

Le bois dans la construction: innovations et perspectives

Autor(en): **Sandoz, Jean-Luc**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tracés : bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **128 (2002)**

Heft 12: **Ingénierie du bois**

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-80287>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Le **bois** dans la construction : innovations et perspectives

Pour renforcer l'exploitation et la valorisation du bois suisse, il est nécessaire de pouvoir en mesurer la qualité comme matériau de structure. Avec un outil de mesure non destructive du bois, il est possible de dresser un inventaire qualitatif de la ressource au niveau régional et de préciser la qualité du matériau en fonction des nouvelles normes européennes de classement des bois de construction.

La mesure par ultrason

Analysons d'abord le principe de la méthode ultrason, développée à l'IBOIS depuis 1985 et qui connaît un fort développement industriel, aussi bien en Suisse qu'au niveau international. Dès 1985, la méthode ultrason pour la mesure des performances mécaniques du bois (le module élasticité $E_{//}$ et la résistance en flexion σ_b) a été validée sur les bois de structure. A la fin des années 80, un transfert de technologie était réalisé avec la mise au point de l'appareil *Sylvatest*, fruit d'un important travail de thèse [1]¹. L'outil se basait sur la mesure de la vitesse de propagation longitudinale V_L d'une onde

basse fréquence dans le bois selon l'équation (1):

$$V_L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_{//}}{1,82 \cdot \rho}} \quad (1)$$

avec C_{11} : premier terme de la matrice de rigidité
 ρ : densité du bois

Pour une essence comme le sapin-épicéa, un modèle d'étalement donne le module élasticité $E_{//}$ (2) et la contrainte de flexion σ_b (3) en fonction de la vitesse longitudinale:

$$E_{//} = 6,28 V_L - 22 190 = \text{module d'élasticité moyen} \quad (2)$$

$$\sigma_b = 0,0249 V_L - 105,6 = \text{valeur caractéristique} \quad (3)$$

(f5%) de la résistance en flexion

Sur la base de ces modèles de calcul par méthodes non destructives, la Suisse a pu valider la classe 0 ($E_{//} = 14 000$ N/mm² et $\sigma_b = 17$ N/mm²), puis la classe 0+ ($E_{//} = 15 000$ N/mm² et $\sigma_b = 20$ N/mm²) quelque dix ans avant l'arrivée des *Swisscodes*, qui reprennent les classements européens de la norme EN 338 [2], selon le tableau I.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient aux références en fin d'article.

(Résineux et peuplier)		Classe de résistance								
Caractéristique	Symbole	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
Propriétés de résistance [N/mm ²]										
Flexion	$f_{m,k}$	14	16	18	22	24	27	30	35	40
Traction axiale	$f_{t, ,k}$	8	10	11	13	14	16	18	21	24
Traction transversale	$f_{t,\perp,k}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression axiale	$f_{c, ,k}$	16	17	18	20	21	22	23	25	26
Compression transversale	$f_{c,\perp,k}$	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3
Cisaillement	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8
Propriétés de rigidité [kN/mm ²]										
Module moyen d'élasticité axial	$E_{ ,moy}$	7	8	9	10	11	12	12	13	14
Module d'élasticité axial au fractile 5%	$E_{ ,05}$	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4
Module moyen d'élasticité transversal	$E_{\perp,moy}$	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47
Module moyen de cisaillement	G_{moy}	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88
Masse volumique [kg/m ³]										

Tableau I: Caractéristiques de résistance, de rigidité et de masse volumique des différentes classes de qualité de bois sciés selon EN 338 [2]

Fig. 1: Traitement du signal acousto-ultrasonique pour la mesure du temps de propagation et du pic d'énergie transmis

Fig. 2: Mesure du taux de dégradation d'un arbre urbain avec la méthode acousto-ultrasonique

Fig. 3: Application industrielle du triage mécanique par méthode acousto-ultrasonique

Aujourd'hui, la Suisse est le seul pays d'Europe qui va au-delà de la classe de haute performance C40: elle a admis la classe C45 pour exploiter l'excellent bois des plateaux jurassien et pré-alpin (aux environs de 700 à 1100 m d'altitude). Cette qualité permet de valoriser la spécificité de l'épicéa, dont la croissance ralentie en altitude - de un à deux mm de croissance annuelle, observable sur la largeur moyenne des cernes de croissance - génère des densités supérieures, soit du bois de hautes performances.

La méthode acousto-ultrasonique

En partenariat avec l'IBOIS/EPFL et l'AR/FNP², la société CBT développe et améliore depuis maintenant deux ans la technologie ultrason appliquée au bois, avec un outil de nouvelle génération qui intègre la mesure de la réponse acousto-ultrasonique du bois. S'il établit toujours la mesure de la vitesse de propagation d'une onde basse fréquence (20 kHz), l'appareil (*Sylvatest-Duo*[®]) y associe en outre la mesure du pic d'énergie maximal transmis par le bois (fig. 1).

La vitesse de propagation est toujours corrélée au module d'élasticité ($E_{//}$), mais l'énergie sera quant à elle corrélée aux singularités locales (nœuds, fibre torse, zone en phase de dégradation, etc.). En fait, la fonction d'amortissement de l'onde dépendant directement des singularités locales, la valeur maximale du pic énergétique constitue une mesure de la réponse acoustique du bois qui traduit très fidèlement la fonction d'amortissement.

Apte à mesurer et gérer les deux variables acousto-ultrasoniques, cette nouvelle génération d'appareillage permet de travailler en mesure de qualité dans les deux directions principales du bois.

² Antenne romande de l'Institut forêt, neige et paysage de Birmensdorf

En mode longitudinal

Appliquées au mode longitudinal, les deux variables acousto-ultrasoniques mesurées - la vitesse V_L et le pic énergétique P_{max} - permettent d'évaluer les deux propriétés de base d'un élément structurel bois, en levant l'incertitude liée à la variabilité naturelle du matériau au niveau macroscopique, soit: le module d'élasticité

$$E_{//} = \alpha_1 V_L + \beta_1 P_{max} + k_1 \quad (4)$$

la résistance caractéristique en flexion

$$\sigma_b = \alpha_2 V_L + \beta_2 P_{max} + k_2 \quad (5)$$

où α , β et k sont des constantes d'étalonnage.

Pour les bois de structure, la relation basée sur la loi de Hooke simplifiée sur l'axe longitudinal est très pauvre étant donné l'influence stochastique des singularités locales sur un échantillon de bois à l'échelle macroscopique. En revanche, la corrélation obtenue avec l'équation (5) est très supérieure puisqu'elle intègre à la fois l'influence du module d'élasticité, $E_{//}$ (4) et des singularités, via la mesure du pic d'énergie, P_{max} .

En mesure radiale

Sur l'axe radial (perpendiculaire aux cernes de croissance), la très faible variabilité du bois peut être négligée. Dans ce cas, l'équation (6), basée sur le module d'élasticité radial E_R , sera donc une constante pour une essence donnée et pour du bois sain:

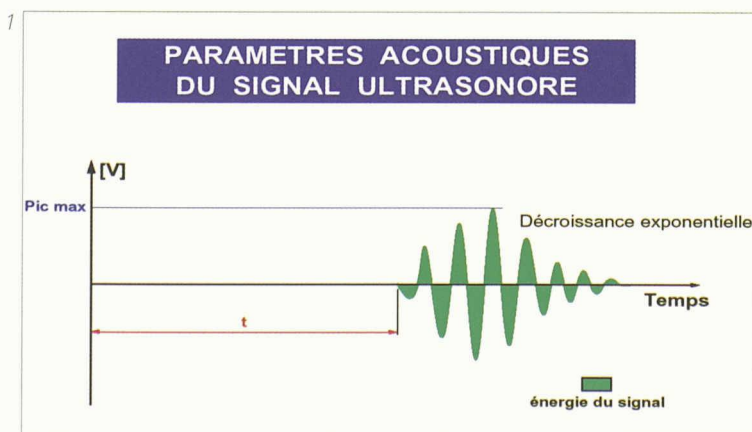
$$V_R = \sqrt{\frac{E_R}{\rho}} \cong \text{constante} \quad (6)$$

Sur cette base, il est donc possible de procéder à la détection de défauts, trous ou tares internes sur des arbres sur pied ou de mesurer le décollement de planches perpendiculairement aux fibres, par exemple pour le lamellé-collé ou le parquet collé.

Le taux de défaut sera donné par l'équation:

$$T_{(\%)} = \alpha_3 \left\{ \frac{V_{R,ref} - V_{R,mes}}{V_{R,ref}} \right\} + \beta_3 \left\{ \frac{P_{max,ref} - P_{max,mes}}{P_{max,ref}} \right\} + k_3 \quad (7)$$

En mode radial également, la mesure énergétique permettra de préciser le type de défaut mesuré. En effet, l'énergie transmise varie d'un facteur cent en cas de trou (délamination, arbre creux) par rapport à du bois sain considéré comme référence.



La figure 2 montre l'application de l'appareil pour l'évaluation de la sécurité d'un arbre urbain par la mesure du taux de dégradation sur l'axe radial, tandis que la figure 3 illustre une application industrielle de triage mécanique d'éléments bois destinés à la structure. Dans ce dernier cas, un processeur électronique permet à la machine de travailler en ligne dans la chaîne de production. Pour aller plus vite en cadence de production (de l'ordre de 150 m/min), cette machine peut travailler avec un système multi-têtes pour les mesures (deux, quatre ou huit paires de sondes).

Pour chaque application, les résultats de mesure sont exploités par le logiciel *Sylvius* qui transmet des données directement exploitables par l'opérateur ou informe, dans le cas industriel, le logiciel gestionnaire des flux de planches pour faire bon usage de la qualité haute performance (par exemple pour la production de poutres lamellées collées hautes performances).



2

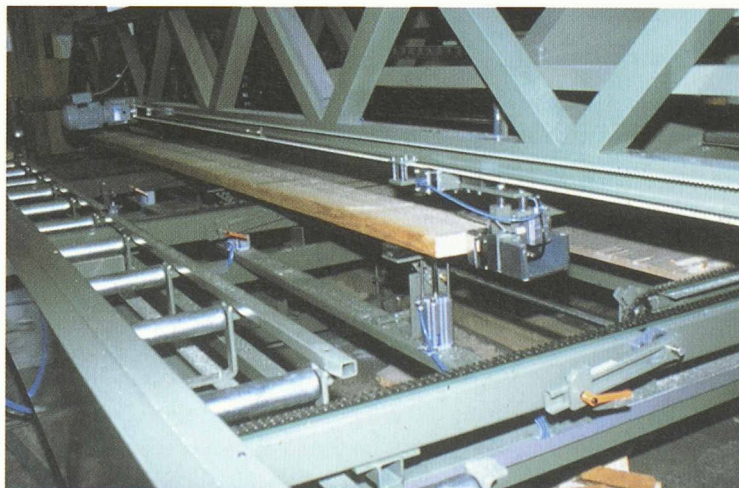
L'évaluation des poteaux bois en service

Sur la lancée des travaux de recherche visant la mesure de qualité du bois par la méthode acousto-ultrasonique, un important programme de recherche financé par EDF (France) et l'EPFL a été entrepris au début des années 90 pour la mesure de poteaux bois en service utilisés comme supports de lignes électriques aériennes. Le but était de développer un appareil répondant aux trois objectifs suivants:

- mesure de la fiabilité résiduelle du poteau bois en service, pour assurer la sécurité des opérateurs devant ascensionner le support;
- mesure de la performance résiduelle du poteau, pour éliminer préventivement les points faibles du réseau et accroître sa fiabilité globale;
- mesure projective de la durée de vie résiduelle du poteau (zéro, trois, cinq ou huit ans), pour planifier et optimiser les interventions de maintenance.

A l'issue de ces travaux de recherche, ayant porté sur plus de 1500 poteaux testés à ce jour sur les cinq continents, il est rapidement apparu que la méthode acousto-ultrasonique n'était pas performante dans ce cas: elle est beaucoup trop perturbée par les fentes naturelles de séchage du bois qui jouent un rôle perturbateur aléatoire. (Cela n'empêche pas des fabricants japonais et anglais de commercialiser une méthode de ce type pour les poteaux, mais ils ont la sagesse de ne garantir aucune performance de leur produit).

Un autre concept de mesure physique a donc dû être développé et, à la lumière de l'expérience acquise avec l'ultrason, il a vite été admis qu'un modèle bi-varié, voire multi-varié serait beaucoup plus pertinent. En vertu des objectifs fixés, la



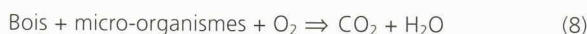
3

mesure du poteau bois en service doit en outre être envisagée par rapport à la performance mécanique locale du bois et à une éventuelle dégradation biologique. Des effets supplémentaires - tels que l'effet d'échelle du diamètre ou encore les couronnes de nœuds proches de l'encastrement - peuvent compléter le modèle multi-varié. Contrairement aux croyances empiriques, l'âge n'a en revanche pas d'effet significatif sur le modèle multi-varié général. Enfin, les bois constituant les poteaux de ligne pouvant être très différents à l'échelle de la planète, le modèle général doit pouvoir être exploité et optimisé pour une essence donnée.

Si l'on observe le fonctionnement physico-mécanique d'un poteau bois, deux particularités fondamentales apparaissent :

- le moment fléchissant maximum dans le poteau est atteint en cas de vent extrême (comportement dynamique) et il se trouve à l'encastrement (au niveau du sol) puisque le poteau travaille comme une poutre en porte-à-faux;
- le risque de dégradation biologique maximum est au niveau du sol, à l'interface air-sol.

Bien qu'exposée (classe III) la partie aérienne du poteau peut en effet très vite sécher sous l'action du vent. La zone de l'interface sol-air est en contact avec le sol (classe IV). Quand à la zone encastree, elle est soit immergée, dans des sols non filtrants, soit compactée pour des sols filtrants. Dans les deux cas, la disponibilité en oxygène est très faible, ce qui bloque la réaction de bio-dégradation, selon l'équation :



On constate donc que, comme pour la performance mécanique, la zone biologique à risque est la ligne de sol. C'est donc dans cette zone qu'il importe de localiser la mesure des propriétés physico-mécaniques.

Mesure de dureté

Comme on l'a vu précédemment, le paramètre principal expliquant la variabilité du bois est sa densité (liée aux conditions de croissance). On va donc évaluer cette densité en enfonçant deux aiguilles de trois mm de diamètre sur une longueur de pénétration de 40 mm. On mesure ainsi la pression de pénétration avec un capteur de force monté en série entre la paire d'aiguilles et le bras de levier permettant de donner la pression.

Mesure de l'hygroscopie interne

Une fois ces deux aiguilles enfoncées, on mesure l'hygroscopie interne du bois. En effet, un bois en équilibre hygroscopique affiche une humidité interne d'environ 20% à 25% dans les pires conditions climatiques, soit un peu moins que

le point de saturation des fibres, qui s'établit autour de 30%. Quand il y a biodégradation, l'activité des micro-organismes produit de l'eau selon l'équation (8). Excédant le point de saturation des fibres (eau libre), cette production d'eau se situe entre 50% et 70%.

Si le poteau est immergé (sol marécageux ou non drainant), l'eau libre remonte par capillarité dans les vides cellulaires pour saturer à nouveau les fibres d'eau libre, comme le ferait l'autoclave de traitement. Dans ce cas, le taux hygroscopique atteint des valeurs de saturation complète, de 120% à 180% pour l'épicéa.

Application

La mesure hygroscopique s'avère donc très stratégique pour connaître l'état physique interne du bois. La figure 4 illustre l'application des principes décrits avec l'appareil *Polux*. Pour l'interprétation des conditions physiques instantanées du poteau, la figure 5 redéfinit les trois grands domaines physiques de l'eau dans le bois pour un poteau de ligne en service. Associé à un tel appareil, un logiciel d'analyse des données gère les informations obtenues par la mesure dans le terrain et donne un résumé de la fiabilité du réseau en termes de sécurité et de durée de vie résiduelle.

Pour généraliser le contrôle de lignes, et grâce à l'utilisation de périphériques informatiques dans le terrain, un modèle d'évaluation généralisé a pu être développé sur la base d'une approche multi-variée, selon l'équation suivante :

$$MOR_{res} = aF + bH + cD + dN + eA + k \quad (9)$$

où :

MOR_{res}	: résistance ultime à la flexion
F	: effort de pression [N]
H	: taux hygroscopique interne [%]
D	: diamètre du poteau [mm]
N	: indice de nodosité locale [mm]
A	: âge en années

a, b, c, d, e et k : constantes d'étalonnage.

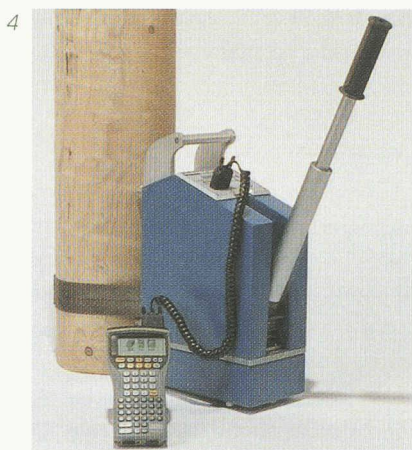
Des périphériques informatiques permettent la gestion de toutes les autres données relatives à la ligne d'un point de vue technique ou administratif. A l'aide de logiciels *ad hoc*, toutes ces données peuvent être saisies sur le terrain par un opérateur, être transférées sur les banques de données centrales des grandes compagnies téléphoniques ou électriques, puis téléchargées pour effectuer les contrôles suivants en les comparant à celles déjà relevées. Quant à l'information géographique saisie avec les micro-terminaux GPS (*Global Positionning System*), elle permet de reconstruire

Fig. 4: Expertise physique d'un poteau bois en service par mesure de dureté locale et d'hygroscopie interne

Fig. 5: Définition des domaines physiques de l'eau dans le bois pour l'interprétation des conditions physiques d'un poteau en service

Fig. 6: Principe du concept de la poutre multi-collée de type Herculle

Fig. 7: Différence de résistance ultime de poutres en bois lamellé-collé en comparaison avec des poutres multi-collées



re la ligne sur l'ordinateur et de planifier une maintenance optimale. Ces développements précurseurs ont été réalisés très récemment pour les télécoms espagnols (*Telefonica*) avec la mise en service de cent appareils de mesure. D'autres pays participent actuellement à des projets pilotes de même ambition.

L'innovation en systèmes structurels

Toujours dans la perspective d'un développement durable - qui favorise l'usage rationnel d'un matériau disponible localement (ressource renouvelable de proximité) - et pour tirer la quintessence du potentiel des bois, plusieurs systèmes structurels ont été développés ces dernières années, en partenariat avec l'IBOIS/EPFL.

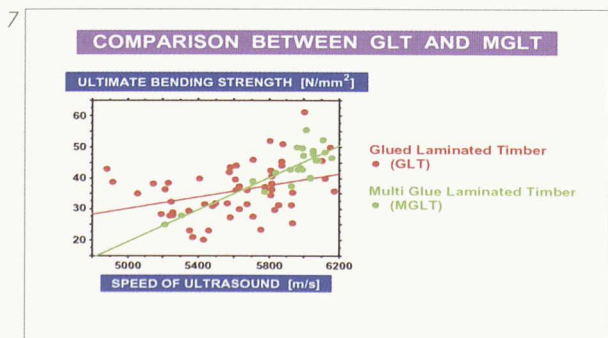
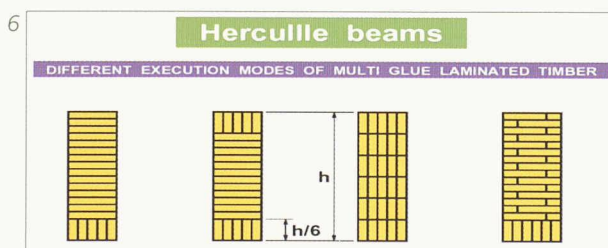
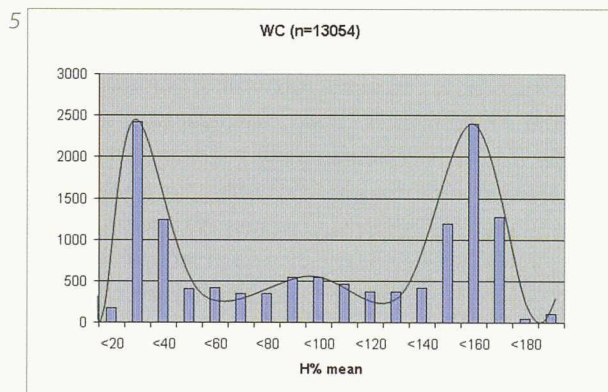
Le bois lamellé collé haute performance

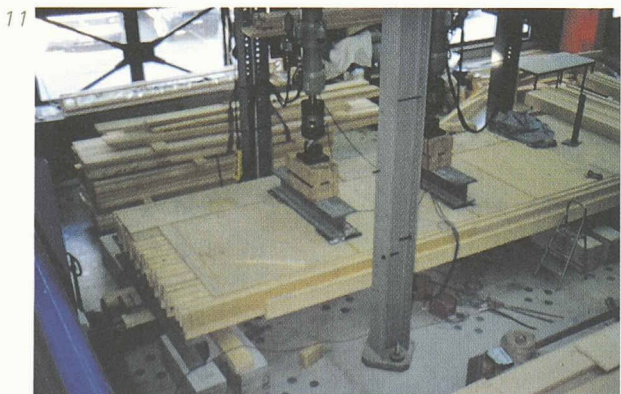
Même si elle est fabriquée avec du bois de haute performance - choisi après triage à l'ultrason, par exemple, et pouvant afficher un module d'élasticité élevé (jusqu'à 16 000 N/mm²) -, la poutre bois en lamellé-collé (BLC) usuelle ne peut toutefois être garantie en haute performance pour la contrainte de flexion. En effet, un petit défaut physique (une singularité comme un nœud) ou une limite de performance de l'aboutage par entures multiples suffira à faire casser la poutre, lui conférant un comportement strictement élastique fragile.

Avec une semelle en lames verticales dans la zone de traction, cette fragilité est repoussée pour atteindre une résistance ultime supérieure et, surtout, nettement moins variable. Avec des planches présentant une variabilité de l'ordre de 30%, les poutres BLC afficheront un coefficient de variation de 20% alors que la poutre multi-collée avec lames verticales, faite des mêmes bois et toujours pour la flexion, donnera un coefficient de variation de seulement 10%.

La poutre en bois lamellé multi-collé (fig. 6) permet ainsi d'atteindre la haute performance pour des valeurs de contraintes admissibles en flexion de $\sigma_b = 20 \text{ N/mm}^2$ (valeur admissible) soit 50% à 70% de plus que les valeurs usuelles du BLC, grâce à la fiabilité du système de planches travaillant en parallèle dans la zone de traction, par opposition au système sériel (fragile) du bois lamellé-collé classique. La différence de résistance ultime entre poutres en bois lamellé-collé et poutres multi-collées en fonction de leur module d'élasticité est illustré à la figure 7.

Bien évidemment, l'effet système parallèle fonctionne également pour la contrainte de compression perpendiculaire aux fibres. De plus, au niveau de l'effet volume (ou de l'ef-





fet de hauteur), la poutre multi-collée devient insensible, puisqu'elle sort du comportement spécifique strictement élastique fragile.

Les dalles en planches décalées

Dans l'idée d'exploiter le comportement spécifique de systèmes bois à composants parallèles, la dalle *O'Portune* représente une innovation pour la valorisation des planches dans le domaine des dalles de hautes performances et de grandes portées. Son principe consiste à connecter (par vissage, clouage, etc.) des planches posées sur champs et décalées sur la hauteur pour augmenter la hauteur statique de la dalle. Afin d'améliorer l'isotropie partielle de cette dalle, un panneau micro-lames à haute performance longitudinale peut être croisé sur ces planches. On obtient la coupe type reproduite à la figure 12.

Sous des charges ponctuelles de type essieu de camion, le comportement du panneau micro-lames est assimilable, après déformation, à celui d'une membrane tendue autour de la charge, qui diffuse transversalement aux planches la charge concentrée introduite sur la dalle.

Dans l'exemple des tabliers en bois qui constituent les plates-formes offshore d'*Expo.02* à Neuchâtel et Bienne, les essais de validation du système (fig. 11) ont permis - pour le cas de charge d'essieux du modèle 1 de la norme SIA 160 - d'étudier le schéma de diffusion des efforts dans la dalle. A partir d'une charge introduite sur une largeur de 400 mm sur la dalle, la largeur effective de dalle mobilisée par la diffusion du panneau micro-lames sera de 1260 mm, soit trois fois plus que la dimension d'introduction.

Ce comportement optimal est obtenu en utilisant un connecteur de type vis (6/220 mm pour les dalles d'*Expo.02*) qui a l'avantage d'améliorer considérablement la perfor-

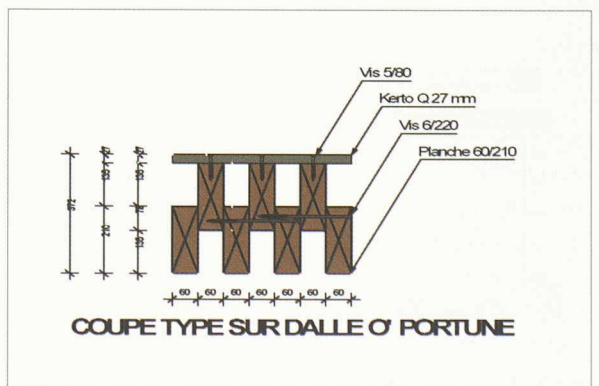


Fig. 8 à 10: Phases de montage du tablier bois des plates-formes pour Expo.02
 Fig. 11: Essais de validation à l'échelle 1/1 du concept de la dalle O'Portune pour les plates-formes d'Expo.02

Fig. 12: Coupe type de principe de la dalle en planches décalées

Fig. 13 et 14: Principe et exemple de la dalle en planches plissées, pour le domaine de l'habitat ou du bureau

mance en cisaillement de la section composée, par l'effet d'une précontrainte transversale des planches.

Bien évidemment, pour conserver cette performance de cisaillement, le bois ne doit pas sécher après la mise en œuvre. Son taux hygroscopique à la fabrication sera donc inférieur ou égal à l'hygroscopie d'équilibre la plus défavorable de la dalle ($H = 17\%$ dans le cas des dalles d'Expo.02). Les figures 8 à 10 montrent les phases de montage du tablier bois pour les plates-formes d'Expo.02.

Le panneau en planches plissées

Si la dalle en planches décalées a été conçue et développée pour des hautes performances (6,1 m de portée pour 4x75 kN, avec des planches de 21 cm de hauteur dans le cas des plates-formes Expo.02), une dalle de petite portée (3 à 6 m) destinée à des charges conventionnelles d'habitat ou de bureau, légère, économique et architecturale peut être obtenue grâce à la conception du panneau en planches plissées.

En bois massif, ce panneau structurel novateur est basé sur le vissage de planches en «W» posées sur une crémaillère qui donne le gabarit en «W» et la rigidité transversale. C'est le principe du panneau *Wénus*. Les figures 13 et 14 montrent la conception extrêmement simple de cette dalle, avec son rendu architectural, dans un espace destiné à des bureaux. Là également, les bois doivent être assemblés secs, pour éviter tout retrait qui serait dommageable à la performance et surtout à l'esthétique de ces dalles.

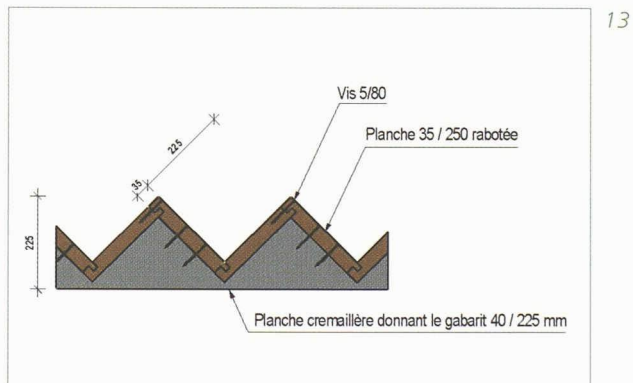
Pour une portée libre de 5 m en poutre simple, des planches de 27/200 mm suffisent pour reprendre 300 kg/m² de surcharge d'exploitation. En cas de tenue au feu exigée (F30 ou F60), l'épaisseur nominale des planches sera augmentée.

Du point de vue économique, on notera qu'une dalle de 5 m intégrant un plafond bois acoustique est ainsi réalisée avec seulement 40 mm de bois par m², ce qui représente actuellement le maximum d'efficacité connu.

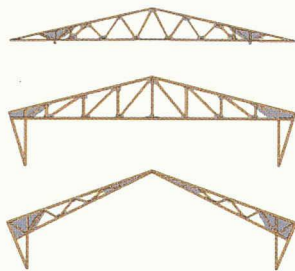
Les fermes triangulées en planches

Autre innovation dans les systèmes porteurs en bois, cette ferme triangulée est composée de planches en bois massif disposées en couches et assemblées dans les nœuds sur des goussets en panneau micro-lames. Les assemblages sont réalisés par clous, vis, broches ou boulons.

Ce système structurel renforcé dans les nœuds est très hyperstatique, ce qui permet d'optimiser la quantité de matière et de connecteurs. Les planches d'arbalétrier et de diagonales seront choisies dans des qualités très moyennes



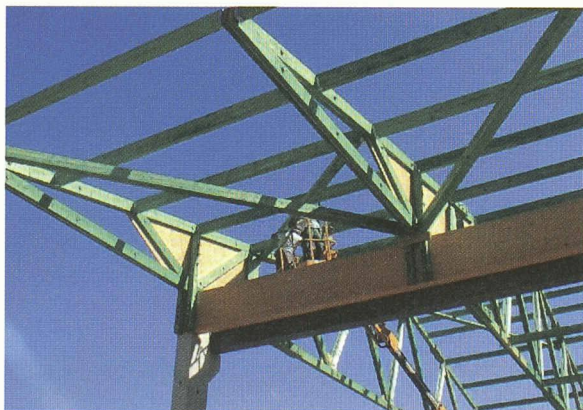
15



16a



16b



16c



(C22 à C24), tandis que les éléments de traction seront triés pour travailler avec les hautes performances, soit les qualités C35 à C40.

Quant à la modélisation statique, elle intègre les encastresments dans les nœuds et exploite les performances en cisaillement des inserts en panneau micro-lames. Les principaux systèmes statiques développés (fig. 15) sont la poutre triangulée sur deux ou trois appuis, le portique à deux articulations ou encore le portique à trois articulations, permettant une préfabrication d'éléments plus facilement transportables.

La compétitivité de ce type de bâtiments en ferme *Ariane* (nom de cette ferme avec des membrures en planches «tissées») tient au fait que le volume de bois utilisé est à la fois faible et de coût réduit (planches séchées), et que les connecteurs sont aussi très simples. L'ingénierie est par contre plus complexe, mais elle se justifie dès l'instant où les centres d'usinage (robot de taillage) sont capables de tailler toutes les pièces d'une ferme sans intervention humaine, sur la seule base des fichiers de plans d'atelier exécutés par DAO. Les figures 16 montrent un bâtiment récemment achevé de 26 m de portée et deux fois six mètres de porte-à-faux, soit des fermes de 38 m, réalisées en *Ariane 3* (trois couches de planches) avec des bois massifs de section 68/215 mm et des inserts en panneaux *kerto* $Q = 27$ mm.

La fixation invisible

Toujours pour valoriser l'utilisation du bois massif, cette fois en aménagements extérieurs, une nouveauté à fixation invisible résout un problème récurrent de la fixation du bois en bardage ou terrasse. Le système *Jupit'air* (le «velcro du bois») place la fixation sous ou derrière la planche exposée, ce qui élimine un connecteur visible, donc un foyer potentiel de biodégradation, et favorise la durabilité de ce bois pourtant exposé en l'espaçant pour mieux le ventiler. Cette solution de protection constructive permet l'exploitation sans traitement chimique d'essences locales comme le mélèze ou le douglas, soit des options écologiquement souhaitables. Les figures 17 et 18 montrent le principe de cette fixation et une application.

Conclusions

Dans la perspective de l'intégration, au domaine de la construction, des critères favorisant le développement durable, le bois connaît une renaissance dynamisée par tout un ensemble d'innovations. Le présent article en illustre sommairement quelques-unes, sous l'angle technologique et structurel. Fruits de quinze ans de recherche et développement entre un bureau d'ingénieurs et la chaire de construction en bois du département de Génie Civil de l'EPFL (aujourd-

Fig. 15: Systèmes statiques de la ferme Ariane: poutre triangulée sur deux appuis, portique triangulé à deux articulations, portique triangulé à trois articulations

Fig. 16: Bâtiment réalisé avec des fermes Ariane

Fig. 17: Principe de la fixation Jupit'Air, avec son gabarit de marquage du positionnement de la lame sur le support

Fig. 18: Exemple de terrasse en bois fixée avec Jupit'Air

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par Concept Bois Technologie SA)

d'hui rattachée à la faculté ENAC), ces exemples montrent clairement, et une fois de plus, l'intérêt que la Haute école lausannoise porte au développement de l'économie régionale. Pour le bois, qui a été délaissé pendant presque l'entier du XX^e siècle, la recherche universitaire se montre non seulement prolifique, mais encore capable d'associer des problèmes socio-économiques contemporains (développement durable, entretien de la forêt suisse, création d'emplois) à des innovations techniques ou scientifiques de portée internationale.

Dans le domaine de la construction, l'approche bois se présente comme une éclaircie dans un ciel actuellement gris. Au fur et à mesure de son redéploiement, cette démarche alternative apportera sa touche sensible à l'expression architecturale de demain, et requerra à n'en pas douter des capacités complémentaires chez l'architecte et l'ingénieur travaillant de concert avec les technopôles de mise en œuvre.

Remerciements

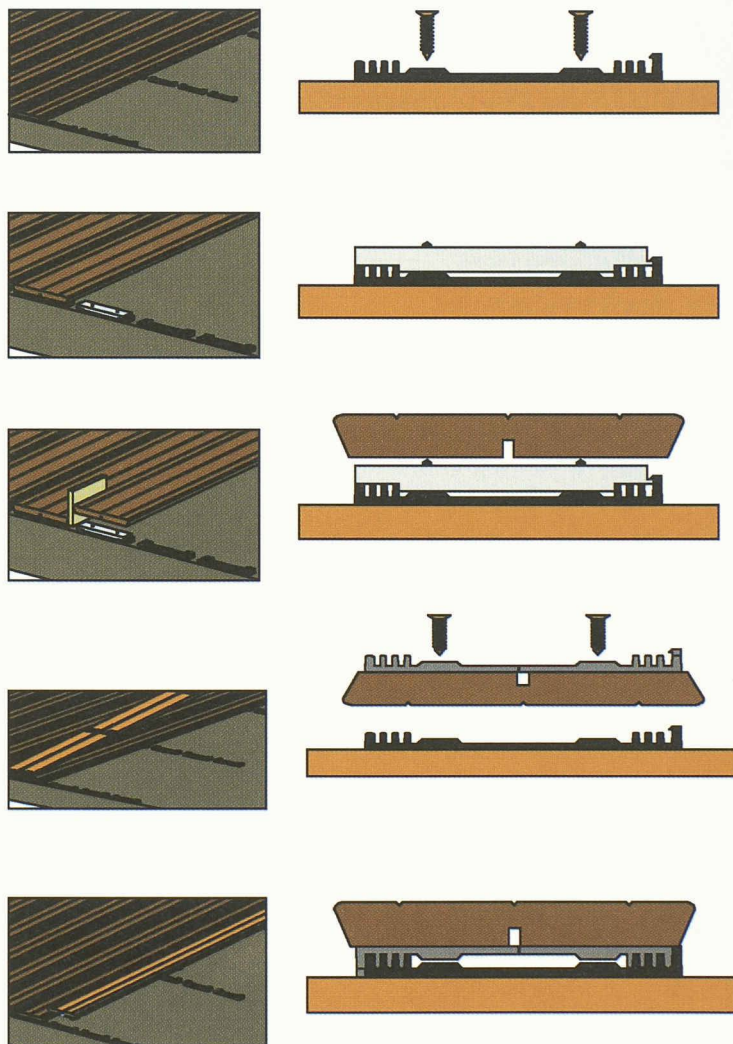
Pilotant l'ensemble de ces développements technologiques depuis quinze ans, l'auteur tient à remercier tous les partenaires sans lesquels rien ne serait possible et notamment:

- l'AR/FNP de l'EPFL, et plus particulièrement M. Jean Combe,
- Batigroup SA, Entreprise Générale à Bâle, M. Jean-Marc Allégri, chef de projet plates-formes Expo.02,
- le Département vaudois de l'Economie,
- EDF, Electricité de France, à Paris,
- le Fond National pour la Recherche Scientifique (FNRS) et la Commission pour la Technologie et l'Innovation (CTI) à Berne,
- les services forestiers de Suisse Romande,
- les responsables du Parc jurassien vaudois (PJV),
- l'EPFL en général et la chaire bois du département de Génie-Civil (IBOIS) en particulier, soit toute l'équipe de doctorants, d'ingénieurs, d'assistants avec une mention spéciale au Prof. J. Natterer qui a transmis, au travers de son génie éclairé, les orientations et les motivations indispensables à la prise de risque et à l'engagement total,
- enfin, toute l'équipe de CBT, Concept Bois Technologie SA, à St-Sulpice.

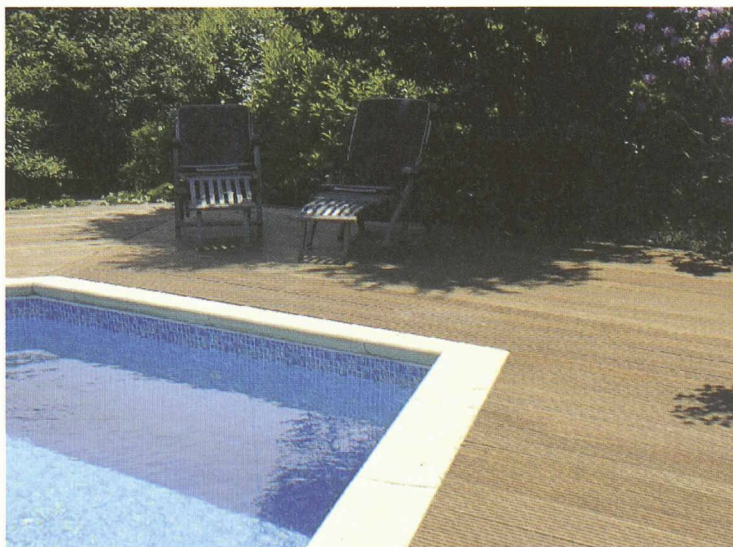
Références

- [1] J.-L. SANDOZ, 1990: Triage et fiabilité des bois de construction: validité de la méthode ultrason, thèse n°851, EPFL
 - [2] EN 338, 1995: Bois de structure, classes de résistance, Bruxelles, Comité Européen de Normalisation
- Pour en savoir plus: <www.cbs-cbt.com>

Jean-Luc Sandoz, Dr ès sc. tech.
 Concept Bois Technologie SA, Jordils Park, Rue des Jordils 40
 CH - 1025 Saint-Sulpice



17



18