

Assemblage par picots

Jean-François Bocquet
ENSTIB/LERMAB
Epinal, France



1. Utiliser du bois feuillu en construction

1.1. Les problématiques

Sur le territoire Français, il pousse plus de feuillus que de résineux dans un rapport qui est de l'ordre de 6.5/10 (*FCBA 2013*) et pourtant à peine 5 % du bois utilisé en construction est du bois feuillu. Il est même à noter au passage que les applications structurales sont très rares et que le bois feuillu est plutôt utilisé en second œuvre : pourquoi ? Les raisons sont multiples.

Une première raison qui est presque la principale réside dans le fait que pour mettre en œuvre du bois en construction, il est nécessaire, comme pour tous les autres matériaux, de lui attribuer une classe mécanique. A la différence du résineux, la corrélation entre les propriétés observables (masse volumique, module d'élasticité...) est extrêmement faible avec la résistance mécanique à part si le bois est déjà de très bonne qualité : nodosité faible, pente de fil faible [1]. En prenant du bois de belle qualité, son prix devient très élevé, car il peut alors être beaucoup mieux valorisé dans des applications plus nobles. Bien qu'a priori plus résistant, les qualités d'un feuillu très bien classé D40 par exemple ne seront que globalement 25 % pour cent plus élevé qu'un résineux C30 ce qui ne peut **jamais** compenser le prix. Cette observation s'avère être pire encore si le rendement matière est pris en compte. Ce type de valorisation par une sélection des belles qualités restera réservé à des applications très en marge de la réalité du marché de la construction et de son besoin.

Du fait qu'il soit difficile à classer, d'autant plus pour de fortes sections, la disponibilité des feuillus est extrêmement faible lorsque l'on souhaite les utiliser en construction. La demande étant faible, il n'existe donc pas de réel standard pour la construction et donc de section immédiatement disponible sèche. A cela s'ajoute le fait que puisque ce sont des feuillus, ils sont difficiles à sécher : soit parce que cela prend du temps soit parce que les sciages peuvent subir des déformations conséquentes par un retrait important.

En conclusion de ces différents constats, il apparaît que si l'on souhaite mettre en œuvre du bois feuillu en construction, il faut réunir trois conditions :

- En *1*, que son prix soit au maximum équivalent à celui d'un résineux,
- En *2*, qu'il soit classé mécaniquement de manière très efficace,
- En *3*, qu'il soit disponible partout pré-séché ou sec dans des dimensions standard.

1.2. Les solutions

Pour arriver à un prix de bois de structure équivalent à celui d'un résineux, il faut à la base partir d'une ressource (grume) dont le prix est égal voir inférieur à celui du résineux pour compenser le rendement de sciage plus faible en feuillu (Illustration 1).

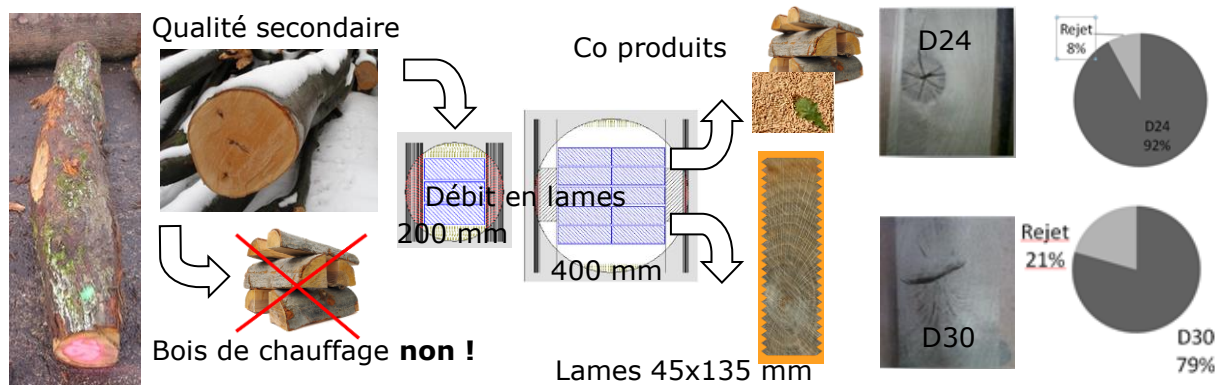


Illustration 1 : Valorisation du bois de qualité secondaire en planches à 92 % D24 et 79 % D30 [2]

Ceci **est** possible en prenant des grumes de feuillus en **qualité secondaire** de classe C et D : sur-billes, bois mal conformés ou encore du bois issu d'éclaircie. En 2011, il a été montré dans l'étude APCEF [4,5,6,7] que 92 % d'un lot de chênes de qualité secondaire était en classement optimal du bois D24 et à 80% du bois D30. Dans cette étude, aucune purge de défauts n'avait été effectuée : c'est-à-dire que même en présence de gros nœuds ou d'une importante pente de fil la résistance de ces bois à faible qualité

visuelle reste d'un niveau parfaitement acceptable en construction. Le prix de ces bois bord de route est égal, voir inférieur à celui du résineux et s'élève à environ 45 euros la tonne. La piste à suivre est donc d'optimiser le rendement en produisant des **lames standard** purgées de leurs plus gros défauts et ensuite aboutées en différentes longueurs selon le besoin. Ainsi il est permis d'assurer la disponibilité et de faciliter le séchage par un pré séchage à l'air libre suivant la provenance des bois, l'aboutage pouvant être réalisé sur élément sec ou vert suivant la facilité de travail des bois.

La piste qualité secondaire répond aux conditions *1* et *3*, reste le problème fondamental du classement : la condition *2*. L'idée qui peut être mise en avant est de faire alors un « **test tout ou rien** ». En effet, le bois étant du « bois de chauffage » à la base et la grande majorité du bois étant de très bonne qualité, les défauts majeurs ayant été purgés par aboutage, il est peu impactant sur le volume total de vérifier par un test mécanique porté au niveau de la résistance caractéristique envisagée de traction ou de flexion la résistance réelle le long de la barre. Si quelques lames se rompent sous l'effort caractéristique, elles sont au pire renvoyées en bois de chauffage. L'avantage majeur est de ne plus être soumis à une approche d'évaluation statistique et de garantir en plus la résistance des aboutages. La résistance caractéristique étant garantie, le coefficient de sécurité en termes de calcul pourra être abaissé ce qui permet de compenser une partie de la perte de rendement matière par rapport à du bois résineux [3].

Cette approche a été expérimentée lors d'une étude effectuée pour Terre de Hêtre [10] en 2015 au LERMAB. Après avoir scié et séché du hêtre des Vosges de classe C et D, ces bois ont été aboutés (longueur mini 1m) après un pré-calibrage **sans purge** par la société SIMONIN. Seules quelques barres trop mal conformées après séchage ont été retirées du fait de la longueur mini d'aboutage. A partir de 6,53 m³ de bois en section 50 x 150 mm en 3,00 et 2,40 m, 5,6m³ de barres de 43 x 150 mm en 3,05 m ont été fabriquées : soit un rendement de 85 % quasi entièrement dû au pré-calibrage et à la calibration finale à 43 mm (Illustration 2).

Arbitrairement, 38 planches (parmi les 295 produites) ayant le plus de défauts visuels ont été prélevées en classe C et en classe D. Ces planches ont ensuite été testées à plat en flexion quatre points par tronçon afin que 90% de la longueur de la planche soit éprouvée à 30 MPa de flexion puis à 50 MPa et ceci sur les deux faces. Sur les 38 planches, 2 ont cassé à une valeur inférieure à 30 Mpa et 11 à une valeur comprise entre 30 et 50 Mpa.



1 - Test en vibration

2 - Test en continu de la résistance en flexion sur chaque face

3 - Profil de rupture à plat des lames sans purge des défauts !!

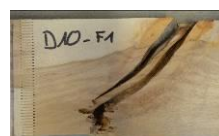
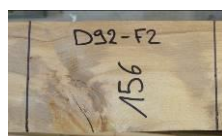
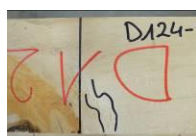
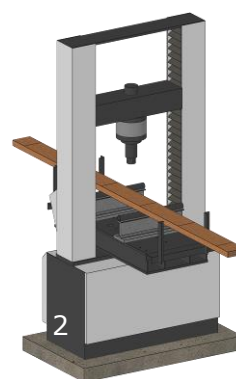


Illustration 2 : Mesure du module en vibratoire, test de flexion en continu, rupture au nœud et pente de fil

Les ruptures sont apparues principalement du fait des nœuds ou du fait de l'importante pente de fil. En préliminaire à ces essais, le module d'élasticité a été mesuré par essai vibratoire : les lames issues de la classe C se sont avérées classables en D40 et les lames de classe D en D45. Une série de test sur 30 aboutages a conduit à une résistance en flexion caractéristique de 49 Mpa.

En conclusion, le bois de « chauffage » feuillu (chêne ou hêtre) est valorisable en structure à un niveau de résistance important moyennant une purge minimale : mais pour en faire **quoi** ?

2. Des produits performants en strato-conception

Avec des lames de bois certifiées, de nombreuses applications performantes peuvent être réalisées. Le LERMAB et l'ENSTIB se sont orientés depuis 2005 vers l'écoconception [8] en essayant au maximum d'éviter l'emploi du collage pour construire. Le principe consiste à utiliser les lames en formant des couches croisées où il est possible d'intercaler de l'isolation. Dans cette ultra-standardisation possible des composants de base, il a été mis en perspective de produire de **l'unitaire en série** avec l'aide de la robotique et de la chaîne numérique [11].

2.1. Parois, planchers et éléments de toiture

En liant les lames de manière rigide au droit de leur croisement, il est possible de réaliser différentes sortes de parois qui peuvent servir de mur, de plancher ou d'éléments de toiture. Ces parois ont été prototypées à l'ENSTIB avec du hêtre issu de classe C et D et testées mécaniquement. Le niveau de finition dépend du degré de robotisation envisagé : actuellement avec le niveau de précision atteint par les robots, **tout** est devenu possible (Illustration 3).

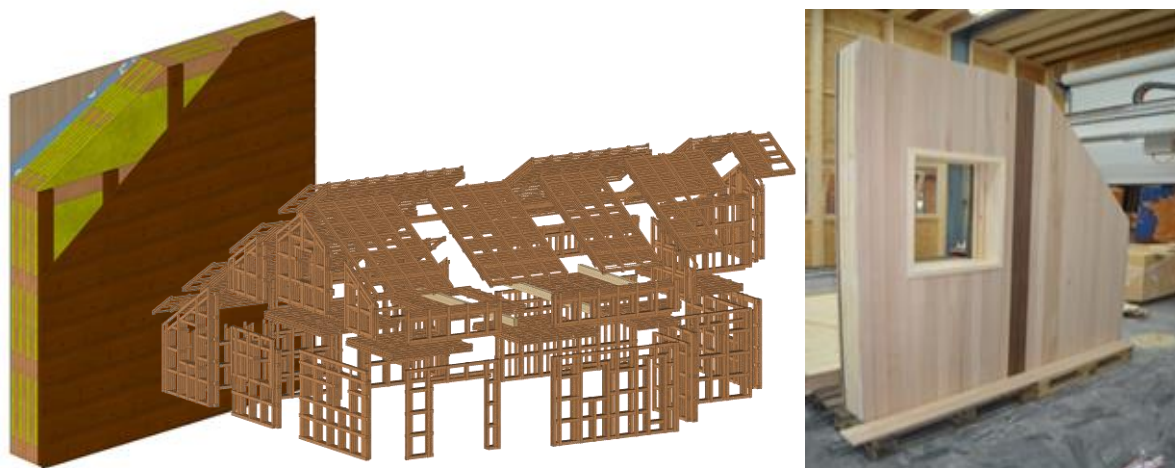


Illustration 3 : Réalisation de parois, de planchers ou d'éléments de toiture composés de lames croisées ou l'isolant peut être intercalé [12], [13], [17], [20].

L'intérêt d'une construction couche par couche, par la pose des composants, composant par composant est de produire l'élément exactement dessiné sans perte de matière et sans retouche d'usinage. Pour cela, il est nécessaire de pouvoir assembler les pièces de manière précise, instantanément et sans collage. Le procédé prototypé à l'ENSTIB garantit une tolérance inférieure au mm au montage.

2.2. Poutres treillis

Parmi les systèmes de structure les plus performants qui peuvent être fabriqués à partir de lames, il se trouve les poutres treillis. Des poutres de 6 mètres de long ont été réalisées [16] à l'aide du robot WOODFLEX 32 à l'ENSTIB et testées mécaniquement (Illustration 4). Ces poutres ont été réalisées en lames de chêne issu de grumes classées C et D.



Illustration 4 : Dessin, réalisation et test de poutres en lames de chêne issues de grumes classe C et D [16].

Ces poutres se révèlent très performantes pour peu que les assemblages soient très rigides et résistants. Optimisant la matière, permettant le passage transversal des fluides, leur capacité peut être adaptée et décuplée suivant le nombre de couches : elles peuvent alors servir également à réaliser des poteaux.

3. Architecture

Le développement de nouvelles technologies de construction donne en général naissance à de nouveaux styles d'architecture. Ces nouveaux styles ne sont pas toujours en accord avec l'architecture vernaculaire. Le LERMAB a conduit une étude [14] pour montrer que ces structures en lames croisées permettaient de respecter et de réhabiliter l'architecture vernaculaire en apportant un renouveau.

3.1. Le meuble structurel

Les structures en lames croisées peuvent être remplies ou non ce qui permet, avec une préparation standard de rabotage des lames pour en soigner l'aspect, de produire des parois qui participent à la stabilité de la structure tout laissant passer la lumière. Ces parois (Illustration 5) peuvent alors servir en intérieur à l'ameublement : bibliothèque, placard, encastrement d'équipement etc. ...Tous les graphismes sont possibles, lames droites ou inclinées, espacement régulier ou non, lames décalées ou pas, remplissage partiel ou complet. Le jeu des couleurs peut également être pris en compte par le choix des essences, le traitement thermique ou de simple teinte, la texture après rabotage.



Illustration 5 : Paroi meublante en intérieur, claustra structurel au graphisme variable [14]

3.2. Vers la paroi gauche

L'emploi de la lame permet la courbure, c'est grâce à cette souplesse que les poutres courbes en lamellé-collé sont possibles. Le LERMAB a conduit une première étude architecturale [19] pour intégrer de la paroi en lames croisées courbe en structure. La courbure dans ce projet ménage de façon douce des espaces privatifs dans les coursives et permet de jouer avec la lumière et l'habitabilité des logements.



Illustration 6 : Projet architecturale intégrant de la paroi courbe ouverte vers l'extérieur [19]

Ce type de paroi n'a pas encore été prototypée mais le sera prochainement. Le LERMAB participe à un projet de la société Ycoor System (suisse) qui développe un logiciel de tracé de courbes géodésiques « Géocurve » permettant de tracer sur une surface gauche des lignes géodésiques, ce qui permet de calculer les angles de torsion flexion et de prévoir la position des assemblages.

4. Industrialisation : l'unitaire en série

4.1. Chaîne numérique

Le composant lame étant standard, il est aisé de prototyper la chaîne numérique de la conception au montage automatisé de ces structures [18]. Ce travail a été réalisé au LERMAB (Illustration 8) [10]. Une première passerelle permet de récupérer un volume 3D d'une paroi en format BTL par exemple et de réaliser son remplissage en lames et panneaux d'isolants. Connaissant la position des lames, il est facile de prévoir les usinages des zones de jonction et de produire le fichier machine BTL de chaque lame ou morceau d'isolant après optimisation. Enfin, le fichier d'ordonnancement de montage par strate des parois peut-être produit est envoyé directement au robot d'assemblage. Celui-ci n'a plus qu'à prendre les pièces dans l'ordre de montage, les positionner sur la paroi et de les assembler. Parallèlement, le modèle filaire de la structure peut être réalisé de manière complète (lame par lame) ou de manière simplifiée pour des grosses structures afin de vérifier le dimensionnement.

4.2. Robotisation : démonstrateur ENSTIB

L'ENSTIB a investi en 2010 dans un robot cartésien. Ce portique produit par la société Güdel a été intégré par la société WOOD UNLIMITED en partenariat avec CADWORK SA. Ce portique un peu particulier permet de réaliser de l'usinage 5 axes et du montage automatisé 6 axes (deux concepts antinomiques). Ce portique a permis de prototyper de nouveaux types d'assemblage et permet aujourd'hui de terminer la faisabilité de montage automatique de ces parois en lames croisées (Illustration 8) [15].

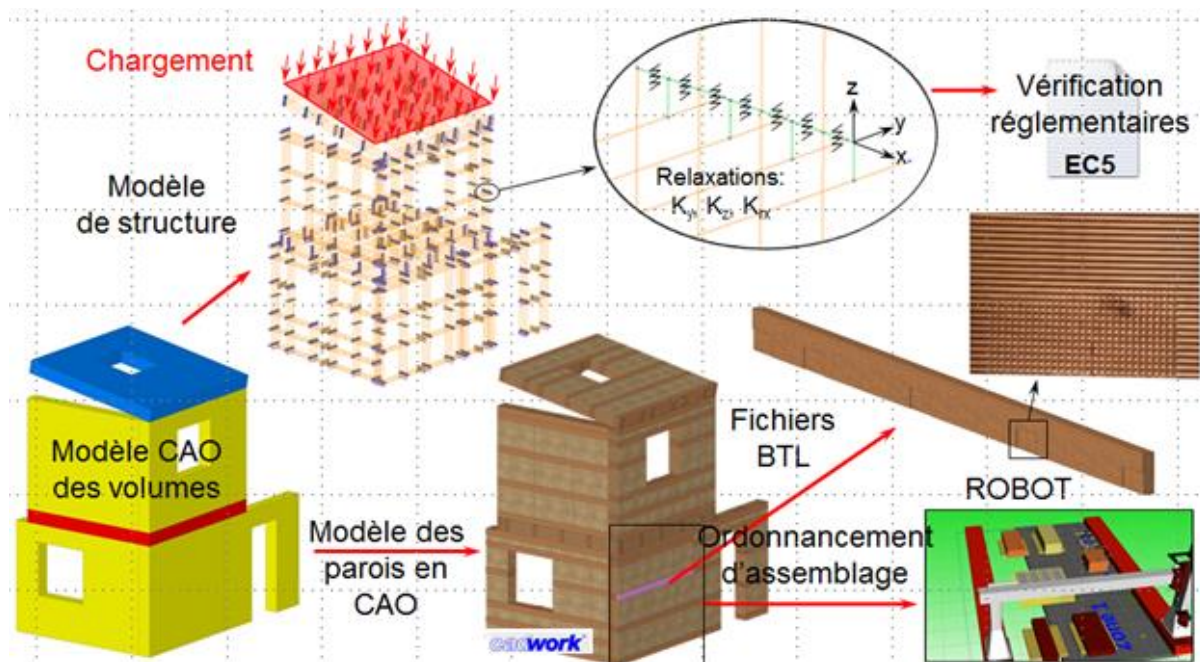


Illustration 7 : Schéma général de la chaîne numérique comprenant l'automatisation du remplissage des parois, la vérification de la structure, l'édition des fichiers d'usinage des pièces et le fichier d'ordonnancement du montage [10]

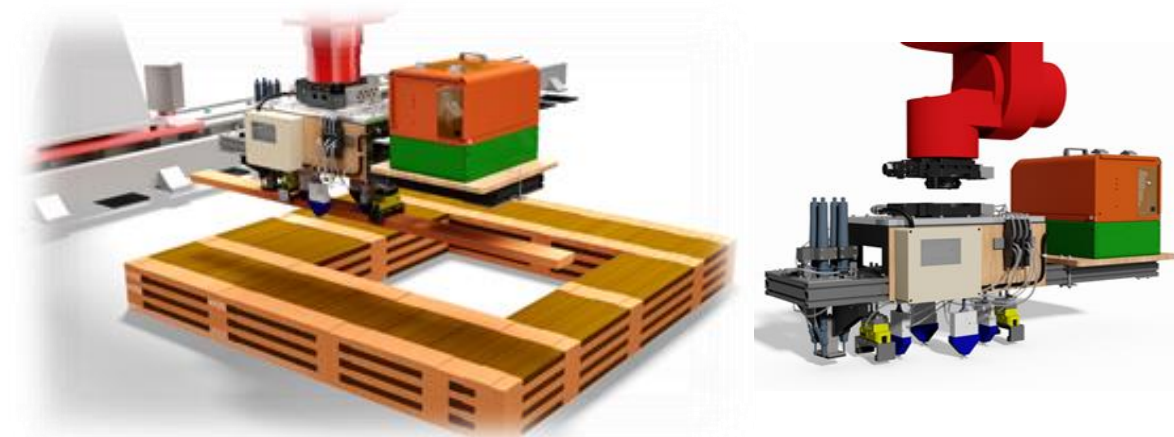


Illustration 8 : Prototypage d'une pince permettant la préhension et le déplacement des panneaux d'isolant ainsi que les lames et le liaisonnement des pièces sur le robot WOODFLEX 32 [15].

5. Mais comment on assemble ? Par picots, naturellement !

La faisabilité de toute cette démarche reposait en réalité sur un cahier des charges exigeant concernant l'assemblage de ces lames. Il fallait en premier lieu qu'il soit rigide, résistant, efficace de manière instantanée pour permettre le montage en strate, pensé dans une démarche d'écoconception et bien évidemment le moins cher possible.

En partant du constat que les planches en contact offraient une surface importante de transfert d'effort, l'idée est venue de créer des obstacles et de transférer les efforts par contact dans l'interface. En rainurant les lames à l'aide d'un profil trapézoïdal dans un sens puis dans l'autre, il est possible de créer des pyramides ou « picots » qui s'enclenchent dans des rainures (Illustration 9). Il est alors possible de transférer un effort dans le sens de la lame qui supporte les picots. En associant l'action de deux lames après avoir pris soin d'inverser la localisation des picots, les efforts peuvent être transmis dans deux directions transversales. Si la disposition des « picots » précédente est réalisée sur une même lame, l'assemblage peut transmettre un torseur plan. Cette recherche de solutions s'est effectuée pendant un travail de thèse conduit au LERMAB et

terminé en 2014 [9]. Ce travail a montré que le frottement dans l'assemblage était faible et que tout l'effort transmis par obstacle provoquait l'ouverture de l'assemblage. Il est donc nécessaire d'adjoindre des vis pour fermer les assemblages : le vissage dans les bois feuillus étant très efficace du fait de la densité. La résistance d'un assemblage par « picots » dans le bois feuillu est pour le moment équivalente à celle d'un assemblage collé dans du résineux : la ductilité en plus !

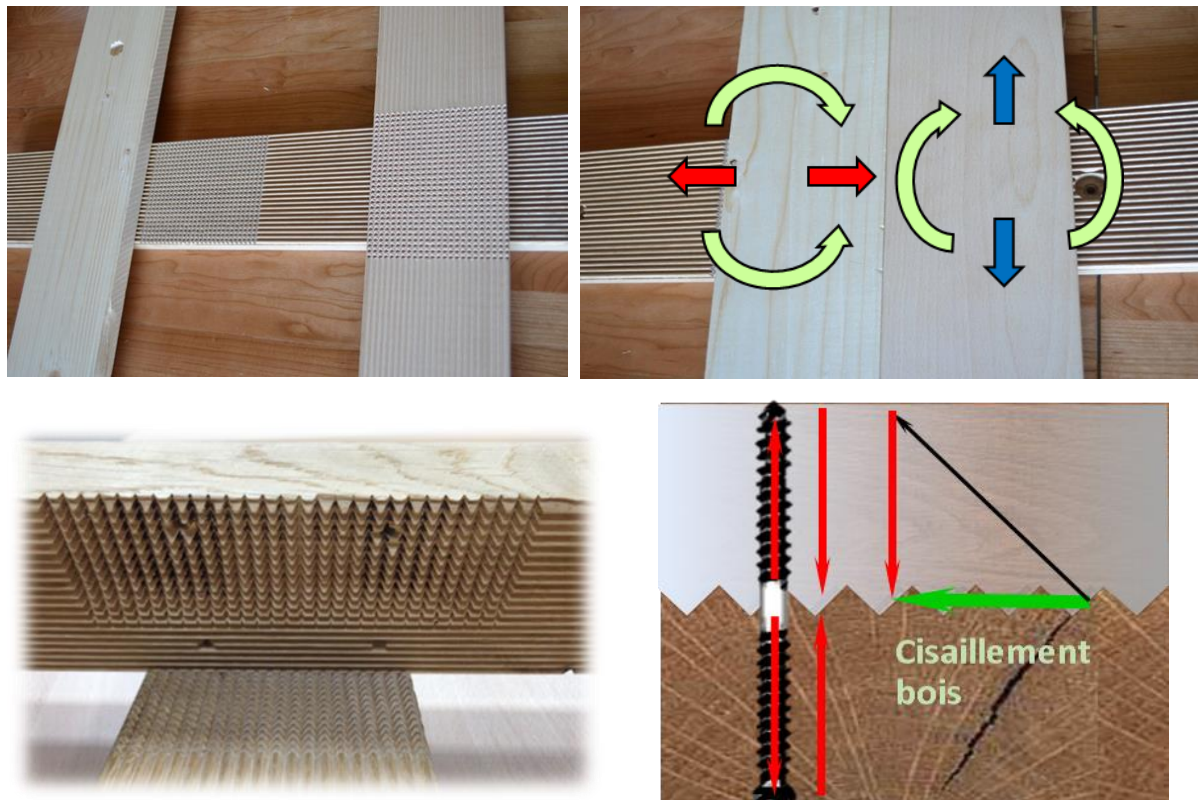


Illustration 9 : Principe de transmission par obstacle « picots » des efforts plans dans un assemblage de lames, exemple de réalisation et rôle fondamental du maintien par un vissage pour la transmission des efforts [9]

6. Conclusion

Les travaux présentés ont été conduits à l'ENSTIB et au LERMAB depuis une douzaine d'années pour l'utilisation du bois local et plus récemment des bois feuillus. Ils montrent la faisabilité de structure non seulement pertinente mais très efficace structurellement qui s'intègre parfaitement dans le cadre d'un renouveau économique en offrant : l'éco conception, la personnalisation, de nouvelles possibilités d'architecture et l'utilisation de la ressource locale par la robotisation.

Bien que cette nouvelle technologie offre de nombreux avantages et pourrait s'avérer très concurrentielle par rapport à d'autres techniques de structure bois par son niveau d'automatisation, elle vient dans un contexte économique et sociologique difficile. En utilisant du bois local, la logique économique du système actuel basé sur la croissance de ses marchés ne peut être respectée car la seule loi que connaît la forêt c'est sa croissance végétale propre. Conserver la logique actuelle en utilisant nos ressources nous conduira inéluctablement sur l'île de Pâques.

Il faut donc créer un nouvel espace économique qui doit consister à **produire pour ne plus consommer** en le finançant aujourd'hui par la non consommation de demain. C'est le seul prêt que l'humanité devrait s'autoriser à souscrire si elle veut regarder sa descendance dans les yeux. « Nous n'héritons pas de la terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants » : qu'allons-nous laisser ? Le renoncement au gaspillage énergétique et à la pollution est une source de profit illimité pour l'homme. La voie de développement à suivre est la **déconstruction reconstruction** : cette voie économique nécessitera l'emploi de beaucoup de gens formés pour encadrer, développer et réaliser à tous les niveaux ce changement de l'espace de vie commun.

7. Bibliographie

- [1] Correspondance entre classes visuelles et classes de résistance mécanique EN 338 pour le HETRE (*Fagus sylvatica*) de France. Introduction des règles de tri par méthode visuelle dans les normes NF B 52 001 partie 1 & 2 JD. LANVIN - Rapport commission française BF 002 - REF. LBO/JDL/403/15/295 08/08/2015
- [2] Joffrey VIGUIER « Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique. » thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré –Nancy soutenue le 12 novembre 2015.
- [3] EFFEUR5 « Comportements structurels des Essences de bois Feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5 » Pilotage CRITT Bois 2016-2019 – Appel à projets génériques 2015 ANR.
- [4] COLLET R., BLERON L., CHASTAGNIER T., BLOT A., LIBERGE M, Etude en vue de la valorisation de la ressource bourguignonne en chênes de qualité secondaire dans de nouveaux usages constructifs, Association de Promotion pour l'Emploi du Chêne Français (APECF) / Conseil régional de Bourgogne, Mai 2011, 66p.
- [5] BLÉRON L., COLLET R., Corrélations de caractéristiques de pièces de bois à partir de données issues de dispositifs de contrôle non-destructif en vue du développement de machines automatiques de classement mécanique, Société Luxscan, Septembre 2009, 30p.
- [6] BLERON L., COLLET R., Classement mécanique non destructif du bois (CLAMEB), ANR Programme Matériaux et Procédés pour des Produits Performants (2012-2016), Part fonctionnement Equipe Bois LaBoMaP et ARTS
- [7] MARCHAL R., BLÉRON L., Caractérisation technologique du chêne France entière. Tâche caractérisation des multiplis (essais mécaniques et d'usinabilité), Contrat d'étude (2003-2005), CTBA, Conseils Régionaux d'Aquitaine, de Bourgogne, de Lorraine, de Midi Pyrénées, Financement géré par l'équipe
- [8] Ludovic RESCH « Développement d'éléments de construction en bois de pays lamellés assemblés par tourillons thermo-soudés » thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré – Nancy soutenue le 12 novembre 2009.
- [9] Stéphane GIRARDON « Amélioration des performances mécaniques des assemblages bois sur bois vissés par préparation des interfaces : application à la réalisation d'éléments de structure » thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré –Nancy soutenue le 09 décembre 2014.
- [10] Romain LEMAITRE, Damien LATHUILLERE, Jean-François BOCQUET, Laurent BLERON « Etude de faisabilité d'un ouvrage en hêtre des Vosges par planches croisées striées vissées » rapport d'étude janvier 2016 « Terre de Hêtre ».
- [11] Jean-François BOCQUET & Laurent BLERON « Conception automatisée de murs bois » Conférence au Colloque de Bayeux Mercredi 26 février 2014
- [12] Romain MUNSCH & Yannick BERNE « Construction bois robotisée » Projet de fin d'études ENSTIB 2013-2014
- [13] Sylvain DELETRAZ & Cédric FANTIN « Système constructif en lames croisées crantées » Projet de fin d'études ENSTIB 2014-2015. Encadrement Jean-François BOCQUET & Laurent BLERON.
- [14] Laure Elise ALAPHILIPPE « L'architecture Vernaculaire à la maison d'aujourd'hui avec le bois croisé » Projet de fin d'études LERMAB 2014-2015 Encadrement Jean-François BOCQUET & Laurent BLERON.
- [15] Johan D'HOUTAUD & Quentin LENOIR « Développement d'un préhenseur pour le robot de l'ENSTIB » Projet de fin d'études ENSTIB 2015-2016 Encadrement Jean-François BOCQUET & Laurent BLERON.
- [16] Max MERILLON & Bruno THERON « Etude de poutres treillis en bois feuillus utilisant des assemblages par picots » Projet de fin d'études ENSTIB 2015-2016. Encadrement Jean-François BOCQUET & Laurent BLERON.
- [17] Hugo FUCHS & Théodore PERRIN « Dimensionnement et analyse du comportement d'un plancher à assemblages dit « picots » grâce à un modèle numérique » Projet de fin d'études ENSTIB 2015-2016. Encadrement Jean-François BOCQUET & Laurent BLERON.
- [18] Mathieu BONY et Théo HASCOET « Rentabilité d'une usine de fabrication de murs en bois croisés » Projet de fin d'études ENSTIB 2015-2016. Encadrement Jean-François BOCQUET, Laurent BLERON et Gérard XOLIN.
- [19] Sylvain BAJOLET « Courbe » Rapport de stage Master ABC ENSTIB 2015-2016 Encadrement Jean-François BOCQUET.
- [20] Jeanne BOUCHOÛ « automatisation du dessin de structure a usage d'habitation utilisant le système constructif bois en lames croisées assemblées par picots » Rapport de stage de fin d'études ENSTIB 2015-2016 Encadrement Jean-François BOCQUET.