

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Magister

Présenté à l'Université de Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil et Hydraulique

Option : Matériaux et structures

Présenté par : NAHAL Abdallah

**Thème : ETUDE DE LA FAISABILITE D'UN BOIS
LAMELLÉ-COLLÉ À PARTIR
D'ESSENCE ALGERIENNE**

Sous la direction de : **Dr. NAFA Zahreddine**

JURY

Pr : BENMALEK Mohamed-Larbi	Université de Guelma	Président
Dr : NAFA Zahreddine	Université de Guelma	Rapporteur
Dr : CHERAIT Yacine	Université de Guelma	Examineur
Dr : OUCIEF Hocine	Université de Annaba	Examineur

2011



AVANT PROPOS



Je tiens tout d'abord à remercier Dieu qui m'a aidé et donné la force pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui m'ont aidé tout au long de ce travail, et plus particulièrement :

Monsieur NAFA Zahreddine pour avoir dirigé ce travail, et m'a beaucoup apporté soutien et courage pour surmonter les difficultés rencontrées tout au long du parcours de cette recherche.

Monsieur le Pr. BENMALEK Mohamed Larbi qui a accepté de présider le jury d'évaluation de ce mémoire.

Messieurs ; Dr. CHERAIT Yacine et Dr. OUCIEF Hocine qui ont accepté d'examiner ce travail.

Monsieur BOURAS qui m'a aidé à réaliser les essais expérimentaux au laboratoire LGCH.

Les responsables de la société BELCOL, Spa et plus particulièrement son Directeur Monsieur BELHADJ Mokhtar.

Tous les membres du département de génie civil de l'université de Guelma ainsi que ceux du laboratoire LGCH.

Particulièrement mon très cher fils ZAKARIA et ma femme à qui je dédie ce travail.

Mes très chers parents qui m'ont soutenu tout au long de mes études.

A tous je dis : merci beaucoup...



ملخص

RESUME

ABSTRACT



ملخص :

تعتبر الألواح الخشبية الملصقة من أهم المنتجات المطورة في صناعة الخشب. فهي عبارة عن مادة مركبة تحتوي على ألواح خشبية ملصقة فيما بينها بحيث تسمح بالحصول على عناصر هيكلية مهمة في البناء ذو أبعاد كبيرة مثل الروافد ذي الأشكال المختلفة, كما تسمح بالحصول على خاصيات مقاومة جد مهمة و أحسن بكثير من الخشب العادي. بفضل التطور الصناعي في هذا المجال الذي سمح بإنجاز منشآت جد معقدة و غاية في الروعة من حيث الجمال و الدقة في الإنشاء.

إن استعمال الخشب في مجال البناء كعنصر هيكل رئيسي ينعدم تماما في الجزائر. لذا يكمن الهدف من هذا العمل هو إنجاز مشروع دراسي لمواد جديدة من خلال الاعتماد على المنتج الوطني المحلي بغية استغلاله, كما يحث على استعمال الخشب و مشتقات الخشب في البناء. إذا فإن البحث عن الخصائص الفيزيائية للصنوبر الحلبي قد أجريت و أيضا إمكانية استخدام الألواح الملصقة في البناء من خلال هذا الصنف من الخشب (الصنوبر الحلبي). جل النتائج للخصائص الميكانيكية المحصلة تعتبر جيدة كما تظهر قدرة كبيرة من أجل استخدام هذه التقنية.

الكلمات مفاتيح :

الخشب, الصنوبر الحلبي, الألواح الخشبية الملصقة, الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية.



Résumé :

Le lamellé-collé est l'un des produits développés par l'industrie du bois, c'est un matériau composé à base de lamelles de bois collées, qui permet d'obtenir des éléments de structure de dimensions et de portées importantes et présentant des caractéristiques de résistance que même le bois massif ne peut garantir. Grâce au développement de cette technique, des ouvrages très complexes ont été entièrement réalisés en bois, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives à ce matériau. En Algérie, l'utilisation du bois comme matériau de structure est quasiment nulle. Ce travail rentre dans le cadre d'un projet d'étude de nouveaux matériaux innovants à base de produits nationaux pour valorisation, il vise à promouvoir l'utilisation du bois et des produits à base de bois dans la construction. Une caractérisation physico-mécanique du pin d'Alep est faite ainsi que la faisabilité d'un bois lamellé-collé à partir de cette essence. Les résultats montrent des caractéristiques mécaniques correctes et une bonne aptitude à cette technologie.

Mots clés : bois, pin d'Alep, lamellé-collé, caractérisation physico-mécanique.



Abstract :

Glued laminated wood is one of the products developed by the industry of wood, it is a material obtained on the basis of glued wood plates, which make possible to obtain elements of structure of dimensions and significant ranges and showing strength properties that even sawn timber cannot guarantee. Because of the development of this technique, very complex works were entirely made out of wood, thus opening new prospects with this material. In Algeria, the use of wood as structural material is almost null. This work is a part of a research project witch study new innovating materials based on national products for valorisation, it aims the promoting of use of wood and wood-based products in construction. Physical and mechanical characterization of Aleppo pine and the feasibility of a glulam from this species are made. The results show correct mechanical properties and good ability for this technology.

Key words : wood, Aleppo pine, glued-laminated, physical and mechanical characterization.



TABLE DES MATIERES



PREMIERE PARTIE : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

<u>INTRODUCTION</u>	13
<u>CHAPITRE I : RESSOURCES FORESTIERES ALGERIENNE</u>	15
I.INTRODUCTION	16
II. PRESENTATION DE LA FORET ALGERIENNE	16
II.1. Consistance globale et caractéristiques de la forêt algérienne	16
II.1.1. Surface sous forêts, couvert forestier, volume sur pied	17
II.1.1.1. Surface sous forêt, couvert forestier	17
II.1.1.2. volume sur pied	17
II.1.2. Forêts naturelles	17
II.1.2.1. Consistance	17
II.1.2.2. Volume sur pied et production	18
II.1.3 Forêts plantées	20
II.1.3.1. Contribution des plantations à la production de bois	20
II.2. Etat des industries forestières	20
II.2.1. Situation actuelle des industries forestières	21
II.3 La recherche	21
<u>CHAPITRE II : LE BOIS</u>	23
I. INTRODUCTION	24
I.1 Domaines d'utilisation du bois dans la construction	24
II STRUCTURE DU BOIS	25
II.1 Structure macroscopique	25
II.2 Structure microscopique	26
II.3 Défauts des bois	28
II.3.1 Défauts d'origine végétative	28
II.3.1.1 Les nœuds	28



II.3.1.2 Accentuation de la forme tronconique	29
II.3.1.3 Courbure des tiges	29
II.3.1.4 Excentricité du cœur	29
II.3.1.5 Torsion des fibres	29
II.3.1.6 Fibre ondulée	30
II.3.1.7 Bois madré	30
II.3.2 Défauts dus à des causes extérieures	30
II.3.2.1 La gélivure	30
II.3.2.2 Roulure	30
II.3.2.3 Fissures internes	30
II.3.2.4 Cadranure, Cœur étoilé	31
II.4 Classement des bois	31
III. PROPRIETES DU BOIS	33
III.1 L'anisotropie	33
III.2 L'hygroscopie	34
III.2.1 L'eau libre ou intracellulaire	35
III.2.2 L'eau de saturation	35
III.2.3 L'eau de constitution du bois	35
III.3 Le retrait	36
III.4 La rétractibilité	37
III.5 La densité	38
III.6 Propriétés mécaniques	39
III.6.1 Traction longitudinale du bois	40
III.6.2 Traction transversale du bois	41
III.6.3 Compression longitudinale du bois	41
III.6.4 Compression transversale du bois	42
III.6.5 Flexion du bois	42
III.6.6 Cisaillement du bois	43
III.6.7 Dureté du bois	46
IV. FORMES COMMERCIALES	46
<u>CHAPITRE III : LE LAMELLE-COLLE</u>	49
I- INTRODUCTION	50
II. ETAPES DE FABRICATION ET CONSTITUANTS D'UN BOIS LAMELLE-COLLE	51
II.1. Le bois	52



II.2 La colle	53
II.2.1 Caractéristiques de la colle	53
II.2.2 Assemblage treillis	54
II.2.3 Assemblage d'angle de portiques	55
II.3 Aboutage	55

III. ARCS ET POUTRES EN BOIS LAMELLE-COLLE **56**

III.1 Poutres	57
III.2 Arcs	58

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV : CARACTERISATION DU PIN D'ALEP **61**

I. INTRODUCTION **62**

II. RECUPERATION DU BOIS **62**

II.1 Confection d'éprouvettes	64
-------------------------------	----

III. CARACTERISATION PHYSIQUE **64**

III.1. Mesure de la densité	64
III.2. Mesure du degré d'humidité	66

IV. CARACTERISATION MECANIQUE **69**

IV.1. Banc d'essais	69
IV.2. Résistance à la traction	69
IV.3. Résistance à la compression	71
IV.4. La flexion trois points	73
IV.4.1. Détermination du module de flexion	74
IV.4.1.1 conclusion	77
IV.4.2. Détermination de la résistance à la flexion	77

V. CONCLUSION **80**



<u>CHAPITRE V : CARACTERISATION MECANIQUE DU LAMELLE-COLLE</u>	81
I. INTRODUCTION	82
II. FABRICATION DES EPROUVETES	82
III. ESSAIS REALISES	84
III.1. Détermination du module de flexion	84
III.2. Détermination de la résistance à la flexion	86
CONCLUSION GENERALE	89
BIBLIOGRAPHIE	91
ANNEXES	92



PREMIERE PARTIE :

RECHERCHE

BIBLIOGRAPHIQUE



INTRODUCTION



Le bois n'est pas aujourd'hui seulement le premier matériau de construction dans plusieurs régions du monde mais il est aussi présent dans la liste des matériaux privilégiés utilisés dans le Hi-Tech bien sûr sous forme modifiée ou associé à d'autres matériaux. Cette utilisation du bois n'est pas liée seulement à sa disponibilité et à son prix mais aussi à quelques unes de ses exceptionnelles qualités technologiques. Le bois à l'état naturel ne présente malheureusement pas seulement des qualités, elles sont associées à d'autres propriétés moins performantes qui rendent son utilisation directe inappropriée pour des usages sous conditions sévères. Pour atténuer les effets dus aux défauts naturels du bois, les industriels le transforment pour obtenir des produits plus performants et mieux adaptés.

Le lamellé-collé est un de ces produits, c'est un matériau à base de bois qui permet d'obtenir des éléments de structure de dimensions et de portées importantes et de caractéristiques de résistance que le bois massif ne peut garantir.

Notre travail consiste en l'étude expérimentale de la faisabilité d'un bois lamellé-collé à partir d'une essence Algérienne ; le pin d'Alep. Ce travail comporte une caractérisation physico-mécanique du pin d'Alep ainsi que l'essai d'éprouvettes en lamellé-collé.

Ce mémoire est structuré en deux parties : La première partie est dédiée à l'étude bibliographique, et comporte deux chapitres. Dans le premier, on donne une synthèse de la ressource forestière algérienne au niveau national et régional et dans le deuxième chapitre, on présente l'essentiel du matériau bois ; sa structure, sa nature et son comportement.

L'étude expérimentale est détaillée dans la deuxième partie et comporte aussi deux chapitres. Dans le troisième, on présente les résultats de la caractérisation du bois pin d'Alep, et dans le dernier chapitre on traite la caractérisation du lamellé-collé à base du bois pin d'Alep avant de finaliser avec une conclusion générale.



CHAPITRE I :

RESSOURCES

FORESTIERES

ALGERIENNES



I. INTRODUCTION :

L'Algérie couvre une superficie de 2,388 millions de km² ce qui en fait, en étendue, le deuxième pays africain après le Soudan. Le Sahara l'un des plus vastes déserts du monde en occupe plus de 2 millions de km² soit 84% du territoire.

Les régions du nord de l'Algérie où les conditions de climat et de milieu permettent le développement des formations forestières occupent 250 000 km² soit un peu plus de 10% de la superficie totale.

Nous présentons dans ce chapitre un résumé de trois ressources bibliographiques sur la forêt algérienne. [1][2][3]

II. PRESENTATION DE LA FORET ALGERIENNE :

II.1. Consistance globale et caractéristiques de la forêt algérienne :

Les forêts et maquis couvrent 4,1 millions d'hectares soit un taux de boisement de 16,4% pour le nord de l'Algérie et de 1,7 % seulement si les régions sahariennes arides sont également prises en considération. Ces taux de boisement sont évidemment très insuffisants pour assurer l'équilibre physique et biologique. L'essence prédominante est le pin d'Alep qui occupe 880 000ha et se rencontre principalement dans les zones semi arides. Le capital sur pied de ces pineraies est assez pauvre. Le chêne liège avec 230 000 ha se localise principalement dans le nord-est du pays. Les chênes zeen et afars avec 48 000 ha occupent les milieux les plus frais dans la subéraie. Les cèdres sont éparpillés sur 16 000 ha en îlots discontinus dans le tell central et les Aurès. Le pin maritime est naturel dans le nord-est du pays et couvre 32 000 ha. Les eucalyptus introduits dans le nord et surtout l'est du pays occupent 43 000 ha. Ces essences constituent le premier groupe de forêts dites économiques qui totalisent 1 249 000 ha dont 424 000 ha de peuplements artificiels. Le second groupe, constitué par le chêne vert, le thuya et le genévrier qui, en étage semi-aride jouent un rôle de protection essentiellement, ne couvre que 219 000 ha. Le reste des surfaces forestières qui s'étendent sur 2 603 940 ha se répartissent entre les reboisements de protection qui couvrent 727 000 ha et les maquis et broussailles qui occupent une superficie de 1 876 000 ha. Les forêts font partie du domaine public de l'Etat. S'ajoutent à ces superficies forestières les nappes d'alfa qui totalisent 2,7 millions d'hectares. La forêt algérienne apparaît comme une formation végétale dont les arbres sont en état de lutte continue contre la sécheresse (plusieurs mois secs consécutifs l'été).

Compte tenu de tous les éléments historiques qui la marquèrent et des pressions qu'exercent sans cesse sur elle, l'homme et son bétail, la forêt semble glisser rapidement sur la voie d'une dégradation progressive des essences principales



et de son remplacement par le maquis et les broussailles dont le rôle reste néanmoins extrêmement important pour le contrôle et la fixation des sols en terrain à forte déclivité.

II.1.1. Surface sous forêts, couvert forestier, volume sur pied :

II.1.1.1. Surface sous forêt, couvert forestier :

L'Algérie avec une superficie totale de 2,4 millions de km² peut se subdiviser en deux parties:

- les régions sylvatiques, qui occupent 25 235 000 hectares, dans la partie nord du pays, soit un peu plus de 10% de la superficie totale;
- les régions sahariennes arides (moins de 200 mm de pluie) qui couvrent près de 90% du territoire.

Les forêts et maquis couvrent 4,1 millions d'hectares. En 1830 la superficie était de 5 000 000 d'hectares. Elle est actuellement de 1 500 000 d'ha y compris les repeuplements mais non inclus 1 876 000 ha de maquis et les reboisements réalisés depuis 1962 qui sont de 727 940 ha. La diminution de la superficie en 150 ans correspond donc à 37 % si l'on ne prend en compte que la forêt mais à moins de 10 % si l'on considère l'ensemble des forêts et maquis.

Comme par ailleurs on estime la superficie nécessaire à un bon niveau de protection à 7 000 000 d'ha soit un taux de boisement de 28% pour le nord de l'Algérie, la surface existante en forêts et maquis correspond à environ 57 % du niveau souhaité.

Les données de l'inventaire national de 1984 mettent en évidence, malgré une incertitude sur l'homogénéité des définitions.

- La stabilité des surfaces de pin d'Alep imputable pour partie à l'importance des plantations auxquelles il a donné lieu sur des centaines de milliers d'hectares au cours des 3 dernières décennies
- La réduction de moitié des surfaces de chêne et de liège.

II.1.1.2. volume sur pied :

L'inventaire forestier national publié en 1984 fournit une estimation des volumes sur pied (54 955 000 m³ dont 30 427 000 m³ pour le pin d'Alep) et des accroissements (1 622 600 m³ dont 1 217 000 m³ pour le pin d'Alep).

II.1.2. Forêts naturelles :

II.1.2.1. Consistance :



Les essences principales couvrent 1 491 000 ha qui se répartissent en forêts d'intérêt économique et forêts de protection.

- Forêts d'intérêt économique constituées par : les résineux (pin d'Alep, pin maritime et cèdre) et les feuillus Chêne-zéen et Afarès, eucalyptus.
- Forêts de protection composées de Chêne vert, thuya et genévriers.

Ces diverses forêts ont quelques traits importants en commun:

- Elles sont en général constituées de peuplements purs d'une seule essence, rarement en mélange de 2 ou 3 essences (chêne liège et chêne zéen, ou chêne liège et pin maritime) ;
- Suite à l'action des usagers et de leurs troupeaux, ou aux incendies, les troncs des arbres sont souvent courts, ou tordus et les bois affectés de nombreuses tares et pourritures qui réduisent fortement leur aptitude au sciage.

- *Les pineraies de pin d'Alep* comportent un capital sur pied assez pauvre, de 11 à 54 m³/ha (valeurs extrêmes) avec une moyenne de 45 m³/ha, et un accroissement moyen annuel de 1,8 m³/ha. Le volume sur pied est présumé fournir 30 m³/ha de bois d'œuvre et d'industrie et 15 m³/ha de bois de chauffage.

- *Les subéraies* (229 000 ha). Il s'agit de peuplements âgés: 61% des subéraies sont constituées de vieilles futaies qui ont subi plusieurs démasclages et devraient être régénérées.

Les taillis et perchis ne représentent que 2,5 % de la surface.

- *Les chênes caducifoliés* (zéén et afarès ; 48 000 ha). Ces peuplements occupent les milieux les plus frais et les altitudes élevées dans la subéraie.

Avec sa croissance rapide, le zéén a tendance à recoloniser les subéraies.

Les vieilles futaies représentent 56% des surfaces, les taillis et perchis 5% seulement.

- *Le pin maritime* (31 510 ha). Le pin maritime, qui est naturel dans le nord-est de l'Algérie, s'installe dans les subéraies plus ou moins dégradées.

Sa régénération naturelle est aisée, sauf en exposition sud.

- *Le chêne vert* est surtout abondant dans le nord-ouest du pays ; la surface aurait fortement régressé en 30 ans, de 700 000 ha à 108 200 ha (PNDF, 1984).

II.1.2.2. Volume sur pied et production :

Les forêts productives ne couvrent qu'un tiers du patrimoine forestier national, soit 1 400 000 ha. Elles sont constituées de peuplements de pin d'Alep, d'eucalyptus, de chêne liège, de chêne zéen et afarès, de pin maritime et de cèdre. En matière de réserves de matériel ligneux sur pied, les forêts de pin d'Alep représentent la plus grande proportion. Parmi les feuillus, les eucalyptus et les chênes sont les plus importants. Le chêne liège est essentiellement cultivé pour son écorce (liège).



a) Le bois :

La possibilité annuelle globale, toutes catégories de bois confondues, s'élève à environ 1 200 000 m³ (PNDF, 1984). L'accroissement moyen annuel s'élèverait donc à peine à 1 m³/ha/an si l'on considère la superficie occupée par les forêts productives. Les peuplements de pin d'Alep renferment plus de 80% de la possibilité totale annuelle. Le reste est fourni par les eucalyptus, le chêne zéen et le chêne afarès. La superficie des forêts ayant fait l'objet d'études d'aménagement s'élève à près d'un million d'hectares toutes essences confondues (y compris les peuplements artificiels d'eucalyptus).

Ces forêts représentent une possibilité annuelle d'environ 460 000 m³. La production de bois a suivi un rythme très irrégulier depuis l'indépendance.

Faible de 1963 à 1990, celle-ci a connu une augmentation sensible à partir de 1991 culminant en 1993 avec 240 000 m³. Cette augmentation est essentiellement due aux moyens humains et matériels mis en œuvre par le secteur pour une meilleure prise en charge des plans de gestion.

Ces dernières années, on enregistre un accroissement sensible des besoins nationaux en bois et, parallèlement, une régression des importations, ce qui engendre des tensions sur le marché.

Cette situation a contraint les pouvoirs publics à encourager l'exploitation des ressources locales. Le secteur des forêts devra désormais améliorer son niveau de participation au développement de l'économie nationale. C'est ainsi qu'il se fixe l'objectif de mobiliser annuellement durant les années à venir plus de 500 000 m³ de bois, l'objectif étant, bien entendu, la réalisation de la possibilité globale de plus d'un million de m³/an.

Débouchés des bois locaux

Le bois du Pin d'Alep, de loin le plus répandu, est de qualité moyenne. Ses principaux débouchés sont la menuiserie, la charpente et le coffrage. Les bois d'eucalyptus, qui est exploité généralement à courte rotation (10ans), est destiné à la trituration. Le bois de chêne zéen, vu son importante densité et sa dureté, est essentiellement utilisé pour la confection de traverses de chemin de fer. Le bois de pin maritime, de meilleure qualité est surtout utilisé en menuiserie, le bois de cèdre est, quant à lui, utilisé en ébénisterie.

b) Le liège :

De loin, le plus valorisé des produits forestiers, le liège constitue une ressource stratégique du fait de ses multiples usages (bouchonnerie, parquet, isolation thermique). Les potentialités nationales sont estimées à plus de 200 000 qx/an. Avec une production relativement faible ces dernières années (100 000 à 150 000 qx/an), l'Algérie occupe le troisième rang des producteurs de liège (7% de



la production mondiale), mais loin derrière le Portugal (57%) et l'Espagne (23%). Cependant, avec une meilleure gestion et une exploitation plus rationnelle des peuplements, la production nationale de liège peut connaître une sensible augmentation à court terme.

c) L'Alfa :

D'une moyenne de 30 000t/an au début des années 1990, la production alfatière a chuté de manière drastique pour atteindre 10 000 t en 1994. Les causes essentielles, à l'origine de cette régression tiennent à la désaffection des opérateurs chargés de la récolte et à la raréfaction de la main d'œuvre due à la pénibilité du travail d'arrachage et à son caractère saisonnier notamment.

En résumé on peut dire qu'à l'instar des massifs forestiers méditerranéens, la forêt algérienne joue un rôle beaucoup plus de protection que de production. Composée essentiellement d'essences locales à croissance relativement faible, elle est exploitée à hauteur de 15 à 20% de la possibilité globale estimée à 1 200 000 m³/an.

II.1.3 Forêts plantées :

Le reboisement a toujours constitué une action déterminante dans les programmes d'extension du patrimoine et de protection des terres. Pour l'exécution de ces programmes le secteur des forêts dispose d'une infrastructure de production de plants constituée par 98 pépinières. Leur superficie totale est de 1 159 ha permettant une capacité de production de 170 millions de plants (forestiers, pastoraux et fruitiers). Le bilan des réalisations depuis 1962, déduction faite des plantations fruitières et fourragères, s'élève à plus de 1 million d'hectares. Aucun bilan qualitatif

II.1.3.1. Contribution des plantations à la production de bois :

Les plantations effectuées depuis 1962, date de l'indépendance du pays, l'ont été essentiellement à base d'eucalyptus et de pin d'Alep. La production du bois à partir du pin d'Alep est comprise dans la production des forêts naturelles, cette essence ayant été utilisée massivement pour les repeuplements de forêts naturelles. Les eucalyptus qui ont été plantés pour, d'une part, leur croissance rapide et, d'autre part, fixer des sols fragiles fournissent une production de 145 000 m³ annuellement sur une superficie de 50 000 ha. Cette production est destinée quasi exclusivement à la trituration.

II.2. Etat des industries forestières :



II.2.1. Situation actuelle des industries forestières :

Dans le secteur public, il existe trois types d'industrie du bois bien distincts: les complexes intégrés de l'entreprise nationale de transformation du bois (ENATB) de 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} transformations, les grosses unités qui sont aussi des entreprises publiques économiques par actions qui font de la 2^{ème} et 3^{ème} transformation et les entreprises privées, généralement de petite taille, de 3^{ème} transformation.

Les complexes intégrés de l'ENATB sont au nombre de 4 (réalisés entre 1978 et 1980; capacité de production de 526000 m³) dont trois ont été prévus pour s'approvisionner en bois locaux et donc installés dans les régions recelant les plus importants massifs forestiers constitués de forêts de pin d'Alep. Les approvisionnements font essentiellement à partir de bois d'importation pour les sciages, déroulage, et tranchage. Les chaînes de panneaux de particules sont approvisionnées à 70% par des déchets des unités de première transformation et à 30% par des bois locaux: eucalyptus et pin d'Alep essentiellement. L'ENATB autoconsomme plus de 50% des productions de ses unités de 1^{ère} et 2^{ème} transformation dans ses usines de fabrication de meuble et d'emballage qui sont au nombre de 7. Ces unités n'utilisent pour leur fabrication de meubles, pour les parties massives, que du bois importé. Les contreplaqués et panneaux de particules sont locaux.

D'autres unités de transformation existent : ENMGP (Entreprise nationale de menuiserie générale et du préfabriqué), SNTF (Société nationale des transports ferroviaires), SNTA (Société nationale des Tabacs et allumettes), les P et T (Postes et Télécommunications), SAFA (Société agro-forestière d'aménagement). L'ENMGP se compose de 23 unités (capacité 420000m³) construisant des maisons préfabriquées fixes et mobiles en bois et métallique. Elle s'approvisionne essentiellement par l'importation (368.000 m³ soit 35 % des importations totales de bois). La SNTF a installé une scierie dans la région de Jijel pour fabriquer de la traverse de chêne Zeen. La SNTA importe du peuplier en grume pour la fabrication d'allumettes et dispose d'une petite unité de déroulage. Les P et T n'utilisent que des poteaux soit importés soit locaux (pin d'Alep) qu'ils traitent localement. La Société Agro Forestière d'Aménagement des Aurès dispose de deux petites unités (scierie de pin d'Alep et de cèdre et menuiserie) avec des équipements anciens et donc une faible productivité.

Le secteur privé de la transformation du bois existe principalement dans les grandes villes, et surtout à Alger, sous forme de petites unités artisanales (2 à 6 personnes) de fabrication de meuble, menuiserie, emballage plus ou moins bien équipées, mais beaucoup disposent d'un combiné à 7 opérations.

II.3. La recherche :



En Algérie la recherche forestière est du domaine de compétence de l'institut national de la recherche forestière (INRF) organisé en équipes de recherche dans des stations régionales de recherche réparties à travers les différentes zones écologiques du pays. Bien que les chercheurs de cet institut aient obtenu des résultats appréciables dans le domaine de la recherche – développement en matière de reboisement, de lutte contre l'érosion et la désertification, de lutte contre les maladies et parasites, de sylviculture et de conservation de la biodiversité, avec trop souvent des moyens dérisoires, ces résultats restent insuffisants et pas assez performants ; or le développement de la foresterie et sa contribution efficace à l'économie et au bien-être national suppose entre autres l'existence d'institutions de recherche hautement performantes. Pour atteindre cette performance élevée les autorités s'attacheront à mettre en place un environnement de recherche adéquat, des capacités et des moyens suffisants ; mais s'évertueront également à réunir des scientifiques bien formés et motivés. La recherche forestière s'inscrit dans le cadre de la recherche scientifique nationale laquelle est dotée d'un programme national dont la mise en œuvre est confiée à des institutions spécialisées dépendant des différents secteurs ou du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Ce programme est coordonné par un conseil supérieur composé de tous les secteurs concernés. Une loi programme a été adoptée, elle est destinée à financer le programme national réalisé par des institutions et des centres de recherche et confié à différentes équipes spécialisées et souvent pluridisciplinaires. Grâce à cela et à l'assouplissement des modalités de décaissement, les fonds destinés à la recherche ont sensiblement augmenté et sont mieux utilisés.



CHAPITRE II :

LE BOIS



I. INTRODUCTION :

Le bois est un matériau organique naturel, il est fourni par deux grandes catégories regroupant des milliers d'espèces d'arbres : Les *feuillus* ; nom couramment donné aux arbres à feuilles plates (Chêne, Hêtre, Peuplier, Frêne,..), et Les *résineux* ; nom donné aux arbres à aiguilles (Sapin, Pin, Epicéa,..). Par extension, ces deux appellations désignent également leurs bois respectifs.

Chacun de nous sait que l'arbre est principalement composé de trois parties : Les *racines* enterrés dans le sol, la *tige* (ou le tronc) fixé au sol par les racines et le *houppier* qui regroupe les *branches* et les *feuilles*. La tige est à l'origine de la quasi-totalité du bois utilisé en construction.

I.1 Domaines d'utilisation du bois dans la construction :

Le bois est un matériau préhistorique : la construction sur pilotis a été utilisée depuis des lustres par l'homme, il en reste encore des vestiges, qui illustrent bien la durabilité de ce matériau. Au moyen âge, le bois a été utilisé pour la réalisation des ossatures des maisons à pans de bois et pisé, et comme pilots (pieux) de fondation. De nos jours le bois est utilisé à tous les stades de l'exécution des ouvrages, notamment sous forme de :

- Blindage et étayages des fouilles ;
- Coffrage des éléments en béton (à côté du coffrage métallique) ;
- Réalisation de la charpente et des couvertures ;
- Menuiserie (portes, fenêtre, etc..) ;
- Parquets.

Le bois est également très utilisé comme matériel de chantier. On s'en sert comme :

- Echafaudages ;
- Plateaux de levage ;
- Baraques préfabriquées
- Palissades pour clôturer les chantiers.

Ces multiples utilisations nécessitent de l'utilisateur des connaissances précises sur les diverses essences, les qualités et défauts des bois, leurs modes d'assemblages et leur condition d'emploi.

La production mondiale de bois ronds s'élève à plus de 3 milliards de mètre cube par an, les plus grands producteurs étant les Etats Unis, le Canada, l'ex URSS, l'Inde et la Chine.

L'Algérie consomme quant à elle une très modeste quantité de bois, environs 1,3 million de m³ par an, dont 15% seulement proviennent de sa production nationale.



II. STRUCTURE DU BOIS :

II.1 Structure macroscopique :

La coupe transversale d'un tronc (fig. II.1) laisse apparaître une partie centrale assez dure. Il s'agit d'un tissu mort appelé bois de cœur ou duramen. La partie périphérique plus tendre prend le nom d'aubier. C'est un tissu vivant où circule la sève. Son épaisseur est très variable suivant les essences.

Le cambium est la partie biologique active, c'est là où se fait la croissance saisonnière de l'arbre. Au printemps, il se forme des tissus lâches, riches en éléments conducteurs de la sève alors qu'en été se forment des tissus plus serrés, plus denses donc plus résistants. Cette alternance donne au bois une structure de cernes concentriques d'épaisseur variable permettant de connaître l'âge de l'arbre.

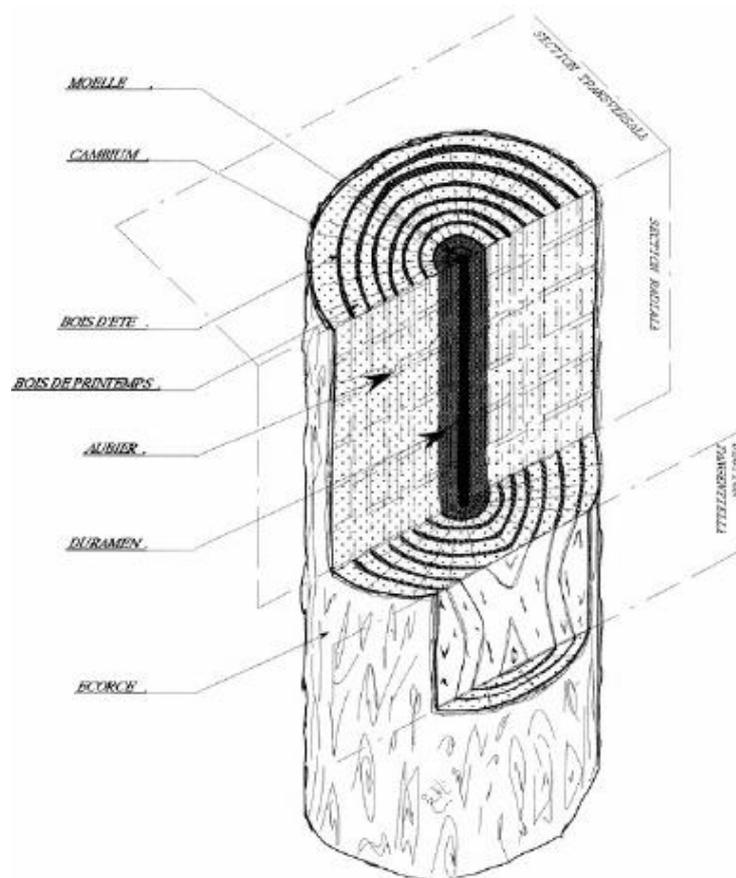


Figure II.1 coupe d'un tronc d'arbre



ELEMENTS	DEFINITIONS ET ROLES
ECORCE	Composée de cellules mortes. Elle est imperméable mais permet des échanges gazeux pour la respiration des cellules du cambium et de l'aubier ;
LIBER	La plupart des cellules le composant sont mortes. La partie la plus interne du liber possède des canaux qui amènent la sève élaborée des feuilles aux cellules du cambium ;
COMBIUM	C'est là que se produit la croissance de l'arbre. Il est uniquement visible au microscope ;
AUBIER	Composé de cellules plus ou moins vivantes il transporte la sève brute des racines aux feuilles
DURAMEN	Composé de cellules mortes (qui ont fini d'évoluer).C'est le support de l'arbre. Aussi appelé : bois parfait ;
MOELLES	Tissu mou au centre. Elle forme au début de la croissance de l'arbre et ne se modifie pas ;
RAYONS	Espace possédant des cellules de parenchyme qui servent à l'entreposage de réserves nutritives. Ils sont invisibles à l'œil nu chez les résineux ;
CERNES	Correspondent aux couches de croissance annuelles.

Tableau II.1 *Structure transversale de l'arbre*

Chaque année le cambium produit des formations en anneaux concentriques. Les limites de ces anneaux sont nettes dans certains bois. En effet, au printemps il se forme un bois riche en vaisseaux qui assure le transport d'une sève abondante. A la fin de l'été et en automne il se forme un bois où les fibres dominant et, en hiver, la multiplication cellulaire est quasiment nulle. La différence entre le bois de printemps poreux et clair et le bois d'automne compact et foncé permet de compter les cernes annuels et donc de connaître l'âge d'un arbre.

II.2 Structure microscopique :

a) Structure anatomique :

Le bois est un tissu végétal fait d'éléments cellulaires différemment agencés d'une essence à une autre, mais selon la taille et la forme des éléments conducteurs, on distingue deux grandes familles : les Gymnospermes (résineux, conifères) et les Angiospermes (feuillus).

La figure (II.2) représente le plan ligneux d'un résineux, les tissus sont essentiellement formés de cellules allongées de 1 à 4 mm, appelées "trachéides", associées à des canaux résinifères et des rayons médullaires constituées par des cellules de parenchymes.

La figure (II.3) représente le plan ligneux d'un feuillu, la présence de vaisseaux, tissus de conduction, et la longueur des fibres distinguent le feuillu du résineux.

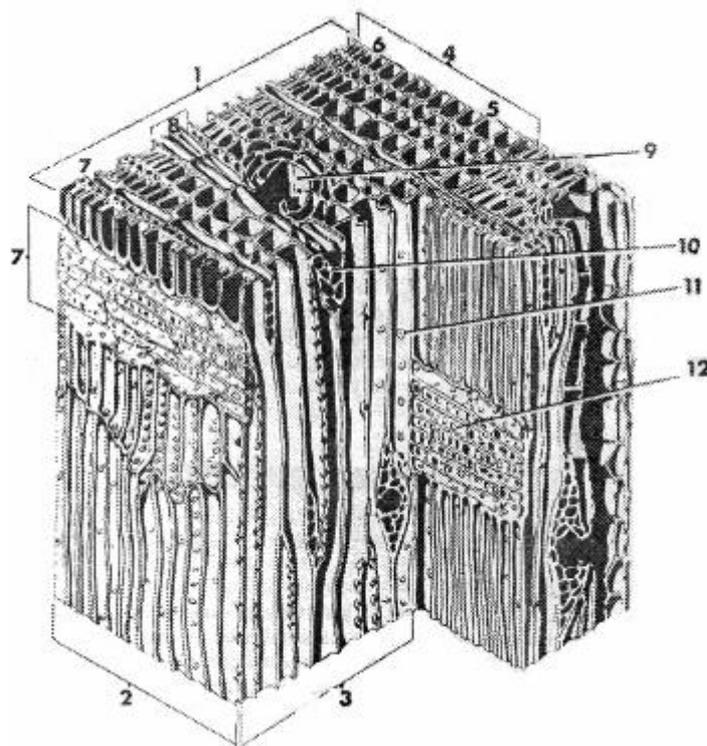


Figure II.2 Plan ligneux d'un résineux :
section transversale, (2) section radiale, (3) section tangentielle, (4) cernes de croissance, (5) bois de printemps, (6) bois d'été, (7) et (8) rayons, (9) canaux résinifères verticaux, (10) canaux résinifères horizontaux, (11) et (12) ponctuations [07]

b) Constituants chimiques :

La paroi cellulaire est composée en moyenne de 50% de cellulose, chaîne qui joue un rôle important dans le comportement rhéologique du bois, de 25 à 30% d'hémicelluloses, corps de composition analogue à la cellulose mais de chaînes plus courtes, et enfin de 10 à 25% de lignine, polymère amorphe qui joue surtout un rôle de liant entre les parois cellulaires.

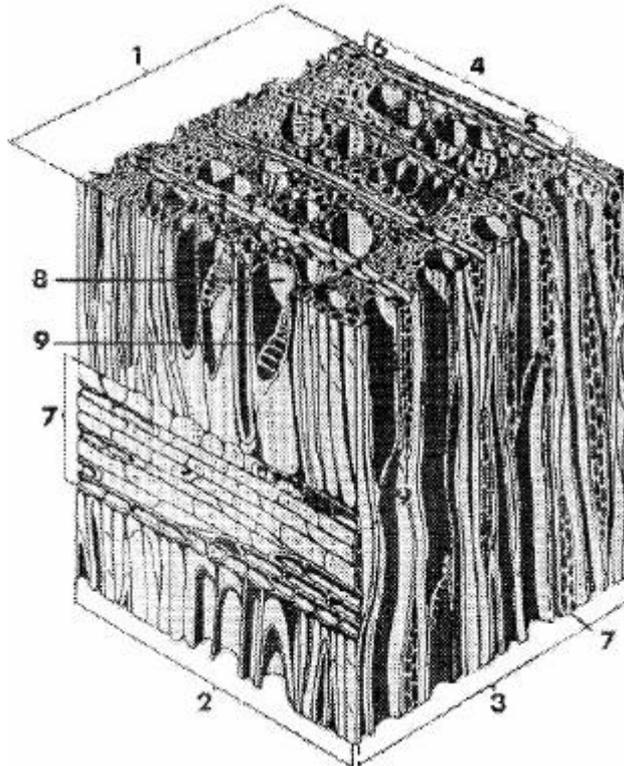


Fig. II.3: Plan ligneux d'un feuillu:
(1) section transversale, (2) section radiale, (3) section tangentielle,
(4) cernes de croissance, (5) bois de printemps, (6) bois d'été,
(7) rayons, (8) vaisseaux, (9) perforations [07]

II.3 Défauts des bois :

Le bois présente parfois des anomalies ou défauts qui modifient ses propriétés. Ces défauts sont de deux origines ; végétative ou dus à des causes extérieures.

II.3.1 Défauts d'origine végétative :

II.3.1.1 Les nœuds :

Les nœuds sont constitués par des branchements dont il ne subsiste que la base par suite de la chute du rameau. La portion du rameau qui subsiste est ultérieurement recouverte par les formations annuelles.

Il résulte de cette origine que la plupart des nœuds ne peuvent se déceler par un examen extérieur du tronc.

Forme de nœuds du bois : la forme sous laquelle apparaissent les nœuds dépend du débit et de l'orientation du trait de scie par rapport à la branche: circulaires ou ovales dans le débit tangential ils se présentent sous forme de nœuds plats dans un débit radial.



Dimensions : Le diamètre est variable suivant l'importance de la branche dont ils sont issus. Il entre en ligne de compte dans la classification des pièces de bois.

Ainsi on peut considérer comme :

- très petits, ceux qui ont moins de 5 mm de diamètre ;
- petits, de 5 à 15 mm de diamètre ;
- moyens, de 16 à 25 mm de diamètre ;
- gros, de 25 à 40 mm de diamètre ;
- très gros, ceux qui ont plus de 40 mm de diamètre.

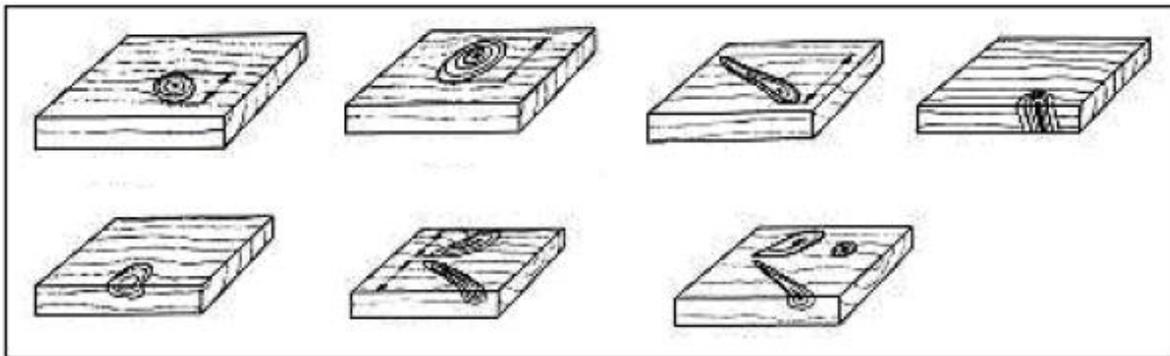


Figure. II.4 Défauts du bois

II.3.1.2 Accentuation de la forme tronconique :

C'est la décroissance du diamètre de la base au sommet d'un arbre.

II.3.1.3 Courbure des tiges :

Certaines courbures ont une origine héréditaire mais le plus souvent la courbure d'un tronc a une cause accidentelle : poids de la neige, vent dominant, voisinage d'un mur élevé, d'un bâtiment, etc.

II.3.1.4 Excentricité du cœur :

On constate ce défaut chez les arbres qui ont poussé sur des pentes rapides ou chez ceux qui sont soumis à des vents dominants. Les couches concentriques sont de largeur variable : d'un côté amincies et, de l'autre élargies. Ces bois se déforment tellement au retrait qu'ils doivent être exclus de toute fabrication.

II.3.1.5 Torsion des fibres :



Les fibres ne sont pas toujours verticales dans l'arbre sur pied. Elles sont parfois disposées suivant une hélice d'inclinaison variable avec les essences et les conditions de végétation.

II.3.1.6 Fibre ondulée :

Les fibres sont disposées suivant une ligne sinueuse par rapport à l'axe de l'arbre. Lorsque ce défaut se combine à une certaine dureté, il donne des bois qui se déforment beaucoup au séchage, qui sont difficiles à usiner et à polir.

II.3.1.7 Bois madré :

On appelle ainsi un bois dont les éléments constitutifs sont enchevêtrés en tous sens.

II.3.2 Défauts dus à des causes extérieures :

Ces défauts sont dus à des causes climatiques, à l'action des végétaux parasites, ou à des accidents multiples auxquels les arbres sont exposés.

Le froid, la chaleur et la sécheresse, le vent, la foudre, la neige et la pluie peuvent, par leurs excès, provoquer l'apparition de certains défauts importants, on peut citer :

II.3.2.1 La gélivure :

La gélivure se produit principalement lorsque le froid survient très brutalement après une période relativement douce. L'éclatement se fait suivant un rayon médullaire, après un gonflement dû au gel de la sève dans tout le tronc. Les bois atteints de gélivure (assez souvent le chêne, l'orme, le peuplier, le noyer) sont difficilement utilisables.

II.3.2.2 Roulure :

C'est une séparation de deux couches consécutives annuelles qui ne sont plus adhérentes. La roulure est souvent provoquée par un hiver très rigoureux. Un bois roulé est inutilisable.

II.3.2.3 Fissures internes :

Les fissures internes peuvent avoir des causes variées, elles peuvent aller de simples sillons dans l'écorce à l'éclatement à peu près total.



II.3.2.4 Cadranure, Cœur étoilé :

Ce sont des fentes radiales partant du cœur. On les rencontrera dans les arbres vétustes. L'arbre cadrané est sans valeur comme bois d'œuvre si les cadranures sont importantes.

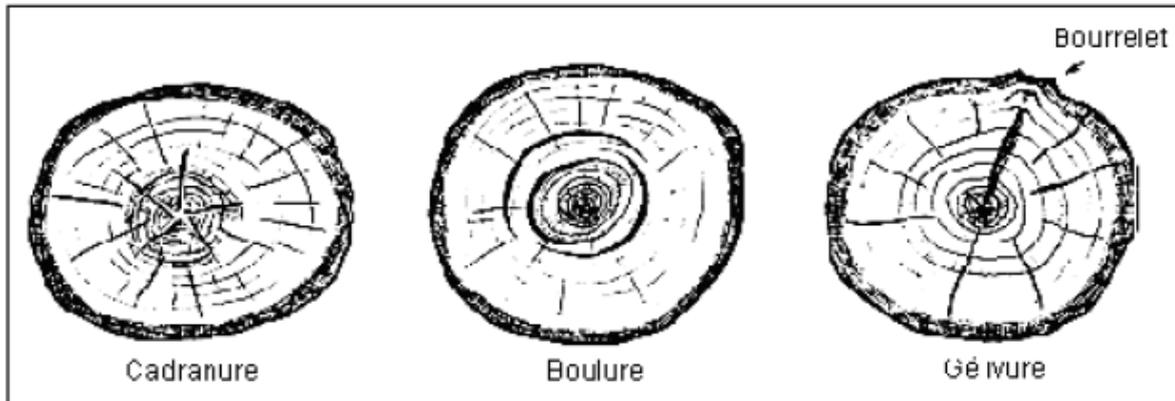


Figure II.5 Défauts du bois dus à des causes extérieures

Parmi les défauts dus à l'action des végétaux parasites on peut citer :

1°) Le gui ; C'est une plante qui vit en parasites sur le bois.

2°) Plantes sarmenteuses ; elles sont nuisibles, sont principalement : le lierre, le chèvrefeuille des bois et les clématites.

3°) Le chancre ; ce sont des champignons parasites vivant sur l'arbre provoquent une déformation du tronc.

4°) La rouille vésiculeuse ; C'est une altération des résineux due à un champignon et qui se traduit par une sécrétion surabondante de résine.

D'autres défauts comme les blessures sont la conséquence des accidents multiples auxquels les arbres sont exposés.

II.4 Classement des bois :

La présence de défauts ne doit pas interdire l'utilisation des bois mais seulement la limiter à certains domaines, ainsi la notion de classement du bois est née. Des règles de classement détaillées ont été introduites pour la première fois en 1923 aux états unis et, à partir des années 1930, successivement dans différents pays d'Europe. Le classement est réalisé par un examen visuel du bois en prenant en compte les facteurs de réduction de la résistance qui peuvent être examinés. Ces facteurs sont principalement les nœuds et la largeur des cernes d'accroissement.

Le tableau ci-dessous résume la norme française B 52-001 relative à la classification des bois commerciaux.



Critères de classification		Catégorie I Très bon choix	Catégorie II Bois de choix	Catégorie III Bois sain	
Pente du fil sur une face	générale . .	$\leq 7\%$	$\leq 12\%$	$\leq 18\%$	
	locale . .	$\leq 10\%$	$\leq 20\%$	$\leq 25\%$	
Noeuds acceptés sains et adhérents, non groupés		de $\varnothing \leq 30$ mm	de $\varnothing \leq 40$ mm	sans limita- tion de diamètre	
Fentes		Superficielles et aux extrémités arêtes vives		avec flaches accidentelles	
épaisseur moyenne des couches annuelles en (mm)	chêne . .	7 mm	> 4 mm	aucune restriction	
	résineux . .	3 mm	≤ 5 mm	< 10 mm	
contrainte admissible en bars à 15% d'humidité	compression axiale	chêne . . .	90	70	
		résineux . .	80	60	
	flexion	chêne . . .	110	100	80
		résineux . .	100	90	70

Tableau II.2 Classification des bois [NF B 52-001]

Il est à noter que malgré la quasi exclusivité du classement visuel, le classement automatisé se développe et commence à être utilisé voir imposé dans des pays comme le Canada.



III. PROPRIETES DU BOIS :

A la structure et à l'aménagement des couches annuelles se rattachent deux notions importantes : l'homogénéité et la texture. Un bois est homogène lorsqu'il y a peu de différence entre les bois de printemps et d'été.

Exemple : charme, hêtre, chêne vert, noyer.

Il est hétérogène lorsque la zone poreuse du bois de printemps se différencie nettement du bois d'été, dur compact et, foncé.

Exemple : châtaignier, frêne, faux acacia.

La texture est liée au rapport entre la largeur du bois d'été et la largeur totale des cernes. Chez les résineux poussant vite les couches annuelles sont larges et formées surtout de bois de printemps. Leur texture est donc faible. Au contraire, les résineux de montagne ou des pays nordiques poussés lentement présentent des cernes peu épais dans lesquels domine le bois d'été. Ils ont donc une texture forte.

C'est exactement l'inverse chez les bois feuillus. Les Chênes, ormes ou frênes à croissance rapide présentent dans des cernes larges une forte proportion de bois d'été. Ils ont une texture forte sont parfois difficile à travailler, ceux au contraire qui poussent lentement sont plus légers, plus tendres, plus facile à travailler.

De la structure originale du bois dépend aussi plusieurs propriétés fondamentales du bois qui régissent son comportement ; l'anisotropie et l'hygroscopie en sont deux exemples.

III.1 L'anisotropie :

Par définition l'anisotropie, contraire de l'isotropie, s'exprime par le fait que les propriétés physiques est mécaniques dépendent de la direction.

Elle est due dans le cas du bois essentiellement à la disposition concentrique des cernes et à la structure de fibres.

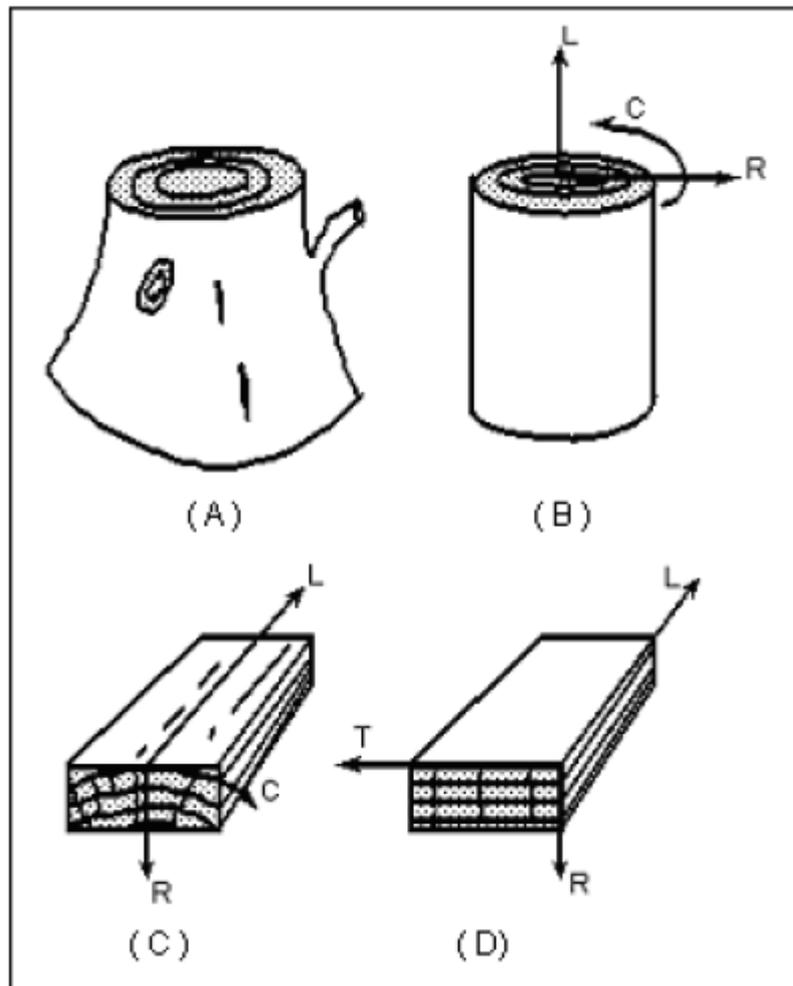


Figure II.6 Anisotropie et modélisation du bois

La complexité du matériau bois exige alors pour son étude une modélisation qui, sans s'éloigner des grands traits de sa structure, facilite cette étude.

La *grume* (A) (figure II.6), contenant des défauts naturels de croissance tels que les nœuds, les fissures ou les excentricités, est idéalisée (B) en ignorant ces singularités, d'autre part une planche coupée loin du centre de la grume et qui doit logiquement se référer à un système de coordonnées cylindriques (L,R,C), vue sa géométrie et les particularités de sa structure telles que les enveloppes cylindriques (C), est généralement étudiée dans un système cartésien rectangulaire (L,R,T) (D).

III.2 L'hygroscopie :

Le bois est fortement hygroscopique, son taux d'humidité interne s'équilibre en fonction des conditions climatiques de l'environnement. L'eau adsorbée sous forme «*d'eau libre*» n'a probablement pas une influence notable sur le



comportement mécanique en petites déformations. Par contre, la partie de l'eau adsorbée dite "liée" interagit dans la paroi cellulaire sur les polymères constitutifs de la matière ligneuse. Cette hydrolyse partielle, occasionne des modifications de comportement mécanique qui se manifestent pendant les essais. Cette eau est donc localisée dans différentes parties du bois et il convient de bien distinguer :

III.2.1 L'eau libre ou intracellulaire :

Elle remplit les vaisseaux, les vides cellulaires (intérieur des fibres par exemple), Cette eau n'influe d'ailleurs pas sur les propriétés du bois si ce n'est sur sa densité. Nous trouvons une forte quantité d'eau libre dans les bois contenant par exemple 40%.

III.2.2 L'eau de saturation :

Elle est retenue par les parois des cellules. Lorsque ces parois contiennent le maximum de l'eau qu'elles sont susceptibles d'absorber on dit que le bois est saturé. Le point de saturation est voisin de 30%. L'eau de saturation influe directement sur les propriétés du bois. Lorsque sous l'action naturelle ou artificielle de l'air, le bois perd son eau de saturation, ses dimensions varient et il subit des déformations suivant la quantité d'eau de saturation restant dans le bois, on dit qu'il est :

- Saturé (taux d'humidité voisin de 30 % mais pouvant varier tout de même de 25 à 35% suivant les espèces) ;
- Mi-sec (taux d'humidité compris entre le point de saturation et 23 % environ). Commercialement sec (taux. d'humidité compris entre 22-23 et 18%) ;
- Sec à l'air (taux d'humidité assez variable suivant les régions et la saison, mais s'établissant en général de 15 à 20%) ;
- Desséché (au-dessous de 13%. C'est très souvent le cas des bois séjournant dans des locaux d'habitation ou des bureaux, fortement, chauffés et non humidifiés artificiellement).
- Anhydre ou sec absolu (taux d'humidité de 0% qui ne peut être obtenu que par un séjour en étuve à 100° 116° et même 130° et qui ne peut être maintenu puisque le bois absorbera l'humidité ambiante, assez lentement d'ailleurs, jusqu'à établissement d'un état d'équilibre).

III.2.3 L'eau de constitution du bois :

Elle fait partie de la molécule de cellulose ou de lignine. On ne peut la faire disparaître que par transformation de la composition chimique, par distillation du bois par exemple. Cette eau n'étant pas comprise dans le taux d'humidité,



nous n'aurons pas à en évoquer le rôle. Il ressort de ce qui précède que nous sommes surtout intéressés aux pourcentages compris entre 10 à 12 % et 30% puisque nous utilisons le bois dans ces limites.

Calcul du taux d'humidité :

Au laboratoire la détermination du taux d'humidité est facile à réaliser même avec précision. Une éprouvette est pesée, puis desséchée dans une étuve à 110° C. Ce taux est calculé en fonction du poids total, c'est à dire du poids du bois vert, c'est-à-dire du bois humide (BH). C'est d'ailleurs le plus souvent ainsi que l'on s'exprime dans l'industrie.

Cependant, si l'on se conforme aux prescriptions de la norme AFNOR B-51004, on doit mesurer le taux d'humidité d'un bois en pourcentage du poids du bois anhydre c'est-à-dire absolument sec (Bs). Évidemment les résultats seront d'autant plus différents que le titre d'humidité est plus élevé.

$$H[\%] = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100\%$$

avec :

M_h est la masse de l'éprouvette humide, en [g].

M_s est la masse de l'éprouvette à l'état anhydre, en [g].

Il existe une autre méthode plus rapide (et moins précise) qui consiste à introduire dans un trou pratiqué dans une éprouvette un papier imprégné d'un sel de cobalt. Le chlorure de cobalt bleu par temps sec devient rose par temps humide. Donc le papier vire du bleu au rose dans le bois humide et l'on compare la teinte obtenue à celles d'une gamme de couleurs étalonnée.

Les méthodes électriques ont l'avantage de permettre une lecture directe. La plus fréquemment utilisée est la mesure par résistance.

Le bois anhydre est un isolant parfait. Il perd rapidement cette propriété au fur et à mesure que son taux d'humidité s'élève.

Au delà de 25% d'humidité, à l'approche du point de saturation le bois est bon conducteur et l'on ne peut plus pratiquer de mesure.

Les appareils utilisés doivent donc fournir un courant et l'on mesure en fait la résistance opérée par le bois au passage de ce courant.

III.3 Le retrait :



A mesure qu'il se dessèche et s'éloigne du point de saturation des fibres, le bois diminue dans ses dimensions et par conséquent dans son volume. On dit qu'il subit un retrait (comme le béton).

Le bois se met dans un état d'équilibre avec l'humidité ambiante. Par conséquent le taux d'humidité peut varier si le milieu présente lui-même une humidité variable. Il en résulte des variations dans l'état hygrométrique et ces variations s'accompagnent des variations dimensionnelles et volumétriques dans les deux sens. On dit que le bois travaille. Il en résulte l'apparition d'un jeu dans les assemblages.

L'importance des variations dimensionnelles n'est pas la même suivant les espèces, mais est surtout variable suivant les directions considérées.

- Dans le sens de l'axe de l'arbre le retrait est pratiquement négligeable ; Dans le sens radial il est beaucoup plus important, atteignant jusqu'à 3 ou 9 % de la largeur des planches ou plateaux ;

- Dans le sens tangentiel enfin le retrait peut atteindre 3 fois la valeur du retrait radial.

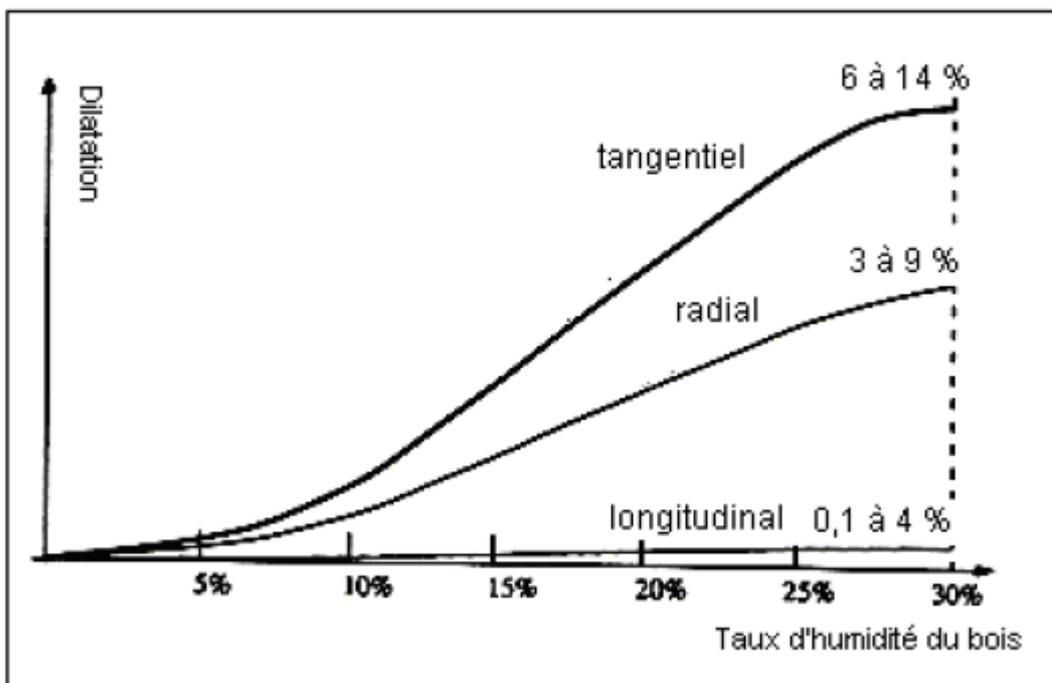


Figure II.7 Retrait du bois selon les trois directions [07]

III.4 La rétractibilité :

On distingue la rétractibilité totale qui correspond à la variation de volume depuis le point de saturation jusqu'à l'état anhydre, le coefficient de rétractibilité volumétrique c'est-à-dire la variation de volume établie en pourcentage du volume initial, pour une variation de 1% du taux d'humidité et le coefficient de



rétractibilité linéaire qui exprime en pourcentage de la dimension considérée le retrait pour une variation de 1% du taux d'humidité.

En fonction de la valeur du coefficient de rétractibilité volumétrique les bois sont qualifiés de la manière suivante :

VALEUR DU COEFFICIENT DE RETRACTIBILITE VOLUMETRIQUE	QUALIFICATION	EXEMPLES
(0,55 à 1) %	Très nerveux	Chêne
(0,35 à 0,55) %	Nerveux	Eucalyptus, hêtre
(0,15 à 0,35) %	Peu nerveux	Sapin, Pin, Epicéa,

Tableau II.3 Valeur du coefficient de rétractibilité volumétrique des bois

Les différences entre retrait radial et tangentiel peuvent provoquer des voilements et gauchissement plus ou moins accentués selon le type de débit de la pièce de bois (fig. II.8).

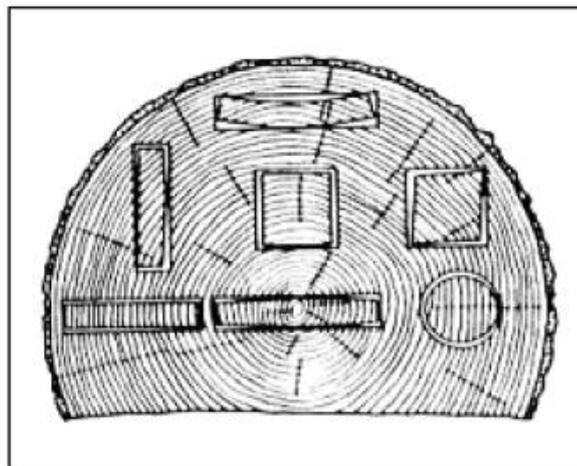


Figure II.8 Gauchissement de différentes sections

III.5 La densité :

L'approche utilisée dans cette étude est suivant la norme française NF B 51-002 [2], qui définit trois types de masse volumiques en fonction d'un degré d'humidité H :

- La masse volumique à 15% (bois sec à l'air).
- La masse volumique à 0% (bois anhydre).
- La masse volumique à H% (à un degré d'humidité quelconque).



En effet, on utilise des éprouvettes cubiques ($20 \times 20 \times 20 \pm 0.01$ mm) qui seront pesées, avec une précision de 0.01 g, avant et après dessiccation au moyen d'une étuve ventilée permettant de maintenir une température de $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2$. cette méthode se résume comme suit :

- Peser l'ensemble des éprouvettes avant dessiccation,
- Déshydrater les éprouvettes dans l'étuve jusqu'à masse constante, (c'est-à-dire qu'on mesure la masse de quelques éprouvettes chaque quatre heures jusqu'à stabilisation de la masse).
- Une fois la masse est stabilisée, on fait une dernière pesée de l'ensemble des éprouvettes aussitôt sorties de l'étuve.

III.6 Propriétés mécaniques :

Les efforts mécaniques auxquels doivent résister les bois mis en œuvre sont ceux qui s'exercent normalement sur les pièces constitutives des constructions et qui peuvent se ramener aux efforts simples de compression, de traction ou de cisaillement.

Pour chacun de ces efforts, il faut distinguer entre les efforts statiques et les efforts dynamiques. De plus, en raison de la structure fibreuse anisotrope du bois, il faut considérer les directions par rapport auxquelles ces efforts peuvent être exercés.

On distingue ainsi :

- La compression axiale parallèlement à la direction axiale et la compression transversale normale à l'axe.
- La traction axiale parallèlement à la direction axiale et la traction perpendiculaire aux fibres.
- Le cisaillement longitudinal s'exerçant suivant des plans parallèles à l'axe du tronc et le cisaillement transversal s'exerçant suivant des plans perpendiculaires à cet axe.

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer les résistances que le bois peut offrir aux efforts qui lui sont appliqués. Ces essais sont classés en deux catégories différentes :

Les essais de qualification du bois Ces essais permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques d'une essence, on caractérise non pas une pièce à mettre en œuvre, mais la matière qui la constitue, indépendamment de ses qualités technologiques.

Ces essais s'effectuent sur des éprouvettes de faibles dimensions, sans nœuds, ni défauts. Les résultats sont rapportés aux masses volumiques de manière à obtenir des caractéristiques à masses volumique égale et à éliminer les variations trop importantes dues aux différences de masse volumique, déjà signalées.



Les essais de détermination des résistances d'emploi Ces essais recherchent les valeurs des résistances mécaniques à introduire dans le calcul des pièces. Les résistances mécaniques d'une pièce dépendent de l'essence, de ces particularités de structure, de la présence et de la dimension de certains défauts (nœuds, fentes, etc.).

L'essai peut se pratiquer sur des échantillons convenablement choisis ou sur des pièces prêtes à être mises en œuvre (poteaux, poutres, etc.). L'influence des défauts, la détermination des charges de sécurité, les résistances des assemblages et des pièces composées sont autant de problèmes qui se posent à ce propos.

III.6.1 Traction longitudinale du bois :

Les essais de traction sont difficilement réalisables. L'éprouvette à essayer étant maintenue sur la machine de traction par ses extrémités, des ruptures prématurées apparaissent au voisinage des têtes de fixation par cisaillement ou arrachement.



Figure II.9 Traction longitudinale

Le comportement en traction est linéaire jusqu'à la rupture est de type fragile (figure II.10). Le mode de rupture est le déchirement des fibres. La résistance en traction longitudinale est plus grande que celle obtenue en compression, les valeurs courantes pour les résineux sont 80 à 100 N/mm². Le module d'élasticité est quand à lui sensiblement identique dans les deux cas et s'étale entre les valeurs courantes de 11000 à 15000 N/mm².

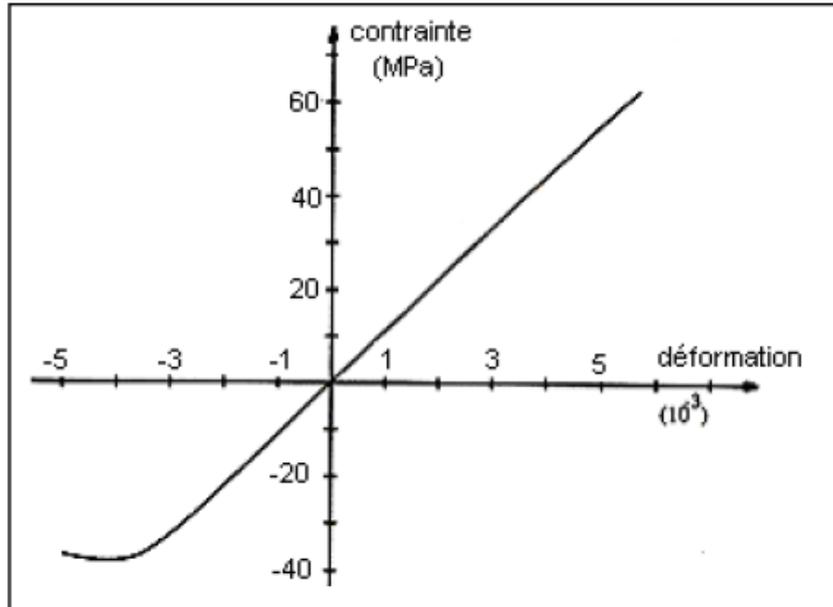


Figure II.10 Courbe contrainte-déformation

III.6.2 Traction transversale du bois :

Le bois possède une très faible résistance transversale. Elle est approximativement comprise entre 1 et 2 N/mm². La rupture se fait par décollement des fibres.

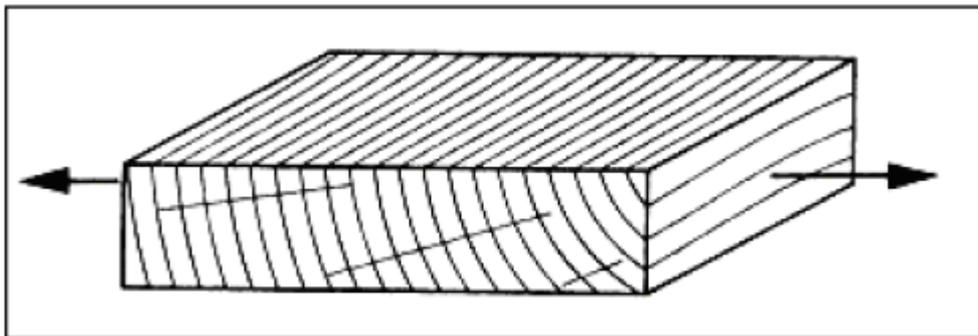


Figure II.11 Traction transversale

Dans la conception des pièces de bois, les contraintes de traction perpendiculaire doivent être évitées autant que possible.

III.6.3 Compression longitudinale du bois :

Les éprouvettes de compression doivent être aussi courtes que possible pour éviter les problèmes de flambement, ceci est normalement garanti pour $L < 5 l$.

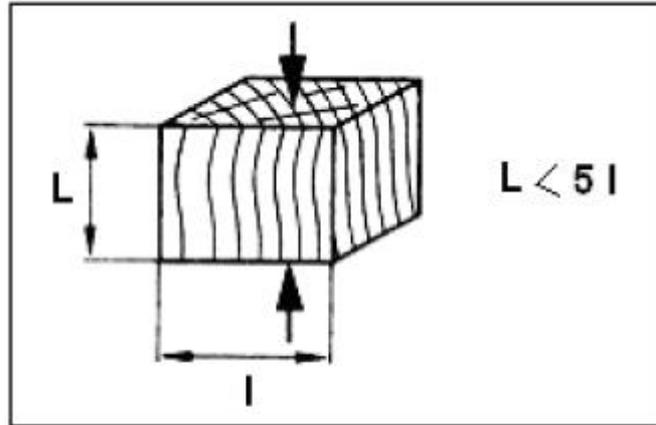


Figure II.12 *Compression longitudinale*

La rupture est ductile et correspond au flambement de paquets de fibres, c'est une sorte d'instabilité locale due au cisaillement suivant un plan incliné. Les valeurs courantes pour la résistance en compression longitudinale des résineux sont 40 à 50 N/mm².

III.6.4 Compression transversale du bois :

La résistance du bois est beaucoup plus faible dans cette direction, la zone de déformation élastique est très réduite, sinon inexistante. Sous l'influence de la charge, les affaissements deviennent rapidement importants, en raison de l'écrasement successif des différents éléments du bois. Les déformations sont très importantes.

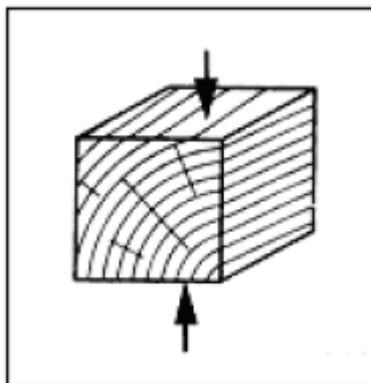


Figure II.13 *Compression transversale*

Les valeurs courantes pour la résistance en compression transversale des résineux sont 2 à 4 N/mm².

III.6.5 Flexion du bois :



Cet essai est réalisé habituellement sur une éprouvette posé sur deux appuis et supportant en son milieu une charge lentement croissante (5 mm par minute), jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

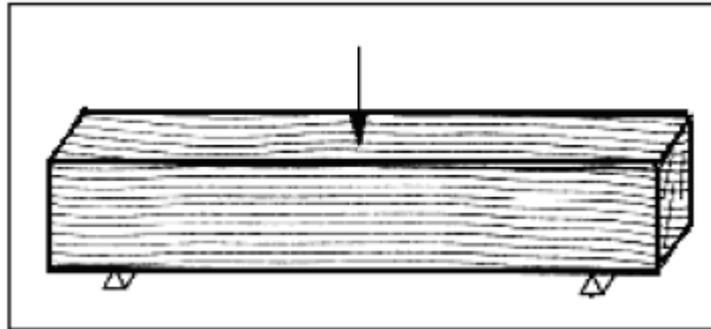


Figure II.14 *Eprouvette de flexion*

La distribution des contraintes dans la section droite ne peut être rectiligne que si la limite élastique n'est pas dépassée dans la zone comprimée. Dans le cas de moments extérieurs élevés, la répartition des contraintes n'est plus uniforme; dans le bord comprimé la contrainte augmente pour atteindre au maximum la résistance à la compression $f_{c, //}$, alors que du côté du bord tendu la contrainte maximale peut atteindre $f_{t, //}$. Si le bois est exempt de défauts, et puisque la résistance à la compression est plus petite que celle en traction, la rupture en compression apparaît en premier sur le bord supérieur, puis c'est au tour de la rupture en traction qui apparaît sur le bord inférieur.

Il est en général admis de calculer avec une bonne approximation les contraintes maximales de rupture par la formule de la résistance des matériaux.

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W}$$

Où W est le module de section.

Pour une section rectangulaire, nous avons : $W = \frac{b.h^2}{6}$

III.6.6 Cisaillement du bois :

La résistance au cisaillement intervient dans de très nombreuses applications mécaniques : assemblages, poutres fléchies, etc. Le bois en raison de sa



structure, est mal organisé pour résister à des efforts de ce genre, et en particulier au cisaillement longitudinal.

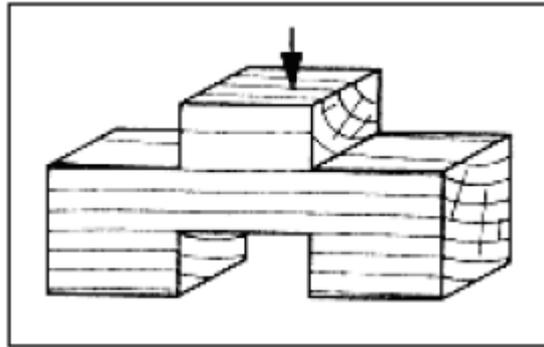


Figure II.15 *Essai de cisaillement transversal*

Le cisaillement pur n'est malheureusement que très difficilement observable, et l'on ne peut réaliser que des essais où le cisaillement domine, mais où interviennent en même temps d'autres sollicitations : traction, compression, flexion, etc..

Parallèlement aux fibres, la résistance au cisaillement n'atteint que 1/8 à 1/10 de la résistance à la compression. Les valeurs courantes des résineux sont 3 à 5 N/mm².

Perpendiculairement aux fibres elle est nettement plus élevée, mais, étant donné la faible résistance à la compression transversale, elle n'a pratiquement pas d'importance.

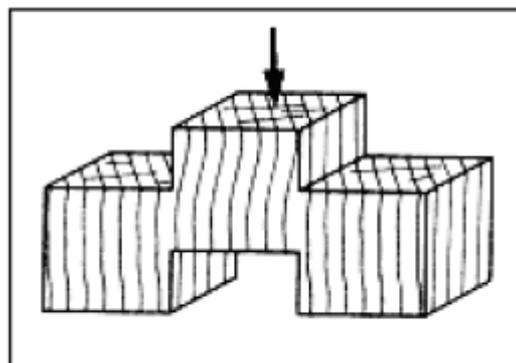


Figure II.16 *Essai de cisaillement longitudinal*

- Valeurs usuelles des résistances du bois

En fonction du mode de sollicitation et de la catégorie, on pourra utiliser, pour la résistance d'un bois, les valeurs du tableau suivant, valeurs exprimées en daN/cm².



Mode de sollicitation	Catégorie I		Catégorie II		Catégorie III	
	Chêne	Sapin	Chêne	Résineux	Chêne	Résineux
Compression A	110	100	100	90	80	II0
Flexion	120	110	110	100	85	II5
Traction axiale	130	120	120	110	90	80
Cisaillement	15	12	15	12	12	10
Compression T	30	15	30	15	éviter	éviter

Tableau II.4 Valeurs usuelles des résistances du bois [08]

α	Contraintes admissibles en daN/cm ²					
	Catégorie I		Catégorie II		Catégorie III	
	Chêne	Résineux	Chêne	Résineux	Chêne	résineux
0	110	100	90	90	80	II0
10	92	84	68	68	69	55
20	III	II1	54	54	60	43
30	64	60	42	43	52	34
40	53	50	32	32	44	28
50	44	42	36	25	38	22.5
60	3II	36	33	19	33	III.5
II0	33	33	31	1II	(5)	(5)
80	31	31	30	16	(5)	(5)
90	30	30		15	(5)	(5)

Tableau II.5 contraintes admissibles des bois en fonction de l'angle d'inclinaison des fibres de bois α [08]

Le tableau précédent indique les valeurs caractéristiques de la résistance des bois utilisés dans la fabrication d'éléments de construction porteurs. Les propriétés du bois étant variables, le tableau indique les valeurs supérieures et inférieures. Ces valeurs sont données pour une teneur en humidité de 12 %.



III.6.7 Dureté du bois

La dureté du bois est difficile à définir par un essai standard de pénétration d'une bille d'acier, en raison de son hétérogénéité (alternance de bois de printemps, plus tendre et bois d'été, plus dur). La norme française NF B-51-013 définit la dureté par un essai de pénétration de flanc (perpendiculaire à l'axe) intéressant une surface assez large pour comprendre à la fois un assez grand nombre de couches annuelles.

L'essai donne un chiffre de dureté (N), qui permet de classer les bois suivant les indications du tableau II.6.

NATURE DU BOIS	VALEUR DE LA DURETE	QUALIFICATION	EXEMPLES
Résineux	1 à 2	Tendres	Sapin, épicéa, Pin Weymouth, Pin sylvestre, pin maritime, mélèze, Pin laricio, Pitchpin.
	2 à 4	Mi-durs	
	4 à 20	Durs	
Feuillus	0.2 à 1.5	Très tendres	Balsa, certains peupliers Aulne, tilleul, bouleau
	1.5 à 3	Tendres	
	3 à 6	Mi-durs	Chêne, hêtre, frêne, orme Buis, charme, cormier Chêne vert, bois exotiques
	6 à 9	Durs	
	9 à 20	Très durs	

Tableau II.6 Qualification des bois en fonction de leur dureté [08]

IV FORMES COMMERCIALES :

Le bois est commercialisé sous différentes formes et dimensions : on trouve les produits ronds, les produits sciés et autres produits de bois reconstitué comme les contre-plaqués. Les tableaux suivants donnent les dimensions des différents produits sciés selon la norme française B 53-001.

Essences	Plots (plateaux)			Feuillets		
	e [mm]	L [mm]	L [mm]	e [mm]	L [mm]	L [mm]
Sapin	12.15.18	115	300	12.15.18	115	200
Epicéa	22.26.30	et plus	et au	22.26.30	et	et au
Pin	35.40.45		delà	35.40.45	plus	



Sylvestre	55.65	155	par	8.10.12		delà
Mélèze	115.105	et plus	33 cm	15.18.22	115	
Chêne	8.10.12			26.30.35	et plus	
Peuplier	5.18.212	115 et	300	40.45.55		
	26.30.35	au delà	et au	60.115	155	
	40.45.55	185	delà	90.105	et plus	
	65.115	et au delà	par 10	120		
	90.105		200			
	120		et au			
	12.15.18		delà			
	22.30					
	55					

Tableau II.7 Dimensions courantes des madriers [NF B 53-001]

Dimensions	Sections	Dimensions	Sections
(35 . 220)	III	(32 . 165)	46
(35 . 205)	II0	(32 . 155)	43
(35 . 1115)	61	(32 . 130)	36
(35 . 150)	53	(35 . 105)	32
(35 . 125)	44	(35 1 80)	29
(35 . 110)	39		22
(35 . 100)	35		
(32 . 220)	II0	(26 . 220)	48
(32 . 1115)	56	(26 . 200)	44
(29 . 220)	64	(26 . 1115)	39
(29 . 200)	58	(26 . 150)	33
(29 . 1115)	50	(26 . 125)	28
		(26 . 110)	24
		(26 . 100)	22

Tableau II.8 Dimensions courantes des planches [NF B 53-001]



Nombre de plis			3			5			II		9		
Epaisseur (mm)			4	5	6	8	10	12	15	19	22	25	
Collage	Usage	Format											
<i>ordinaire</i>	<i>courant</i>	250.100	-	X	-	X	X	-	X	X	-	-	
		250.122	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
		250.153	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
		300.153	-	X	-	X	X	X	X	X	X	-	-
		305.153	-	X	-	X	X	X	X	X	X	-	-
		310.153	-	X	-	X	X	X	X	X	X	-	-
	<i>coffrage</i>	250.100		X		X	X			X	X		
		250.122		X		X	X				X		
		250.153		X		X	X			X	X		
		300.153		X		X	X			X	X		
		305.153		X		X	X			X	X		
		310.153		X		X	X			X	X		
	<i>extérieur</i>	250.100		-			-	-			-	X	
		250.122		X			X	X			X	X	
		250.153		X			X	X			X	X	
		300.153		X			X	X			X	X	
		305.153		X			X	X			X	X	
		310.153		X			X	X			X	X	

Tableau II.9 Dimensions des panneaux de contreplaqué [NF B 53-001]

Un panneau de contreplaqué se désigne dans une commande par : *Longueur (en cm) Largeur (en cm) . Epaisseur (en cm) et le nombre de plis.*



CHAPITRE III :

LE BOIS LAMELLE-COLLE



I. INTRODUCTION :

Les bois lamellés-collés se sont des pièces reconstituées à partir des éléments (lamelles) d'assez faibles sections, aboutés et recollés entre eux à fil parallèle de façon à obtenir des sections plus importantes, multiples des premières (figure III.1).



Figure III.1 – *Elément lamellé-collé de poutre droite*

Cette technique présente de nombreux avantages qui viennent s'adjoindre à ceux du bois lui-même :

- la section et la longueur des éléments finals ne sont plus limitées par les dimensions des pièces initiales, ce qui permet en outre de revaloriser certains sciages de faibles sections ;
- on peut, au moment du collage effectué sur gabarit, obtenir des formes courbes à peu près quelconques, ce qui permet de recourir à des solutions constructives particulièrement intéressantes tant sur le plan mécanique (arcs par exemple) qu'esthétique ;
- en outre, le processus de fabrication incorpore nécessairement une phase de tronçonnage des sciages initiaux, qui permet l'élimination des défauts naturels, et une phase de reconstitution, qui conduit à une distribution aléatoire des défauts résiduels à l'intérieur du produit fini ;
- il en résulte une amélioration des contraintes moyennes de rupture sous sollicitations axiales et une réduction encore plus nette des écarts statistiques. Cela a permis, du point de vue réglementaire, d'attribuer aux éléments de structures en bois lamellé-collé des contraintes admissibles légèrement supérieures à celles des bois massifs de qualité équivalente à celle des lamelles constitutives.



II. ETAPES DE FABRICATION ET CONSTITUANTS D'UN LAMELLE-COLLE :

Le principe de fabrication du bois lamellé-collé passe par plusieurs étapes dont le séchage artificiel des planches du bois résineux (plus rarement de feuillus) est la première démarche à suivre jusqu'à stabilisation à un taux d'humidité d'environ 12%, suivie du triage et aboutage à enture multiples des lamelles des planches de faible épaisseur (moins de 50 mm).

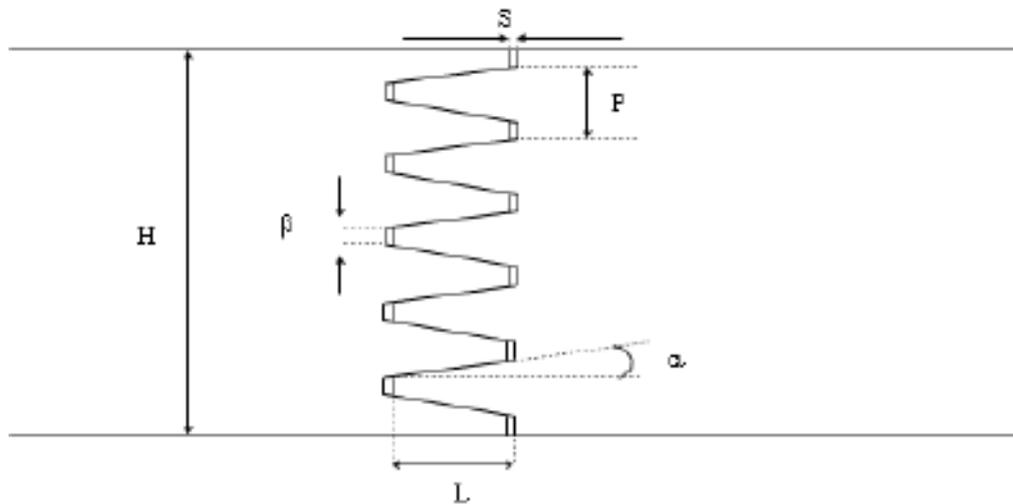


Figure III.2 – Aboutage à entures multiples

Les lamelles ainsi obtenues sont ensuite rabotées pour avoir une épaisseur comprise entre 15 à 42 (± 0.2) mm avant d'être encollées.

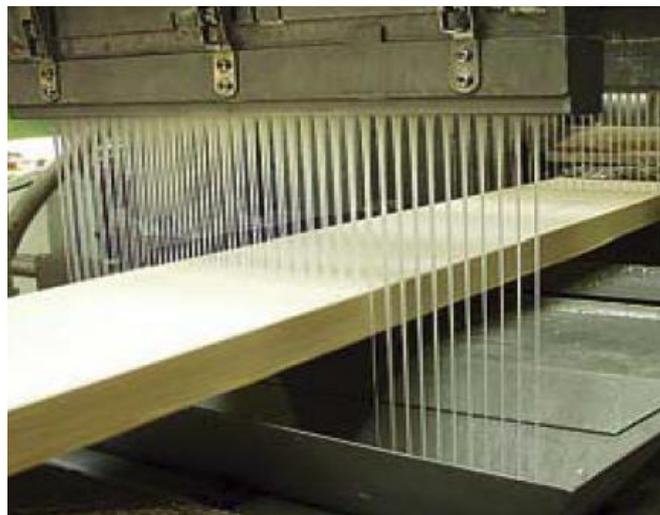


Figure III.3 – Encollage des lamelles



Les lamelles ainsi encollées sont, une nouvelle fois, superposées et maintenues sous pression (variant entre 6 à 10 bars selon l'épaisseur des lamelles) en utilisant soit des tiges métalliques filées de forte section soit des vérins hydrauliques ou pneumatiques jusqu'à polymérisation et stabilisation de la colle.

Les adhésifs utilisés sont principalement :

- la colle résorcine formaldéhyde (RF) ;
- la colle phénol résorcine formaldéhyde (RPF) ;
- la colle mélamine urée formaldéhyde (MUF) ;
- la colle urée formaldéhyde (UF) (réservée à un usage intérieur) ;
- la colle polyuréthane (PU).

On peut obtenir des éléments droits ou courbes. Les sections sont généralement rectangulaires mais on peut disposer de poteaux profilés, permettant de réaliser des formes diverses.



Figure III.4 – *Serrage des lamelles*

II.1. Le bois :

La conception des ouvrages en bois lamellé-collé s'appuie en général sur les caractéristiques du sapin et de l'épicéa. D'autres essences des zones tempérées ou tropicales peuvent être utilisées sous réserve que leur collage puisse être réalisé correctement, ce qui suppose un examen préalable des points suivants :

- rétractibilité (elle doit être faible ou moyenne) ;
- masse volumique (elle ne doit pas être trop élevée : au-delà de 600 à 700 kg/m³, des difficultés importantes peuvent être rencontrées) ;
- résilience ;



- compatibilité chimique avec la colle.

Parmi les essences possibles et dont les niveaux de prix peuvent être admis dans certains cas, nous citerons :

- essences des régions tempérées : douglas (pin d'Orégon), épicéa, hêtre, pin sylvestre, sapin, western hemlock, mélèze ;
- essences tropicales ou équatoriales : Framiré, Ilomba, Ilmba (ou Fraké), Olon, avodiré, bossé, Ozigo, sipo.

Le choix des colles sera fait essentiellement en fonction des conditions d'exploitation hygrothermique de la structure.

II.2. La colle :

II.2.1 Caractéristiques :

L'utilisation d'une liaison chimique à haute résistance dans les charpentes en bois a été permise, au début du siècle, par l'apparition des colles à base de caséine qui ont fait, depuis, place aux colles urée-formol et résorcine ou assimilées.

Le niveau de résistance (en traction et cisaillement) de ces colles, constituées d'une résine polymérisable et d'un durcisseur catalyseur, leur permet de reconstituer la cohésion naturelle transversale existant entre les fibres de bois.

Le collage de pièces de bois doit respecter certaines règles fondamentales :

- un collage n'est durable et résistant que si le plan de collage est parallèle ou sensiblement parallèle (jusqu'à 10 % de pente) aux fibres du bois. Au-delà de cette valeur angulaire, la résistance décroît très rapidement et devient insuffisante ;
- un bon collage ne peut être obtenu que sur du bois sec, le taux d'humidité limite dépendant des techniques et des colles utilisées, mais ne dépassant jamais 16 à 18 % ;
- les surfaces à coller doivent être les plus lisses et les plus propres possible ; elles doivent être correctement dressées et rabotées, mais non poncées en principe ;
- une pression doit être assurée pendant la polymérisation : très variable selon la technologie, elle peut atteindre 1,5 MPa mais n'est jamais inférieure à 0,25 MPa ;
- la nature de la colle et son pH doivent être définis en fonction des caractéristiques chimiques du bois : pH, résines, tannins ;
- les colles de charpente doivent supporter l'existence exceptionnelle de joints épais (jusqu'à 0,3 mm environ) en raison des tolérances d'usinage des pièces de bois, ce qui, dans le cas des colles urée-formol, suppose une plastification qui leur confère la qualification de joint épais ;



- d'une façon générale, un strict respect des recommandations du fabricant est indispensable.

Les applications du collage en charpente sont multiples :

- bois lamellé-collé ;
- aboutage par profils à entures multiples ;
- fabrication des panneaux contreplaqués ;
- fabrication de poutres composites par collage de bois et contreplaqué.

On peut citer comme principaux adhésifs utilisés sont :

- la colle résorcine formaldéhyde (RF) ;
- la colle phénol résorcine formaldéhyde (RPF) ;
- la colle mélamine urée formaldéhyde (MUF) ;
- la colle urée formaldéhyde (UF) (réservée à un usage intérieur) ;
- la colle polyuréthane (PU).

II.2.2 Assemblage de treillis

Cette utilisation, qui consiste à appliquer le principe des entures multiples (ou doigt de gant) à des pièces non coaxiales n'est utilisée que dans certains procédés de préfabrication industrielle de poutres droites en treillis (figure III.5).

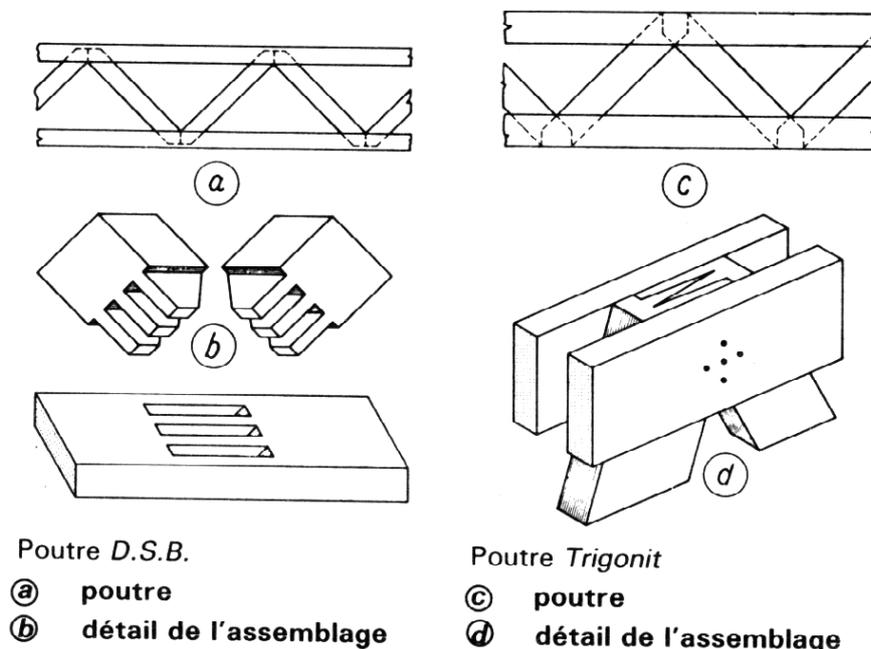


Figure III.5 – Assemblage de treillis



II.2.3 Assemblage d'angle de portique :

Ici encore, c'est le principe des entures multiples en coupe d'onglet qui est employé, la particularité résidant dans la taille des entures (jusqu'à 15 ou 20 cm de profondeur) qui est appropriée aux fortes sections des éléments en bois lamellé-collé.

II.3 Aboutage :

L'aboutage consiste à assembler par collage bout à bout, coaxialement, deux ou plusieurs pièces de bois de même section de façon à obtenir un élément de plus grande longueur.

Cela est réalisé grâce à l'exécution (à chaque extrémité des pièces à assembler) d'un profil de dents trapézoïdales dont les flancs ont une pente inférieure à 10 % par rapport à l'axe géométrique de la pièce (figure III.6).

L'usinage, l'encollage et le pressage sont confiés à des chaînes automatisées qui représentent un investissement assez lourd. Un contrôle strict de la fabrication est indispensable.

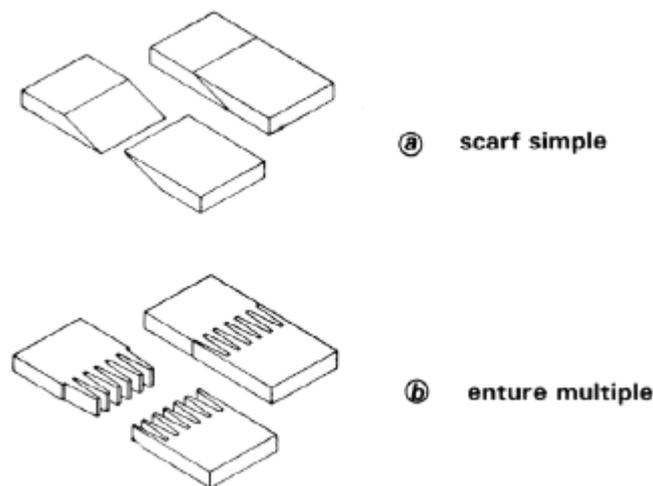


Figure III.6 – Aboutage

Les applications de cette technologie en charpente sont les suivantes :

- amélioration de la qualité technologique et augmentation des longueurs des bois bruts par purge préalable des défauts et aboutage ;
- préparation des lamelles constitutives des pièces lamellées-collées de grande longueur ;
- préparation des membrures dans certaines fabrications de poutres composites.



NB : Résistance utile ; sur le plan des principes, la résistance d'un aboutage doit être telle que celui-ci ne constitue pas un point faible dans la pièce obtenue. Cette performance, relativement aisée à atteindre industriellement dans le cas des essences résineuses légères, l'est d'autant moins que la résistance naturelle de l'essence employée est plus élevée.

III. ARCS ET POUTRES EN BOIS LAMELLE-COLLE :

La lamellation et le collage de bois permettent, comme nous l'avons vu au paragraphe 2.2, la réalisation de pièces de très fortes sections, à inertie variable, éventuellement courbes et de grande longueur. Cette possibilité, jointe aux caractéristiques de résistance au feu, d'inertie chimique, de légèreté, de rapidité, de mise en œuvre et de fabrication, ouvre au bois lamellé-collé un nombre croissant de marchés dans des domaines aussi divers que les bâtiments industriels et agricoles (figure III.7), les bâtiments sportifs (stades couverts, salles de sports, patinoires, piscines, etc., cf. figure III.8), culturels, commerciaux, culturels. Le plus grand nombre de ces réalisations se rattache, du point de vue du fonctionnement mécanique, à deux familles: les poutres et les arcs.

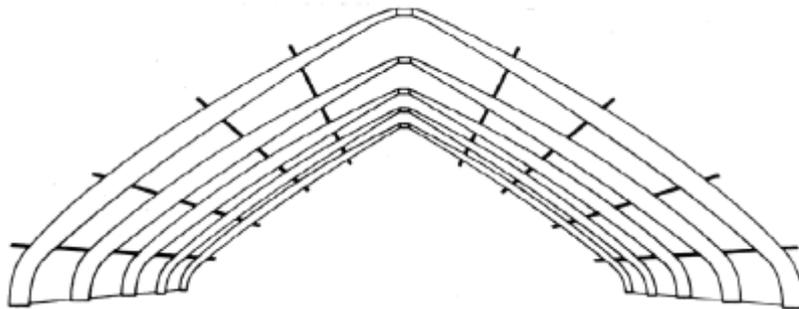


Figure III.7 – Arc à trois articulations pour bâtiment à destination de silo (portée de 50 à 70 m)

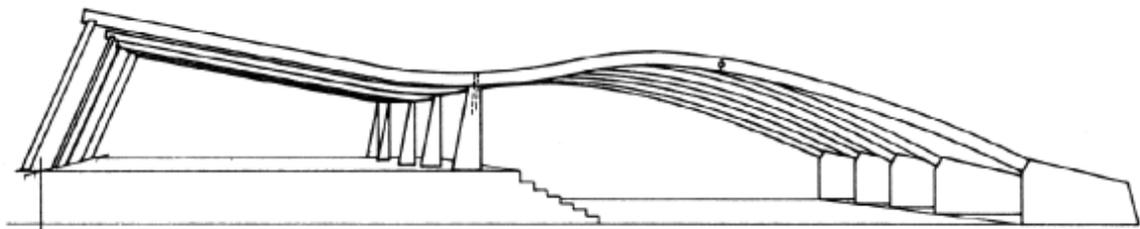


Figure III.8 – Structure pour hall de sport : arcs de section constante ; moises sur appuis par les poutres droites (portée de 20 à 40 m et plus entre appuis).



III.1 Poutres :

Les poutres, droites ou courbes, isostatiques ou hyperstatiques sont souvent associées à des infrastructures (mur, voiles, portiques ou poteaux) en béton et à des éléments secondaires en bois (pannes, contreventements) ou en acier (tirants, contreventements, pièces d'assemblage).

En raison de la souplesse géométrique intrinsèque de ce matériau et du fait de sa préfabrication *sur mesure*, des audaces architecturales sont possibles sans crainte d'augmentation importante des sujétions de fabrication ou du prix de revient.

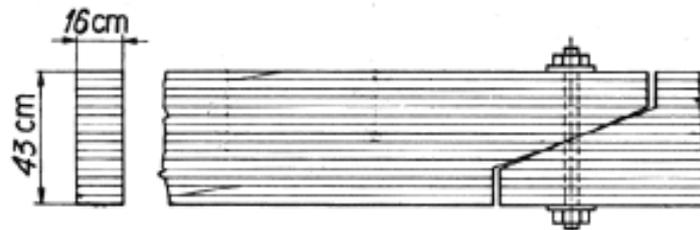


Figure III.9 – Poutre droite lamellée avec articulation

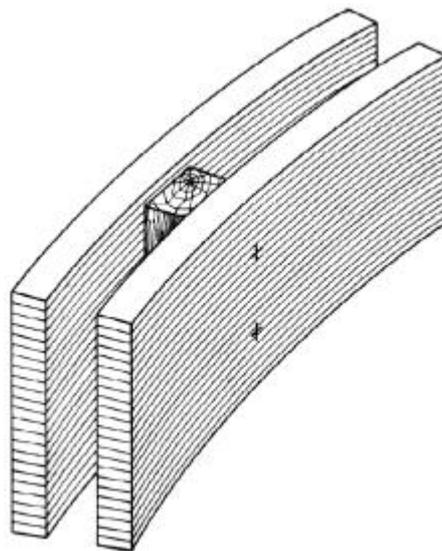


Figure III.10 – Arcs jumelés lamellés-collés pour grande portée

Le type de section le plus généralement utilisé est rectangulaire (figure III.9). Toutefois, lorsqu'une économie ou un allégement sont particulièrement souhaités, des sections en I ou, à l'inverse, en caisson peuvent être retenues. Dans le premier cas, on constituera en premier lieu l'âme, d'épaisseur plus faible et de hauteur variable en fonction des variations d'inertie nécessaires, puis on recollera en extrados et en intrados deux semelles plus larges, généralement de hauteur constante, constituées de trois ou quatre lamelles.



Dans le cas du caisson, on préfère généralement une technique se rapprochant de celle du jumelage (figure III.10) et consistant à rassembler transversalement deux pièces possédant chacune une hauteur égale à la hauteur totale de la pièce définitive, en intercalant entre elles une fourrure haute et une fourrure basse affleurant l'extrados et l'intrados. Les pièces ainsi obtenues, peu sensibles au déversement, ont un comportement mécanique très voisin de celui d'une pièce pleine de même encombrement.

III.2 Arcs :

Dans le cas des arcs (figure III.11) qui peuvent d'ailleurs être considérés comme des cas particuliers de poutres, la technologie est identique, mais le mode de fonctionnement, particulièrement adapté au matériau, permet d'atteindre des portées considérables avec une importante économie de matière. Des poutres libres de l'ordre de 100 à 110 m ont pu être réalisées sans difficultés majeures et les exemples de réalisation entre 25 et 80 m sont innombrables à l'heure actuelle.

Le calcul des arcs en bois lamellé-collé est particulièrement simple et fiable, puisque les formules générales de la résistance des matériaux pour le calcul des arcs sont applicables sans précautions particulières.

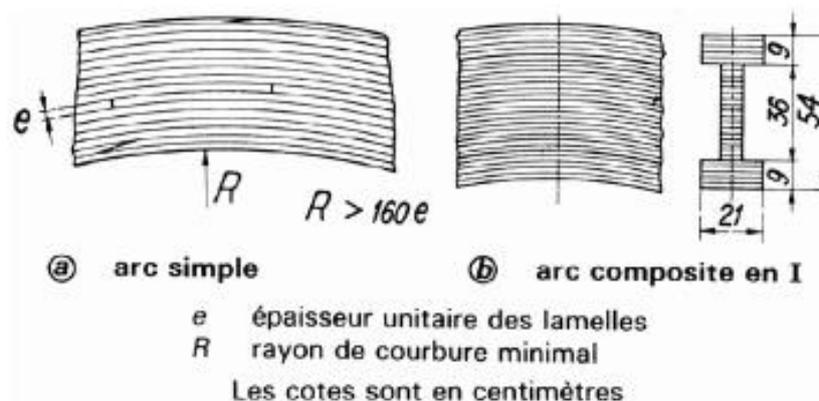


Figure III.11 – Arc lamellé (fabrication par encollage sur cintre)

Les termes relatifs à la dilatation thermique sont supprimés dans les formules et les termes relatifs aux déformations sous efforts normal et tranchant peuvent être négligés sans inconvénients, du moins au stade des calculs d'avant-projet.

Seuls deux types d'arcs sont pratiquement retenus :

- les arcs isostatiques à trois articulations ;
- les arcs hyperstatiques à deux articulations.



La technique des assemblages fait généralement appel au boulonnage et à l'emploi de goussets latéraux ou axiaux en tôle d'acier ou de *boîtiers* à rotules pour les pieds et les clefs d'arcs.

Toutefois, la réalisation d'assemblages destinés à transférer des moments de flexion est toujours très délicate et coûteuse, et l'on évite toujours, dans la mesure du possible, de transférer de tels efforts dans un assemblage mécanique de pièces en bois.

Quand, pour des raisons de transport en particulier, le recours à des assemblages est inévitable, on s'efforce de les disposer en des zones de moments nuls ou très faibles sous l'action des charges permanentes, de façon que leur déformabilité ne perturbe pas le fonctionnement d'ensemble.

Une autre solution consiste à réaliser, pour certains assemblages d'angle, des entures multiples collées (figure III.12) de grandes dimensions.

La rigidité obtenue est supérieure à celle des assemblages mécaniques, mais les limites de résistance conduisent à un léger surdimensionnement des éléments à assembler et la réalisation d'un tel collage est difficile à envisager sur chantier.

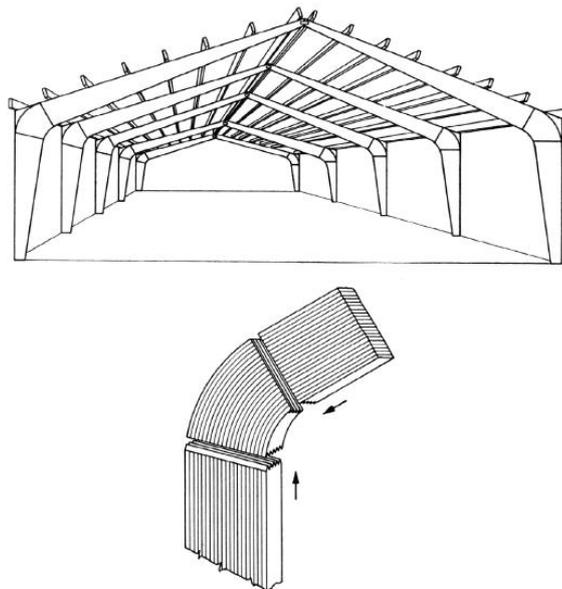


Figure III.12 – Hall à usages divers : poutres droites (portée de 10 à 25 m) et détail d'assemblage d'angle à entures multiples.



DEUXIEME PARTIE:

ETUDE EXPERIMENTALE



CHAPITRE IV :

CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE DU PIN D'ALEP



Figure IV.2 – Récupération du bois de pin d'Alep.

Les troncs d'arbres sont débarrassés des branches puis coupés à la tronçonneuse en morceaux de 1.00 m de longueur avant d'être transportés au laboratoire. (fig. IV.3).



Figure IV.3 – Troncs d'arbres du pin d'Alep coupés sur une longueur de 1 mètre.

Le bois est soumis alors au séchage naturel pendant six mois, d'abord sous sa forme initiale (fig. IV.3), puis en le découpant en madriers de 8 cm d'épaisseur. (fig. IV.4)



Figure IV.4 – Bois coupé en madrier.



Figure IV.5 – Machine de bois combinée.

II.1 La confection des éprouvettes :

Une fois le bois séché, il est usiné, à l'aide d'une machine de bois combinée (fig. IV.5), sous différentes formes selon le besoin de chaque type d'essais.

III. CARACTERISATION PHYSIQUE :

III.1 Mesure de la densité :

Cette mesure est effectuée selon la norme française NF B 51-002 [2], qui définit trois types de masse volumiques en fonction d'un degré d'humidité H :

- La masse volumique à 15% (bois sec à l'air).
- La masse volumique à 0% (bois anhydre).
- La masse volumique à H% (à un degré d'humidité quelconque).

Éprouvettes utilisées :

Pour la détermination de la densité anhydre du pin d'Alep, on a fait usiné au total 294 éprouvettes cubiques de (20×20×20) mm de côté de deux échantillons provenant de deux d'arbres différents (fig.IV.6 et 7). La mesure des dimensions des éprouvettes est effectuée en utilisant un pied à coulisse à 0.01 [mm] de précision. Par la suite, toutes les éprouvettes sont pesées avec une précision de 0.01g avant et après dessiccation.



Figure IV.6 – Eprouvettes de mesure de la densité

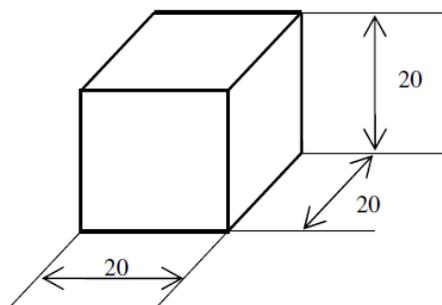


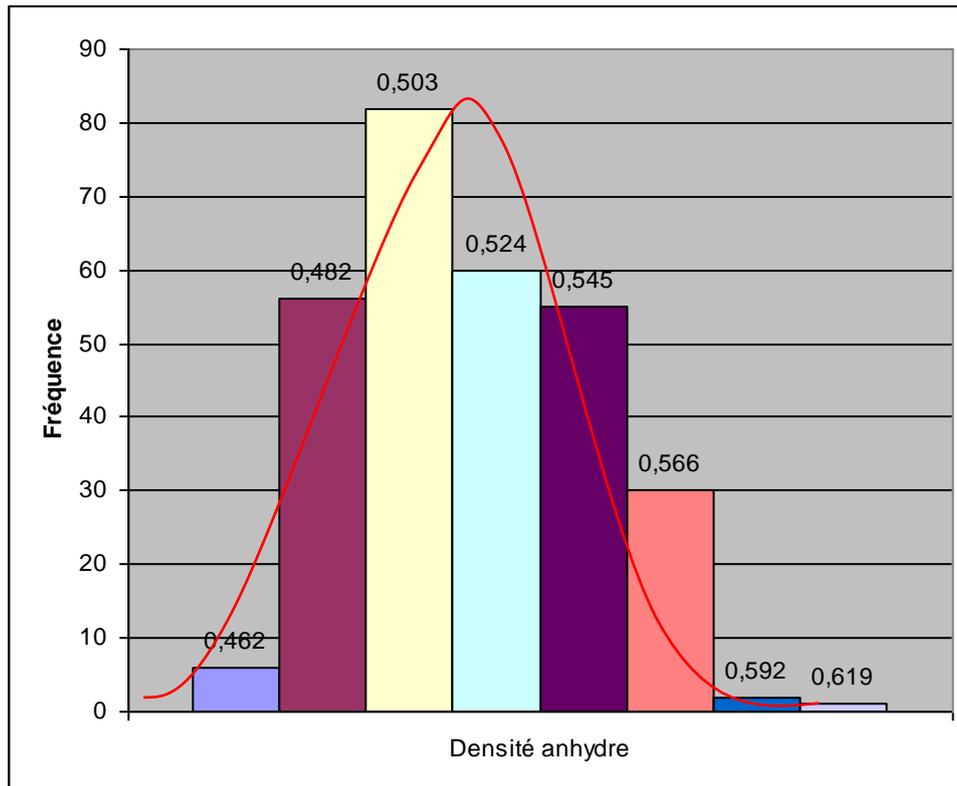
Figure IV.7 – Dimensions des éprouvettes de mesure de la densité anhydre et teneur en eau

On résume dans le tableau suivant les valeurs de la densité anhydre obtenues après mesures.

caractéristique	nombre	moyenne	Ecart type	min	max
Densité	292	0.508	0.028	0.442	0.619

Tableau IV.1 – Résumé des valeurs de la densité anhydre.

Une simple étude de statistiques nous a permis d'obtenir le graphe représentant la distribution des valeurs de la densité anhydre ci-après. (graphe IV.1)



Graphes IV-1 – *Distribution des valeurs de la densité anhydre.*

On remarque que :

- l'histogramme de densité présente une distribution normale suivant la variation de gauss, dont 87% des éprouvettes donnent une valeur de densité entre 0.482 à 0.545 ;
- d'après la densité moyenne trouvée (0.508, voir tableau 01), on peut conclure que ce bois se classe comme étant bois légers et tendres, à l'instar d'autres essences telles que épicéa, sapins, douglas, pins et framiré ; (*selon classification faite par Marie-Christine TROUY-TRIBOULOT et Pascal TRIBOULOT., matériau bois ; structure et caractéristiques. Techniques de l'ingénieur documents C925, C926 et C927*).

III.2 Mesure du degré d'humidité :

La mesure du degré d'humidité est effectuée en respectant les recommandations de la norme française NF B 51-002 [2], qui définit les étapes suivantes ci-après.

a) Appareillage utilise :

- Balance précise à 0.01 gramme.
- Etuve ventilée permettant de maintenir une température de $103 \text{ °C} \pm 2$.

**b) Eprouvettes :**

On reprend les mêmes éprouvettes utilisées dans la détermination de la densité anhydre du bois pin d'Alep (fig.III-4 et III-5).

c) Mode opératoire :

- Peser l'ensemble des éprouvettes avant dessiccation,
- Déshydrater les éprouvettes dans l'étuve jusqu'à masse constante, (c'est-à-dire qu'on mesure la masse de quelques éprouvettes chaque quatre heures jusqu'à stabilisation de la masse).
- Une fois la masse est stabilisée, on fait une dernière pesée de l'ensemble des éprouvettes aussitôt sorties de l'étuve.

d) Mesure du degré d'humidité :

La mesure du degré d'humidité est alors déduite en utilisant la formule suivante :

$$H[\%] = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100\%$$

avec,

M_h est la masse de l'éprouvette humide (avant dessiccation), en [g].

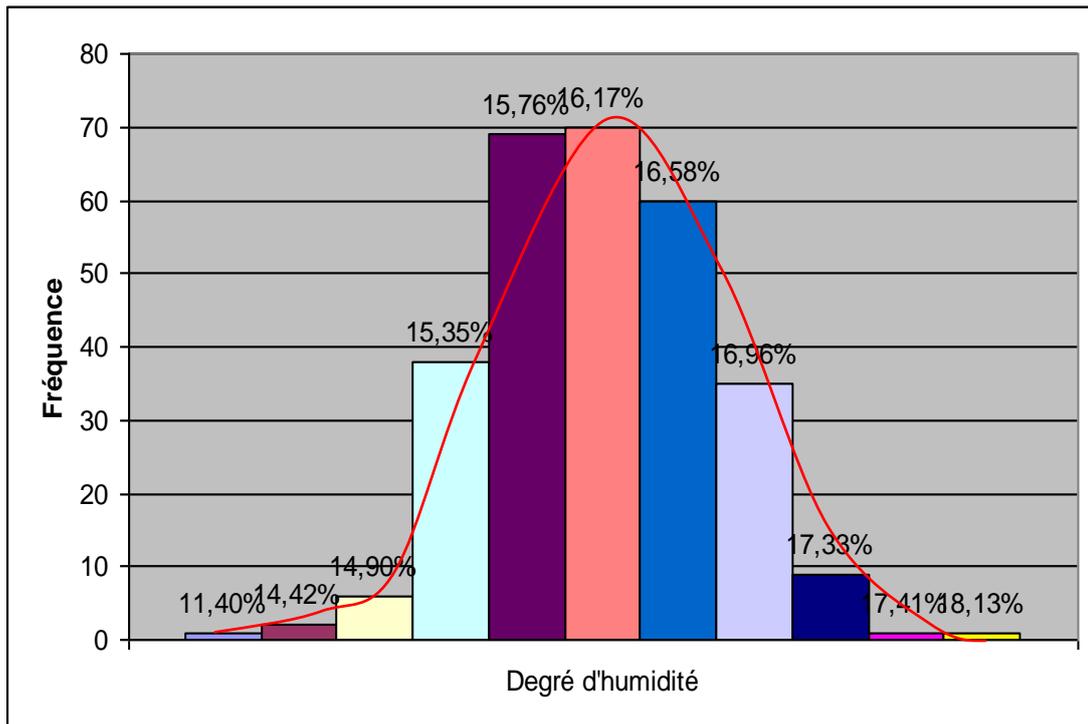
M_s est la masse de l'éprouvette à l'état anhydre (après dessiccation), en [g].

On récapitule dans le tableau suivant les valeurs du degré d'humidité obtenues.

caractéristique	nombre	moyenne	Ecart T.	min	max
Humidité [%]	292	15.95 %	0.65%	11.40 %	18.13 %

Tableau IV.2 – Résumé des valeurs du degré d'humidité.

Une simple étude de statistiques nous permis d'obtenir le graphe représentant la distribution des valeurs du taux d'humidité ci-après. (graphe IV.2).



Graph IV.2 – Distribution des valeurs du degré d'humidité.

Compte tenu de ce qui précède, on peut résumer les remarques suivantes :

1. On remarque une distribution normale des valeurs de l'humidité, dont 94% des éprouvettes présentent un taux d'humidité variant entre 15.56% et 16.96%, d'après qualifications normalisées des bois en fonction du taux d'humidité (NF B51-002), on peut conclure que le bois de pin d'Alep au laboratoire est classé comme étant un bois sec à l'air (tableau IV.3).

Taux d'humidité	Qualification
Au-delà du point de saturation des fibres (30 %)	Bois vert
De 30 à 23 %	Bois mi-sec
De 22 à 18 %	Commercialement sec
De 17 à 13 %	Bois sec à l'air
En dessous de 13 %	Desséché
0 %	Anhydre

Tableau IV.3 – Qualifications normalisées des bois en fonction du degré d'humidité (NF B51-002).



IV. CARACTERISATION MECANIQUE :

IV.1 Banc d'essais :

Tous les essais sont réalisés sur une seule machine sur laquelle on a monté des dispositifs de traction, compression et flexion.

Cette machine est constituée d'un portique, d'un vérin et d'une pompe asservie, de la marque CONTROLAB, d'une capacité de 160 KN avec une course du vérin de 160 mm et un pupitre de commande à lecture digitale (Fig. IV.8).



Fig. IV.8 – *Machine d'essais.*

IV.2 Résistance à la traction :

Pour la traction, on opte pour celle parallèle aux fibres. C'est l'essai fréquemment utilisé, car la résistance à la traction perpendiculaire aux fibres est beaucoup plus faible donc à éviter dans la construction en bois comme cité dans la partie recherche bibliographique.

En application de la norme française NF B 51-002, l'éprouvette utilisée est telle que montrée dans la figure IV.9.



Fig. IV.9 – *Eprouvette de traction parallèle aux fibres.*

Après usinage des éprouvettes on a pu récupérer au total 18 éprouvettes présentant les caractéristiques physiques et dimensionnelles requises par la norme sus-citée.

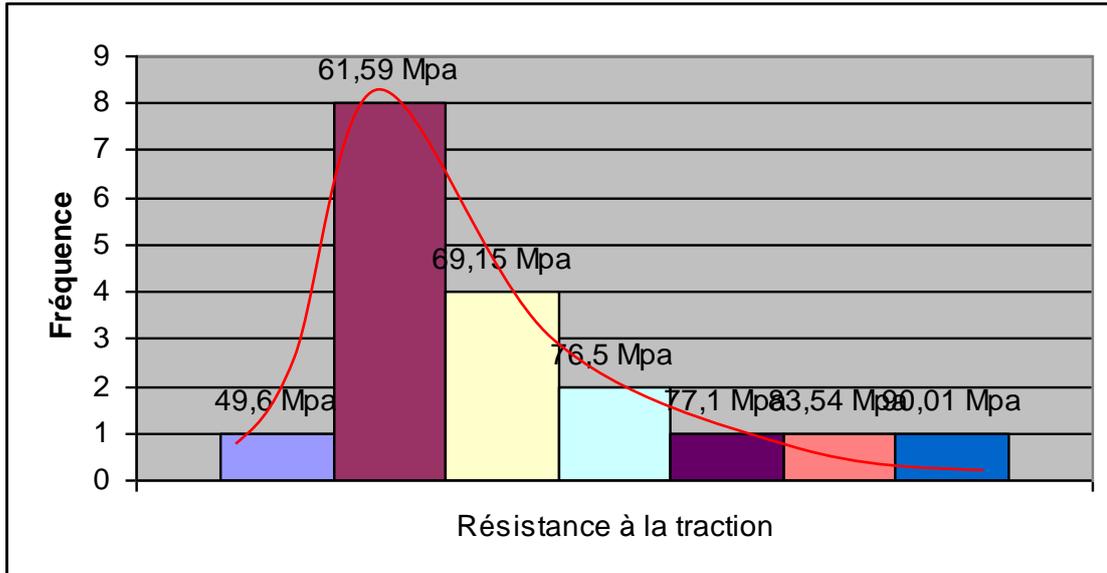
Les mesures de sections des éprouvettes sont effectuées au moyen d'un pied à coulisse de 0.01 mm de précision.

Les résultats obtenus sont récapitulés au tableau suivant :

caractéristique	nombre	moyenne	Ecart T.	min	max
Résistance à la traction	18	65.44 MPa	10.61 MPa	49.60 MPa	90.01 MPa

Tableau IV.4 – *Résumé des valeurs de résistance à la traction.*

Une simple étude de statistiques nous permis d'obtenir le graphe représentant la distribution des valeurs de la résistance à la traction ci-après. (graphe IV.3)



Graphes IV-3. Distribution des valeurs de résistance à la traction
Parallèle aux fibres.

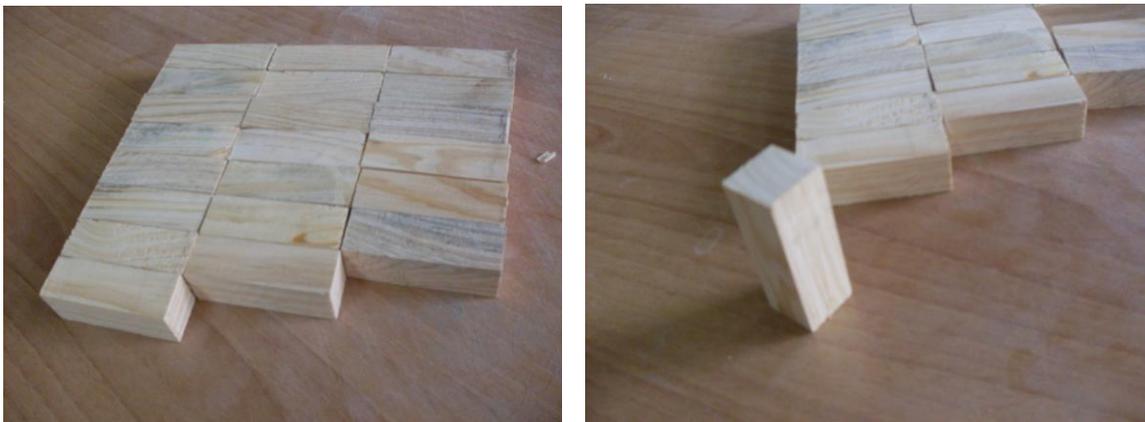
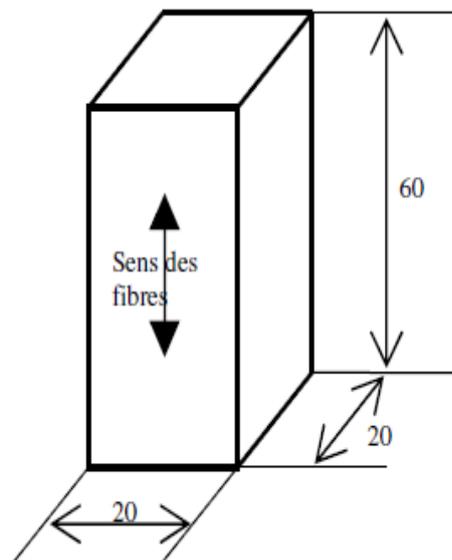
On remarque que la distribution des valeurs de la résistance à la traction suit une variation non symétrique.

IV.3 Résistance à la compression :

Comme on a vu au chapitre II, deux essais de compression peuvent être effectués sur le bois, la compression parallèle et perpendiculaire aux fibres, le travail qu'on effectue rentre dans le cadre d'un projet d'utilisation du bois pin d'Alep en lamellé-collé.

Le bois ne travaillera alors qu'en compression parallèle aux fibres ; pour cette raison, seuls les essais de compression parallèle aux fibres ont été réalisés.

L'éprouvette utilisée ainsi que le protocole d'essai sont décrits dans la norme NF B 51-002 (Fig. IV.10).



Figures. IV-10. *Eprouvettes d'essai de compression parallèle aux fibres*

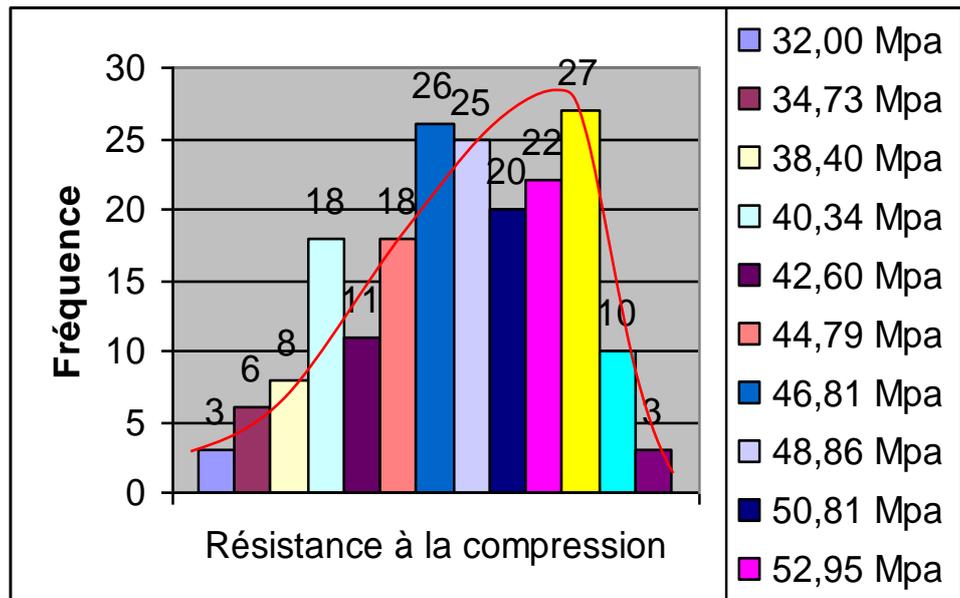
Au total, 197 éprouvettes sont confectionnées et testées. La mesure des dimensions de chaque éprouvette est effectuée au moyen d'un pied à coulisse au 0.01 mm de précision.

Nous ne présentons ici, qu'un récapitulatif les résultats l'ensemble est porté en Annexe.

Dans un but de vérification, les résultats obtenus ont fait l'objet d'une simple étude statistique.

caractéristique	nombre	moyenne	Ecart T.	min	max
Résistance à la compression	197	47.08 MPa	6.11 MPa	30.09 MPa	58.23 MPa

Tableau IV.5 – Résumé des valeurs de résistance à la compression.



Graph 4-4. *Distribution des valeurs de résistance à la compression Parallèle aux fibres.*

On remarque que la distribution des valeurs de la résistance à la traction suit une variation non symétrique.

IV.4 La flexion trois points :

a) Objet et domaine d'application :

En application de la norme française NF B 51-016, l'essai de flexion trois points a pour objet la détermination du module flexion statique dans la direction parallèle au fil, d'éprouvettes de bois de petites dimensions, de droit fil, sans nœud ni défaut.

b) Principe :

C'est la détermination du module d'élasticité dans la zone de flexion pure en déformation élastique, d'une éprouvette soumise à une charge progressivement croissante exercée perpendiculairement au fil du bois.

b) Appareillage :

▪ Machine d'essai : (figure IV.8)

Assurant une vitesse constante soit de l'augmentation de la charge, soit du déplacement de la tête mobile et permettant de mesurer la charge exercée avec une précision de 1% au moins.

▪ Dispositif :

Assurant la flexion de l'éprouvette par application de la charge; il est composé :



D'un banc de flexion constitué de deux appuis cylindriques horizontaux libres en rotation, d'un diamètre de 60mm et distants entre axes d'une valeur l égale à 300 mm, d'une traverse comportant une tête cylindrique horizontale de même diamètre que les appuis placée au centre, sur la face supérieure ou inférieure de l'éprouvette.

▪ **Comparateur numérique :**

Pour mesurer la flèche dans la zone centrale soumise à la flexion pure et simple.

c) Epreuves :

Les éprouvettes doivent avoir la forme d'un prisme droit à section carrée de (20 ± 0.2) mm de côté et une longueur parallèle au fil du bois de (340 ± 4) mm. (fig.IV.11)

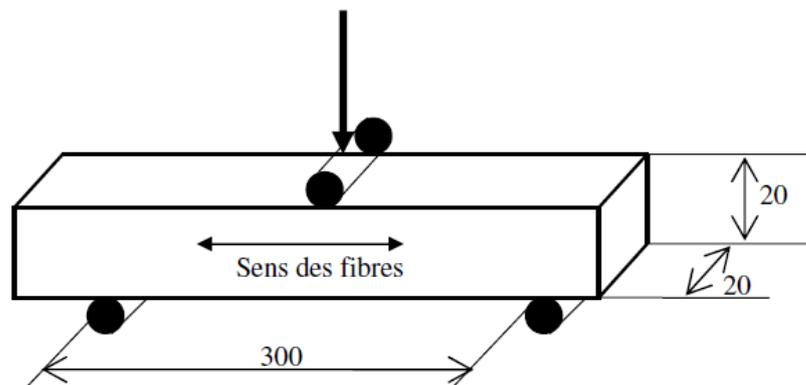


Figure IV.11 – *Eprouvette de flexion.*

IV.4.1 Détermination du module de flexion :

En application de la norme française NF B 51-016, on calcule le module de flexion de chaque éprouvette par la formule :

$$E_L = \frac{3(P_1 - P_2).l^3}{8b.h^3.(f_1 - f_2)}$$

Dont,

- E_L : est le module de flexion parallèle aux fibre,
- P_1 : correspond au chargement de l'éprouvette,
- P_2 : correspond au déchargement de l'éprouvette,
- l : est la distance entre les appuis égale à 300 mm,



b : largeur de section de l'éprouvette mesurée,
 h : hauteur de section de l'éprouvette mesurée,
 f_1 : flèche mesurée au milieu lors du chargement,
 f_2 : flèche mesurée au milieu lors du déchargement,



Figure IV.12 – Essai de mesure du module de flexion.

On a pu récupérer deux échantillons provenant de deux arbres différents.

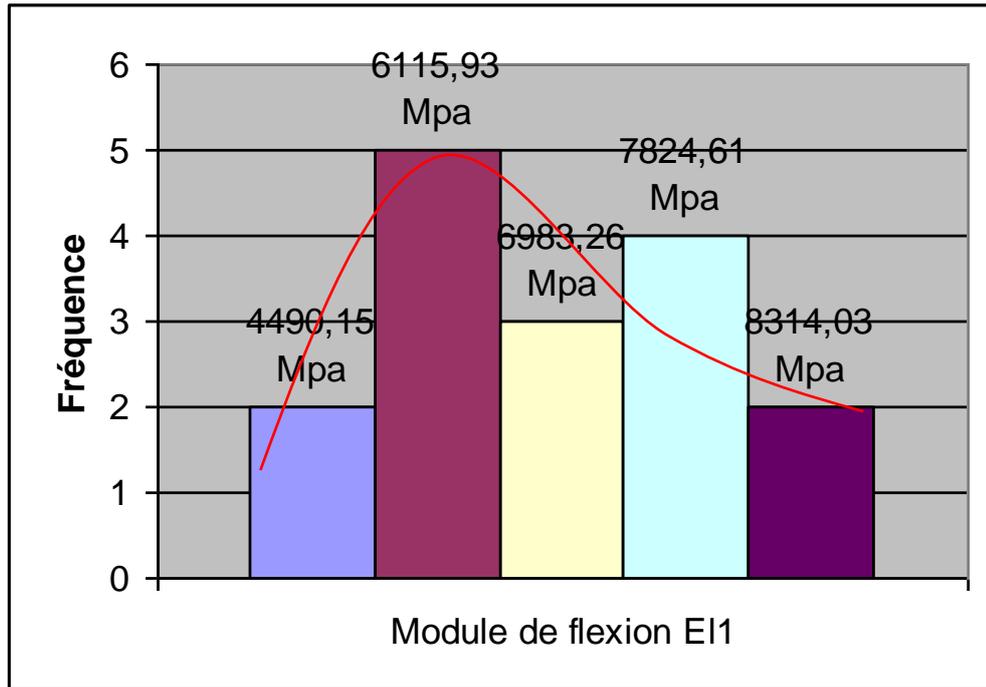
a) Echantillon 01 :

On récapitule au tableau suivant les valeurs du module de flexion de l'échantillon 01.

caractéristique	nombre	moyenne	Ecart T.	min	max
Module de flexion		6490.87	1301.73	4063.59	8314.03
E_L	16	MPa	MPa	MPa	MPa

Tableau IV.6 – Résumé des valeurs du module de flexion (échantillon 01).

On remarque que la distribution des valeurs de la résistance à la traction suit une variation non symétrique (graphe IV.5).



Graph IV.5 – Distribution des valeurs du module de flexion (Échantillon 01).

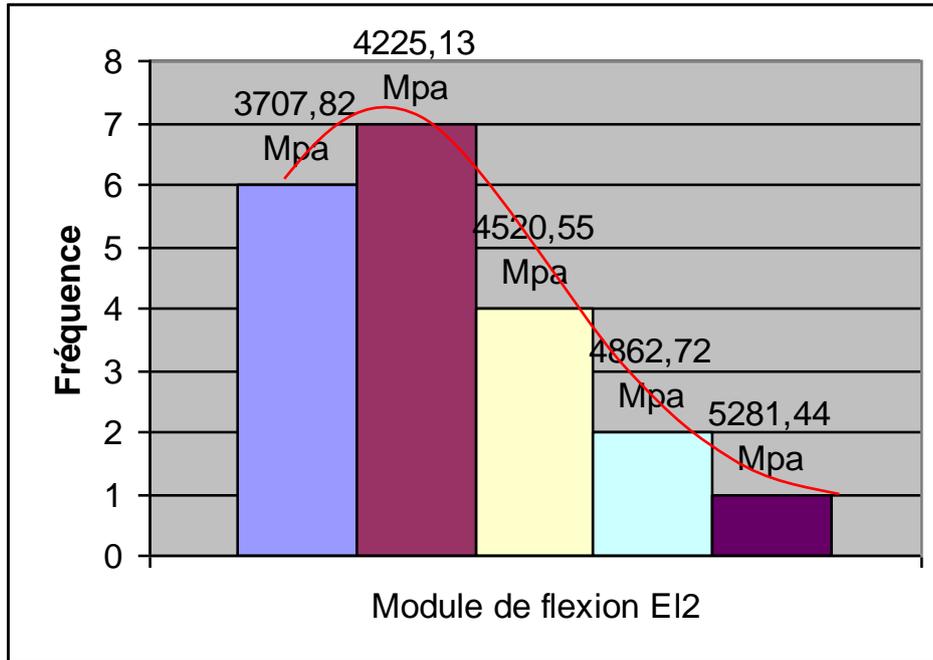
b) Echantillon 02 :

On récapitule au tableau suivant les valeurs du module de flexion de l'échantillon 02.

caractéristique	nombre	moyenne	Ecart T.	min	max
Module de flexion E_L	20	4105.08 MPa	506.11 MPa	3370.30 MPa	5281.44 MPa

Tableau IV.7 – Résumé des valeurs du module de flexion (échantillon 02).

On remarque que la distribution des valeurs de la résistance à la traction suit une variation non symétrique (graphe IV.6).



Graphe IV.6 – Distribution des valeurs du module de flexion (Échantillon 02).

IV.4.1.1 Conclusion :

En plus de la dispersion des résultats dans le même lot (même arbre), on remarque aussi une dispersion importante entre les deux échantillons testés, cela montre la variabilité des caractéristiques physiques et mécaniques du bois entre les arbres de la même espèce.

IV.4.2 Détermination de la résistance à la flexion :

On mesure la résistance maximale à la flexion de chaque éprouvette en utilisant le même dispositif (fig.IV.13), mais en continuant l'essai jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette.



Figure IV.13 – *Essai de résistance à la flexion.*



Figure IV.14 – *Rupture d'éprouvette par essai de flexion.*

La rupture intervient comme le prédit la théorie d'abord par compression des fibres supérieures puis par traction des fibres inférieures.

Nous ne présentons ici, qu'un récapitulatif des résultats, l'ensemble est porté à la fin du mémoire sous Annexe 1.

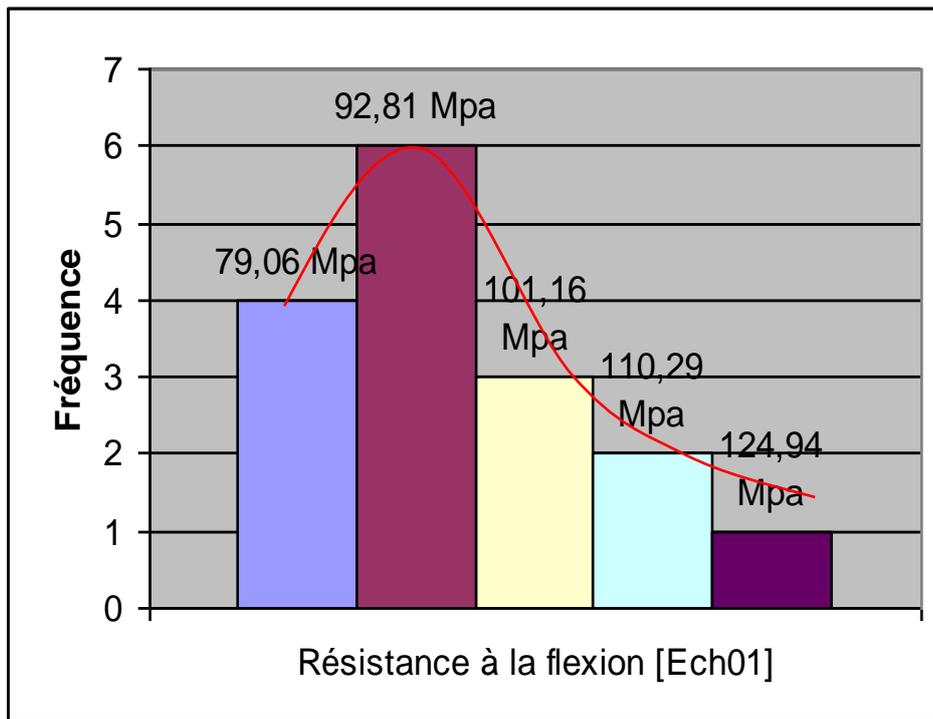
Dans un but de vérification, les résultats obtenus ont fait l'objet d'une simple étude statistique des deux échantillons.



a) Echantillon 01 :

caractéristique	nombre	moyenne	Ecart T.	min	max
Résistance à la flexion	16	92.02 MPa	14.21 MPa	73.21 MPa	124.94 MPa

Tableau IV.8 – Résumé des valeurs de la résistance à la flexion (échantillon 01).

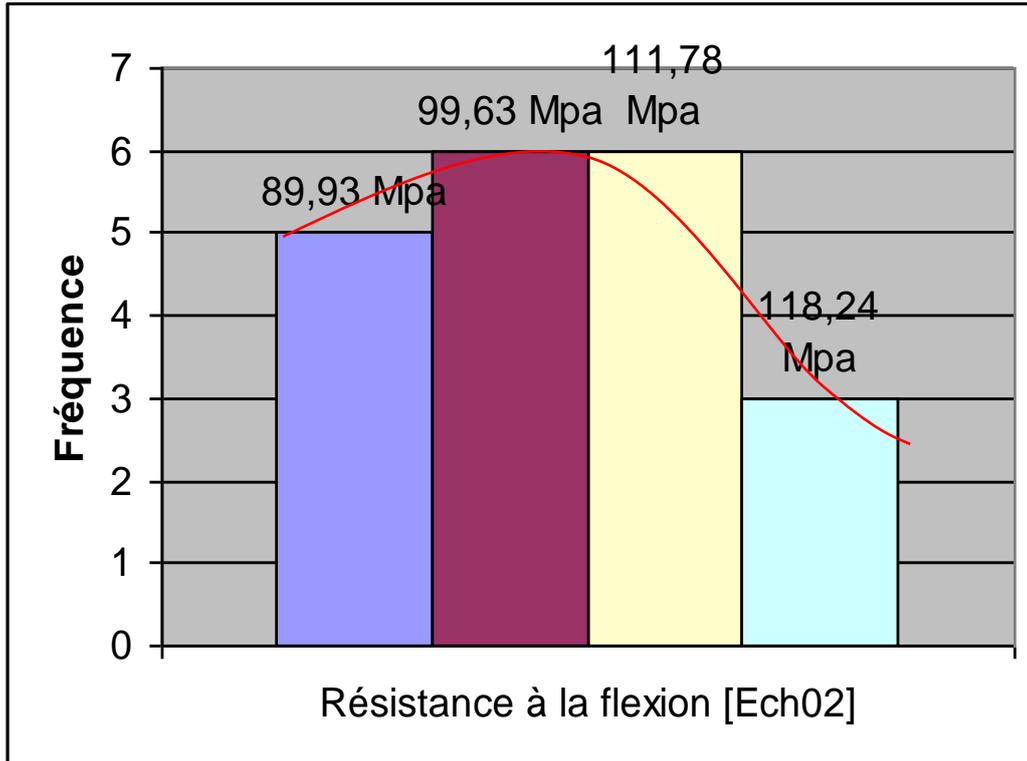


Graph IV.7 – Distribution des valeurs de résistance à la flexion (Échantillon 01).

b) Echantillon 02 :

caractéristique	nombre	moyenne	Ecart T.	min	max
Résistance à la flexion	20	100.63 MPa	10.29 MPa	84.27 MPa	118.24 MPa

Tableau IV.9 – Résumé des valeurs de la résistance à la flexion (échantillon 02).



Graphes IV.8 – Distribution des valeurs de résistance à la flexion (Échantillon 02).

V. CONCLUSION :

- On peut résumer, pour l'ensemble des résultats statistiques des essais mécaniques, que la distribution des valeurs suivent une courbe non symétrique selon une variation de Weibull,
- La caractérisation physique du bois pin d'Alep révèle une densité assez élevée par rapport à d'autres types de bois utilisés dans la construction,
- Le bois pin d'Alep possède des résultats de résistance moyennement élevés par rapport à d'autres essences de bois.



CHAPITRE V :

LA FAISABILITE DU LAMELLE-COLLE



I. INTRODUCTION :

Par faute de temps et de moyens nous avons limité le travail de faisabilité du lamellé-collé de pin d'Alep à la confection et l'essai d'éprouvettes de flexion trois points.

L'adhésif utilisé est produit en Algérie par la société BELCOL.Spa* sis à OUED SMAR. C'est une Colle vinylique (PVAc, acétate de polyvinyle) : c'est la colle à bois traditionnelle la plus connue dans le domaine du bois, appelée généralement " colle blanche " ! Elle présente une excellente adhérence sur le bois, elle a une grande durée de vie, elle durcit à froid rapidement, est mono-composant et très facile d'utilisation. Une grande variété de formulations est disponible pour s'adapter à tout type de mise en oeuvre, manuelle ou automatisée. Elle est réservée aux assemblages non portants car c'est une résine thermoplastique ayant une très forte tendance au fluage, en particulier quand il fait chaud. Elle est réservée également aux emplois intérieurs car elle ne résiste pas à l'humidité. Par ailleurs, elle tolère peu de défaut d'usinage (pas de joints épais).

La confection des éprouvettes se fait selon les dimensions stipulées dans la norme NF B 51-016 expliquée ci-après.

II. FABRICATION DES EPROUVETTES :

a) Usinage des lamelles :

On a fait usiner des lamelles droites de section $(20 \times 10 \pm 0.2)$ mm sur une longueur de 340 mm (fig.IV-1).

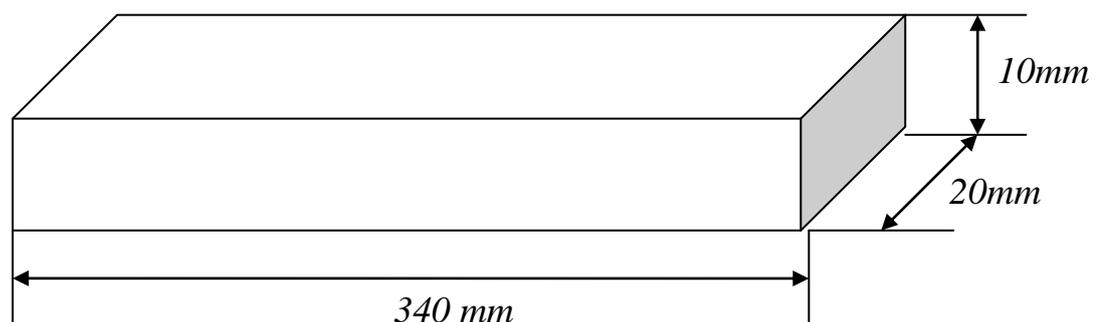


Figure V.1 – Dimensions d'une lamelle.

* Nous remercions les responsables de la société Belcol, Spa et plus particulièrement son directeur Monsieur Belhadj Mokhtar pour avoir facilité cette étude, par le fait de nous avoir fourni gracieusement l'adhésif utilisé dans le présent travail.



b) Collage des lamelles :

Après usinage des lamelles suivant ces dimensions, on a procédé à leur collage l'une à l'autre. Le collage des lamelles se fait selon la longueur (fig.V.1).



Figure V.2 – Colle utilisée.



Figure V.3 – Serrage des lamelles.

Le collage des lamelles a été effectué comme suit :

- Avant collage, les substrats bois sont mis dans une étuve pendant une journée à $T=30^{\circ}\text{C}$, et ceci dans le but de minimiser le taux d'humidité absorbé par le bois,
- Ensuite, la colle à bois est étalée sur l'une des surfaces à assembler et s'y accrocher,
- Le temps de séchage est maintenu constant à 15 min,
- La pression de collage est assurée par un étau pendant 24 h (fig.V.3), puis les éprouvettes sont démontés, finies à la raboteuse et stockés avant de subir les tests.

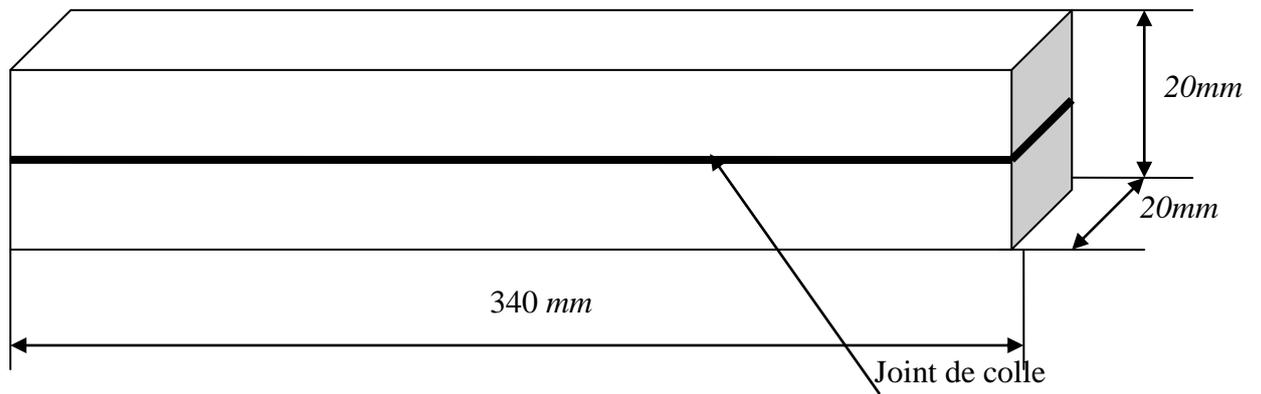


Figure V.4 – Dimensions d'éprouvette de flexion en lamellé-collé.



Figure V.5 – Lot d'éprouvette de flexion en lamellé-collé.

III. ESSAIS REALISES :

III.1 Détermination du module de flexion :

En application de la norme française NF B 51-016, on calcule le module de flexion de chaque éprouvette par la formule :

$$E_L = \frac{3(P_1 - P_2).l^3}{8b.h^3.(f_1 - f_2)}$$

Dont,



E_L : est le module de flexion parallèle aux fibre,
 P_1 : correspond au chargement de l'éprouvette,
 P_2 : correspond au déchargement de l'éprouvette,
 l : est la distance entre les appuis égale à 300 mm,
 b : largeur de section de l'éprouvette mesurée,
 h : hauteur de section de l'éprouvette mesurée,
 f_1 : flèche mesurée au milieu lors du chargement,
 f_2 : flèche mesurée au milieu lors du déchargement.

Donc on fait monter le dispositif nécessaire (fig. V.6) pour mesurer le module de flexion de chaque éprouvette.

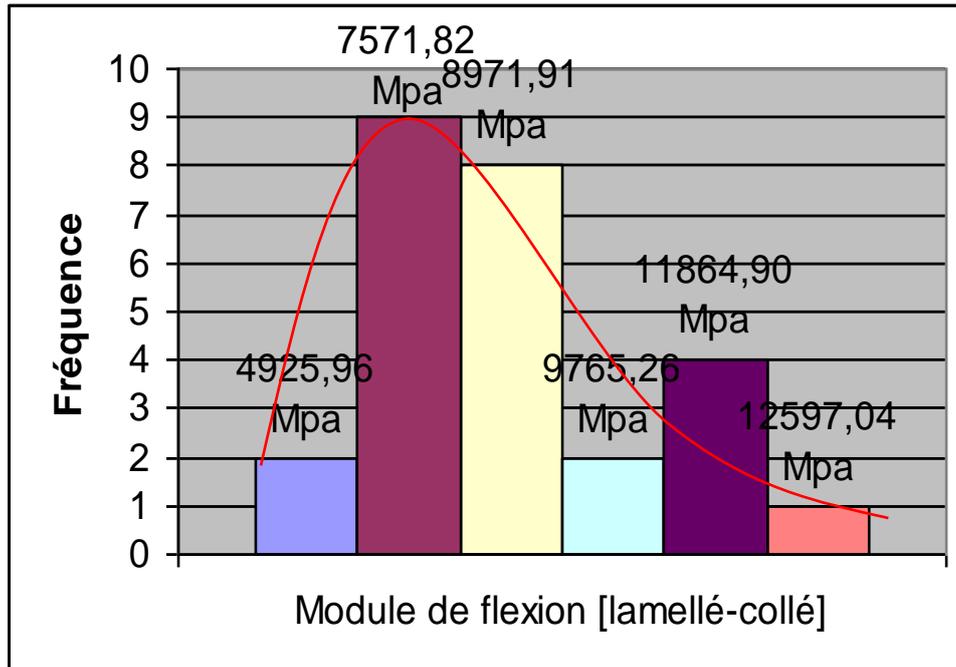


Figure V.6 – Essai de mesure du module de flexion (lamellé-collé).

On récapitule au tableau suivant les valeurs du module de flexion des poutres en lamellé-collé.

caractéristique	nombre	moyenne	Ecart T.	min	max
Module de flexion	25	8036.92	2141.92	4778.74	12597.04
E_L		MPa	MPa	MPa	MPa

Tableau V.1 – Résumé des valeurs du module de flexion (lamellé-collé).



Graphe V.1 – Distribution des valeurs du module de flexion (lamellé-collé).

Comparaison entre les valeurs moyennes du module d'élasticité en flexion entre les éprouvettes de bois massif et les éprouvettes en bois lamellé-collé.

Bois massif: lot1 $E=6490.87$ MPa lot2 $E=4105.08$ MPa

Bois lamellé-collé : $E=8036.92$ MPa

On remarque que la valeur du module d'élasticité des éprouvettes en bois lamellé-collé est de loin plus grande que celles des deux lots d'éprouvettes en bois massif. Cela peut être expliqué en partie par le surplus de rigidité apportée par le joint de colle.

III.2 Détermination de la résistance à la flexion :

On mesure la résistance à la flexion de chaque éprouvette en lamellé-collé jusqu'à la rupture (fig.V.7), avant de passer par une analyse statistique.

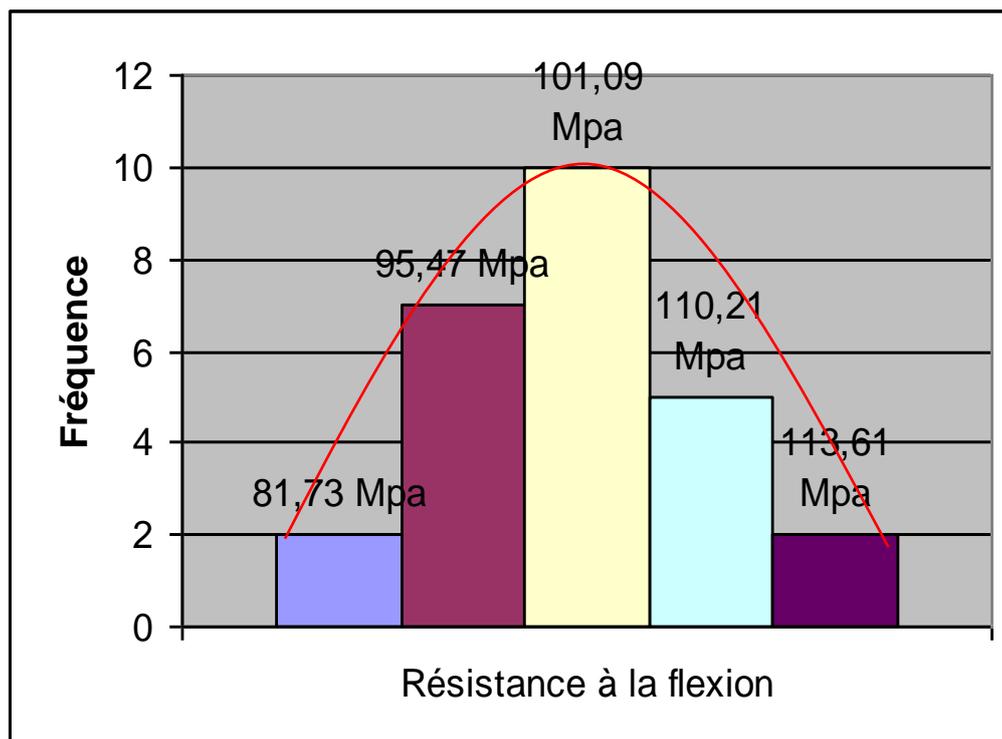


Figure V.7 – Rupture d'une éprouvette en lamellé-collé par flexion.

On récapitule au tableau suivant les valeurs de la résistance à la flexion des poutres en lamellé-collé.

caractéristique	nombre	moyenne	Ecart T.	min	max
Résistance à la flexion [Mpa]	25	98.60 MPa	8.50 MPa	80.40 MPa	113.61 MPa

Tableau V.2 – Résumé des valeurs de résistance à la flexion (lamellé-collé).



Graphe V.2 – Distribution des valeurs de résistance à la flexion des Éprouvettes en lamellé-collé.

On observe que l'histogramme suit une simple variation de gauss. Comparaison entre les valeurs moyennes de la résistance en flexion entre les éprouvettes de bois massif et les éprouvettes en bois lamellé-collé.

Bois massif : lot1 $Re=92.02$ MPa lot2 $Re=100.63$ MPa

Bois lamellé-collé : $Re=98.60$ MPa

On remarque que la valeur de la résistance en flexion des éprouvettes en bois lamellé-collé est proche de celles des deux lots d'éprouvettes en bois massif. Cela est en concordance avec la logique car le bois utilisé pour les éprouvettes en lamellé-collé provient des deux lots de bois massif.

Ces résultats nous rassurent quand à la faisabilité du bois lamellé-collé à partir d'une essence algérienne de bois en l'occurrence le pin d'Alep et nous encourage à pousser la recherche vers plus de validation de la faisabilité de cette technologie par l'élaboration d'un protocole d'essais plus élaboré pour une utilisation industrielle.



CONCLUSION GENERALE



Compte tenu de ce qui précède, en particulier les essais expérimentaux effectués, nous pouvons conclure que, malgré le manque des moyens utilisés pour élargir cette recherche qui ressort du domaine purement expérimental, le bois lamellé-collé du pin d'Alep est une technologie faisable en Algérie.

La caractérisation physique du bois pin d'Alep révèle une densité assez élevée par rapport à d'autres types de bois utilisés dans la construction.

Le bois pin d'Alep possède des résultats de résistance moyennement élevés par rapport à d'autres essences de bois, ce qui lui donne la possibilité d'être utilisé d'une manière ou d'une autre comme matériau de construction, ou associé à d'autres matériaux de construction.

Les résultats obtenus par les essais de flexion trois points montrent une similitude que ce soit pour la résistance à la flexion ou pour le module de flexion entre le bois massif de cette essence (pin d'Alep) et le lamellé-collé obtenu.

Ces résultats nous rassurent quand à la faisabilité du bois lamellé-collé à partir d'une essence algérienne de bois en l'occurrence le pin d'Alep et nous encourage à pousser la recherche vers plus de validation de la faisabilité de cette technologie par l'élaboration d'un protocole d'essais plus élaboré pour une utilisation industrielle.



BIBLIOGRAPHIE :

1. Analyse du déséquilibre entre les ressources forestières et la consommation de bois en Algérie. YUCEF BERKANE, thèse de doctorat, *ENGREF, Nancy, 1994*
2. L'Etude prospective du secteur forestier en Afrique-Algérie, *FOSA, 1999*
3. Algérie, Mohamed Mezali, Forum des nations unies sur les forets, *Genève – 26 mai au 06 juin 2003*
4. MILE OLIVIER., *Technologie des matériaux de construction*. Entreprise moderne d'édition, Paris, 1973 .
5. A. KOMAR., *Matériaux et éléments de construction*. Mir Edition, Moscou, 1978.
6. BERNARD.F., TOURANCHEAU.A.L., BRU.A., *Eléments de construction*. Editions Dunod, Paris, 1973
7. BODIG J., JAYNE B. A., *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York, 1982.
8. GUITARD D., *Mécanique du matériau bois et composites*. Editions Cepadues, Toulouse, 1987.
9. F.KOLLMAN., A.W. COTE., *Principles of wood science and technology*. Springer Verlag Inc, New York 1968.
10. M. PERCHAT., *Calcul des éléments et structures en bois*, Annales de l'ITBTP, Numéro 497, Octobre 1991.
11. Marie-Christine TROUY-TRIBOULOT et Pascal TRIBOULOT., matériau bois ; structure et caractéristiques. Techniques de l'ingénieur documents C925, C926 et C927.
12. Yves Benoit, Bernard Legrand et Vincent Tastet EUROCODE 5., calcul des structures en bois. 2008.
13. Yves Benoit, le guide des essences de bois, édition Eyrolles 2008.
14. Yves Benoit, manuel simplifié de l'eurocode 5., 2008.



15. B. Thibaut., Caractéristiques technologiques du bois Pin d'Alep (*Pinus Halepensis*). USTL Montpellier.

16. Philippe CRUBILÉ., charpente en bois conception, techniques de l'ingénieur, document réf. C 2 440.

17. Jean-Pierre BIGER., pathologie des structures en bois, techniques de l'ingénieur, document réf. C 2 450.

18. Rainer Marutzky., Le bois lamellé collé..., Traduction française de l'article publié dans la revue «Bauen mit Holz» 2/2002 (revue allemande «construire en bois»).



A N N E X E

I. IDENTIFICATION PHYSIQUE DU BOIS PIN D'ALEP

N°	Dimensions en [mm]			Vt [mm ³]	Poids en [g]		W [%]	Densité en [g/cm ³]	
	a	b	c		<i>Humide</i>	<i>Sec</i>		<i>Yh</i>	<i>Yd</i>
1	20,10	20,60	20,15	8343,309	4,95	4,27	15,93	0,593	0,512
2	20,00	19,92	19,94	7944,096	5,07	4,38	15,75	0,638	0,551
3	18,84	20,10	20,44	7740,301	4,32	3,73	15,82	0,558	0,482
4	19,94	20,35	20,35	8257,603	4,58	3,95	15,95	0,555	0,478
5	19,86	20,30	20,25	8163,950	4,54	3,92	15,82	0,556	0,480
6	20,15	20,25	20,20	8242,358	4,79	4,13	15,98	0,581	0,501
7	20,30	19,92	20,50	8289,708	5,31	4,56	16,45	0,641	0,550
8	20,30	20,10	20,40	8323,812	5,12	4,42	15,84	0,615	0,531
9	20,30	20,40	20,66	8555,719	5,06	4,33	16,86	0,591	0,506
10	20,60	19,80	20,40	8320,752	4,35	3,76	15,69	0,523	0,452
11	20,40	20,30	20,04	8298,965	4,84	4,16	16,35	0,583	0,501
12	20,00	21,30	21,00	8946,000	5,13	4,40	16,59	0,573	0,492
13	20,30	20,10	20,66	8429,900	4,71	4,07	15,72	0,559	0,483
14	19,60	18,60	19,70	7181,832	4,19	3,60	16,39	0,583	0,501
15	19,80	19,90	20,40	8038,008	5,08	4,39	15,72	0,632	0,546
16	20,10	20,20	20,25	8221,905	4,58	3,97	15,37	0,557	0,483
17	20,20	19,70	20,30	8078,182	4,72	4,09	15,40	0,584	0,506
18	20,30	19,80	20,40	8199,576	4,55	3,94	15,48	0,555	0,481
19	20,20	20,30	20,10	8242,206	4,98	4,27	16,63	0,604	0,518
20	20,20	20,30	20,70	8488,242	4,90	4,24	15,57	0,577	0,500
21	20,30	20,30	20,30	8365,427	4,74	4,07	16,46	0,567	0,487
22	20,30	20,10	20,60	8405,418	4,62	3,99	15,79	0,550	0,475
23	20,30	20,40	19,40	8033,928	4,73	4,09	15,65	0,589	0,509
24	20,20	20,00	19,94	8055,760	5,35	4,62	15,80	0,664	0,574
25	20,40	19,90	20,60	8362,776	4,46	3,87	15,25	0,533	0,463
26	20,30	20,30	20,20	8324,218	4,61	3,95	16,71	0,554	0,475
27	19,85	19,90	20,40	8058,306	4,45	3,85	15,58	0,552	0,478
28	19,90	20,00	20,30	8079,400	4,80	4,16	15,38	0,594	0,515
29	20,30	20,20	20,40	8365,224	4,76	4,08	16,67	0,569	0,488
30	19,80	19,60	20,30	7878,024	4,87	4,19	16,23	0,618	0,532
31	20,20	20,30	20,70	8488,242	4,75	4,09	16,14	0,560	0,482
32	20,20	20,30	20,40	8365,224	4,89	4,20	16,43	0,585	0,502
33	20,40	20,40	20,00	8323,200	4,50	3,87	16,28	0,541	0,465
34	20,10	20,20	20,70	8404,614	4,82	4,17	15,59	0,573	0,496
35	20,30	20,20	20,00	8201,200	4,59	3,95	16,20	0,560	0,482
36	20,30	20,40	20,00	8282,400	4,75	4,07	16,71	0,574	0,491
37	19,90	19,84	19,90	7856,838	4,37	3,74	16,84	0,556	0,476
38	19,84	20,20	20,30	8135,590	5,08	4,39	15,72	0,624	0,540
39	20,20	20,20	20,60	8405,624	4,82	4,14	16,43	0,573	0,493
40	20,10	20,15	20,30	8221,805	4,76	4,11	15,82	0,579	0,500



41	20,30	19,50	20,30	8035,755	4,68	4,03	16,13	0,582	0,502
42	20,30	20,40	20,40	8448,048	5,43	4,68	16,03	0,643	0,554
43	20,10	19,70	19,80	7840,206	4,51	3,88	16,24	0,575	0,495
44	20,00	20,10	20,50	8241,000	4,78	4,12	16,02	0,580	0,500
45	20,00	20,30	20,62	8371,720	5,15	4,42	16,52	0,615	0,528
46	19,90	19,80	20,25	7978,905	4,44	3,85	15,32	0,556	0,483
47	19,60	19,85	20,10	7820,106	4,74	4,11	15,33	0,606	0,526
48	20,15	20,30	20,10	8221,805	4,76	4,12	15,53	0,579	0,501
49	21,30	20,20	20,30	8734,278	4,91	4,23	16,08	0,562	0,484
50	20,15	20,50	21,25	8777,844	4,74	4,12	15,05	0,540	0,469
51	20,10	20,10	20,10	8120,601	5,19	4,50	15,33	0,639	0,554
52	20,30	20,30	20,40	8406,636	4,79	4,11	16,55	0,570	0,489
53	19,00	19,80	20,45	7693,290	3,92	3,40	15,29	0,510	0,442
54	20,10	20,30	20,40	8323,812	4,60	3,98	15,58	0,553	0,478
55	20,20	20,10	19,75	8018,895	5,12	4,43	15,58	0,638	0,552
56	20,00	20,00	20,10	8040,000	5,12	4,46	14,80	0,637	0,555
57	19,75	18,75	20,70	7665,469	4,69	4,06	15,52	0,612	0,530
58	20,20	20,00	19,80	7999,200	4,67	4,05	15,31	0,584	0,506
59	20,00	20,30	20,30	8241,800	4,79	4,12	16,26	0,581	0,500
60	19,80	20,00	20,00	7920,000	5,66	4,90	15,51	0,715	0,619
61	20,15	20,35	20,30	8324,066	4,89	4,22	15,88	0,587	0,507
62	19,70	19,85	20,00	7820,900	5,00	4,31	16,01	0,639	0,551
63	19,70	19,80	20,10	7840,206	4,74	4,10	15,61	0,605	0,523
64	20,10	20,15	20,35	8242,055	5,10	4,40	15,91	0,619	0,534
65	20,20	20,25	20,65	8446,883	4,78	4,08	17,16	0,566	0,483
66	19,80	19,80	20,50	8036,820	4,78	4,16	14,90	0,595	0,518
67	20,00	20,30	20,50	8323,000	5,42	4,70	15,32	0,651	0,565
68	20,25	20,30	20,65	8488,699	4,90	4,24	15,57	0,577	0,499
69	20,85	20,20	20,70	8718,219	5,52	4,80	15,00	0,633	0,551
70	19,90	19,80	20,40	8038,008	4,84	4,18	15,79	0,602	0,520
71	19,85	19,95	20,15	7979,551	5,05	4,37	15,56	0,633	0,548
72	20,10	20,10	20,80	8403,408	4,79	4,13	15,98	0,570	0,491
73	20,05	20,10	20,45	8241,452	5,18	4,47	15,88	0,629	0,542
74	19,85	20,25	20,65	8300,526	4,50	3,85	16,88	0,542	0,464
75	20,20	20,20	20,00	8160,800	4,48	3,85	16,36	0,549	0,472
76	19,90	21,00	20,25	8462,475	5,22	4,51	15,74	0,617	0,533
77	20,00	19,95	20,65	8239,350	4,53	3,90	16,15	0,550	0,473
78	20,25	20,35	20,30	8365,376	4,68	4,01	16,71	0,559	0,479
79	19,30	20,35	20,20	7933,651	4,44	3,81	16,54	0,560	0,480
80	20,05	20,30	20,20	8221,703	4,67	4,00	16,75	0,568	0,487
81	20,30	20,20	20,60	8447,236	5,12	4,41	16,10	0,606	0,522
82	20,35	20,35	20,45	8468,805	5,35	4,58	16,81	0,632	0,541
83	20,40	19,90	20,50	8322,180	4,53	3,91	15,86	0,544	0,470
84	19,95	19,50	20,20	7858,305	4,66	4,00	16,50	0,593	0,509
85	20,30	19,60	20,20	8037,176	4,94	4,26	15,96	0,615	0,530
86	20,40	20,40	20,40	8489,664	4,84	4,18	15,79	0,570	0,492
87	19,85	19,90	20,30	8018,805	4,54	3,91	16,11	0,566	0,488



88	20,15	19,30	20,20	7855,679	4,70	4,04	16,34	0,598	0,514
89	20,20	20,00	20,40	8241,600	4,50	3,85	16,88	0,546	0,467
90	19,75	19,80	20,45	7996,973	4,35	3,77	15,38	0,544	0,471
91	20,15	20,10	20,15	8161,052	4,78	4,11	16,30	0,586	0,504
92	20,10	20,30	20,25	8262,608	5,22	4,51	15,74	0,632	0,546
93	19,75	19,85	20,10	7879,954	4,83	4,17	15,83	0,613	0,529
94	20,00	19,70	20,00	7880,000	4,82	4,17	15,59	0,612	0,529
95	20,25	20,25	20,40	8365,275	4,66	3,99	16,79	0,557	0,477
96	20,25	20,35	20,20	8324,168	5,22	4,48	16,52	0,627	0,538
97	20,35	20,20	20,40	8385,828	4,90	4,19	16,95	0,584	0,500
98	20,50	19,80	20,20	8199,180	4,56	3,93	16,03	0,556	0,479
99	20,25	20,30	20,20	8303,715	4,48	3,89	15,17	0,540	0,468
100	20,20	20,10	20,50	8323,410	5,06	4,35	16,32	0,608	0,523
101	20,10	20,10	20,30	8201,403	4,98	4,31	15,55	0,607	0,526
102	20,25	19,20	20,00	7776,000	4,54	3,89	16,71	0,584	0,500
103	20,20	20,20	20,20	8242,408	5,15	4,42	16,52	0,625	0,536
104	20,35	20,30	20,00	8262,100	4,65	3,99	16,54	0,563	0,483
105	20,00	20,10	20,25	8140,500	4,72	4,05	16,54	0,580	0,498
106	20,30	20,25	20,50	8427,038	5,12	4,38	16,89	0,608	0,520
107	19,80	20,15	20,20	8059,194	4,92	4,23	16,31	0,610	0,525
108	20,15	20,20	20,00	8140,600	4,41	3,76	17,29	0,542	0,462
109	20,25	20,10	21,10	8588,228	5,70	4,91	16,09	0,664	0,572
110	20,10	20,20	21,35	8668,527	5,50	4,76	15,55	0,634	0,549
111	18,90	19,70	20,20	7521,066	3,91	3,37	16,02	0,520	0,448
112	18,80	19,70	19,90	7370,164	3,97	3,41	16,42	0,539	0,463
113	19,90	20,00	20,20	8039,600	4,91	4,22	16,35	0,611	0,525
114	19,80	20,20	19,80	7919,208	4,69	4,04	16,09	0,592	0,510
115	19,60	19,80	19,30	7489,944	4,62	3,95	16,96	0,617	0,527
116	20,45	19,70	20,60	8299,019	4,88	4,22	15,64	0,588	0,508
117	19,80	20,10	20,40	8118,792	4,74	4,08	16,18	0,584	0,503
118	19,70	19,90	20,15	7899,405	4,70	4,07	15,48	0,595	0,515
119	20,00	20,30	19,80	8038,800	4,77	4,12	15,78	0,593	0,513
120	20,00	19,85	20,70	8217,900	4,71	4,04	16,58	0,573	0,492
121	20,00	20,20	20,10	8120,400	5,08	4,37	16,25	0,626	0,538
122	20,00	20,55	20,40	8384,400	5,19	4,48	15,85	0,619	0,534
123	20,30	20,25	20,30	8344,823	4,65	4,01	15,96	0,557	0,481
124	19,90	19,85	20,15	7959,552	4,70	4,07	15,48	0,590	0,511
125	20,15	20,25	20,50	8364,769	4,70	4,06	15,76	0,562	0,485
126	20,20	20,30	20,10	8242,206	4,86	4,19	15,99	0,590	0,508
127	20,00	19,85	20,20	8019,400	5,12	4,43	15,58	0,638	0,552
128	20,30	20,20	20,20	8283,212	5,01	4,34	15,44	0,605	0,524
129	20,30	20,30	21,10	8695,099	4,92	4,23	16,31	0,566	0,486
130	19,90	19,90	20,00	7920,200	4,79	4,30	11,40	0,605	0,543
131	20,05	19,50	20,35	7956,341	4,33	3,78	14,55	0,544	0,475
132	20,10	20,10	20,10	8120,601	5,22	4,53	15,23	0,643	0,558
133	19,90	19,90	20,50	8118,205	4,92	4,27	15,22	0,606	0,526
134	20,20	20,00	20,40	8241,600	5,06	4,38	15,53	0,614	0,531



135	20,30	20,25	20,70	8509,253	4,79	4,14	15,70	0,563	0,487
136	19,70	19,80	20,30	7918,218	4,38	3,78	15,87	0,553	0,477
137	19,00	20,30	19,15	7386,155	4,60	3,96	16,16	0,623	0,536
138	20,20	20,20	20,20	8242,408	5,25	4,56	15,13	0,637	0,553
139	20,30	20,20	20,30	8324,218	4,67	4,05	15,31	0,561	0,487
140	20,00	19,95	20,25	8079,750	4,67	4,02	16,17	0,578	0,498
141	20,20	20,20	20,80	8487,232	4,72	4,07	15,97	0,556	0,480
142	19,70	19,35	20,00	7623,900	4,28	3,67	16,62	0,561	0,481
143	19,70	20,20	20,30	8078,182	4,50	3,87	16,28	0,557	0,479
144	20,40	20,20	20,65	8509,452	4,72	4,06	16,26	0,555	0,477
145	20,00	20,00	20,15	8060,000	4,42	3,82	15,71	0,548	0,474
146	19,85	20,00	21,60	8575,200	4,72	4,04	16,83	0,550	0,471
147	19,90	19,70	20,10	7879,803	4,96	4,30	15,35	0,629	0,546
148	20,10	20,20	20,00	8120,400	4,41	3,78	16,67	0,543	0,465
149	20,00	20,20	20,15	8140,600	4,62	3,98	16,08	0,568	0,489
150	20,30	20,20	20,30	8324,218	4,81	4,16	15,63	0,578	0,500
151	19,80	19,40	20,20	7759,224	4,35	3,73	16,62	0,561	0,481
152	19,95	19,85	20,50	8118,154	4,45	3,86	15,28	0,548	0,475
153	20,00	19,80	20,50	8118,000	4,50	3,89	15,68	0,554	0,479
154	20,20	20,40	20,10	8282,808	4,89	4,23	15,60	0,590	0,511
155	20,20	19,55	20,70	8174,637	4,97	4,30	15,58	0,608	0,526
156	20,20	20,00	20,50	8282,000	4,99	4,32	15,51	0,603	0,522
157	19,80	20,40	20,40	8239,968	4,91	4,26	15,26	0,596	0,517
158	20,00	19,70	20,65	8136,100	4,95	4,29	15,38	0,608	0,527
159	20,00	20,00	20,15	8060,000	4,78	4,12	16,02	0,593	0,511
160	19,65	20,15	20,40	8077,329	4,88	4,19	16,47	0,604	0,519
161	20,35	20,35	20,25	8385,981	5,08	4,41	15,19	0,606	0,526
162	19,90	19,80	20,55	8097,111	4,83	4,18	15,55	0,597	0,516
163	20,00	20,10	20,25	8140,500	5,10	4,42	15,38	0,626	0,543
164	19,90	20,45	20,25	8240,839	4,99	4,30	16,05	0,606	0,522
165	20,20	20,20	20,20	8242,408	4,56	3,92	16,33	0,553	0,476
166	20,00	20,00	20,15	8060,000	4,66	3,99	16,79	0,578	0,495
167	20,00	20,10	20,60	8281,200	5,26	4,57	15,10	0,635	0,552
168	20,25	20,25	20,15	8262,759	5,11	4,42	15,61	0,618	0,535
169	19,75	19,85	20,40	7997,565	5,05	4,37	15,56	0,631	0,546
170	20,40	20,25	20,30	8385,930	4,80	4,16	15,38	0,572	0,496
171	20,05	20,00	20,55	8240,550	5,12	4,43	15,58	0,621	0,538
172	20,30	20,25	19,90	8180,393	4,53	3,89	16,45	0,554	0,476
173	20,00	20,00	20,30	8120,000	5,27	4,56	15,57	0,649	0,562
174	20,00	20,10	20,00	8040,000	4,51	3,91	15,35	0,561	0,486
175	20,00	20,00	20,30	8120,000	4,94	4,28	15,42	0,608	0,527
176	20,60	20,00	20,30	8363,600	5,06	4,37	15,79	0,605	0,523
177	19,70	20,20	20,20	8038,388	4,44	3,80	16,84	0,552	0,473
178	20,30	20,10	20,50	8364,615	4,76	4,10	16,10	0,569	0,490
179	20,40	20,25	20,20	8344,620	4,90	4,24	15,57	0,587	0,508
180	20,10	21,30	20,50	8776,665	4,99	4,29	16,32	0,569	0,489
181	20,25	20,00	20,90	8464,500	4,84	4,21	14,96	0,572	0,497



182	20,10	20,50	20,30	8364,615	5,14	4,45	15,51	0,614	0,532
183	20,20	19,20	20,10	7795,584	4,40	3,82	15,18	0,564	0,490
184	20,30	20,30	19,80	8159,382	4,73	4,08	15,93	0,580	0,500
185	20,10	20,30	20,45	8344,214	4,82	4,17	15,59	0,578	0,500
186	20,70	20,20	20,60	8613,684	5,35	4,65	15,05	0,621	0,540
187	20,00	20,00	20,20	8080,000	4,54	3,92	15,82	0,562	0,485
188	20,30	20,20	20,15	8262,709	4,75	4,12	15,29	0,575	0,499
189	20,20	20,30	20,50	8406,230	4,60	3,96	16,16	0,547	0,471
190	19,90	19,80	20,65	8136,513	4,46	3,86	15,54	0,548	0,474
191	20,30	20,30	20,30	8365,427	5,35	4,60	16,30	0,640	0,550
192	20,30	20,00	20,20	8201,200	4,82	4,17	15,59	0,588	0,508
193	20,20	20,05	20,65	8363,457	4,83	4,14	16,67	0,578	0,495
194	20,00	19,80	20,20	7999,200	5,01	4,32	15,97	0,626	0,540
195	20,30	20,00	20,40	8282,400	4,74	4,04	17,33	0,572	0,488
196	20,20	20,20	20,60	8405,624	4,78	4,12	16,02	0,569	0,490
197	20,35	20,35	20,20	8365,275	4,68	4,02	16,42	0,559	0,481
198	20,10	20,30	20,60	8405,418	5,39	4,68	15,17	0,641	0,557
199	19,90	19,90	20,60	8157,806	4,68	4,04	15,84	0,574	0,495
200	20,20	20,60	20,60	8572,072	5,32	4,62	15,15	0,621	0,539
201	20,10	19,90	20,40	8159,796	4,49	3,89	15,42	0,550	0,477
202	20,30	20,30	20,20	8324,218	4,64	4,00	16,00	0,557	0,481
203	19,70	20,00	20,50	8077,000	4,95	4,29	15,38	0,613	0,531
204	20,00	20,10	20,40	8200,800	5,06	4,39	15,26	0,617	0,535
205	20,00	19,80	20,20	7999,200	4,77	4,18	14,11	0,596	0,523
206	20,20	20,10	20,40	8282,808	4,86	4,23	14,89	0,587	0,511
207	19,90	19,95	20,30	8059,202	4,42	3,83	15,40	0,548	0,475
208	20,25	20,40	20,30	8385,930	4,85	4,20	15,48	0,578	0,501
209	20,20	20,20	20,20	8242,408	4,78	4,12	16,02	0,580	0,500
210	20,20	20,30	20,40	8365,224	5,41	4,67	15,85	0,647	0,558
211	20,20	20,10	20,20	8201,604	5,27	4,55	15,82	0,643	0,555
212	20,30	19,50	20,60	8154,510	4,67	4,01	16,46	0,573	0,492
213	20,20	20,20	20,20	8242,408	4,97	4,32	15,05	0,603	0,524
214	20,10	20,20	20,20	8201,604	5,19	4,51	15,08	0,633	0,550
215	19,90	20,00	20,00	7960,000	4,56	3,97	14,86	0,573	0,499
216	19,80	20,00	20,00	7920,000	4,59	3,97	15,62	0,580	0,501
217	20,10	20,30	20,00	8160,600	5,17	4,49	15,14	0,634	0,550
218	19,90	19,70	20,40	7997,412	4,97	4,31	15,31	0,621	0,539
219	20,20	20,30	20,10	8242,206	4,57	3,94	15,99	0,554	0,478
220	19,60	20,00	20,60	8075,200	4,83	4,19	15,27	0,598	0,519
221	20,00	20,50	20,00	8200,000	5,01	4,34	15,44	0,611	0,529
222	20,10	20,10	20,00	8080,200	4,66	4,04	15,35	0,577	0,500
223	20,20	20,40	20,10	8282,808	4,75	4,10	15,85	0,573	0,495
224	20,20	19,60	20,40	8076,768	4,58	3,97	15,37	0,567	0,492
225	20,30	20,20	20,00	8201,200	5,00	4,33	15,47	0,610	0,528
226	20,30	20,10	20,40	8323,812	5,28	4,58	15,28	0,634	0,550
227	20,20	20,10	20,70	8404,614	5,12	4,45	15,06	0,609	0,529
228	20,00	20,30	20,00	8120,000	4,84	4,23	14,42	0,596	0,521



229	20,10	20,20	20,10	8161,002	4,82	4,19	15,04	0,591	0,513
230	19,90	19,90	20,20	7999,402	4,48	3,89	15,17	0,560	0,486
231	19,90	19,90	20,30	8039,003	4,74	4,13	14,77	0,590	0,514
232	19,50	20,40	20,20	8035,560	4,69	4,03	16,38	0,584	0,502
233	19,30	20,30	20,20	7914,158	4,60	3,93	17,05	0,581	0,497
234	20,20	20,30	20,20	8283,212	5,00	4,31	16,01	0,604	0,520
235	20,00	19,80	20,20	7999,200	4,80	4,14	15,94	0,600	0,518
236	20,10	20,10	20,10	8120,601	4,76	4,10	16,10	0,586	0,505
237	20,00	20,20	20,20	8160,800	4,55	3,93	15,78	0,558	0,482
238	20,10	20,30	20,20	8242,206	4,72	4,06	16,26	0,573	0,493
239	20,00	19,80	20,60	8157,600	5,09	4,40	15,68	0,624	0,539
240	20,00	20,30	20,40	8282,400	5,02	4,33	15,94	0,606	0,523
241	20,30	20,20	21,60	8857,296	5,10	4,39	16,17	0,576	0,496
242	20,10	20,20	20,30	8242,206	5,19	4,45	16,63	0,630	0,540
243	19,60	19,70	20,10	7761,012	4,41	3,79	16,36	0,568	0,488
244	20,10	20,00	19,70	7919,400	4,58	3,96	15,66	0,578	0,500
245	20,10	20,30	20,00	8160,600	5,29	4,54	16,52	0,648	0,556
246	20,10	20,40	20,00	8200,800	4,43	3,79	16,89	0,540	0,462
247	20,10	19,50	20,40	7995,780	5,02	4,29	17,02	0,628	0,537
248	20,40	19,90	20,50	8322,180	5,13	4,44	15,54	0,616	0,534
249	20,20	20,20	22,00	8976,880	5,40	4,65	16,13	0,602	0,518
250	20,00	20,00	20,30	8120,000	4,78	4,11	16,30	0,589	0,506
251	20,10	19,50	20,30	7956,585	4,78	4,11	16,30	0,601	0,517
252	20,10	20,10	20,30	8201,403	5,01	4,31	16,24	0,611	0,526
253	19,90	19,70	20,30	7958,209	4,37	3,75	16,53	0,549	0,471
254	20,20	20,40	20,40	8406,432	4,80	4,13	16,22	0,571	0,491
255	20,30	20,20	20,00	8201,200	4,88	4,20	16,19	0,595	0,512
256	20,00	20,20	20,20	8160,800	5,19	4,46	16,37	0,636	0,547
257	19,90	20,00	20,00	7960,000	4,56	3,86	18,13	0,573	0,485
258	20,00	20,60	20,10	8281,200	5,03	4,31	16,71	0,607	0,520
259	20,50	20,00	20,50	8405,000	4,46	3,87	15,25	0,531	0,460
260	19,30	20,00	20,10	7758,600	4,58	3,97	15,37	0,590	0,512
261	20,30	19,80	20,10	8078,994	4,56	3,92	16,33	0,564	0,485
262	20,40	20,10	20,40	8364,816	4,64	4,00	16,00	0,555	0,478
263	20,20	20,40	20,40	8406,432	5,11	4,37	16,93	0,608	0,520
264	20,00	20,10	20,20	8120,400	4,75	4,08	16,42	0,585	0,502
265	20,30	20,40	20,40	8448,048	5,05	4,35	16,09	0,598	0,515
266	20,00	20,00	19,10	7640,000	4,61	3,99	15,54	0,603	0,522
267	20,25	20,10	20,40	8303,310	4,84	4,17	16,07	0,583	0,502
268	20,00	20,10	20,50	8241,000	4,69	4,02	16,67	0,569	0,488
269	20,00	21,30	20,10	8562,600	4,76	4,06	17,24	0,556	0,474
270	20,20	20,10	20,50	8323,410	5,15	4,42	16,52	0,619	0,531
271	20,00	20,60	20,20	8322,400	5,10	4,37	16,70	0,613	0,525
272	20,10	20,10	20,00	8080,200	4,76	4,11	15,82	0,589	0,509
273	20,30	20,00	20,20	8201,200	4,67	4,00	16,75	0,569	0,488
274	20,30	20,20	20,30	8324,218	5,09	4,36	16,74	0,611	0,524
275	20,20	20,20	20,20	8242,408	4,71	4,07	15,72	0,571	0,494



276	19,90	20,00	19,80	7880,400	4,55	3,93	15,78	0,577	0,499
277	20,20	19,50	20,30	7996,170	4,75	4,08	16,42	0,594	0,510
278	20,20	20,10	20,20	8201,604	5,00	4,29	16,55	0,610	0,523
279	20,20	20,20	21,00	8568,840	5,32	4,57	16,41	0,621	0,533
280	20,30	20,10	20,10	8201,403	5,18	4,44	16,67	0,632	0,541
281	20,30	20,10	20,30	8283,009	4,36	3,76	15,96	0,526	0,454
282	19,80	20,20	20,20	8079,192	4,51	3,88	16,24	0,558	0,480
283	20,30	20,20	20,00	8201,200	4,53	3,87	17,05	0,552	0,472
284	20,20	20,00	20,50	8282,000	5,37	4,62	16,23	0,648	0,558
285	20,00	20,00	20,50	8200,000	5,15	4,42	16,52	0,628	0,539
286	20,10	20,20	20,60	8364,012	4,75	4,06	17,00	0,568	0,485
287	20,60	20,00	20,10	8281,200	5,05	4,33	16,63	0,610	0,523
288	20,10	20,10	20,20	8161,002	5,07	4,35	16,55	0,621	0,533
289	20,00	19,50	20,10	7839,000	4,45	3,79	17,41	0,568	0,483
290	19,80	20,00	20,50	8118,000	5,09	4,36	16,74	0,627	0,537
291	20,30	20,20	20,40	8365,224	5,15	4,40	17,05	0,616	0,526
292	20,10	20,00	20,60	8281,200	4,90	4,23	15,84	0,592	0,511
Moyenne				8190,07	4,82	4,16	15,95	0,589	0,508
Valeur maximale				8976,88	5,70	4,91	18,13	0,715	0,619
Valeur minimale				7181,83	3,91	3,37	11,40	0,510	0,442
Ecart type				241,32	0,29	0,25	0,65	0,031	0,028

**II. RESULTATS DES ESSAIS DE RESISTANCE A LA TRACTION**

N°	Dimensions en [mm]		Section [mm ²]	Effort max de traction [KN]	Résistance max [Mpa]
	a	b			
1	20,00	10,20	204,00	15,15	74,26
2	19,80	10,10	199,98	11,53	57,66
3	19,80	9,80	194,04	15,70	80,91
4	19,70	10,20	200,94	11,73	58,35
5	19,80	9,60	190,08	14,64	77,02
6	20,20	10,10	204,02	10,12	49,60
7	19,90	9,65	192,04	11,15	58,06
8	20,10	9,90	198,99	13,76	69,15
9	20,20	10,10	204,02	12,09	59,27
10	19,70	9,75	192,08	14,45	75,23
11	20,00	9,70	194,00	14,28	73,61
12	20,00	10,10	202,00	13,54	67,02
13	20,30	10,20	207,06	11,64	56,20
14	19,80	9,90	196,02	12,67	64,64
15	19,90	9,80	195,02	12,01	61,59
16	20,10	10,20	205,02	11,63	56,70
17	20,30	10,25	208,08	12,28	58,99
18	20,10	10,15	204,02	12,83	62,90
	Moyenne		199,52	12,84	64,51
	Valeur maximale		208,08	15,70	80,91
	Valeur minimale		190,08	10,12	49,60
	Ecart type		5,65	1,54	8,72



III. RESULTATS DES ESSAIS DE RESISTANCE A LA COMPRESSION

N°	Dimensions en [mm]		Section [mm ²]	Effort max de compression [KN]	Contrainte max [Mpa]
	a	b			
1	19,85	20,10	398,99	21,10	52,88
2	20,00	20,20	404,00	21,17	52,40
3	19,80	20,05	396,99	16,68	42,02
4	19,75	19,80	391,05	21,11	53,98
5	19,70	20,20	397,94	16,91	42,49
6	19,65	19,60	385,14	15,67	40,69
7	20,25	20,10	407,03	19,96	49,04
8	19,90	19,65	391,04	16,07	41,11
9	20,10	19,90	399,99	20,93	52,33
10	20,25	20,10	407,03	15,73	38,65
11	19,95	19,95	398,00	20,93	52,59
12	19,70	19,75	389,08	15,39	39,56
13	20,00	19,70	394,00	22,17	56,27
14	19,98	20,13	402,20	15,17	37,71
15	20,30	20,21	410,26	17,16	41,83
16	19,79	19,90	393,82	22,62	57,44
17	19,94	19,80	394,81	21,72	55,01
18	20,10	20,20	406,02	16,81	41,40
19	20,30	20,24	410,87	14,17	34,49
20	19,97	20,15	402,40	16,23	40,33
21	20,14	20,13	405,42	16,16	39,86
22	19,95	20,03	399,60	19,86	49,70
23	20,17	20,12	405,82	23,17	57,09
24	20,08	20,32	408,03	18,21	44,63
25	20,11	20,24	407,03	20,86	51,25
26	20,02	20,06	401,60	18,67	46,49
27	20,26	20,17	408,64	17,50	42,82
28	19,96	20,10	401,20	17,25	43,00
29	20,22	20,17	407,84	16,00	39,23
30	20,03	19,67	393,99	18,94	48,07
31	20,13	19,84	399,38	15,76	39,46
32	19,24	19,93	383,45	15,70	40,94
33	20,23	20,13	407,23	18,84	46,26
34	19,96	20,02	399,60	16,06	40,19
35	19,40	18,68	362,39	16,00	44,15
36	19,55	19,92	389,44	14,27	36,64
37	19,16	19,42	372,09	16,83	45,23
38	19,74	20,10	396,77	20,12	50,71
39	20,00	20,20	404,00	19,91	49,28
40	19,90	19,40	386,06	17,48	45,28
41	19,54	19,50	381,03	19,77	51,89



42	19,34	20,24	391,44	20,94	53,49
43	20,00	20,10	402,00	18,38	45,72
44	20,30	20,40	414,12	21,14	51,05
45	20,10	20,00	402,00	19,03	47,34
46	20,10	20,10	404,01	19,30	47,77
47	20,20	20,10	406,02	19,74	48,62
48	20,00	20,14	402,80	20,83	51,71
49	20,00	20,20	404,00	15,97	39,53
50	19,82	19,54	387,28	18,25	47,12
51	19,86	20,00	397,20	14,98	37,71
52	20,10	20,10	404,01	19,60	48,51
53	20,00	20,04	400,80	17,00	42,42
54	20,20	20,10	406,02	20,74	51,08
55	19,72	19,90	392,43	20,31	51,75
56	20,00	19,60	392,00	20,22	51,58
57	20,34	20,10	408,83	19,73	48,26
58	20,14	19,72	397,16	21,81	54,91
59	20,00	20,30	406,00	13,16	32,41
60	20,10	20,00	402,00	22,01	54,75
61	20,20	20,10	406,02	21,08	51,92
62	20,00	19,80	396,00	17,92	45,25
63	20,20	20,10	406,02	16,20	39,90
64	20,20	20,10	406,02	17,80	43,84
65	19,90	19,80	394,02	18,07	45,86
66	20,10	20,00	402,00	22,49	55,95
67	20,10	20,00	402,00	22,15	55,10
68	20,40	19,80	403,92	18,46	45,70
69	20,20	20,30	410,06	22,05	53,77
70	19,64	20,10	394,76	17,74	44,94
71	20,20	20,00	404,00	14,03	34,73
72	20,10	19,90	399,99	21,79	54,48
73	20,06	20,17	404,61	20,00	49,43
74	20,21	20,02	404,60	13,76	34,01
75	19,63	19,91	390,83	20,80	53,22
76	20,39	19,74	402,50	17,33	43,06
77	19,90	19,77	393,42	12,94	32,89
78	20,20	20,14	406,83	17,41	42,79
79	19,67	20,03	393,99	19,74	50,10
80	20,10	20,20	406,02	18,00	44,33
81	20,00	20,16	403,20	21,27	52,75
82	20,03	20,14	403,40	19,85	49,21
83	19,54	19,63	383,57	20,57	53,63
84	20,00	20,17	403,40	17,35	43,01
85	20,16	20,15	406,22	21,34	52,53
86	19,72	19,50	384,54	17,01	44,23
87	20,02	19,98	400,00	17,00	42,50
88	19,96	20,13	401,79	22,59	56,22



89	19,90	20,05	399,00	18,89	47,34
90	19,97	19,98	399,00	21,58	54,09
91	20,15	19,66	396,15	20,49	51,72
92	19,97	20,12	401,80	18,06	44,95
93	19,94	20,08	400,40	21,20	52,95
94	20,03	20,19	404,41	18,65	46,12
95	19,90	20,04	398,80	19,48	48,85
96	19,89	20,20	401,78	15,32	38,13
97	20,23	20,28	410,26	20,14	49,09
98	20,00	19,76	395,20	11,89	30,09
99	19,74	20,08	396,38	15,22	38,40
100	20,16	20,13	405,82	19,97	49,21
101	20,14	20,12	405,22	18,97	46,81
102	19,88	20,00	397,60	21,12	53,12
103	19,98	19,95	398,60	15,69	39,36
104	19,88	20,17	400,98	17,58	43,84
105	19,58	19,53	382,40	21,25	55,57
106	20,00	20,00	400,00	22,75	56,88
107	19,90	20,98	417,50	16,84	40,34
108	20,05	19,90	399,00	20,11	50,40
109	19,84	19,82	393,23	15,81	40,21
110	20,18	19,86	400,77	18,68	46,61
111	19,95	20,16	402,19	21,42	53,26
112	19,82	19,84	393,23	17,69	44,99
113	19,91	19,77	393,62	15,48	39,33
114	19,95	19,71	393,21	17,37	44,17
115	19,58	19,81	387,88	20,44	52,70
116	20,07	19,84	398,19	14,99	37,65
117	19,93	19,98	398,20	19,64	49,32
118	19,84	19,98	396,40	21,76	54,89
119	19,90	20,14	400,79	18,84	47,01
120	20,23	20,17	408,04	16,10	39,46
121	20,05	20,20	405,01	18,14	44,79
122	19,84	20,15	399,78	21,53	53,86
123	20,16	20,12	405,62	21,81	53,77
124	20,07	20,16	404,61	20,22	49,97
125	20,10	20,16	405,22	18,22	44,96
126	20,08	20,16	404,81	22,01	54,37
127	20,12	20,16	405,62	20,24	49,90
128	20,12	20,08	404,01	19,18	47,47
129	19,86	20,14	399,98	21,02	52,55
130	19,38	19,63	380,43	18,30	48,10
131	19,98	20,15	402,60	21,64	53,75
132	20,00	20,08	401,60	21,48	53,49
133	19,92	19,88	396,01	23,06	58,23
134	19,96	20,15	402,19	15,94	39,63
135	19,85	20,04	397,79	20,03	50,35



136	20,06	20,16	404,41	17,74	43,87
137	20,15	20,18	406,63	18,61	45,77
138	19,90	20,13	400,59	21,32	53,22
139	20,10	20,09	403,81	22,42	55,52
140	20,15	19,89	400,78	18,38	45,86
141	20,23	20,28	410,26	18,46	45,00
142	20,00	20,15	403,00	16,02	39,75
143	20,00	20,04	400,80	20,94	52,25
144	19,66	19,96	392,41	17,56	44,75
145	19,87	19,92	395,81	19,33	48,84
146	20,07	19,94	400,20	18,66	46,63
147	20,12	20,02	402,80	12,89	32,00
148	20,16	20,24	408,04	14,88	36,47
149	20,00	20,16	403,20	15,81	39,21
150	20,12	20,16	405,62	19,82	48,86
151	19,78	19,72	390,06	18,85	48,33
152	20,11	20,09	404,01	20,87	51,66
153	20,00	19,45	389,00	19,38	49,82
154	19,94	20,08	400,40	12,72	31,77
155	19,94	20,10	400,79	18,98	47,36
156	20,06	20,08	402,80	18,98	47,12
157	19,88	20,03	398,20	13,50	33,90
158	20,12	19,98	402,00	19,10	47,51
159	19,98	20,08	401,20	17,09	42,60
160	20,24	20,18	408,44	21,80	53,37
161	19,75	19,68	388,68	17,44	44,87
162	20,11	20,00	402,20	20,40	50,72
163	19,94	19,45	387,83	18,68	48,17
164	19,92	20,05	399,40	21,43	53,66
165	20,03	20,06	401,80	15,78	39,27
166	19,52	19,69	384,35	17,45	45,40
167	20,16	20,00	403,20	21,18	52,53
168	19,87	19,91	395,61	18,12	45,80
169	19,38	19,73	382,37	18,68	48,85
170	19,24	19,89	382,68	18,24	47,66
171	19,89	19,38	385,47	21,32	55,31
172	20,88	19,88	415,09	18,73	45,12
173	20,03	20,14	403,40	19,09	47,32
174	20,16	19,92	401,59	17,63	43,90
175	20,18	19,81	399,77	18,24	45,63
176	19,31	19,36	373,84	16,34	43,71
177	20,19	20,24	408,65	20,26	49,58
178	19,95	20,11	401,19	23,06	57,48
179	20,14	19,97	402,20	19,02	47,29
180	19,62	19,15	375,72	19,09	50,81
181	19,79	19,92	394,22	20,94	53,12
182	18,30	19,78	361,97	17,23	47,60



183	19,98	19,94	398,40	22,37	56,15
184	19,92	21,12	420,71	17,14	40,74
185	19,95	20,10	401,00	18,23	45,46
186	20,11	19,88	399,79	19,79	49,50
187	19,85	20,13	399,58	21,37	53,48
188	19,70	19,88	391,64	21,08	53,83
189	19,46	19,84	386,09	20,43	52,92
190	20,22	20,09	406,22	18,95	46,65
191	20,03	20,12	403,00	17,83	44,24
192	19,88	19,92	396,01	21,38	53,99
193	19,89	20,10	399,79	22,04	55,13
194	19,88	19,90	395,61	21,43	54,17
195	19,78	19,88	393,23	19,96	50,76
196	20,02	19,95	399,40	14,93	37,38
197	19,26	20,44	393,67	18,63	47,32
Moyenne			398,97	18,78	47,08
Valeur maximale			420,71	23,17	58,23
Valeur minimale			361,97	11,89	30,09
Ecart type			8,54	2,43	6,11



IV. DETERMINATION DU MODULE DE FLEXION PARALLELE AUX FIBRES (Echantillon 01)

EPROU- VETTE	Essai	Dimensions		CHARGE	FLECHE	DECHARGE	FLECHE	RESISTANCE	MODULE E
		b	h	A [600 N]	[mm]	A [200 N]	[mm]	[Mpa]	[N/mm2]
101	1	19,92	20,20	590,00	2,46	230,00	1,32	19,93	6491,24
	2	19,92	20,20	580,00	2,43	240,00	1,28	18,82	6077,31
	3	19,92	20,20	590,00	2,45	230,00	1,30	19,93	6434,80
	Moy	19,92	20,20	586,67	2,45	233,33	1,30	19,56	6334,00
102	1	20,11	19,88	580,00	2,49	240,00	1,46	19,25	7051,06
	2	20,11	19,88	580,00	2,50	230,00	1,48	19,82	7329,60
	3	20,11	19,88	570,00	2,54	240,00	1,47	18,68	6587,84
	Moy	20,11	19,88	576,67	2,51	236,67	1,47	19,25	6983,26
103	1	19,85	20,13	590,00	2,48	230,00	1,37	20,14	6760,23
	2	19,85	20,13	580,00	2,44	240,00	1,39	19,02	6749,50
	3	19,85	20,13	580,00	2,46	240,00	1,37	19,02	6501,81
	Moy	19,85	20,13	583,33	2,46	236,67	1,38	19,39	6670,09
104	1	19,95	20,10	580,00	1,92	240,00	0,96	18,98	7378,20
	2	19,95	20,10	580,00	1,89	230,00	0,97	19,54	7925,43
	3	19,95	20,10	590,00	1,91	240,00	0,97	19,54	7756,81
	Moy	19,95	20,10	583,33	1,91	236,67	0,97	19,35	7682,93
105	1	19,70	19,88	580,00	2,15	230,00	1,14	20,23	7556,23
	2	19,70	19,88	590,00	2,20	220,00	1,12	21,39	7470,27
	3	19,70	19,88	590,00	2,16	230,00	1,16	20,81	7849,84
	Moy	19,70	19,88	586,67	2,17	226,67	1,14	20,81	7621,21
106	1	20,16	20,12	580,00	1,91	230,00	1,03	19,30	8174,94
	2	20,16	20,12	590,00	1,91	220,00	1,01	20,40	8450,04
	3	20,16	20,12	590,00	1,88	230,00	0,99	19,85	8314,03
	Moy	20,16	20,12	586,67	1,90	226,67	1,01	19,85	8314,03
107	1	20,07	20,16	570,00	2,48	220,00	1,29	19,31	6036,37
	2	20,07	20,16	580,00	2,52	230,00	1,38	19,31	6301,12
	3	20,07	20,16	580,00	2,50	240,00	1,34	18,76	6015,56
	Moy	20,07	20,16	576,67	2,50	230,00	1,34	19,12	6115,93
108	1	19,84	20,15	620,00	2,08	230,00	1,19	21,79	9111,33
	2	19,84	20,15	600,00	2,10	230,00	1,15	20,67	8098,14
	3	19,84	20,15	590,00	2,06	230,00	1,08	20,11	7638,07
	Moy	19,84	20,15	603,33	2,08	230,00	1,14	20,86	8258,02
109	1	20,10	20,16	580,00	2,01	220,00	1,04	19,83	7605,66
	2	20,10	20,16	590,00	1,94	240,00	1,07	19,28	8244,32
	3	20,10	20,16	580,00	1,99	240,00	1,08	18,73	7656,74
	Moy	20,10	20,16	583,33	1,98	233,33	1,06	19,28	7824,61
110	1	20,08	20,16	570,00	2,61	220,00	1,34	19,30	5653,31
	2	20,08	20,16	580,00	2,61	230,00	1,36	19,30	5743,76
	3	20,08	20,16	580,00	2,64	230,00	1,31	19,30	5398,27
	Moy	20,08	20,16	576,67	2,62	226,67	1,34	19,30	5594,57



	1	20,15	19,89	570,00	2,81	190,00	1,24	21,45	5152,03
	2	20,15	19,89	580,00	2,88	200,00	1,29	21,45	5087,22
	3	20,15	19,89	580,00	2,84	230,00	1,57	19,76	5866,22
111	Moy	20,15	19,89	576,67	2,84	206,67	1,37	20,89	5333,52
	1	20,23	20,28	590,00	2,68	220,00	1,38	20,01	5692,89
	2	20,23	20,28	590,00	2,72	220,00	1,37	20,01	5482,04
	3	20,23	20,28	580,00	2,66	220,00	1,37	19,47	5581,96
112	Moy	20,23	20,28	586,67	2,69	220,00	1,37	19,83	5584,32
	1	20,00	20,15	570,00	2,16	220,00	1,19	19,40	7442,43
	2	20,00	20,15	600,00	2,28	190,00	1,05	22,72	6875,39
	3	20,00	20,15	580,00	2,16	220,00	1,18	19,95	7576,96
113	Moy	20,00	20,15	583,33	2,20	210,00	1,14	20,69	7264,56
	1	20,07	19,94	570,00	2,81	210,00	1,51	20,30	5873,68
	2	20,07	19,94	570,00	2,85	230,00	1,61	19,17	5815,78
	3	20,07	19,94	570,00	2,91	240,00	1,63	18,61	5468,33
114	Moy	20,07	19,94	570,00	2,86	226,67	1,58	19,36	5719,06
	1	19,66	19,96	550,00	3,92	240,00	2,24	17,81	3983,47
	2	19,66	19,96	550,00	3,95	220,00	2,20	18,96	4070,84
	3	19,66	19,96	560,00	3,96	240,00	2,29	18,38	4136,59
115	Moy	19,66	19,96	553,33	3,94	233,33	2,24	18,38	4063,59
	1	19,87	19,92	580,00	3,27	220,00	1,63	20,55	4717,01
	2	19,87	19,92	590,00	3,39	170,00	1,20	23,97	4121,10
	3	19,87	19,92	580,00	3,29	240,00	1,76	19,41	4775,24
116	Moy	19,87	19,92	583,33	3,32	210,00	1,53	21,31	4490,15
Moyenne				581,04	2,53	226,46	1,34	19,83	6490,87
Valeur maximale				603,33	3,94	236,67	2,24	21,31	8314,03
Valeur minimale				553,33	1,90	206,67	0,97	18,38	4063,59
Ecart type				10,38	0,54	9,85	0,30	0,83	1301,73



IV. DETERMINATION DU MODULE DE FLEXION PARALLELE AUX FIBRES (Echantillon 02)

EPROU- VETTE	Essai	Dimensions		CHARGE	FLECHE	DECHARGE	FLECHE	CONTRAINTE	MODULE E
		b	h	A [600 N]	[mm]	A [200 N]	[mm]	[Mpa]	[N/mm ²]
201	1	20,20	19,90	580,00	2,35	220,00	1,19	12,38	3919,57
	2	20,20	19,90	590,00	2,41	230,00	1,22	12,94	3996,97
	3	20,20	19,90	590,00	2,40	230,00	1,22	12,94	3996,97
	Moy	20,20	19,90	586,67	2,39	226,67	1,21	12,75	3971,60
202	1	19,64	19,54	570,00	2,56	230,00	1,40	13,80	3784,06
	2	19,64	19,54	590,00	2,61	200,00	1,26	12,00	3656,10
	3	19,64	19,54	590,00	2,57	230,00	1,44	13,80	3678,95
	Moy	19,64	19,54	583,33	2,58	220,00	1,37	13,20	3707,82
203	1	20,20	19,34	580,00	2,55	220,00	1,37	13,10	3708,99
	2	20,20	19,34	570,00	2,58	230,00	1,42	13,70	3741,04
	3	20,20	19,34	580,00	2,59	200,00	1,29	11,91	3580,91
	Moy	20,20	19,34	576,67	2,57	216,67	1,36	12,90	3679,65
204	1	20,10	20,00	570,00	2,44	210,00	1,18	11,75	3735,30
	2	20,10	20,00	580,00	2,42	220,00	1,29	12,31	3579,49
	3	20,10	20,00	580,00	2,43	230,00	1,31	12,87	3685,06
	Moy	20,10	20,00	576,67	2,43	220,00	1,26	12,31	3664,71
205	1	20,06	20,30	590,00	2,06	210,00	1,03	11,43	4100,50
	2	20,06	20,30	580,00	2,07	210,00	1,05	11,43	4022,40
	3	20,06	20,30	580,00	2,05	220,00	1,08	11,98	4096,88
	Moy	20,06	20,30	583,33	2,06	213,33	1,05	11,61	4073,31
206	1	20,21	19,86	570,00	2,13	220,00	1,03	12,42	4553,60
	2	20,21	19,86	580,00	2,20	200,00	0,96	11,29	4441,49
	3	20,21	19,86	590,00	2,21	230,00	1,09	12,98	4498,53
	Moy	20,21	19,86	580,00	2,18	216,67	1,03	12,23	4499,17
207	1	19,63	20,10	580,00	2,28	190,00	1,03	10,78	3905,55
	2	19,63	20,10	590,00	2,31	220,00	1,20	12,48	3881,56
	3	19,63	20,10	590,00	2,38	230,00	1,25	13,05	3895,68
	Moy	19,63	20,10	586,67	2,32	213,33	1,16	12,10	3893,73
208	1	20,14	20,00	590,00	1,91	210,00	0,92	11,73	4781,41
	2	20,14	20,00	590,00	1,87	220,00	0,95	12,29	4850,91
	3	20,14	20,00	580,00	1,81	220,00	0,93	12,29	4955,23
	Moy	20,14	20,00	586,67	1,86	216,67	0,93	12,10	4862,72
209	1	19,63	20,20	590,00	2,93	230,00	1,42	12,92	3378,62
	2	19,63	20,20	590,00	2,91	220,00	1,35	12,36	3399,29
	3	19,63	20,20	590,00	2,91	230,00	1,41	12,92	3402,58
	Moy	19,63	20,20	590,00	2,92	226,67	1,39	12,73	3393,38
210	1	20,17	20,00	560,00	2,06	220,00	1,02	12,27	4511,29
	2	20,17	20,00	590,00	2,11	220,00	1,03	12,27	4467,49
	3	20,17	20,00	590,00	2,11	230,00	1,05	12,83	4581,59
	Moy	20,17	20,00	580,00	2,09	223,33	1,03	12,46	4520,55
211	1	20,15	20,00	580,00	2,60	210,00	1,24	11,72	3545,74
	2	20,15	20,00	570,00	2,61	220,00	1,41	12,28	3266,72
	3	20,15	20,00	580,00	2,65	230,00	1,45	12,84	3321,00
	Moy	20,15	20,00	576,67	2,62	220,00	1,37	12,28	3370,30
212	1	19,90	19,64	580,00	1,83	220,00	0,93	12,90	5295,85
	2	19,90	19,64	590,00	1,89	220,00	0,95	12,90	5184,36
	3	19,90	19,64	570,00	1,85	230,00	0,96	13,48	5363,56



	Moy	19,90	19,64	580,00	1,86	223,33	0,95	13,09	5281,44
	1	19,97	20,20	580,00	2,02	230,00	1,04	12,70	4534,57
	2	19,97	20,20	590,00	2,05	220,00	1,02	12,15	4422,46
	3	19,97	20,20	580,00	2,01	210,00	1,05	11,60	4100,83
213	Moy	19,97	20,20	583,33	2,03	220,00	1,04	12,15	4351,36
	1	20,15	20,10	590,00	2,37	230,00	1,30	12,71	3649,18
	2	20,15	20,10	580,00	2,40	220,00	1,24	12,16	3659,41
	3	20,15	20,10	590,00	2,42	220,00	1,30	12,16	3490,52
214	Moy	20,15	20,10	586,67	2,40	223,33	1,28	12,35	3598,77
	1	19,97	20,06	580,00	2,04	220,00	1,10	12,32	4187,29
	2	19,97	20,06	590,00	2,07	220,00	1,09	12,32	4225,70
	3	19,97	20,06	590,00	2,11	230,00	1,13	12,88	4261,40
215	Moy	19,97	20,06	586,67	2,07	223,33	1,11	12,51	4225,13
	1	20,00	19,93	580,00	2,34	210,00	1,08	11,90	4144,93
	2	20,00	19,93	590,00	2,39	220,00	1,22	12,46	3844,01
	3	20,00	19,93	590,00	2,39	220,00	1,19	12,46	3940,92
216	Moy	20,00	19,93	586,67	2,37	216,67	1,16	12,27	3970,18
	1	19,82	19,84	570,00	2,05	230,00	1,14	13,27	4399,14
	2	19,82	19,84	590,00	2,18	220,00	1,10	12,69	4360,89
	3	19,82	19,84	580,00	2,11	220,00	1,08	12,69	4441,65
217	Moy	19,82	19,84	580,00	2,11	223,33	1,11	12,88	4400,30
	1	19,86	19,90	590,00	2,04	220,00	0,99	12,59	4792,07
	2	19,86	19,90	570,00	2,02	220,00	1,01	12,59	4697,17
	3	19,86	19,90	590,00	2,08	220,00	0,99	12,59	4792,07
218	Moy	19,86	19,90	583,33	2,05	220,00	1,00	12,59	4760,01
	1	20,10	20,23	590,00	2,38	210,00	1,07	11,49	3980,39
	2	20,10	20,23	580,00	2,41	230,00	1,16	12,58	4021,24
	3	20,10	20,23	580,00	2,37	220,00	1,09	12,04	4093,42
219	Moy	20,10	20,23	583,33	2,39	220,00	1,11	12,04	4031,77
	1	19,90	20,05	570,00	2,38	230,00	1,28	12,94	3780,90
	2	19,90	20,05	570,00	2,38	230,00	1,27	12,94	3810,67
	3	19,90	20,05	560,00	2,45	240,00	1,28	13,50	3945,29
220	Moy	19,90	20,05	566,67	2,40	233,33	1,28	13,13	3845,71
	Moyenne			582,17	2,29	220,83	1,16	12,48	4105,08
	Valeur maximale			590,00	2,92	233,33	1,39	13,20	5281,44
	Valeur minimale			566,67	1,86	213,33	0,93	11,61	3370,30
	Ecart type			5,33	0,27	4,82	0,15	0,42	506,11

V. DETERMINATION DE LA RESISTANCE A LA FLEXION

Ech	EPROUVETTE	CHARGE MAX.	DIMENSIONS		RESISTANCE
		[N]	b [mm]	h [mm]	[Mpa]
	101	1500	20,10	19,97	84,21
	102	1300	20,25	19,15	78,78
	103	1590	19,95	19,92	90,38
E	104	2140	19,70	19,78	124,94
CH	105	1640	20,00	19,94	92,81
AN	106	1930	19,98	21,12	97,45



TI	107	2010	20,30	20,10	110,29
LL	108	1900	19,79	19,88	109,32
ON	109	1500	19,94	20,13	83,54
	110	1620	20,17	19,88	91,45
1	111	1390	20,10	19,84	79,06
	112	1750	20,17	20,09	96,74
	113	1790	19,67	20,12	101,16
	114	1460	19,84	19,92	83,45
	115	1310	19,93	20,10	73,21
	116	1330	20,13	19,84	75,53
Moyenne					92,02
Valeur maximale					124,94
Valeur minimale					73,21
Ecart type					14,21
	201	1770	20,20	19,90	99,57
	202	1610	19,64	19,54	96,62
	203	1510	20,20	19,34	89,93
E	204	1780	20,10	20,00	99,63
CH	205	1940	20,06	20,30	105,61
AN	206	1980	20,21	19,86	111,78
TI	207	1700	19,63	20,10	96,46
LL	208	1900	20,14	20,00	106,13
ON	209	1500	19,63	20,20	84,27
	210	1920	20,17	20,00	107,09
2	211	1720	20,15	20,00	96,03
	212	1960	19,90	19,64	114,90
	213	1910	19,97	20,20	105,48
	214	1570	20,15	20,10	86,79
	215	1900	19,97	20,06	106,40
	216	1580	20,00	19,93	89,50
	217	2050	19,82	19,84	118,24
	218	2040	19,86	19,90	116,72
	219	1620	20,10	20,23	88,62
	220	1650	19,90	20,05	92,81
Moyenne					100,63
Valeur maximale					118,24
Valeur minimale					84,27
Ecart type					10,29



VI. MODULE DE FLEXION DES EPROUVETTES DE BOIS LAMELLE-COLLE

EPROU- VETTE	Essai	Dimensions		CHARGE A [600 N]	FLECHE [mm]	DECHARGE A [200 N]	FLECHE [mm]	RESISTANCE [Mpa]	MODULE E [N/mm2]
		b	h						
200	1	19,70	20,00	600,00	1,97	200,00	1,28	22,84	12414,48
	2	19,70	20,00	610,00	2,00	220,00	1,32	22,27	12282,12
	3	19,70	20,00	620,00	2,01	210,00	1,34	23,41	13104,69
	Moy	19,70	20,00	610,00	1,99	210,00	1,31	22,84	12597,04
201	1	19,90	20,00	620,00	2,21	200,00	1,20	23,74	8815,74
	2	19,90	20,00	610,00	2,17	200,00	1,20	23,18	8960,72
	3	19,90	20,00	610,00	2,17	200,00	1,22	23,18	9149,37
	Moy	19,90	20,00	613,33	2,18	200,00	1,21	23,37	8971,91
202	1	20,00	20,05	610,00	2,63	210,00	1,61	22,39	8210,33
	2	20,00	20,05	600,00	2,61	200,00	1,59	22,39	8210,33
	3	20,00	20,05	600,00	2,62	200,00	1,59	22,39	8130,62
	Moy	20,00	20,05	603,33	2,62	203,33	1,60	22,39	8183,58
203	1	19,00	20,20	610,00	3,08	200,00	1,71	23,80	6449,55
	2	19,00	20,20	610,00	3,12	200,00	1,75	23,80	6449,55
	3	19,00	20,20	600,00	3,12	200,00	1,73	23,22	6201,71
	Moy	19,00	20,20	606,67	3,11	200,00	1,73	23,60	6366,14
204	1	20,10	20,15	610,00	2,28	200,00	1,10	22,61	7131,07
	2	20,10	20,15	610,00	2,28	200,00	1,12	22,61	7254,01
	3	20,10	20,15	610,00	2,29	200,00	1,10	22,61	7071,14
	Moy	20,10	20,15	610,00	2,28	200,00	1,11	22,61	7151,27
205	1	20,00	20,40	600,00	2,47	200,00	1,38	21,63	7294,35
	2	20,00	20,40	600,00	2,58	200,00	1,41	21,63	6795,59
	3	20,00	20,40	600,00	2,54	200,00	1,41	21,63	7036,15
	Moy	20,00	20,40	600,00	2,53	200,00	1,40	21,63	7036,15
206	1	19,64	20,10	610,00	2,11	200,00	1,33	23,25	11123,29
	2	19,64	20,10	610,00	2,10	200,00	1,32	23,25	11123,29
	3	19,64	20,10	600,00	2,11	200,00	1,33	22,69	10851,99
	Moy	19,64	20,10	606,67	2,11	200,00	1,33	23,06	11032,86
207	1	20,20	20,10	600,00	2,53	210,00	1,58	21,50	8446,47
	2	20,20	20,10	610,00	2,53	200,00	1,60	22,61	9070,58
	3	20,20	20,10	610,00	2,55	200,00	1,62	22,61	9070,58
	Moy	20,20	20,10	606,67	2,54	203,33	1,60	22,24	8859,58
208	1	20,30	20,10	610,00	2,76	200,00	1,55	22,50	6937,26
	2	20,30	20,10	610,00	2,78	200,00	1,58	22,50	6995,07
	3	20,30	20,10	600,00	2,79	200,00	1,58	21,95	6768,06
	Moy	20,30	20,10	606,67	2,78	200,00	1,57	22,31	6899,87
209	1	20,20	20,50	600,00	3,17	200,00	1,57	21,20	4848,43
	2	20,20	20,50	600,00	3,22	200,00	1,58	21,20	4730,17
	3	20,20	20,50	600,00	3,21	200,00	1,58	21,20	4759,19
	Moy	20,20	20,50	600,00	3,20	200,00	1,58	21,20	4778,74
210	1	19,90	20,45	610,00	2,21	220,00	1,09	21,09	6905,38
	2	19,90	20,45	610,00	2,22	200,00	1,02	22,17	6775,53
	3	19,90	20,45	610,00	2,20	200,00	1,01	22,17	6832,47
	Moy	19,90	20,45	610,00	2,21	206,67	1,04	21,81	6836,27
211	1	19,90	19,90	600,00	2,65	200,00	1,27	22,84	6237,96
	2	19,90	19,90	610,00	2,67	200,00	1,25	23,41	6213,80
	3	19,90	19,90	610,00	2,68	200,00	1,33	23,41	6535,99



	Moy	19,90	19,90	606,67	2,67	200,00	1,28	23,22	6326,64
	1	19,90	19,80	610,00	2,15	200,00	1,23	23,65	9736,91
	2	19,90	19,80	610,00	2,24	200,00	1,24	23,65	8957,96
	3	19,90	19,80	600,00	2,23	200,00	1,24	23,07	8827,75
212	Moy	19,90	19,80	606,67	2,21	200,00	1,24	23,46	9159,93
	1	20,10	20,00	610,00	2,31	200,00	1,08	22,95	6996,27
	2	20,10	20,00	600,00	2,32	200,00	1,06	22,39	6663,11
	3	20,10	20,00	620,00	2,37	200,00	1,09	23,51	6886,95
213	Moy	20,10	20,00	610,00	2,33	200,00	1,08	22,95	6847,81
	1	19,70	20,20	600,00	3,74	190,00	2,02	22,95	4954,60
	2	19,70	20,20	610,00	3,84	200,00	2,12	22,95	4954,60
	3	19,70	20,20	610,00	3,85	200,00	2,10	22,95	4869,67
214	Moy	19,70	20,20	606,67	3,81	196,67	2,08	22,95	4925,96
	1	20,30	20,20	600,00	2,38	190,00	1,30	22,27	7657,44
	2	20,30	20,20	610,00	2,42	200,00	1,35	22,27	7729,01
	3	20,30	20,20	600,00	2,44	200,00	1,34	21,73	7334,84
215	Moy	20,30	20,20	603,33	2,41	196,67	1,33	22,09	7571,82
	1	20,10	20,00	600,00	2,39	200,00	1,32	22,39	7846,28
	2	20,10	20,00	610,00	2,45	200,00	1,34	22,95	7752,62
	3	20,10	20,00	610,00	2,48	200,00	1,34	22,95	7548,61
216	Moy	20,10	20,00	606,67	2,44	200,00	1,33	22,76	7712,75
	1	20,00	20,15	600,00	2,69	200,00	1,53	22,17	7112,47
	2	20,00	20,15	610,00	2,77	190,00	1,52	23,27	6930,39
	3	20,00	20,15	610,00	2,78	190,00	1,53	23,27	6930,39
217	Moy	20,00	20,15	606,67	2,75	193,33	1,53	22,91	6988,10
	1	20,00	20,30	600,00	2,14	200,00	1,40	21,84	10903,95
	2	20,00	20,30	610,00	2,16	200,00	1,40	22,39	10882,43
	3	20,00	20,30	620,00	2,23	200,00	1,41	22,93	10332,16
218	Moy	20,00	20,30	610,00	2,18	200,00	1,40	22,39	10694,80
	1	20,20	19,70	610,00	1,97	200,00	1,23	23,53	12108,10
	2	20,20	19,70	610,00	2,05	200,00	1,27	23,53	11487,17
	3	20,20	19,70	600,00	2,05	200,00	1,31	22,96	11812,78
219	Moy	20,20	19,70	606,67	2,02	200,00	1,27	23,34	11797,10
	1	20,20	20,30	600,00	2,06	200,00	1,36	21,62	11412,91
	2	20,20	20,30	600,00	2,05	200,00	1,41	21,62	12482,87
	3	20,20	20,30	600,00	2,07	200,00	1,39	21,62	11748,58
220	Moy	20,20	20,30	600,00	2,06	200,00	1,39	21,62	11864,90
	1	20,00	20,10	620,00	1,95	190,00	1,04	23,95	9819,35
	2	20,00	20,10	610,00	1,94	200,00	1,06	22,83	9681,82
	3	20,00	20,10	600,00	1,92	190,00	1,05	22,83	9793,10
221	Moy	20,00	20,10	610,00	1,94	193,33	1,05	23,20	9765,26
	1	19,84	20,30	610,00	2,28	200,00	1,30	22,57	8507,50
	2	19,84	20,30	600,00	2,25	200,00	1,32	22,02	8746,23
	3	19,84	20,30	600,00	2,25	200,00	1,33	22,02	8841,30
222	Moy	19,84	20,30	603,33	2,26	200,00	1,32	22,20	8694,47
	1	20,10	20,20	610,00	2,14	200,00	1,13	22,50	8269,63
	2	20,10	20,20	610,00	2,16	200,00	1,13	22,50	8109,05
	3	20,10	20,20	600,00	2,14	200,00	1,14	21,95	8148,61
223	Moy	20,10	20,20	606,67	2,15	200,00	1,13	22,31	8175,42
	1	19,94	20,20	600,00	2,34	200,00	1,41	22,12	8832,25
	2	19,94	20,20	610,00	2,36	200,00	1,39	22,68	8679,74
224	3	19,94	20,20	610,00	2,40	200,00	1,41	22,68	8504,39



	Moy	19,94	20,20	606,67	2,37	200,00	1,40	22,49	8668,75
	1	20,00	20,00	600,00	2,31	190,00	1,19	23,06	7721,82
	2	20,00	20,00	600,00	2,28	200,00	1,19	22,50	7740,83
	3	20,00	20,00	610,00	2,32	200,00	1,19	23,06	7653,48
225	Moy	20,00	20,00	603,33	2,30	196,67	1,19	22,88	7704,90
	Moyenne			606,83	2,52	200,50	1,40	22,66	8036,92
	Valeur maximale			613,33	3,81	210,00	2,08	23,60	12597,04
	Valeur minimale			600,00	1,99	193,33	1,04	21,20	4778,74
	Ecart type			3,33	0,45	3,47	0,25	0,65	2141,98

VII. DETERMINATION DE LA RESISTANCE A LA FLEXION DES EPROUVETTES EN BOIS LAMELLE-COLLE

EPROUVETTES	CHARGES MAX. [N]	SECTIONS		RESISTANCE [Mpa]
		b [mm]	h [mm]	
200	1970	19,70	20,00	112,50
201	1600	19,90	20,00	90,45
202	1760	20,00	20,05	98,51
203	1620	19,00	20,20	94,03
204	1830	20,10	20,15	100,91
205	1950	20,00	20,40	105,43
206	1930	19,64	20,10	109,46
207	1780	20,20	20,10	98,15
208	1720	20,30	20,10	94,37
209	1770	20,20	20,50	93,83
210	1820	19,90	20,45	98,41
211	1920	19,90	19,90	109,64
212	1730	19,90	19,80	99,79
213	1780	20,10	20,00	99,63
214	1460	19,70	20,20	81,73
215	1480	20,30	20,20	80,40
216	1740	20,10	20,00	97,39
217	1900	20,00	20,15	105,29
218	1660	20,00	20,30	90,64
219	1920	20,20	19,70	110,21
220	1870	20,20	20,30	101,09
221	2040	20,00	20,10	113,61
222	1630	19,84	20,30	89,72
223	1740	20,10	20,20	95,47
224	1750	19,94	20,20	96,79
225	1710	20,00	20,00	96,19
Moyenne	1772	19,97	20,13	98,60
Valeur maximale	2040	20,30	20,50	113,61
Valeur minimale	1460	19,00	19,70	80,40
Ecart type	144,54	0,26	0,19	8,50

