

Tressage, tissage et tricot dans la **construction** en bois

Ressource naturelle renouvelable, le bois ne requiert que peu d'énergie pour sa transformation, son assemblage ou encore son recyclage. Mais au-delà de son aspect écolo, il s'agit d'un matériau aux propriétés structurelles remarquables, qui demeure peu exploité dans la construction actuelle. Le laboratoire de construction en bois de l'EPFL se donne pour objectif d'explorer le potentiel de structures innovantes en bois.

Les structures en bois formées d'éléments rectilignes ont guidé la conception de charpentes depuis plusieurs siècles. Mais contrairement au béton ou à l'acier – matériaux dominant la construction depuis la fin du XIX^e siècle – l'analyse des structures n'a été que très peu appliquée aux structures en bois. Avec le développement de nouveaux outils informatiques, il est désormais possible d'élargir considérablement le champ d'application de ces dernières.

L'utilisation de tels outils laisse entrevoir de nouvelles géométries, des modes de construction inédits, bref, des approches qui tendent vers un nouveau champ d'investigation en ingénierie des structures en bois. Le recours à des éléments surfaciques faits de matériaux dérivés du bois ou à des éléments linéaires incurvés sont autant d'innovations qui ouvrent la voie à une plus grande utilisation du bois pour

la construction de bâtiments publics. En plus de stimuler le développement des structures innovantes, les recherches menées par le l'IBOIS visent à questionner la relation entre les sciences de l'ingénieur civil et le processus de conception propre à l'architecte.

Bien ancré à l'Institut de Structures (IS), l'IBOIS entretient aussi des liens forts avec la Section architecture de l'EPFL (SAR) par le biais d'un atelier destiné aux étudiants de la filiale master (voir encadré p. 17 et interview p. 7). Cette proximité entre génie civil et architecture a été déterminante pour les travaux et résultats présentés ci-après.

Profiter de l'effet système

De nos jours, les usages liés à l'architecture se diversifient. Certains types de bâtiments requièrent des structures nouvelles, mieux adaptées à des programmes flexibles, tant d'un point de vue temporel que d'utilisation de l'espace. Les coques aux formes dites « libres » (*free-form shells*), aux courbes et contre-courbes souvent asymétriques, représentent ainsi un potentiel de réponse à ces nouveaux besoins. L'aspect novateur de ces structures réside principalement dans le caractère irrégulier de leur forme et dans leur conception modulaire inspirée de la théorie des fonctions itératives (*IFS iterative function systems*), qui induit un effet « système ».

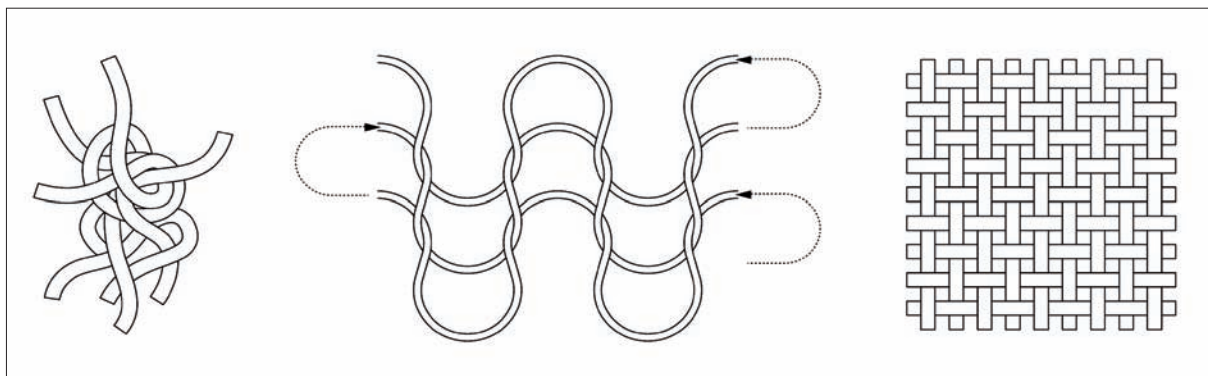


Fig. 1 : Structure textile de type « feutre » ; structure textile à mailles ; structure textile tissée

Fig. 2 : Lignes géodésiques sur une surface de type free-form – grille optimisée pour une coque nervurée en bois

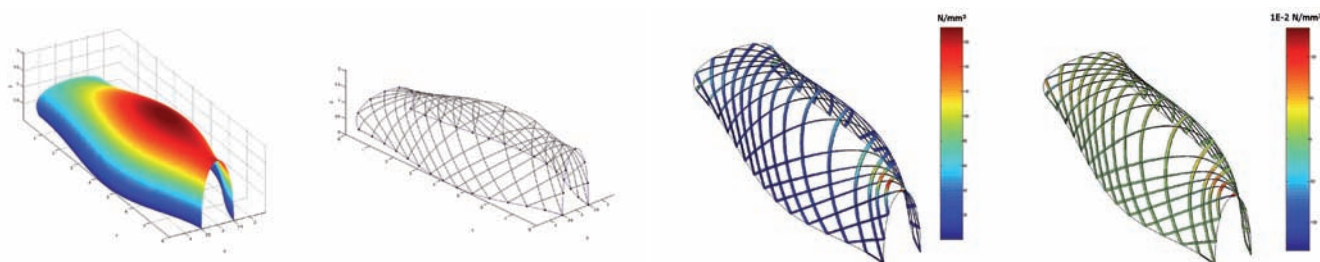
Fig. 3 : Stade expérimental de développement d'une structure nervurée

Ce facteur « système » peut s'expliquer comme suit. Lorsqu'une construction est composée de plusieurs éléments fonctionnant ensemble, on parle de « système ». Selon la composition de ce dernier, il devient possible de raisonner par assemblage. En principe, nous dressons le constat suivant : la défaillance du système apparaît avec l'apparition de la défaillance de son maillon le plus faible. Mais en réalité, certaines constructions pourraient, ou tirent déjà profit, d'un facteur système. Prenons pour exemple une poutre en bois lamellé-collé. Cette poutre est composée de plusieurs couches. Selon le nombre de couches, le calcul de sa résistance diffère. Si le nombre total de couches reste inférieur ou égal à quatre, alors cette poutre se calcule à l'ordinaire selon les valeurs prescrites pour la classe de bois utilisée. Si, par contre, le nombre de couches est supérieur à cette limite, la norme

SIA 265 admet l'application d'un facteur système favorable. En effet, la logique de la chaîne s'estompe puisqu'un affaiblissement local d'une planche (d'une couche) devient moins probable, donc moins critique.

A ce jour, ce raisonnement n'est opéré que pour un seul élément composé : la poutre en bois lamellé-collé. Par analogie, nous pouvons imaginer transposer ce principe à des systèmes composés d'une multitude d'éléments. Contrairement à la charpente classique pour laquelle la rupture locale – souvent causée par une faiblesse isolée (un nœud, si l'on reprend l'exemple de la construction en bois) – cause la rupture du système dans son ensemble, les systèmes maillés que nous élaborons à l'IBOIS sont composés d'une multitude d'éléments formant un tout non hiérarchisé : la rupture de l'un d'eux ne provoquera pas celle du système tout entier.

2



3



Les structures tressées, que nous décrivons plus loin, fonctionnent de cette manière. Chaque « brin » joue un rôle dans la rigidité de l'ensemble. Par contre, vu le nombre élevé d'éléments porteurs interdépendants, la rupture du maillon le plus faible ne provoquera pas la rupture de l'élément porteur principal. Il s'agit d'une notion fascinante à développer dans les années à venir, particulièrement à travers les structures tressées en bois, quasiment inexistantes sur le marché actuel. Nous pourrions ainsi envisager de calculer le facteur de sécurité global d'une structure tressée ou, en d'autres termes, sa probabilité de rupture, à l'image de ce qui se fait pour les grandes structures (par exemple les barrages). Ceci ouvrirait la voie à un dimensionnement beaucoup plus pointu de nos constructions.

De la coque pliée à la structure tressée

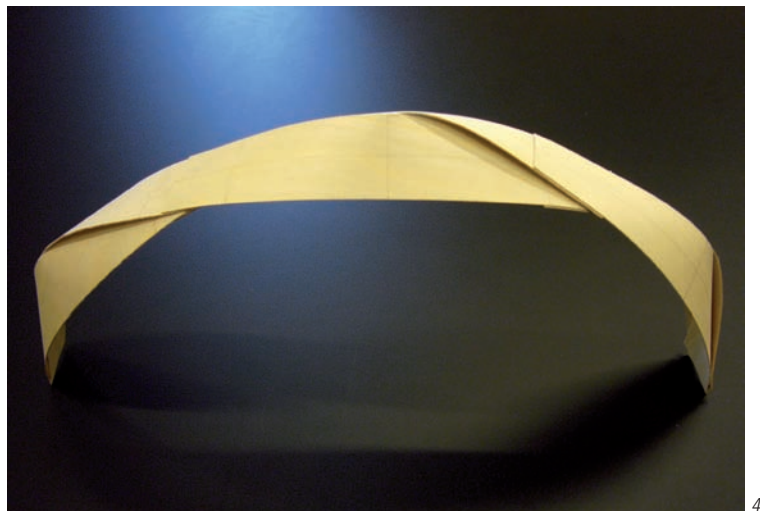
Dans le cadre des recherches menées à l'IBOIS, ce sont à ce jour deux « familles » de structures – deux réponses possibles pour la création de structures innovantes – qui ont été abordées de front.

La première famille concerne les structures réalisées à partir de panneaux en bois massif contrecollé. Du point de vue de l'ingénieur, il s'agit de structures spatiales faisant travailler les éléments dans leur surface. Les structures pliées, de type « origami », en sont un exemple (voir article p. 19). Pour ces structures, une forme générale plus ou moins lisse ou rugueuse – présentant ou non des aspérités et un tracé irrégulier – est formée par l'assemblage d'une série d'éléments plans. Pour les structures « origami », toutes les facettes contribuent à créer une forme générale éventuellement incurvée. D'un point de vue statique, elles participent conjointement à la stabilité de la forme. Pour la conception géométrique des structures plissées, nous avons recours à un outil de modélisation hautement performant, le « modeleur ». Ce logiciel de conception 3D permet de visualiser facilement – sans les inconvénients habituellement liés à la création tridimensionnelle des « splines » – une forme courbe faite d'une multitude de facettes. La base mathématique permet de définir et de modifier aisément l'emplacement, la distribution et les caractéristiques des « plis », notamment pour améliorer l'efficacité statique d'une structure plissée donnée.

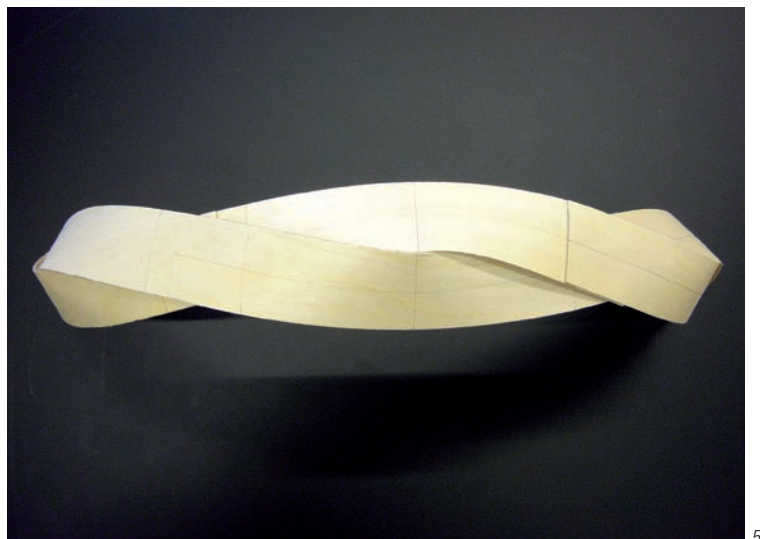
La seconde famille de structures à l'étude englobe les coques nervurées et les structures inspirées du tissage. Dans le cas des coques nervurées, il s'agit d'appliquer à la surface d'une forme libre doublement courbée dans l'espace un principe linéaire : les nervures. De telles structures présentent l'avantage de conserver de façon précise la forme de départ.

Comme le montre l'étude menée par Claudio Pirazzi en 2006 [1]¹, il est possible d'appliquer une série de lignes géodésiques à la surface d'une forme complexe et de déterminer la nature et l'emplacement des nervures optimales à l'obtention de la forme souhaitée. Le travail de recherche portait sur l'ensemble du processus d'élaboration de formes libres : l'esquisse de la forme recherchée, l'élaboration d'une grille optimisée et, enfin, la construction d'un prototype définitif permettant de valider les hypothèses de départ. Le tracé précis des « lignes » a pu être obtenu grâce à un outil informatique performant, le logiciel GEOS développé entre 2002 et 2004 à l'IBOIS et à l'Institut de Géométrie, Algèbre et Topologie (IGAT) (fig. 2). En parallèle

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.



4



5

au développement du logiciel, des tests de charge ont en effet été menés sur un prototype construit en 2005 (fig. 3), afin d'évaluer la validité du modèle de calcul théorique et de déterminer les écarts entre les déformations théoriques calculées et celles mesurées concrètement sur le prototype. Les structures nervurées font aussi l'objet d'une étude dans le cadre de la thèse développée par Johannes Natterer [2]. Son travail consiste principalement à analyser la coque nervurée d'un point de vue mécanique.

Ces divers travaux prometteurs permettent d'arriver à une compréhension plus précise du comportement en flexion des structures nervurées assemblées par clouage ou vissage. En effet, connaissant la rigidité flexionnelle des nervures le long de leur axe, qui varie selon le nombre de vis de liaison, et en tenant compte de l'éventuelle variabilité de cette rigidité, nous pouvons mieux calculer la charge critique ainsi que les déformations des coques nervurées dans leur ensemble. Fort de cette connaissance, nous avons la possibilité de concevoir

des coques qui travaillent davantage en flexion, en acceptant par exemple des formes contre-courbées, dont les structures tissées. Par la suite, puisque l'élément multicouche de la nervure est connu sur le plan de son comportement mécanique, nous pouvons envisager un assemblage de ces éléments sous forme de tressage. Des connecteurs peuvent être introduits, et nous nous trouvons dans une situation comparable à celle des poutres en lamellé-collé : le calcul d'un élément multicouche mais dont les couches, cette fois, sont des éléments surfaciques répartis dans un plan.

Bois tressé

L'étude des structures tressées ouvre à une autre typologie structurelle, pour laquelle on utiliserait non seulement des éléments linéaires mais aussi des éléments « surfaciques » (des panneaux courbés).

A l'IBOIS, Markus Hudert propose dans ses recherches une nouvelle catégorie de structures en bois basée sur une logique



6

Fig. 7 : Des maquettes faites à partir de bandes de carton ou de planches fines en sapin sont assemblées en utilisant la technique du tressage. Des contre-courbures peuvent être introduites en manipulant les planches.

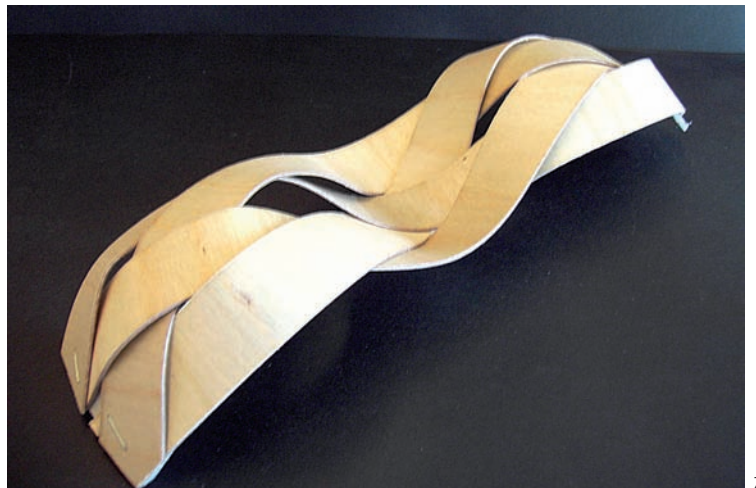
de fabrication des tissus. La première phase de ses travaux consistait en une analyse théorique et historique poussée, dans laquelle il a évalué les techniques et les structures de production du textile, de même que les particularités de leur pendant naturel, le tissu biologique. Dans un premier temps, il a examiné des structures tissées, tricotées et tressées. Une classification de ces géométries a été établie. Il a ensuite étudié la diversité des tissus et a tenté de trouver une sorte de dénominateur commun à ces structures. Cela lui a permis de définir un module de base, dénommé *Textile Module*, qui est en ce moment le centre de son intérêt. Partant de ce module, il a pu établir des sauts d'échelle pour certaines maquettes. Au cours de ce processus, les questions et problèmes suivants sont apparus :

- la description mathématique et mécanique des courbures est difficile à établir ;
- des points singuliers et particulièrement sollicités apparaissent ;
- la courbure crée des contraintes résiduelles qui ne disparaîtront que partiellement par relaxation ;
- l'estimation du frottement entre éléments paraît difficile ;
- les propriétés des matériaux utilisés : le saut vers une échelle plus grande implique dans la plupart des cas l'utilisation d'éléments plus rigides. Ceci réduit/influence les possibilités géométriques du tressage.

Souvent, la constitution de maquettes de travail successives permet d'avancer et de tirer des conclusions pour améliorer la structure (comportement statique, faisabilité des assemblages, forme, coût). L'appréciation des structures naissantes se fait également par l'œil de l'architecte qui y cherche des qualités de transmission de lumière ou d'autres qualités esthétiques.

Dans un deuxième temps, Markus Hudert abordera les ramifications, les contraintes et le potentiel d'application de ces techniques à l'échelle du bâtiment. Les conclusions ainsi que les données obtenues seront ensuite complétées et vérifiées par la construction de maquettes à grande échelle et de prototypes. Des méthodes de calcul appropriées accompagneront chacune de ces expériences grandeur nature. Enfin, il s'agira d'aborder la conception des détails d'assemblage de la structure et les façons de réaliser une enveloppe, dans le but de produire un prototype constructif fonctionnel.

Il sera alors intéressant de déterminer le facteur système de telles structures tressées. En combinant des panneaux minces et rigides et en intégrant des considérations à la fois structurales et architecturales, des formes/structures inédites pourraient voir le jour. Pour l'ingénieur, il s'agit de



définir à quel moment les structures tissées se comportent comme des coques, ou adoptent un comportement linéaire à deux dimensions.

Du point de vue du tressage, nous travaillons généralement avec deux ou trois brins. La figure 6 est une tentative de développement de ce principe. Des différences de rigidité apparaissent sur l'ensemble de la surface de la structure puisque nous voulons entrelacer des éléments et que, pour ce faire, ces éléments doivent être courbés.

Du point de vue de l'ingénierie, les avantages d'une structure tressée sont les suivants :

- amélioration du facteur système ;
- utilisation conjointe d'éléments surfaciques et linéaires qui peuvent former des structures travaillant avec plusieurs couches (élément multicouche) ;
- augmentation de la hauteur statique puisque les panneaux courbés le sont hors de leur plan et la surface de la structure globale devient ainsi plus « épaisse ».

Les structures tressées pourraient ainsi donner d'autres possibilités pour mettre en œuvre les produits dérivés du bois afin de constituer des toitures.

Favoriser la curiosité

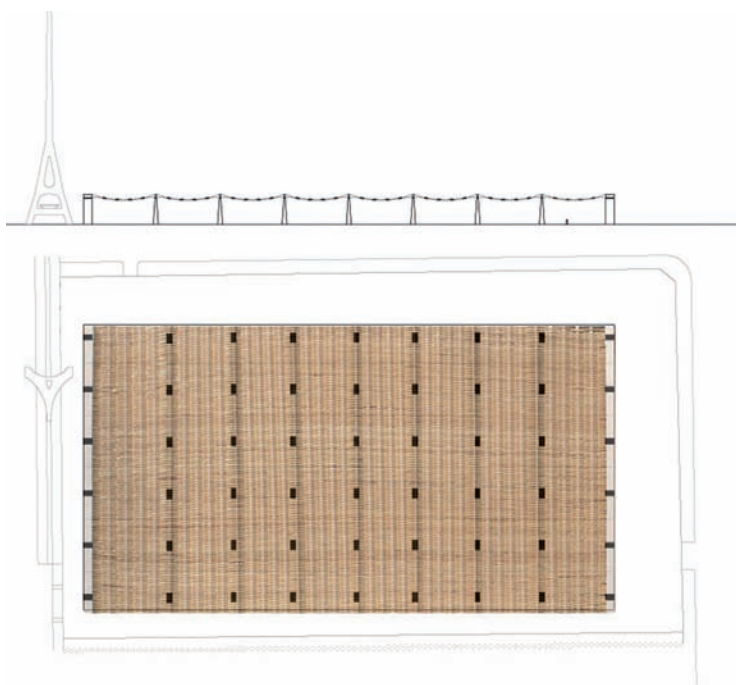
Si elle tient à maintenir un lien étroit avec la pratique, la stratégie de recherche mise en place au sein de l'IBOIS se caractérise aussi par sa volonté de favoriser la curiosité des collaborateurs qui y contribuent. Cette démarche se concrétise par une incitation permanente à tisser des liens entre divers domaines de compétence plus ou moins directement

Fig. 8 : Projet de couverture du marché aux poissons de Tokyo, vue de dessus et vue de côté

Fig. 9 : Structure suspendue en bois tissé, vue intérieure

Fig. 10 : Isométrie du principe structurel

Fig. 11 : Modélisation par éléments finis permettant le dimensionnement (image issue du programme de calcul RFEM)

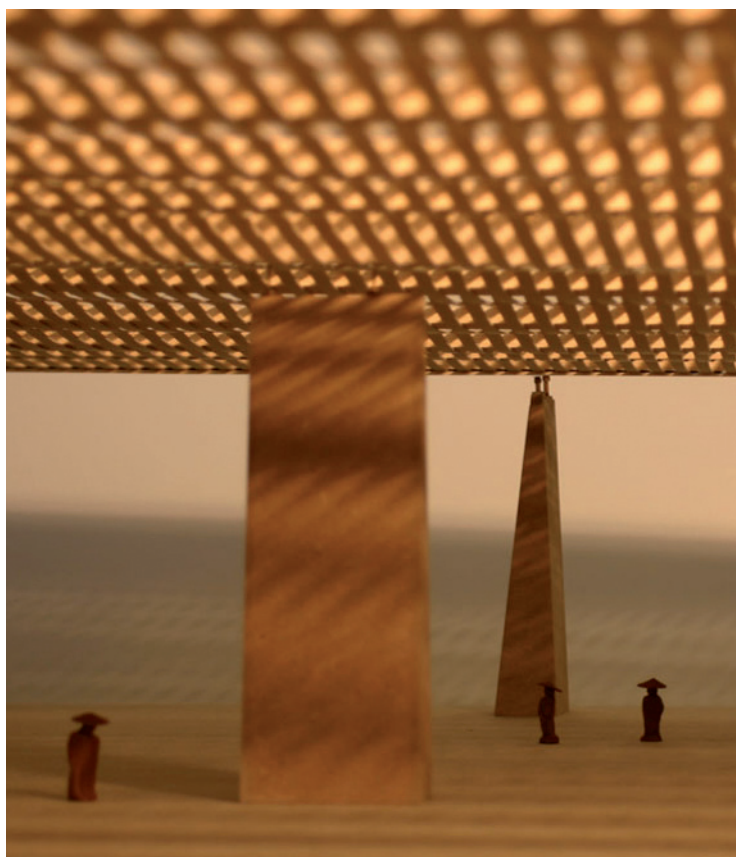


liés au bois. On pense ici en premier lieu à un rapprochement entre architecture et génie civil, mais aussi à des réflexions plus mathématiques touchant notamment à la géométrie, à un questionnement de techniques ancestrales ou encore au développement d'outils informatiques de modélisation. Une aspiration vers une pensée globale autour d'un matériau, qui reste néanmoins solidement liée à la pratique des constructeurs.

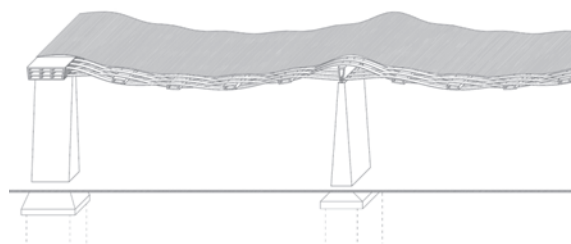
Yves Weinand, Prof. EPFL, architecte ISA, dr ing. civil EPF
EPFL-ENAC-IS-IBOIS
GC H2 711 (Bâtiment GC), Station 18, CH-1015 Lausanne

- [1] PIRAZZI C.: « Geodesic Lines on Free-Form Surfaces – Optimized Grids for Timber Rib Shells », *WCTE 2006 Proceedings*
- [2] NATTERER J., WEINAND Y.: « Modeling of Multi-Layer Beam with Inter-Layer Slips », *WCTE 2008 Proceedings*

8



9



10



11

Fig. 12 : Projet d'arc en bois tressé. Série d'essais faisant varier les paramètres « matériaux » et « géométries ». Observation du détail : distance entre appuis ; zones de contact (pression) plus importantes ; distance entre panneaux

Fig. 13 : Version optimisée, résultat de la série des essais. Gabarit pour le prototype intermédiaire. Dimensions : épaisseur 0.2 cm, largeur 4.5 cm, longueur 105 cm, portée 92 cm, flèche 24 cm, distance des appuis 6 cm. Matériau : bois triplis

Fig. 14 : Réalisation du prototype en faisant un saut d'échelle (environ 7.5 fois) ayant les caractéristiques suivantes : épaisseur 1.1cm, largeur 38 cm, longueur 764 cm, portée 665 cm, flèche 177 cm, distance des appuis 65 cm. Matériau : Schuler Blockholz
(Tous les documents illustrant le présent article ont été fournis par l'IBOIS)

Atelier d'architecture à l'IBOIS

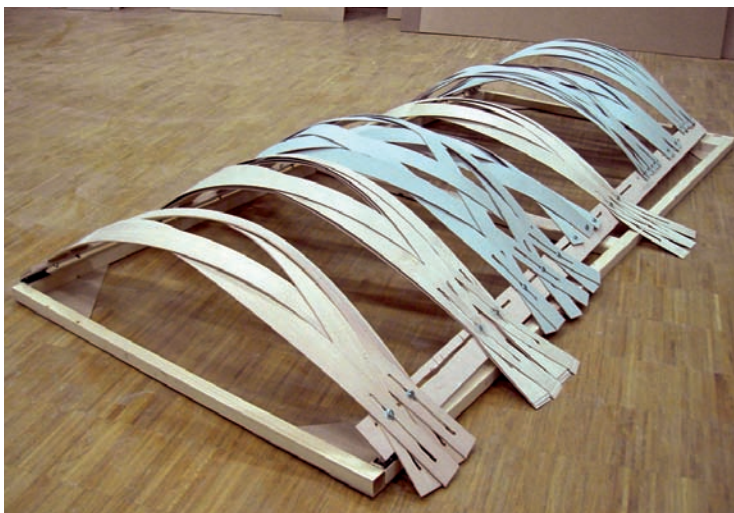
Depuis quelques années, l'atelier Weinand de la Section d'architecture de l'EPFL aborde la conception de structures inspirées du tissage, du tissage ou du tricot.

Pour l'année académique 2006-2007, c'est le marché aux poissons de Tokyo qui a servi de site pour cet atelier d'architecture. Sophie Carpentieri, étudiante en architecture, a conçu dans ce cadre une structure tissée novatrice. En imbriquant des panneaux *Kerto*, elle a projeté une structure suspendue.

La difficulté principale consistait à comprendre la géométrie structurelle du dispositif à différentes échelles, chaque échelle présentant des caractéristiques différentes. Une de ces caractéristiques, la rigidité, ne variait pas de manière directement proportionnelle en fonction des dimensions géométriques.

Pendant l'année académique 2007-2008, les étudiants abordaient le projet selon la prémisse suivante : ils devaient arriver à une compréhension / assimilation des différentes techniques de tissage / tressage pour ensuite les mettre en application, sous forme de maquettes de travail. La notion de programme architectural intervenait plus tard dans le contexte du projet, de manière ciblée pour chaque étudiant.

La structure développée par Jacopo Laffranchini – un arc « tressé » – nous est apparue prometteuse (fig. 12, 13, 14). Ses premières tentatives ont pris la forme de petites maquettes de bois. Des observations géométriques précises ont ensuite permis de définir une série de paramètres importants. Il est apparu que le nombre de nervures, leur épaisseur et leur largeur, de même que leurs variations de courbure générales ou locales avaient une incidence significative sur le schéma structurel résultant.



12



13



14