

## **L'innovation technologique au service de l'Art**

À l'occasion des représentations de l'opéra Nabucco à la cathédrale de Lausanne en novembre 2018, cette dernière revêt un manteau de bois unique et encore jamais présenté.

### **Qui sommes nous ?**

Le Laboratoire de constructions en bois de l'EPFL, IBOIS, est dirigé depuis 2004 par le Professeur Yves Weinand. Doté d'un double diplôme d'architecte et d'ingénieur civil, le professeur explore avec son équipe (ingénieurs civils, architectes, mathématiciens et informaticiens) les potentiels encore inexploités du bois.

À travers une vision globale du projet d'architecture, les recherches menées au sein du laboratoire questionnent les modes de construction contemporains, depuis leur conception jusqu'à leur mise en œuvre, et interrogent leur devenir en fin de vie. Le laboratoire IBOIS poursuit de nombreuses recherches et met en œuvre ses découvertes via des transferts technologiques appliqués à des projets tels que récemment la Chapelle Saint Loup ou le Pavillon du Théâtre de Vidy.

### **Nos préoccupations**

En 2010, le secteur du bâtiment était responsable de près d'un tiers (32%) des dépenses globales en énergies. Cette consommation peut être significativement réduite via l'utilisation de matériaux dont la production requiert moins d'énergie, tels que le bois. Un bâtiment en bois, c'est 90% de matériaux recyclables ou réutilisables. C'est sur ce constat qu'intervient le Laboratoire de construction en bois de l'EPFL.

Le bois possède des caractéristiques mécaniques extrêmement intéressantes et encore sous-exploitées. Son cycle de vie en fait un matériau à la fois durable, renouvelable et dégradable. Ce matériau admet également une très large diversité d'essences qui présentent des résistances variables, une certaine flexibilité et des applications infinies. Sa simplicité de transport, de mise en œuvre et d'assemblage font du bois un matériau idéal pour la production d'éléments préfabriqués destinés au bâti.

### **Contexte**

Pour la réalisation de coques et de structures spatiales, les panneaux de bois s'adaptent facilement à des formes irrégulières et non orthogonales. Les avancées techniques et technologiques simplifient grandement la préfabrication. Toutefois, si les panneaux de bois LVL offrent d'intéressantes propriétés mécaniques, les possibilités de design sont réduites par le manque d'efficacité des éléments de jonction. Des composés géométriquement simples tels que les caissons Kerto Ripa sont assemblés grâce à des liaisons collées. Lors du montage in-situ, il devient en outre nécessaire d'ajouter des attaches ou éléments métalliques de fixation, de plus il n'est pas toujours possible de coller ensemble les éléments sur place, à cause des

conditions environnementales particulières requises pour l'usage des colles. Pour des structures plus complexes, telles que des structures pliées, l'assemblage de joints non orthogonaux devient un réel défi, même avec des éléments de jonction métalliques. Des études précédentes ont par ailleurs démontré que l'efficacité structurelle d'un édifice en bois pouvait être considérablement améliorée si les joints venaient à être optimisés. (Hahn, 2009)

Une possibilité d'amélioration réside dans la plus vieille méthode d'assemblage connue : les joints mécaniques intégrés (Messler, 2006). Ce sont des liaisons solides, telles que les tenons-mortaises, les queues d'aronde ou encore les assemblages à queue droite (finger-joints) qui sont communément utilisés dans la charpenterie et la menuiserie traditionnelle. Avec l'industrialisation croissante et la prolifération des machines, ces joints ont été largement remplacés par la production massive de fixations métalliques. Ce n'est que récemment que l'industrie du bois a pris conscience que des outils tels que les interfaces de génération algorithmiques peuvent être utilisés pour l'analyse et la conception des liaisons intégrées, provoquant la résurgence de techniques de fixations mécaniques intégrées. Une seconde alternative possible pour l'assemblage de panneaux de bois sans l'utilisation de fixations additionnelles existe dans des jonctions dites « élastiques », qui constituent une autre technique connue d'assemblage mécaniques.

Ces joints élastiques appelés « joints snap fit » permettent un verrouillage mécanique pour relier ensemble deux éléments de bois. Ils sont aujourd'hui largement utilisés dans l'industrie comme un moyen simple, économique et rapide de connecter deux éléments.

## Innovation

En 2014 le laboratoire IBOIS de l'EPFL présentait à la conférence Acadia 2014 Design Agency à Los Angeles un modèle de joints clipsés en bois, encore inédit\*. Concrètement, en explorant les propriétés d'élasticité du bois et particulièrement sa viscosité, le laboratoire a mis au point système de prise mâle et femelle, qui une fois emboîtés (ou "clipsés") sont capables de maintenir ensemble deux éléments de bois sans ajout de colle ou de métal. Le principe de connexion instantanée a déjà été utilisé dans l'industrie automobile par exemple, mais s'il venait à être utilisé dans la construction, il pourrait simplifier la mise en œuvre, raccourcir le temps de montage et diminuer son coût.

Le joint se compose d'un élément mâle et un femelle, à la manière d'un tenon-mortaise où le tenon (mâle) viendrait se clipser dans la mortaise (femelle). Le tenon est doté en son extrémité d'un crochet, et subit une compression temporaire pour s'insérer dans la mortaise. Cette compression est permise par l'élasticité du matériau. Lorsque les deux prises sont emboîtées, la compression est relâchée et le tenon retrouve son état initial, assurant ainsi l'assemblage des éléments sans stress. L'étude de la force maximale admise par l'élément tenon en compression est primordiale car il faut éviter que les fibres de bois de la tête du tenon ne s'écrasent lors de l'encastrement dans la mortaise. L'utilisation de tels joints pour lier ensemble des panneaux de bois ouvre la porte à de nouvelles structures tridimensionnelles entièrement en bois.

## Une nouvelle technologie basée sur des méthodes d'assemblage complémentaires

Si les *snap-fit joints* peuvent assurer un certain maintien entre les éléments, ils n'admettent en revanche aucune résistance au cisaillement. Afin de pouvoir utiliser ce type de joints en tant qu'éléments de construction capables de reprendre et transmettre les efforts de la structure, IBOIS a combiné les joints snap-fit avec des joints de type queue d'aronde prismatiques qui récupèrent la majorité des efforts. La combinaison de ces éléments a pour résultat un assemblage au comportement mécanique équivalent à des joints vissés. Leur résistance aux efforts tranchants dépend de la longueur des éléments assemblés.

Un premier prototype réalisé en laboratoire a permis l'étude du comportement de ces assemblages. L'élément est paramétré via un script Python sur Rhino 3D, ensuite le script génère automatiquement la géométrie des joints à partir de l'épaisseur des panneaux. Le modèle tridimensionnel est ensuite envoyé pour la découpe sur une découpeuse CNC. Le temps de découpe des éléments – inexistant dans le cas d'un assemblage conventionnel – est compensé par la rapidité de montage. L'assemblage d'une poutre à joints snap-fit se fait en deux étapes : d'abord le clipsage des éléments latéraux sur l'élément du dessous, puis la partie supérieure vient se clipser et compléter la poutre. Ceci signifie également qu'une poutre peut être transportée démontée et à plat, et montée directement sur le chantier. Son assemblage est intuitif et ne nécessite pas d'outillage particulier. Ce procédé réduit considérablement le volume de transport.

C'est le même processus qui est aujourd'hui appliqué pour l'ensemble de la fabrication des bancs destinés aux spectateurs de l'opéra Nabucco.

## De nombreux avantages sur les liaisons métalliques

Comme vu précédemment, les éléments de liaison métalliques tels que les vis conviennent pour un assemblage rapide directement sur le site, contrairement à des liaisons par collage. Toutefois ces éléments additionnels nécessitent une épaisseur minimum des éléments à assembler pour être efficaces, et ils ne peuvent être utilisés sur des panneaux LVL trop fins par exemple. Ils nécessitent également d'importants moyens pour une mise en œuvre précise, contrairement à des joints mécaniques intégrés, qui sont préfabriqués pour s'emboîter parfaitement avec une tolérance de 0.1mm. Le processus de mise en œuvre de ces nouveaux joints (modélisation numérique, paramétrisation, découpe CNC) permet une optimisation de la géométrie des joints au sein même de la structure, et peut être adaptée selon le matériau choisi, son épaisseur, l'angle d'assemblage etc. Le transport des éléments à plat avant montage permet une optimisation du volume déplacé. Les joints snap-fit permettent un assemblage et un désassemblage rapide, Les joints snap-fit forment une connexion bois-bois ; les avantages d'une connexion à matériau unique sont nombreux : aspect et esthétique,

facilité de recyclage, conductivité thermique homogène etc. Associés à des joints mécaniques de type queue d'aronde, les performances mécaniques d'un tel assemblage sont très prometteuses. Les bancs présentés par IBOIS pour l'opéra Nabucco sont un infime aperçu des possibilités offertes par ces nouvelles technologies.

### Application du processus au projet Nabucco

Le rôle du modèle numérique dans ce processus de création de structures en bois est essentiel. Ces nouveaux outils ouvrent le champ des possibilités, à de nouvelles formes structurales, de nouveaux assemblages, les seules restrictions à la création sont celles inhérentes au matériau bois.

Avec le projet Nabucco, le laboratoire présente au grand public une application concrète de ses recherches, par le biais d'un projet simple, compréhensible et intuitif. La totalité de la structure mise en place pour Nabucco est démontable et réutilisable. Sa mise en œuvre ne nécessite pas d'outils particuliers et se fait manuellement. Suite aux représentations, certains bancs seront laissés à la cathédrale pour accueillir des événements ultérieurs, tels que des concerts d'orgue. La structure sera proposée à la vente pour une seconde vie. A moyen terme, des applications dans la construction en bois de ce type de joint pourraient voir le jour.

### Illustrations (à télécharger sur [go.epfl.ch/Nabucco2018](http://go.epfl.ch/Nabucco2018))

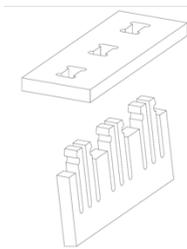


Schéma de principe des joints clipsés



Détail d'un joint



Exemple de réalisation



Prototype de banc



Maquette de l'installation dans la Cathédrale



**IBOIS**  
Laboratory for Timber  
Constructions

## Du bois clipsé pour l'opéra Nabucco : dossier de presse 7 septembre 2018

**Maître de l'ouvrage**

Amabilis, Renens

**Architecte**

Yves Weinand Architectes sàrl, Lausanne

**Ingénieur civil**

Bureau d'études Weinand, Liège (BE)

**Transfert technologique / Laboratoire des constructions en bois, IBOIS, EPFL**

Prof. Dr. Yves Weinand,

Julien Gamarro

Petras Vestartas

Loïc Pelletier

Martin Nakad

Dr. Christopher Robeller