



HAL
open science

Caractérisation des pièces aboutées pour le domaine de la construction

Laurent Bertino, Robin Marchaison

► **To cite this version:**

Laurent Bertino, Robin Marchaison. Caractérisation des pièces aboutées pour le domaine de la construction. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2011. hal-01880872

HAL Id: hal-01880872

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01880872v1>

Submitted on 25 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

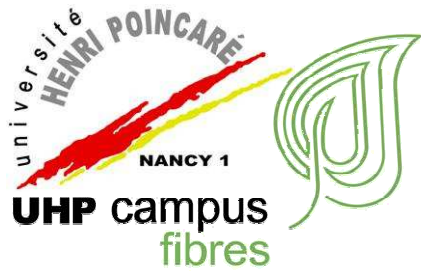
LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



**Rapport de projet de
fin d'études
- Promo 2011 -**

**CARACTÉRISATION DES PIÈCES ABOUTÉES
POUR LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION**

Laurent BERTINO

Robin MARCHAISON

Encadrement : Pierre-Jean MÉAUSOONE

Co-encadrement : Pascal KREMER

AVANT PROPOS

Le projet de fin d'études est l'un des plus longs et des plus importants que nous avons réalisé à l'ENSTIB. Il nous a demandé un fort investissement personnel et nous a permis d'approfondir, de compléter, et mettre en pratique les cours qui nous ont été dispensés.

Ce travail en autonomie n'aurait pas pu se dérouler aussi bien sans le soutien et les conseils de Pierre-Jean Méausoone et de Pascal Kremer dont l'aide nous a permis de nous poser les questions indispensables au bon déroulement de notre étude.

De plus, nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin notamment pour l'utilisation et la réparation de la tenonneuse numérique.

Enfin, nous regrettons cependant qu'aucun contact avec un industriel spécialisé dans l'aboutage ne se soit concrétisé.

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| AVANT PROPOS | 2 |
| INTRODUCTION | 5 |
| I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE CONCERNANT L'ABOUTAGE..... | 6 |
| 1. Définition..... | 6 |
| 2. Présentation des différents types d'aboutage..... | 6 |
| 2.1. Historique | 6 |
| 2.2. Type de configuration des joints..... | 7 |
| 2.3. Géométrie des joints | 8 |
| 2.4. Positionnement des entures | 9 |
| 3. Les facteurs influençant l'aboutage | 10 |
| 3.1. Les paramètres de production | 11 |
| 3.1.1. Pression d'assemblage | 11 |
| 3.1.2. Les choix des adhésifs..... | 12 |
| 3.1.3. Les entures..... | 14 |
| 3.1.4. L'avance par couteau..... | 14 |
| 3.1.5. La vitesse de coupe..... | 15 |
| 3.1.6. L'usure et l'entretien | 16 |
| 3.2. Les propriétés du bois | 17 |
| 3.2.1. L'humidité | 17 |
| 3.2.2. La masse volumique et densité | 18 |
| 3.2.3. Les singularités | 18 |
| 3.2.4. La température | 19 |
| II. PRÉSENTATION DU SUJET ET DÉTAILS DES CHOIX EXPÉRIMENTAUX..... | 20 |
| 1. Introduction..... | 20 |
| 2. Objectifs de l'étude | 20 |
| 3. Choix expérimentaux..... | 20 |
| III. LE PLAN D'EXPÉRIENCE..... | 21 |
| 1. Présentation : | 21 |
| 2. Les facteurs : | 21 |
| 3. Les modalités : | 22 |

| | | |
|------|--|----|
| 4. | Les matrices : | 23 |
| 5. | Choix du plan d'expérience approprié : | 25 |
| IV. | DÉROULEMENT DES ESSAIS | 26 |
| 1. | Réalisation des éprouvettes | 26 |
| 2. | Description des machines | 27 |
| 3. | Calculs théoriques préalables aux essais | 29 |
| 4. | Mode opératoire | 30 |
| 5. | Les différents modes de rupture | 32 |
| 6. | Analyses visuelles des éprouvettes rejetées par le test de Dixon : | 33 |
| V. | EXPLOITATION DES RÉSULTATS PAR LA MÉTHODE TAGUCHI | 35 |
| 1. | Recherche des valeurs aberrantes par le test de DIXON | 35 |
| 2. | Interprétation des résultats selon la norme NF EN 408..... | 37 |
| 3. | Analyse du plan d'expérience | 37 |
| 4. | Vérification des résultats..... | 39 |
| 4.1. | Essais de vérifications..... | 39 |
| 4.2. | Recherche des causes possibles..... | 40 |
| VI. | ESSAIS COMPLÉMENTAIRES | 42 |
| 1. | Prise en considération des contraintes de la Norme NF EN 408 | 42 |
| 1.1. | Introduction..... | 42 |
| 1.2. | Les caractéristiques de la norme NF EN 408..... | 43 |
| 1.3. | Le plan d'expérience | 44 |
| 2. | Confrontation des deux plans d'expériences..... | 46 |
| | CONCLUSION | 49 |
| | BIBLIOGRAPHIE..... | 50 |
| | TABLE DES ILLUSTRATIONS..... | 52 |
| | ANNEXES..... | 54 |
| | RESUME | 55 |
| | ABSTRACT | 55 |

INTRODUCTION

Le domaine de la construction bois recherche des matériaux garantissant une résistance mécanique. Pour cela, le bois massif, avec ses singularités a montré ses limites. L'aboutage apporte ici un double intérêt. Il permet d'une part de purger les singularités des bois qui fragilisent la pièce et d'autre part d'assembler des pièces de faible longueur.

A l'heure actuelle, les entreprises françaises aboutent des bois scandinaves garantis en qualité et en humidité. Or, la montée en gamme des bois de sciage français commence à intéresser ces entreprises. Cependant, les données concernant l'aboutage de ces bois locaux demandent encore à être complétées.

C'est dans cette optique que se dirige notre étude. Pour cela, nous allons chercher à déterminer l'influence des caractéristiques techniques d'aboutage sur la résistance mécanique du Pin sylvestre et de l'Epicéa local. Après une étude bibliographique, nous mettrons en place un plan d'expérience afin d'obtenir un maximum de comparaisons avec un minimum de tests à réaliser.

I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE CONCERNANT L'ABOUTAGE

1. Définition

L'aboutage à entures multiples est un assemblage longitudinal réalisé par le collage de pièces de bois de fil et aux extrémités desquelles ont été pratiqués des coins trapézoïdaux semblables, appelés entures. [CTBA : (1)]

Le but de l'aboutage est d'obtenir des pièces de grandes longueurs à partir de petites dimensions. De plus, avec ce procédé, on peut supprimer les singularités du bois en ne gardant que les zones de premier choix de la pièce. Par conséquent, on peut améliorer les propriétés physiques et esthétiques de la pièce en question. Avec cette méthode, on peut alors utiliser des bois de second choix, ce qui influe directement sur l'aspect financier d'une entreprise.

On utilise principalement ce type d'usinage dans la fabrication de poutres en I, de poutres lamellées-collées, et dans la fabrication de certaines menuiseries.

2. Présentation des différents types d'aboutage

A l'heure actuelle, l'industrie de l'aboutage utilise différents profils d'entures. Ces choix ne sont pas anodins. En effet, ils influent directement sur les caractéristiques mécaniques et l'aspect esthétique du produit mis en œuvre.

2.1. Historique

D'après Gaiffe (2), on a vu en Allemagne les premières applications en Allemagne de cette technique d'assemblage pour la construction de ponts lors de la Seconde Guerre mondiale.

L'aboutage de pièces de bois permettant l'utilisation de pièce unique fut beaucoup utilisé au cours du XXe siècle pour la fabrication d'aéronefs, et aux États-Unis pour la réalisation d'hélice d'hélicoptère dans les années 1940. Ce procédé utilisait des coupes en biseau de grandes longueurs afin de coller les pièces entre elles. Cette coupe en biseau fut développée compte tenu de la faible résistance qu'offrait l'aboutage bout à bout et fut améliorée afin de fournir une surface de collage presque parallèle au fil du bois. Cependant, ce type de joint n'a pas connu beaucoup d'expansion puisqu'il engendre une grande perte de longueur et qu'il permet difficilement d'obtenir une bonne exactitude ainsi qu'une bonne précision dans l'alignement des blocs. [Janowiak : (3)]

Au début des années 1950, des efforts furent concentrés au développement d'un profil de joint permettant d'obtenir un joint ayant une aussi bonne résistance, tout en n'augmentant pas le

volume de bois à usiner. L'enture multiple, comme on la connaît aujourd'hui, a alors vu le jour. [Hernandez : (4)]

En Europe, l'Allemagne fut le premier pays à définir une norme Din 68 140 par l'intermédiaire de l'Institut Allemand Otto Graf, conséquence d'un développement rapide dans la réalisation de pièce pour la construction. [Molliard et Zearo : (5)]

Depuis, l'aboutage connaît un fort développement dans les pays boisés et devrait connaître un nouvel essor dans les années à venir en raison du souci écologique de limiter le gaspillage. En France deux normes lui sont consacrées : NF EN 385 (Aboutages à entures multiples dans les bois de construction. Exigences de performance et exigences minimales de fabrication) et NF EN 387 (Bois lamellé-collé. Aboutages à entures de grandes dimensions.)

Ainsi, un bois de moindre qualité peut être utilisé afin de concevoir un produit fini de meilleure qualité dont la résistance et l'apparence seront augmentées en y enlevant les défauts indésirables.

Il faut cependant nuancer cette tendance avec l'arrivée massive du bois énergie, permettant de revaloriser des déchets autrefois jetés.

2.2. Type de configuration des joints

Le choix des joints est la chose la plus importante pour la résistance mécanique. Selbo (6) a testé plusieurs types de configurations de joints à la traction longitudinale (Figure 1). Ceux à entures multiples (B, C et D) présentent une meilleure résistance que ceux du bois collé bout à bout (A). Le joint à biseau (E), l'ancêtre du bois abouté, a été étudié par Richards et Goodrick (7) et Selbo (6). Toutes ces personnes s'accordent à dire que le joint biseau est le meilleur existant. Cependant, il n'a pas connu d'essor de par la forte perte de matière qu'il génère. De plus, d'un point de vue purement pratique, il est difficile d'obtenir une bonne exactitude et une bonne précision dans l'alignement des blocs. [Jokerst (8)]

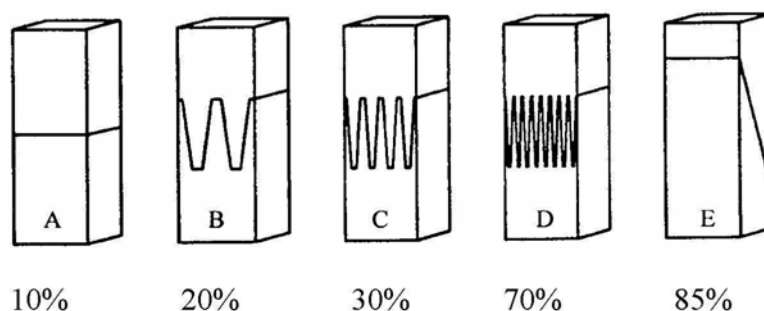


Figure 1 : Effet du type de joint sur la résistance mécanique à la traction par rapport à celle du bois massif (d'après Selbo 1975)

On retrouve communément trois configurations de joints structuraux à entures multiples dans l'industrie : sans épaulement (A), mâle-femelle (B) et inversée (C) (Figure 2).

Une étude menée par Forintek (9) en collaboration avec l'Université de Laval a évalué la performance du bois d'épinette noir assemblé par entures multiples. Des tests ont été effectués à la flexion et à la traction entre ces trois configurations de joints. Des différences significatives sont apparues pour la flexion avec une meilleure résistance de l'assemblage sans épaulement. En revanche, pour la traction, les résultats sont moins tranchés.

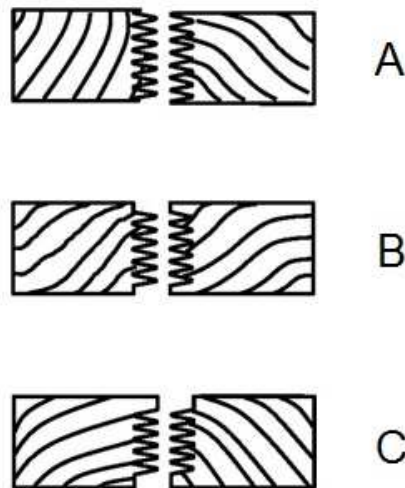


Figure 2 : Types de configuration des joints A: Sans épaulement, B: Mâle-femelle, C: Inversée

2.3. Géométrie des joints

La caractérisation géométrique des joints est principalement dictée par quatre variables : la pente, le pas, la longueur, et la largeur des extrémités d'entures (Figure 3).

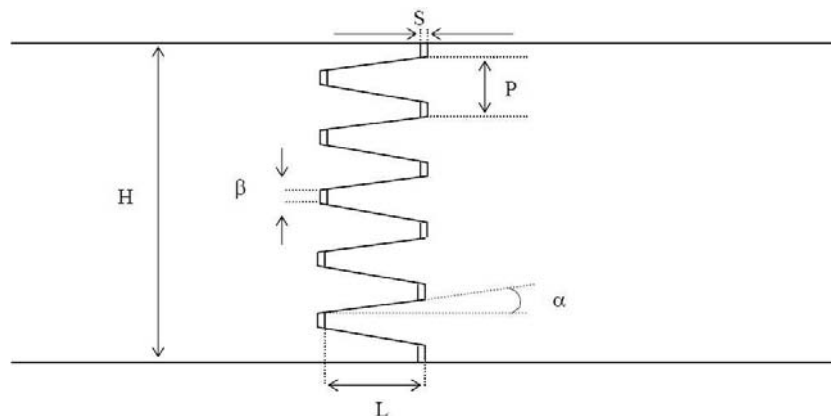


Figure 3 : Nomenclature et géométrie d'aboutage (d'après le CTBA : 1973)

Avec :

- L : longueur
- P : pas
- b : épaisseur de l'extrémité de l'enture
- a : pente
- S : jeu au fond de l'enture
- H : largeur totale de l'assemblage

Plusieurs auteurs se sont penchés sur la géométrie des joints. Richards et Goodrick (7) ont évalué l'effet de la pente sur la résistance mécanique en traction. Les pentes étudiées ont été 1:6, 1:9, 1:12, et 1:15. Le rapport de pente 1:15ème a obtenu 82% de résistance mécanique à la traction du bois massif, alors que la pente de 1:6ème n'a atteint que 54% de cette résistance. On peut conclure en disant que plus la pente est faible, plus le collage résiste. Une étude de Selbo (6) va également dans ce sens. Trois épaisseurs de l'extrémité de l'enture (b), de six pentes (a) et de six pas (P) ont été testés. Il en est ressorti que pour avoir une résistance au cisaillement mécanique optimale, il est nécessaire d'avoir une grande zone d'union collée et des entures minces. De plus, la traction longitudinale augmente avec la diminution de la pente (a). Il faut donc que les entures soient longues et à faibles pentes afin de disposer d'une bonne surface de collage.

Il faudra donc faire des choix entre de longues entures pour un usage structural, ou des entures plus courtes avec une moins bonne résistance mécanique. Le choix n'est pas anodin, car plus les entures sont longues, plus les outils sont sophistiqués et le pressage devra être fort. Il y a également une plus grande consommation de colle, et enfin plus de casse lors de l'assemblage des deux pièces à abouter.

Après la pente et la longueur, l'épaisseur de l'enture **b** est le facteur le plus important affectant la résistance mécanique du joint. Selbo(6) recommande d'avoir une épaisseur de l'enture la plus petite possible. Strickler va dans le même sens en préconisant un **b** n'excédant pas les 0,8mm.

2.4. Positionnement des entures

Il existe trois principales orientations d'entures possibles : sur face, sur chant et inclinée.

Si l'on recherche un aspect esthétique sans de réelle résistance mécanique, on prendra un aboutage sur chant qui cachera les entures de la vue une fois la pièce de bois mise en œuvre. De plus, ce positionnement est préféré des industriels, car, de part ce positionnement qui prend moins de place que le tapis d'aménagement de la machine, l'usinage est plus rapide et donc plus rentable.

En revanche, dès lors qu'une sollicitation mécanique est nécessaire, on préférera l'aboutage sur face qui est relativement plus résistant. En effet, l'étude de Tan(10) fait ressortir qu'une pièce aboutée sur face est 29% plus résistante qu'une pièce aboutée sur chant en compression. Jokerst (8) va dans le même sens pour les tests en flexion en expliquant que les contraintes se distribuent à travers toutes les entures pour les joints sur face, tandis que pour le joint sur chant, les entures extérieures supportent la plupart de la charge, ce qui affecte leur intégrité. Malgré ces deux études, Janowiak (3) n'a pas trouvé les mêmes résultats et explique qu'il n'y pas de différences significatives entre l'aboutage sur face et sur chant.

En règle générale, il est plus simple d'abouter sur face ou sur chant qu'incliné. De plus, l'usinage incliné serait un compromis entre résistance et esthétique assez maladroit. Nous préférons alors écarter ce type de positionnement des entures de nos tests, qui ne nous semble pas refléter le monde industriel de l'aboutage.

3. Les facteurs influençant l'aboutage

Lors de ses travaux, Bustos (11) a mis en avant de nombreux facteurs influençant la performance mécanique d'un assemblage par entures multiples. En effet, la performance d'une enture multiple dépend des propriétés du bois, de la géométrie des entures et de la qualité du collage. En ce qui concerne les propriétés du bois, les paramètres anatomiques et physiques influencent également la résistance mécanique. Pour les joints, nous avons différents paramètres géométriques tel que : le type de joint, la pente, l'orientation, etc. Finalement, pour la qualité du collage, les paramètres de production et d'usinage sont les plus importants. Le Tableau 1 dénombre les multiples facteurs influençant la performance mécanique d'un bois abouté.

Tableau 1 : Facteurs influençant l'aboutage

| Propriétés | Facteurs |
|---------------------------------|--|
| Propriétés du bois | Anatomie |
| | Masse volumique |
| | Proportion de bois final |
| | Nœuds (Grandeur, quantité et localité) |
| | Pente du fil |
| | Grandeur des cernes annuels |
| | Bois de traction ou de compression |
| | Bois juvénile |
| | Teneur en humidité |
| | Gerces produites par le séchage |
| | Cambrure et gauchissement |
| | Teneur en résine |
| Géométrie des joints | Type de joint |
| | Paramètre de profil des joints |
| | Direction de coupe des joints |
| Propriétés de production | Séchage et conditionnement |
| | Coupe transversale des blocs |
| | Coupe des entures |
| | Type d'adhésif |
| | Application de l'adhésif |
| | Pression d'assemblage |
| | Application de chaleur sur les joints |
| | Entreposage |
| | Rabotage |
| | Contrôle de la qualité dans l'usine |

3.1. Les paramètres de production

3.1.1. Pression d'assemblage

La pression à appliquer durant l'assemblage des joints à entures multiples joue un rôle déterminant dans la résistance finale du joint. Elle dépend de la viscosité de l'adhésif utilisé et de la qualité de l'agencement recherché. Raknes(12) stipule que cette pression permet le serrage des joints en forçant les entures les unes contre les autres afin de provoquer leur ancrage mutuel. Jokerst(8) démontre que des joints bien agencés donnent de meilleures performances, même à une pression d'assemblage moindre. L'information dans la littérature sur la quantité et la durée de la pression pour former des joints résistants est confuse et parfois contradictoire. Par exemple, Strickler(13) recommande des pressions de 28 kg/cm² sur la section transversale des pièces pour la plupart de résineux et Turgeon (14) quant à lui mentionne que cette pression se situe entre 28 et 56 kg/cm² pour les bois mous et entre 42 et 70 kg/cm² pour le sapin, douglas et le mélèze. Il ajoute qu'à mesure que la longueur des entures est augmentée, la pression finale doit être réduite pour éviter leur endommagement. Ceci se reflète dans la norme allemande DIN 68140 qui précise des minimums de 120 kg/cm² pour des longueurs d'entures de 10mm et de 20 kg/cm² pour des longueurs d'entures de 60mm. Mais qu'en aucun cas, cette pression ne doit être inférieure à 10 kg/cm².

On remarque alors une tendance à augmenter la pression tant que le bois n'est pas endommagé. Fissette et Rice (15) ont comparé la performance de l'aboutage de deux bois de résineux, selon différentes pressions. Leur étude montre d'une part qu'il est important d'appliquer une pression adéquate afin que les pièces soient bien agencées, mais d'autre part qu'il ne faut pas que cette pression endommage les pointes des entures, et donc qu'une pression trop importante diminuera la résistance à la traction. Ayarkwa (16), par son étude sur la résistance en flexion de trois bois de feuillus africains, montre que la résistance à la flexion et la rigidité des bois aboutés, ne sont que très peu influencés par la géométrie et la pression d'assemblage. Il démontre également qu'il existe une pression pour laquelle la performance en traction est optimale et que lorsque l'on s'en éloigne, la performance tend à diminuer.

Les résultats de recherches antérieures semblent être parfois contradictoires concernant l'effet de la pression d'assemblage. Mais il semble néanmoins qu'on puisse discerner une pression optimale directement proportionnelle à la densité du bois (Figure 4).

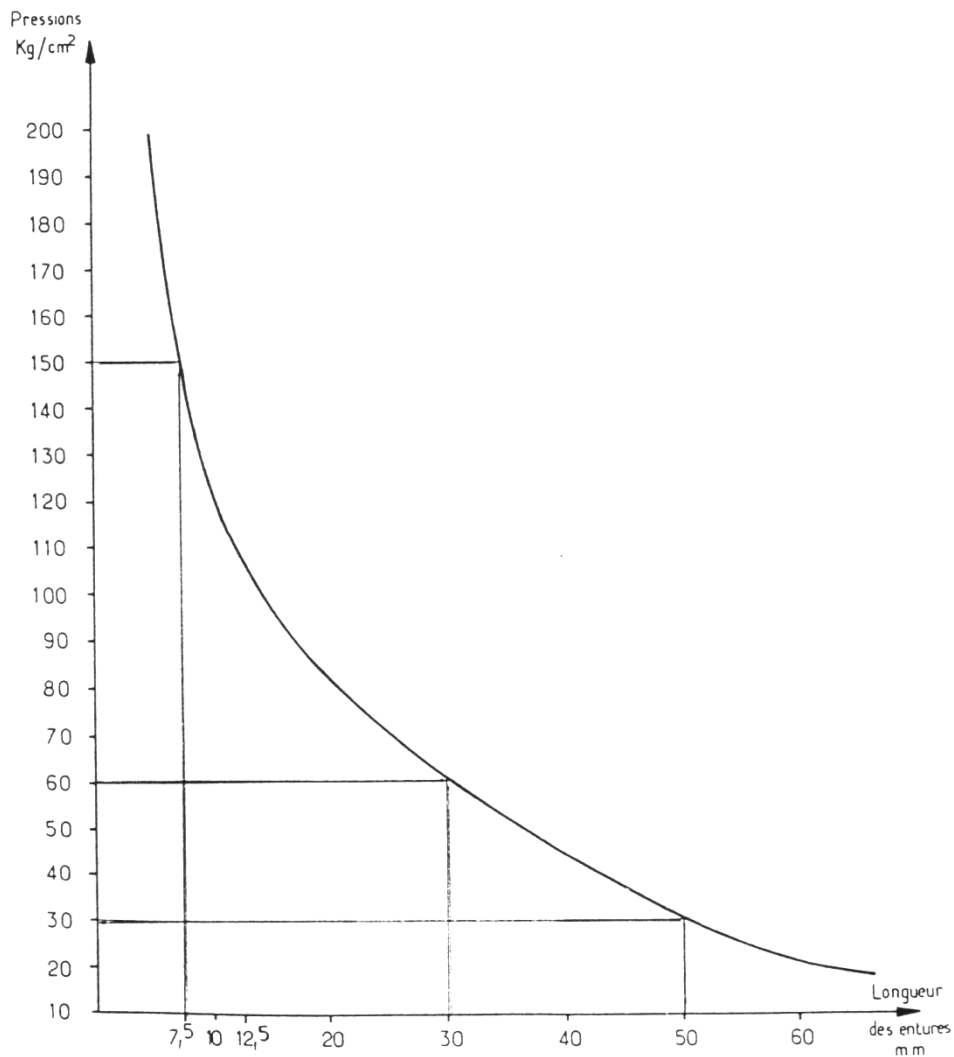


Figure 4 : Pressions de serrage en fonction de la longueur des entures

3.1.2. Les choix des adhésifs

Selon Jokerst (8), un adhésif apte au collage de pièces de bois peut techniquement être approprié au collage d'entures multiples. Par contre, l'utilisation finale de la pièce de bois déterminera si cet adhésif est approprié ou non. Par exemple, il indique que si une utilisation extérieure est envisagée, le choix des adhésifs est automatiquement limité au type résorcinol, phénol-résorcinol ou mélamine. Il indique également que la principale différence entre un adhésif de type résorcinol et un adhésif de type phénolique est la possibilité de durcir la colle à plus basse température. Il est par contre recommandé d'utiliser une température de 21°C ou plus pour les bois de résineux et une température encore plus élevée pour les feuillus. Un bois qui ne se prête pas bien au collage avec un certain type d'adhésif peut par contre mieux performer avec un autre. King & Chen (17) mentionnent qu'un adhésif utilisé dans la fabrication de bois abouté par entures multiples doit posséder un court temps de durcissement ainsi qu'une excellente résistance afin de tenir les pièces jointes ensemble afin et pouvoir ainsi effectuer de plus amples transformations.

Vrazel (18) et Sellers (19) étudièrent trois types d'adhésif sur l'aboutage de bois de Douglas, de Pin, et de Keruing. Ils ont obtenu les meilleures performances en traction et en flexion sur le bois de Keruing abouté avec un adhésif de type résorcinol-formaldéhyde que lors de l'utilisation des types polyuréthane combiné à un polymère en émulsion aqueuse et soja-résorcinol-formaldéhyde combiné. Les auteurs expliquent leurs résultats par le fait que le bois de Keruing est de plus grande densité (780 kg/m^3) que le Sapin-Douglas (550 kg/m^3) et le Pin du Sud (580 kg/m^3), et donc présente évidemment de meilleures propriétés mécaniques.

Labosky (20) a réalisé une autre étude ayant pour objectif de déterminer si les adhésifs utilisés pour les bois de résineux sont équivalents lors du collage de bois de feuillus. Le chêne, l'érable et le peuplier aboutés avec des adhésifs de type résorcinol formaldéhyde et phénol-résorcinol-formaldéhyde furent étudiés. Les deux types d'adhésif ont démontré des résultats satisfaisants pour l'aboutage du chêne et des résultats acceptables pour l'érable et le peuplier (des bois de plus faible densité que le chêne). Janowiak (3) ajoute que les adhésifs de type mélamine-formaldéhyde et résorcinol-formaldéhyde procurent des résultats équivalents lors de l'aboutage des trois bois de feuillus utilisés par Labosky (20) et qu'il n'y a pas d'avantage à utiliser un adhésif de type résorcinol, ce dernier étant plus cher.

À ce sujet, le Wood Handbook (21) mentionne que même si les adhésifs utilisés pour les résineux et les feuillus sont généralement différents chimiquement, les adhésifs utilisés doivent être conçus spécifiquement pour les résineux ou les feuillus (et propres aux essences) ou doivent posséder des propriétés ajustables en fonction de l'utilisation finale du produit. Qui plus est, Chui et Delahunty (22) indiquent que l'adhésif de types polyuréthane combiné à un polymère en émulsion aqueuse utilisé lors de leur étude sur l'érable ne semblait pas permettre d'atteindre le plein potentiel de l'aboutage par entures multiples de cette essence, possiblement parce que cet adhésif est formulé pour des bois résineux.

Ayarkwa et al (16) étudièrent les adhésifs de type isocyanate, résorcinol-formaldéhyde et mélamine-formaldéhyde pour l'aboutage de trois bois tropicaux. Il a été démontré que l'adhésif utilisé influence les résistances en flexion et en traction, mais influence peu les rigidités respectives. La performance des adhésifs semble liée à la densité du bois, présentant la meilleure efficacité dans le bois de basse densité (351 kg/m^3) et la pire efficacité dans le bois le plus dense (819 kg/m^3). L'adhésif de type mélamine-formaldéhyde a par contre mieux performé pour les bois de haute densité (677 kg/m^3 et 819 kg/m^3).

Mais de nos jours, les adhésifs de type polyuréthane sont très utilisés pour une variété d'applications structurales et non-structurales. Le bois abouté constitue un produit intéressant pour l'utilisation des adhésifs polyuréthanes. Ce type de colle offre de grandes possibilités étant donné que le processus de durcissement n'est pas limité par les mêmes conditions que les adhésifs phénoliques. L'humidité dans le bois ou dans l'air provoque le durcissement des adhésifs polyuréthanes sans avoir recours à aucun catalyseur ou aucune chaleur supplémentaire. Ces adhésifs ont alors été considérés comme une alternative pour l'aboutage du bois. Ayarkwa (16) a testé des colles de type isocyanate, résorcinol-formaldéhyde et mélamine-formaldéhyde pour l'aboutage de trois bois tropicaux. Le type d'adhésif isocyanate a

eu un effet significatif sur les propriétés de flexion et de traction. Les perspectives d'utilisation des isocyanates deviennent de plus en plus importantes puisqu'elles ont démontré une bonne capacité pour le collage du bois à des fins structurales.

Vrazel (18) a évalué la performance d'un système à base d'un polymère émulsifié et d'un prépolymère polyuréthane pour des applications de bois abouté et de poutrelles en I. Les performances mécaniques de cet adhésif furent de 10% à 25% plus élevées que celles des autres types d'adhésifs commerciaux. Une vitesse rapide de durcissement de l'adhésif, une excellente résistance mécanique et une bonne durabilité pour dix-neuf des applications à l'extérieur, sont quelques-uns des avantages que l'auteur a trouvés lors de son étude. Par ailleurs, il a évalué les effets de l'espèce, du type d'adhésif et de la température de durcissement sur la résistance et la durabilité du bois abouté structural. Bien que l'adhésif résorcinol-formaldéhyde ait eu une meilleure performance en flexion et en traction des trois adhésifs évalués, le système à base d'un polymère émulsifié et d'un prépolymère polyuréthane peut aussi être considéré comme un système très comparable à celui de type résorcinol-formaldéhyde.

Pour finir, certains principes fondamentaux sont à respecter notamment pour les aboutages de type structuraux. Molliard et Zearo (5) nous donnent ces principes :

- Obtenir des surfaces de coupe sans endommagement.
- Appliquer suffisamment d'adhésif pour chacune des entures afin de fournir un film continu dans l'interface de l'union.
- Mouiller chimiquement les deux surfaces pour les assembler.
- S'assurer que les surfaces aient un bon contact au moment du durcissement de l'adhésif.

3.1.3. Les entures

Une attention particulière doit être portée à l'usinage des entures afin de fournir de belles surfaces de collage. Ces dernières doivent être réalisées par les outils bien affûtés. D'après Sellers, de mauvaises conditions d'usinage entraînent des surfaces trop rugueuses ou trop lisses et endommagent les fibres de bois en surface. Ces mauvaises surfaces diminuent le mouvement de l'adhésif et augmentent la quantité d'adhésif requise lors de son application. Les bois denses, généralement difficiles à coller correctement, requièrent une surface lisse et non endommagée afin de fournir une adhésion performante. Plusieurs paramètres d'usinage doivent donc être contrôlés afin d'optimiser le procédé d'aboutage. Les paramètres d'usinage tels que l'avance par couteau, la vitesse de coupe, et l'angle d'attaque sont parmi ceux qui peuvent affecter le procédé et la qualité du produit. Il est donc important de suivre les recommandations données par les fabricants des outils et des machines.

3.1.4. L'avance par couteau

Selon Dagenais (23), l'avance par couteau est la quantité de bois enlevé par chaque couteau pour un tour de l'axe. Le calcul de l'avance par couteau permet de déterminer si les couteaux

sont trop sollicités dans les porte-outils et de fournir une référence sur la quantité de la force qui est appliquée à partir de chaque couteau sur le bois lui-même. À mesure que l'avance par couteau augmente, les couteaux font augmenter la pression et la chaleur exercées sur le bois. Ces deux facteurs augmentent la vitesse de l'usure sur la face de coupe des couteaux réduisant ainsi le délai entre les affûtages. Un accroissement de l'avance par couteau contribuera également à un excès de bois arraché en raison de la pression élevée exercée par l'outil. À mesure que l'avance par couteau diminue, la pression exercée par l'outil va diminuer et généralement la chaleur aussi. Si l'avance par couteau est trop faible, les couteaux froteront davantage et couperont moins efficacement. Ce frottement excessif fait que l'affûtage de l'arête tranchante se perd prématurément et peut causer assez de brûlures au bois en empêchant la pénétration de la colle. D'ailleurs, ce frottement exigera aussi des énergies de coupe importantes. La détermination de l'avance par couteau peut être exprimée selon la formule qui suit:

$$\text{Avance par couteau} = \frac{V_{\text{avance}}}{n \times N}$$

Avec:

- V_{avance} = vitesse d'avance
- n = nombre de couteaux
- N = vitesse de rotation (tr/min)

Il est à noter que les avances par couteau peuvent être comparées si la longueur et la géométrie du joint sont égales. Une plus grande longueur des dents du joint enlèvera plus de bois qu'un joint usiné avec la même avance par un couteau, mais ayant une longueur des dents plus courte.

ACEco Precision Wood Tooling recommande d'une part des avances par couteau entre 0,38mm et 0,53mm pour assurer une vie optimale à l'outil. Wisconsin Knife Works recommande d'autre part une valeur de 0,50mm.

3.1.5. La vitesse de coupe

La vitesse de coupe est la vitesse avec laquelle les couteaux passent à travers le bois. Elle est directement reliée à la vitesse de rotation des outils de coupe et au diamètre de coupe selon la relation trois suivante :

$$\text{Vitesse de coupe} = \frac{\pi \times D \times N}{1000}$$

Avec :

- N = vitesse de rotation (tour/min)
- D = diamètre du cercle de coupe du porte-outil (mm)

Le diamètre du cercle de coupe peut se définir comme étant le diamètre du porte-outil, allant jusqu'au bout des dents. Bustos (11) mentionne que la vitesse d'avance a un effet direct sur l'usure des outils de coupe. Une plus grande vitesse d'avance génère également une plus haute température à la surface du bois et réduit la durée de vie des outils. Cette vitesse est alors contrôlée par la dureté du matériau à usiner et par la qualité du métal constituant l'arête de coupe des outils.

Bustos (11) étudia l'effet des paramètres d'usinage sur la performance structurale de l'aboutage par entures multiples de l'épinette noire. La résistance en traction fut évaluée pour différentes vitesses d'avance par couteau et différentes vitesses de coupe. En général, elle a obtenu de faibles résistances en traction associées à des vitesses de coupe élevées, et ce pour les trois avances par couteau étudiées. Une vitesse de coupe plus élevée que 2932 m/min est déconseillée et une vitesse de coupe comprise entre 1676 et 2932 m/min semble produire des résultats satisfaisants pour les trois avances par couteau étudiées. Les meilleurs résultats ont été obtenus à une vitesse de coupe de 1676 m/min et une avance par couteau de 0,86mm. Compte tenu du fait que 1676 m/min était la plus petite vitesse de coupe étudiée, il n'est pas évident de savoir si une plus petite vitesse de coupe produirait de meilleurs résultats. Le tableau ci-dessous (Tableau 2) résume les différents paramètres d'usinage de recherches antérieures.

Tableau 2: Différents paramètres d'usinages des recherches antérieures

| Type | Essence | Densité (Kg/m ³) | Avance par couteau (mm) | Vitesse de rotation (tour/min) | Vitesse de coupe (m/min) | Vitesse d'avance (m/min) | Auteur(s) | | |
|----------|----------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|-------|-----------|
| Résineux | Épinette noire | 480 à 550 | 0,76 | 1100 à 3600 | 1403 à 4592 | 8,4 à 27,4 | Cossette | | |
| | | 437 | 0,64 | 1998 | 1676 | 7,7 | Bustos | | |
| | | | | 3495 | 2932 | 13,4 | | | |
| | | | | 4495 | 3770 | 17,3 | | | |
| | | | 0,86 | 1998 | 1676 | 10,3 | | | |
| | | | | 3495 | 2932 | 18,1 | | | |
| | | | | 4495 | 3770 | 23,2 | | | |
| | | | 1,14 | 1998 | 1676 | 13,7 | | | |
| | | | | 3495 | 2932 | 24,0 | | | |
| | | | | 4495 | 3770 | 30,9 | | | |
| | | 448 | 0,84 | 3500 | 3500 | 18,3 | | | |
| | | Feuillus | Érable | 719 | 0,71 | 3600 | 3020 | 15,24 | Verreault |

3.1.6. L'usure et l'entretien

Une meilleure résistance au cisaillement a été observée lors de l'utilisation de couteaux ayant peu d'usure. En effet, selon Hernandez et Naderi (24), les surfaces de collages peuvent être affectées négativement par la chaleur générée par la friction entre les couteaux et la surface du bois.

Reeb (25) évalua la qualité des joints par entures multiples après 4, 6 et 32 heures d'usure des couteaux. Il a utilisé du Pin de Ponderosa abouté à l'aide de joints horizontaux de type mâle-femelle et une pression d'assemblage de 1200 psi. Il a observé une relation directe entre la profondeur des cellules endommagées et le temps d'usure des couteaux. La surface de collage devient rugueuse et plus irrégulière lors d'une utilisation prolongée des couteaux. Il a été conclu que l'entretien des couteaux est une étape importante dans le but de produire des surfaces de collage de qualité.

3.2. Les propriétés du bois

Les propriétés du bois jouent un rôle important dans la réalisation des joints à entures multiples. En effet, l'habileté au collage d'un bois est directement liée à son humidité, à sa masse volumique, à ses singularités (nœuds, gerces, fil tranché, etc.), et à sa température.

3.2.1. L'humidité

Selon Jokerst (8), et comme pour tous collages, le bois utilisé pour l'aboutage doit être préalablement séché à une teneur en humidité adéquat à la colle. En effet, la teneur en humidité affecte les propriétés physiques et mécaniques du bois et par le fait même, son collage. Une fois collée, la pièce aboutée devrait avoir une humidité aussi proche que possible de celle requise en service afin de limiter au maximum les variations dimensionnelles après la mise en œuvre. Dans la plupart des cas, il faut essayer d'atteindre une humidité du bois comprise entre 6% et 16%. De plus, l'écart d'humidité entre deux pièces qui seront collées ensemble ne devrait pas dépasser 5%. Le problème majeur d'une mauvaise teneur en humidité du bois à abouter est de provoquer des défauts lors du pressage par hautes fréquences, utilisées principalement pour le durcissement des adhésifs phénol-résorcinol formaldéhyde. Lorsque l'humidité est supérieure à 15%, l'énergie des hautes fréquences est déviée vers les surfaces les plus humides plutôt que sur le joint lui-même. Ce phénomène peut entraîner de sérieux problèmes d'adhésion. La teneur en humidité du bois doit donc être contrôlée de façon à produire un collage le plus résistant. Il faut considérer également l'eau ajoutée par l'adhésif de manière à ce que l'humidité finale du produit soit celle requise en service (1).

Ngangué (26) a étudié l'impact de la teneur en humidité sur la performance mécanique des joints d'épinette noire collés avec du phénol-résorcinol formaldéhyde. Des paires de blocs de bois de même teneur en humidité ont été testés à 8%, 12%, 16% et 20% d'humidité. Des combinaisons de paires de blocs à différentes teneurs en humidité ont été également évaluées. L'écart de teneur en humidité entre les paires était de 0%, 4%, 8% et 12% d'humidité. Le pressage de blocs fut fait par hautes fréquences. La performance au collage a été évaluée à l'aide d'un essai de cisaillement à la ligne de colle. Une valeur optimale de 13,5% d'humidité fut obtenue pour les blocs de bois ayant une même teneur en humidité. Cependant, aucune différence significative n'a été observée de 8% à 20% de teneur en humidité. D'autre part, des différences significatives ont été observées lorsque la teneur en humidité variait entre les blocs. D'après Ngangué (26), une trop grande variation de la teneur en humidité fera que l'énergie

destinée à la cuisson de l'adhésif sera absorbée plutôt par le bois, en diminuant ainsi le taux de réticulation de la colle. Shuler (27) a indiqué que la performance mécanique en flexion de poutres d'épinette de l'Est a été affectée par la teneur en humidité des joints lors de l'aboutage. Plus tard, Shuler (27) a étudié le comportement du bois à entures multiples d'épinette de l'Est pour trois teneurs en humidité (8%, 12% et 14% H) et pour trois temps d'assemblage (10, 20 et 30 minutes), sur les propriétés de traction et de flexion avec un adhésif de type phénol-résorcinol formaldéhyde. Aucune différence appréciable n'a été notée pour les conditions d'assemblage, quoique les échantillons de basse teneur en humidité (8%) aient montré de faibles contraintes à la rupture en traction et en flexion.

3.2.2. La masse volumique et densité

La masse volumique varie beaucoup d'un bois à un autre, compte tenu de la différence de vide dans le bois ainsi que l'épaisseur de ses parois cellulaires. Un bois ayant une faible densité possède de minces parois cellulaires et un plus grand volume de cavités cellulaires, tandis qu'un bois de grande densité possède des parois cellulaires plus épaisses, mais des cavités cellulaires plus petites. La résistance d'un bois est directement reliée à la densité d'un bois dû au fait que des parois cellulaires épaisses sont plus résistantes que des parois cellulaires minces. Le Wood Handbook (21) stipule que la résistance d'un joint de colle augmente avec une densité allant jusqu'à 700 à 800 kg/m² (à une teneur en humidité de 12%), puis décroît ensuite. Sellers dans son étude sur l'effet du pH, de la perméabilité et de la densité sur les habilités au collage de bois de feuillus, mentionne que la densité fut le facteur prédominant quant à la résistance en cisaillement du plan de colle lors de l'utilisation d'adhésifs de types urée et résorcinol-phénol.

Les bois de haute densité et de faible porosité nécessite plus de temps d'assemblage (temps écoulé entre l'application de l'adhésif et l'application de la pression d'assemblage) afin de bien laisser pénétrer l'adhésif. De plus, la porosité du bois affecte également le temps de pression d'assemblage pour un adhésif qui durcit à partir de la migration et l'évaporation de son solvant.

Enfin, Ayarkwa et al. (16) étudièrent les adhésifs de type isocyanate, résorcinol-formaldéhyde et mélamine-formaldéhyde pour l'aboutage de trois bois tropicaux. Il a été démontré que la performance des adhésifs semble liée à la densité du bois, présentant la meilleure efficacité dans le bois de basse densité (351 kg/m³) et la pire efficacité dans le bois le plus dense (819 kg/m³). L'adhésif de type mélamine-formaldéhyde a par contre mieux performé pour les bois de haute densité (677 kg/m³ et 819 kg/m³). En effet, un bois plus dense nécessitera un adhésif moins visqueux, soit plus liquide, qui pénétrera plus rapidement et efficacement. Un bois moins dense permet une pénétration rapide même pour des adhésifs très visqueux.

3.2.3. Les singularités

Les nœuds jouent un rôle important sur les propriétés mécaniques du bois. Les pièces de bois jointées doivent alors être sélectionnées sans nœud pour éviter des amorces de rupture. Selon Bustos (11), leur influence est négligeable à l'axe neutre, même sur le comportement en

cisaillement. Sur la partie comprimée d'une semelle, leur influence est très inférieure à celle sur la partie en traction. Les amorces de rupture sont reliées à des anomalies dans les membrures, correspondant principalement à des nœuds. Une distance minimale entre le nœud et la base des entures est donc généralement exigée. Raknes (12) indique que cette distance est égale à trois fois le diamètre d'un nœud. Par ailleurs, Pellicane et al. (28) ont rapporté que les nœuds de 6mm à 13mm de diamètre ont diminué la résistance mécanique à la traction de bois abouté. Il faut donc éviter la présence des nœuds près des joints.

Un autre facteur important est la pente de fil. La résistance mécanique est très sensible aux variations de la pente du fil. Une augmentation de la pente peut causer une réduction significative de la résistance mécanique. Kollmann et Côté (29) ont constaté que la pente du fil a plus d'influence sur la résistance mécanique à la traction que sur celles en flexion et en compression. La pente du fil est donc un paramètre important à considérer lors de l'optimisation de l'aboutage du bois.

3.2.4. La température

La température du bois est une autre caractéristique qui peut influencer le collage du joint. Par exemple, elle peut modifier la viscosité de la colle utilisée. Une température basse peut impliquer un retard dans la prise de la colle tandis qu'une température élevée peut provoquer une diminution du temps de prise de la colle et activer le durcissement. La température du bois doit être supérieure à 18°C lorsque la colle est appliquée. Ceci nécessite un préchauffage du bois, du moins pour certaines régions du Canada et de la Scandinavie (Turgeon 1981 (30)). Sans préchauffage, un joint de phénol-résorcinol ou de résorcinol durcit à la température ambiante après 36 heures. Selon Turgeon (14) le bois froid ou gelé ne donne pas un joint satisfaisant, il est donc nécessaire de prévoir une surface d'entreposage suffisamment grande pour le bois dans les mois d'hiver. Raknes (12) indique qu'il est théoriquement possible d'abouter des bois indépendamment de leur température à condition qu'une chaleur suffisante soit introduite dans la zone d'union pour durcir la colle.

II. PRÉSENTATION DU SUJET ET DÉTAILS DES CHOIX EXPÉRIMENTAUX

1. Introduction

Le développement de bois massif abouté, appelé BMA, a permis l'utilisation des bois de petite section, épurés de leurs défauts. Il connaît une progression constante, donnant de multiples solutions pour la construction bois. Historiquement, aux Etats-Unis, les entures étaient réalisées sur les faces des bois. Ce choix est souvent dû à un critère esthétique concernant le produit fini.

Une première analyse a permis de caractériser un choix d'entures sur le chant, qui permettait de donner un aspect intéressant et esthétique sur la face. Le travail a été réalisé en ne prenant qu'un seul type d'entures et en utilisant du bois scandinave.

Le projet devra caractériser l'influence sur la résistance mécanique des bois d'une essence locale résineuse, ainsi que d'une caractérisation technique de l'assemblage : longueur des entures.

2. Objectifs de l'étude

En tenant compte des travaux antérieurs, réaliser des échantillons représentant les dimensions courantes de pièces de structure. Le choix de l'essence locale (Vosgiennes) se fera en collaboration avec un industriel. En se basant sur les essais de ces pièces dans les conditions industrielles, et en utilisant des longueurs d'entures différentes, définir des tests de résistance mécanique afin de donner des réponses simples et claires.

3. Choix expérimentaux

Les matériels à notre disposition étant limités nous avons dû adapter nos choix. En ce qui concerne le choix des essences locales, n'ayant pas réussi à établir le lien avec l'industriel, nous nous sommes intéressés à des essences déjà présentes à l'ENSTIB, à savoir le Pin sylvestre et l'Epicéa.

Ensuite, pour le choix des sections, nous avons opté pour une section carrée de 40x40 mm et une section rectangulaire de 20x40 mm. Nous avons essayé d'être au plus proche des sections industrielles tout en gardant à l'idée les capacités des matériels pour pouvoir effectuer les essais mécaniques.

Pour les entures, nous avons choisi 10mm et 25mm usinées avec les outils disponibles à l'ENSTIB.

Pour les autres choix, une explication plus complète vous sera apportée dans les détails du plan d'expérience.

III. LE PLAN D'EXPÉRIENCE

1. Présentation :

La méthode Taguchi est une méthode d'expérimentation tournée vers un usage industriel. Les essais sont réalisés en nombre réduit et tous les facteurs d'essais varient simultanément en suivant des plans préétablis fournis par des tables orthogonales choisies en fonction des objectifs. Elle permet, en particulier la fixation des paramètres de conception et de fabrication à partir d'essais réalisés sous la forme de plan d'expérience. De plus, cette méthode est recommandée pour réaliser des essais sur des process industriels où le coût et la durée des essais doivent être optimisés afin d'améliorer la qualité.

Deux critères de base sont à prendre en compte lors de l'utilisation d'une telle méthode. Le premier concerne la faculté des facteurs à être supprimés ou pas. Le second concerne la présence d'interactions entre les facteurs.

Tout d'abord, il est nécessaire d'intégrer l'expérience des personnes connaissant le sujet abordé. Ensuite, la conduite d'une démarche expérimentale doit être réalisée d'une manière rigoureuse et pertinente. On associe donc à la fois le savoir-faire et la démarche expérimentale.

2. Les facteurs :

Au vue du sujet en présence et des essais à réaliser, le plan d'expérience semble convenir parfaitement. L'objectif à atteindre est de pouvoir comparer deux à deux le plus grand nombre de facteurs tout en réalisant un nombre d'essais mécaniques limités. La mesure portera sur une résistance mécanique en flexion quatre points.

Après avoir effectué des recherches bibliographiques, nous nous sommes rendu compte que certaines études avaient déjà été réalisées sur la comparaison de différents facteurs. Par exemple, Molliard et Zearo(5) ont étudié l'influence de l'orientation et du positionnement des entures sur différentes sections de bois.

Après différentes réunions de travail avec M. Méausoone et M. Kremer, nous avons décidé de nous restreindre aux facteurs suivants (Figure 5) :

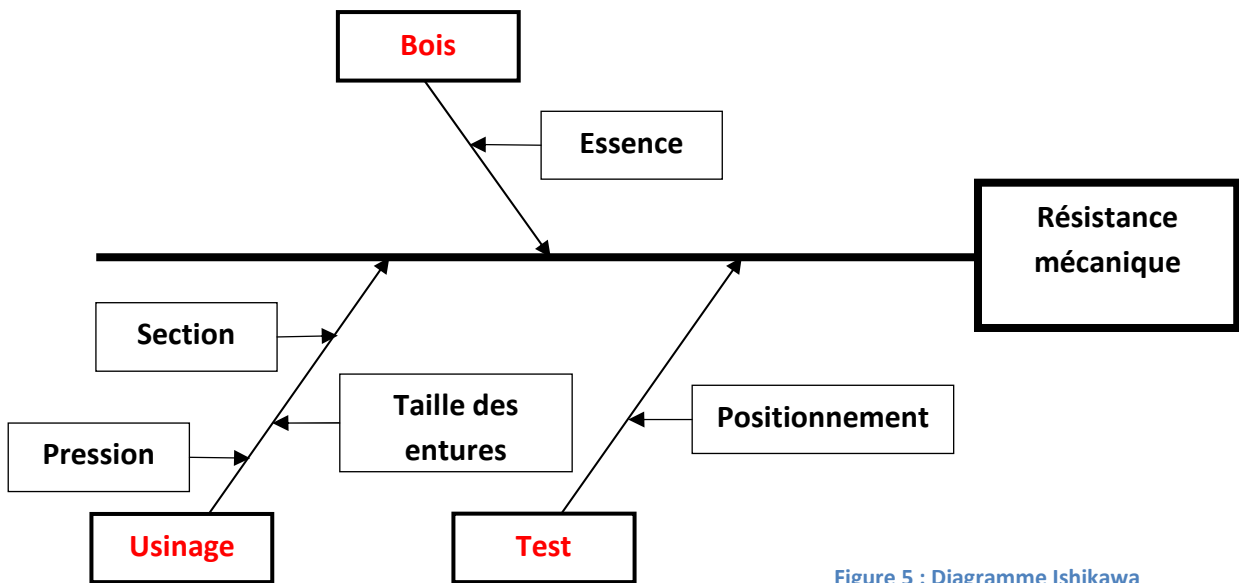


Figure 5 : Diagramme Ishikawa

On remarque ici, que tous ces facteurs sont maîtrisables, ou gérables. De plus une attention particulière sera portée aux différentes phases d'usinages et de tests afin d'éviter au maximum les bruits de facteurs non identifiés. En effet, les différentes machines d'usinage et la machine de test seront des sources inévitables de bruits.

3. Les modalités :

Les modalités sont les possibilités de positionnement du facteur gérable. Elles sont généralement composées de niveaux. Ces derniers représentent les valeurs que prend un facteur pour chaque modalité au cours des différents essais.

Voici les modalités retenues pour notre plan d'expérience (Tableau 3):

Tableau 3 : Détails des niveaux du plan d'expérience

| Facteurs | Niveau 1 | Niveau 2 |
|-----------------|---|--------------------------|
| Essence | Épicéa | Pin sylvestre |
| Pression | Valeur préconisée par le constructeur de la machine | 30% en moins |
| Taille d'enture | 10mm | 25mm |
| Section | Carré : 40*40 mm | Rectangulaire : 20*40 mm |
| Positionnement | Entures horizontales | Entures verticales |

Concernant la pression de serrage au collage, pour calculer la valeur préconisée par le constructeur, nous avons utilisé la Figure 6 situé sur l'abouteuse.

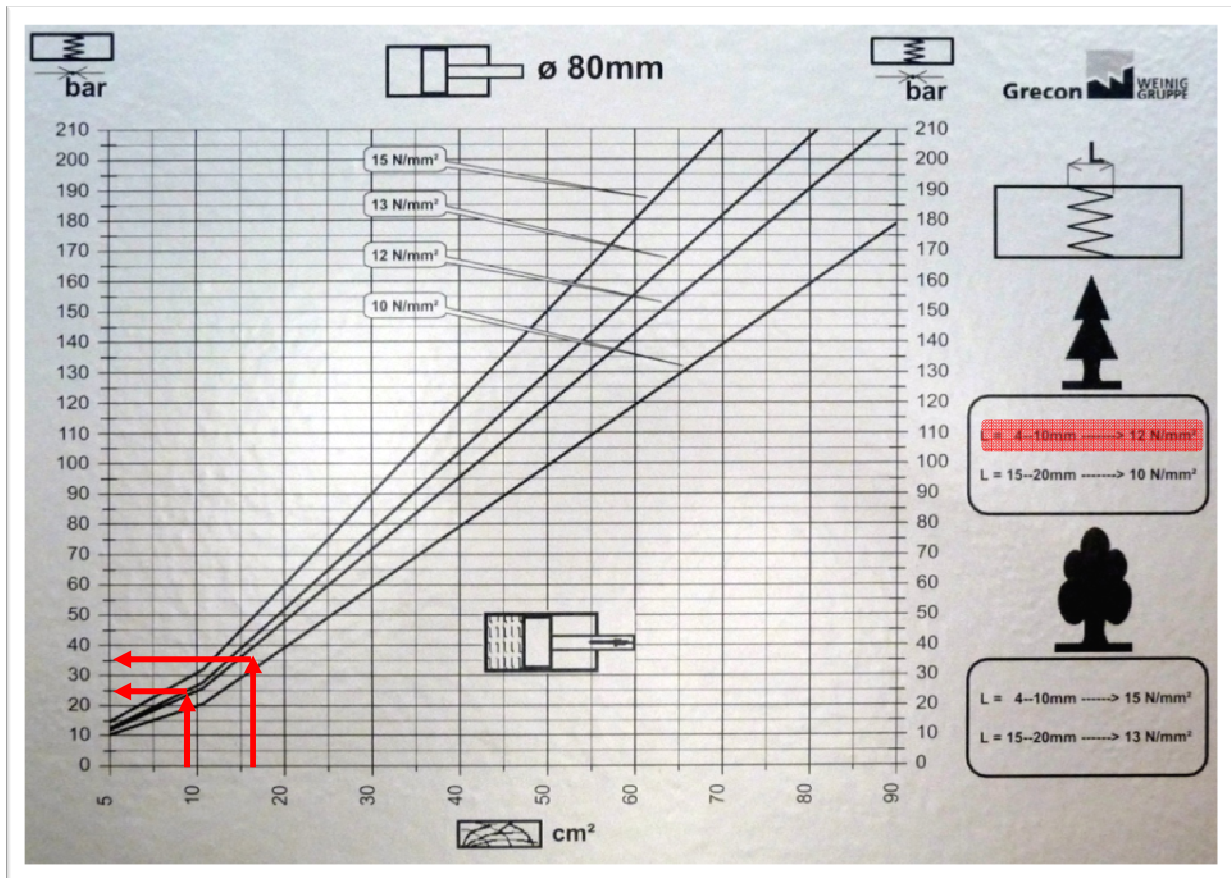


Figure 6 : Diagramme constructeur pour la pression de serrage au collage

Nous pouvons déduire de la Figure 6 les pressions de serrage au collage retenues pour le plan d'expérience (Tableau 4).

Tableau 4 : Pression de serrage au collage

| Section | 20x40 mm | 40x40 mm |
|---------------------------------|----------|----------|
| Pression constructeur | 25 bar | 35 bar |
| Pression constructeur moins 30% | 18 bar | 25 bar |

Nous avons utilisés la colle vinylique car elle est disponible en grande quantité à l'école. Cette colle est la plus utilisée en menuiserie et en ébénisterie classique du fait de ses nombreux avantages et de sa polyvalence. Même si cette colle n'est pas structurale, elle nous permettra de comparer les modalités de chaque facteur comme souhaité.

4. Les matrices :

Si on veut étudier ces cinq facteurs avec deux modalités par la méthode traditionnelle avec un plan complet, on obtient trente-deux expériences différentes à réaliser !

Par l'utilisation des plans d'expériences, on réduira d'une part le nombre d'expériences à réaliser, ici huit expériences pour cinq facteurs. Avec ces huit expériences on pourra évaluer les effets de ces facteurs ce qui donnerait théoriquement 128 expériences. De plus, on pourra modifier plusieurs facteurs lorsque l'on passe d'une expérience à l'autre, ce qui n'est pas pensable en approche cartésienne. Pour cela nous allons utiliser la matrice orthogonale.

La matrice est dite orthogonale si pour tout le plan d'expériences, à chaque niveau de l'un des facteurs, tous les niveaux de chacun des autres facteurs lui sont associés le même nombre de fois. Ou lorsqu'un facteur est à une modalité, tous les autres facteurs sont un même nombre de fois à toutes les modalités qu'ils peuvent avoir.

L'outil clé des plans Taguchi est le plan fractionnaire. Pour notre cas, nous allons utiliser la table L8 (2^7) suivante :

Tableau 5 : Table L8(27)

| N° \ Col | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

Figure 7 : Graphes linéaires

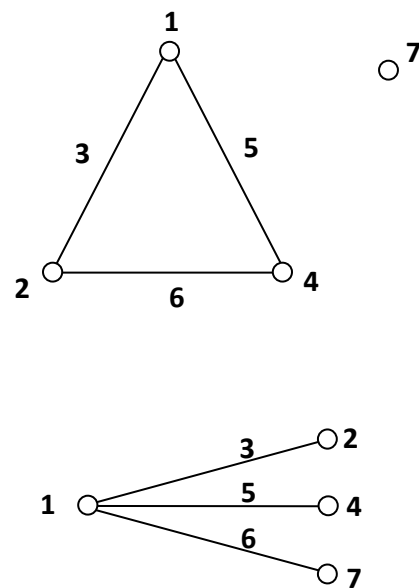


Figure 8 : Table des interactions

| N° \ Col | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|
| (1) | | 3 | 2 | 5 | 4 | 7 | 6 |
| (2) | | | 1 | 6 | 7 | 4 | 5 |
| (3) | | | | 7 | 6 | 4 | 4 |
| (4) | | | | | 1 | 2 | 3 |
| (5) | | | | | | 3 | 2 |
| (6) | | | | | | | 1 |
| (7) | | | | | | | |

5. Choix du plan d'expérience approprié :

Pour des raisons de simplicité, nous avons décidé de donner des abréviations pour nos facteurs et pour nos niveaux (Tableau 6):

Tableau 6 : Abréviations des facteurs et des niveaux

| Facteur bois | | Facteurs usinage | | | | | | Facteur essai | |
|--------------|-----|------------------|------|----------|------|---------|---------------|----------------|----------|
| Essence | | Taille d'enture | | Pression | | Section | | Positionnement | |
| Épicéa | Pin | 10mm | 15mm | Normale | -30% | carrée | rectangulaire | Horizontal | Vertical |
| E1 | E2 | T1 | T2 | Pr1 | Pr2 | S1 | S2 | Po1 | Po2 |

De plus nous avons retenu deux interactions, à savoir :

Interaction 1(IN1): Entre les facteurs « Taille d'entures » et « Essence ».

Interaction 2(IN2): Entre les facteurs « Taille d'entures » et « Pression ».

Nous en avons déduit la table suivante pour notre plan d'expérience (Tableau 7):

Tableau 7 : Tableau du plan d'expérience

| | T | E | IN1 | Pr | IN2 | S | Po |
|----------------|---|---|-----|----|-----|---|----|
| Série 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Série 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Série 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Série 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Série 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Série 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Série 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| Série 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

Remarque :

Chaque série est composée de 15 éprouvettes.

Pour les interactions, il est à noter le mode de fonctionnement. Par exemple, IN1 = 1 si T et D sont à des niveaux identiques. Si T et D sont à des niveaux différents, IN1= 2. Il en est de même pour IN2 avec ses facteurs.

IV. DÉROULEMENT DES ESSAIS

1. Réalisation des éprouvettes

Afin de réaliser les éprouvettes nécessaires à l'application du plan d'expérience, nous avons réalisé une procédure stricte en utilisant le circuit machine ci-dessous (Figure 9). De plus, afin de respecter la norme, des contrôles d'humidités et de températures ont été effectués afin de respecter la norme NF EN 385 (Aboutage à entures multiples dans les bois de construction – Exigences de performance et exigences minimales de fabrication).

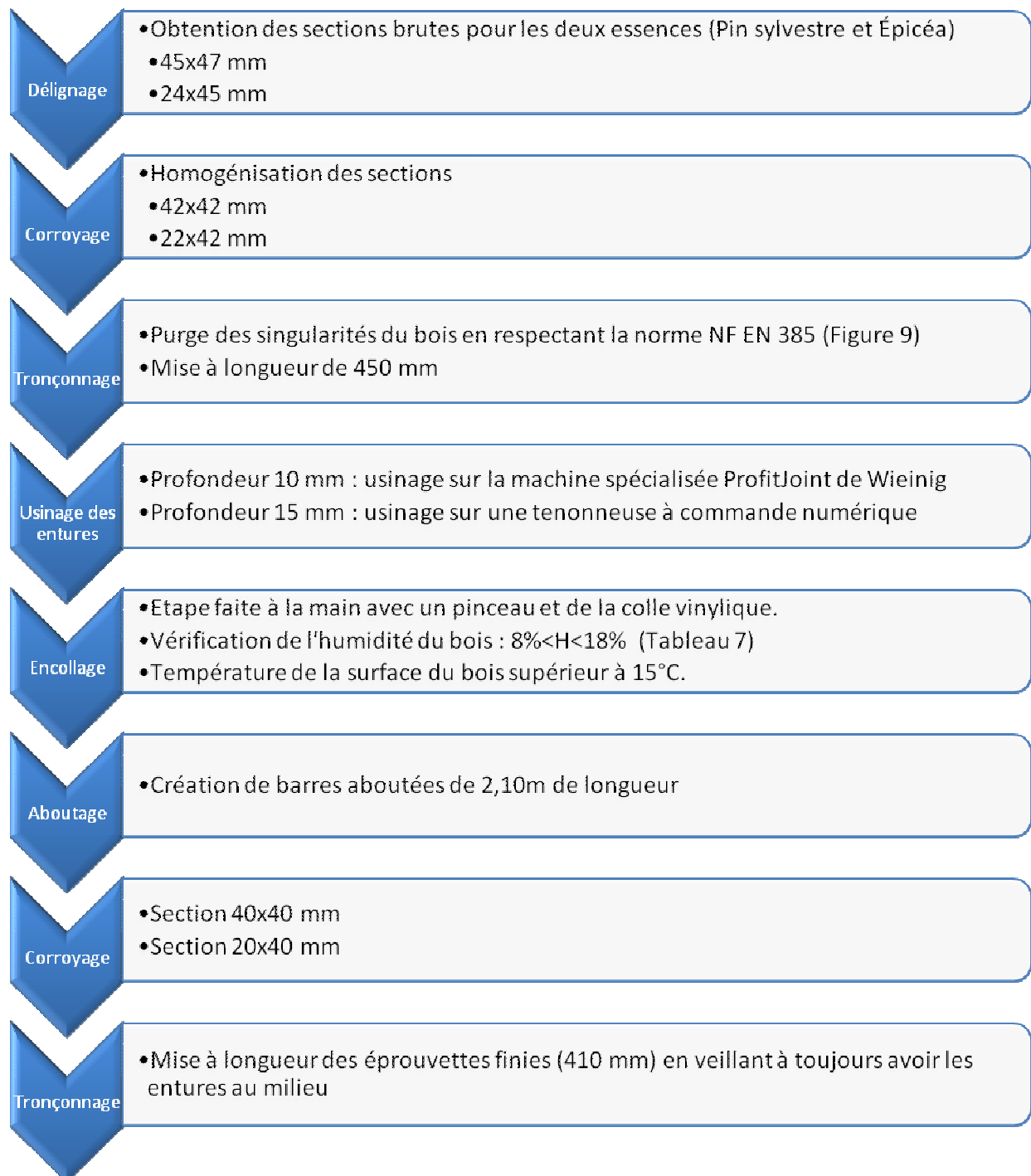


Figure 9 : Circuit machine utilisé pour la fabrication des éprouvettes

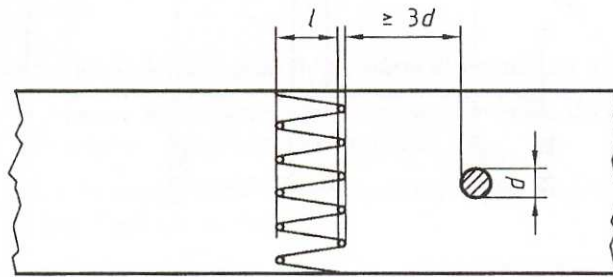


Figure 10 : Distance minimale entre l'extrémité du bois et un nœud (NF EN 385)

Tableau 8 : Humidité moyenne des éprouvettes (Détail en Annexe 2).

| Humidité | | | |
|-------------------------|-----------------------------|--------|--|
| | Essais du plan d'expérience | | Essais respectant intégralement la norme NF EN 408 |
| | Epicéa | Pin | Epicéa |
| Humidité moyenne | 8,35 % | 8,55 % | 8,60 % |

Afin de diminuer le bruit lors de la réalisation des éprouvettes, nous nous sommes imposés des règles supplémentaires :

- La personne qui encolle les éprouvettes au pinceau est toujours la même.
- Le temps entre l'usinage et le collage doit être inférieur à 2h.
- Un unique opérateur par type de machine.

2. Description des machines

Les machines utilisées ont été différentes suivant la longueur d'enture souhaitée.

En effet, pour les entures de 10mm de longueur nous avons utilisé la machine du groupe Weinig (Photo 1) spécialement conçue pour la réalisation d'aboutage. Alors que les entures de 25mm de longueur ont été réalisées sur une tenonneuse numérique (Photo 2) sur laquelle un outil à enturer a été monté.



Photo 1 : Entureuse ProfitJoint de la marque Weinig

Nous n'avons pas pu utiliser l'outil à enturer de 25mm sur la première machine car le diamètre d'alésage de l'outil était différent de celui de la machine.

Il est à noter que ces deux usinages étaient quelque peu différents, mais nous prenons comme hypothèse que les bruits induits sont englobés dans le facteur taille d'enture. Cela ne pose pas de problème pour la validité des plans d'expériences.

Chaque usinage étant différents, nous tenons à caractériser les avantages et les inconvénients de chaque machine (

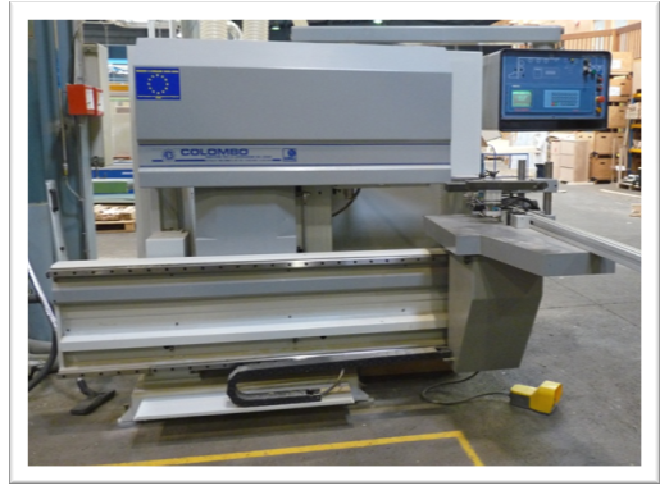


Photo 2 : Tenonneuse numérique

Tableau 9).

Tableau 9 : Avantages et inconvénients des deux machines à enturer

| Machines | ProfitJoint de Weinig | Colombo |
|--------------------------|--|---|
| Taille d'enture réalisée | 10 mm | 25 mm |
| Avantages | <ul style="list-style-type: none"> • Usinage de plusieurs pièces à la fois en fonction des dimensions de ces dernières. • Changement automatique de la hauteur de l'outil pour la réalisation des deux côtés de la pièce. • La machine est munie de peignes encolleurs. • Machine semi-automatique et ergonomique. | <ul style="list-style-type: none"> • Réglage très polyvalent. • Machine munie d'un pare-éclats. • Pas de limite en nombre de pièce pour lancer le cycle. |
| Inconvénients | <ul style="list-style-type: none"> • Il faut un nombre minimum de pièces pour pouvoir lancer un cycle. • Les réglages sont très limités. • Pas de pare éclats. | <ul style="list-style-type: none"> • Usinage d'une ou deux pièces à la fois. • Changement manuel du programme pour l'usinage des deux côtés de la pièce. |



Photo 3 : Abouteuse de la marque Weinig

Une fois les usinages réalisés, l'application de la colle a été effectuée manuellement. Dans l'industrie, afin de réduire les temps de production, cette opération pourrait être réalisée grâce aux peignes encolleurs.

Enfin l'assemblage est réalisé sur un centre de pressage (Photo 3) spécialement conçu

pour les pièces aboutées. Il est approvisionné manuellement par les pièces aboutées et encollées. La longueur des pièces n'est pas importante, en revanche, les pièces doivent avoir des sections identiques. Une fois le pressage réalisé, on obtient des barres de longueur fixe 2.10m.

3. Calculs théoriques préalables aux essais

Le but de cette partie est de prévoir la force à la rupture théorique pour une éprouvette de type C40 sans enture (cas défavorable). Ce résultat nous permettra de vérifier la capacité des machines d'essais et de mieux comprendre la répartition des efforts dans l'éprouvette lors de la sollicitation.

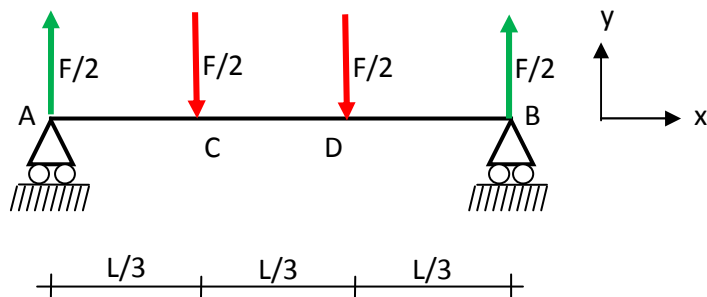


Figure 11 : Modélisation de la flexion 4 points

- PFS : Principe fondamental de la statique
D'après la symétrie des efforts et de la poutre (Figure 11): $Y_A = F / 2$ et $Y_B = F / 2$
- Torseurs :
 - Sur le segment AB : $\{T\} = \begin{cases} -F/2 \\ Fx/2 \end{cases}$
 - Sur le segment BC : $\{T\} = \begin{cases} 0 \\ Fa/2 \end{cases}$
 - Sur le segment CD : $\{T\} = \begin{cases} F/2 \\ \frac{F}{2(l-x)} \end{cases}$
- On en déduit le diagramme des efforts tranchants (Figure 12):

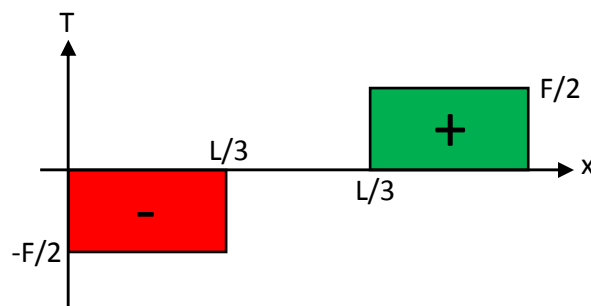


Figure 12 : Diagramme des efforts tranchants

- Moment fléchissant à la mi-portée : $M_{fz}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{FL}{6}$
- On a toutes les informations pour pouvoir tracer le moment fléchissant suivant x (Figure 13) :

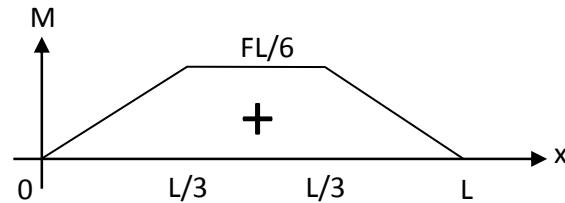


Figure 13 : Diagramme du moment fléchissant

- On calcule ensuite la force théorique de résistance à la flexion :

- $f_{m,k} = \frac{Mv}{I}$ avec :

$$M = M_{\max} = \frac{FL}{6} \quad , \quad v = \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad I = \frac{bh^3}{12}$$

- D'où : $f_{m,k} = \frac{FL}{bh^2}$

- En inversant, on obtient alors la force théorique de résistance à la flexion :

$$F = \frac{f_{m,k} \times b \times h^2}{L}$$

- Application numérique pour trouver la force maximale à appliquer pour la rupture d'une éprouvette de section 40x40 mm en résineux C40 avec un écart entre appuis de 360mm:

$$F = \frac{40 \times 40 \times 40^2}{360} = 7112N$$

Ce chiffre reste une indication bien que le calcul ait pris en compte des cas défavorables. En effet, au vu des dimensions réduites de nos éprouvettes, celle-ci sont exemptes de singularité et il se pourrait que l'on dépasse cette valeur.

4. Mode opératoire

Une fois les éprouvettes réalisées, nous les avons placées une semaine dans la salle d'essai conditionnée afin de les stabiliser. Ce temps nous a été imposé par le planning mais une nouvelle mesure de l'humidité nous a confirmé que cette dernière n'avait pas changée.

Dans un premier temps, on pensait impossible de réaliser des essais respectant la norme NF EN 408 comme le préconisait la norme NF EN 385. En effet, ce problème avait déjà été signalé dans un travail réalisé par Jules MOLLARD et Antoine ZEARO (5) anciens étudiants de l'ENSTIB. La distance entre les appuis des machines d'essais n'étant pas suffisante, nous avons choisi la procédure simplifiée pour casser nos éprouvettes plus courtes (Figure 14 ; Photo 4; Figure 15).

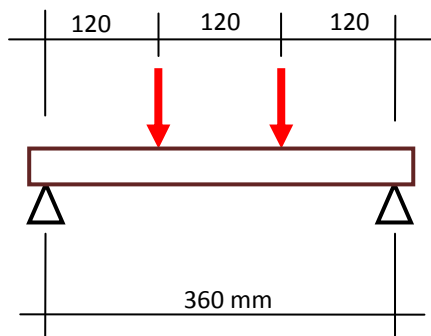


Figure 14 : Dispositif d'essai adapté

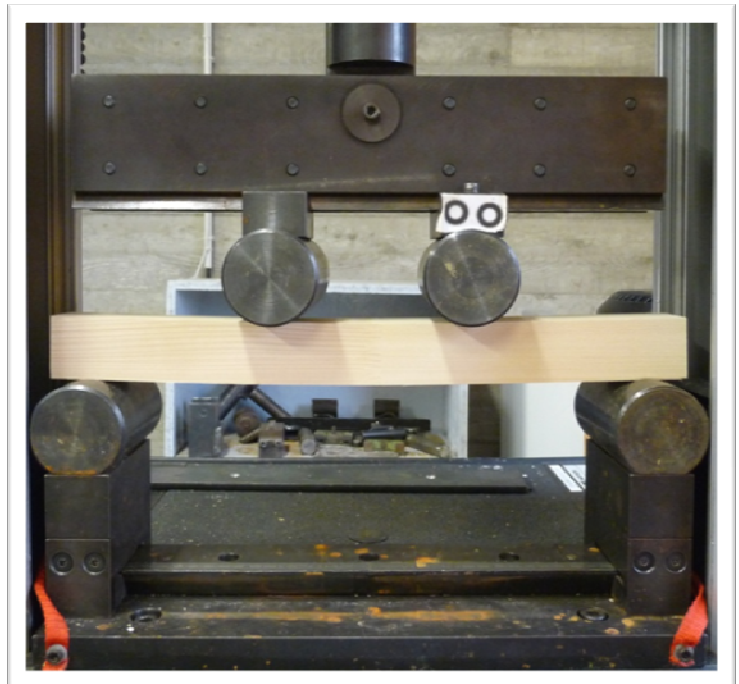


Photo 4 : Dispositif d'essai adapté

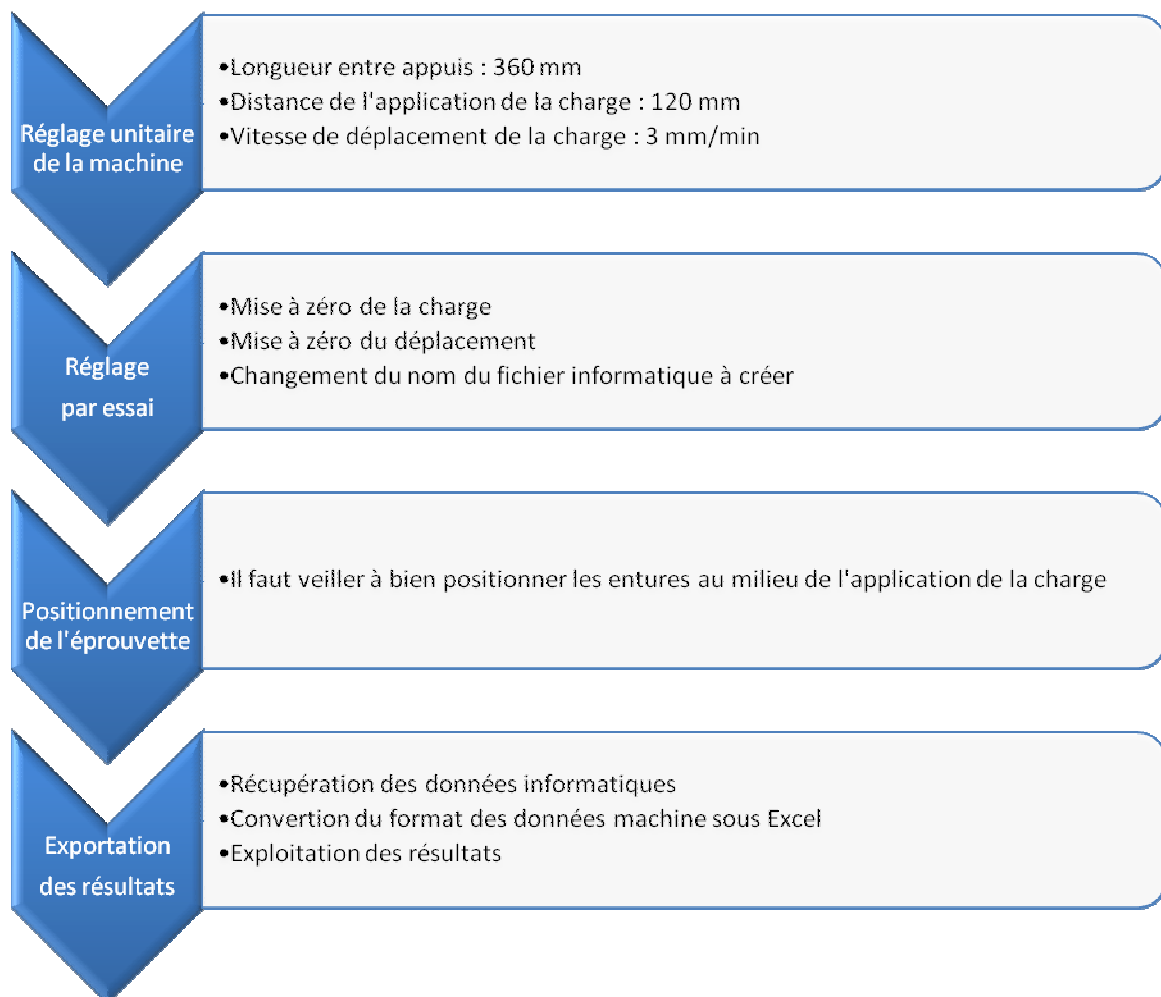


Figure 15 : Procédure des essais

5. Les différents modes de rupture

Pour l'ensemble des essais effectués à travers les deux plans d'expériences nous pouvons caractériser les modes de ruptures obtenus.

Rupture au niveau du joint de colle

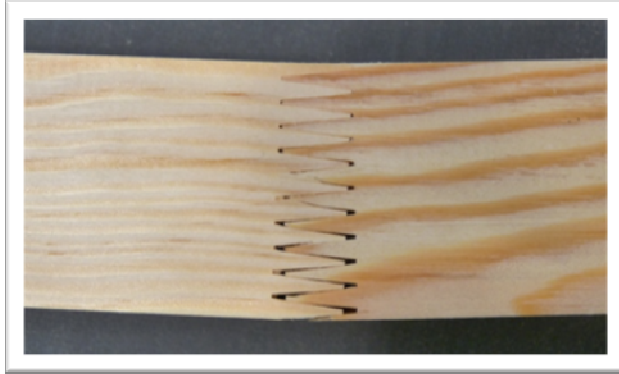


Photo 5 : Rupture dans le joint de colle

Ce mode de rupture a été souvent constaté lors du premier plan d'expérience avec les points entre appuis plus courts que ceux prescrits par la norme. La photo ci-contre (Photo 5) montre une rupture survenue lors d'un essai avec le positionnement des entures horizontales. Mais nous avons également pu constater ce mode de rupture

lorsque les entures étaient positionnées verticalement.

La rupture de bloc

Ce mode de rupture est survenu principalement lorsque les entures étaient positionnées horizontalement. Il s'accompagne généralement d'une rupture au niveau du joint de colle, sur une partie du joint, comme le montre la photo ci-contre (Photo 6).



Photo 6 : Rupture de bloc

Rupture par arrachement des fibres



Photo 7 : Rupture par arrachement des fibres

Comme on peut le deviner sur la photo ci-contre (Photo 7), la traction transversale entraîne la rupture par arrachement des fibres. Ce mode de rupture est celui constaté lors d'un essai en flexion quatre points d'une éprouvette non aboutée. Nous avons pu constater qu'il est survenu majoritairement lors des essais du second plan d'expérience respectant la norme.

Autres cas de rupture



Parfois la rupture a eu lieu hors du joint de colle, cela s'est produit très rarement. Généralement cela concernait des éprouvettes avec des défauts, mais pas toujours comme on peut le constater sur la photo ci-contre (Photo 8).

Photo 8 : Rupture hors du joint de colle

6. Analyses visuelles des éprouvettes rejetées par le test de Dixon :

Il est tout d'abord nécessaire de dissocier les éprouvettes rejetées car leur effort à la rupture était trop important, et celle, à l'inverse, dont l'effort à la rupture était trop faible.

Tableau 10 : Epreuves rejetées par le test de Dixon suite à une force à la rupture trop basse

| Epreuve 3-10 | Epreuve 4-14 | Epreuve 2b-4 |
|---|--|---|
| 3,08 kN | 6,40 kN | 7,83 kN |
|  |  |  |

Le Tableau 10 regroupe les éprouvettes qui ne respectent pas le test de Dixon, de par leur effort à la rupture trop faible. Les deux premières éprouvettes ne semblent pas avoir de défaut, tel que des nœuds, des poches de résine, ou du contrefil. En revanche, l'éprouvette 2b-4 possède des défauts liés à l'usinage. Après vérification de sa section, nous mesurons 39x38mm au lieu de celle prévue de 40x40mm. Cette erreur est liée à la phase de corroyage après collage. Il est à noter que seule cette éprouvette a eu ce type de problème sur toutes celles testées.

Tableau 11 : Epreuves rejetées par le test de Dixon suite à une force à la rupture trop haute

| Epreuve 8-9 | Epreuve 8-13 |
|---|--|
| 15,97 kN | 16,03 kN |
|  |  |

Seules les deux éprouvettes présentes dans le tableau ci-dessous ont été écartées par le test de Dixon car leur valeur était trop importante. De plus, ces deux éprouvettes ont été testées avec une position des entures verticale. De plus, c'est deux éprouvettes sont en Pin sylvestre et nous supposons que les valeurs trouvées sont directement liées à la densité du bois que nous étudierons dans une partie ultérieure.

V. EXPLOITATION DES RÉSULTATS PAR LA MÉTHODE TAGUCHI

1. Recherche des valeurs aberrantes par le test de DIXON

Le plan d'expérience de Taguchi nous a imposé huit séries d'essais différents. Nous avons ensuite testé seize éprouvettes par série.

Afin de pouvoir exploiter les résultats obtenus, il convient d'écartier les valeurs aberrantes pour la suite des calculs proposés par la méthode Taguchi. Pour cela, nous avons utilisé le test de DIXON sur les huit séries.

Principe du test de DIXON sur un exemple:

Soit la série n°8 suivante :

| Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 | Essai 4 | Essai 5 | Essai 6 | Essai 7 | Essai 8 | Essai 9 | Essai 10 | Essai 11 | Essai 12 | Essai 13 | Essai 14 | Essai 15 | Essai 16 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 14,38 | 14,42 | 13,01 | 14,08 | 11,94 | 13,84 | 14,04 | 15,97 | 13,27 | 13,3 | 16,03 | 13,35 | 13,71 | 12,64 | 13,16 | 13,01 |

- Etape 1 :

On classe la série par ordre croissant tel que X_1 soit le plus petit résultat et X_n le plus grand.

| X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} | X_{12} | X_{13} | X_{14} | X_{15} | X_{16} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 11,94 | 12,64 | 13,01 | 13,01 | 13,16 | 13,27 | 13,3 | 13,35 | 13,71 | 13,84 | 14,04 | 14,08 | 14,38 | 14,42 | 15,97 | 16,03 |

- Etape 2 :

On cherche à savoir si X_1 ou X_n sont des valeurs aberrantes. Pour cela, on va calculer le r_{\min} et le r_{\max} et les comparer à la table de Dixon. Si la valeur obtenue est inférieure à celle de la table, le résultat n'est pas aberrant.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Pour } 3 \leq n \leq 7: & r_{\min} = \frac{X_2 - X_1}{X_n - X_1} \quad \text{et} \quad r_{\max} = \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_1} \\
 \text{Pour } 8 \leq n \leq 10: & r_{\min} = \frac{X_2 - X_1}{X_{n-1} - X_1} \quad \text{et} \quad r_{\max} = \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_2} \\
 \text{Pour } 11 \leq n \leq 13: & r_{\min} = \frac{X_3 - X_1}{X_{n-1} - X_1} \quad \text{et} \quad r_{\max} = \frac{X_n - X_{n-2}}{X_n - X_2} \\
 \text{Pour } 14 \leq n \leq 20: & r_{\min} = \frac{X_3 - X_1}{X_{n-2} - X_1} \quad \text{et} \quad r_{\max} = \frac{X_n - X_{n-2}}{X_n - X_3}
 \end{array}$$

Ici, nous nous situons pour $14 \leq n \leq 20$ avec un $n=16$.

$$\text{On a alors : } r_{\min} = \frac{13,01 - 11,94}{14,42 - 11,94} = 0,43 \text{ et } r_{\max} = \frac{16,03 - 14,42}{16,03 - 13,01} = 0,53$$

Tableau 12 : Table de Dixon

| n | 10% | 5% | 1% |
|----|-------|-------|-------|
| 3 | 0,886 | 0,941 | 0,988 |
| 4 | 0,679 | 0,765 | 0,889 |
| 5 | 0,557 | 0,642 | 0,780 |
| 6 | 0,482 | 0,560 | 0,698 |
| 7 | 0,434 | 0,507 | 0,63 |
| 8 | 0,479 | 0,554 | 0,683 |
| 9 | 0,441 | 0,512 | 0,635 |
| 10 | 0,409 | 0,477 | 0,597 |
| 14 | 0,492 | 0,546 | 0,641 |
| 15 | 0,472 | 0,525 | 0,616 |
| 16 | 0,454 | 0,507 | 0,595 |
| 17 | 0,438 | 0,490 | 0,577 |
| 18 | 0,424 | 0,475 | 0,561 |
| 19 | 0,412 | 0,462 | 0,547 |
| 20 | 0,401 | 0,450 | 0,535 |

On fait le choix d'un risque à 5% (soit un $\alpha=0,05$).

On a alors $r_{\min} < 0,507$ (Tableau 12) mais $r_{\max} > 0,507$. Cela signifie que la valeur la plus élevée de notre série est aberrante d'après le test de Dixon.

On recommence alors le test pour les quinze autres essais de la série jusqu'à ce qu'on obtienne un r_{\min} et un r_{\max} vérifiant les valeurs de la table de Dixon. Cette fois, pour $n=15$, on prendra la valeur 0,525 à vérifier.

Au final, après deux boucles de test de Dixon plus une autre de vérification, nous avons considéré les essais 8 et 11 comme aberrants pour la série n°8 :

| Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 | Essai 4 | Essai 5 | Essai 6 | Essai 7 | Essai 8 | Essai 9 | Essai 10 | Essai 11 | Essai 12 | Essai 13 | Essai 14 | Essai 15 | Essai 16 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 14,38 | 14,42 | 13,01 | 14,08 | 11,94 | 13,84 | 14,04 | 15,97 | 13,27 | 13,3 | 16,03 | 13,35 | 13,71 | 12,64 | 13,16 | 13,01 |

Après avoir recherché toutes les valeurs aberrantes dans nos huit séries d'essais, nous obtenons le tableau suivant (Tableau 13):

Tableau 13 : Résultats des essais après élimination des valeurs aberrantes

| Résultats des expériences (kN) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Série 1 | 9,77 | 8,39 | 7,47 | 8,52 | 7,38 | 7,31 | 10,06 | 13,05 | 9,41 | 10,84 | 12,70 | 11,58 | 14,27 | 12,05 | 6,82 | 11,75 |
| Série 2 | 2,68 | 1,93 | 2,65 | 2,56 | 2,66 | 2,64 | 2,08 | 2,38 | 2,30 | 2,25 | 2,15 | 2,16 | 2,68 | 2,14 | 2,22 | 2,13 |
| Série 3 | 4,38 | 4,13 | 3,97 | 3,93 | 3,65 | 3,71 | 3,52 | 4,16 | 3,80 | 3,08 | 4,00 | 4,14 | 3,86 | 3,80 | 3,67 | 4,12 |
| Série 4 | 12,01 | 11,78 | 10,94 | 10,70 | 13,98 | 14,05 | 12,76 | 11,65 | 9,16 | 10,95 | 11,61 | 13,34 | 6,40 | 12,87 | 12,81 | 15,99 |
| Série 5 | 14,34 | 12,57 | 12,63 | 13,01 | 12,12 | 13,28 | 12,01 | 10,96 | 13,76 | 11,38 | 13,19 | 13,67 | 11,49 | 12,11 | 10,90 | 11,02 |
| Série 6 | 3,40 | 4,21 | 4,24 | 3,91 | 4,96 | 3,63 | 3,86 | 4,79 | 3,92 | 5,51 | 3,74 | 3,77 | 4,75 | 3,52 | 4,24 | 5,15 |
| Série 7 | 6,08 | 7,74 | 7,16 | 7,86 | 7,45 | 7,47 | 7,77 | 8,17 | 6,92 | 8,21 | 4,81 | 5,10 | 4,84 | 5,31 | 7,04 | 7,31 |
| Série 8 | 14,38 | 14,42 | 13,01 | 14,08 | 11,94 | 13,84 | 14,04 | 15,97 | 13,27 | 13,30 | 16,03 | 13,35 | 13,71 | 12,64 | 13,16 | 13,01 |

2. Interprétation des résultats selon la norme NF EN 408

Norme NF EN 408 : Bois de structure et bois lamellé-collé. Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques.

D'après la norme, la résistance à la flexion est déterminée par: $f_m = \frac{3 \times F \times a}{b \times h^2}$

| | | |
|---|--|------|
| F | Force mesurée | (N) |
| a | Distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche dans un essai de flexion | (mm) |
| b | Largeur de la section transversale | (mm) |
| h | Hauteur de la section transversale | (mm) |

On applique alors ce calcul pour avoir la résistance à la flexion pour chaque valeur en tenant compte de l'orientation de l'éprouvette lors de l'essai (Tableau 14).

Tableau 14 : f_m : résistance à la flexion

| f_m : résistance à la flexion (N/mm ²) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| Série 1 | 54,96 | 47,19 | 42,02 | 47,93 | 41,51 | 41,12 | 56,59 | 73,41 | 52,93 | 60,98 | 71,44 | 65,14 | 80,27 | 67,78 | 38,36 | 66,09 | |
| Série 2 | 60,30 | 43,43 | 59,63 | 57,60 | 59,85 | 59,40 | 46,80 | 53,55 | 51,75 | 50,63 | 48,38 | 48,60 | 60,30 | 48,15 | 49,95 | 47,93 | |
| Série 3 | 98,55 | 92,93 | 89,33 | 88,43 | 82,13 | 83,48 | 79,20 | 93,60 | V.A. | 69,30 | 90,00 | 93,15 | 86,85 | 85,50 | 82,58 | 92,70 | |
| Série 4 | 67,56 | 66,26 | 61,54 | 60,19 | 78,64 | 79,03 | 71,78 | 65,53 | 51,53 | 61,59 | 65,31 | 75,04 | V.A. | 72,39 | 72,06 | 89,94 | |
| Série 5 | 80,66 | 70,71 | 71,04 | 73,18 | 68,18 | 74,70 | 67,56 | 61,65 | 77,40 | 64,01 | 74,19 | 76,89 | 64,63 | 68,12 | 61,31 | 61,99 | |
| Série 6 | 30,15 | 21,71 | 29,81 | 28,80 | 29,93 | 29,70 | 23,40 | 26,78 | 25,88 | 25,31 | 24,19 | 24,30 | 30,15 | 24,08 | 24,98 | 23,96 | |
| Série 7 | 49,28 | 46,46 | 44,66 | 44,21 | 41,06 | 41,74 | 39,60 | 46,80 | 0,00 | 34,65 | 45,00 | 46,58 | 43,43 | 42,75 | 41,29 | 46,35 | |
| Série 8 | 80,89 | 81,11 | 73,18 | 79,20 | 67,16 | 77,85 | 78,98 | V.A. | 74,64 | 74,81 | V.A. | 75,09 | 77,12 | 71,10 | 74,03 | 73,18 | |

3. Analyse du plan d'expérience

Une fois les valeurs aberrantes supprimées et la résistance à la flexion déterminée, nous pouvons commencer l'étude des résultats du plan d'expérience.

Tout d'abord, nous réalisons la moyenne de chaque série (Tableau 15):

Tableau 15 : Moyenne de chaque série

| Série 1 | Série 2 | Série 3 | Série 4 | Série 5 | Série 6 | Série 7 | Série 8 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 56,73 | 52,89 | 88,46 | 69,23 | 69,76 | 26,44 | 40,87 | 75,60 |
| Moyenne des moyennes de chaque série = 60,00 | | | | | | | |

Puis l'astuce trouvée par Taguchi est de réaliser, pour chaque facteur, la moyenne des moyennes de chaque série, pour un niveau choisi (ici nous prendrons 1). Enfin nous soustrayons à cette moyenne, la moyenne des moyennes des 8 séries. La valeur obtenue correspond à l'effet du niveau 1 pour le facteur.

Par exemple, pour le facteur E (Essence) le calcul devient :

$$M_E = \frac{56,73 + 52,89 + 69,76 + 26,44}{4} - 60,00 = -8,54 \text{ N/mm}^2$$

Nous en déduisons les effets des facteurs (Tableau 16):

Tableau 16 : Effets des facteurs

| Facteurs influents | | | | | | |
|--------------------------|--------------|-----------------|--|------------------|---------------------------------|--|
| T Taille d'entures | E Essence | IN1 = T et E | Pr Pression de serrage au collage | IN2 = T et Pr | S Section de l'éprouvette | Po Position des entures lors de l'essai |
| Effets des facteurs | | | | | | |
| 6,83 | -8,54 | -3,48 | 3,96 | 1,81 | 7,83 | -11,68 |

Pour mieux analyser l'importance des effets de chaque facteur, le graphe des effets devient un outil indispensable.

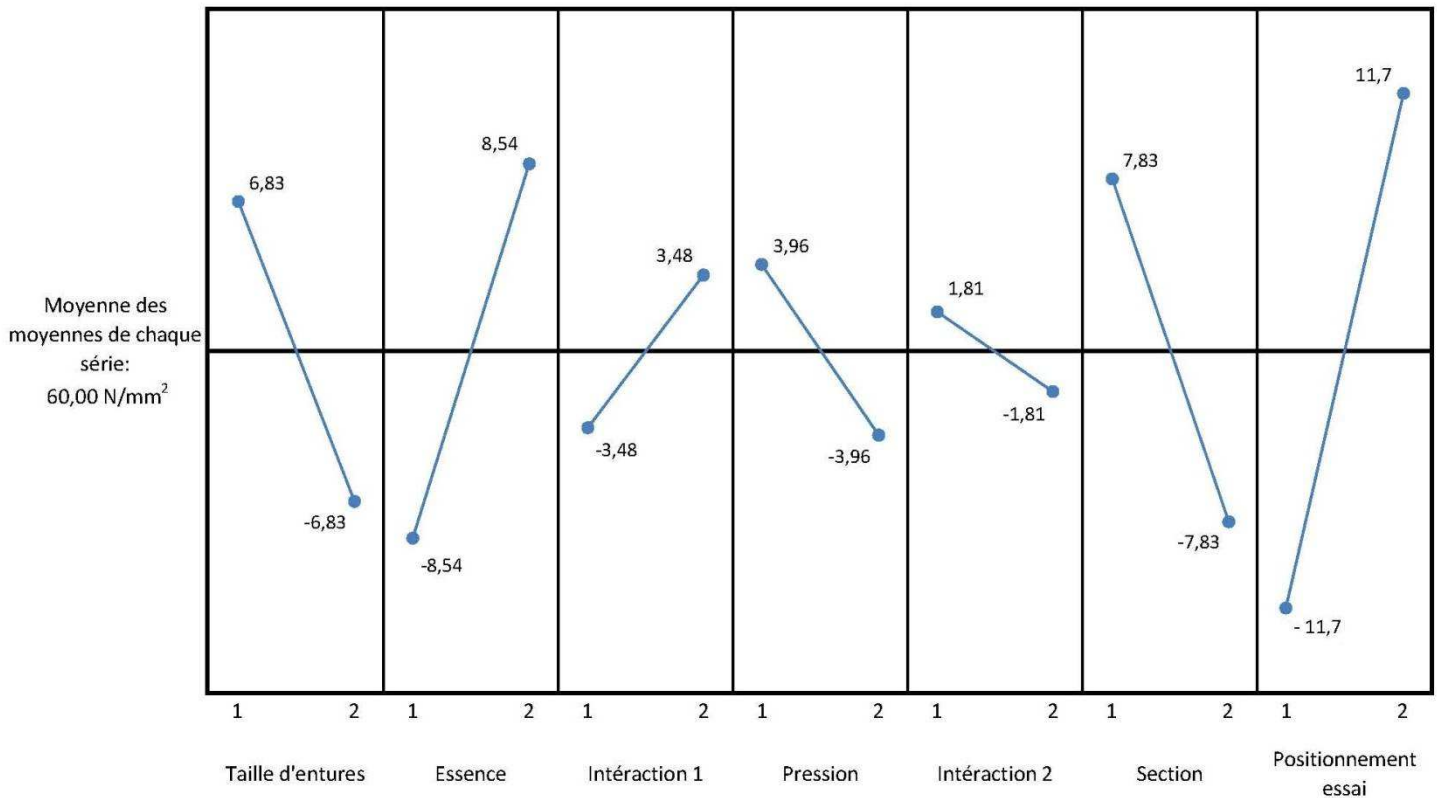


Figure 16 : Graphe des effets

Notre objectif étant d'obtenir la meilleure résistance en flexion, nous retiendrons tout d'abord une taille d'enture de 10mm et le Pin sylvestre comme essence. Leurs effets sont en accord avec notre objectif.

L'interaction considérée lors de nos hypothèses joue un rôle significatif. La logique voudrait que l'on choisisse le niveau 2, avec un effet positif. Ce choix est de plus en accord avec les deux choix précédents.

Le facteur « Pression de serrage au collage », nous retenons le niveau 1 correspondant à la valeur préconisée par le constructeur. De plus, concernant l'interaction 2, entre ce facteur et le facteur « Taille d'entures », nous obtenons encore un effet positif.

Enfin, les deux derniers facteurs sont libres. Le facteur « Section » est celui qui influe le plus sur notre objectif comme on pouvait s'y attendre. Nous retenons donc la section carrée de 40x40mm. Pour finir, concernant l'effet « Positionnement des entures lors de l'essai », nous retenons le niveau 2 correspondant aux entures verticales.

Ainsi, si l'on ajoute à la moyenne des moyennes de chaque série l'effet de chacun des facteurs testés, nous pouvons atteindre la valeur de rupture suivante :

$$F = 60,00 + 6,83 + 8,54 + 3,48 + 3,96 + 7,83 + 11,7 = 104,15 \text{ kN}$$

4. Vérification des résultats

4.1. Essais de vérifications

Afin de contrôler l'exactitude de nos résultats, notamment de la valeur théorique calculée précédemment, une série de huit éprouvettes a été réalisée en prenant en compte les niveaux retenus pour chaque facteur.

Les huit éprouvettes réalisées sont donc en Pin sylvestre et les entures sont de 10mm de longueur. La section est carrée, à savoir 40x40 mm, et la pression lors du collage est celle préconisée par le constructeur. Enfin elles ont été testées avec un positionnement des entures vertical.

| Série de vérification | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| F : force mesurée (kN) | | | | | | | | |
| 12,21 | 13,32 | 14,12 | 13,28 | 14,48 | 13,15 | 13,86 | 10,64 | |
| Test de Dixon pour un risque de 5% | | | | | | | | |
| 10,64 | 12,21 | 13,15 | 13,28 | 13,32 | 13,86 | 14,12 | 14,48 | |
| D'après le test de Dixon, aucune valeur n'est considérée comme aberrante. | | | | | | | | |
| R_{min} | | | | | | | | R_{max} |
| 0,45 | | | | | | | | 0,16 |
| Pour 8 essais : 0,554 | | | | | | | | |
| f_m : résistance à la flexion (N/mm²) | | | | | | | | |
| 68,68 | 74,93 | 79,43 | 74,70 | 81,45 | 73,97 | 77,96 | 59,85 | |
| Moyenne | | | | | | | | |
| 73,87 | | | | | | | | |

Tableau 17 : Essais de vérification du plan d'expérience

La moyenne obtenue est très éloignée de celle déduite du plan d'expérience. Ayant respecté ce dernier à la lettre et évité au maximum les bruits lors de l'usinage des éprouvettes ou lors de la réalisation des essais mécaniques, nous pensons que cet écart provient des caractéristiques propres du bois.

4.2. Recherche des causes possibles

Tout d'abord, il est à noter que l'humidité du bois n'est pas responsable de cet écart. En effet les plateaux à partir desquels ont été réalisées les éprouvettes étaient stockés depuis plusieurs semaines dans les racks de la halle de l'école. Le bois a donc largement eu le temps de se stabiliser. De ce fait, les essais d'humidité effectués confirment cette hypothèse, avec une humidité quasi constante pour nos différents lots (Tableau 8). Le problème provient d'ailleurs.

Nous avons cherché à vérifier que l'espèce du bois était bien la même dans les deux séries d'essais. En effet, il y a simplement écrit « Pin » sur les racks de l'école. Or il existe plus d'une centaine d'espèces différentes pour le genre Pin. Nous avons donc effectué une vérification au microscope pour prouver qu'il s'agit bien de la même espèce, à savoir le Pin sylvestre. Ses ponctuations fenestriques, repérées sur les deux échantillons, nous ont enlevés nos doutes !

Lors des essais, nous avons remarqué que même si les éprouvettes étaient toutes usinées à partir des plateaux de Pin de la halle, celles du test de vérification semblaient moins lourdes que celles du plan d'expérience avec la même section. Nous nous sommes de ce fait intéressés au rôle de la densité dans la résistance de nos éprouvettes.

A partir des séries cassées, nous avons pris au hasard, six éprouvettes de section 40x40 mm dans les séries provenant du plan d'expérience, et six autres provenant de la série de vérification. Ainsi nous avons obtenu deux séries d'éprouvettes de 40x40x40mm, à partir desquelles nous avons déduit la masse volumique. Le tableau ci-dessous (Tableau 18) nous donne les deux résultats obtenus. (Détail en Annexe 1).

Tableau 18 : Calcul de la masse volumique

| Masse volumique du Pin sylvestre utilisé pour le plan d'expérience 1 | Masse volumique du Pin sylvestre utilisé pour les essais de vérification |
|--|--|
| Moyenne : 568,12 kg/m ³ | Moyenne : 692,73 kg/m ³ |

Nous constatons une différence de l'ordre de 120 kg/m³ entre les deux masses volumiques. Cela est énorme puisque que l'essence reste la même. Les plateaux utilisés devaient provenir de Pins différents, avec des croissances différentes (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cette caractéristique joue un rôle important dans la résistance mécanique comme vue dans l'étude bibliographique. Cela représente un bruit important dans notre plan d'expérience. Nous aurions

pu l'éviter en conservant seulement des éprouvettes dont leurs masses volumiques auraient été comprises entre deux valeurs choisies.

La densité du bois avait été envisagée pour être un facteur de notre plan d'expérience. Or les deux essences retenues ont des densités si différentes que nous aurions eu les mêmes résultats que pour le facteur « Essence ».

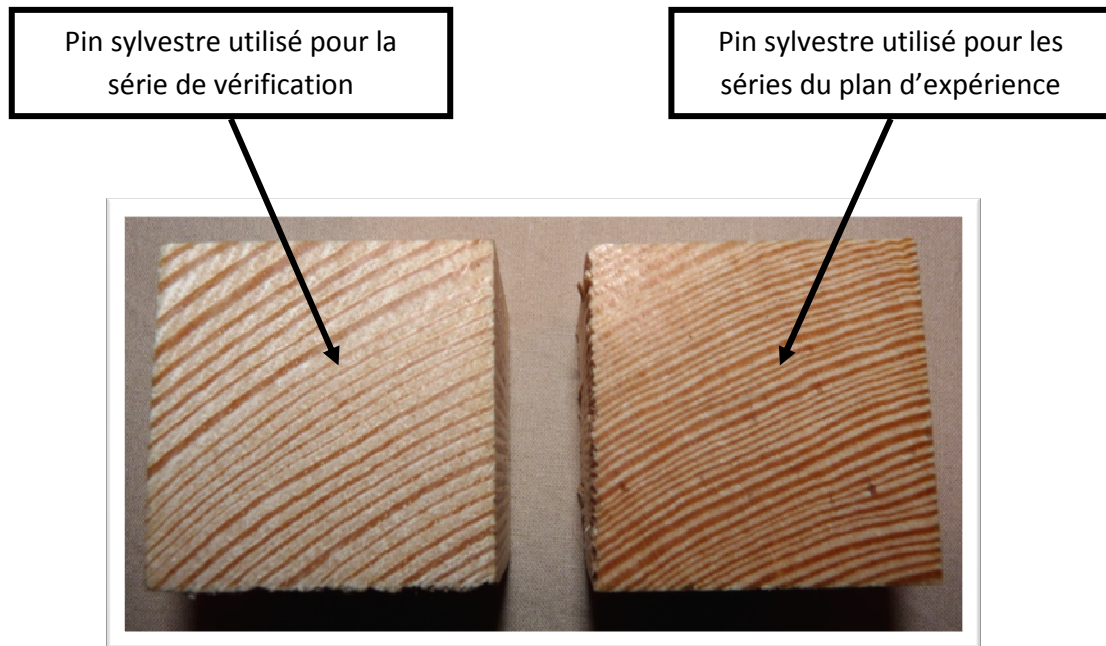


Photo 9 : Différence de largeur des cernes entre deux séries d'éprouvettes en Pin

Sur la photo ci-dessus, on peut remarquer que la croissance annuelle est très différente pour les deux bois utilisés. Pour le Pin sylvestre, la densité est directement reliée à la croissance de l'arbre. En effet, le bois final est beaucoup plus dense que le bois de printemps. De ce fait, il est normal que nous ayons trouvé une masse volumique plus importante pour le bois utilisé dans lors du plan d'expérience.

VI. ESSAIS COMPLÉMENTAIRES

1. Prise en considération des contraintes de la Norme NF EN 408

1.1. Introduction

Les résultats obtenus pour les facteurs concernant l'orientation des entures lors de l'essai nous sont apparus étranges. En effet, les résultats donnent une meilleure résistance pour des entures positionnées verticalement. De plus nous avons constaté qu'un grand nombre de ruptures étaient directement liées au joint de colle. Afin de mieux caractériser ces deux points, nous avons appliqué, sur un nouveau plan d'expérience, la norme NF EN 408 à la lettre.

Lors de la réalisation du plan d'expérience, nous n'avons pas pu suivre les recommandations de la norme concernant les espacements entre appuis. En effet, ces derniers sont directement liés à l'épaisseur de l'éprouvette testée. Or, selon la position des entures lors de l'essai, nous devons prendre en compte deux hauteurs différentes, 20 ou 40mm. Les longueurs finales des éprouvettes étaient trop grandes pour la machine d'essai.

Au cours de la phase d'essai, un employé du CRIT Bois est venu tester du bambou, et a mis en place un module supplémentaire en acier réalisé par leur soin. Nous ne supposons pas l'existence de ce module permettant de tester les éprouvettes plus longues que la limite des machines. De ce fait, nous pouvons, à présent, tester des éprouvettes de toutes tailles (Photo 10).

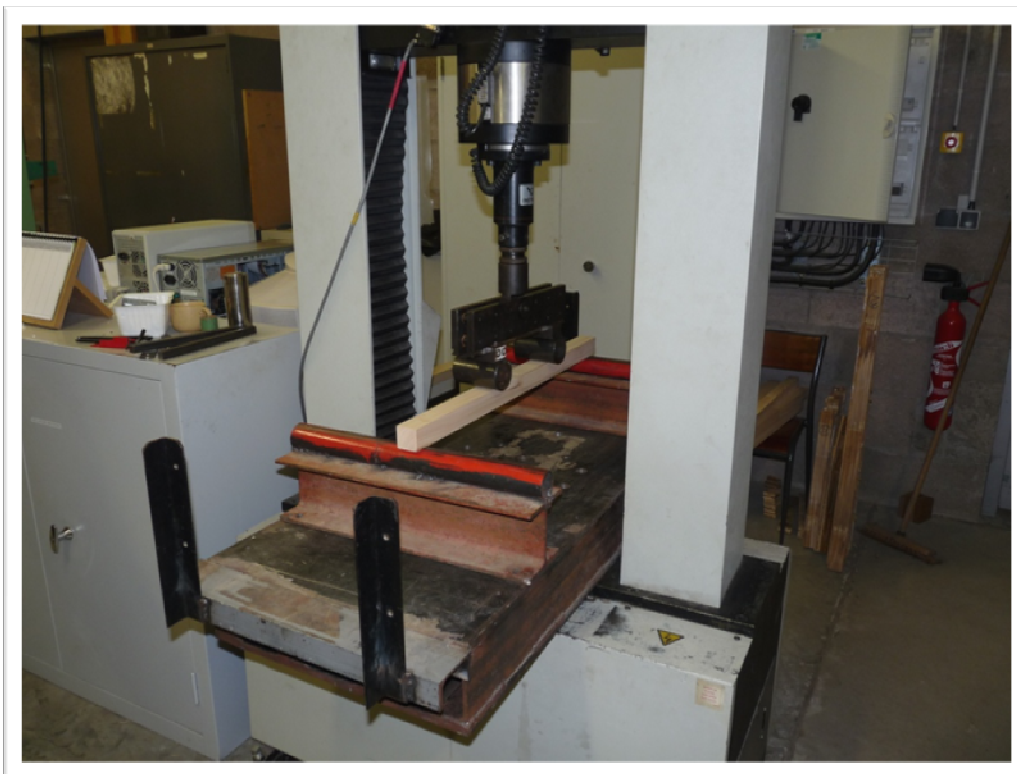


Photo 10 : Banc d'essai recevant des éprouvettes de grande longueur

1.2. Les caractéristiques de la norme NF EN 408

Selon la norme NF EN 408, « pour la détermination de la résistance à la flexion de bois abouté par entures multiples, l'éprouvette d'essai doit être chargée symétriquement en flexion en deux points sur une portée égale à onze fois la hauteur [...], avec l'aboutage à entures multiples situé à mi-portée ». Nous avons remarqué une erreur dans la norme entre le texte écrit et la figure auquel il réfère. Cette dernière indique une portée égale à dix-huit fois la hauteur, soit la portée pour des éprouvettes sans enture. La

Figure 17 reprend ces caractéristiques.

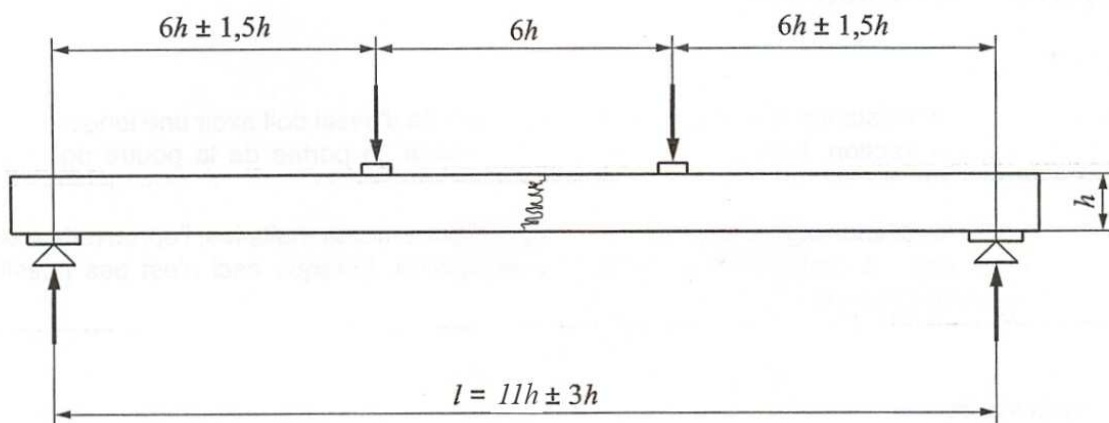


Figure 17 : Dispositif d'essai pour mesurer la résistance à la flexion des aboutages à entures multiples (NF EN 408)

De plus, la vitesse de déplacement de la tête de chargement ne doit pas dépasser 0,003 fois la hauteur de l'éprouvette (en mm/s).

La Figure 18 détaille le processus du déroulement d'un essai selon la norme NF EN 408. Contrairement aux essais précédents, il faut à présent refaire le réglage pour chaque changement de la hauteur de l'éprouvette (h). En effet, la distance entre appuis, la distance séparant les points d'application de la charge, et la vitesse d'avance de cette dernière sont liées à la hauteur (h).

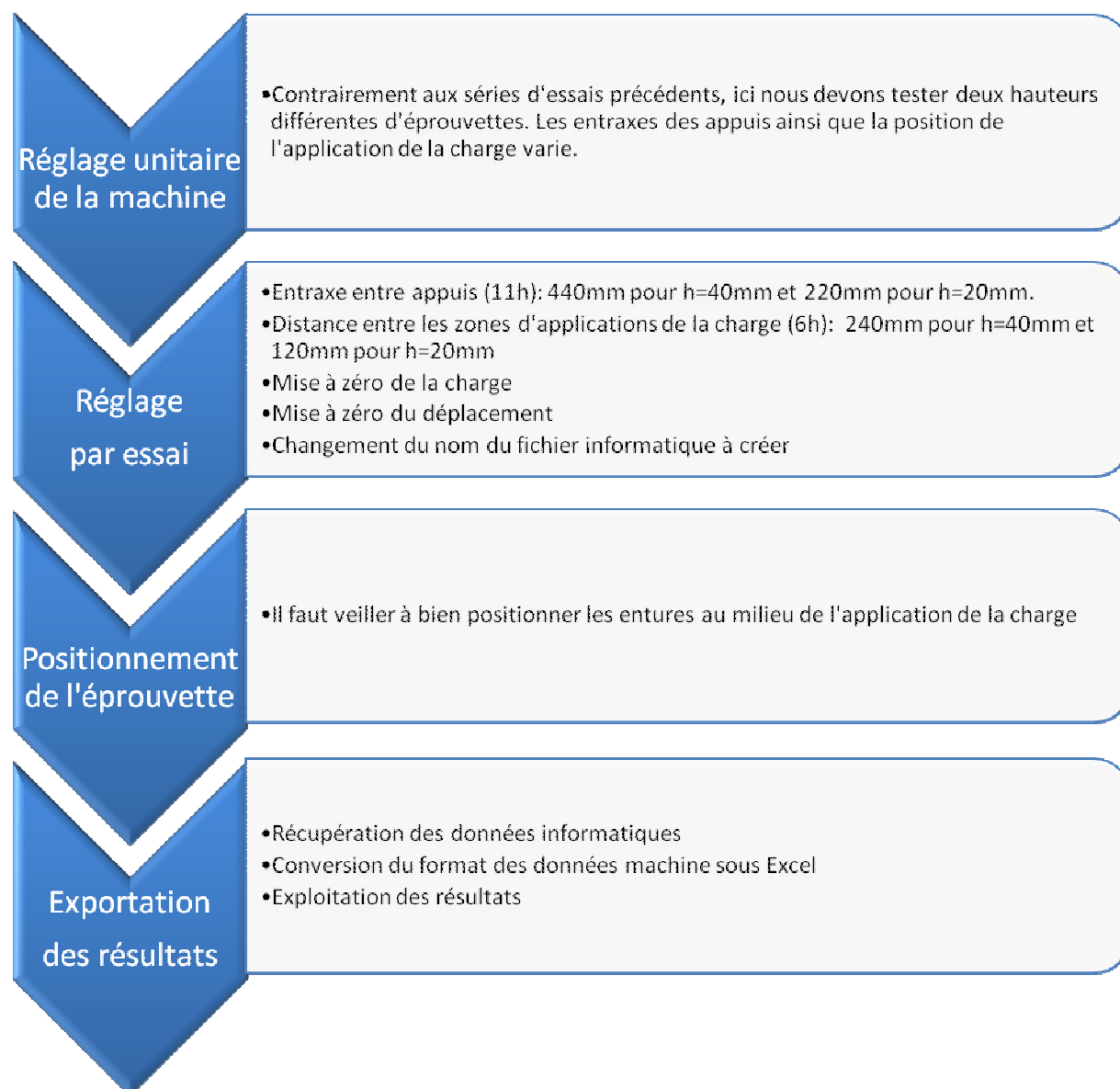


Figure 18 : Procédure des essais selon la norme NF EN 408

1.3. Le plan d'expérience

Le nouveau plan d'expérience fait intervenir la table L4 (2³) et les facteurs retenus sont la section des éprouvettes, la taille des entures, et le positionnement des entures lors de l'essai. Les éprouvettes ont toutes été réalisées en Epicéa afin d'éviter le gaspillage. En effet, contrairement au Pin, l'Epicéa que nous avons à notre disposition à l'école a beaucoup moins de nœuds. De ce fait, l'usinage des éprouvettes requiert donc moins de bois pour respecter la norme NF EN 385. Enfin, la pression retenue est celle préconisée par le constructeur.

Le tableau ci-dessous (Tableau 19) synthétise les facteurs influents de ce nouveau plan d'expérience.

Tableau 19 : Facteurs influents - plan d'expérience 2

| Facteurs influents | | | |
|--------------------|---------|--------|---------------|
| | Section | Taille | Position test |
| Série 1 | 1 | 1 | 1 |
| Série 2 | 1 | 2 | 2 |
| Série 3 | 2 | 1 | 2 |
| Série 4 | 2 | 2 | 1 |

A partir de ce dernier, nous avons pu réaliser le tableau synthétique ci-dessous (Tableau 20) avec les résultats de ce nouveau plan d'expérience. De la même façon que précédemment, nous appliquons le test de Dixon avec un risque de 5% afin de trouver les valeurs aberrantes (Tableau 21). On calcule ensuite la résistance à la flexion d'après le calcul de la norme NF EN 408 (Tableau 22). Enfin, nous pouvons déterminer les effets des facteurs (Tableau 23) ainsi que le graph des effets (Figure 19).

Tableau 20 : F : force mesurée (kN) - plan d'expérience 2

| F : force mesurée (kN) - plan d'expérience 2 | | | | | | | | | | | Moyenne |
|--|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| Série 1 | 11,48 | 9,17 | 10,24 | 8,90 | 8,92 | 11,84 | 10,82 | 11,85 | 9,05 | 10,08 | 10,24 |
| Série 2 | 12,58 | 13,43 | 10,21 | 7,83 | 11,38 | 12,35 | 12,75 | 11,04 | 12,52 | 12,45 | 12,08 |
| Série 3 | 6,67 | 7,73 | 6,13 | 7,26 | 7,10 | 6,61 | 8,08 | 6,73 | 6,29 | 6,53 | 6,91 |
| Série 4 | 4,96 | 5,52 | 6,08 | 6,28 | 5,28 | 4,10 | 4,85 | 3,09 | 5,86 | 4,44 | 5,05 |
| | | | | | | | | | | | 8,57 |

Tableau 21 : Test de Dixon - plan d'expérience 2

| Test de Dixon avec un risque de 5% - plan d'expérience 2 | | | | | | | | | | | 0,477 | | 0,512 | |
|--|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | Rmin | Rmax | Rmin | Rmax |
| Série 1 | 8,9 | 8,92 | 9,05 | 9,17 | 10,08 | 10,24 | 10,82 | 11,48 | 11,84 | 11,85 | 0,007 | 0,003 | | |
| Série 2 | 7,83 | 10,21 | 11,04 | 11,38 | 12,35 | 12,45 | 12,52 | 12,58 | 12,75 | 13,43 | 0,484 | 0,211 | 0,327 | 0,285 |
| Série 3 | 6,13 | 6,29 | 6,53 | 6,61 | 6,67 | 6,73 | 7,1 | 7,26 | 7,73 | 8,08 | 0,100 | 0,196 | | |
| Série 4 | 3,09 | 4,1 | 4,44 | 4,85 | 4,96 | 5,28 | 5,52 | 5,86 | 6,08 | 6,28 | 0,338 | 0,092 | | |

Tableau 22 : Résistance à la flexion – plan d'expérience 2

| f _m : résistance à la flexion (N/mm ²) – plan d'expérience 2 | | | | | | | | | | | Moyenne |
|---|-------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Série 1 | 53,81 | 42,98 | 48,00 | 41,72 | 41,81 | 55,50 | 50,72 | 55,55 | 42,42 | 47,25 | 47,98 |
| Série 2 | 58,97 | 62,95 | 47,86 | Valeur aberrante | 53,34 | 57,89 | 59,77 | 51,75 | 58,69 | 58,36 | 56,62 |
| Série 3 | 62,53 | 72,47 | 57,47 | 68,06 | 66,56 | 61,97 | 75,75 | 63,09 | 58,97 | 61,22 | 64,81 |
| Série 4 | 46,50 | 51,75 | 57,00 | 58,88 | 49,50 | 38,44 | 45,47 | 28,97 | 54,94 | 41,63 | 47,31 |
| | | | | | | | | | | | 54,18 |

Tableau 23 : Effets des facteurs - plan d'expérience 2

| Effets des facteurs | | |
|---------------------|--------|--------------------------------------|
| Section | Taille | Position des entures lors de l'essai |
| -1,88 | 2,21 | -6,54 |

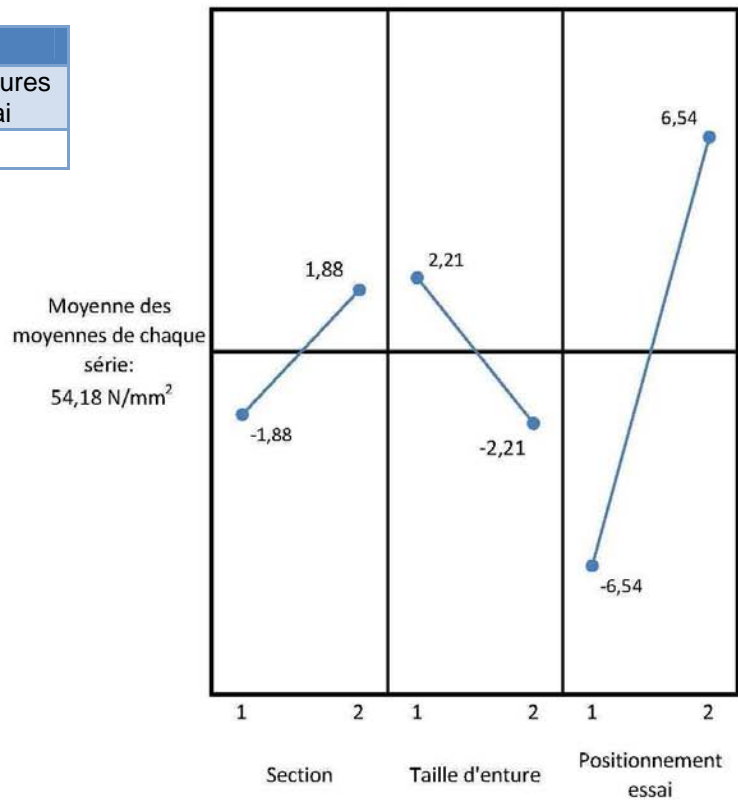


Figure 19: Graph des effets - plan d'expérience 2

Le graphe des effets ci-dessus (Figure 19) nous aide également à mieux cerner les choix des niveaux.

Pour le facteur « Section des éprouvettes », nous retenons les éprouvettes de section rectangulaire. Concernant la taille des entures, notre choix se porte sur des entures de 10mm. Enfin, le positionnement des entures lors de l'essai est le facteur qui possède l'effet dominant. Nous conservons le niveau 2 correspondant aux entures positionnées verticalement.

2. Confrontation des deux plans d'expériences

La confrontation des deux plans d'expériences ne peut être réalisée directement par comparaison des valeurs. En effet, l'analyse doit être effectuée à travers les choix des niveaux et l'importance des effets de chacun des facteurs.

Tout d'abord, on remarque que la moyenne des moyennes est sensiblement plus faible pour le plan d'expérience suivant la norme. Cela s'explique par le fait que ce plan ne fait pas intervenir d'éprouvette en Pin avec une résistance mécanique plus grande que celle de l'Epicéa.

Comparons à présent les niveaux retenus par chacun des plans d'expériences (Tableau 24).

Tableau 24 : Comparaison des niveaux retenus par chacun des plans d'expériences

| Fonctions | Plan d'expérience 1 | Plan d'expérience 2 |
|--|---------------------|---------------------|
| Taille d'entures | 10 mm | |
| Section de l'éprouvette | Carré | Rectangulaire |
| Positionnement des entures lors de l'essai | Vertical | |

Nous constatons que les facteurs « Taille d'entures » et « Positionnement des entures lors de l'essai » sont identiques pour les deux plans d'expériences. Cela renforce notre choix concernant les niveaux retenus.

Une taille d'entures de 10mm augmentera la résistance mécanique par rapport à celle de 25mm, comme indiqué dans l'étude bibliographique.

De même, le positionnement vertical (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) des entures résistera mieux que celui horizontal à charge identique. Cet aspect offre trois avantages. Tout d'abord, il augmente la cadence de production notamment lors de l'utilisation d'une machine dédiée à cet usinage. En effet, on pourra usiner un plus grand nombre de pièces en un seul cycle. Ensuite, d'un point de vue esthétique, toute la hauteur de la poutre ne présentera pas d'enture visible. Enfin, nous avons vu que ce positionnement est le plus résistant, ce qui sera un avantage pour les poutres à forte inertie composées de plusieurs lamelles.

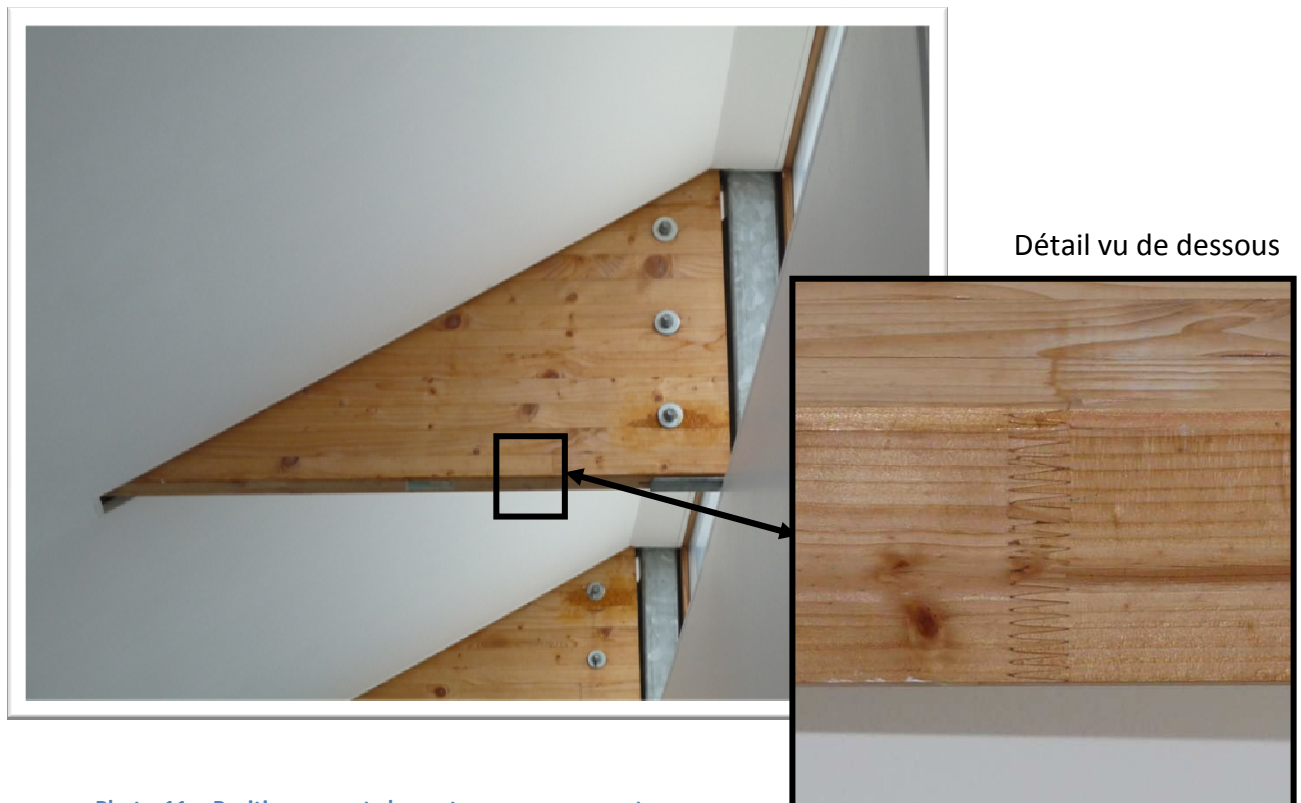


Photo 11 : Positionnement des entures sur une poutre lamellé-collé à forte inertie

La seule différence constatée concerne le facteur « Section ». En effet, les niveaux retenus sont différents selon l'application complète ou non de la norme. Cet effet semble directement lié aux caractéristiques imposées par celle-ci (Tableau 25).

Tableau 25 : Comparaison des conditions d'essais entre les deux plans d'expériences

| Caractéristique de la Norme | Plan d'expérience 1 | Plan d'expérience 2 | |
|--|---------------------|---------------------|------------|
| | | h=40 mm | h=20 mm |
| Distance entre appuis | 360 mm | 440 mm | 220 mm |
| Distance entre les points de chargement | 120 mm | 440 mm | 220 mm |
| Vitesse de déplacement de la charge | 3 mm/min | 7,2 mm/min | 3,6 mm/min |

Tout d'abord, la Norme prend en compte la hauteur des éprouvettes. Cela modifie les caractéristiques du Tableau 25 ci-dessus. En effet, la distance entre appuis et celle entre les points de chargement varie. De même pour la vitesse de déplacement de la charge.

Cette prise en compte explique que les niveaux retenus concernant le facteur «Section de l'éprouvette » ne sont pas les mêmes entre les deux plans d'expériences.

Les résultats des essais selon la norme semblent plus logiques car la résistance à la flexion (f_m) est supérieure pour les sections de plus forte inertie. En effet, la norme NF EN 408 en tient compte en jouant sur les réglages du banc d'essai.

La colle utilisée (vinylique), bien que non structurale, ne semble pas affecter les comparaisons réalisées entre les niveaux des facteurs.

Enfin, la forme propre des entures a un effet sur la résistance mécanique. Les entures testées horizontalement semblent amorcer l'arrachement des fibres dont la traction transversale est responsable lors d'un essai de flexion. Ceci explique qu'un chargement vertical appliqué à une pièce avec des entures positionnées horizontalement résiste moins.

CONCLUSION

Malgré les difficultés rencontrées pour appliquer la norme lors de nos premiers essais, nous avons pu comparer deux essences locales, deux tailles d'entures, deux pressions de serrage au collage et deux orientations des éprouvettes en fonction de deux sections. Il en est ressorti que les petites entures, les sections rectangulaires, une pression d'assemblage suffisante et le Pin sylvestre face à l'Epicéa favorisent la résistance à la flexion des pièces aboutées.

Comme nous l'avons constaté, la densité du bois joue un rôle important. C'est certainement sur ce point que les essences locales devront faire leurs preuves face à des bois à croissance lente des pays scandinaves. Ceci ouvre de nouvelles pistes d'études à explorer.

Ce projet de fin d'études nous aura permis de mettre en œuvre différents plans d'expériences dans leur intégralité, d'en exploiter les résultats, de réaliser des essais sous la contrainte de normes. De plus, nous nous sommes replongés dans nos anciens cours de la même manière que nous devons le faire dans nos futurs métiers.

Enfin, ce travail en binôme et en autonomie fut une expérience riche sur le plan professionnel mais également humain. Le travail en équipe a les avantages de se motiver mutuellement, de multiplier les idées comme les critiques et de faire preuve de compromis pour satisfaire chacun des partis.

BIBLIOGRAPHIE

1. **CTBA : Centre Technique Du Bois.** *Etude technico-économique de l'aboutage. Série III. Travail mécanique du bois - usinage - fabrication des matériaux dérivés du bois. Cahier n°92.* Paris : s.n., 1973.
2. **GAIFFE.** *L'aboutage (Rapport de projet de fin d'études, Université Nancy 1).* Nancy : s.n., 1992.
3. **JANOWIAK.** *Finger-joint strength evaluations of three northeastern hardwoods. Forest Prod.* 1993.
4. **HERNANDEZ.** *Analysis of strain in finger-jointed lumber.* Montreux : s.n., 1998.
5. **MOLLIARD et ZEARO.** *Résistance mécanique des pièces aboutées. (Rapport d'un projet de fin d'études. ENSTIB).* Epinal : s.n., 2008.
6. **SELBO.** *Adhesive bonding of wood. Technical bulletin. N°1512.* Washington : s.n., 1975.
7. **RICHARDS et GOODRICK.** *Tensile strength of scarf joints in Southern Pine.* 1959.
8. **JOKERST.** *Finger-jointed Wood Products.* Madison : s.n., 1981.
9. **FORINTEK.** *Carte routière technologique. Bois de sciage et produits à valeur ajoutée.* Québec : s.n., 2001.
10. **TAN.** *Finger-jointed Meranti Tembaga (shorea leprusula) for structural use. Proceedings, Adhesive Technology and bonded tropical wood products.* Taipei : s.n., 1993.
11. **BUSTOS.** *Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire. Université de Laval.* Québec : s.n., 2003.
12. **RAKNES.** *The influence of production conditions of the strength of finger-joints.* Madison : s.n., 1982.
13. **STRICKLER.** *Finger-jointed dimension lumber - Past, present and future.* s.l. : Forest Products Journal, 1980.
14. **TURGEON.** *Aboutage et lamellage de bois. Ministère de l'industrie, du commerce et du tourisme.* Québec : s.n., 1981. Centre de recherche industrielle du Québec.
15. **FISSETTE et RICE.** *An analysis of structural finger-joints made from two northeastern species.* s.l. : Forest products journal, 1988.
16. **AYARKWA, HIRASHIMA et SASKI.** *Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of finger-jointed tropical african hardwoods.* s.l. : Forest Prod., 2000.
17. **KING et CHEN.** *Adhesive and Wood.* s.l. : Specialty Wood Journal, 2001.

18. **VRAZEL.** *The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strenght and durability of a structural finger-joint.* [éd.] Thèse du Department of forest products. 2002.
19. **SELLERS.** *Gluing of eastern hardwoods.* Nouvelle-Orleans : s.n., 1975.
20. **LABOSKY, et al.** *Bond strenght of resorcinolic adhesives on northeastern hardwoods.* s.l. : Forest Products Journal, 1993.
21. **Laboratory, Forest Products.** *Wood handbook: wood as an engineering material.* s.l. : University Press of the Pacific, 2000.
22. **CHUI et DELAHUNTY.** *Glued engineered products made of Red Maple.* s.l. : University of New Brunswick, 2005.
23. **DAGENAIS.** *Aboutage de l'érable à sucre pour la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux.* [éd.] Université de Laval. Laval : s.n., 2007.
24. **HERNANDEZ et NADERI.** *Effects of Knife Jointing on the Gluing.* 2001.
25. **REEB, et al.** *Finger-Joint.* 1998.
26. **NGANGUE.** *Drying engineered wood products and their componements: impact of moisture content on performance of finger jointing.* [éd.] Canadian forest service. Vancouver : Forintek, 2000.
27. **SCHULER, ADAIR et ELIAS.** *Engineered lumber products: Taking.* 2001.
28. **PELLICANE, STANFILL-MCMILLAN et TICHY.** *Effects of knots.* 1987.
29. **KOLLMANN et COTE.** *Principles of wood science and Technology. Vol. 1.* New York : Springer-Verlag, 1968.
30. **TURGEON.** *Aboutage et lamelage de bois.* [éd.] Centre de recherche industrielle du Québec. Québec : Ministère de l'industrie, du commerce et du tourisme, 1981.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figures :

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Effet du type de joint sur la résistance mécanique à la traction par rapport à celle du bois massif (d'après Selbo 1975)..... | 7 |
| Figure 2 : Types de configuration des joints A: Sans épaulement, B: Mâle-femelle, C: Inversée.... | 8 |
| Figure 3 : Nomenclature et géométrie d'aboutage (d'après le CTBA : 1973) | 8 |
| Figure 4 : Pressions de serrage en fonction de la longueur des entures | 12 |
| Figure 5 : Diagramme Ishikawa | 22 |
| Figure 6 : Diagramme constructeur pour la pression de serrage au collage | 23 |
| Figure 8 : Table des interactions | 24 |
| Figure 7 : Graphes linéaires..... | 24 |
| Figure 9 : Circuit machine utilisé pour la fabrication des éprouvettes | 26 |
| Figure 10 : Distance minimale entre l'extrémité du bois et un nœud (NF EN 385)..... | 27 |
| Figure 11 : Modélisation de la flexion 4 points | 29 |
| Figure 12 : Diagramme des efforts tranchants..... | 29 |
| Figure 13 : Diagramme du moment fléchissant | 30 |
| Figure 15 : Procédure des essais | 31 |
| Figure 14 : Dispositif d'essai adapté..... | 31 |
| Figure 16 : Graphe des effets | 38 |
| Figure 17 : Dispositif d'essai pour mesurer la résistance à la flexion des aboutages à entures multiples (NF EN 408)..... | 43 |
| Figure 18 : Procédure des essais selon la norme NF EN 408..... | 44 |
| Figure 19: Graph des effets - plan d'expérience 2 | 46 |

Tableaux :

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Facteurs influençant l'aboutage | 10 |
| Tableau 2: Différents paramètres d'usinages des recherches antérieures | 16 |
| Tableau 3 : Détails des niveaux du plan d'expérience | 22 |
| Tableau 4 : Pression de serrage au collage | 23 |
| Tableau 5 : Table L8(27) | 24 |
| Tableau 7 : Tableau du plan d'expérience..... | 25 |
| Tableau 6 : Abréviations des facteurs et des niveaux..... | 25 |
| Tableau 8 : Humidité moyenne des éprouvettes (Détail en Annexe 2). | 27 |
| Tableau 9 : Avantages et inconvénients des deux machines à enturer | 28 |
| Tableau 10 : Eprouvettes rejetées par le test de Dixon suite à une force à la rupture trop basse | 33 |

| | |
|--|----|
| Tableau 11 : Eprouvettes rejetées par le test de Dixon suite à une force à la rupture trop haute | 34 |
| Tableau 12 : Table de Dixon | 36 |
| Tableau 13 : Résultats des essais après élimination des valeurs aberrantes..... | 36 |
| Tableau 14 : f_m : résistance à la flexion | 37 |
| Tableau 15 : Moyenne de chaque série | 37 |
| Tableau 16 : Effets des facteurs | 38 |
| Tableau 17 : Essais de vérification du plan d'expérience..... | 39 |
| Tableau 18 : Calcul de la masse volumique..... | 40 |
| Tableau 19 : Facteurs influents - plan d'expérience 2..... | 45 |
| Tableau 20 : F : force mesurée (kN) - plan d'expérience 2 | 45 |
| Tableau 21 : Test de Dixon - plan d'expérience 2 | 45 |
| Tableau 22 : Résistance à la flexion – plan d'expérience 2 | 45 |
| Tableau 23 : Effets des facteurs - plan d'expérience 2..... | 46 |
| Tableau 24 : Comparaison des niveaux retenus par chacun des plans d'expériences | 47 |
| Tableau 25 : Comparaison des conditions d'essais entre les deux plans d'expériences | 48 |

Photos :

| | |
|---|----|
| Photo 1 : Entreuse ProfitJoint de la marque Weinig..... | 27 |
| Photo 2 : Tenonneuse numérique..... | 28 |
| Photo 3 : Abouteuse de la marque Weinig | 28 |
| Photo 4 : Dispositif d'essai adapté | 31 |
| Photo 5 : Rupture dans le joint de colle | 32 |
| Photo 6 : Rupture de bloc..... | 32 |
| Photo 7 : Rupture par arrachement des fibres | 32 |
| Photo 8 : Rupture hors du joint de colle | 33 |
| Photo 9 : Différence de largeur des cernes entre deux séries d'éprouvettes en Pin | 41 |
| Photo 10 : Banc d'essai recevant des éprouvettes de grande longueur..... | 42 |
| Photo 11 : Positionnement des entures sur une poutre lamellé-collé à forte inertie..... | 47 |

ANNEXES

Annexe 1 : Calcul de la masse volumique des éprouvettes en Pin Sylvestres du plan d'expérience 1 et de la vérification

| Masse volumique du pin: test Taguchi | | | | | | |
|--|-----------|-----------------|-------|-------|--------------------------|--------------------------------------|
| | Masse (g) | Dimensions (mm) | | | Volume (m ³) | Masse volumique (kg/m ³) |
| éprouvette 1 | 36,444 | 40,05 | 39,95 | 39,75 | 6,36E-05 | 573,02 |
| éprouvette 2 | 37,146 | 39,99 | 40,04 | 39,93 | 6,39E-05 | 580,99 |
| éprouvette 3 | 36,884 | 39,94 | 40,39 | 39,88 | 6,43E-05 | 573,33 |
| éprouvette 4 | 34,937 | 39,96 | 40,00 | 39,56 | 6,32E-05 | 552,51 |
| éprouvette 5 | 36,046 | 39,96 | 39,88 | 39,63 | 6,32E-05 | 570,76 |
| éprouvette 6 | 35,587 | 40,09 | 39,84 | 39,92 | 6,38E-05 | 558,14 |
| | | | | | Moyenne | 568,12 |
| Masse volumique du pin: vérification du test Taguchi | | | | | | |
| | Masse (g) | Dimensions (mm) | | | Volume (m ³) | Masse volumique (kg/m ³) |
| éprouvette 1 | 43,948 | 39,30 | 39,98 | 39,93 | 6,27E-05 | 700,49 |
| éprouvette 2 | 40,329 | 39,88 | 39,73 | 39,34 | 6,23E-05 | 647,01 |
| éprouvette 3 | 51,258 | 39,97 | 39,94 | 40,05 | 6,39E-05 | 801,71 |
| éprouvette 4 | 37,966 | 39,95 | 39,93 | 39,71 | 6,33E-05 | 599,35 |
| éprouvette 5 | 43,243 | 40,03 | 40,25 | 39,31 | 6,33E-05 | 682,75 |
| éprouvette 6 | 45,454 | 40,10 | 39,83 | 39,25 | 6,27E-05 | 725,07 |
| | | | | | Moyenne | 692,73 |

Annexe 2 : Contrôle de l'humidité du bois

| | Humidité (%) | | |
|--------------------------------|---------------------|-------------|---------------------|
| | Plan d'expérience 1 | | Plan d'expérience 2 |
| | Epicéa | Pin | Epicéa |
| Valeur 1 | 8,70 | 8,80 | 8,30 |
| Valeur 2 | 8,00 | 8,30 | 8,90 |
| Moyenne | 8,35 | 8,55 | 8,60 |
| Ecart à la moyenne | 0,15 | 0,05 | 0,10 |
| Pourcentage d'écart d'humidité | 1,76% | 0,59% | 1,18% |

RESUME

Le domaine de la construction bois recherche des matériaux garantissant une résistance mécanique. Pour cela, le bois massif, avec ses singularités a montré ses limites. L'aboutage apporte ici un double intérêt. Il permet d'une part de purger les singularités des bois qui fragilisent la pièce et d'autre part d'assembler des pièces de faible longueur.

A l'heure actuelle, les entreprises françaises aboutent des bois scandinaves garantis en qualité et en humidité. Or, la montée en gamme des bois de sciage français commence à intéresser ces entreprises. Cependant, les données concernant l'aboutage de ces bois locaux demandent encore à être complétées.

Le but de ce projet a été de déterminer l'influence des caractéristiques techniques d'aboutage sur la résistance mécanique de ces essences locales résineuses. Les essences retenues sont le Pin et l'Epicéa. Tout d'abord, une étude bibliographique nous a permis de mieux comprendre le principe de l'aboutage et de cibler les paramètres importants dont dépendent la qualité et la résistance mécanique de la pièce finale. Ainsi, nous avons déterminé les meilleurs facteurs à prendre en compte pour notre projet. La section des bois massifs aboutés, la taille des entures, l'essence de bois utilisé, la pression de serrage au niveau du collage et l'orientation des entures ont été les facteurs retenus. Ensuite, un plan d'expérience a été mis en place afin d'obtenir un maximum de comparaisons avec un minimum de tests à réaliser. Les éprouvettes ont été ensuite usinées et testées mécaniquement en flexion quatre points, sur une machine Instron, suivant les normes en vigueur. Enfin, les résultats obtenus ont été analysés afin de pouvoir conclure et caractériser les facteurs importants.

Mots clés : Aboutage, Enture, Plan d'expérience, Résistance mécanique, Flexion, Essais

ABSTRACT

The domain of wood construction is looking for materials guaranteeing mechanical resistance. That is why, solid wood, with its peculiarities has showed its limits. Fingerjointing has a double interest. On one hand it allows to eliminate weak points of wood which weaken it and on the other hand to assemble short pieces of wood.

At the moment, French companies join Scandinavian wood guaranteed in quality and in humidity. Today, the increase in quality of French sawn wood begins to interest these companies. However, the data concerning Fingerjointing of this local wood still needs to be completed.

The purpose of this project was to determine the influence of the characteristic techniques of Fingerjointing on the mechanical resistance of local coniferous woods. The choice was made to use Pine and Spruce. First, a bibliographical study allowed us to better understand the principle of Fingerjointing and to target the important parameters on which depend the quality and the mechanical resistance of the final product. Thus, we have determined the best parameters to take into account in our project. The section of joined wood, the size of fingers, the wood, the pressure of tightening during gluing and the orientation of fingers were the parameters taken into account parameters. Then, a factorial experiment was set up to obtain a maximum of comparisons with a minimum of tests. Samples were assembled and tested mechanically in four points bending, on an Instron mechanical testing machine, and according to the relevant standards. Finally, results were analyzed in order to conclude and characterize the important parameters.

Keywords: Finger-jointing, Finger-joint, Plan of experiment, Bending, Breaking strength, Tests