



Approche comparative d'assemblages pour poutres et panneaux lamellés en bois

Table des matières

I- Le bois aujourd'hui en France

- I-1 Usages
- I-2 Le bois, un atout pour l'écoconstruction
 - I-2-1 La disponibilité du bois
 - I-2-2 Certifications et organismes spécialisés
 - I-2-2-1 A l'échelle de la forêt
 - I-2-2-2 A l'échelle du fabricant
 - I-2-2-3 A l'échelle du produit : l'Analyse de Cycle de Vie
- I-3 Les traitements du bois
- I-4 La problématique de la colle
- I-5 L'empreinte écologique du bois

II- Le matériau bois

- II-1 La structure du bois
- II-2 Composition chimique
 - II-2-1 La cellulose
 - II-2-2 La lignine
 - II-2-3 Les hémicelluloses
 - II-2-4 Les matières extractibles
- II-3 Les différentes essences

III- Le bois dans la construction

- III-1 Les espèces de bois utilisées dans la construction
- III-2 Mécanique et caractéristiques du bois
 - III-2-1 Caractère orthotrope
 - III-2-2 Données physiques
 - III-2-3 Résistance au feu
- III-3 Les modes constructifs traditionnels en bois
- III-4 Les perspectives en construction
 - III-4-1 Le CLT
 - III-4-2 Les Panobloc
- III-5 Les innovations attendues
 - III-5-1 Le problème d'approvisionnement
 - III-5-2 Une insuffisance au niveau de l'isolation acoustique
 - III-5-3 Les différents matériaux d'isolation : un écobilan positif pour les isolants en bois

IV- Les systèmes d'assemblage pour poutres et panneaux massifs en bois

- IV-1 Le contre-collage
- IV-2 Le vissage
- IV-3 Les tiges filetées métalliques collées
- IV-4 Les connecteurs métalliques
- IV-5 Le clouage
- IV-6 Le chevillage
- IV-7 Le BMT : Bois Massif Tourillonné
- IV-8 Le BMT-D : Bois Massif Tourillonné en Diagonal
- IV-9 Les vis en hêtre pour panneaux CLT
- IV-10 Le bois chauffé et compressé
- IV-11 La thermo-soudure du bois par friction

V- La thermo-soudure ou soudure du bois par friction

V-1 Histoire

V-2 Mécanismes physiques

V-2-1 Une question de température

V-2-2 Les trois types de thermo-soudure

V-2-2-1 La friction orbitale

V-2-2-2 La friction linéaire

V-2-2-3 La friction rotative

V-3 Un assemblage écologique

V-4 Un gain de temps relatif

V-5 Certains inconvénients

V-5-1 Une résistance relative à l'humidité

V-5-2 Une liaison imparfaite

VI- Comparaison par l'expérimentation

VI-1 Rapport des tests de Ludovic Resch

VI-2 Matériel nécessaire pour les différentes expérimentations

VI-3 Premier test sans dimensionnement

VI-4 Eprouvettes individuelles pour expérimenter la soudure par friction rotative

VI-4-1 Tests avec des tourillons coniques

VI-4-1-1 La préparation des éprouvettes

VI-4-1-2 La réalisation des tourillons coniques

VI-4-3 La soudure

VI-5 Tests avec des tourillons cylindriques

VI-6 Comparaison avec un type d'assemblage plus classique

VI-7 Observation microscopique du phénomène de soudure

VI-8 Réalisation des poutres

VI-8-1 Réalisation d'une poutre lamellée-collée

VI-8-2 Réalisation d'une poutre lamellée-clouée

VI-8-3 Réalisation d'une poutre lamellée-vissée

VI-8-4 Réalisation d'une poutre lamellée-chevillée

VI-8-5 Réalisation d'une poutre lamellée-thermo-soudée

VI-9 Tests de résistance au cisaillement et analyse

VI-9-1 Résultats attendus

VI-9-2 Tests finaux

VI-9-3 Observations

VI-9-3-1 La poutre lamellée-collée

VI-9-3-2 La poutre lamellée-clouée

VI-9-3-3 La poutre lamellée-vissée

VI-9-3-4 La poutre lamellée-chevillée

VI-9-3-5 La poutre lamellée-thermo-soudée

VI-9-3 Données finales

VII- Autres données nécessaires pour la réalisation d'une Analyse de Cycle de Vie

Conclusion

Remerciements

Glossaire

Sources

Introduction

D'après le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, le secteur de la construction représente **42% de la consommation en énergie** sur le territoire français¹ si l'on cumule la production et l'exploitation des bâtiments. Dans le cadre du **Protocole de Kyoto**, les pays industrialisés se sont engagés à réduire leurs émissions. Il présente dès lors un important potentiel d'économie. Depuis Octobre 2007, l'une des mesures phares pour le secteur de la construction est l'éco-prêt à taux zéro destiné à financer la rénovation thermique des logements privés, et de l'éco-prêt logement social qui financera l'amélioration de la performance énergétique des logements sociaux. Au programme de l'horizon 2020, le gouvernement souhaite atteindre un objectif de rénovation de 800 000 logements parmi les plus énergivores, dans le but de réduire de 38% les émissions de CO2 sur le parc existant. La question de la réhabilitation est donc cruciale. C'est ainsi que le secteur du bâtiment est classé au sommet des priorités du **Grenelle de l'environnement**.

Le décret du **Plan Bois Construction Environnement** vise à favoriser l'utilisation du bois dans la construction. Un immeuble à usage d'habitation dont la charpente de toiture est en bois, doit, depuis décembre 2011, incorporer un volume de 35 décimètres³ de bois par m², soit plus de 10 fois le volume imposé par le décret n°2005-1647 datant de 2005². On peut se demander de quelle manière cette volonté politique va se traduire à l'échelle de l'architecture.

Effectivement, pour concevoir de manière écologique, le bois semble être un matériau pertinent. Grâce à la photosynthèse, les arbres absorbent, durant leur croissance, de grandes quantités de dioxyde de carbone atmosphérique, pour produire la matière ligneuse en fixant le carbone et en libérant de l'oxygène. L'emploi dans la construction des arbres récoltés à maturité fournit le moyen de fixer durablement un volume important de carbone. Pour un m³ de bois mis en œuvre, c'est environ 825 kg de CO2 qui sont éliminés³. Par ailleurs, l'exploitation, la transformation et la mise en œuvre du bois nécessitent beaucoup moins d'énergie que celles des autres matériaux de structure. De ce fait, la construction d'un bâtiment à structure bois consomme deux à trois fois moins d'énergie. En fin de cycle de vie du bâtiment, le bois est recyclable, sous réserve d'une déconstruction soignée pensée dès la conception du bâtiment et d'un traitement écologique. C'est ici que le rôle de l'architecte semble essentiel.

Y a-t-il des améliorations à apporter à la filière bois pour rendre l'architecture en bois encore plus écologique ? Est-il intéressant d'aller plus loin qu'une réponse stricte aux réglementations ? Le bois peut-il être utilisé dans n'importe quel contexte climatique, géologique, structurel, programmatique, économique ?

De nouveaux types d'assemblages innovants sont actuellement en phase de recherche dans les laboratoires d'écoles d'ingénieurs ou d'entreprises privées. Nous avons ainsi réalisé un inventaire de ces techniques et comparé les plus assemblages traditionnels via des tests de résistance au cisaillement. Pour ce mémoire, nous avons aussi voulu tester l'une de ces techniques d'assemblage innovantes et prometteuse, et ce, à travers l'expérimentation, afin de se mettre dans la peau d'un ingénieur chercheur. Il s'agit de la thermo-soudure, une connexion 100% bois qui permettrait un gain de 20% de résistance par rapport à un chevillage traditionnel. Il semble également intéressant d'en acquérir une mise en œuvre simple, maîtrisable par tous et d'abord par un étudiant en architecture qui souhaite maîtriser les techniques de construction en bois.

Si ces techniques s'avèrent réellement performantes, peuvent-elles être utilisées pour l'amélioration thermique des bâtiments ? Ou encore pour densifier la ville ? Quelles sont les potentialités architecturales des assemblages thermo-soudés ? Ces questions constitueront le point de départ pour notre sujet de Projet de Fin d'Etude de Master 2 à l'ENSA Paris Malaquais.

¹ Chiffre publié en Novembre 2008

² Chiffre publiés par le Comité National pour le Développement du Bois

³ Cf calcul au chapitre I-5

I - Le bois aujourd'hui en France

I-1- Usages

Le bois est utilisé pour de multiples usages ; de l'objet fonctionnel à l'élément de construction en passant par l'objet décoratif, le bois est mobilisé pour ses caractéristiques mécaniques, esthétiques mais aussi pour sa facilité à être travaillé. Ses différents usages sont permis grâce à sa capacité à être recyclable. Le design, l'ameublement, les jouets –exemple de l'entreprise artisanale Vilac dans le Jura, les parquets, les bardages, etc. mettent en avant les qualités du bois avant de pouvoir être recyclés en : pâte à papier, panneaux dérivés du bois comme les panneaux OSB, granulés pour poêles, isolants⁴, litières, absorbants, emballages, etc... avec possiblement une certification ou un label.⁵ Il faut noter que les granulés de bois constituent le dernier cycle de vie du matériau bois, le recyclage du bois n'est pas infini comme peut l'être celui du métal lorsqu'on le fond par exemple.

Panneaux OSB : « dit de 'process' constitué de grandes lamelles orientées et liées entre elles par un collage organique. L'appellation OSB est l'acronyme de sa dénomination anglo-saxonne (Oriented Strand Board). »⁶

Granulés de bois de chauffage : particules de bois issues des scieries broyées, tamisées, déshydratées à haute température et conditionnées avec un taux d'humidité⁷ maximum de 10%.⁸

D'après le Comité National pour le Développement du Bois (CNDB), le bois coupé est principalement utilisé dans la construction et l'aménagement.

I-2- Le bois, un atout pour l'écoconstruction

Nous avons vu ci-dessus que le bois est couramment recyclé, de manière finie. Il s'inscrit ainsi dans une démarche de développement durable. Mais d'autres précautions sont indispensables pour correspondre aux critères d'une écoconstruction.

I-2-1 La disponibilité du bois

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), l'Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA) et l'Institut National de l'Information Géographique et forestière (IGN) ont réalisé une étude de disponibilité en bois d'origine forestière en France métropolitaine destinée à l'industrie et à l'énergie, ainsi qu'un scénario prévisionnel pour les horizons 2020 et 2030. D'après cette publication, on compte une disponibilité moyenne annuelle de 71 millions de m³/an sur la période 2006-2020, dont 46,1 millions « dans les conditions économiques actuelles et compte tenu des contraintes techniques de récolte »⁹. Pour avoir un ordre d'idée, l'INSEE a estimé que les ménages français consomment 28,9 millions de m³ de bois pour se chauffer. Il faut aussi savoir que chaque partie de l'arbre est destinée à un usage particulier, selon le schéma ci-dessous tiré de l'étude citée plus haut.

Le CNDB assure que « la forêt française est la première forêt feuillue d'Europe. Les forêts publiques, de l'Etat (10% ou des collectivités territoriales (16%), sont gérées par l'Office National des Forêts, établissement public à caractère industriel et commercial. La plus grande partie de la forêt française a pour vocation de produire du bois d'œuvre de qualité, dans le cadre d'une gestion durable, c'est-à-dire soucieuse de la conservation de la diversité biologique et du maintien des potentialités des sols, en évitant toute évolution irréversible. »

⁴ Cf VIII-2 pour plus d'informations sur les caractéristiques et les avantages de l'isolation par fibre de bois

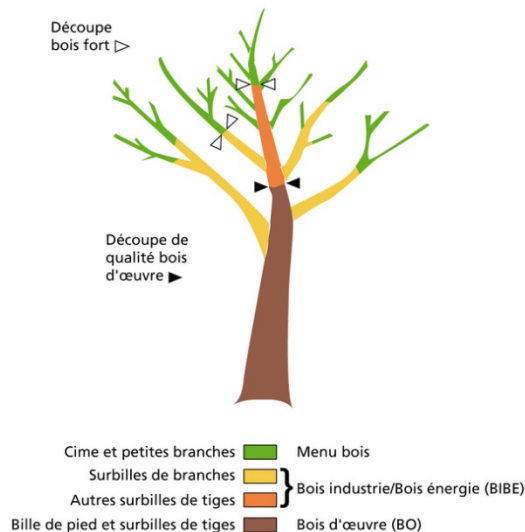
⁵ Cf II-3 pour plus d'informations sur les certifications et les labels

⁶ Définition extraite de l'Avis Technique du CTBA

⁷ Taux d'humidité= poids de l'eau libre divisée par le poids du bois sec

⁸ SICSA, entreprise de recyclage et de valorisation des déchets forestiers

⁹ <http://www.dispo-boisenergie.fr/>



¹⁰ **Menu bois** : bois de diamètre inférieur à 7 cm

BIBE : bois situé entre le menu bois et le bois d'œuvre, sa qualité restreint une destination ciblée : formes industrielles (panneaux, papier, piquets) et énergétiques (bûches, plaquette, granulés).

Bois d'œuvre : bois de diamètre supérieur à 7 cm dont la qualité permet une découpe commerciale, destiné au sciage, déroulage, tranchage et aux usages nobles de la filière

Bois d'industrie: destiné à des emplois industriels : poteaux, pâte à papier, charpente, caisserie, ameublement, menuiserie...

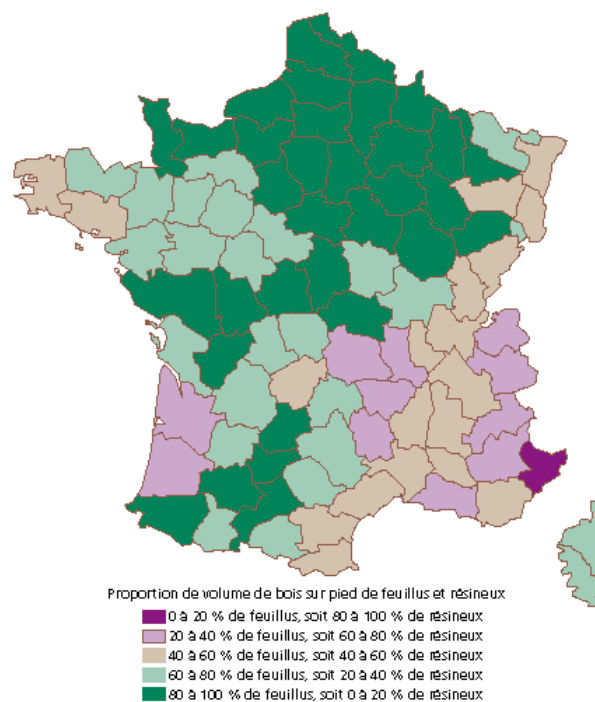
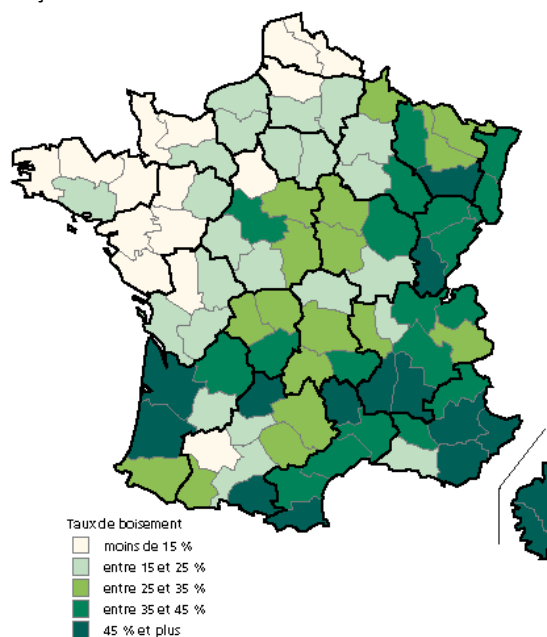
Bois-énergie ou bois de feu : bois utilisé pour le chauffage domestique principalement issus des déchets de transformation du bois d'industrie¹¹

Ressource : quantité totale de bois existant dans une zone et à une date données.

Disponibilité : quantité totale de bois qui pourra être prélevée pendant une période et dans une zone données, si l'on applique des règles raisonnables de gestion. Celles-ci doivent être entendues aujourd'hui comme aptes à assurer la gestion durable des forêts de la zone étudiée. Elles doivent ainsi intégrer les différents objectifs de production, d'accueil du public et de protection générale des milieux et paysages ainsi que les contraintes liées à la structure actuelle des peuplements et foncière de la forêt privée¹².

D'après *Le Moniteur*, la forêt française représente la troisième superficie européenne. En 2010, la balance commerciale de la filière bois avait un déficit de 6,4 milliards d'euros. Malgré la vaste forêt française, les panneaux de bois proviennent ainsi quasiment tous d'Allemagne, d'Autriche ou de Finlande. Ce qui induit beaucoup de transport et donc une quantité importante de dégagements de gaz à effet de serre.

Les cartes ci-dessous illustrent le taux de boisement et les proportions en feuillus et en résineux selon les régions françaises.

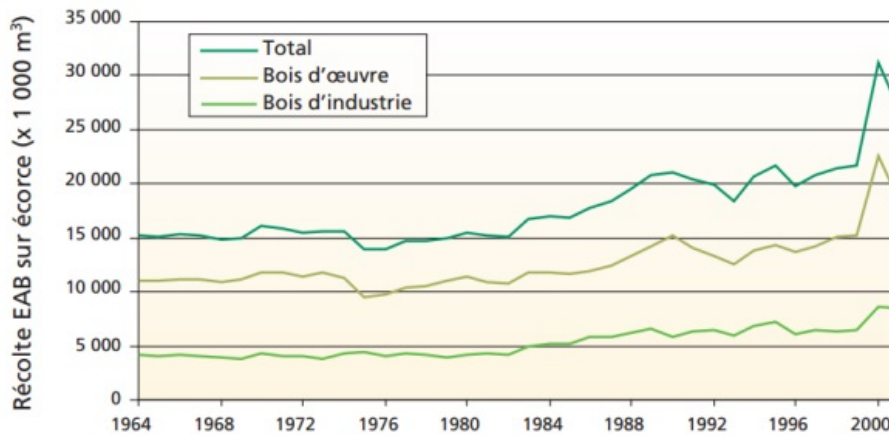


¹⁰ <http://www.dispo-boisenergie.fr/>

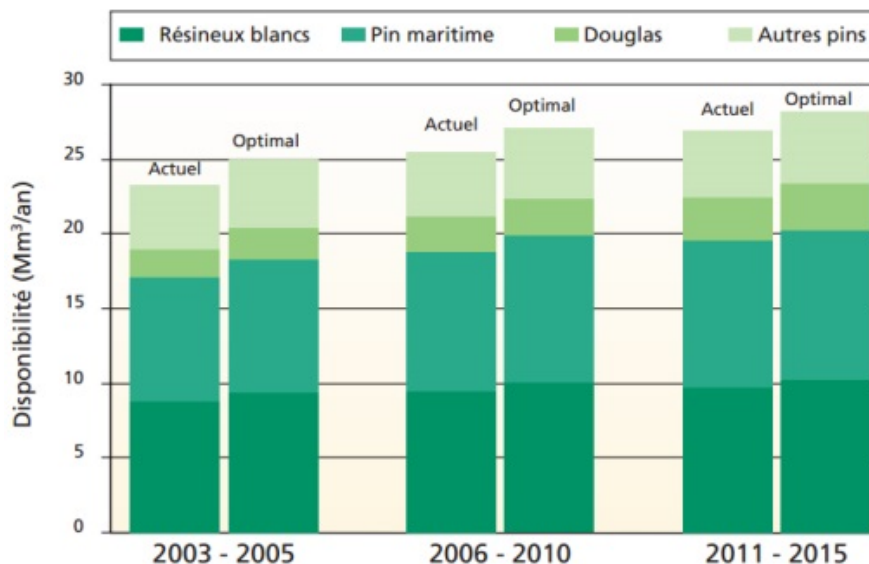
¹¹ D'après la COFA : Coopérative Forestière des Ardennes

¹² *Ressource et disponibilité forestières : une valorisation importante de l'inventaire*, IF, n°6, décembre 2004

Le tableau ci-dessous illustre la proportion de récolte de bois d'œuvre et de bois d'industrie dans la récolte totale en France.¹³



Le tableau ci-dessous illustre la proportion de disponibilité de chaque type de bois en France.¹⁴



Il est important que l'ensemble des essences soit utilisé pour ne pas nuire à une espèce et risquer sa disparition. Cette question reste problématique dans le domaine de la construction qui utilise essentiellement le sapin-épicéa et le douglas¹⁵.

I-2-2 Certifications et organismes spécialisés

La *résolution H1* prise au cours de la Conférence Interministérielle sur la Protection des Forêts en Europe qui a eu lieu à Helsinki en 1993 assure que : "La *gestion durable* signifie la gérance et l'utilisation des forêts et des terrains boisés, d'une manière et à une intensité telles qu'elles maintiennent leur diversité biologique, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur capacité à satisfaire, actuellement et pour le futur, les fonctions écologiques, économiques et sociales pertinentes aux niveaux local, national et mondial ; et qu'elles ne causent pas de préjudices à d'autres écosystèmes." Ainsi, si la France développe sa filière bois, elle devra porter une attention particulière à la gestion durable de ses forêts.

¹³ L'IF (Inventaire Forestier national), n°6, décembre 2004

¹⁴ L'IF, n°6, décembre 2004

¹⁵ Cf III-1 pour les caractéristiques de ces deux espèces

I-2-2-1 A l'échelle des forêts

Des **labels** peuvent imposer une limitation pour la quantité de substances dangereuses pour l'environnement et la santé utilisée pour le traitement, l'assemblage, la finition du bois. Ils ne peuvent garantir leur suppression en raison des composés volatiles.

L'**Ecolabel Européen** est le seul label écologique officiel européen utilisable dans tous les pays membres de l'Union Européenne. Les produits dont l'impact sur l'environnement est réduit peuvent donc être étiquetés avec la **marque NF Environnement**, certification délivrée par le groupe AFNOR Certification.

La **Gestion forestière responsable (FSC)** assure l'identification des produits bois certifiés FSC® dans les étapes successives de la transformation et de la distribution depuis la forêt jusqu'au consommateur. L'objectif de la marque FSC® est de promouvoir et d'assurer les bonnes pratiques forestières telles que définies dans les « principes et critères FSC® de bonne gestion forestière » et de mettre en place un marquage homogène des bois et produits ligneux certifiés FSC® »¹⁶.

La **Fédération de l'Industrie Bois Construction (FIBC)** a été créée en 2000. Elle regroupe plusieurs syndicats appartenant à la filière bois-construction. Cette mutualisation permet aux différents syndicats de faire cause commune sur des actions transversales techniques, réglementaires ou même de promotion. La FIBC met à la disposition des syndicats un ensemble de moyens (équipes, locaux, service de communication)¹⁷.

L'**Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA-Forêt Cellulose Bois Construction Ameublement)** est « un organisme qui a le pouvoir de certifier la qualité du bois tout au long du processus. Il a d'abord pour mission de « promouvoir le progrès technique, participer à l'amélioration du rendement et à la garantie de la qualité dans l'industrie ». ¹⁸ Le FCBA est au service des secteurs de la sylviculture¹⁹, de l'exploitation forestière, de la scierie, de la pâte à papier, des panneaux, de l'emballage, des industries bois-construction, du traitement du bois et de l'ameublement, dans le but de promouvoir l'innovation et le progrès technique de ces secteurs. Il a pour objectif d'aider les entreprises à intégrer les innovations, à s'adapter à l'évolution rapide des marchés et à se positionner aux niveaux européen et mondial.

Le **Programme de reconnaissance des certifications forestières (PEFC-Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes)** a certifié plus de 7,6 millions d'hectares de la forêt en France métropolitaine et en Guyane, soit 67% de la forêt publique et 20% de la forêt privée. PEFC France travaille avec 52 000 propriétaires forestiers et 2 600 entreprises de la filière forêt-bois, parmi lesquels on compte des exploitants, scieries, constructeurs, négociants, artisans, distributeurs, papetiers, imprimeurs, éditeurs, etc. qui ont donc la **certification PEFC**, c'est-à-dire que l'ensemble de la chaîne de production, depuis la forêt jusqu'au produit fini a été soumis à des critères de gestion écologique²⁰.

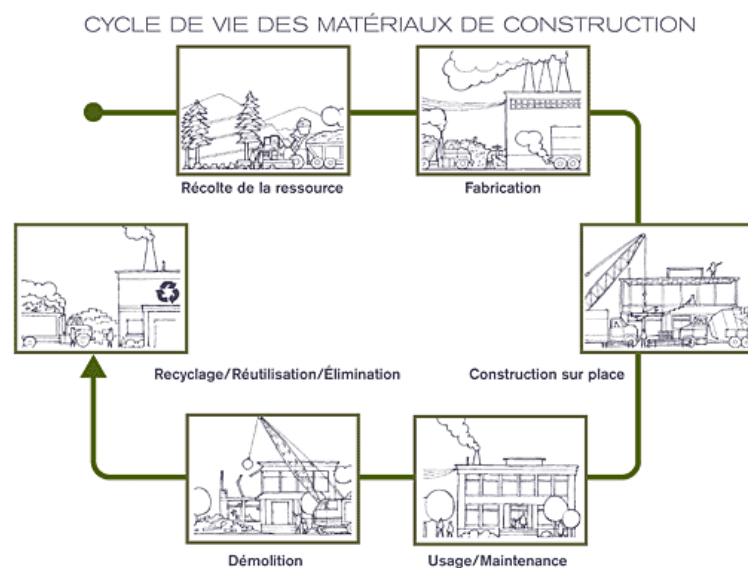
I-2-2-2 A l'échelle du fabricant

Le **CSTB** propose aux industriels une prestation d'assistance et de conseil pour augmenter leur chance d'obtention de reconnaissance officielle telles qu' : un Avis Techniques (AT), un Document Technique d'Application (DTA), un Agrément Technique Européen (ATE), Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX).

Le **Comité Professionnel de développement des industries françaises de l'ameublement et du bois (CODIFAB)** propose, lui, une étude technico-économique des solutions innovantes d'assemblage pour des structures bois.

I-2-2-3 A l'échelle du produit : L'ACV

L'analyse du cycle de vie des matériaux est un outil d'analyse pour établir un écobilan pour l'utilisation de chaque matériau. C'est une méthode qui a vu le jour au début des années 90 et qui prend en compte une multitude de critères tels que la consommation de matière et d'énergie, les émissions dans l'air et dans l'eau et les déchets, et ce, tout au long du cycle de vie des matériaux, soit de leur fabrication à leur désintégration finale. Ainsi, la quantité de CO₂ émise par la coupe, la fabrication et la destruction du bois est beaucoup plus faible que celle des autres matériaux de construction.²¹



¹⁶ Dossier de presse de Janvier 2012 publié par le PEFC

¹⁷ <http://www.batibois.org/>

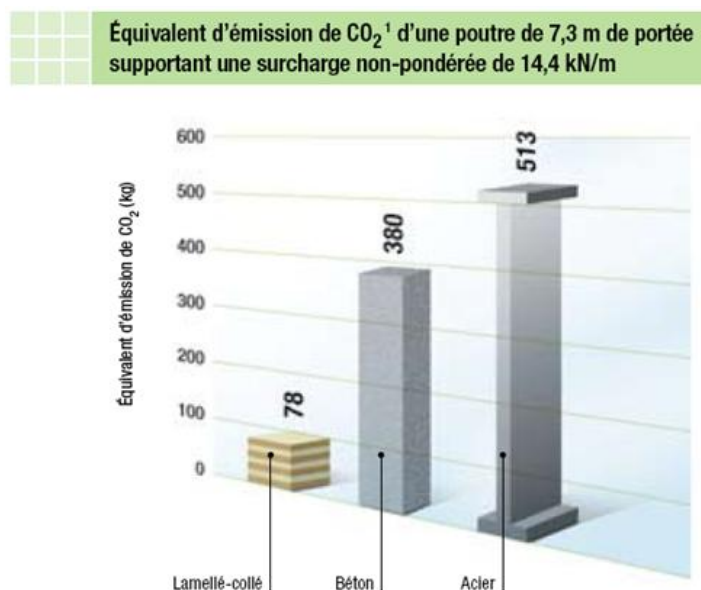
¹⁸ <http://www.fcba.fr/>

¹⁹ *Entretien et exploitation des forêts*, document du FCBA

²⁰ Dossier de presse de Janvier 2012 publié par le PEFC

²¹ <https://www.cecobois.com/le-bois-et-lenvironnement/le-matériau-bois-et-lanalyse-du-cycle-de-vie>

Voici, ci-dessous le comparatif de quantité de CO₂ émise pour trois poutres de 7,3m de portée, l'une en bois lamellé-collé (données plus élevées que pour une poutre en bois massif), la seconde en béton et la troisième en acier. L'ACV du bois est largement meilleure que celle de ces deux derniers matériaux.²²



1. L'équivalent d'émission de CO₂ représente potentiel de réchauffement climatique obtenu lors de l'analyse du cycle de vie à l'aide du logiciel ATHENA™

L'**Avis Technique** est l'appréciation de l'aptitude d'un produit à l'emploi prévu, formulée par un groupe d'experts qualifiés représentant toutes les professions. Il est publié pour être mis à la disposition des décideurs du bâtiment. Ainsi, l'aptitude à l'emploi de votre produit sera mieux connue de vos clients : entrepreneurs et artisans, concepteurs, maîtres d'ouvrage et d'autres professionnels de la construction : assureurs, contrôleurs techniques, etc. Toute personne, physique ou morale, française ou étrangère, qui fabrique, distribue ou met en œuvre en France un produit ou un procédé de construction "non traditionnel". A ce titre, l'Avis Technique peut compléter utilement la procédure réglementaire liée à la mise sur le marché des produits de construction et basée sur une norme européenne ou un Agrément Technique Européen (ATE). Il est alors formulé sous forme de Document Technique d'Application.

L'**Agrément technique européen (ATE)** est une sorte d'avis technique mais reconnu à l'échelle européenne plutôt que nationale. Il constitue de plus la référence de base pour l'attribution du marquage CE.

Le « Deutsches Institut für Bautechnik » a pour fonction de délivrer des certifications en Allemagne, notamment pour le CLT²³, on parle de **Certification technique générale (DIBt)**.

I-3 – Les traitements du bois

Le bois, pour être résistant, doit faire l'objet de quelques précautions. En effet, l'aubier, la partie vivante qui contient des substances issues de la sève est vulnérable. Il peut être altéré par des agents biologiques comme les champignons ou les insectes. Pour éviter les champignons, il faut éviter toute humidité supérieure à 20% et utiliser des duramens exempts d'aubier. Concernant les insectes et les champignons, il existe un traitement thermique qui consiste à chauffer le bois à haute température pour faire réagir les composés biochimiques pour obtenir des propriétés intéressantes telles qu'une meilleure résistance aux attaques fongiques, une meilleure stabilité dimensionnelle, une augmentation de la rigidité ainsi qu'une diminution de la contrainte de rupture. Le procédé Thermoprocess® atteint ces objectifs.

On traite également le bois grâce à des pentachlorophénols qui sont d'excellents fongicides. On ajoute parfois des pesticides, de l'acide formique, des phénols nitrés. Les chloro-naphtalènes sont aussi d'excellents fongicides et non toxiques pour l'Homme

La ventilation est également une condition indispensable à la bonne conservation du bois²⁴.

²² <https://www.cecobois.com/le-bois-et-lenvironnement/le-matériau-bois-et-lanalyse-du-cycle-de-vie>

²³ Cf III-3

²⁴ Cours de technologie du bois, R. Lourdin, U.P.S.

I-4 La problématique de la colle

Le **liant** est le composant de base indispensable au collage. Il permet l'agglomération des diverses particules solides entre elles. Il est constitué de résines, synthétiques ou naturelles, qui forment un film en séchant. La phase de dissolution est un liquide volatil qui dissout ou dilue le liant pour faciliter l'adhésion des différents matériaux. Lors du séchage, le solvant s'évapore dans l'air ambiant ou est absorbé par le support.

Les **solvants** des colles synthétiques -y compris les colles à phase aqueuse- sont les principaux responsables des émissions de COV liées aux colles.

Les **charges** sont des substances solides, non miscibles, ayant pour but d'améliorer le renforcement mécanique ou l'absorption du support. Les charges d'origine minérale sont sans risque lors de l'utilisation des colles.

Les **additifs** apportent des propriétés spécifiques à la colle. Il peut s'agir de conservateurs, d'accélérateurs de séchage, de pesticides, d'épaississants... parfois très toxiques.²⁵ La plupart des colles présentes sur le marché fait encourir à l'Homme des risques pour sa santé et pour son environnement.

Il apparaît ainsi souhaitable de réduire l'usage de produits nécessitant de la colle (revêtements muraux, tapis, revêtements synthétiques -vinylics, certains planchers flottants, etc.). Il est préférable de favoriser des modes de fixation mécaniques -clous, vis, emboîtements, fixations tendues pour les textiles, etc. Il en est de même pour les bois lamellé-collé, les panneaux contre-plaqués, les panneaux de fibres de bois, etc. Certaines colles sont naturelles, à base d'amidon, de caséine, de poisson ou d'os, notamment pour des revêtements muraux.

La **caséine**, par exemple, provient d'un mélange complexe de protéines de lait et d'hydrate de calcium issu du chou. Elle est notamment utilisée dans les mortiers, les peintures et aussi pour coller. C'est une colle à fort pouvoir adhésif, ininflammable, insensible à l'eau après complet séchage et sans solvant. Mais cette colle a elle aussi un aspect négatif : elle contient de la poudre de marbre, ressource épuisable²⁶. Elle a été utilisée pour des dizaines de milliers d'avions en bois. Les charpentes en lamellé-collé inventées et développées par le charpentier allemand Otto Hetzer dans les premières années du XXème siècle par exemple sont toujours en parfait état comme de nombreuses charpentes datant de la Renaissance. On reproche à la caséine une mauvaise résistance à l'humidité, d'autres disent que cela ne tient qu'à une imprécision lors la fabrication. La caséine connaît depuis quelques années un regain d'intérêt dans le domaine de la peinture car elle constitue un excellent liant. Les charpentiers du Moyen-Age, tout comme Otto Hetzer, n'ont pas connu les contraintes de la rentabilité à tout prix et ont su utiliser une colle de caséine correctement formulée qui donne un caséinate insoluble. Ces collages laissés à l'abri des intempéries ont prouvé qu'ils avaient une durée de vie bien supérieure au siècle ! Pourquoi par exemple la société De Havilland utilisait-elle pendant la seconde guerre mondiale un collage à la caséine dans ses usines Canadiennes alors qu'en Grande Bretagne le même avion fabriqué avec une colle phénolique ? La réponse nous est parvenue il y a peu de temps. Le lait était une matière trop précieuse en Grande Bretagne pour en tirer la caséine, mais surtout les Canadiens disposaient des résultats d'études confidentielles menées par le gouvernement Américain sur les colles. Une étude menée de 1932 à 1939 a, quant à elle, abouti à la mise au point d'une colle à la caséine capable de maintenir ses performances pendant six mois sous une humidité de 97% et une température de 30°C. Cette formule incorpore hélas un puissant fongicide toxique à une concentration très largement supérieure à ce qu'autorise actuellement la réglementation européenne. Elle montre cependant qu'il est possible de réaliser une colle naturelle capable de rivaliser avec les produits issus de la synthèse pétrolière.

	Colles synthétiques			Colles "naturelles"		
	Composants	Avantages	Inconvénients	Composants	Avantages	Inconvénients
Liant	Polymères synthétiques (résines acryliques, vinyliques ou époxydes, polyuréthanes, polyester, caoutchouc chloré)	Facilité d'emploi Séchage rapide	Certains sont cancérigènes ou irritants Imperméables à la vapeur d'eau	Amidon Dextrine Cire d'abeille Caséine Latex naturel Résine d'arbre Cellulose Isoparaffine Os Poisson	Pénétration du support (durent plus longtemps) Perméables à la vapeur d'eau	Séchage lent Sans effet nocif
Phase de dissolution	Hydrocarbures (white-spirit, toluène, xylène, benzène) Alcools Ether de glycol Cétones (acétone) Formaldéhyde Eau		Intoxications (troubles neurologiques, digestifs et respiratoires) parfois très sévères Nocivité pour la reproduction, le développement du fœtus et le sang (éther de glycol) Dermatoses et allergies Emissions de COV Peu dégradables	Eau	Sans impact sur la santé	
Charge	Matériaux naturels ayant subi des traitements chimiques			Matériaux naturels sans traitements chimiques (chaux, talc, kaolin)		
Additif	Polyalcool vinylique Méthylcellulose Formaldéhyde...	Certains sont cancérigènes ou irritants Emissions de COV		Lécithine de soja Manganèse Calcium		

25 www.prioriterre.org, Information et Conseil Energie Eau Consommation, *Choisir ses colles*, avril 2010

26 <http://www.caseo.fr/documents/caseine/une-super-colle-restee-secrete.html>

	Toxicité	Constitution	Application	Risques
Colles en phase aqueuse	Colles néoprènes	Formaldéhyde, butylphénol, polyisocyanate	Collage des stratifiés bois, carrelages, plinthes...	Fortement allergisantes par contact cutané. Risque d'intoxication neurologique pendant l'évaporation des solvants, divers risques liés aux solvants présents (eczéma, troubles sensitifs des membres inférieurs...).
	Colles vinyliques	Solvants : eau et éthers de glycol.	Revêtements de murs et sols (papier vinyl, toile de verre, panneaux de liège, parquet, liège...)	Irritations cutanées.
	Colles acryliques	Liant : copolymère d'acrylates, des résines phénoliques peuvent être ajoutées. Solvant : eau et éthers de glycol.	Revêtements de murs et sols (papier vinyl, toile de verre, panneaux de liège, parquet, liège...). Résistent mieux à l'humidité et aux supports alcalins (bétons) que les colles vinyliques.	Irritations cutanées.
	Colles à base d'amidon		Utilisées essentiellement pour la mise en œuvre des revêtements muraux (papiers peints).	Sans impact sur la santé.
	Colles à base de caséine		Utilisées essentiellement pour les produits dérivés du bois (lamellé-collé, contrplaque...).	Sans impact sur la santé.
	Colles cellulosiques		Constituant principal : dérivé synthétique de la cellulose (méthylcellulose, hydroxyéthylcellulose, carboxyméthylcellulose).	Utilisées essentiellement pour la mise en œuvre des revêtements muraux (papier peint).

Remarque : les colles néoprènes, vinyliques et cellulosiques en phase solvant sont plus toxiques que leur équivalent en phase aqueuse.

	Toxicité	Constitution	Application	Risques
Colles en phase solvant	Colles néoprènes	Constituées par de multiples solvants représentant jusqu'à 80% de leur poids.	Collage des stratifiés bois Carrelages Plinthes...	Fortement allergisantes par contact cutané (formaldéhyde, butylphénol, polyisocyanate), risque d'intoxication neurologique pendant l'évaporation des solvants, divers risques liés aux solvants présents (eczéma, troubles sensitifs des membres inférieurs...).
	Colles polyuréthanes	Constituées par la réaction entre un polyisocyanate et un polyester/polymère, elles peuvent être sans solvant.	Collage de revêtements textiles, des parquets, mastics, joints...	Fortement irritantes pour la peau, les muqueuses oculaires et respiratoires, peuvent engendrer de l'asthme, risques d'irritations cutanées, risques liés aux solvants si présents dans la composition.
	Colles époxydiques	A base de résines époxydiques, elles peuvent ne pas contenir de solvants. Très bonne résistance mécanique, chimique, à l'humidité, très bonne adhésivité.	Nombreuses applications dans le bâtiment (collage de parquets en pièces humides, vernis de protection des planchers...).	Cancérogène au cours de la fabrication, irritations cutanées et allergies lors de l'emploi.
	Colles vinyliques	Liants principaux : polyacétate de vinyl, polymères de l'acétate de vinyl Liants secondaires possibles : colophane, urée-formaldéhyde, mélamine-formaldéhyde. Grande durée de vie, nettoyage facile, sensible au gel, à l'humidité et à la chaleur.	Parquets, moquettes, revêtements PVC, liège...	Solvants : divers mais risques pour la santé (irritations cutanées, troubles neurologiques).
	Colles cellulosiques	Constituées principalement d'ester cellulosique ou ethylcellulose. Solvants : alcools (méthanol, éthanol), cétones, hydrocarbures...	Principalement utilisées pour les parquets.	Risques liés aux solvants présents.

Remarque : les colles néoprènes, vinyliques et cellulosiques en phase solvant sont plus toxiques que leur équivalent en phase aqueuse.

Les tableaux ci-dessus montrent qu'il faut privilégier les colles à phase aqueuse (polyol, esters d'acide gras, résines liquides...) aux colles à phase solvant²⁷. Les assemblages mécaniques sont toutefois les plus durables.

Des labels existent également pour la certification des colles. Ils ne signifient néanmoins pas nécessairement que la colle soit parfaitement naturelle. Ils certifient uniquement l'exclusion voire même la limitation de quantité de certaines substances chimiques dangereuses dans la composition des produits labellisés. Au contraire, certaines colles peuvent être naturelles sans pour autant avoir de labels, si le fabricant ne l'a pas demandé.

La **marque NF Environnement** exige par exemple :

- une teneur en COV²⁸ ≤ 30 g/l hors eau
- pertes totales en COV ≤ 2% de la masse de COV mise en œuvre
- résistance au décollement ≥ 0,6 N/mm

Label Emission EC1

Il s'agit d'une certification allemande qui porte sur les émissions des colles et des revêtements de sols. Elle garantit l'absence de substances cancérigènes ou mutagènes et évalue le niveau d'émissions de COV. Par exemple, en fonction de la quantité d'émission du gaz formaldéhyde en nanogrammes, le produit obtiendra un *Emission* différent :

- EC1 : très faible émission : < 500 ng/m³ après 10 jours,
- EC2 : faible émission : de 500 à 1 500 ng/m³ après 10 jours,
- EC3 : émission non faible mais sans substance cancérigène : > 1 500 ng/m³ après 10 jours.

Les bois lamellé-collé tendent à être abondamment utilisés dans les constructions contemporaines. L'assemblage des avivés se fait par collage, ce qui pose la question de baisse de performance au niveau de l'ACV du lamellé-collé.

I-5 L'empreinte écologique du bois

Du point de vue écologique, le bois est également intéressant car c'est une matière première renouvelable et durable. Sa transformation demande une faible consommation d'énergie et permet d'obtenir divers produits dérivés (panneaux de fibres agglomérées, paillis, bioénergie, qui sont éliminables par biodégradation naturelle ou sous forme de compost lorsqu'aucun agent nocif n'est ajouté. Matériau naturel, qui se développe grâce à la photosynthèse, il est perçu comme le matériau écologique par excellence. D'après l'architecte Richard Murphy, « le matériau bois apporte un GWP (Global-Warming Potential) négatif, c'est-à-dire qu'il permet une réduction du potentiel de réchauffement planétaire ». En effet, le bois, même une fois coupé possède une capacité à stocker le dioxyde de carbone et donc à amoindrir les conséquences de nos émissions de gaz à effet de serre.

Le bois d'œuvre débité représente environ la moitié du volume du tronc. La matière restante peut entrer dans la fabrication de composants pour la construction, comme les panneaux d'OSB, ou encore alimenter la production de pâte à papier. Une partie des écorces est utilisable en horticulture. Le reste des produits connexes (sciures, chutes) est aujourd'hui valorisé sur le plan énergétique, soit via la production de granulés de bois, soit pour l'alimentation des chaudières nécessaires au séchage du bois. Au final, c'est la totalité de la matière première qui est ainsi valorisée²⁹.

CO₂ + H₂O



(CHOH) + O₂

(Gaz carbonique + eau



bois + oxygène)

Mb = 50% masse anhydre dont C = 12 % et CO₂ = 44 %

pba = 450 kg.m⁻³

50% pba = 225 kg.m⁻³

Mco₂ = 225 x 44/12

Mco₂ = 825 kg.m⁻³

Un mètre cube de bois évite ainsi l'émission de 825 kg de CO₂ dans l'atmosphère.

²⁷ www.bruxellesenvironnement.be

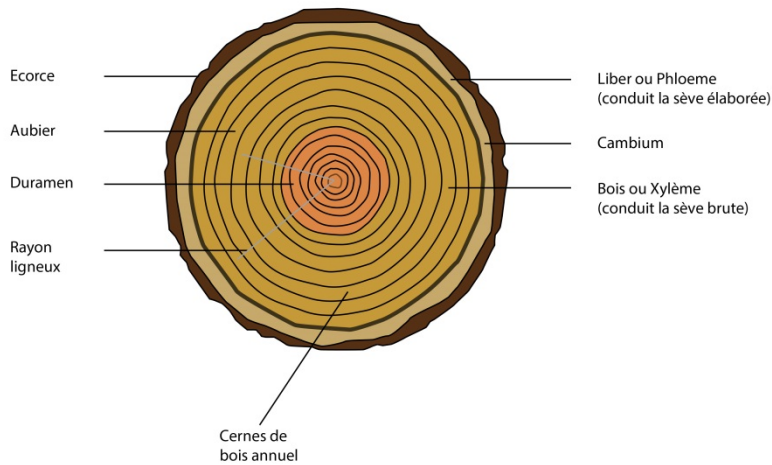
²⁸ Composé Organique Volatil

²⁹ *Surélévations en bois, densifier, assainir, isoler*, M. Mooser, M. Forestier, M. Pittet-Baschung

II - Le matériau bois

II-1- La structure du bois

La structure du bois



La coupe d'un tronc d'arbre fait apparaître de l'extérieur vers le cœur :

- L'écorce externe, appelée **liège** ou rhytidome est constituée de cellules mortes ayant un rôle protecteur
- L'écorce interne ou **liber**
- Le **cambium** produit les cellules du liber et les cellules du bois
- Le **bois** ou **xylème** se forme par couches concentriques, appelées **cernes**, correspondant à une croissance périodique

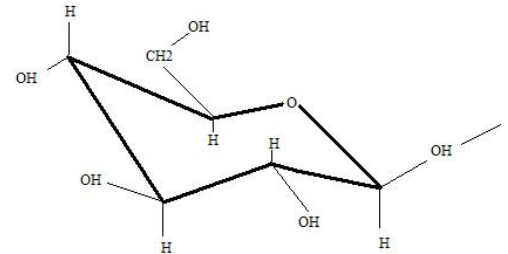
II-2- Composition chimique

A une échelle plus zoomée, il faut noter que la principale molécule constituante du bois est la cellulose (à 50%). La lignine est quant à elle présente à hauteur de 25% à 30% et les hémicelluloses de 25% à 20% selon les espèces. Des extractibles comme les tanins, les cires et les terpènes y sont également présents. La proportion de ces constituants varie d'une essence de bois à l'autre.

II-2-1 La cellulose

La **cellulose** est une macromolécule, un polymère linéaire, non ramifié. Les différentes chaînes placées côte à côte qui la composent sont reliées par de nombreuses liaisons Hydrogène qui confèrent à ce matériau une très grande rigidité. La cellulose est également présente dans les végétaux. C'est la substance qui constitue la paroi des cellules. Dans la cellulose, on trouve une quantité importante de glucose. Il est intéressant de mettre en lumière l'expérience suisse qui consiste à transformer du bois en sucres fermentescibles qui vont, à terme devenir du bioéthanol utilisé comme carburant.

C'est également à partir de la cellulose que l'on produit le papier. Il est aussi important de noter que, quelle que soit l'essence, la cellulose a toujours la même constitution. C'est le nombre d'unités constitutives qui génère des fibres de cellulose plus ou moins longues. La cellulose ne présente aucune résistance mécanique.

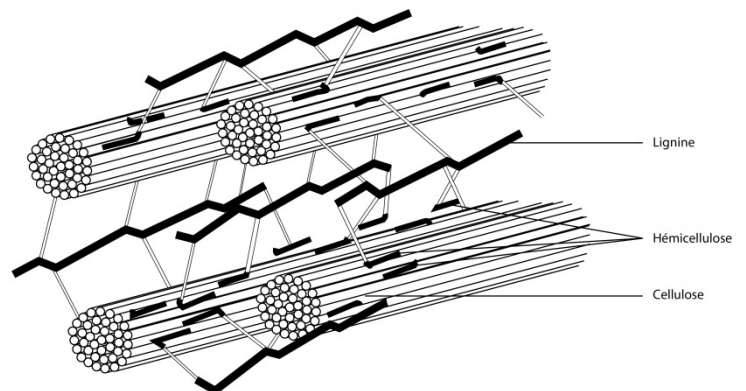


II-2-2 La lignine

La **lignine**, du latin *lignum* qui signifie bois, agit comme un ciment 'entre' les fibres du bois et comme élément rigidifiant 'à l'intérieur' des fibres. En effet, sa structure est très stable du fait de ses cycles benzéniques. Les principales fonctions de la lignine sont ainsi d'apporter de la rigidité, une imperméabilité à l'eau ainsi qu'une grande résistance à la décomposition. La lignine est un polymère réticulé³⁰ dont la structure complexe varie, comme pour les hémicelluloses, en fonction de l'espèce, de l'âge du végétal et des conditions climatiques.

On peut cependant dégager une structure de base commune dite "phénol propane"³¹. Il existe trois formes différentes qui sont des alcools : alcool coumarylique, alcool

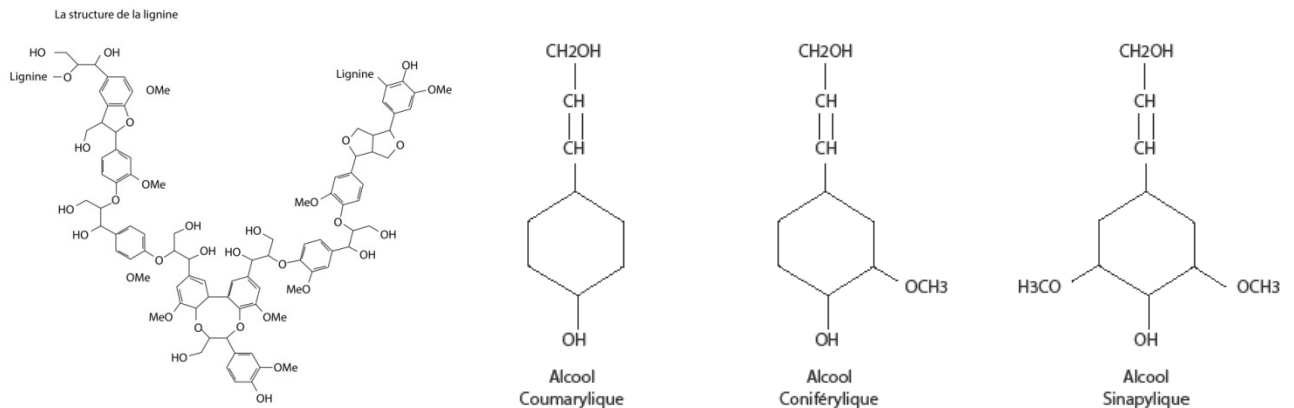
La structure de la biomasse lignocellulosique



³⁰ Polymère réticulé signifie polymère tridimensionnel

³¹ Article de T. Surini sur http://infoforets.free.fr/article.php3?id_article=208

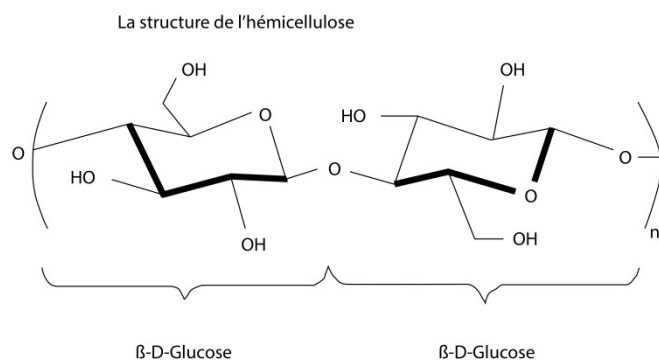
coniférylique et l'alcool sinapylique. Les résineux n'ont que des alcools coniféryliques quand les feuillus ne sont constitués que d'alcools sinapyliques. Les plantes annuelles ont, quant à elles, des lignines plus complexes car elles peuvent être constituées des trois types de ces monomères. Leur structure est montrée par le schéma suivant :



Par ailleurs, la lignine sert de lien entre les molécules de cellulose, elle assure donc la cohésion et la capacité de soutien³². Elle joue aussi un rôle de protection. En effet, les celluloses et hémicelluloses, composées de sucres, sont très attractives pour les champignons et insectes. La lignine est beaucoup plus difficile à biodégrader. Cette capacité de défense est assurée par la propriété d'antioxydant de la molécule. Elle est cependant sensible à la lumière et donc au rayonnement solaire, ce qui provoque une altération de la couleur. Pour faire du papier blanc, il faut donc extraire le maximum de lignine. Par ailleurs, la lignine peut permettre la formation d'arômes comme l'arôme de vanille (ou vanilline).

II-2-3 Les hémicelluloses

Les **hémicelluloses** sont des polymères dont la structure varie fortement selon les feuillus et les résineux. Ces molécules représentent environ 30% de la matière ligneuse. Elles ont un caractère hydrophile assez marqué et forment aisément des gels. Les propriétés et le nombre de molécules formées permettent ainsi d'envisager de nombreux emplois.



II-2-4 Les matières extractibles

Les extractibles sont des substances très légères dont la masse molaire est inférieure à 3000 g/mol³³. Ils sont à l'origine des couleurs, des odeurs ou encore de la résistance face aux agresseurs biologiques du bois³⁴. Les sels minéraux en font partie, tout comme le caoutchouc par exemple produit par l'Hévéa –ou arbre à latex. Les extractibles varient selon les espèces, les arbres sont ainsi plus ou moins bien protégés face à la photocoloration provoquée par les rayons ultra-violet. On peut aussi considérer le bois comme un matériau composite naturel³⁵ où la cellulose est la fibre de renfort, la lignine la matrice et les hémicelluloses une interface qui rend ces deux matériaux compatibles.

Le tableau ci-dessous illustre la composition chimique des différentes parties du bois en pourcentages de la biomasse totale.

³² Jodin, 1994

³³ D'après les études de Diouf, El Bakali, Merlin et Perrin

³⁴ D'après l'étude de Jodin datant de 1994

³⁵ On appelle matériaux composites des matériaux composés d'un renfort, fibres résistantes noyées dans une matrice moins résistante mécaniquement.

	Ecorce	Phloème	Cambium	Aubier	Bois parfait	Tp°C fusion
Cellulose	20 - 30	21 - 37	20 - 43	40 - 45	43 - 44	200 - 250
Hémicellulose	?	9 - 30	30 - 45	23 - 35	25 - 34	150 - 220
Lignine	27 - 58	4 - 53	2 - 20	21 - 30	23 - 30	140 - 190
Pectine	?	3 - 18	3 - 22	1 - 4	0,3 - 1	?
Subérine	2 - 40	0	0	0	0	?
Amidon & sucres	?	4 - 23	3 - 37	1 - 5	0	?
Composés azotés	0,2 - 0,6	0,2 - 2	1 - 5	0,05 - 0,3	0,03 - 0,1	?
Lipides	1 - 38	0,3 - 4	?	0,1 - 7	0,2 - 0,8	?
Minéraux	0,2 - 3	1 - 10	?	0,2 - 0,7	0,2 - 0,8	?

Source : <http://www.veritax.fr/veritax/bois.html>

II-3 - Les différentes essences

FEUILLUS			CONIFERES	
Alisier torminal	Arbousier	Aulne vert	Cèdre de l'Atlas	Cèdre du Liban
Bouleau	Cerisiers ou merisier	Charme	Cyprés	Douglas
Charme-houblon	Châtaignier	Chêne chevelu	Épicéa commun	Épicéa de Sitka
Chêne pédonculé	Chêne pubescent	Chêne rouge d'Amérique	Genévrier thurifère	If
Chêne rouvre	Chêne tauzin	Chêne vert	Mélèze d'Europe	Mélèze exotique
Chêne-liège	Cornouiller mâle	Eucalyptus	Pin à crochets	Pin à encens
Frêne	Grand cytise (aubour)	Grands aulnes	Pin cembro	Pin d'Alep
Grands érables	Hêtre	Micocoulier	Pin laricio	Pin maritime
Noisetier	Noyer	Olivier	Pin mugo	Pin noir
Orme	Petits érables	Peuplier cultivé	Pin pignon	Pin sylvestre
Peuplier non-cultivé	Platane	Robinier faux acacia	Sapin Weymouth	Sapin américain
Saule	Tilleul	Tremble	Sapin de Nordmann	Sapin méditerranéen
Tulipier de Virginie	Autre feuillu exotique	Autre feuillu indigène	Sapin pectiné	Autre conifère exotique
Autre fruitier				Autre conifère indigène

Source : inventaire-forestier.ign.fr

L'inventaire des essences est étoffé. Vingt-neuf essences de feuillus et de résineux sont majoritairement présentes en France. Une application téléchargeable sur le site de l'Office National des Forêts permet de reconnaître les espèces que l'on croise à l'adresse suivante : http://www.onf.fr/activites_nature/++oid++13ee/@@display_advise.html

III – Le bois dans la construction

Le bois est un matériau apte à s'adapter à l'environnement construit ainsi qu'à des milieux extrêmes. En effet, il est léger et souple³⁶. On peut donc l'utiliser sur des sols à faible portance, sur du bâti ancien fragile ou dans des climats venteux et froids, ou encore dans des régions à risques sismiques, moyennant des conceptions adaptées. Construire en bois demande des systèmes constructifs simples qui peuvent être mis en œuvre rapidement et qui ont l'avantage de causer peu de nuisances sur le chantier (nuisances sonores, durée de chantier, une préfabrication qui permet de réduire l'espace de stockage sur le chantier, peu de transport si l'on utilise des bois locaux...)

Avec la demande croissante de logements, le bois semble être une solution simple à mettre en œuvre. Plusieurs pays et régions de France ont déjà commencé ou commencent à mobiliser la filière bois pour répondre à leur besoin en logements. Pour comprendre pourquoi les acteurs de la construction se tournent vers la filière bois, il semble intéressant d'étudier des constructions historiques pour acquérir les fondamentaux des modes constructifs artisanaux ainsi que les propriétés mécaniques du bois. Enfin, nous verrons les perspectives ouvertes par ce matériau.

III-1 Les espèces de bois utilisées dans la construction

Dans le domaine de la construction, on utilise essentiellement du Douglas et de l'Epicéa. L'épicéa peuple spontanément les Vosges, le Jura, les Alpes du Nord et les Alpes du Sud. Il a longtemps été l'essence de reboisement la plus utilisée. Le Douglas est une espèce originaire de la Côte Ouest du continent nord-américain. Sa population s'est multipliée depuis les programmes de reboisement mis en place à la fin de la seconde guerre mondiale. La France est le pays européen qui possède la plus grande quantité de Douglas avec un parc de 420 000 ha.³⁷

Le **Douglas** est intéressant pour ses caractéristiques mécaniques ainsi que pour sa durabilité naturelle grâce à son duramen résistant naturellement à la plupart des attaques d'insectes et de champignons. C'est ainsi qu'il est facile pour le Douglas de répondre aux exigences des classes d'emploi les plus écologiques.

L'**Epicéa**, quant à lui, est intéressant notamment pour sa rapidité de croissance. C'est un arbre de grande taille (35-40m de haut), au tronc droit.

	Epicéa	Douglas
Propriétés physiques à 12% d'humidité		
Masse volumique (kg/m ³)	400 à 500	540
Coefficient de retrait volumique (%)	13 à 14	13,2
Caractéristiques mécaniques à 12% d'humidité		
Contraintes admissibles de rupture (Mpa) de		
Compression transversale	2,2	
Compression axiale		55
Cisaillement longitudinal	1,2	
Traction transversale	0,5	
Traction axiale	7,7 pour les bois massifs 8,3 pour les bois lamellé collé	93
Flexion et de compression parallèle	10,9 pour les bois massifs 12 pour les bois lamellé collé	
Module d'élasticité longitudinale en flexion		18

Source : www.franceboisforet.com

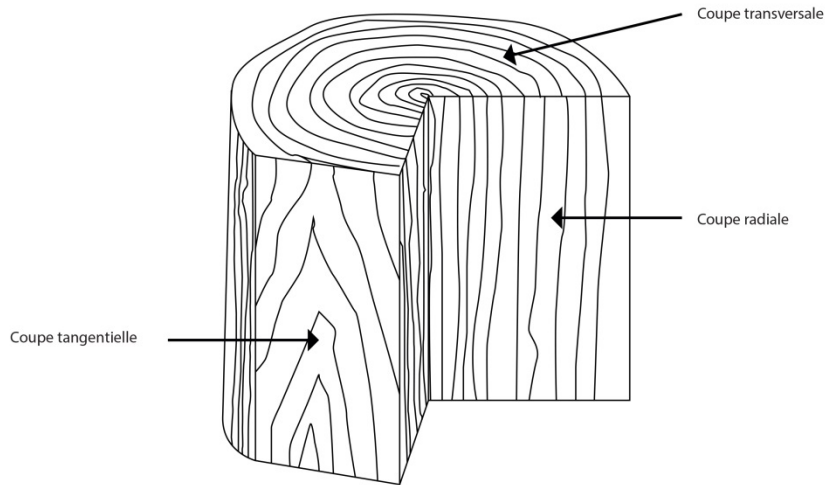
³⁶ *La surélévation en bois*, densifier, assainir, isoler, M. Mooser, M. Forestier, M. Pittet-Baschung

³⁷ IFN, campagne 2006 à 2010

III-2 – Mécanique et caractéristiques du bois

III-2-1 Caractère orthotrope

Le bois est un matériau anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés mécaniques diffèrent selon qu'il travaille dans le sens de ses fibres ou perpendiculairement à celles-ci. En effet, le bois présente trois directions différentes illustrées sur le schéma ci-dessous.



La résistance du bois diffère donc si la contrainte est exercée parallèlement ou perpendiculairement aux fibres du bois. C'est la raison pour laquelle des panneaux de bois ou des lamellés-collés ont été créés. Avec ces systèmes, la résistance est relativement identique dans toutes les directions du bois. Cette résistance varie également selon le type de contrainte – tension ou compression.

Le bois a la particularité d'avoir une haute résistance à la tension, c'est pourquoi on l'utilise pour les poutres.

III-2-2 Données physiques

-Le bois présente une **densité** qui est approximativement 5 fois moins grande que celle du béton et 15 fois moins grande que celle de l'acier.

-Le **pooids propre** des bois résineux, couramment utilisés en structure, est d'environ 5 kN/m^3 , alors que celui du béton atteint 25 kN/m^3 , soit cinq fois celui du bois.

-L'**humidité** du bois est environ de 20%.

-Le bois a un comportement **ductile** intéressant.

-La **masse volumique** des bois résineux est ainsi inférieure à 450 kg.m^{-3} , alors que celles du béton armé ($2\,500 \text{ kg.m}^{-3}$) et de l'acier sont respectivement 4 et 13 fois plus élevées.

-Sapin, Epicéa : 400

-Pin maritime, pin sylvestre, mélèze : 450

-Chêne : 650

-Châtaigner : 650

-CLT : 470

Le tableau ci-dessous présente la résistance aux différentes contraintes selon les classes de bois. (C : bois massifs, GL : bois lamellés-collés)³⁸.

Type de résistance/Classes de bois	C 18	C 24	C 30	GL 24 h	GL 28 h	GL 32 h	GL 36 h
Flexion	18	24	30	24	28	32	36
Traction axiale	11	14	18	16,5	19,5	22,5	26
Traction transversale	0,5	0,5	0,6	0,4	0,45	0,5	0,6
Compression axiale	18	21	23	24	26,5	29	31
Compression transversale	2,2	3	2,5	2,7	3	3,3	3,6
Cisaillement	2	3	3	2,7	3,2	3,8	4,3
Module cisaillement	560	690	750	720	780	850	910

Le bois est donc très performant en traction et en compression axiale. Soumis à une forte compression transversale, il flambe et se rompt. Sous flexion, il se rompt par écrasement du côté comprimé et par arrachement du côté tendu.

³⁸ Particularités du matériau bois, possibilités de mixité, R. Le Roy, AFGC, IFSTTAR

III-2-3 Résistance au feu

Les polymères du bois ont tendance à se dégrader sous une trop forte température. Néanmoins, les éléments de bois de forte section résistent naturellement au feu. Les parties brûlées protègent en effet les couches inférieures par création d'une couche de carbone.

Pour améliorer la résistance au feu du bois, plusieurs techniques existent : une protection par enduit plâtre qui varie selon l'épaisseur de l'enduit, par ignifugation profonde effectuée en autoclaves³⁹, par vide et pression. Ce dernier procédé est efficace mais plus onéreux que les autres. Cette technique peut aussi être utilisée pour injecter des résines synthétiques telles que la bakélite ou de la mélanine pour améliorer la résistance au feu. On peut encore protéger le bois par une fine pellicule métallique qui reflète la chaleur ou compresser le bois, c'est-à-dire augmenter sa densité.

III-3 Les modes constructifs traditionnels en bois

Historiquement, le bois est utilisé pour des architectures à petite échelle, soit pour la construction d'habitations en milieu rural ou vernaculaires. Notamment aux Etats-Unis, l'ossature bois s'est développée dans l'architecture rurale jusqu'à devenir la première technique de construction utilisée pour l'habitation individuelle (75%). Depuis l'Antiquité jusqu'au XIXème siècle, les maisons à pans de bois mobilisent une technique de construction à base de bois et de torchis, les temples grecs étaient eux aussi originellement construits en bois.

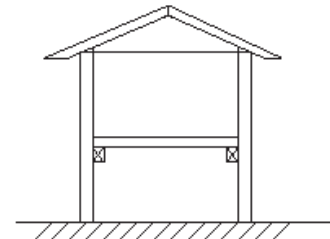
En Europe centrale, en Russie, Finlande et Norvège, on retrouve des constructions rurales mais aussi des bâtiments religieux pour lesquels le bois est amené à travailler au maximum de son efficacité.

On compte trois types de construction en bois pour l'habitat : le système « **balloon frame** », la construction à **plate-forme** et l'ossature **poteaux-poutres**.

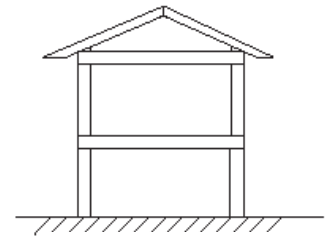
La technique de « balloon frame » est aussi appelée ossature continue. En effet, cette technique inventée par un américain au XIXème siècle, consiste à utiliser des montants de maison continus, correspond directement au nombre de niveaux de la maison, de la lisse basse du plancher jusqu'au bord du toit. Cette technique est assez risquée en cas de mauvais alignement des cloisons qui reposent sur les solives et les éléments de murs. Les deux techniques ci-dessous étaient donc plus souvent utilisées.

L'avantage de la construction à plate-forme est que le plancher et les murs sont assemblés indépendamment. En effet, avec ce système, les poteaux ont la hauteur d'un étage. Les murs peuvent donc être facilement préfabriqués puis assemblés sur le chantier, étage par étage. Avec cette technique, c'est le plancher qui fait office de contreventement des murs extérieurs en raidissant l'ensemble de l'ossature par effet de diaphragme.

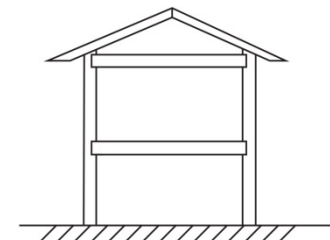
Enfin, l'ossature poteaux-poutres repose sur le principe que les éléments de façade montés entre les poteaux assurent le contreventement dans le plan vertical de l'ouvrage.



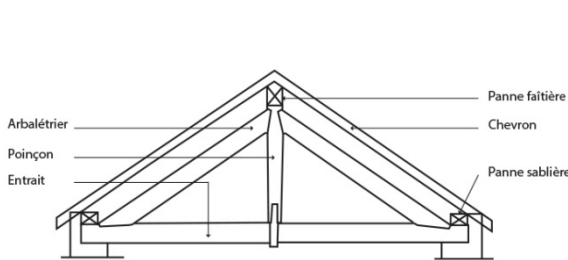
Système ballon frame



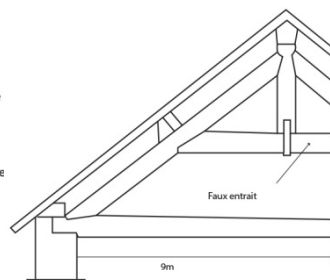
Système plate-forme



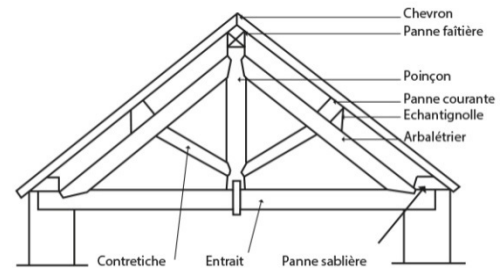
Système poteau-poutre



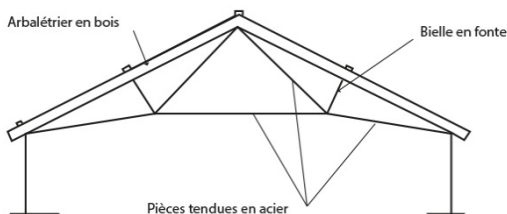
Ferme simple



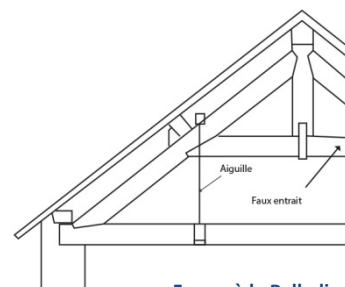
Ferme à faux-entrait



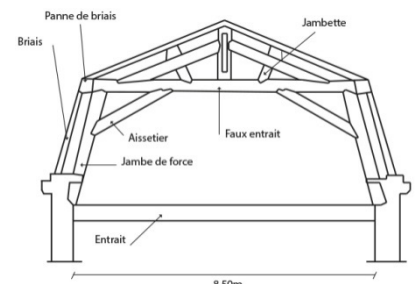
Ferme à contrefiches



Ferme à la Polonceau à une bielle

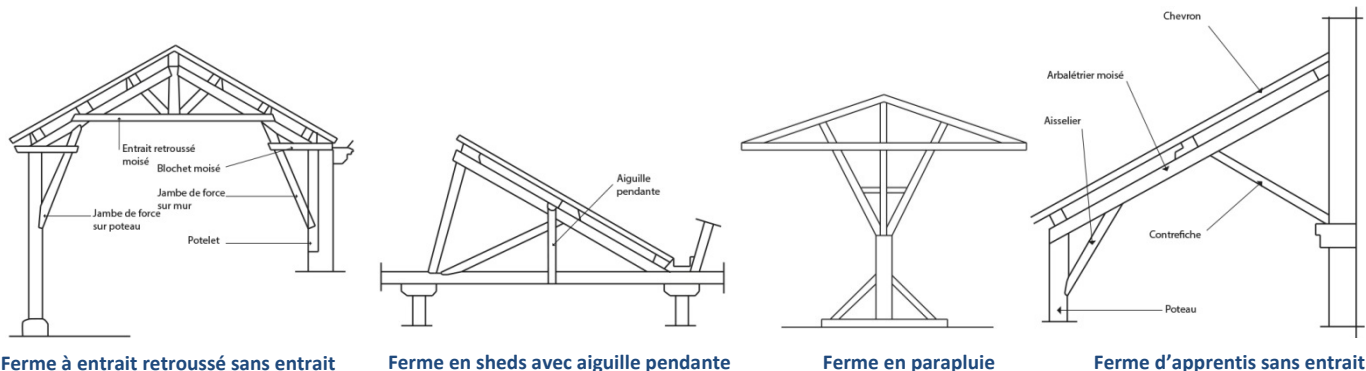


Ferme à la Palladio



Ferme à la Mansart

³⁹ Récipient qui permet une cuisson à la vapeur et stérilisante



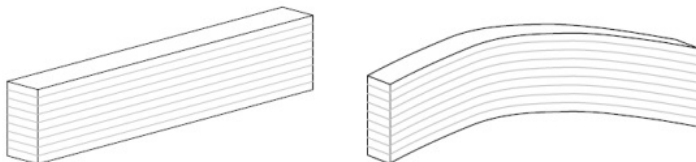
III-4 Les perspectives en construction

III-4-1 Le CLT

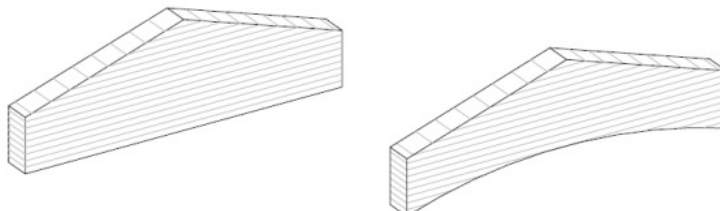
Le principe des panneaux en bois massif a été mis au point dans les années 90 par des industriels allemands et autrichiens. Il combine les techniques de lamellé-collé et de contre-plaqué à grande échelle. Il s'agit de constituer de grands panneaux à partir d'une succession de « couches » de bois massifs appelés **plis** ou **avivés** avec des fibres parallèles. On parle ainsi de panneaux lamellés-collés⁴⁰. Lorsque les plans de collages sont perpendiculaires à la plus grande des dimensions de la section transversale, on parle de lamellé-collé horizontal.

Lorsque les plans de collages sont perpendiculaires à la plus petite des dimensions de la même section, on parle de lamellé-collé vertical. Les poutres en lamellé-collé peuvent être à inertie constante, ou à inertie variable, selon les schémas ci-dessous

Poutres à inertie constante :



Poutres à inertie variable :



Le sapin, l'épicéa, le Pin Sylvestre, le Douglas et le Mélèze sont les essences les plus couramment utilisées pour fabriquer des panneaux de lamellé-collé aux dimensions suivantes : largeur de 60 à 210 mm, hauteur de 100 jusqu'à 2000 mm, longueur jusqu'à 40m. Les propriétés caractéristiques des bois lamellés collés définies par NF EN 1194 :

Symbole	Désignation	Unité	Lamellés collés homogènes				Lamellés collés panachés			
			GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
$f_{m,g,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	24	28	32	36	24	28	32	36
$f_{t,0,g,k}$	Contrainte de traction axiale	N/mm ²	16.5	19.5	22.5	26.0	14.0	16.5	19.5	22.5
$f_{t,90,g,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire	N/mm ²	0.40	0.45	0.50	0.60	0.35	0.40	0.45	0.50
$f_{c,0,g,k}$	Contrainte de compression axiale	N/mm ²	24	26.5	29	31	21	24	26.5	29
$f_{c,90,g,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire	N/mm ²	2.7	3.0	3.3	3.6	2.4	2.7	3.0	3.3
$f_{v,g,k}$	Contrainte de Cisaillement	N/mm ²	2.7	3.2	3.8	4.3	2.2	2.7	3.2	3.8
$E_{0,g,mean}$	Module moyen axiale	kN/mm ²	11.6	12.6	13.7	14.7	11.6	12.6	13.7	14.7
$E_{0,g,05}$	Module axiale au 5 ^{ème} pourcentile	kN/mm ²	9.4	10.2	11.1	11.9	9.4	10.2	11.1	11.9
$E_{90,g,mean}$	Module moyen transversal	kN/mm ²	0.39	0.42	0.46	0.49	0.32	0.39	0.42	0.46
$G_{g,mean}$	Module de cisaillement	kN/mm ²	0.75	0.78	0.85	0.91	0.59	0.72	0.78	0.85
$\rho_{g,k}$	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	380	410	430	450	350	380	410	430

⁴⁰ Fiche CTBA (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement) sur le bois lamellés collés (BLC)

Une autre technique consiste à « croiser » les plis à 90°. Les plis font généralement de 3,5 à 4,5 cm d'épaisseur, 4,80m de longueur par 14,50m de largeur ou 3m de longueur par 16m de largeur. Il peut y avoir 3, 5, 7 ou 9 plis. Ce système est particulièrement d'actualité car il accroît fortement la résistance du panneau dans toutes les directions⁴¹ et en répartissant la charge sur l'ensemble de la surface des panneaux, plutôt qu'à des éléments ponctuels dans les systèmes traditionnels⁴². N'utilisant que des essences résineuses telles que le sapin, l'épicéa, le pin ou encore le mélèze, l'association du collage ou du clouage et du croisement des plis confère ainsi aux panneaux une rigidité et une résistance mécanique accrues. Cette technique prometteuse est appelée **Cross Laminated Timber (CLT)**, **bois lamellé-croisé**, **panneaux massifs**... Ainsi, les concepteurs envisagent que leur résistance à la compression permettent de reprendre des descentes de charges sur 15 à 20 étages. (5kN/m³ pour une densité de à 470kg/m³).

Du point de vue de la sécurité incendie, les panneaux sont stables au feu jusqu'à 30 minutes en version 3 plis et 90 minutes en version 5 plis du fait d'une bonne résistance à la compression.

Les avantages de ce système sont donc que les murs sont continus, isolés le plus souvent par l'extérieur ce qui implique l'obtention d'une enveloppe étanche à l'air et exempte de pont thermique, une grande rigidité et résistance mécanique, un dimensionnement généreux, les efforts sont uniformément répartis ce qui implique un bon comportement en zone sismique, un montage des éléments simple et rapide (jusqu'à 1 étage/jour selon les moyens mis en œuvre) et enfin un très bon rapport performance/prix pour les bâtiments supérieurs ou égaux à R+3⁴³.



La société autrichienne **KLH** est actuellement le premier producteur de panneaux CLT, suivie par Binderholz et MetsäWood (anciennement Finnforest), leur production étant distribuée dans toute l'Europe et au-delà. En France, où cette technique est plus récente et encore marginale (elle représente moins de 5% de la construction bois), quelques entreprises se sont lancées depuis une petite quinzaine d'années sur le marché dont Woodeum et Nordic Bois d'Ingénierie. Ces panneaux sont préfabriqués. Ils nécessitent donc l'utilisation d'outils informatiques performants, une conception et des relevés de côtes très précis. Les relations et les façons de travailler entre Maîtres d'œuvres et entreprises sont donc probablement amenées à évoluer. Ce système présente encore un autre avantage : l'isolation est intégrée à la structure en permettant ainsi un gain de place non négligeable. Il est aussi intéressant de noter que la conductivité thermique de cette technique est inférieure à celle du bois massif. Elle permet donc une meilleure résistance au feu et à la chaleur. Selon Woodeum, le distributeur français de CLT Stora Enso, ces panneaux seraient 20 fois plus isolants que le béton armé. « Le CLT transmet la chaleur 20 fois moins vite que le béton armé. Il ne s'enflamme qu'au-delà de 400°C. Durant sa combustion très lente, au rythme de 0,7 mm/min, le bois s'autoprotège. En effet, l'épaisseur carbonisée constitue une barrière à la propagation du feu »⁴⁴. Cette technique permet aussi de travailler la morphologie des parois. Les panneaux CLT peuvent être courbes. En effet, les panneaux sont porteurs sur leur intégralité, ils assurent aussi le contreventement du bâtiment, ils sont utilisés en façade mais aussi en planchers. Ils peuvent également être percés en intégrant les menuiseries durant l'étape de préfabrication. Sur des bâtiments de grande hauteur néanmoins, des blocs de circulation verticale en béton sont couramment ajoutés. Ils permettent de grandes portées allant jusqu'à 16 mètres de long et 3 mètres de large.



Simulation immeuble CLT Michael Green dans Tall Wood

Pour ces panneaux, on utilise des colles PF ou PRF (phénolformaldehyde⁴⁵ ou phénol-resorcinol aussi utilisées pour la fabrication des bois agglomérés et de matériaux composites renforcés comme la fibre de verre).

⁴¹ Cf III-2-1

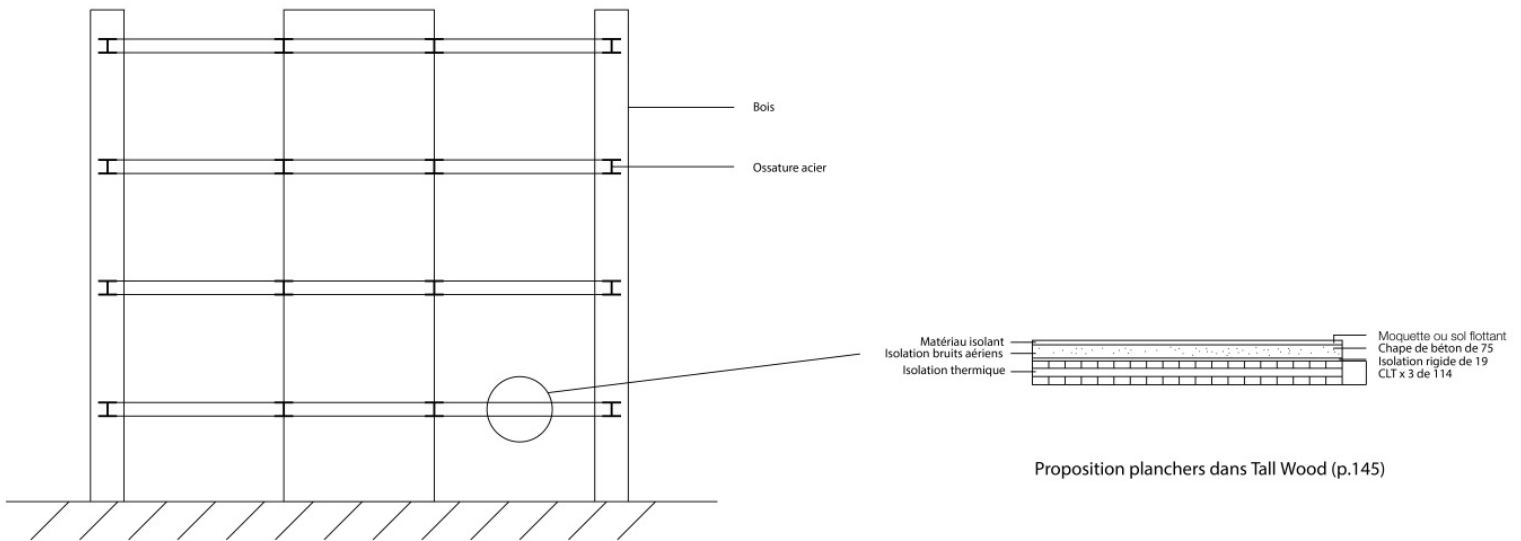
⁴² Cf III-3-1

⁴³ Informations techniques caractéristiques, techniques des panneaux CLT Stora Enso Building Solutions

⁴⁴ Cahiers Techniques n°331, CLT : des panneaux structuraux adaptés à toute construction

⁴⁵ PF : famille des polymères thermodurcissable = ne fondent pas donc ne sont pas recyclables

Aux Etats-Unis, l'architecte canadien Michael Green a animé en février 2013 une conférence Ted intitulée *Pourquoi construire des gratte-ciel en bois ?* D'après l'architecte, nous connaissons aujourd'hui les techniques - CLT avec ossature en acier et planchers mixtes bois-béton qui nous permettent de construire des immeubles en bois de trente étages et plus⁴⁶.



Cependant, d'après les représentants de la filière bois, des freins persistent, et notamment en France, pour construire suivant cette technique. Effectivement, il n'existe pas de DTU sur le CLT (il existe un Avis Technique pour l'entreprise finno-suédoise Stora Enso). La réglementation est contraignante pour le matériau bois d'une part, la société conserve des craintes erronées notamment par rapport à la résistance au feu, enfin le marché de la construction est monopolisé par les filières béton et acier dans lesquelles de nombreuses entreprises ont investi et doivent aujourd'hui être rentables. Le prix d'achat de ces panneaux est aussi de 5 à 10% plus élevé que celui des matériaux traditionnels. Les mesures prises par le gouvernement Montebourg (Comité stratégique de la filière bois –CSF bois) et les Grenelles de l'Environnement, le nombre de constructions en bois devrait se multiplier rapidement.

Quelle est donc la fiabilité de ces techniques que l'on utilise pour la construction d'immeubles à 4, 5, 6, 14 niveaux en à Bergen en Norvège⁴⁷, dans les Vosges en France⁴⁸, à Londres ? Quel est l'avenir des techniques supputées pour les constructions de 30 niveaux et plus ? Comment améliorer ces techniques ?



Immeuble Treet, Bergen, en construction



Le Toit vosgien
Bois et paille
R+7
Saint-Dié-des-Vosges



« Stadhaus », 29 logements sociaux
R+7
Londres
2012

⁴⁶ Tall Wood, Michael Green, Conférence http://www.ted.com/talks/michael_green_why_we_should_build_wooden_skyscrapers

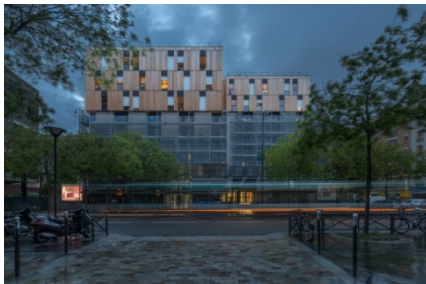
⁴⁷ <http://www.cmpbois.com/articles/projet-treet-bergen-immeuble-bois-14-etages.html>

⁴⁸ Les cahiers techniques du bâtiment, n°331, mars 2014 par Virginie Pavie, *Construction Bois : Techniques innovantes de mise en œuvre pour un matériau renouvelable*

Certains fabricants cherchent donc à optimiser l'utilisation de matière. D'autres recherches s'attachent à acquérir de meilleures propriétés acoustiques. Dotés d'une technique n'étant pas considérée comme traditionnelle, les produits, pour être utilisables sur le sol français, doivent bénéficier d'un Avis technique ou d'un Document technique d'application.

Dans un contexte de volonté de densification des villes, les programmes de surélévations sont en train de faire appel à la filière bois pour ses qualités de légèreté et de possibilité de préfabrication notamment. C'est le cas de ce projet de surélévation conçu par l'architecte Marie Schweitzer. La structure est ossature bois avec dalles de bois massif, panneaux de contreventement en OSB, bardage en mélèze. Il s'agit également de trouver le moyen d'utiliser d'avantage d'essences pour répondre aux exigences du développement durable. L'absorption acoustique est également à améliorer. C'est l'un des objectifs de recherches fédérées par la FCBA.

D'autres projets sont encore plus ambitieux, tel que ce projet de gratte-ciel de 34 niveaux en Finlande en ossature bois et renforcement béton et acier⁴⁹. Ou encore le siège de l'INPI à Courbevoie qui met en avant une écriture contemporaine en bois au niveau de la façade une technique type colombage⁵⁰.



Surélévation de 2 et 3 niveaux ossature bois
Atelier Schweitzer
Paris 13, 2014



Projet de gratte-ciel HSB
Agence C.F. Moller
Stockholm, 2023



Siège de l'INPI
DY Architectes
Courbevoie, 2014

Données pour une poutre sur deux appuis de 4,50m :

Adhésif : colles sans formaldéhyde

Conductivité thermique : $\lambda = 0,11 \text{ W/(mK)}$

Inertie thermique : $C_p = 1\,600 \text{ J/(kgK)}$

ELS

Contraintes de flexion : $z_{ul} w_{fin} = 250$

Contraintes de cisaillement : $z_{ul} w_{s,inst} = 300$

Poids propre : $g_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$

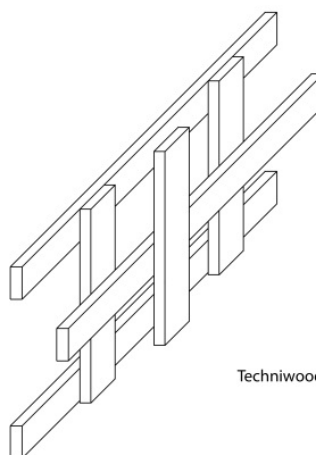
Charge utile supposée : $2,00 \text{ kN/m}^2$ pour l'espace habitable

$+0,8 \text{ kN/m}^2$ pour la cloison de séparation $> n_k = 2,8 \text{ kN/m}^2$

Résistance au feu pendant 30minutes

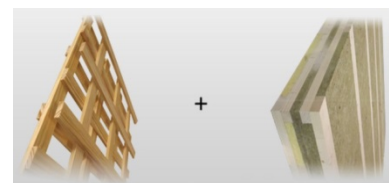
III-4-2 Les Panobloc

A mi-chemin entre un mur à ossature bois et un panneau CLT, la solution hybride développée il y a cinq ans par la société Techniwood, lauréate dans la catégorie Structure du Prix de l'innovation sur l'édition 2013 du salon Bâtimat, a obtenu des Atex pour des panneaux porteurs remplis d'un matériau isolant, pouvant atteindre 8,50m x 2,60m fabriqués en Haute-Savoie. « Le résultat équivaut à un CLT allégé, remarque Daniel Coulon, directeur général de Techniwood. Nous n'utilisons le bois que pour ses performances mécaniques, si bien qu'il n'y a pas de matière en surplus et nous arrivons à des performances équivalentes à celles des murs à ossature bois ou à



Treillis structural en bois croisé et décalé
Remplissage isolant (fibre de bois, laine de verre, laine de roche, polystyrène graphité)

Techniwood - CLT isolé



⁴⁹ <http://www.consoglobe.com/premier-gratte-ciel-en-bois-stockholm-cg>

⁵⁰ <http://architecturion.unblog.fr/2014/06/07/siege-de-linpi-a-courbevoie-lun-des-premiers-batiments-de-bureaux-a-energie-positive-en-france/>

celles des constructions classiques en béton, ou parpaings, avec des épaisseurs 30% plus fines. Ce système permet un important gain de temps de mise en œuvre grâce à cette combinaison.

III-5 Les innovations attendues

III-5-1 Le problème d'approvisionnement

Jean-Louis Ferron, secrétaire général de l'association France Douglas explique le paradoxe français : « Aujourd'hui, la France importe plus de 3 millions de mètres cubes de sciage, alors qu'en théorie la production française pourrait suffire ». Ceci implique l'impossibilité d'imposer dans les appels d'offres la provenance du bois pour obtenir des certifications et des marques de qualité. Mais les choses sont en train d'évoluer fortement. Le « Bois des Alpes » par exemple va bientôt obtenir une certification. Il existe également un guide d'utilisation *Le Douglas, un choix naturel pour la construction*. Pourtant, l'accent sur cette essence est aussi paradoxal car elle n'est pas d'origine européenne (côte est des Etats-Unis) mais elle est très présente sur le territoire – 400 000 hectares contre 200 000 en Allemagne – et qui a des qualités constructives indéniables : « Le Douglas offre deux propriétés importantes pour la construction, sa résistance mécanique et la durabilité naturelle de son cœur, le duramen, qui peut être utilisé aujourd'hui en revêtement extérieur sans traitement », explique Jean-Louis Ferron.

III-5-2 Une insuffisance au niveau de l'isolation acoustique

Nous avons vu avec les Panoblocs que l'on peut intégrer un isolant à la structure. On obtient ainsi une performance en isolation thermique. L'isolation face aux bruits d'impact reste insuffisante. Le Code de la Construction et de l'Habitation ont publié des articles qui imposent un niveau limite maximal de 50 dB entre les appartements pour la transmission des bruits d'impact⁵¹.

Quatre stratégies sont possibles pour composer des éléments d'isolation acoustique dans les types de construction habituels.

-création de masse, suivant la **loi de masse**. Effectivement, plus un matériau est dense, plus il isole. La présence de masse est particulièrement efficace dans l'atténuation des bruits aériens, puisque les ondes de l'air auront plus de difficulté à faire vibrer un élément lourd.

-**déphasier les ondes** : chaque matériau absorbe une tranche sélective d'ondes. La création d'un complexe de couches hétérogènes est donc particulièrement efficace dans le captage de la globalité des phases du son. Il faut donc faire varier l'épaisseur et la densité volumique des matériaux mis en œuvre. C'est le principe **Masse/Ressort/Masse**.

-**étanchéifier** est la stratégie la plus importante afin de tirer parti des efforts acoustiques de chaque paroi, sans oublier de ventiler les parois.

-**désolidariser** afin d'éviter que le bruit ne se propage d'élément en élément, à l'aide de joints de dilatation, de bandes résilientes ou encore par des suspentes antivibratoires.

Les planchers mixtes par exemple tentent de répondre à ce problème acoustique. C'est la raison pour laquelle Michael Green compile CLT et béton pour ses planchers. La difficulté concerne ici la capacité d'adhérence du béton avec le bois.

D'autres méthodes utilisent des matériaux d'isolation acoustique avec un écobilan plus ou moins favorable.

L'IBGE (L'Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement) rappelle que « Plus que la performance des matériaux, c'est la qualité de mise en œuvre de ceux-ci qui détermine la qualité des performances acoustiques ».

Voici un rappel sur les types de bruits et les différentes solutions acoustiques.

Il existe trois types de bruits :

-Le **bruit aérien** est un son qui se propage dans l'air comme le cri d'un enfant, une alarme, la circulation automobile et le passage des avions. L'atténuation efficace des bruits aériens passe par une composition de type Masse/Ressort/Masse » et une bonne étanchéité à l'air.

-Le **bruit d'impact** est un bruit transmis dans la matière même par les poutres, les colonnes, les murs et les planchers. Ce sont des vibrations qui se propagent d'éléments en éléments. On peut s'en protéger par la désolidarisation des éléments/

-Le **bruit technique** est une vibration émise par les appareils ménagers, la ventilation, les conduites d'eau et autres installations mécaniques du bâtiment. Pour y remédier, on peut poser des fourreaux pour canalisation, fixations anti-vibratoires ou encore des bris sonores.

⁵¹ Articles de deux arrêtés du 28 octobre 1994 et 1999 suivants du Code de la Construction et de l'Habitation

III-5-3 Les différents matériaux d'isolation : un écobilan positif pour les isolants en bois

-La **laine de roche** est fabriquée à partir d'un mélange de minéraux (pierre volcanique, basalte, dolomite, scories) chauffé, fondu puis étiré. Une résine vient ensuite lier les fibres. La production de la **laine de verre** suit un procédé analogue, cette fois à partir de sable ou de verre recyclé, de calcaire et de soude calcinée. Ces laines sont nocives pour la santé par émanation, pendant les manipulations, de fines fibres agressives à la peau, aux muqueuses et aux voies respiratoires. De plus, leur efficacité acoustique n'est pas supérieure aux autres laines.

-La **laine de mouton** a un très bon écobilan car elle demande très peu d'énergie pour sa production. La laine repousse l'humidité, résiste aux impuretés et s'enflamme très difficilement. Exemple : marque Doscha

-La **laine de plume** est constituée à 70% de plumes, 10% de laine et 20% de fibres textiles thermofusibles. Les plumes sont traitées à 150°C et débarrassées de toute substance allergène. De plus, la souplesse du matériau est très favorable à l'isolation acoustique. Exemple : marque Bâtiplum

-Les **laines de chanvre** et de lin sont non-irritantes et régulent l'humidité intérieure. Elles sont par ailleurs imputrescibles et répulsives aux insectes et rongeurs. Parmi les isolants à fibre végétales (chanvre, coco, lin, coton), la laine de chanvre est la plus économique. Ex : Isonat Chanvre, Batichanvre, Terrachanvre, Thermolin, Natilin

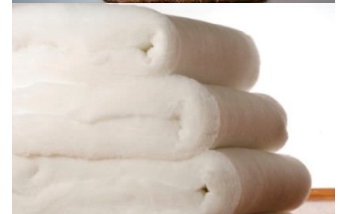
-La **laine de fibres de bois** est obtenue à partir de papier journal recyclé ou directement du bois. Un traitement au sel de bore les protège des attaques d'insectes, des champignons et du feu. La laine de bois est souple et résiliente et sa pose est facile et saine. On préférera les produits dont la fibre est non traitée chimiquement et collée avec sa propre résine. En outre, elle peut réguler l'humidité de l'air intérieur. Exemples : Gutex, Inthermo, Pavatex, Steico, Homatherm, Panterre

-Le **polyester recyclé** est fabriqué à partir de plastiques fondus en fibres puis retissés. Comme il n'y a aucune autre substance, cette matière est considérée comme recyclage à l'infini. Exemple : Deltafiber

-La **cellulose soufflée** est aussi un système satisfaisant obtenu à partir de papier journal recyclé avec le même traitement que pour la laine de bois. Ex : Isofloc, Thermogloc,

-Les **plaques de liège aggloméré** (certaines sont recyclées) constituent une bonne solution d'isolation acoustique. Issu de l'écorce du chêne-liège, c'est un matériau produit naturellement. Il résiste bien à l'humidité et au feu tout en ayant d'excellentes qualités acoustiques vu l'irrégularité de sa surface. Il faut éviter les lièges ajoutés de liants synthétiques non-biodégradables. Exemples : Van Avermaet, Le Petit Liège, T&G source image : escalebio.com

-Il existe enfin des **panneaux poreux en cellulose** également prévus pour l'isolation acoustique.



IV - Les systèmes d'assemblage pour poutres et panneaux massifs en bois

Cette partie ne se veut pas exhaustive mais relève les techniques innovantes et/ou qui ont permis l'avancement de ce sujet de recherche.

IV-1 – Le contre-collage

Nous avons vu l'utilisation abondante du collage à travers l'exemple du CLT⁵². De nombreuses colles existent⁵³. Seulement, l'industrie du lamellé-collé favorise les colles polyuréthanes ou phénoliques qui ont une bonne résistance en traction et au déchirement⁵⁴. Ces colles sont très nocives lorsqu'elles sont inhalées. Nous nous attarderons donc sur les assemblages subsidiaires.

Technique du « goujon collé » par Simonin – dossier d'avis technique

IV-2 - Le vissage

La technique de vissage fait preuve d'une grande résistance mais on rencontre des problèmes récurrents avec les vis :

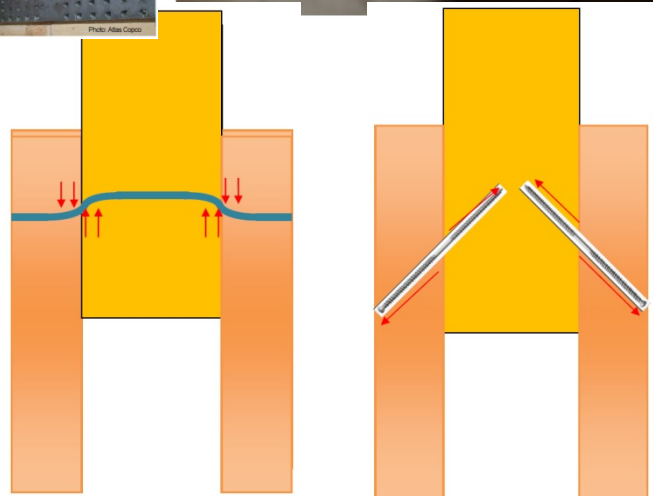
-L'**arrachement** dans le bois

-L'**enfoncement** de la tête de la vis

-La **rupture** de la vis en traction

-Le **flambement** des vis comprimées

-Il faut favoriser un **assemblage multiplan** afin d'éviter le fendage et la rupture des poutres.



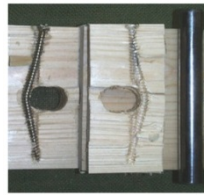
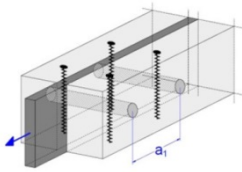
Ci-contre, il s'agit d'une comparaison de sollicitation entre un assemblage moisant (à gauche) et un assemblage optimisé présenté par SFSIntec lors de la conférence au FIBC le 19 juin 2014 où des « vis de grandes longueurs » sont inclinées. Elles travaillent ainsi en traction et le bois est sollicité sur toute la

⁵² Cf III-3-2-1 pour le CLT

⁵³ Cf II-4 pour les colles

⁵⁴ Sandrine Marceau, conférence sur les Polymères synthétiques et biosourcés pour l'architecture à l'ENSAPM

largeur de la poutre plutôt qu'uniquement sur la partie centrale.

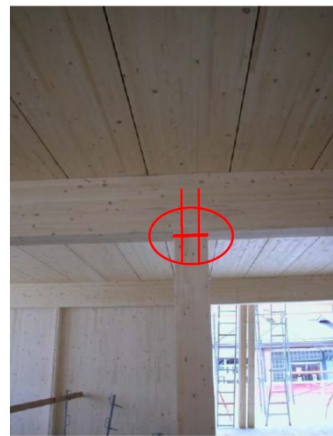


L'Université Technique de Karlsruhe et l'entreprise SFSIntec développent un système **d'assemblage broché par vis** destiné à être essentiellement utilisé pour les charpentes lamellées-collées et les charpentes taillées afin d'augmenter la résistance et de favoriser la capacité ductile des éléments. On utilise les vis de frettage (décrites ci-dessus) des assemblages brochés pour en augmenter la résistance et la rigidité. Dans les assemblages

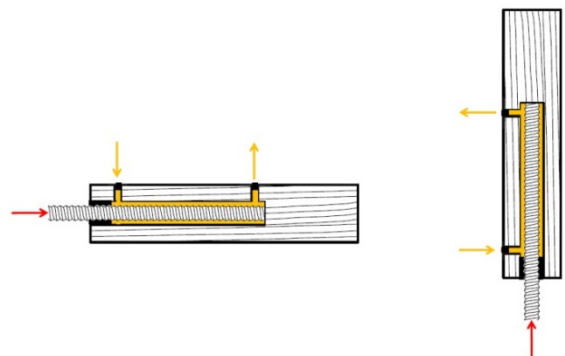
brochés, des sollicitations transversales au fil du bois sont créées et peuvent être à l'origine de ruptures fragiles de ces assemblages. Des frettages par vis (perpendiculaires aux broches et au fil du bois) peuvent être utilisés pour diminuer les risques de ruptures fragiles. Les vis autoforeuses à filetage complet doivent être en contact direct avec les. Pour des broches de diamètre 16 mm à 32 mm, le gain en résistance apporté a été constaté entre 15% et 30%. Au-delà du gain en résistance, ce frettage favorise la ruine ductile pour des assemblages souvent sujets à des ruptures fragiles, ce qui est intéressant notamment en zone sismique. Le frettage ne semble pas écarter la rupture en cisaillement de bloc.

IV-3 Les tiges filetées métalliques collées

L'entreprise EMPA Materials Science & Technology, laboratoire d'ingénierie des structures, a présenté ces tiges filetées métalliques qui sont collées pour renforcer la résistance au cisaillement, renforcer la résistance et la rigidité du bois sous de lourdes charges et connecter des éléments de manière rigide (bois-acier). Elle assure que le collage améliore la résistance au feu...



Cette technique d'assemblage semble complexe à mettre en œuvre, notamment pour faire pénétrer la colle mais aussi pour l'orientation des vis dans le bois⁵⁵.



IV-4 Connecteurs métalliques

Il existe des connecteurs métalliques invisibles destinés à la construction poteau-poutre, fabriqués par l'entreprise japonaise Suteki Europe et l'entreprise belge Powerbuild.



⁵⁵ Conférence au FIBC le 19 juin 2014

Il existe aussi des plaques de cisaillement, des anneaux, des crampons, des plaques à clouer, les sabots, étiers, etc. **Les connecteurs en tôles métalliques** constituent à la fois un élément de renfort lorsque l'on souhaite faire passer une poutre et un élément de contreventement. Ces éléments sont commercialisés en France par ITW-Cullen et Simpson StrongTie.

IV-5 Le clouage

L'entreprise **Scierie Moulin** a déposé un avis technique pour le produit « Massif Bois » -des murs en bois résineux massif cloués. Les murs sont issus de planches de 24 mm qui sont calibrées, rainurées et séchées à 12% puis sont croisées à 90° et fixées mécaniquement entre elles à l'aide de pointes en aluminium de 2,65 mm de diamètre et de 50 mm de longueur. L'épaisseur totale des panneaux varie de 120mm à 370mm, selon le nombre de plis. La hauteur varie de 2m à 3,75m, la longueur de 1,20m à 6m⁵⁶. Leur stabilité au feu est estimée à 30minutes dans sa version 5 à 7 plis et 90 min dans sa version 9 à 15 plis.

Les clous n'ont aucune résistance à la traction, il est donc important de jouer sur l'orientation des clous.

Des tests en cisaillement ont été menés avec les pointes annelées en aluminium $\varnothing 2,65 \times 50\text{mm}$:
 Raideur à l'Etat Limite Ultime : $K_u=204 \text{ N/mm}$
 Raideur à l'Etat Limite de Service : $K_{ser}=307 \text{ N/mm}$
 Valeur caractéristique de résistance au cisaillement : $F_v, R_k=470 \text{ N}$

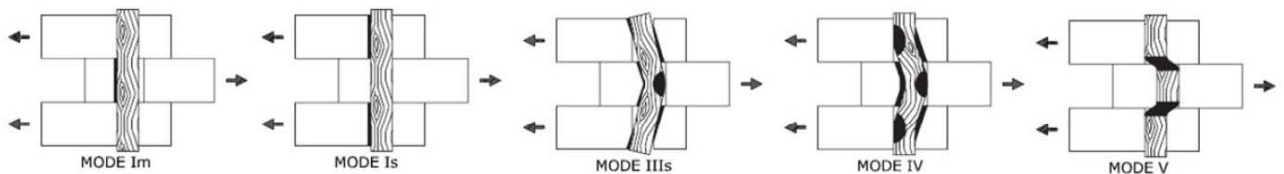
Les planches de bois massif **MHM** sont elles aussi rainurées et constituées de plis croisés à 90° et fixés mécaniquement entre eux par des pointes en aluminium de $\varnothing 2.5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ selon un système automatisé par l'entreprise Hundegger SA.R.L.. Cette technique d'assemblage permet d'obtenir des parois de 6 m de longueur et allant jusqu'à 3.25 m de hauteur.

Les résistances d'une pointe annelée en aluminium sont estimées à :

- Raideur à l'ELU: $K_u = 200\text{N/mm}$
- Raideur à l'ELS: $K_{ser} = 300 \text{ N/mm}$
- La valeur caractéristique de résistance au cisaillement $F_v, R_k = 400 \text{ N}$

IV-6 Le chevillage

Les systèmes de chevillage traditionnels (pré-perçage à un diamètre correspond à celui des chevilles sans les cannelures) ont été adaptés pour la fabrication des panneaux massifs. L'Université américaine de Wyoming a mené une étude pour déterminer des modèles de calculs afin de prendre en compte la résistance des chevilles en bois dans le dimensionnement des structures. Malgré l'usage traditionnel des chevilles bois. Les chercheurs ont également mis en un nouveau mode de rupture non présent dans les modèles de calculs préexistants, car ils étaient basés sur le comportement des tiges métalliques. C'est ce qu'illustrent les schémas ci-dessous, le dernier représentant ce dernier mode de rupture.



Modes de rupture possibles pour les chevilles bois (Mode V spécifique à celles-ci)

« Malgré l'usage traditionnel des chevilles en bois, leur prise en compte dans les calculs de structure est limitée par le manque de modèles de calcul. Des récents développements aux Etats-Unis sont en train d'aboutir à des modèles et procédures d'évaluation pour une utilisation avec les codes de calculs locaux. Les travaux de recherche ont en particulier mis en évidence un nouveau mode de rupture non présent dans les modèles de calculs préexistants, car ils étaient basés sur le comportement des tiges métalliques. (University of Wyoming, ICC-ES). La proposition de modèle de calcul lancé par cette université est en attente de l'accord de l'American Wood Council. »

⁵⁶ Avis technique : AT 3/12-725 pour les produits de la Scierie Moulin

IV-7 Le BMT : le Bois Massif Tourillonné⁵⁷

L'entreprise autrichienne **Kaufmann Holzbau** propose depuis une quinzaine d'années des maisons en bois massif « clef en main », reposant sur un type d'assemblage particulièrement intéressant. Il tire parti de l'évolution de l'hygrométrie des éléments de bois en contact. En effet, les chevilles sont insérées avec un taux d'humidité très bas. Elles vont ensuite gonfler en récupérant une hygrométrie normale. Les lames de bois seront ainsi connectées. L'entreprise française *Bois&Futur* développe ce système depuis quelques années et souhaite ouvrir sa propre usine de production en France. Le fondateur de *Bois&Futur* explique que « Le BMR-T permet d'atteindre d'excellentes performances acoustiques et thermiques à l'intérieur des logements tout en assurant la régulation naturelle de l'hygrométrie. Grâce aux tourillons et à la pose, qui se fait sur chant pour éviter le tassement des murs, il offre également des qualités statiques inédites et permet d'obtenir des bâtiments de grande portée ». *Bois&Futur* construit un seul module de 60 cm de large constitué de 10 lames en épicéa dont la hauteur varie entre 2,50 et 16 mètres. Afin de faire connaître largement le système en France, une maison témoin a été construite à Montperreux dans le département du Doubs, ville la plus froide de France, conçue par les architectes Hermann Kaufmann et Joachim Eble. La maison a permis à Hermann Kaufmann de recevoir le premier « Global Award », le prix créé par la Cité de l'Architecture et du Patrimoine, pour récompenser les projets remarquables s'inscrivant dans l'architecture durable. Le montage des éléments se fait étage par étage. L'isolation des murs se fait par l'extérieur grâce à des panneaux rigides de fibre de bois compressée ou de polystyrène graphité.



La « maison canopée », réalisée par l'agence Coste architectures, a été réalisée selon ce principe⁵⁸.



IV-8 Le BMT-D : le Bois Massif Tourillonné en Diagonal

L'entreprise *Woodeum* développe un système similaire au BMT, appelé BMT-D (Bois massif Tourillonné en Diagonal). Jean-Philippe Ferreira, président de *Woodeum* explique que « les voiles bois sont habillés d'un manteau isolant homogène et continu en PSE graphité (panneaux de Polystyrène Expandé isolants) haute performance qui supprime tout pont thermique et permet d'optimiser l'épaisseur des parois ». Ce système permet, comme les autres systèmes à panneaux massifs, de préfabriquer tous les éléments de structure : murs, planchers, rampants, cages d'ascenseur, escaliers, etc. Les panneaux massifs de cette entreprise vont jusqu'à 3 x 13 mètres. Les modules sont percés sur toute la longueur. Des tourillons en hêtres y sont ensuite « enchâssés de force » afin de bloquer les mouvements latéraux et longitudinaux. Les cloisons non porteuses sont, quant à elles, réalisées en ossature bois et métallique pour intégrer les réseaux verticaux. Un immeuble BBC R+2 en bois tourillonné a également été livré en 2012 après huit mois seulement de construction à Conflans-Sainte-Honorine dans les Yvelines conçu par l'architecte Samuel Remy de l'*Atelier Juste avant l'aube* et *Woodeum* pour le lot bois.⁵⁹

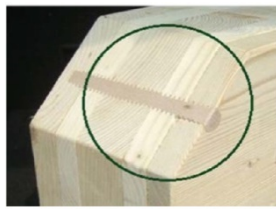
⁵⁷ <http://www.chantier.net/CQFD3/20/09.htm>

⁵⁸ <http://www.coste.fr/projet.html?projet=ec187>

⁵⁹ <http://www.woodeum.com/medias/presentation-video-woodeum/>

IV-9 Les vis en hêtre pour panneaux CLT

L'Université Technique de Karlsruhe et l'industriel Rombach NUR-Holz ont mené des recherches sur le principe d'utilisation de vis en hêtre pour l'assemblage de panneaux massifs en bois



Utilisation de vis en hêtre dans le panneau NUR-HOLZ



Les résultats actuels des recherches pour un assemblage en cisaillement avec vis en hêtre de diamètre 22m :

$K_{ser} = 3\ 600\ \text{N/mm}$

$K_u = 2\ 400\ \text{N/mm}$

$R_k = 5\ 800\ \text{N}$

IV-10 Le bois chauffé et comprimé

Cette technique consiste à chauffer des goujons en bois et à les comprimer à environ 40% de leur volume initial. En reprenant leur volume une fois insérés dans les pièces à assembler, ils se connectent naturellement à ces dernières en appliquant des efforts de contact et de frottement entre la surface des deux éléments de bois. La compression augmente la raideur et la résistance du bois. La pression et la température doivent être suffisamment faibles pour ne pas détériorer le bois. Les universités de Bath et de Liverpool au Royaume-Uni et de Kyoto au Japon qui ont mené ces recherches estiment que la température doit être comprise entre 130°C et 180°C pour compresser le bois de 30% à 40% de son volume original. Les recherches ont montré que cette réaction est obtenue qu'avec une très grande précision, elle varie d'une essence à une autre.

Les travaux ont montré une grande sensibilité des résultats en fonction de l'essence de bois utilisée, de la géométrie des éléments, des paramètres de chauffage et de compression et des conditions d'utilisation telles que le taux d'humidité.

Après l'assemblage des pièces, il faut laisser le temps aux goujons de reprendre leur volume, ce qui peut être compliqué pour une fabrication en atelier (plusieurs jours a priori sont nécessaires pour que les goujons reprennent leur volume initial ou s'y rapproche).

Les universités citées précédemment continuent actuellement leurs recherches pour obtenir des paramètres plus précis concernant le matériau bois comprimé lui-même –sa résistance résiduelle, son niveau de compression optimal-, le comportement résistance cisaillement et en traction, l'assemblage avec plusieurs goujons, etc. La durée dans le temps de l'assemblage n'a pas encore été évaluée ni les possibilités d'industrialisation.

La technique présente donc un intérêt en termes de ductilité des assemblages.

IV-11 Le thermo-soudage du bois par friction

Il s'agit du soudage de deux pièces de bois par friction et rotation de tourillons. Il existe trois systèmes : la friction linéaire, la friction rotative et la friction orbitale.

Le principe du soudage du bois par friction linéaire consiste à faire vibrer deux pièces de bois en les écrasant l'une contre l'autre dans une seule direction. Le principe du soudage du bois par friction rotative consiste à animer en rotation, autour d'un axe normal à la surface à souder, une cheville de bois cylindrique ou conique, et à l'insérer avec force dans les pièces à assembler, préalablement percées à un diamètre inférieur à celui de la cheville. Enfin, le principe du soudage par friction orbitale consiste à écraser les deux pièces de bois de manière circulaire. Ces systèmes peuvent être appliqués à des charpentes lamellées-collées, à charpentes en poutres en I et à des ouvrages en lamellé croisé. Les recherches menées par l'École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (ENSTIB), Le Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), Nancy Université et le Centre Régional d'Innovation de Transfert Technologique des industries du Bois (CRIIT Bois) ont montré que ces assemblages peuvent avoir des rigidités et résistances supérieures à ceux des assemblages mécaniques voire des assemblages collés. Comme pour le bois chauffé et comprimé, la maîtrise des paramètres est complexe. Des recherches sur le comportement des assemblages à l'humidité ainsi que la viabilité économique sont en cours. Ces dernières méthodes mettent en lumière des assemblages entièrement recyclables du fait de leur caractère réversible.

Il semble donc intéressant d'étudier plus précisément la thermo-soudure et d'expérimenter sa mise en œuvre pour comprendre son mode de fonctionnement ainsi que le degré de complexité de sa mise en œuvre. L'objectif des tests et de mettre en avant les possibilités d'appropriation de ces techniques pour une architecture contemporaine facile à mettre en œuvre, voire appropriable pour un particulier.

V - La thermo-soudure ou soudure du bois par friction

V-1- Historique

Le terme « soudage du bois » est apparu en 1993 en Russie à travers un brevet d'invention. « Le procédé consiste à bombarder préalablement des particules de métal sur la surface des éléments bois à souder. Après cette phase de préparation, les deux éléments de bois-métal sont soudés selon les procédés classiques utilisés pour les aciers. Le problème majeur réside dans le procédé de bombardement des particules de métal qui altère voire détruit la structure du bois et qui le rend assez peu résistant aux diverses sollicitations »⁶⁰.

D'autres chercheurs se sont inspirés des techniques de soudage des plastiques par effet de vibration. Les molécules plastiques sont soudées lorsqu'elles atteignent certaines fréquences d'ondes, on parle de friction. Les chercheurs ont ainsi intercalé un élément plastique avec deux éléments de bois afin de souder ces derniers par échauffement. On parle de *Wood Welding Technology* : « Suite à une erreur de manipulation (le film thermoplastique avait été oublié), le constat de l'adhésion entre les deux pièces de bois avait suscité bien des interrogations ».

Le CRITT Bois possède aujourd'hui les connaissances et le matériel nécessaires pour lancer l'industrialisation des soudures linéaires et rotatives. Il mélange les essences de bois et l'orientation des fils du bois. Il décrit le phénomène de la manière suivante : « Le soudage entre deux pièces de bois est dû à :

-La diffusion de matière fondue (lignine + hémicelluloses) dans les vides cellulaires puis à sa solidification.

-Une déstructuration partielle du bois conduisant à la formation d'un réseau de fibres et de longues cellules enchevêtrées dans une matrice de matière fondue puis à sa solidification.

-Des réactions d'auto-condensation et de réticulation⁶¹ ».

Une vidéo disponible sur <http://www.crittbois.com/poles-du-critt-bois/pole-rd-et-transferts/soudage-du-bois/> montre une machine qui réalise une friction linéaire.

V-2- Mécanismes physiques

Le principe du soudage du bois par friction est basé sur la fusion et l'écoulement des constituants des parois des fibres du bois, principalement la lignine mais également les hémicelluloses. Pendant la friction entre les deux pièces de bois entre-elles, la fusion de ces polymères amorphes résulte des températures élevées (plus de 180°C) atteintes en quelques secondes à l'interface. Cela conduit à la formation d'un enchevêtrement de fibres qui sont localement fortement comprimées et dont la fusion des parois produit, après solidification sous charge, une adhésion des pièces entre-elles.

« Les paramètres optimaux sont une friction linéaire d'amplitude de 3 mm pendant 3 secondes, avec un effort de compression de 2 MPa (1 MPa = 1 tonne/cm²), puis un maintien d'une pression de 2,7 MPa pendant 5 secondes après l'arrêt de la friction. Ces assemblages sont obtenus soit en insérant des tourillons cylindriques dans des trous d'un diamètre inférieur au diamètre du tourillon, soit en insérant des tourillons dont l'extrémité a été préalablement rendue conique, mais cette fois sans perçage préalable du support. Pour cela une perceuse tournant à 1200-1600 tours par minute est utilisée. Après obtention de la fusion du bois, la rotation est arrêtée et le montage est maintenu sous pression axiale jusqu'à la solidification du joint »⁶².

V-2-1 Une question de température

Un bois vert contient plus de la moitié de sa masse en eau. Autour de 100°C, l'humidité contenue dans le bois est éliminée et le bois sèche. De manière naturelle, il faut environ deux ans au bois pour qu'il soit sec à 80 %.

Vers 180°C, on atteint la bonne température pour que les polymères se fusionnent sous friction. Cette température correspond à l'intervalle de température durant lequel le bois se déshydrate. La condensation se produit d'abord avec les hémicelluloses puis avec la lignine. Au-delà de cette température, la cellulose commence à se dépolymériser. La résistance du matériau commence alors à diminuer car une couche de charbon se place alors à l'interface des deux éléments de bois et empêche ainsi l'enchevêtrement des fibres. Ce moment est atteint à partir de 6 secondes de soudage d'après les recherches d'Antonio Pizzi, directeur de recherche de Ludovic Resch.

Au-delà de cette température, se produisent des produits gazeux, des goudrons et du carbone. L'ensemble des gaz -soit entre 80 et 90% de la masse initiale, selon les essences, s'oxydent en donnant du dioxyde de carbone et de l'eau ainsi que de la chaleur que l'on récupère pour se chauffer et dont une partie va chauffer le bois non encore atteint par la combustion. La surface extérieure, le résidu charbonneux atteint jusqu'à 800°C et produit encore beaucoup de chaleur.

⁶⁰ Extrait de la thèse de Ludovic Resch, ingénieur doctorant à l'ENSTIB, *Développement d'éléments de construction en bois de pays lamellés assemblés par tourillons thermo-soudés*

⁶¹ La réticulation correspond à la formation d'un ou de plusieurs réseaux tridimensionnels, par voie chimique ou physique.

⁶² Données du CRITT

V-2-2 Les trois types de thermo-soudure

V-2-2-1 La friction orbitale

L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne a soutenu en 2005 une thèse de doctorant sur le soudage par friction orbitale avec du bois de hêtre et d'épicéa. La durée de soudage est supérieure à 10 secondes. La fréquence de vibrations était de 80 Hz à 150 Hz.

V-2-2-2 La friction linéaire

La friction linéaire peut voir apparaître deux limites principales : une limitation dans le dimensionnement car les machines de production doivent suivre les dimensions des panneaux massifs (parfois, les panneaux mesurent la longueur totale des bâtiments) et la résistance du joint soudé après une humidification de quelques heures. Cette technique semble cependant industrialisable dans le design, pour la production de lames de fond de tonneaux, c'est-à-dire à l'échelle de l'objet.

Des chercheurs, Ganne et Chedeville, ont mis en place un soudage linéaire à une fréquence de 100 Hz pendant 1,5 à 4 secondes, avec un effort de compression d'environ 2 MPa, puis le maintien d'une pression de 2,7 MPa pendant cinq secondes après l'arrêt de la friction sur des échantillons de 600 mm de long pour une section transversale de 80*20 mm. Les essais mécaniques réalisés sur les échantillons soudés ont fait apparaître une résistance moyenne en traction qui varie entre 10 et 15 MPa. La température atteinte dans le joint pendant la friction est de plus de 170° Celsius. Cette température est bien plus élevée que la température de transition vitreuse de la lignine et des hémicelluloses, température au-delà de laquelle ces constituants changent d'état et de comportement.

V-2-2-3 La friction rotative

Les tourillons peuvent être cylindriques ou coniques. L'utilisation de chevilles cylindriques insérées dans un pré-perçage également cylindrique a plusieurs inconvénients. En effet, lors du soudage, le temps nécessaire pour souder la longueur entière du tourillon est très élevé. La matière se dégrade complètement au niveau du joint de soudage et donc diminue les capacités mécaniques du joint. L'inconvénient est donc la difficulté à obtenir un soudage correct sur la longueur du tourillon. De plus, lors de l'insertion du tourillon, la ligne de soudure qui vient d'être créée est aussitôt fragilisée par la rotation du tourillon. D'après L. Resch, la résistance mécanique du joint de soudage est améliorée « avec des configurations qui vont vers le perçage conique (le temps de soudage est considérablement réduit et il est possible d'appliquer une pression sur le joint de soudure, il est donc de bonne qualité) ».

« La résistance mécanique des assemblages est d'environ 3 800 N/mm² immédiatement après la soudure et peut atteindre un maximum de 4 300 N/mm². Par comparaison, la résistance obtenue avec l'utilisation de colle est d'environ 3 300 à 3 400 N/mm² 24 heures après collage »⁶³.

Avec ce système, il est possible de concevoir des structures de grandes dimensions, comme des lamelles soudées de 350 cm de long, des poutres de structure en I, des parois en bois et un plancher suspendu, ainsi que des meubles qu'il aurait été difficile de fabriquer autrement.

Le matériel nécessaire à cet assemblage est limité puisqu'il se résume à une perceuse, fixe ou portable.

V-3 Un assemblage écologique

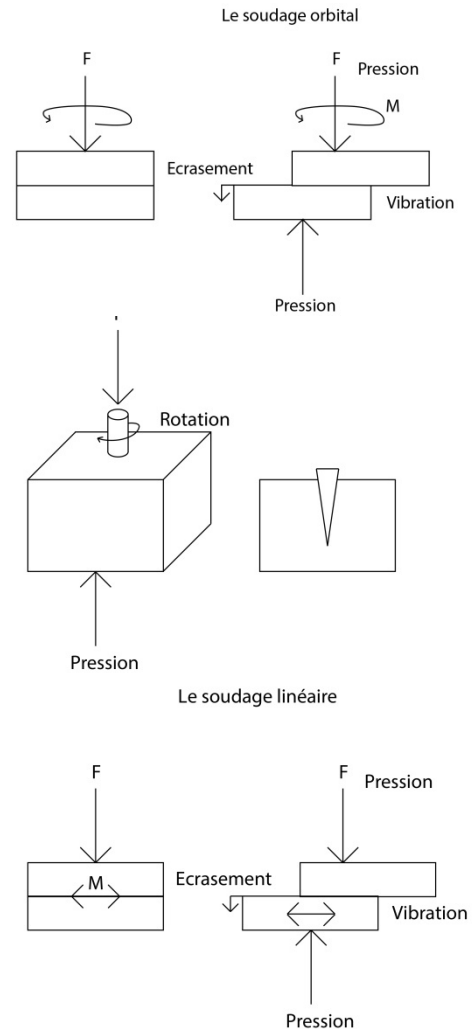
A l'échelle européenne, l'utilisation d'un tel mode d'assemblage, permettrait l'économie de milliers de tonnes d'adhésifs dans l'industrie de l'ameublement et de la menuiserie d'intérieur qui deviendrait ainsi plus compétitive et offrirait des produits de haute qualité environnementale.

V-4 Un gain de temps relatif

Le temps nécessaire à l'assemblage de pièces de bois par soudage est extrêmement rapide en comparaison avec tout autre mode d'adhésion qui implique un temps de polymérisation des colles. C'est la première fois que l'on conçoit un mode d'assemblage rapide par chevilles de bois soudées ayant une résistance 20 fois supérieure aux chevilles traditionnelles⁶⁴ des menuisiers et qui ne nécessite pas l'utilisation de colles. Cette mise en œuvre est facile, à la portée de tous. S'agissant de l'utilisation des colles liquides, il est également nécessaire de disposer des équipements qui permettent la diminution du temps de polymérisation.

⁶³ Extrait de la thèse de L. Resch

⁶⁴ Données tirées de la thèse de L. Resch



V-5 Certains inconvénients

V-5-1 Une résistance relative à l'humidité

L'immersion durant une heure dans l'eau ferait baisser la résistance au cisaillement des joints soudés de 80% et de 100% pour trois heures⁶⁵. Le soudage par friction rotative serait davantage résistant.

V-5-2 Une liaison imparfaite

Ces systèmes d'assemblage impliquent des liaisons imparfaites entre les plis de bois du fait de leur ponctualité, contrairement au collage qui permet une continuité parfaite entre les différentes couches et donc une meilleure répartition des charges ainsi qu'une plus grande rigidité.

Seul le soudage par friction rotative semble donc industrialisable grâce à une machine automatique portable avec couple, vitesse et pression contrôlés ainsi que l'élaboration d'un manuel d'utilisation au vu de la complexité des paramètres à maîtriser.

⁶⁵ Données tirées de la thèse de L. Resch

VI- Comparaison par l'expérimentation

VI-1 Rapport des tests de L. Resch

Des poutres de 2m de longueur composées de deux lamelles de sections 50 x 30 mm sont assemblées à l'aide de chevilles cylindriques de diamètre 10 mm ou de clous de diamètre 3,1 mm. Les chevilles et les lames sont en bois de hêtre ou en épicéa. Les poutres assemblées avec les tourillons soudés sont plus rigides et résistantes que les poutres de même configuration avec des chevilles collées ou avec deux rangées de clous de diamètre 3,1 mm. Les éprouvettes avec les chevilles soudées à 90° par rapport à l'interface sont similaires aux échantillons cloués. Les éprouvettes avec les chevilles soudées à 45° par rapport à l'interface se rapprochent des capacités des joints collés et des échantillons massifs. Ces essais montrent la possibilité d'utiliser les chevilles soudées dans les éléments constructifs. Les tourillons coniques sont plus performants.

VI-2 Matériel nécessaire pour les différentes expérimentations

- Perceuse-visseuse à colonne (machine fixe qui permet d'aligner parfaitement l'axe longitudinal du tourillon avec l'axe de perçage, avec une vitesse et une longueur de foret maîtrisée)
- Mèche conique, marque Manom, diamètre extrémité inférieure de 5 mm, diamètre extrémité supérieure de 31 mm, l=80mm avec une queue de 9 mm de diamètre.
- Tourillons de hêtre de 30 mm de diamètre taillés de manière conique
- Tourillons de hêtre de 6 mm de diamètre, de 30 mm de longueur
- Tourillons de hêtre de 6 mm de diamètre, de 1000 mm de longueur
- Pointes métalliques avec têtes de 5 mm de diamètre, de 35 mm de longueur
- Vis avec têtes de 10 mm diamètre, de 35 mm de longueur
- Colle vinylique
- Bois d'Épicéa à différents taux d'humidité

VI-3 Premier test sans dimensionnement

Le tourillon a été fabriqué à la main à partir d'un tasseau de bois d'épicéa à l'aide d'un tour et d'un ciseau à bois. L'éprouvette a, quant à elle, été percée à l'aide d'une fraise conique à fond plat de 80 mm de longueur et de 5 mm de diamètre inférieur. Dans un premier temps, une rotation à 900tr/min n'a fait que brûler la matière et provoquer de la fumée. (Vitesse de rotation utilisée par L. Resch : 1500tr/min). Ensuite, avec une rotation de 1 900tr/min, la perceuse s'est bloqué ce qui nous a fait supposer qu'une réaction avait eu lieu et que le bois était soudé.



Après une faible traction, le tourillon s'est pourtant détaché. Plusieurs suppositions sont possibles : la première vitesse a eu un impact négatif sur la soudure, le rapport des diamètres des deux éléments n'était pas adéquat, la soudure a manqué d'une pression post-soudure, la conicité imparfaite a empêché la soudure sur toute la surface du tourillon. En effet, l'extrémité inférieure du tourillon n'a pas subi de frottement au vu de l'absence de coloration de cette partie.

VI-4 Eprouvettes individuelles pour expérimenter la soudure par friction rotative

De nombreux tests individuels ont été réalisés pour connaître les conditions favorables à la réalisation d'une soudure par friction rotative : vitesse de rotation du tourillon (en jouant sur la vitesse de la perceuse à colonne en tours.min⁻¹), rapport de diamètre entre le pré-perçage et le tourillon et l'impact de la direction des fibres du bois (entre 10/9 et 10/8 pour L. Resch), la pression et sa durée après le soudage, la durée du soudage, l'impact d'un assemblage coaxial, où les fibres des deux éléments de bois sont parallèles, ou désaxé, où les fibres sont perpendiculaires

A partir des résultats de la thèse de L. Resch, aucune éprouvette n'a été soudée. Il a donc été nécessaire de tester l'ensemble des paramètres ainsi que leurs combinaisons.

VI-4-1 Tests avec des tourillons coniques

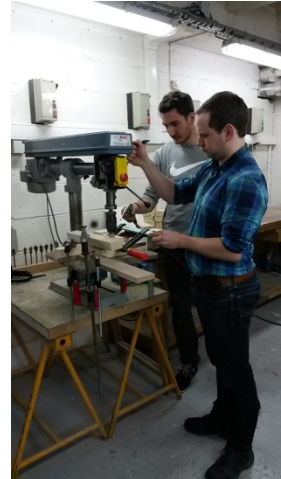
Pour ce faire, une succession d'éprouvettes en épicéa a été réalisée. Les deux couches de bois sont de dimensions différentes pour caler les éléments sur le support de la presse. Six d'entre-elles sont coaxiales, les six autres sont désaxées. Une autre sous-catégorie différencie les éprouvettes : diamètre 27 mm ou diamètre 24 mm. En effet, les tourillons ont un diamètre supérieur de 30 mm. Pour tester l'impact du rapport diamètre-cheville sur diamètre-perçage, nous allons comparer un rapport de 10/9^{ème} et de 10/8^{ème}. Nous savons ainsi que nous devons percer les six premières éprouvettes jusqu'à 69,67 mm de profondeur, et les six dernières jusqu'à 67,1 mm (arrondis en pratique à 70 mm et 67 mm).



Ces expériences n'ont pas abouti du fait de l'imprécision des surfaces de contact entre les tourillons coniques et les perçages. Réalisées à la main, au tour et au ciseau à bois, les tourillons étaient très irréguliers. Ci-après, nous avons toutefois précisé le protocole suivi.

VI-4-1-1 La préparation des éprouvettes

- Pré-perçage des éprouvettes avec une mèche cylindrique de diamètre 5mm pour les éléments bas et de 14mm pour les éléments du haut. (Deux profondeurs différentes pour obtenir les deux diamètres différents)
- Alésage des éprouvettes à l'aide de la mèche conique en faisant attention que les centres des éléments soient alignés.



VI-4-1-2 La réalisation des tourillons coniques

- Réalisation des tourillons coniques de diamètre 30 mm à partir de tourillons cylindriques en les inclinant et avec le tour.
- Garder un décolletage pour insérer le tourillon dans la perceuse-visseuse.

VI-4-1-3 La soudure

- Fixer l'éprouvette sous la visseuse-perceuse
- Insérer le tourillon dans la visseuse
- Percer l'éprouvette jusqu'au blocage de la rotation
- Exercer une pression sur l'assemblage
- Attendre 3 jours pour que l'assemblage se réacclimate
- Réaliser les tests de résistance



VI-5 Tests avec des tourillons cylindriques

Ces tests ont été beaucoup plus rapides à réaliser. Les tourillons existent sous différentes formes dans les magasins de bricolage : les diamètres, la longueur varient. Ils peuvent être cannelés ou non.

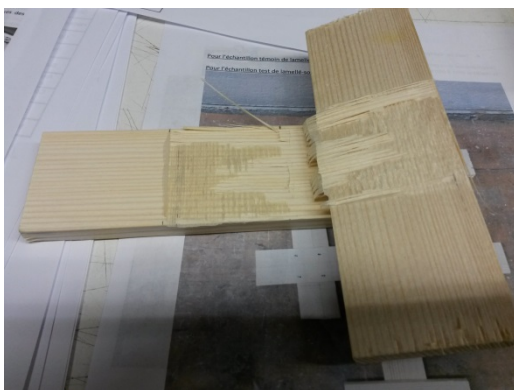
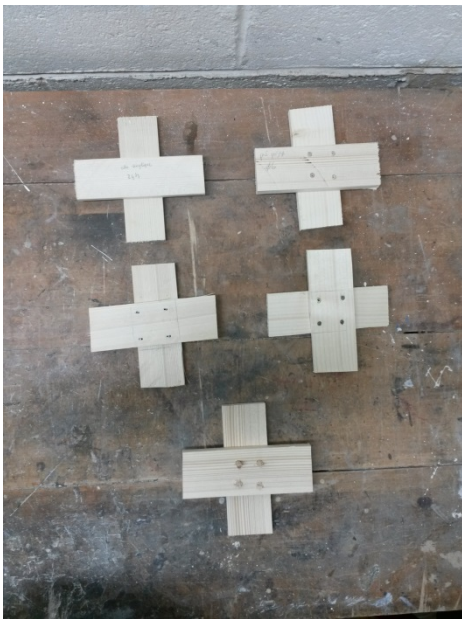
Une multitude de tests ont été réalisés afin de tenter d'acquiescer le mouvement adéquat pour une bonne soudure.

Diamètre du pré-perçage	V = 1450 - 1580				V = 1950 - 2150				V = 1950 - 2150			
	4	5	5,5	6	4	5	5,5	6	4	5	5,5	6
Résultats	Le tourillon brûle	Le tourillon est polis, pas d'accrochage ni de soudure	Pas de soudure	Polissage, diamètre trop important	Soudure réussie pour l'élément bois du dessus. L'extrémité inférieure du tourillon est brûlée.	Moins de brûlure. Semble être le meilleur rapport. S'insère jusqu'au bout du second élément de bois.	Bonne adhérence. Mais pas une soudure car la rotation est toujours possible.	Polissage, diamètre trop important.	Le tourillon se rompt avant même insertion. Trop de pression. Torsion du tourillon.	Carbonisation trop importante.	Brûle trop, accroche trop rapidement.	Polissage, diamètre trop important.



VI-6 Comparaison avec un autre type d'assemblage plus classique

Nous avons choisi un montage simple, en forme de croix, aux fibres perpendiculaires, afin de réaliser rapidement des tests à la presse pour obtenir des résultats quantitatifs de résistance à la traction des soudures supposées réussies.



Finalement, le diamètre 4,5mm de pré-perçage a été favorisé pour des tourillons de diamètre 6 mm. Nous avons observé que plus le diamètre est proche de celui du tourillon, plus on peut souder profondément car les frottements sont moins importants. Plus on descend rapidement, moins ça adhère, mais la carbonisation est plus rapidement produite. Au contraire, une vitesse trop lente n'implique pas assez de frottement et donc un simple polissage de la matière, sans soudure. Plus la longueur du tourillon est importante, plus la pression exercée sur la perceuse doit être faible pour éviter la rupture du tourillon avant même sa complète insertion.

Nous avons essayé de souder des éprouvettes avec un angle de 45°. La carbonisation était excessive d'un côté et insuffisante de l'autre du fait de la pression exercée par la perceuse à colonne sur un côté unique.

L'ajout de propylène glycole, conseillé dans la thèse, a fait apparaître de la fumée très rapidement et plus claire. Le propylène glycole est un antigel et un refroidissant qui est utilisé afin d'éviter les surchauffes en été dans les systèmes d'air-conditionnés. L'objectif était d'abaisser la température de transition vitreuse afin de ralentir la carbonisation pour permettre une meilleure fusion des fibres.

Afin de réduire la surchauffe de l'extrémité inférieure du tourillon, nous avons essayé de changer la géométrie de celui-ci à l'aide d'un taille-crayon. Il perd ainsi environ 1 mm. Nous n'avons pas obtenu de résultat significatif.

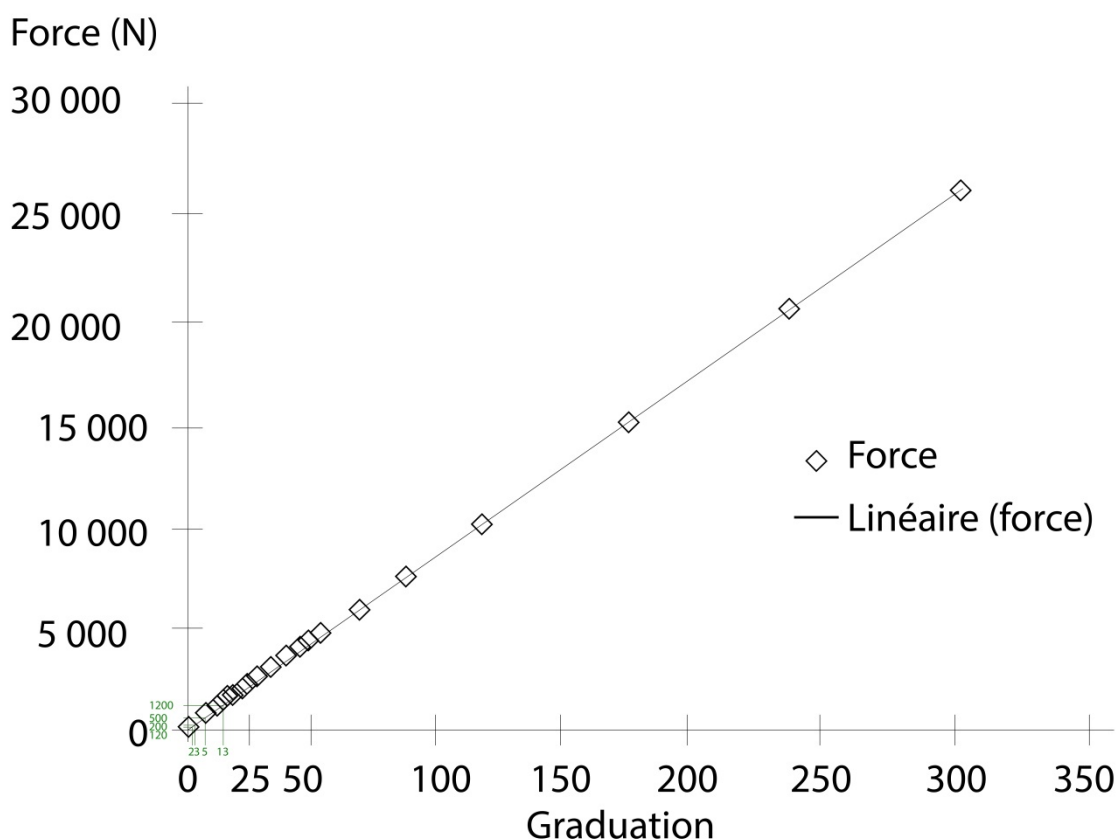
La comparaison entre du chevillage et de la soudure nous a permis de comprendre que la cheville n'a aucune résistance à la torsion (elle est facilement extraite à l'aide d'une pince) et qu'elle risque de fissurer le bois pendant le martèlement.

Le soudage a semblé contrer ces inconvénients : les tourillons ne sont pas extrudables à la pince et aucune fissure n'est jamais apparue durant l'ensemble des expériences.

L'ajout de quelques gouttes d'eau ou encore le détrempeage des tourillons avant leur friction a permis une insertion plus facile ainsi qu'une plus petite quantité de carbonisation mais il est impossible de savoir si la soudure a effectivement eu lieu. En effet, le tourillon gonfle et ses fibres s'attendrissent.

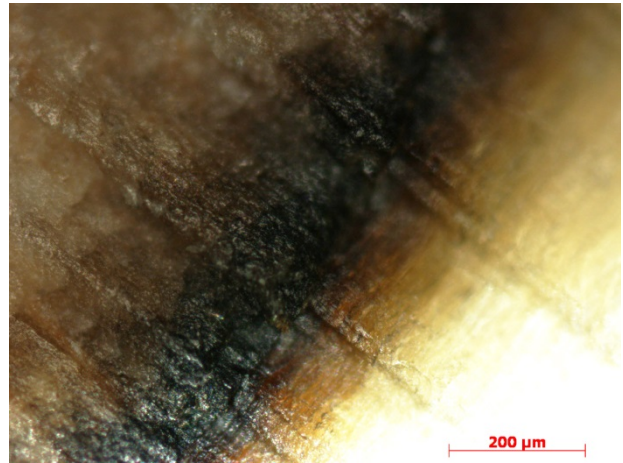
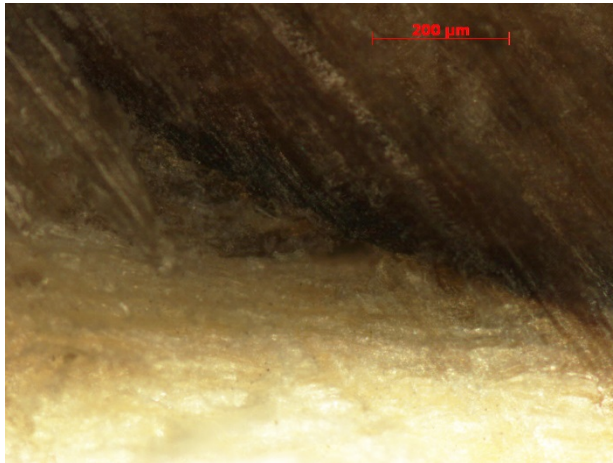
Ci-dessous figurent les résultats obtenus avec deux types de presses différentes : l'une est manuelle, l'autre est digitale. L'assemblage vissé était trop résistant pour la presse manuelle qui présente une stabilité ainsi qu'une précision toutes relatives. Aucune conclusion ne peut être émise d'après ces résultats qui envisageraient que quatre vis ont une résistance à la traction 4,6 fois supérieure à celle d'une colle vinylique. Ce qui paraît absurde.

Type d'assemblage	Résistance en traction (µm)	Résistance en traction (N)	Résistance en traction (bar)
4 vis	> 60 Trop de résistance pour la petite presse	4 000 000	40
Colle vinylique	13	1 200	0,012
4 chevilles	5	500	0,005
8 clous	3	200	0,002
4 tourillons soudés	2	120	0,0012



VI-7 Observation microscopique du phénomène

Ces images, prises aux Ponts et Chaussées, ont permis de montrer qu'une zone rassemble les deux pièces de bois. En effet, il n'y a ni espace vide ni ligne parfaitement nette. Néanmoins, le fait que cette zone soit colorée du fait de la carbonisation, il est impossible de distinguer les fibres du tourillon de celles de l'éprouvette. Le test semble positif visuellement mais l'assemblage se rompt facilement.



VI-8- Réalisation des poutres

Dans un second temps, nous des tests à plus grande échelle ont été réalisés pour se rapprocher des éléments structurels utilisés en architecture : cinq poutres lamellées constituées de trois plis chacune ont été assemblées avec un type d'assemblage particulier : collage avec de la colle vinylique, vissage, clouage, chevillage, soudage. Les poutres mesurent toutes 1,10 de longueur (10 cm de marge sont prévus pour le montage sur la presse digitale), 6cm de largeur et 3 x 2 cm de hauteur.

Précautions particulières :

- Ecartement requis entre chaque tourillon pour utilisation perceuse : 3,5cm
- Longueur perdue des tourillons (insertion dans la perceuse) : 1,5 cm
- Ne pas exercer une trop grande pression pendant la soudure sinon le tourillon va se tordre et se rompre.
- Temps relativement long pour l'insertion complète du tourillon dans les deux éléments de bois, contrairement aux observations de L. Resch.
- Le taux d'humidité du bois : le tableau ci-contre présente le taux d'humidité du bois requis selon son utilisation⁶⁶.

HUMIDITE (%)	CONSTRUCTION			AMEUBLEMENT
	Charpente	Menuiserie	Parquet	
22	Fermettes	Extérieure		
20				
18	Traditionnelle, emploi ouvert			
16				
14	Lamellée collée	Intérieures	Contrecollé, suivant les cas	[Marque de Qualité NF-Meuble et NF-Siège
12	Traditionnelle, combles habitables			
10			Mosaïque	
8				
6				

⁶⁶ Ecole Supérieure du Bois, Gaël SIMON et Jean-Yves JOINEAU (LRPC Nancy)

Les plis sont rabotés et ponçés pour s'assurer de la meilleure adhérence possible lors de l'assemblage.



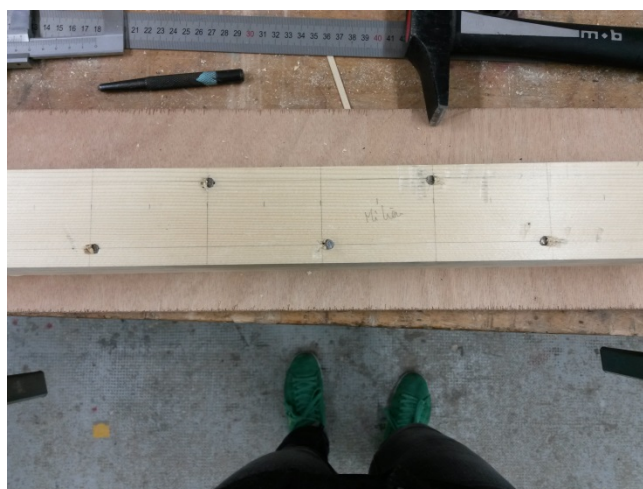
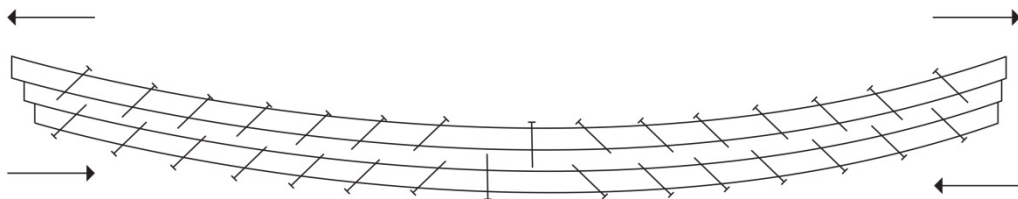
VI-8-1 Réalisation d'une poutre lamellée-collée

Trois plis sont collés à la colle vinylique et maintenus avec des serre-joints pendant plusieurs jours.



VI-8-2 Réalisation d'une poutre lamellée-clouée

Trente pointes (diamètre de tête 5 mm et longueur 35 mm) ont été insérées de manière oblique et à la direction maîtrisée afin d'optimiser leur fonction et de bloquer les mouvements susceptibles durant les tests sous presse. Quinze pointes assemblent entre elles deux couches.



VI-8-3 Réalisation d'une poutre lamellée-vissée

Trente vis (diamètre de tête 10 mm et longueur 35 mm) ont été insérées à la perceuse portable. Le risque de fissurer le bois et d'enfoncer les têtes de vis est également important.



VI-8-4 Réalisation d'une poutre lamellée-chevillée

Trente chevilles ont été insérées dans la poutre pré-perçée avec une mèche d'un diamètre correspondant au diamètre des tourillons sans l'épaisseur des cannelures.



VI-8-5 Réalisation d'une poutre lamellée-thermo-soudée

Le taux d'humidité de ces plis était beaucoup trop important. Le bois était pratiquement mouillé au toucher. Grâce à ce taux d'humidité élevé, l'insertion des tourillons a été facilitée mais nous supposons qu'aucune soudure ne s'est produite. En effet, aucune « ligne de carbonisation » n'est apparue. Il s'agit donc davantage d'assemblage par compression et gonflage. Après quelques jours, les plis se sont en effet désolidarisés.

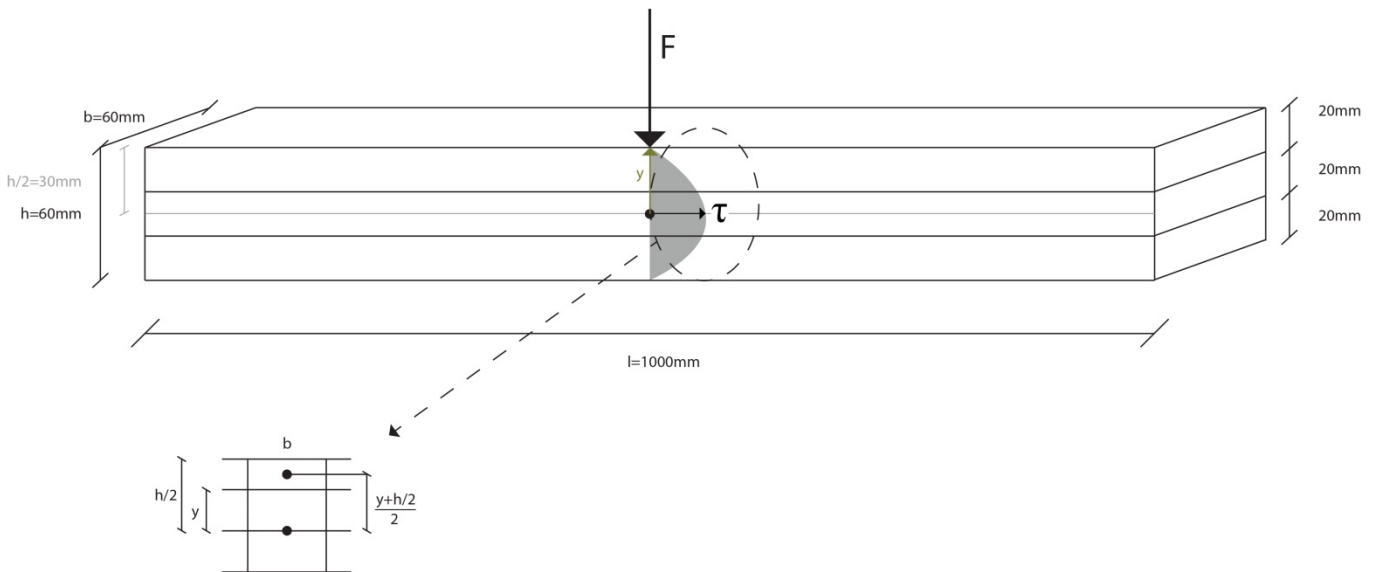


VI-9 Tests de résistance au cisaillement et analyse

Les poutres ont été quadrillées pour faciliter la lecture des mouvements lors des tests sous presse.



Nous avons exercé une force F avec une presse digitale à mémorisation automatique de la force maximale appliquée avant rupture. L'objectif est d'évaluer la résistance en cisaillement de chaque type d'assemblage au niveau de chaque unité (au niveau d'un tourillon, d'un clou, d'une cheville et d'une vis) afin d'en réaliser un classement de performance.



VI-9-1 Résultats attendus

- r = Rayon de l'interface
- S = Surface de l'interface h = hauteur de la poutre lamellée
- I = Moment quadratique ζ_{int} = Moment statique à l'interface
- F_{exp} = Force expérimentale
- V = Effort tranchant
- n = Nombre de tourillons
- $\tau_{(y)}$ = Contrainte de rupture en cisaillement en y
- $b_{(y)}$ = Largeur de la poutre
- $\zeta_{(y)}$ = Moment statique en y

$$\zeta_{(y)} = \frac{V \zeta_{(y)}}{I b_{(y)}}$$

$$V = \frac{F_{exp}}{2} = cte$$

$$\frac{V}{I b} = cte$$

$$\zeta_{(y)} = Sx$$

- $\tau_{(y)} = \frac{b}{2} \times \left(\frac{h}{2} - y \right) \times \left(\frac{h}{2} + y \right)$

$$\tau_{(y)} = \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{2} - y^2 \right)$$

- $\tau_{(y)} > 0, y = \frac{h}{2} \Rightarrow \tau_{(y)} = 0$ pour $y = \frac{h}{2}$ ou $y = -\frac{h}{2}$

- $\tau_{(y)} = \max, y = 0 \Rightarrow \tau_{(y)} = \frac{bh^2}{8}$

$$y = \frac{h}{6}$$

- $\tau_{int} = \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - \frac{h^2}{36} \right)$

$$\tau_{int} = \frac{b}{2} \left(\frac{9h^2 - h^2}{36} \right)$$

$$\tau_{int} = \frac{b}{2} \left(\frac{8h^2}{36} \right) = \frac{2h^2}{9} \times \frac{b}{2}$$

$$\tau_{int} = \frac{bh^2}{9}$$

- $$\zeta_{int} = \frac{\frac{F_{exp}}{2} \times \frac{bh^2}{9}}{\frac{bh^3}{12} \times b}$$

$$\zeta_{int} = \frac{12 F_{exp} \times bh^2}{18 bh^3 \times b}$$

$$\zeta_{int} = \frac{12 F_{exp}}{18 bh \times b}$$

$$\zeta_{int} = \frac{2 F_{exp}}{3 bh \times b}$$

$$F_{ctot} = \tau \times S_c$$

$$F_{ctot} = \tau \times b \times \frac{l}{2}$$

$$F_{ctot} = \tau \times n$$

$$F_{ctot} = \frac{\tau \times b \times l}{2n}$$

$$F_{ctot} = \frac{2 F_{exp} \times b \times l}{6 bh \times n}$$

$$F_{ctot} = \frac{F_{exp} \times l}{6 hn} \text{ kN}$$

- $$M_{max} = 500 \times \frac{F}{2}$$

$$M_{max} = 250 F$$

- $$\sigma = \frac{6 M}{bh^2}$$

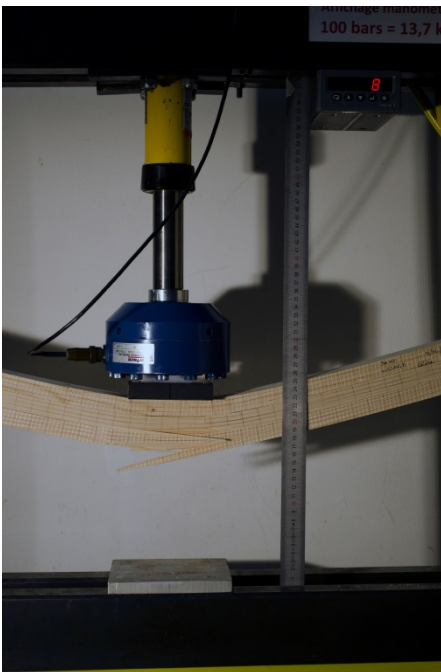
$$\sigma = \frac{250 \times 6 F}{bh^2} = \frac{1500 F}{60^3}$$

$$F_{max} = \frac{\sigma_{max} \times 60^3}{1500}$$

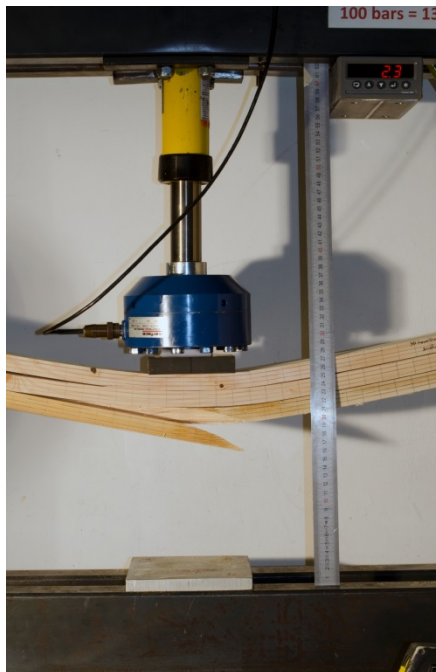
$$F_{max} = \frac{50 \times 60^3}{1500}$$

$$F_{max} = 7200 = 7,2 \text{ kN}$$

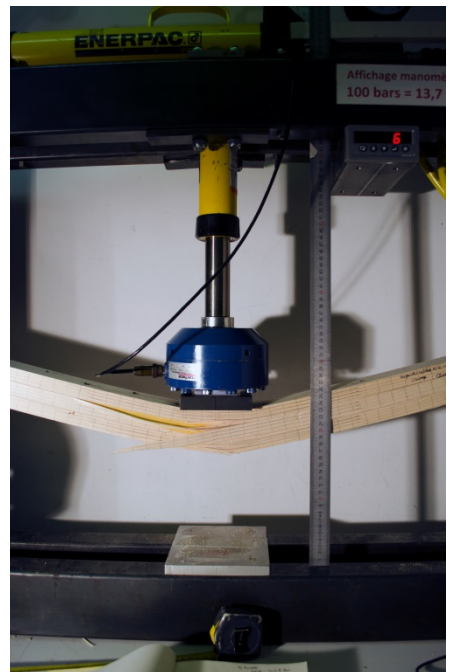
VI-9-2 Tests finaux



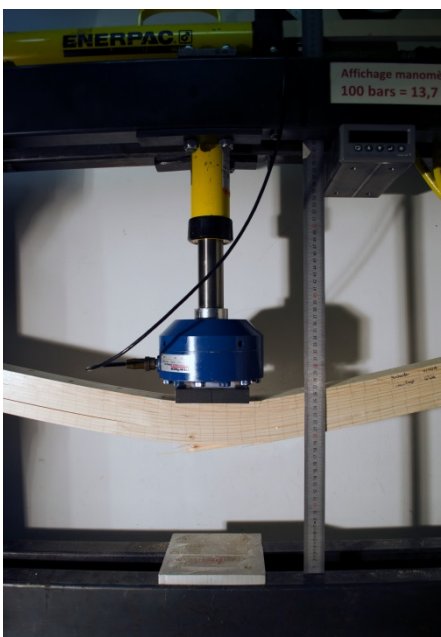
Résistance maximale par vissage



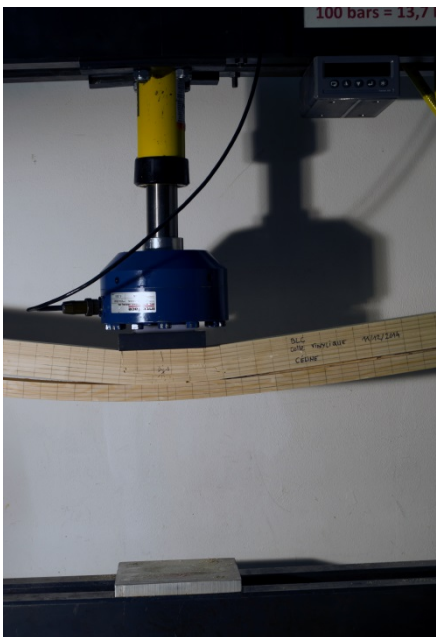
Résistance max par soudage



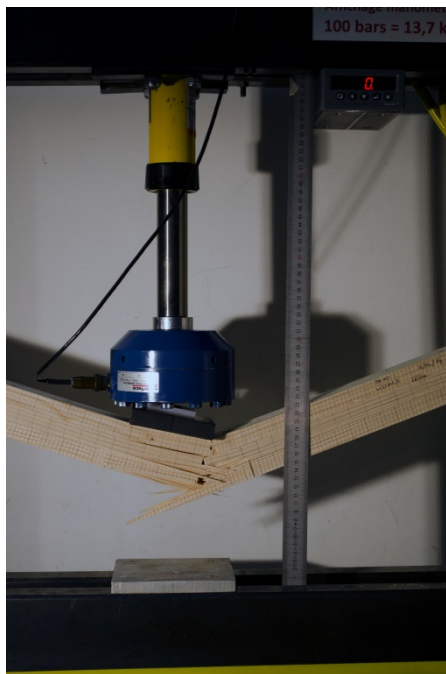
Résistance max par clouage



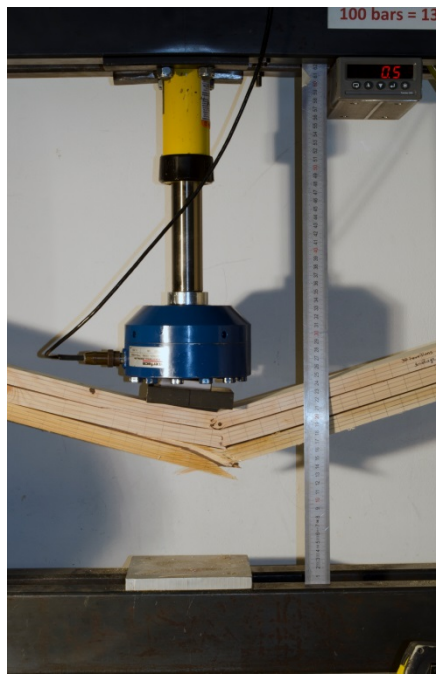
Résistance max par chevillage



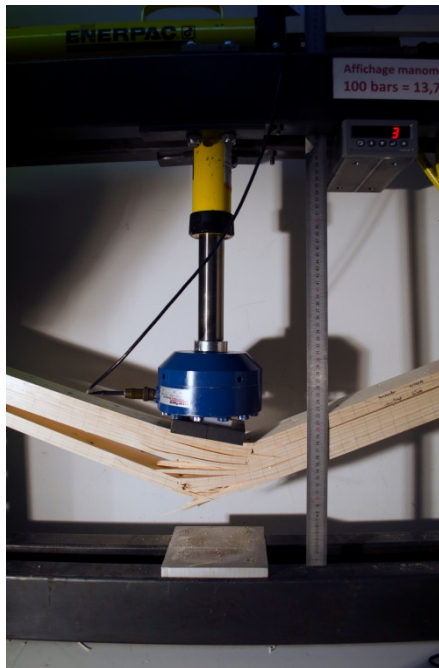
Résistance max par collage



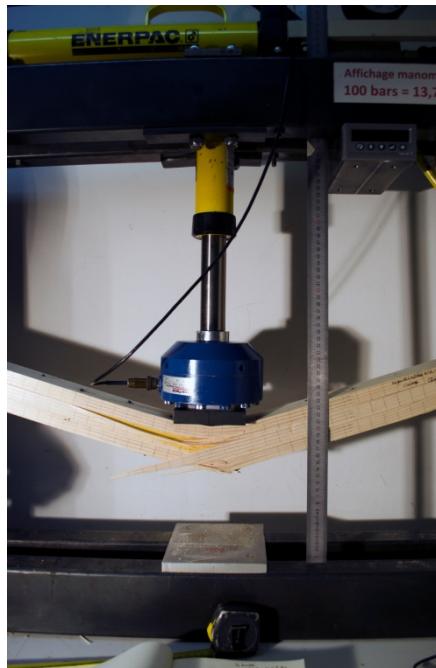
Rupture complète de la poutre
vissée



Rupture complète de la poutre
soudée



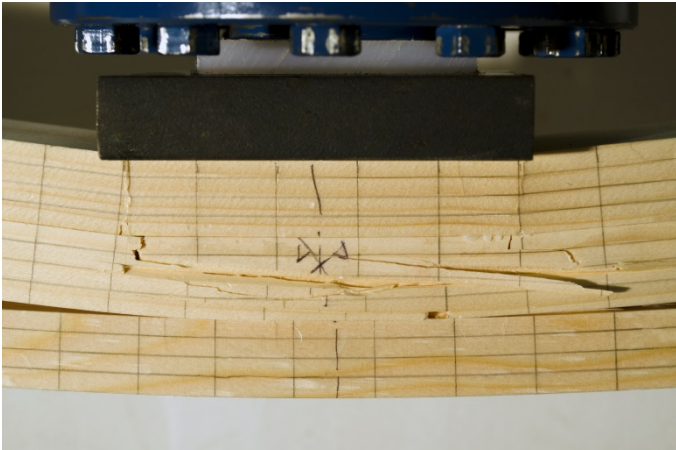
Rupture complète de la poutre
chevillée



Rupture complète de la poutre
clouée

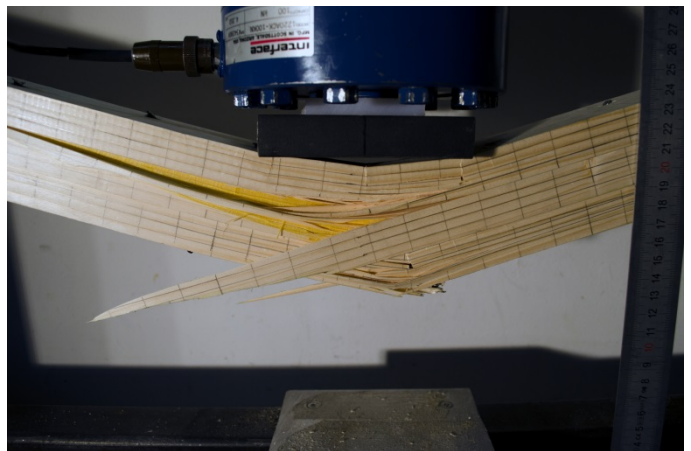
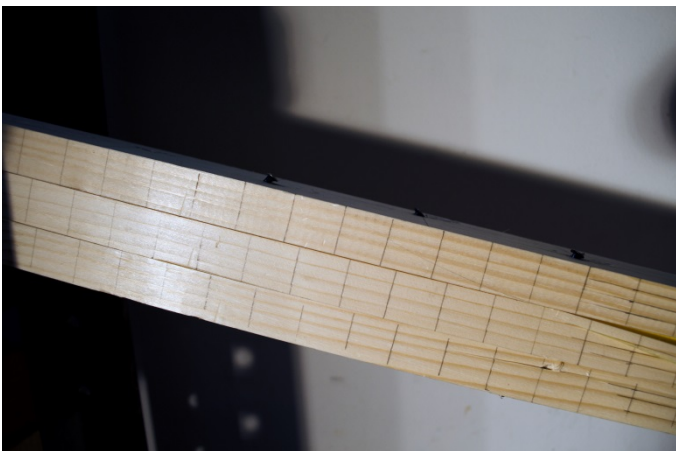
VI-9-3 Observations

VI-9-3-1 La poutre lamellée-collée



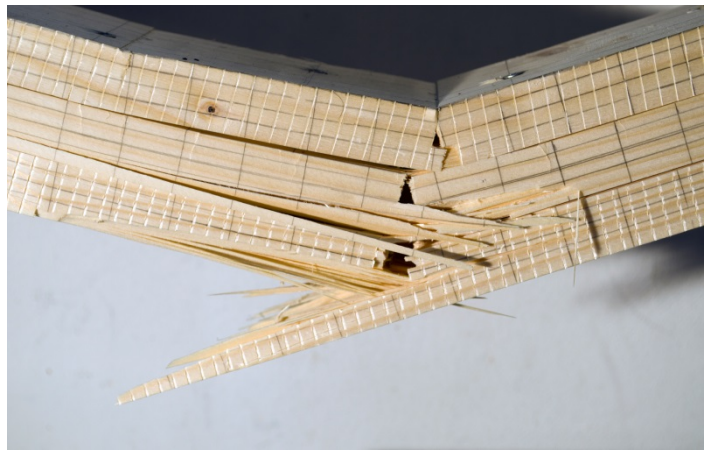
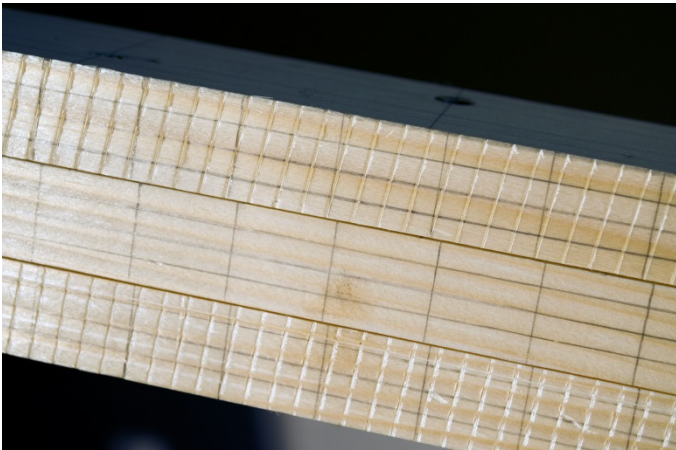
La poutre lamellée-collée a subi un décollement entre les deux plis inférieurs. La colle s'est arrachée mais pas le bois. Le décalage des plis est nul entre les deux lames supérieures et relativement faible entre les deux lames inférieures. Une forte compression est apparue sur les deux premières lames car la lame inférieure s'est détachée.

VI-9-3-2 La poutre lamellée-clouée



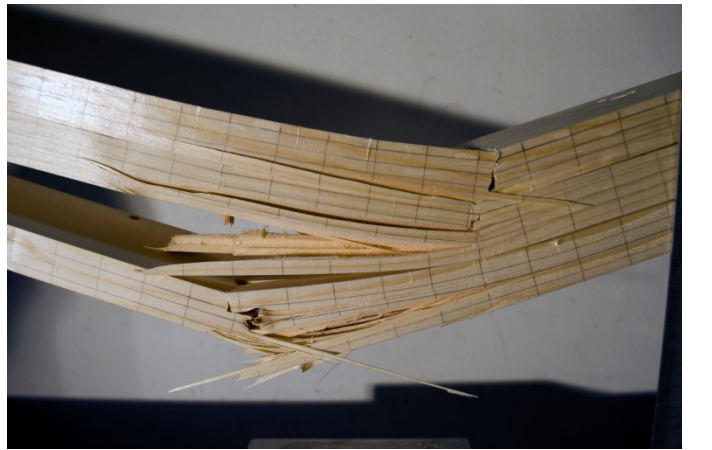
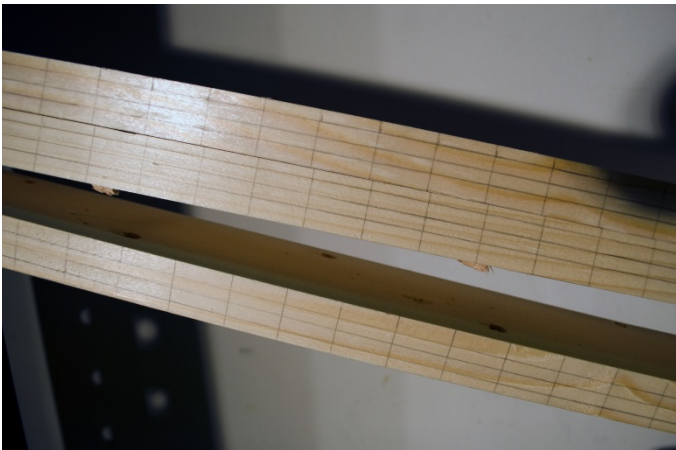
La poutre lamellée-clouée a subi un grand déplacement de ses plis.

VI-9-3-3 La poutre lamellée-vissée



La poutre lamellée-vissée a subi un faible déplacement de ses lames.

VI-9-3-4 La poutre lamellée-chevillée

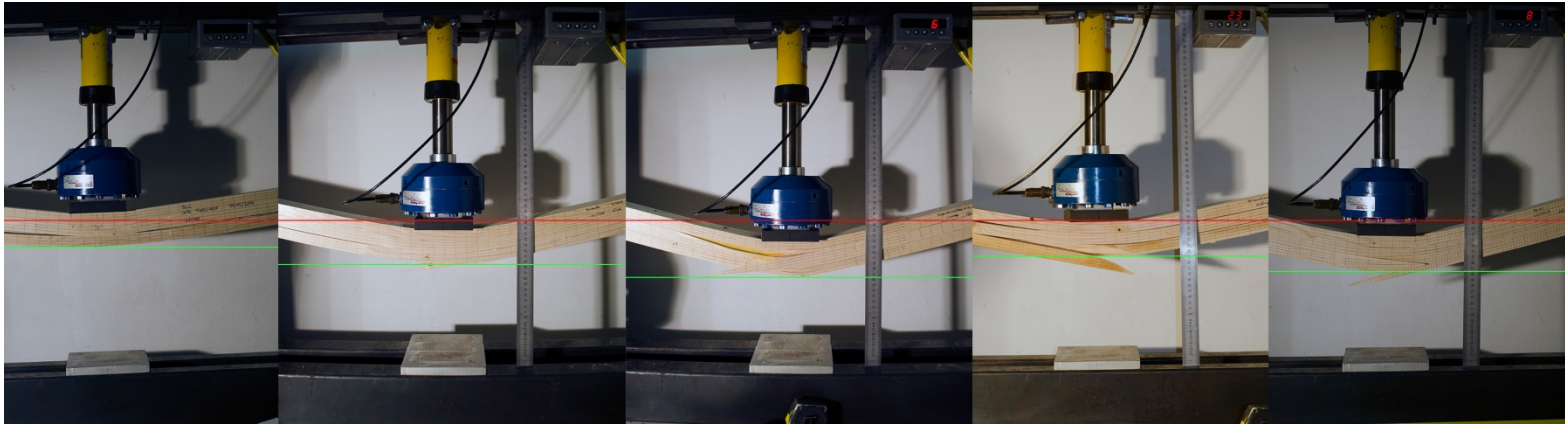


Les chevilles ont été arrachées provoquant le décollement de la lame inférieure.

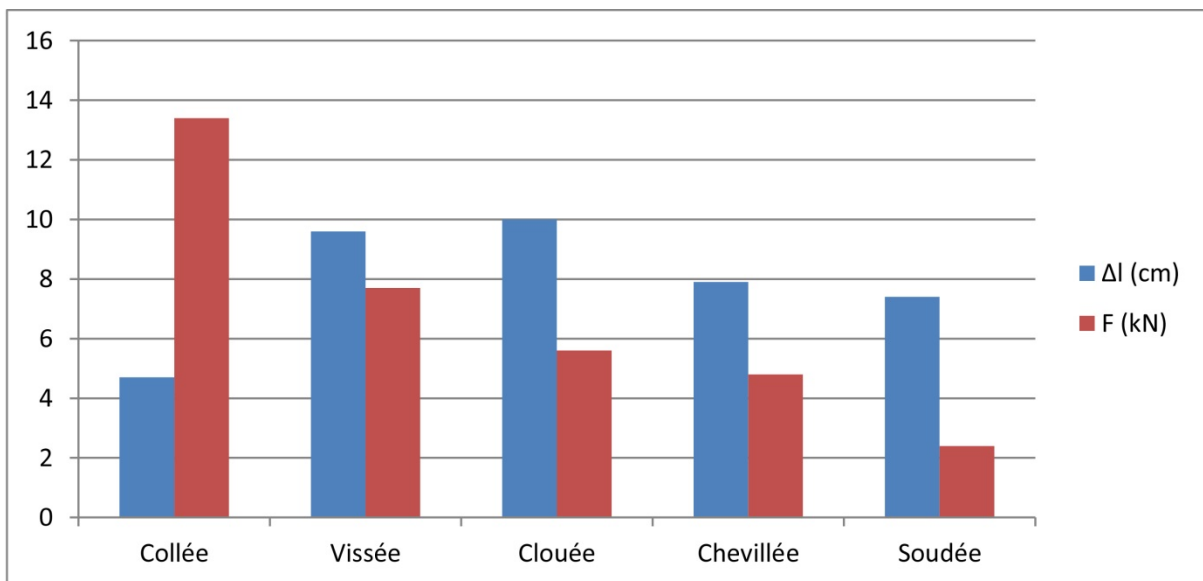
VI-9-3-5 La poutre lamellée-soudée



Les tourillons ont été arrachés. Il n'y a plus aucune adhérence entre les lames. Le déplacement est important.



Poutre	Taux d'humidité (%)	Δl (cm)	F (kN)
Collée	10,7	4,7	13,4
Vissée	10,7	9,6	7,7
Clouée	10,7	10	5,6
Chevillée	10,7	7,9	4,8
Soudée	16,6	7,4	2,4



Finalement, la poutre lamellée-collée a obtenu le meilleur résultat de résistance avec 13 kN. La poutre lamellée-clouée a présenté la plus grande flèche devant les poutres lamellée-vissée et lamellée-chevillée. Seules les poutres collée et vissée correspondent à la résistance attendue⁶⁷.

Les résultats obtenus avec la poutre lamellée-soudée sont décevants. La poutre a présenté une faible flèche mais sa résistance a été très faible et n'a pas répondu aux prévisions concernant le gain de 20% de résistance par rapport à la poutre lamellée-chevillée. Nous supposons qu'aucune ou peu de soudures ont eu lieu du fait du fort taux d'humidité de la poutre. Les imprécisions des paramètres d'insertion (vibrations, mouvements, vitesse de rotation non fixe, pression appliquée non fixe, etc.) ont également dû jouer sur la qualité des soudures.

⁶⁷ Cf VI-9-1

VII- Autres données nécessaires pour la réalisation d'une Analyse de Cycle de Vie

Provenance du bois utilisé à l'atelier : inconnue

Masse volumique de la colle vinylique : $1,43 \text{ g.cm}^{-3}$

Teneur en colle dans le lamellé-collé : 2,7 % du volume en m^3

Quantité de bois dans le lamellé-collé : 97,3 %

Mouvements possibles : aucun a priori

Durée de vie de la colle vinylique : 10 ans⁶⁸

Temps de réalisation :

Masse volumique du bois anhydre : 450 kg.m^{-3}

Quantité de bois dans le lamelle-soudé : 100%

Mouvements possibles : aucun a priori

Détérioration : en cas d'évolution forte de l'humidité

Durée de vie d'un tourillon : ? ans

Temps de réalisation d'une poutre thermo-soudée : 20 min

Durée de vie d'un clou : ? ans

Mouvements possibles : mouvement perpendiculaire à l'enfoncement du clou

Détérioration : rouille, rupture

Temps de réalisation : infime vu qu'il s'agit d'un élément largement industrialisé

Durée de vie d'une poutre en Epicéa : 100 ans⁶⁹

⁶⁸ Déclaration environnementale et sanitaire conforme à la norme NF P 01-010 de la colle vinylique D1 pour assemblage bois, déclaration en juin 2010, Bostik, INIES

⁶⁹ Déclaration environnementale et sanitaire conforme à la norme NF P 01-010 pour une charpente industrielle en sapin-épicéa, fabriquée en France, Décembre 2011-version vérifiée suivant le programme AFNOR, FCBA, CODIFAB, validé par l'AIMCC

Conclusion

Ce mémoire a ainsi mis en avant les caractéristiques du bois afin de comprendre pourquoi ce matériau est intéressant pour une architecture durable. Les types d'assemblage sont multiples et tendent à être perfectionnés. Que ce soit pour l'ameublement ou pour la construction, cette échelle de travail est primordiale pour acquérir des matériaux et des modes de constructions écologiques.

Les tests sous presse ont prouvé les performances indéniables du bois lamellé-collé. Cependant, les tests sur du bois lamellé-thermo-soudé, cette technique de soudure du bois par friction linéaire, orbitale ou rotative, ont particulièrement décevants. La thermo-soudure n'a pas été maîtrisée. Malgré d'innombrables tests individuels réalisés dans le but d'acquérir le geste et une précision dans les paramètres nécessaires à la réalisation d'une soudure par friction, le test final a été négatif. Nous pouvons ainsi répondre aux questionnements suscités sur cette technique concernant sa mise en œuvre et sa capacité à être adaptée par un particulier. Nous pouvons préconiser l'invention d'une « perceuse-soudeuse » qui bloquerait tous les paramètres : vitesse de rotation de la perceuse, vitesse d'insertion, pression appliquée pendant une durée fixe, diamètre du pré-perçage par rapport à celui du tourillon afin de reproduire et de pouvoir contrôler l'efficacité des soudures. Cette perceuse devrait également tenir compte du taux d'humidité du bois, du sens des fibres et de la présence de nœuds. Cette combinaison semble complexe à réaliser du fait de l'hétérogénéité du matériau bois mais elle est nécessaire pour l'industrialisation de poutres ou de panneaux massifs structurels en bois ou encore d'une « fabrication-maison », à la portée de tous, qui peuvent répondre aux besoins de l'architecture écologique de demain. De plus, le fait qu'il s'agisse d'un assemblage 100% bois, qui a déjà fait ses preuves au sein de laboratoires professionnels d'ingénieurs BTP, mérite que d'autres tests soient réalisés pour l'obtention de meilleurs résultats.

L'approche expérimentale qu'a suscitée ce séminaire de recherche, les nombreuses lectures scientifiques et les conférences spécialisées ont été particulièrement enrichissantes et ont constitué un outil riche ainsi qu'une base de données précieuse pour la réalisation d'un Projet de Fin d'Etude ainsi que pour une entrée dans la vie active. La rencontre avec des professionnels incitent en effet à échanger sur les questionnements réciproques ainsi que sur l'état d'avancée des recherches.

L'éco-conception reste difficile à approcher. Elle complique encore d'avantage l'approche structurelle dans la phase de conception. Une multitude de données sont à prendre en compte et à savoir maîtriser avec des sources multiples et parfois contradictoires.

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Robert Le Roy pour sa disponibilité, ses conseils précieux et les invitations à différentes conférences, ainsi que Monsieur Benoit Vérant pour l'aide et le soutien qu'il m'a apporté durant toutes les phases d'expérimentation au sein de l'atelier bois de l'ENSA Paris Malaquais.

Glossaire

- Autoclave** : récipient qui permet une cuisson stérilisante à la vapeur
- Avis technique** : pour couvrir les frais pour plusieurs exemplaires (centaines)
- Avivé** : bois scié à quatre arêtes vives, généralement à 90°
- BMT-D ou Bois Massif Tourillonné en Diagonal** : terme employé par Woodeum pour qualifier ses panneaux tourillonnés fournis par la société Sohm HolzBautechnik : assemblage de 10 solives d'épicéa ou de sapin blanc sec à 12%. Ces solives de 60 mm de large, d'abord aboutées et profilées sont maintenues les unes contre les autres mécaniquement alors qu'elles avancent dans la « tourillonneuse en diagonal » qui va successivement réaliser des percements traversant puis insérer des tourillons de hêtre”
- BMR ou Bois Massif Reconstitué** : certains fabricants de panneaux utilisent le terme de Bois Massif Reconstitué pour qualifier leur produit alors que le CNDB, comme Batibois utilisent ce terme exclusivement dans le cas « d'éléments linéaires reconstitués par collage de lames de bois massifs de forte épaisseur aboutées ou non au moment de la fabrication, de section reconstituée maximum de 260 x 320 mm »
- BMR-T ou Bois Massif Reconstitué Tourillonné** : terme employé par Bois&Futur pour parler des panneaux tourillonnés fournis par la société Sohm HolzBautechnik, société dépositaire du brevet « Diagonal Dûbel », système exclusif de tourillonnage en diagonale assurant à la fois une stabilité dimensionnelle longitudinale et latérale de modules.
- Bois lamellé-cloué** : ou BLCI, mentionné par le CRIT concernant une réalisation de logements collectifs à Gilamont-Vevey, en Suisse, en 1995. Il s'agit de murs et planchers réalisés en bois cloué sur chant
- Bois lamellé-collé** : technique inventée par le charpentier allemand Otto Hetzer dans les premières années du XXème siècle, abondamment utilisé dans les constructions contemporaines. L'assemblage des avivés se fait par collage
- Bois massif structurel ou panneau massif structurel** : les termes sont régulièrement employés comme synonyme des panneaux de bois massif
- Bruit d'impact** : transmis dans la matière même, ce sont des vibrations qui se propagent d'élément en élément. On peut s'en protéger par la désolidarisation des éléments et en créant des bris de conductivité.
- Construction en bois massif ou murs en bois massif** : ce terme est utilisé presque exclusivement pour les constructions à base d'empilage de poutres (de section ronde ou rectangulaire et profilées de façon différente par chaque promoteur de cette technique), ou de rondins écorcés voire de troncs
- COV** : Composé Organique Volatil
- Diaphragme** : élément généralement rectangulaire, plan et mince, transmettant des efforts dans son propre plan
- DTU** : Document Technique Unifié. Le CSTB le définit comme étant les règles générales de construction, l'articulation entre la partie d'ouvrage visée et les autres parties, l'exécution des travaux, les règles de moyens.
- Madrier** : planche épaisse façonnée dans un bois dur comme le chêne
- Norme « produit »** : Le CSTB la définit comme étant les exigences applicables pour chaque produit, les principes de fabrication à respecter, les méthodes de vérification, les performances minimales.
- Panneaux de bois massif** : terme employé par le CNDB pour qualifier les panneaux réalisés en planches contrecollées pour des ossatures légères – en général qualifié d'ossature-bois ou MOB-, des systèmes poteaux-poutres, du colombage, des madriers –aussi appelé empilage-, et enfin des panneaux de bois massif. On peut aussi noter que le CNDB emploie une autre dénomination, le panneau massif reconstitué.
- Polymères thermodurcissables** : qui ne fondent pas et qui ne sont donc pas recyclables.
- Polymère réticulé** : la réticulation correspond à la formation d'un ou de plusieurs réseaux tridimensionnels, par voie chimique ou physique.
- Taux d'humidité** : poids de l'eau libre divisée par le poids du bois sec
- Température de transition vitreuse** : température où le matériau va changer d'état, de dur à caoutchoutique, définition tirée de la conférence de Sandrine Marceau à l'ENSA Paris Malaquais
- Thermo-soudure** : soudage de deux pièces de bois par friction et rotation de tourillons. Il existe trois systèmes : la friction linéaire, la friction rotative et la friction orbitale.

Sources

Articles

- Le bois et la ville, *Séquences Bois*, n° 96, Juil-Oct 2014
- CLT : des panneaux structuraux adaptés à toute construction, *Cahiers Techniques*, n°331
- Construire avec le bois tourillonné, *Bois&Futur*, WoodSurfer, fev. 2011, 1628-9706, p.19-21
- La densification, *Annales de la recherche urbaine*, n°67 *Densités et espacements*, juin 1995, P. 95-105
- Faut-il densifier Paris?, *Architecture intérieure CREE*, n° 305, 3^{ème} trimestre 2002, P. 34-37
- Plaidoyer pour la densification, *Techniques et architecture*, n° 447, fev 2000, P. 54-61
- Propriétés antioxydantes en solution des substances extractibles du bois ; rôle dans la durabilité de l'aspect coloré d'une essence de bois, *Annales des 6èmes Journées scientifiques de la forêt et du bois*, CTBA, DIOUF P.N., EL BAKALI I., MERLIN A., PERRIN D., 2003, pp. 53-60.
- Soudage bois, *A+*, fev 2007, n°204, p.96-98
- Le soudage du bois par friction, *Belgian Woodforum*, A. Pizzi, ENSTIB Nancy
- Surélévations, *Séquences Bois*, n° 6, sept 1995, p.6

Ouvrages

- Green, M.C., *Tall Wood*, 2012
- LOURDIN, R., *Cours de technologie du bois*, U.P.S.
- MOOSER, M., FORESTIER, M., PITTET-BASCHUNG, M., *Surélévations en bois, densifier, assainir, isoler*

Avis Techniques

- Avis technique CLT CSTB
- JODIN P., *Le Bois, matériau d'ingénierie*, ARBOLOR, Nancy, 1994, 433 p.
- PRAT R., Université Pierre et Marie Curie, UFR de Biologie, « La constitution chimique du bois - La lignine »

Documents universitaires

- Thèse de RESCH, L., *Développement d'éléments de construction en bois de pays lamellés assemblés par tourillons thermo-soudés*, ENSTIB, 2009
- Thèse de SEGOCIA BRANDT, C., *Performances des assemblages des tourillons soudés*, ENSTIB, 2010
- Thèse de GANNE—CHEVEVILLE, C., *Soudage linéaire du bois : étude et compréhension des modifications physico-chimiques et développement d'une technologie d'assemblage innovante*, ENSTIB, 2008

Sites web

- www.bois.be
- www.boisfutur.com
- <http://cndb.org/>
- <http://www.chantier.net>
- <http://www.larecherche.fr/actualite/technologie/souder-du-bois-c-est-possible-01-09-2005-69306>
- <http://www.metsawood.com/fr>
- <http://www.moulin-sa.com/>
- <http://www.ojala.fr/> (architectes : Atelier du Jour de l'Aube)
- <http://www.woodeum.com/>

Conférences

- Assemblages innovants*, FIBC
- AFGC dans Guide AFGC pour la conception des ouvrages d'art en bois
- Colloque FIBC-Fédération de l'Industrie Bois Construction, *Techniques d'assemblages pour structures bois : dernière évolutions, dernières innovations*, jeudi 19 juin 2014 au FCBA-Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement

Boutiques spécialisées

- BHV : Forêt conique étagé marque Tivoly diam sup 14, diam inf 3 _ 61,10^e
- Leroy Merlin : tourillons vendus en baguettes d'un mètre ou en pièces de 3cm
- Les Forges de l'Est : 40, rue d'Avron - 75020 PARIS
- Mèche américaine : 5 rue SAINT BERNARD 75011 Paris
- Tartek : Boulevard Beaumarchais

Notes de bas de page

- ² Chiffre publiés par le Comité National pour le Développement du Bois
- ⁶ Définition extraite de l'Avis Technique du CTBA
- ⁸ SICSA, entreprise de recyclage et de valorisation des déchets forestiers
- ⁹ <http://www.dispo-boisenergie.fr/>
- ¹⁰ <http://www.dispo-boisenergie.fr/>
- ¹¹ D'après la COFA : Coopérative Forestière des Ardennes
- ¹² *Ressource et disponibilité forestières : une valorisation importante de l'inventaire*, IF, n°6, décembre 2004
- ¹³, ¹⁴ et ³⁷ L'IFN (Inventaire Forestier national), n°6, décembre 2004
- ¹⁶ Dossier de presse de Janvier 2012 publié par le PEFC
- ¹⁷ <http://www.batibois.org/>
- ¹⁸ <http://www.fcba.fr/>
- ¹⁹ *Entretien et exploitation des forêts*, document du FCBA
- ²⁰ Dossier de presse de Janvier 2012 publié par le PEFC
- ²¹ <https://www.cecobois.com/le-bois-et-lenvironnement/le-matériau-bois-et-lanalyse-du-cycle-de-vie>
- ²² <https://www.cecobois.com/le-bois-et-lenvironnement/le-matériau-bois-et-lanalyse-du-cycle-de-vie>
- ²⁴ Cours de technologie du bois, R. Lourdin, U.P.S.
- ²⁵ www.prioriterre.org, Information et Conseil Energie Eau Consommation, Choisir ses colles, avril 2010
- ²⁶ <http://www.caseo.fr/documents/caseine/une-super-colle-restee-secrete.html>
- ²⁷ www.bruxellesenvironnement.be
- ²⁹ et ³⁶ *Surélévations en bois, densifier, assainir, isoler*, M. Mooser, M. Forestier, M. Pittet-Baschung
- ³¹ Article de T. Surini sur http://infoforets.free.fr/article.php3?id_article=208
- ³² Jodin, 1994
- ³³ D'après les études de Diouf, El Bakali, Merlin et Perrin
- ³⁴ D'après l'étude de Jodin datant de 1994
- ³⁸ *Particularités du matériau bois, possibilités de mixité*, R. Le Roy, AFGC, IFSTTAR
- ⁴⁰ Fiche CTBA (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement) sur le bois lamellés collés (BLC)
- ⁴³ Informations techniques caractéristiques, techniques des panneaux CLT Stora Enso Building Solutions
- ⁴⁴ Cahiers Techniques n°331, *CLT : des panneaux structuraux adaptés à toute construction*
- ⁴⁶ *Tall Wood*, Michael Green, Conférence http://www.ted.com/talks/michael_green_why_we_should_build_wooden_skyscrapers
- ⁴⁷ <http://www.cmpbois.com/articles/projet-treet-bergen-immeuble-bois-14-etages.html>
- ⁴⁸ Les cahiers techniques du bâtiment, n°331, mars 2014 par Virginie Pavie, *Construction Bois : Techniques innovantes de mise en œuvre pour un matériau renouvelable*
- ⁴⁹ <http://www.consoglobe.com/premier-gratte-ciel-en-bois-stockholm-cg>
- ⁵⁰ <http://architecturion.unblog.fr/2014/06/07/siege-de-linpi-a-courbevoie-lun-des-premiers-batiments-de-bureaux-a-energie-positive-en-France>
- ⁵¹ Articles de deux arrêtés du 28 octobre 1994 et 1999 suivants du Code de la Construction et de l'Habitation
- ⁵⁴ Sandrine Marceau, conférence sur les Polymères synthétiques et biosourcés pour l'architecture à l'ENSAPM
- ⁵⁵ Conférence au FIBC le 19 juin 2014
- ⁵⁶ Avis technique : AT 3/12-725 pour les produits de la Scierie Moulin
- ⁵⁷ <http://www.chantier.net/CQFD3/20/09.htm>
- ⁵⁸ <http://www.coste.fr/projet.html?projet=ec187>
- ⁵⁹ <http://www.woodeum.com/medias/presentation-video-woodeum/>
- ⁶⁰, ⁶³, ⁶⁴, ⁶⁵ Extrait de la thèse de Ludovic Resch, ingénieur doctorant à l'ENSTIB, *Développement d'éléments de construction en bois de pays lamellés assemblés par tourillons thermo-soudés*
- ⁶² Données du CRITT
- ⁶⁶ Ecole Supérieure du Bois, Gaël SIMON et Jean-Yves JOINEAU (LRPC Nancy)
- ⁶⁸ Déclaration environnementale et sanitaire conforme à la norme NF P 01-010 de la colle vinylique D1 pour assemblage bois, déclaration en juin 2010, Bostik, INIES
- ⁶⁹ Déclaration environnementale et sanitaire conforme à la norme NF P 01-010 pour une charpente industrielle en sapin-épicéa, fabriquée en France, Décembre 2011-version vérifiée suivant le programme AFNOR, FCBA, CODIFAB, validé par l'AIMCC