possible de relever des données géométriques en 3D sur place et de les intégrer de manière fluide à une multitude d'attributs afin d'élaborer un modèle de bâtiment tridimensionnel.

Dans la modélisation BIM, l'essentiel est d'adopter une méthode de travail collaborative qui favorise la communication entre toutes les personnes impliquées et crée une base de travail globale et actualisée en permanence. Cela permet de mieux gérer les interfaces, d'améliorer la coordination et par suite de détecter et de résoudre très tôt les problèmes éventuels liés à la planification et à la réalisation. Il en découle une plus grande sécurité de planification et de réalisation en ce qui concerne les délais et les coûts. Un défi demeure toutefois : l'optimisation des échanges de données facilitant une planification 3D interdisciplinaire et intersectorielle. Avec le logiciel 3D-CAD et le système CNC, la filière bois est bien équipée pour la révolution numérique, ainsi que le démontrent de nombreux projets-phares aux formes libres (comme le Yeosu Golf Resort en Corée du Sud, cf. illustration 11). De la sorte, la construction en bois peut également jouer un rôle déterminant dans le secteur du bâtiment et le bois devenir un mode de construction compétitif. Il importe pour ce faire que l'ensemble de la filière bois puisse bénéficier de la révolution numérique.



III. 11 Yeosu Golf Resort, Corée du Sud, 2007, conçu par l'architecte Shigeru-Ban et réalisé par l'entreprise Blumer-Lehmann AG (crédit photo : Blumer-Lehmann AG)

OPTIONS DESTINÉES À LA RECHERCHE COMME À LA PRATIQUE

Si l'on veut pouvoir mettre en pratique les résultats obtenus dans le domaine de la construction en bois, il importe de fournir des efforts particuliers et d'instaurer les conditions-cadres correspondantes – que ce soit dans la formation initiale et continue, dans la recherche et le développement, dans la standardisation ou encore dans le contexte économique et social. Par conséquent, les principales recommandations destinées aux acteurs de la recherche et de la pratique seront résumées en conclusion sous forme de mots-clés.

Formation initiale et continue

Les disciplines techniques doivent occuper une place suffisante dans la formation en architecture. La construction en bois doit passer de l'exception à la normalité dans la formation comme ailleurs, et ce sans être cantonnée dans les établissements spécialement orientés vers cette filière. Les choses ont certes déjà bien évolué, mais une importante marge de progression demeure.

La révolution numérique donne naissance à de nouveaux secteurs d'activité et domaines professionnels. Les compétences en planification et construction numériques doivent être développées dans les hautes écoles et les hautes écoles spécialisées, ce qui nécessite que les cours soient adaptés en conséquence. Le savoir étant par ailleurs très évolutif, la formation continue revêt tout autant d'importance pour l'ensemble de la filière.

Recherche et développement

Les activités de R et D permettent d'améliorer constamment la compétitivité économique de la construction en bois suisse et de consolider ainsi sa position de leader. Ce pool de connaissances doit non seulement trouver application en Suisse, mais

aussi être commercialisé à l'échelle internationale et encourager le développement de nouveaux modèles économiques.

Les axes thématiques de recherche doivent se focaliser sur le perfectionnement et l'optimisation des matériaux et produits de haute qualité à base de bois, des techniques de collage et d'assemblage et des processus correspondants. La révolution numérique actuelle et le changement de paradigme structurel – d'une société construite sur la croissance à une société marquée par la raréfaction des ressources – constituent la toile de fond de cette démarche. À cet égard, le dialogue initié entre la recherche et la pratique par le PNR66 se révèle déterminant pour une future évolution positive de toute la branche et il doit donc être poursuivi en conséquence. Dans ce contexte, le réseau thématique national S-WIN (Swiss Wood Innovation Network) joue un rôle essentiel.

Normalisation

La normalisation peut être un élément-clé positif pour accélérer la mise en œuvre de nouvelles technologies dans l'industrie, sans requérir d'autorisation au cas par cas. Cependant, une normalisation trop stricte risquerait de freiner l'innovation.

En Suisse, les projets de structures porteuses s'appuient surtout sur les normes SIA correspondantes, qui ont été élaborées sur la base du système de milice au sein de commissions regroupant des membres de toutes les entités impliquées dans le processus de normalisation (bureaux d'études, entreprises, maîtres d'œuvre, autorités) et servent de références pratiques aux spécialistes bénéficiant d'une formation appropriée. Les normes SIA relatives aux structures porteuses sont claires et accessibles, se basent sur la responsabilité individuelle et la formation et encouragent, voire facilitent, l'innovation responsable.

À l'avenir, il est possible que l'on recourt en Suisse également de plus en plus souvent aux normes européennes en matière de structures porteuses (Eurocodes), qui sont actuellement en révision. Par conséquent, la SIA a lancé un projet visant à susciter un engagement accru dans l'élaboration des Eurocodes de deuxième génération (SIA, 2014). L'objectif de cette démarche consiste à intégrer dans la refonte en cours des Eurocodes la philosophie des normes SIA cohérentes et ancrées dans la pratique. Si l'on parvient à une harmonisation supplémentaire, les normes SIA relatives aux structures porteuses pourraient disparaître au profit des Eurocodes dès 2020/2022. Dans le cas contraire, il faudra élaborer une version actualisée des normes SIA en s'alignant sur les normes et le droit européens. La construction en bois suisse peut également jouer un rôle de premier plan et apporter un savoir important en matière de normalisation.

Outre les normes relatives aux structures porteuses, l'industrie du bâtiment est confrontée à un nombre croissant de normes de produits. Là aussi, il est crucial que la Suisse contribue activement à l'élaboration de celles-ci afin d'assurer la compétitivité de toutes les parties prenantes. Le financement des travaux de normalisation demeure toutefois difficile et doit donc être soutenu pour les raisons exposées plus haut.

Économie et société

Construire en bois permet de relever de grands défis architecturaux, le bois étant tout simplement idéal pour les formes libres. La révolution numérique fait que l'on privilégie désormais les modes de construction compatibles avec la modélisation BIM: avec 3D-CAD et le système CNC, la filière bois est bien outillée.

La population apprécie le bois, une matière qui permet de maintenir un climat intérieur confortable tout au long de l'année. Dans les divers emplois du bois, que ce soit en façade, en intérieur et comme élément structurel porteur ou non, on constate que les architectes souhaitent à l'instar de la société donner une visibilité à ce matériau. Grâce aux prescriptions en matière de protection incendie adoptées depuis 2015 en Suisse, les éléments de construction en bois (à l'exception de ceux des voies d'évacuation) peuvent être laissés apparents dans les bâtiments mesurant jusqu'à 30 mètres de



III. 12

UBC Brock Commons, résidence étudiante de 18 étages de l'Université de Colombie-Britannique à Vancouver, tenante actuelle du record du monde de hauteur en matière de construction en bois (crédit photo: KK Law)

hauteur. La question de l'altération due aux intempéries et de la durabilité se pose toutefois pour les façades. C'est là qu'entrent en jeu les projets de la plate-forme de dialogue «Innovations et nouvelles applications dans les matériaux à base de bois» qui apportent une contribution importante en vue d'améliorer la résistance aux intempéries et la durabilité des façades en bois (voir rapport de synthèse «Innovations et nouvelles applications dans les matériaux à base de bois»).

Construire en bois présente plusieurs avantages – légèreté, rapidité, précision, numérisation, etc. – et engendre des retombées positives, notamment en ce qui concerne la consommation d'énergie ou le stockage à long terme du dioxyde de carbone. Les nouvelles prescriptions en matière de protection incendie permettent désormais d'avoir recours au bois pour toutes les catégories de bâtiments et d'utilisations. Même des tours en bois comportant des éléments structurels en bois sont désormais envisageables. Dans d'autres pays aussi, les premiers grands immeubles de construction bois ou hybride ont vu le jour. Le gros œuvre de l'immeuble en bois actuellement le plus haut du monde a été achevé en septembre 2016 à Vancouver. Construit pour l'Université de Colombie-Britannique, cet ensemble de 18 étages culmine à 53 mètres (cf. illustration 12). Dans la zone de Suurstoffi à Risch Rotkreuz, un nouveau quartier réunissant logements, bureaux et activités de loisirs voit petit à petit le jour. C'est à cet endroit qu'ont été bâtis les deux premiers

grands immeubles en bois de Suisse (Lignum 2016). La première tour (Suurstoffi S22, Burkard Meyer Architekten BSA, Baden; cf. illustration 13) est un immeuble de bureaux de 10 étages d'une hauteur de 36 mètres. La deuxième (Suurstoffi BF1 – Haus A) abrite également des bureaux et compte 16 étages pour 60 mètres de hauteur. Les délais restreints – qui imposaient une planification de grande précision en peu de temps, c'est-à-dire des conditions pour lesquelles le bois est tout à fait prédestiné – constituent le principal argument ayant motivé le choix de la construction en bois pour la réalisation de ces bâtiments. La tendance aux tours en bois qui se dessine à l'heure actuelle partout dans le monde est un autre signe du vaste potentiel que présente la construction en bois pour une approche du bâtiment durable et orientée vers l'avenir.

Aujourd'hui, au-delà des coûts de construction purs, les coûts de cycle de vie tendent de plus en plus à être pris en compte dans les décisions d'investissement. À cet égard, les bâtiments en bois (surtout aux standards Minergie-P-Eco) peuvent se révéler tout à fait compétitifs face aux ouvrages massifs conçus en béton armé ou en brique (Glanzmann et al. 2012). Pourtant, il s'agit là d'un fait encore trop peu connu des investisseurs, qui explique pourquoi la construction en bois reste perçue comme désavantageuse lors du développement de projets et des recherches de financement.



III. 13

Suurstoffi 22, L'effet sur l'espace de la structure en bois visible. Burkard Meyer Architekten BSA, Baden. (crédit photo : Markus Bertschi, Zurich)

Principales recommandations destinées à la recherche comme à la pratique

Matériaux et construction

1. Perfectionnement de la technique de collage et d'assemblage en vue d'autres progrès dans le domaine de la construction en bois.
2. Perfectionnement de nouveaux produits et processus de construction de haute qualité faisant appel au bois de feuillus comme alternative à la construction en acier et béton armé. Activités de R et D à mener en collaboration plus étroite avec l'industrie afin d'assurer une application concrète.
3. Perfectionnement de systèmes de planchers standardisés dans la construction en bois et comparables à ceux en béton armé utilisés jusqu'à présent.
4. Développement approfondi de systèmes porteurs en bois optimisés en tant que solutions globales rentables pour les bâtiments à plusieurs étages et les projets d'envergure.
5. Perfectionnement de la fabrication numérique: des techniques et approches de conception formelles radicalement nouvelles peuvent être envisagées pour l'avenir.

Dialogue, formation et transfert de connaissances

6. Élaboration d'une stratégie et mise en œuvre de mesures permettant de poursuivre et d'intensifier le dialogue entre la recherche et la pratique et entre les divers acteurs de la chaîne de création de valeur qui s'étend de la matière première au bâtiment. L'échange entre la recherche et la pratique est tout à fait déterminant pour l'évolution future de toute la filière. C'est ainsi que synergies et nouveaux concepts voient le jour. Le réseau national thématique S-WIN (Swiss Wood Innovation Network) joue un rôle essentiel à cet égard.
7. Les compétences en planification et construction numériques doivent être développées dans les hautes écoles et les hautes écoles spécialisées, ce qui nécessite que les cours soient adaptés en conséquence.
8. Le riche savoir-faire suisse en matière de construction en bois doit s'exporter à l'international (mot-clé: développement de nouveaux modèles commerciaux).

Normes

9. En matière de normes, la construction en bois peut jouer un rôle de premier plan et apporter un savoir important.
10. La Suisse doit participer activement à l'élaboration des normes européennes (Eurocodes et normes produits) dans l'intérêt de la filière nationale de la construction en bois, mais aussi pour assurer la compétitivité de tous les acteurs impliqués dans ce domaine.

Économie et société

11. Élaboration de bases destinées aux investisseurs et décideurs, présentant les principaux arguments/faits liés aux avantages de la construction en bois (mots-clés: logistique, préfabrication étendue, courte durée de construction, coûts), surtout pour le développement urbain local et la modernisation du parc immobilier dans un objectif de réduction de la consommation d'énergie.
12. Élaboration et mise à disposition d'une estimation, axée sur la pratique et aussi simple que possible, des retombées environnementales positives de la construction en bois.

ANNEXE

APERÇU DES SEPT PROJETS DE RECHERCHE DE LA PLATE-FORME DE DIALOGUE 1

Les sept projets de la plate-forme de dialogue 1 «Avancées technologiques dans l'utilisation du bois dans la construction» s'étendent de la recherche fondamentale pure à des solutions mises en pratique. Tous contribuent à faire de la construction en bois un domaine plus fort économiquement et posent des bases de perfectionnements pérennes.

Voici une brève présentation des sept projets de recherche de la plate-forme de dialogue 1 «Avancées technologiques dans l'utilisation du bois dans la construction». Notons que tous ne vont pas aussi loin en termes de mise en œuvre dans la pratique: certains projets ouvrent la voie à des applications et nouveaux produits déjà matures (projets *Steiger* et *Frangi* par exemple), alors que d'autres portent sur une phase de développement moins avancée et ne seront qu'ultérieurement prêts à être mis en application.

Collage du bois de feuillus

Projet «Adhesive bonding in structural elements made of hardwood» (Niemz Peter, EPFZ)

Des collages fiables sont indispensables si l'on veut pouvoir utiliser le bois de feuillus pour la construction. Les techniques de collage établies pour le bois de résineux ne pouvant pas être étendues au bois de feuillus, il est donc nécessaire d'avoir une compréhension approfondie des mécanismes physiques fondamentaux en jeu dans le collage de ce type de bois.

Les éléments structurels porteurs en bois collé comme les poutres en lamellé-collé ou les planches de surface en contreplaqué sont les produits les plus importants pour la construction en bois. Le collage affectant considérablement la sécurité structurale des composants porteurs en bois, seuls des

adhésifs certifiés répondant aux strictes exigences des normes européennes actuelles doivent être utilisés pour les structures porteuses en bois collé. Les variations d'humidité au niveau des sections transversales en bois collé sollicitent particulièrement les assemblages de ce type.

Toute une série de nouveaux développements destinés à une utilisation dans la construction en bois se basent sur les excellentes propriétés mécaniques du bois de feuillus. On utilise alors des poutres en hêtre lamellé-collé ou des poutres hybrides avec lamelles extérieures en hêtre. Comme cette essence de bois se dilate et se rétracte très fortement tout en présentant une rigidité élevée, les assemblages par collage du bois de hêtre sont soumis à des contraintes internes nettement supérieures à celles du bois de résineux lors des inévitables variations d'humidité, de sorte qu'il est difficile de prouver la qualité du joint de collage selon les normes en vigueur. Cela s'explique notamment par le fait que les systèmes de colles disponibles ont été conçus pour des résineux et sont donc inadaptés aux caractéristiques des bois de feuillus. Par ailleurs, la normalisation actuelle repose sur des essais effectués sur des résineux, dont la transposition sur le bois de feuillus s'avère impossible sans connaissance approfondie des propriétés de collage de ce type de bois.

Une amélioration des collages du hêtre en point de mire

L'objectif était de mettre au point, en collaboration avec des fabricants suisses, des assemblages par

collage mieux adaptés au bois de hêtre. Ce projet portait à la fois sur des questions de fabrication, des approches pour élaborer des méthodes de détection fiables ainsi que la description circonstanciée des tensions à l'œuvre au niveau des joints de collage en cas de contraintes hygromécaniques. En s'appuyant sur la mécanique de la rupture et des preuves numériques, les chercheurs ont déterminé le comportement de délamination et de décollement à long terme des poutres en lamellé-collé. Ils ont ensuite développé une méthode de détection fiable destinée aux assemblages collés de bois de feuillus qui prend en compte les variations d'humidité définies au niveau du composant. Pour ce faire, il a tout d'abord fallu déterminer les influences de l'humidité sur les indicateurs de rupture mécanique. Se basant sur des simulations numériques, les chercheurs ont étudié le comportement des éléments collés en bois de feuillus en considérant l'effet des changements climatiques au fil des saisons et comparé ces données à des expériences réalisées sur du bois lamellé de hêtre exposé à des degrés variables d'humidité de l'air.

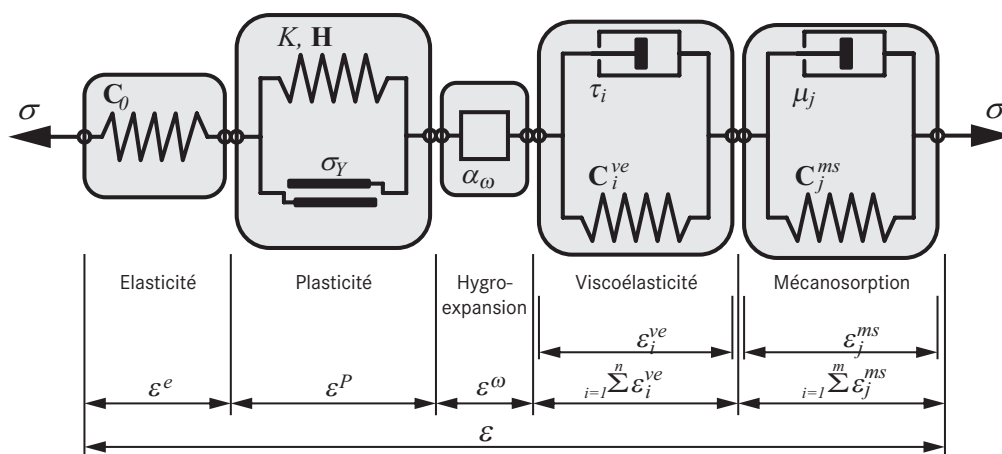
L'humidité, un facteur déterminant

Les essais réalisés révèlent que le taux d'humidité joue un rôle déterminant dans la nature des interactions entre les différentes mécaniques de rupture. Les chercheuses et chercheurs ont donc

élaboré un modèle de colle et de bois non linéaire dépendant de l'humidité, qui tient compte pour la première fois de l'ensemble des déformations et contraintes pertinentes (cf. illustration 14). Les utilisateurs peuvent ainsi pronostiquer l'évolution temporelle des profils de tension et d'humidité au niveau des éléments de construction. Les résultats montrent que la conjonction humidité-charge est largement responsable de la rupture spontanée observée dans les composants.

Un modèle pour l'élaboration d'éléments structurels hybrides

La sécurité structurale est absolument incontournable dans l'optique d'une utilisation commerciale des produits en bois de feuillus. Le modèle élaboré permet de prendre en compte les changements de propriétés de diverses essences de bois et de diverses colles sous l'effet des variations climatiques. Il sert en même temps de base de calcul pour la création d'éléments structurels hybrides. Le nombre, l'épaisseur et la disposition des lamelles ainsi que d'autres paramètres de processus, comme les écarts d'humidité entre lamelles, peuvent ainsi être optimisés. Le transport d'humidité se produisant très lentement, cette approche numérique permet désormais de pronostiquer le comportement sous charge des composants en bois sur plusieurs décennies.



III. 14 Représentation schématique du modèle rhéologique du bois

Nouveaux assemblages collés bois-bois

Projet « Design tool for adhesively bonded timber joint »
(Vasilopoulos Anastasios, EPFL)

Des bases de calcul permettant de mieux comprendre le comportement sous charge du bois en tant que matériau de construction ont été élaborées pour la mise au point de nouveaux assemblages collés bois-bois. In fine, cette démarche débouche sur une compétitivité accrue de la construction en bois.

Le collage ne se révèle pas adéquat pour l'assemblage de tiges en bois, notamment en ce qui concerne les éléments de jonction des charpentes, si bien que l'on recourt habituellement à des assemblages mécaniques pour ces utilisations. Les chercheurs et chercheuses ont établi des bases de calcul destinées au développement et au dimensionnement d'assemblages collés bois-bois. Ils ont examiné les caractéristiques des matériaux et les approches de calcul à différents niveaux: bois et colles utilisés, assemblages et conception sur le terrain.

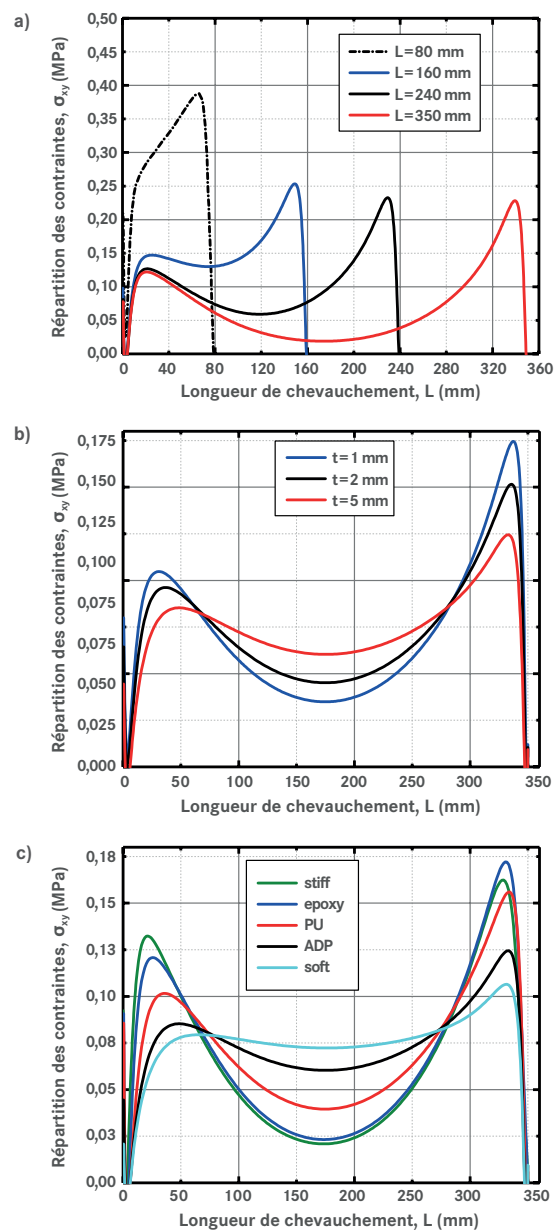
Les assemblages collés à la résine acrylique présentent une forte ductilité

Les résultats des études expérimentales ont permis d'établir des corrélations entre le module d'élasticité, la solidité et l'allongement à la rupture. Le modèle de simulation ainsi mis au point a facilité la reproductibilité des études expérimentales. On a en outre pu évaluer l'effet de volume (à la suite des variations de longueur) observé pour ces propriétés. Outre les essais expérimentaux, le comportement sous charge d'assemblages collés bois-bois a également été étudié lors de différentes analyses numériques mettant l'accent sur la rigidité, la portance et la ductilité. Les paramètres d'influence étaient la géométrie de l'assemblage (longueur de chevauchement), l'essence de bois (épicéa et hêtre) et l'adhésif utilisé (cf. Illustration 15). Trois types de colle (époxy, polyuréthane et résine acrylique) ont été analysés de façon numérique. La résine acrylique s'est révélée le produit adhésif présentant le plus fort potentiel pour un assemblage ductile. Elle a donc fait l'objet d'une analyse complémentaire approfondie. Les résultats des essais de traction sur les assemblages bois-bois avec époxy et résine acrylique, correctement modélisés grâce aux simulations numériques, ont démontré la ductilité supérieure des assemblages collés à la résine acrylique.

Des assemblages de bonne portance assurent la compétitivité de la construction en bois

Les essais expérimentaux et numériques réalisés ont fourni les bases nécessaires à une com-

préhension approfondie du comportement sous charge complexe du bois dépourvu de défauts et des assemblages bois-bois. Les assemblages bois-bois à la résine acrylique ont montré un comportement ductile prometteur. Grâce à la simulation numérique élaborée, le comportement sous charge a pu être modélisé en tenant compte de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques du bois. Cela a notamment permis de décrire le comportement sous charge des assemblages bois-bois, lesquels pourront être perfectionnés et optimisés et contribuer ainsi à accroître la compétitivité de la construction en bois.



III. 15: Incidence de la longueur de chevauchement (a), de l'épaisseur des joints de collage (b) et des différents types de colles (époxy, polyuréthane [PU] et résine acrylique [ADP]) (c) sur la répartition des contraintes dans les assemblages bois-bois

Éléments porteurs en béton de bois allégé

Projet « Wood and wood-based concrete: The building material of the future? » (Zwicky Daia, HES-SO)

Ce projet porte sur le développement de nouvelles bases théoriques et empiriques concernant les éléments porteurs constitués de bois et de béton de bois allégé. Outre leur fonction statique, ces éléments de construction novateurs contribuent à une meilleure isolation phonique et thermique et présentent ainsi des avantages économiques et écologiques.

Les produits à base de bois liés au ciment sont utilisés depuis longtemps comme éléments non porteurs, par exemple en tant que plaques d'insonorisation ou de protection contre le feu. En principe, le béton de bois allégé pourrait aussi être utilisé pour réaliser des plafonds et des murs et répondre, outre aux exigences statiques, également à d'autres fonctions (isolation thermique, phonique et protection incendie). Les connaissances actuelles relatives aux éléments porteurs en béton de bois allégé sont toutefois trop limitées pour permettre une application pratique. Les données qui font défaut concernent surtout la composition du béton de bois allégé requise en fonction des différentes utilisations, le type de liant indiqué, les moyens rentables de conception d'éléments de plafond ou de mur et les méthodes possibles de dimensionnement de ces éléments de construction.

Bases de calcul pour la mise au point de nouveaux éléments en béton de bois allégé

L'équipe de recherche a développé différents mélanges de béton de bois allégé puis évalué leur adéquation en tant que matériau porteur (cf. illustration 16). Les chercheurs ont alors conçu des éléments de plafonds et de murs en béton de bois allégé, effectué des tests avec différents liants et vérifié leur comportement porteur dans des essais de sollicitation à grande échelle. L'étude expérimentale et analytique visait à évaluer leur comportement sous charge et à la rupture ainsi que leur comportement à long terme. Les scientifiques ont ainsi pu élaborer des méthodes de dimensionnement proches de la pratique. Le comportement sous charge permet l'utilisation de ce type d'éléments de plafond dans la construction de logements, de bureaux et d'écoles. Outre la fonction statique, les scientifiques ont également évalué l'isolation thermique et la récupération de chaleur, la protection contre le feu, l'insonorisation, la durabilité et la compétitivité économique des éléments de plafonds et de murs en béton de bois allégé.

Nouvelle formule pour le béton de bois allégé

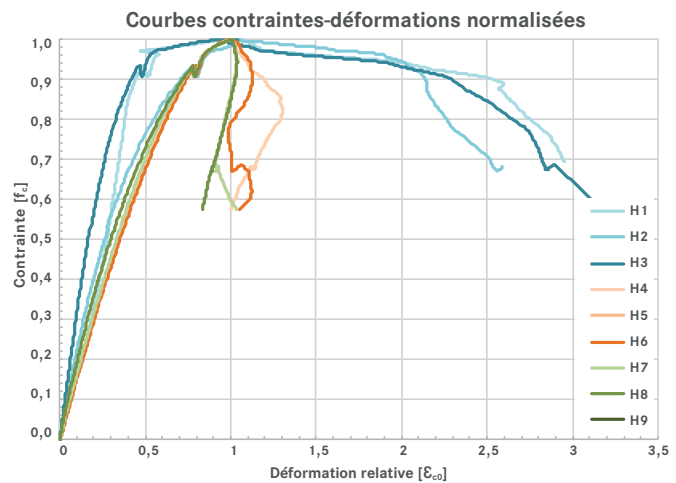
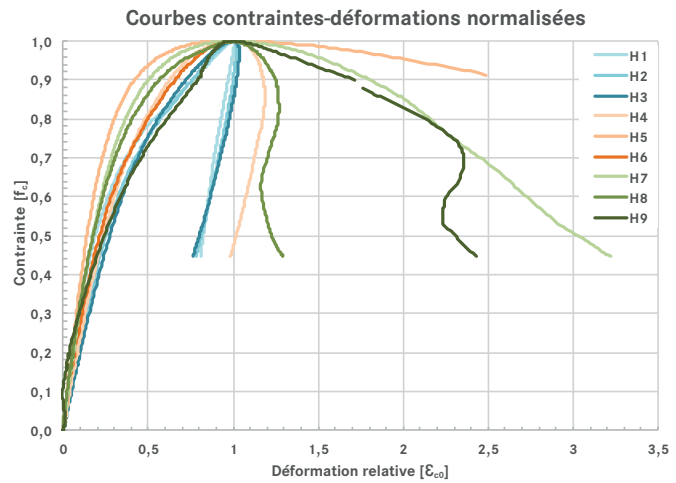
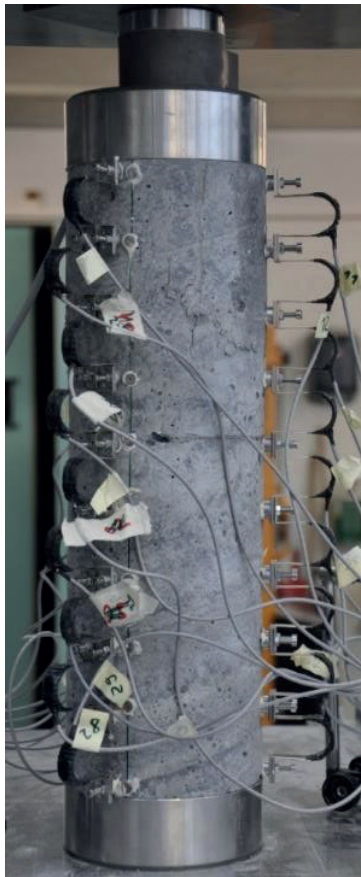
Des formules de béton de bois allégé (BBA) ont pu être définies afin de disposer d'un nouveau matériau de construction susceptible d'être coulé, autocompactant, léger et rentable. Grâce aux études réalisées, il a été constaté que les BBA présentaient une grande capacité à emmagasiner la chaleur. Ses propriétés d'isolation thermique sont d'ailleurs comparables à celles d'autres bétons légers.

Les propriétés mécaniques (p.ex. module d'élasticité ou résistance à l'écrasement) des BBA sont toutefois faibles et constituent un obstacle à leur utilisation en tant que matériau de substitution pour le béton léger conventionnel. Dans les éléments de construction, il est donc nécessaire que les BBA soient associés à d'autres composants. En outre, les déformations à long terme des BBA sont considérables et doivent donc être prises en compte dans la conception et la vérification des structures porteuses.

Ces matériaux conviennent bien à la réalisation de chapes et à la protection incendie, par exemple pour envelopper les éléments en bois. Compte tenu de leur grande valeur calorifique, ils peuvent également être recyclés dans la production de chaleur ou d'électricité. L'incinération de BBA ne nécessite par ailleurs pas de système de traitement des gaz de combustion ni d'équipement de protection incendie particuliers. Néanmoins, ces matériaux devraient être incinérés avec d'autres combustibles et l'utilisation ultérieure des cendres examinée soigneusement en raison des quantités élevées de résidus de combustion.

Construire avec du béton de bois allégé est efficace et écologique

Comparés aux éléments composites bois-béton conventionnels, les éléments porteurs en béton de bois allégé présentent un poids moindre ainsi qu'une insonorisation et une protection contre le feu intégrées. De par leur teneur élevée en bois, ces éléments de construction innovants sont largement basés sur des ressources renouvelables. Ils peuvent être recyclés en chaleur après leur démontage et présentent donc d'importants avantages écologiques par rapport aux autres matériaux de construction. Les approches de dimensionnement conçues dans le cadre de ce projet permettent de construire avec du béton de bois allégé et contribuent ainsi à rendre l'utilisation du bois disponible en Suisse compétitive.



III. 16 Essais de compression sur deux formules différentes de béton de bois allégé

Planches en placage stratifié de hêtre pour les structures porteuses

Projet « Innovative and reliable structures made of beech wood » (Frangi Andrea, EPFZ)

Jusqu'à présent, le hêtre était principalement utilisé comme bois-énergie. Le développement de nouvelles structures porteuses en hêtre, de haute fiabilité et de qualité supérieure, permet à cette essence de bois d'apparaître comme un matériau de construction plus solide, plus fiable et plus durable.

À long terme, on peut s'attendre à ce que la part de feuillus augmente et à ce que la population de résineux diminue. Cet état de fait confère au bois de hêtre

un rôle déterminant en tant que matière première forestière présentant en outre de très bonnes propriétés mécaniques. Le hêtre était jusqu'ici essentiellement utilisé comme bois-énergie, mais il serait judicieux de l'employer aussi comme matériau de construction. Pour cela, il faut des idées innovantes qui ouvrent sur des usages novateurs de cette essence de bois. Ce projet est axé sur la mise au point de charpentes et de planchers composites bois-béton élaborés à partir de placage stratifié de hêtre. Ce dernier possède d'excellentes propriétés mécaniques et exerce un effet homogénéisant supérieur par rapport au hêtre massif ou lamellé-collé, offrant ainsi une fiabilité mécanique plus élevée. L'utilisation de couches transversales lui confère en outre une très bonne stabilité de forme.

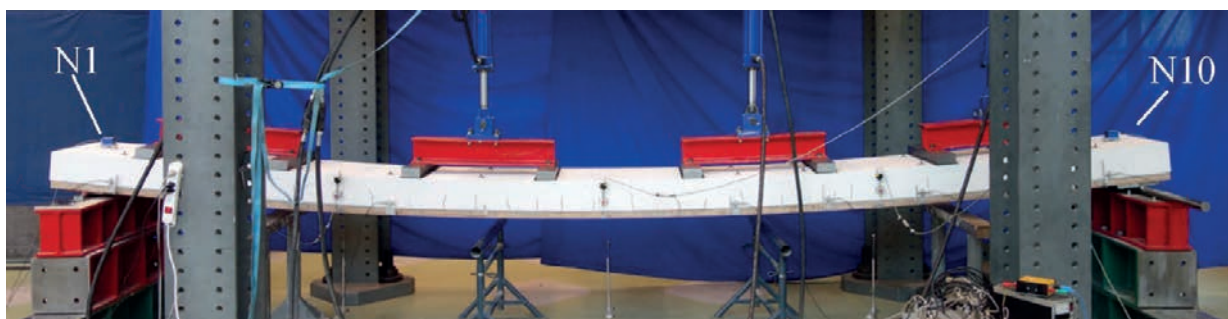
Structures porteuses et planchers composites bois-béton novateurs en placage stratifié de hêtre

Les planchers composites développés sont formés de planches de 40 à 60 mm d'épaisseur en placage stratifié de hêtre et d'une couche de béton de 120 mm. Les planches de hêtre servent tout d'abord de coffrage puis d'élément porteur conjugué au béton et enfin de sous-face. L'association des deux matériaux en une dalle composite se fait grâce à l'imbrication mécanique de segments de béton dans des rainures de 15 mm fraisées dans le bois. Les analyses et expériences approfondies ont révélé que le dimensionnement optimal des dalles composites induisait un comportement sous charge fiable et ductile dans l'état de rupture (cf. illustration 17). Pour les structures porteuses en placage stratifié de hêtre, l'équipe de recherche a étudié les assemblages à chevilles acier-bois avec plaques d'acier intérieures et les assemblages à vis avec plaques d'acier extérieures. Les essais conduits sur les assemblages et structures porteuses ont montré que l'utilisation de placage stratifié de hêtre à couches transversales empêchait le bois de se fendre et aboutissait à un comportement ductile à la rupture.

Les assemblages ductiles ainsi mis au point permettent de fortes déformations sans effondrement ni rupture. Un type de construction ductile augmente considérablement la robustesse des structures porteuses. Par conséquent, les éléments en placage stratifié de hêtre contribuent largement à l'amélioration de la fiabilité, de la ductilité et de la robustesse des structures porteuses dans l'ingénierie de la construction en bois.

Prêt pour l'application pratique

Les résultats du projet révèlent le fort potentiel et le comportement sous charge avantageux des dalles composites bois-béton et des structures porteuses en placage stratifié de hêtre. Le recours à ce dernier permet d'optimiser les assemblages et d'atteindre une portance très élevée. On obtient également un comportement non linéaire et ductile avantageux dans l'état de rupture. Les bases de calcul ainsi élaborées permettent une utilisation expérimentalement éprouvée et rentable du bois de hêtre dans l'ingénierie de la construction en bois et contribuent à soutenir la vente et la création de valeur de cette essence. Les planchers composites bois-béton en hêtre ont été employés pour la première fois dans la House of Natural Resources de l'EPFZ (Zurich, Höggerberg) (cf. illustration 3).



III. 17 Comportement sous charge ductile des planchers composites bois-béton mis au point avec des planches en placage stratifié de hêtre

Planchers en bois avec insonorisation améliorée des basses fréquences

Projet « Acoustically optimised floor system made of hardwood » (Krajči Lubos, K+I Ingenieurbüro für Akustik und Bauphysik GmbH)

Des données fiables concernant l'insonorisation se révèlent indispensables si l'on veut généraliser l'utilisation des structures en bois. L'objectif consistait à mettre au point un nouveau système

de plancher en bois présentant de meilleures propriétés d'isolation phonique des basses fréquences et pouvant être utilisé dans les bâtiments d'habitation et de bureaux.

Pour les immeubles en particulier, les critères de protection contre le bruit sont plus stricts que pour les bâtiments à un étage ou les maisons individuelles. Pour pouvoir répondre aux normes en vigueur, les constructions à planchers en bois doivent

souvent recourir à une conception multicouche qui induit une complexité et un alourdissement supplémentaires. Relativement épais, les planchers obtenus se révèlent plus onéreux et donc moins compétitifs que les structures conventionnelles en béton armé. En outre, les constructions de planchers en bois correspondant aux critères d'insonorisation peuvent malgré tout se révéler insatisfaisantes d'un point de vue subjectif. Ce problème est inhérent à leurs propriétés acoustiques qui sont insuffisantes pour isoler les basses fréquences inférieures à 200 Hz (notamment générées quand les occupants marchent ou sautent, ou par le Dolby Surround et le home cinema). D'un point de vue purement juridique, ces très basses fréquences ne sont pas considérées comme problématiques puisqu'elles ne figurent pas dans les normes d'isolation phonique.

Planchers pour immeubles collectifs et de bureaux

L'équipe de recherche a mis au point un prototype de plancher multifonctionnel en bois de hêtre lamellé tourillonné qui présente des propriétés améliorées quant aux bruits d'impact dans les basses fréquences. L'utilisation de planchers en bois dans les immeubles collectifs et de bureaux se trouvait au cœur du projet. Des études expérimentales et des simulations numériques exhaustives ont permis d'analyser le comportement des systèmes de planchers en bois quant à l'isolation phonique, mais aussi à l'incidence de l'assemblage tourillonné sur la propagation des ondes sonores. Par ailleurs, les chercheuses et chercheurs se sont aussi penchés sur la propagation du son à travers les points de transition des appuis, c'est-à-dire la transmission indirecte par les éléments latéraux. Les analyses portaient également sur divers éléments de découplage.

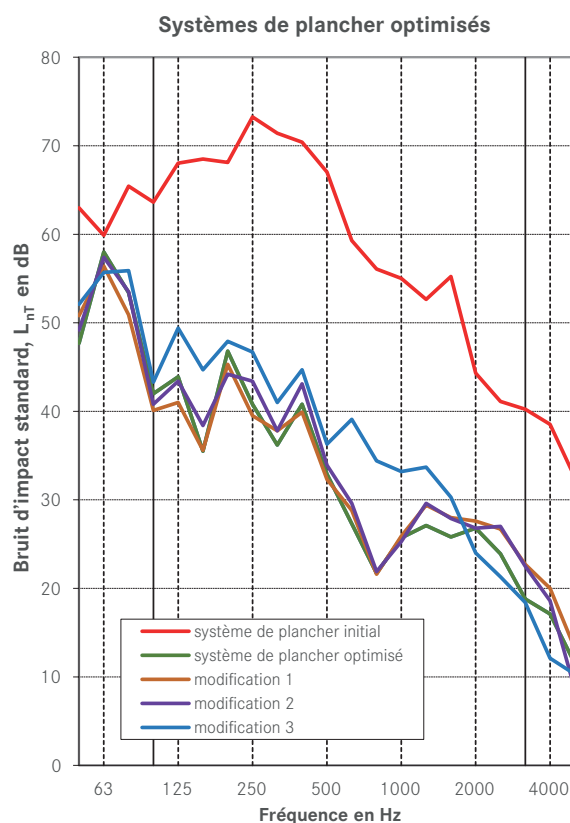
Une amélioration cruciale

Au cours des travaux de recherche, les mesures ont mis en évidence d'importantes propriétés dynamiques du bois, aussi bien au niveau des composants individuels que de l'ensemble du système de plancher. Ces données ont servi à la modélisation détaillée de la propagation du son à travers les structures en bois de hêtre lamellé tourillonné. Les fonctions de transfert modales résultant de l'analyse modale expérimentale ont été comparées au modèle numérique, ce qui a permis son optimisation et sa validation. Grâce à cette projection numérique, il a été possible de calculer le rayonnement sonore du système de planchers dans l'espace mitoyen. Enfin, les chercheuses et chercheurs ont procédé à des mesures et à une optimisation

de l'ensemble de la construction dans un laboratoire acoustique. Cette optimisation a été obtenue au moyen d'une chape flottante et d'un plafond suspendu lamellé. Dans l'optique de réduire au maximum les émissions sonores à travers les éléments latéraux, les structures ont été montées avec un découplage acoustique au niveau des points d'appui. Les mesures réalisées en laboratoire acoustique ont alors démontré que l'amélioration escomptée de 10 dB en dessous de 200 Hz avait pu être atteinte au niveau de l'isolation des bruits de pas (cf. illustration 18). Les strictes exigences de la norme SIA 181:2006 relative à la protection contre le bruit dans les immeubles ont donc été aisément respectées.

Rentabilité et efficacité de la protection contre le bruit dans les basses fréquences

Les constructions de planchers ainsi développées isolent bien du bruit d'impact, même dans les basses fréquences. À cet égard, elles sont donc comparables aux dalles conventionnelles en béton armé. L'utilisation de paliers élastiques correctement dimensionnés atténue en outre la propagation des sons dans les éléments latéraux et permet de réduire les coûts d'insonorisation.



III. 18 Mesure de l'isolation des bruits d'impact après optimisation du système de plancher

Structure porteuse optimisée pour les constructions en bois à plusieurs étages

Projet « Earthquake-resistant wood structures for multi-storey buildings » (Steiger René, Empa)

L'équipe de recherche a mené des expériences sur les assemblages, éléments muraux et bâtiments pour des régions à risque sismique faible à moyen et à contrainte éolienne modérée. Ces travaux ont servi de base à l'élaboration d'un système optimisé de structure porteuse en bois, d'une méthode de calcul basée sur la déformation selon les principes de la mesure de capacité et d'un protocole de charge en vue de tests cycliques quasi statiques.

À l'avenir, de plus en plus de logements, bureaux et écoles de hauteur moyenne (trois à huit étages) seront intégralement construits en bois. Il importe donc de perfectionner les structures porteuses classiques de plusieurs étages, notamment afin d'optimiser le dimensionnement et le comportement des éléments de renforcement horizontaux sous l'effet des sollicitations causées par les séismes et les vents violents. Dans ce cadre, il ne faut pas négliger les autres contraintes que constituent l'adéquation vis-à-vis de l'utilisation, la protection incendie, l'insonorisation et l'exploitation des ressources.

Éléments de structure porteuse et méthode de calcul correspondante

Les chercheuses et chercheurs ont élaboré un système de structure porteuse pour bâtiments à plusieurs étages spécialement conçu pour la sollicitation horizontale (vent, séismes). La force moyenne des vents et la magnitude faible à modérée des séismes, telles qu'on les connaît en Suisse, faisaient office de références. La méthode de dimensionnement employée se fondait sur la déformation et reposait sur les principes de la théorie de la capacité: elle définissait les zones de la structure porteuse qui se déforment de façon inélastique et celles qui restent élastiques en cas d'événement extrême. Le projet s'articulait autour de trois modules. Le module 1 était consacré au comportement des assemblages soumis à une sollicitation monotone puis cyclique, le module 2 au comportement des éléments muraux (cf. illustration 19) et des éléments porteurs voisins pertinents, et le module 3 au comportement de l'ouvrage considéré dans son ensemble. En dernier lieu, l'équipe de recherche a formulé des recommandations pour optimiser les structures porteuses et développé des méthodes adéquates pour leur dimensionnement.

Un modèle adapté

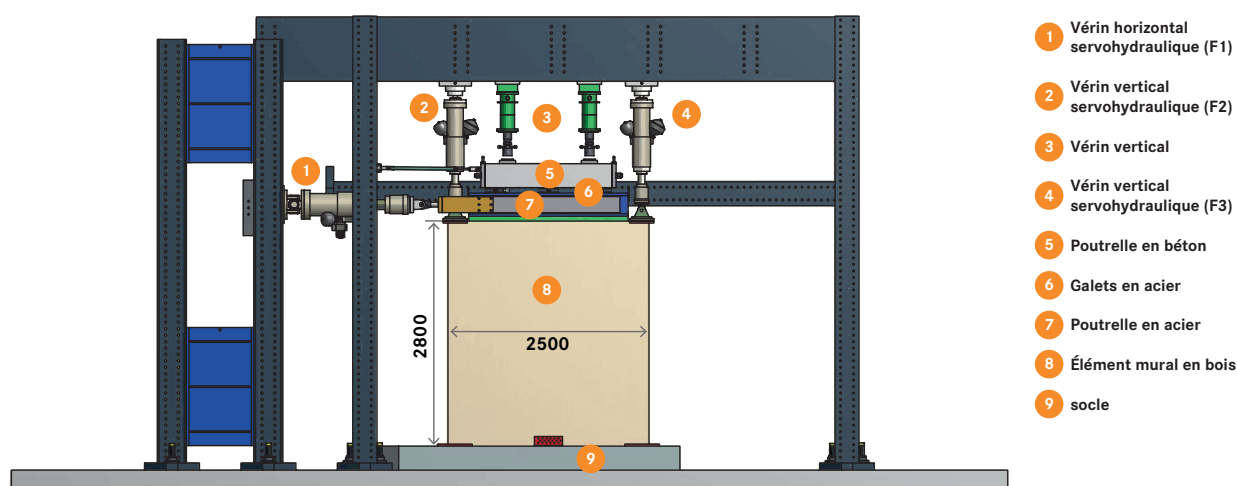
Les résultats des essais conduits sur les assemblages ont montré que les règles de calcul, conformes à la norme Eurocode 5 pour les assemblages par pointes et agrafes entre panneaux de particules et bois, devaient être vérifiées quant à l'incidence de l'angle force-fibres, des écarts longitudinaux et centraux de l'agent liant et du calcul de la capacité de charge. Les tests de vibration effectués sur une construction de plusieurs étages à ossature en bois avec planchers composites bois-béton ont révélé des différences notables de rigidité de la structure porteuse entre l'expérience et le modèle de calcul. Ces différences étaient dues à une sous-estimation de la rigidité des éléments de renforcement et des composants considérés non porteurs. Par ailleurs, le modèle ne prenait pas en compte la friction. Courante dans la pratique, cette approche de dimensionnement n'est pas appropriée à la recherche si l'on veut pouvoir comparer correctement expérience concrète et modèle numérique. Par conséquent, des tests de friction ont été réalisés sur des parties des murs porteurs afin de compléter le modèle numérique avec les coefficients de friction statiques et cinétiques établis. Des protocoles de charge adaptés ont été développés pour les essais cycliques sur les assemblages et éléments muraux. Comparés aux protocoles appliqués aux régions à forte sismicité, ils engendrent un nombre réduit de cycles de charge et des exigences inférieures en ce qui concerne l'accumulation des dégradations. Des solutions plus rentables sont donc envisageables pour les régions à sismicité faible, voire modérée. Grâce à une étude paramétrique réalisée sur les systèmes avec un degré de liberté, les premiers rapports entre le coefficient de comportement et la ductilité ont en outre pu être établis. Ces rapports permettent également d'appliquer la méthode de dimensionnement des constructions en béton armé (méthode N2 selon Eurocode 8) aux structures porteuses en bois.

Fiabilité, compétitivité et sûreté de planification

Conjuguées à une standardisation des assemblages et au perfectionnement des méthodes de dimensionnement et de vérification, les structures pour bâtiments en bois de plusieurs étages développées et optimisées – pour les conditions sismiques et éoliennes connues en Suisse – contribuent notablement à accroître la compétitivité du secteur de la construction en bois face aux autres modes de construction. Outre une meilleure rentabilité, elles permettent également d'obtenir une plus grande sécurité de planification et une fiabilité élevée.

Compte tenu des données issues des expériences réalisées sur les assemblages, les cloisons et les bâtiments, les ingénieurs peuvent évaluer avec

une plus grande fiabilité la rigidité, la capacité de charge et la capacité de déformation lors du calibrage statique.



III. 19 Installation expérimentale à l'Empa pour les tests cycliques quasi statiques sur les parois

Prototypes pour la fabrication robotisée d'une structure en bois

Projet « Robot-assisted assembly of complex timber structures » (Kohler Matthias, EPFZ)

Les robots permettent d'assembler des éléments simples d'une manière précise et économique en ressources afin de former des structures complexes. Pendant cinq ans, l'équipe de recherche a utilisé plusieurs prototypes à l'échelle 1:1 pour analyser les répercussions que les procédés numériques de conception et de fabrication peuvent avoir sur la construction en bois du futur.

La raréfaction des ressources mondiales rend d'autant plus urgente l'optimisation de leur exploitation. L'assemblage robotisé de structures porteuses complexes constitue une démarche en ce sens. À la différence des techniques traditionnelles, il permet de fabriquer des structures porteuses de géométrie variable avec précision et efficacité et sans perte de matériau à la découpe. De plus, ce mode d'assemblage permet de développer des techniques de

construction alternatives auxquelles se prête également le bois massif ordinaire. L'autre avantage présenté par ce processus est qu'il offre la possibilité d'intégrer des caractéristiques conceptuelles et de fabrication (p.ex. des structures géométriquement différenciées à qualité d'assemblage égale), si bien qu'il confère une dimension durable à la fabrication d'éléments complexes en bois.

Des prototypes pour démontrer de nouveaux procédés de conception et de fabrication

L'équipe de recherche a mis en place des stratégies de construction novatrices qui ont été conjuguées à des méthodes d'assemblage adaptées pour permettre la conception assistée par ordinateur et l'assemblage robotisé de structures porteuses complexes. L'utilisation d'éléments simples et courts en bois massif se trouvait au centre de la démarche. En effet, il s'agit là de composants disponibles en grande quantité qui peuvent être assemblés de façon précise et efficace à l'aide de robots industriels afin de constituer des structures porteuses complexes. S'appuyant sur une liste de critères, les chercheuses et chercheurs ont mis au point un

procédé de conception et de fabrication numérique qui sert à explorer des techniques de construction novatrices. Ils ont alors transposé à une échelle supérieure les résultats ainsi obtenus en construisant plusieurs maquettes grandeur nature (cf. Illustration 20). Celles-ci fournissent les bases analytiques nécessaires pour caractériser avec précision de nouveaux procédés de fabrication robotisés et les transposer avec efficacité à échelle industrielle.

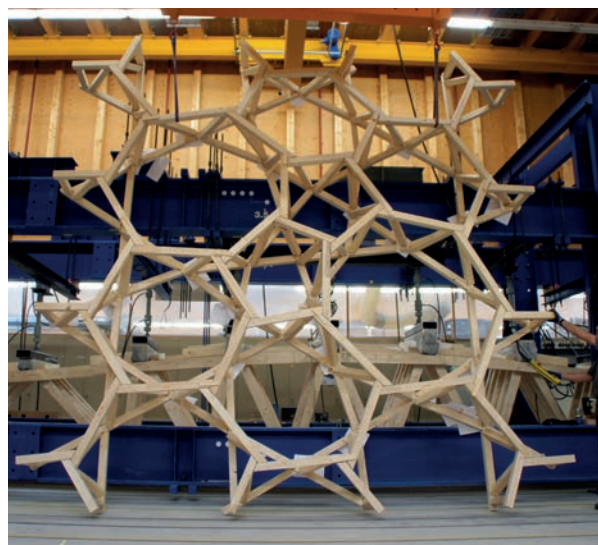
La technique de collage pour base

Au centre des récentes découvertes scientifiques se trouve le fait que les jonctions en about simples et géométriques se prêtent particulièrement bien aux processus de construction séquentiels et robotisés des structures porteuses constituées de petits éléments. Une nouvelle technique de collage a donc été développée pour les joints bout à bout. Elle peut non seulement être largement automatisée, mais permet en outre une forte variabilité géométrique de l'assemblage lui-même. Afin d'améliorer la capacité de charge de l'assemblage collé, les surfaces de celui-ci peuvent faire l'objet d'un traitement mécanique, par exemple d'un fraisage conique. Sur la base de cette technique d'assemblage, les chercheurs ont développé des typologies et approches de structures porteuses correspondantes dont la conception a pu être étudiée à l'aide d'outils de modélisation spécifiques assistés par ordinateur. Ces outils peuvent à leur tour être intégrés dans un flux de travail nu-

mérique continu afin d'évaluer la portance de la structure. Le processus de fabrication additionnel qui en découle dépend largement de l'exactitude du positionnement de l'élément et de sa géométrie. Afin de le perfectionner, une méthode de numérisation spéciale – consistant à mesurer préalablement chacun des éléments en bois afin d'atteindre la précision nécessaire à la construction – lui a été adjointe. Ce processus de conception et de fabrication a été démontré et validé à taille réelle à l'aide de plusieurs prototypes à échelle 1:1.

Multiples possibilités dans la fabrication

Le projet fournit les données élémentaires nécessaires à la conception assistée par ordinateur et à l'assemblage robotisé de structures porteuses complexes en bois. Ces fondements sont déterminants pour toute la filière bois, car ils ouvrent la voie à de nouvelles applications. En outre, l'utilisation et l'association innovantes de divers outils numériques et informatiques favorisent l'évolution de la fabrication numérique dans le bâtiment. D'un côté, des logiciels courants sont connectés entre eux afin d'établir un modèle de conception programmable dans lequel toutes les données sont reliées de façon logique. De l'autre, les actuelles étapes de planification et de fabrication séquentielles et séparées dans le temps sont remises en question et de nouvelles stratégies prévoyant un déroulement simultané des processus sont testées.



III. 20 Prototypes à taille réelle pour la démonstration et la validation des processus de conception assistée par ordinateur et de fabrication robotisée destinés à l'assemblage de structures porteuses complexes en bois

BIBLIOGRAPHIE

Bartlomé O., 2013. Subjektive Wahrnehmung von Schall, Tagungsband, Holzbau Forum, 4. Holz-BauSpezial «Akustik & Brandschutz», Bad Wörishofen.

Frangi A., 2014. Decken- und Rahmensysteme aus Laubholz – ETH House of Natural Resources, Tagungsband, 20. Internationales Holzbau-Forum IHF, Garmisch-Partenkirchen.

Frangi A., Steiger R., 2015. Mit Laubholz zu höheren Leistungen, Tagungsband, 47. Fortbildungskurs «Moderner Massivbau aus Holz – vom Einfamilienhaus bis zum Hochhaus», Swiss Wood Innovation Network S-WIN, Weinfelden.

Glanzmann J., Hegglin R., Humm O., Knüsel P., Sidler C., 2012. Holzbau – mehrgeschossig, Schriftenreihe Nachhaltigkeit, Faktor Verlag, Zurich, 152 pp.

Heeren N., Jakob M., Martius G., Gross N., Wallbaum H., 2013. A component based bottom-up building stock model for comprehensive environmental impact assessment and target control, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013; 20: 45–56.

Herzog T., Natterer J., Schweitzer R., Volz M., Winter W., 1991, Holzbau Atlas, 2e édition révisée, Detail, Munich.

Kolb J., 2010, Holzbau mit System, 3e édition, Birkhäuser, Bâle, 320 pp.

Krackler V., Keunecke D., Niemz P., 2010. Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten, ETH Zürich, Institut für Baustoffe IfB, IfB-Projektstudie.

Lignum, 2012. Klimaschonend und energieeffizient Bauen mit Holz – Lignatec N 25 (Grundlagen) et N 26 (Umsetzung).

Lignum, 2016. Erstes Holz-Hochhaus der Schweiz in Risch Rotkreuz, Communiqué de presse Lignum, 6.9.2016.

Lignum, 2017. Bauten in Holz – Brandschutzanforderungen, Lignum-Dokumentation Brandschutz 1.1.

Niemz P., Sonderegger W., 2017. Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 400 pp.

SAH, 2000, Verbindungstechnik im Holzbau, Tagungsband, 32. Fortbildungskurs, Communauté suisse pour la recherche sur le bois, Weinfelden.

Schickhofer G. et al. 2010, BSPhandbuch: Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz, Technische Universität Graz & holz.bau forschungsgmbh, Graz.

SIA, 2014. Verstärktes Engagement bei der Erarbeitung der Eurocodes 2nd Generation (EC2G) – Projektbeschreibung 2015–2020.

Steuere A., 2006. Entwicklung im Ingenieurholzbau – Der Schweizer Beitrag, Birkhäuser, Bâle, 336 pp.

TEC21, 2016a. Arch_Tec_Lab, ETH Zürich, Schweizerische Bauzeitung, Numéro spécial, Annexe à TEC21, 38–39.

TEC21, 2016b. Stadt aus Holz II, Schweizerische Bauzeitung, Numéro spécial, Annexe à TEC21 N° 47.

AEAI, 2003. Prescriptions de protection incendie 2003, Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI).

AEAI, 2015. Prescriptions de protection incendie 2015, Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI).

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).

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



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

Auteurs:

Prof. Andrea Frangi, EPF Zurich
Jutta Glanzmann, Zurich

Citation recommandée:

Andrea Frangi, Jutta Glanzmann (2017): Avancées dans la construction en 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 « Avancées technologiques dans l'utilisation du bois dans la construction »:

Daniel Studer, IC Infraconsult, Berne

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

Andrea Bernasconi (HEIG-VD); Christophe Siegrist (BFH); Werner Riegger (OFEV); Christoph Starck (Lignum); Thomas Wehrle (ERNE); Katharina Lehmann (Blumer-Lehmann).

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

Photographies: Häring & Co. AG (photo de couverture: Saldome à Riburg); Bürgi Schärer Architektur und Planung AG, Alexander Gempeler; EPF Zurich, Marco Carocari; Implenia Schweiz AG; Empa; Andrea Diglas/ITA/Arch_Tec_Lab AG; JHG Photography; Lignum, Michael Meuter; Stücheli Architekten AG; Blumer-Lehmann AG; KK Law; Burkard Meyer Architekten BSA, Baden, Markus Bertschi.

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.

La construction en bois a le vent en poupe : de la campagne à la ville, du pavillon à l'immeuble, des nouvelles constructions aux transformations. Une politique des ressources durable requiert néanmoins d'aller encore plus loin en s'appuyant sur l'industrialisation et la numérisation. Les projets de la plate-forme de dialogue « Avancées technologiques dans l'utilisation du bois dans la construction » du PNR 66 mettent en lumière comment exploiter le vaste potentiel offert par la synergie des matériaux et des processus.