

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 Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : HAMDI OQBA

CHOUATI WISSEM

**Thème : DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA
RESISTANCE EN FLEXION D'UNE POUTRE DE
DIMENSIONS REELLES EN BOIS DE PIN D'ALEP
ABOUTÉ ET LAMELLÉ-COLLÉ**

Sous la direction de : ZAHREDDINE NAFA

Juillet 2019

AVANT PROPOS

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions ALLAH de nous avoir donné le pouvoir afin de réaliser ce travail.

Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimer nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nous souhaitons tout d'abord remercier notre encadreur le professeur : NAFA Zahreddine, qui nous a encadrés avec patience durant la réalisation de ce travail de fin d'études. Ses conseils nous ont été bien utiles, notamment pour la rédaction de ce mémoire.

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont honorés en acceptant de juger ce modeste travail. Leurs remarques ont été à l'origine de discussions riches et passionnantes.

Enfin, nous tenons à remercier l'ensemble du corps enseignant de département de Génie civil et d'hydraulique.

Dédicace

À ma mère...

À ma famille...

*À toutes les personnes qui
font le plus beau don : le don
de savoir, le don de temps et
le don de soi.*

HAMDI OQBA

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents et ma grand-mère

Pour leur patience, leur amour,

Leur soutien et leur encouragement.

A mes sœurs et mon frère Iyed

A mes amis et camarades.

A tous les professeurs que ce soit de primaire, du moyen,

Du secondaire et de l'enseignement supérieur.

Sans oublier tous les personnes que j'aime.

CHOUATI WISSEM.

RESUME

ملخص

منذ القديم ومادة الخشب تستخدم في البناء، وهو مادة البناء الطبيعية الوحيدة المتجددة بالكامل. الخشب الرقائقي المصنوع من المنتجات الخشبية التي يستعملها المهندس في الهياكل لأنها مستقرة وبدون عيوب. إنها توفر نسبة (خصائص ميكانيكية / كثافة) جيدة، مما يؤدي إلى تحقيق اقتصاد في الأساسات، ويمكن من الحصول على أشكال هندسية معقدة (أقواس، روافد المنحنية، روافد عملاقة...).

يهدف هذا العمل إلى إجراء دراسة تجريبية لانحناء روافد مصنوعة من خشب الصنوبر الحلبي بواسطة تقنية الرقائق المصققة.

أولاً، أعطتنا الدراسة الببليوغرافية معلومات جيدة عن الخشب الرقائقي المصقق، وخصائصه، وطريقة الحصول عليه، ولا سيما مقاومة هذا النوع من المواد. ثم وبعد مقارنة النتائج التجريبية المتحصل عليها بالنسبة للخشب الرقائقي المصقق للصنوبر الحلبي مع تلك المتحصل عليها بالنسبة لخشب القولية الموجود في السوق تبين لنا أن هذه النتائج متقاربة إلى حد كبير سواءاً بالنسبة للمقاومة أو الصلابة.

الكلمات المفتاحية : خشب الصنوبر، الربط، الرقائق المصققة، خشب القولية، اختبار الانحناء.

RÉSUMÉ

Utilisé depuis toujours en construction, le bois est le seul matériau de construction naturel totalement renouvelable. Le bois abouté lamellé-collé est un produit de bois d'ingénierie très utilisé en structure car il est stable et sans défaut. Il offre un bon rapport caractéristiques mécaniques / masse volumique, entraînant des économies sur les fondations, et se prête aux formes architecturales complexes (arcs, curvilignes, portiques...).

Le but de ce travail est d'étudier expérimentalement la flexion de poutres de bois de pin d'Alep obtenues par la technique du lamellé-collé. Tout d'abord, l'étude bibliographique nous a bien renseigné sur le bois abouté lamellé collé, ses caractéristiques, sa méthode d'obtention, et notamment la résistance de ce type de matériau. Une comparaison des résultats expérimentaux obtenus pour les poutres lamellée-collées et les poutres de bois de coffrage nous a permis de constater des valeurs comparables de la résistance ainsi que de la rigidité.

Mots – clés : bois de pin d'Alep, aboutage, lamellé-collé, bois de coffrage, essai de flexion.

Abstract

Ever used in construction, wood is the only completely renewable natural building material. Glued laminated is the engineered wood product chosen for structures because it is stable and without defaults. It offers a good mechanical characteristics / density ratio, resulting in savings on foundations, and lends itself to complex architectural forms (arches, curvilinear, gantries ...).

The aim of this study is to experimentally study the bending of Alep pine wood beams obtained by the glulam technique. Firstly, the bibliography study gave us good information on glued laminated, its characteristics, its method of obtaining, and in particular the resistance of this type of material. Then a comparison of the experimental results obtained for glulam beams and timber formwork beams allowed us to observe comparable values of strength and rigidity.

Keywords: Aleppo pine wood, butting, glulam, formwork timber, bending test.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	II
INTRODUCTION GENERALE.....	02
<u>CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</u>	
1.1 LE BOIS.....	05
1.1.1. Anatomie du bois à l'échelle macroscopique.....	05
1.1.2. Propriété principale du bois.....	06
a) L'humidité.....	06
b) Le retrait.....	07
c) La densité.....	07
d) Résistance et flexibilité.....	08
1.1.3. Les défauts du bois.....	10
a) Les nœuds.....	10
b) Le cœur excentré.....	11
c) Le fil tors.....	11
d) Les irrégularités de croissance.....	11
e) Les roulures.....	11
f) Gélivures.....	11
g) Gerçure.....	11
1.1.4. L'utilisation du bois dans la construction.....	12
1.1.5. Avantage du bois dans la construction.....	12
a) Aspect écologique.....	12
b) Aspect technique.....	12
c) Aspect économique.....	13
1.1.6. Différents systèmes constructifs du bois.....	13
a) Ossature bois.....	14
b) Poteaux-poutres	15
c) Les constructions bois empilés.....	16
d) Panneaux massifs contrecollés.....	16

1.1.7. Panneaux dérivés du bois.....	17
a) Panneau OSB (Oriented Strand Board).....	18
b) Panneaux contreplaqués.....	18
c) Panneau MDF (MEDIUM DENSITY FIBERBOARD).....	19
d) PANNEAU DE PARTICULES – AGGLOMERE.....	20
1.2. LE LAMELLE COLLE.....	21
1.2.1. Introduction	21
1.2.2. Historique	22
1.2.3. Fabrication du lamellé collé	23
1.2.4. Caractéristiques du matériau.....	26
1.2.5. Avantages du lamellé-collé	26
1.3. LES NORMES D'ESSAS.....	27
1.3.1. Eurocode 5.....	27
1.3.2. ISO.....	27
1.3.3. AFNOR.....	28

CHAPITRE 2 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

2.1. INTRODUCTION.....	30
2.2. CARACTÉRISATION PHYSIQUE.....	35
2.2.1. Densité.....	35
2.2.2. Mesure de taux d'humidité.....	37
2.3. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE.....	38
2.3.1. Mode opératoire	38
2.3.2. Machine d'essais.....	39
2.3.3. Présentation des cas testés.....	40
2.3.4. Expression des résultats.....	41
2.3.5. Rapport d'essai.....	42

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

3.1. CARACTÉRISATION PHYSIQUE.....	45
3.1.1. Densité.....	45
a) Densité humide	45
b) Densité sèche.....	45
3.1.2. Le taux d'humidité.....	45
3.2. CARACTÉRISATION MECANIQUE.....	46
3.2.1. Module de YOUNG	46
3.2.2. La résistance en flexion.....	48
3.2.3. Mode de rupture.....	50
CONCLUSION GENERALE.....	53
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	54
ANNEXE 1.....	57
ANNEXE 2.....	90

LISTE DES FIGURES :**Chapitre 1 : étude bibliographique**

Figure 1.1 : structure du bois des deux groupes.....	5
Figure 1.2 : Schéma de la rétractabilité du bois.....	7
Figure 1.3 : Compression parallèle et perpendiculaire au fil.....	8
Figure 1.4 : Traction parallèle et perpendiculaire au fil.....	9
Figure 1.5 : cisaillement.....	9
Figure 1.6 : flexion du bois.....	10
Figure 1.7 : Cycle de vie des produits du bois.....	13
Figure 1.8 : Maison à ossature bois.....	14
Figure 1.9 : Chalet poteaux-poutres.....	15
Figure 1.10 : Maison en bois empilé.....	16
Figure 1.11 : Panneaux massifs contrecollés.....	17
Figure 1.12 : Panneaux OSB.....	18
Figure 1.13 : Panneaux contreplaqués.....	19
Figure 1.14 : Panneaux MDF.....	20
Figure 1.15 : Panneau de particule.....	20
Figure 1.16 : Structure d'un panneau Lamellé collé.....	21
Figure 1.17 : Séchage des bois sciés.....	23
Figure 1.18 : Purge et tri en classe de résistance.....	23
Figure 1.19 : _Enlèvement des nœuds et des défauts.....	24
Figure 1.20 : Rabotage des lames (ou lamelles).....	24
Figure 1.21 : Encollage.....	24
Figure 1.22 : Pressage des lamelles.....	24
Figure 1.23 : Rabotage.....	25
Figure 1.24 : Taillage et finitions.....	25

Chapitre 2 : étude expérimentale

Figure 2.1 : troncs d'arbre reçus au laboratoire.....	30
Figure 2.2 : Troncs d'arbre découpés au laboratoire.....	31
Figure 2.3 : Les lamellés de bois avec défauts.....	31
Figure 2.4 : Les défauts éliminés.....	32
Figure 2.5 : Les lamellés de bois sans défauts.....	32
Figure 2.6 : les entures multiples.....	33
Figure 2.7 : Collage des éprouvettes.....	33
Figure 2.8 : Mise sous pression des éprouvettes.....	34
Figure 2.9 : Eprouvettes brutes.....	34
Figure 2.10 : Eprouvette finie.....	34
Figure 2.11: O.BASF Master Brace ADH 2200.....	35
Figure 2.12: Eprouvettes pour la mesure de la densité et teneur en eau.....	36
Figure 2.13 : Pied à coulisse à 0.01 [mm] de précision.....	36
Figure 2.14 : Balance de précision de 0.01g.....	36
Figure 2.15: Etuve ventilée.....	37
Figure 2.16 : Dispositif d'essai pour le mesurage du module d'élasticité en flexion.....	39
Figure 2.17: Machine d'essais.....	39
Figure 2.18 : Poutre en bois seulement.....	40
Figure 2.19 : Poutre lamellée collée.....	40
Figure 2.20 : Courbe force/déplacement indiquant la plage des déplacements élastiques....	41

Chapitre 3 : présentation et analyse des résultats

Figure 3.1 : Exemple de courbe charge-déplacement (poutre de type 01).....	47
Figure 3.2 : Exemple de courbe charge-déplacement (poutre type 02).....	47
Figure 3.3 : Exemple de courbe charge-déplacement (poutre type 01).....	49
Figure 3.4 : Exemple de courbe charge-déplacement (poutre type 02).....	49
Figure 3.5 : les ruptures sur les poutres de bois de coffrage.....	50
Figure 3.6 : Mode de rupture de 2 ^{eme} et 3 ^{eme} poutre de bois de coffrage.....	50
Figure 3.7 : Les ruptures sur les poutres de lamellées collées.....	51
Figure 3.8 : mode de rupture de la troisième poutre.....	51

LISTE DES TABLEAUX :**Chapitre 1 : étude bibliographique**

Tableau 1.1 : Qualifications normalisées des bois en fonction du taux d'humidité (NF B51002).....	6
Tableau 1.2 : Classement des bois en fonction de leur masse volumique.....	7

Chapitre 3 : présentation et analyse des résultats

Tableau 3.1: Récapitulatif des résultats de mesure de la densité humide.....	45
Tableau 3.2: Récapitulatif des résultats de mesure de la densité sèche.....	45
Tableau 3.3: Récapitulatif des résultats de mesure du taux d'humidité.....	45
Tableau 3.4 : Récapitulatif des résultats de calcul de module de YOUNG.....	46
Tableau 3.5 : Récapitulatif des résultats de calcul de résistance pour mode 01.....	48

INTRODUCTION

L'Algérie a une superficie totale de 2,388 millions de km². La ressource forestière recouvre un peu plus de 10% de la surface totale. La localisation des forêts est dans les régions du nord du pays avec un peuplement principalement constitué de résineux.

En Algérie, les forêts sont constituées de deux groupes, le premier groupe : les forêts d'intérêt économique (les chênes, les cèdres, le pin maritime, les eucalyptus, l'essence prédominante est le pin d'Alep) et le second groupe sont les forêts de protection des sols (Chêne vert, Thuya...). L'utilisation du bois en Algérie dans la construction est très minime pour ne pas dire inexistante (échafaudage, coffrages). Il est constaté seulement des utilisations secondaires comme la fabrication des ameublements, menuiseries, décoration...etc., malgré que les essences de bois locales puissent être utilisées dans la majorité des produits de bois.

Le pin d'Alep est l'essence la plus répandue en Algérie (plus de 800.000 Ha). Les pins de groupe Halepensis, sont des pins à deux feuilles, souvent connus sous le nom de pins méditerranéens. Le Pin d'Alep est une essence de lumière, qui supporte le découvert dès sa naissance ; ses faibles exigences en eau (300mm et même moins) et l'abondance de ses grains lui permettent de coloniser rapidement les stations les plus variées, on trouve cet arbre à l'état spontané sur tout le pourtour du bassin méditerranéen.

La tendance s'inverse dans le monde, la construction bois revient. De nos jours, du fait des problèmes environnementaux, la demande pour les constructions à base de bois s'est considérablement amplifiée. Pour cela il a eu un développement de nouveaux visages de bois de construction dont le bois abouté. Le bois abouté lamellé-collé est généralement le produit de bois d'ingénierie retenu pour la fabrication des poutres de bois de longue portée.

Notre travail de fin d'étude rentre dans le cadre d'un projet de recherche visant à l'étude de la faisabilité de poutres en bois lamellé collé à partir du pin d'Alep. Ces poutres seront utilisées comme bois de coffrage dont la quasi-totalité provient de l'importation.

Il s'agit de fabriquer des poutres en bois abouté et lamellé collé puis de comparer leur résistance en flexion à celle de poutre en bois de coffrage trouvé dans le commerce.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres. Après cette introduction, on présentera dans le chapitre un, un aperçu bibliographique sur le bois en général et la technique d'aboutage et de lamellé collé en particulier. Le second chapitre est consacré à la présentation du bâti d'essai, des étapes de fabrication des éprouvettes, ainsi que les différents essais réalisés et leurs protocoles. Les résultats de l'expérimentation et leur analyse et interprétation sont exposés dans le troisième et dernier chapitre. Enfin, une conclusion vient clôturer ce mémoire, dans laquelle on donnera un résumé des résultats trouvés et quelques perspectives de travaux complémentaires futurs souhaités.

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. LE BOIS

1.1.1. Anatomie du bois à l'échelle macroscopique :

Le bois a pour origine l'arbre et le matériau qui nous intéresse le plus particulièrement est celui tiré du tronc.

Au niveau macroscopique, une coupe transversale d'un tronc d'arbre est caractérisée par la présence de « cerne annuels ». Ceux-ci correspondent à l'activité cellulaire en fonction des saisons.

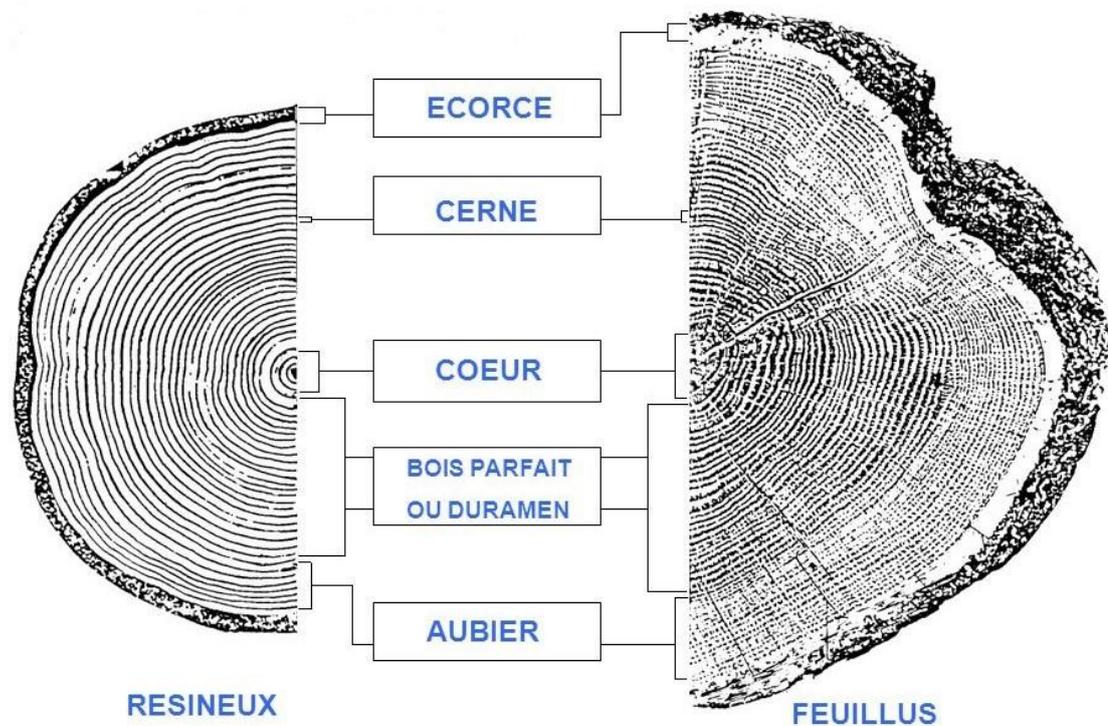


Figure 1.1 : structure du bois des deux groupes.

L'aubier représente le système conducteur de la nourriture de l'arbre, des racines à la couronne. Il transporte la sève brute (montante), un mélange de sels nutritifs dissous dans l'eau que les racines prélèvent du sol. L'aubier reprend aussi l'effort principal des charges mécaniques (en traction et en compression) dus aux vents, à la neige et au poids propre de la couronne.

Le bois de cœur (ou le bois parfait ou duramen) est l'élément de soutien central de l'arbre. En revanche, il ne remplit plus de fonction conductrice des substances nutritives. Le centre du tronc, la moelle, peut, à partir d'un certain âge, être creuse.

1.1.2. Propriété principale du bois

a) L'humidité :

Presque toutes les propriétés physiques du bois sont influencées par sa teneur en eau. En dépendent en effet : son poids, son comportement au feu, sa résistance aux parasites, son comportement statique, et surtout sa résistance à la déformation et sa stabilité dimensionnelle.

Lorsque le taux d'humidité change, le bois se rétracte ou se dilate. Lorsque le bois sèche, son volume diminue. Ce phénomène est appelé retrait, le processus inverse, qui provoque une augmentation de volume, étant appelé gonflement.

Ces changements de volume sont dus au fait que tant les cavités que les parois des cellules contiennent de l'eau. Le bois étant un matériau hygroscopique, il a la propriété d'absorber ou de restituer l'humidité en fonction du climat ambiant. On dit à ce propos que le bois « travaille ».

Le taux d'humidité du bois d'œuvre débité doit toujours être indiqué. On établit à cet égard la distinction suivante :

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 1.1 : Qualifications normalisées des bois en fonction du taux d'humidité (NF B51-002).

L'humidité du bois indique le pourcentage d'eau que contient le bois par rapport à son poids à l'état anhydre.

Le bois continue cependant de travailler une fois mis en œuvre ; il se gonfle et se rétracte lors des changements de saison, selon l'humidité de l'air ambiant.

b) Le retrait :

Le retrait du bois est le phénomène selon lequel les dimensions d'une pièce de bois diminuent avec son taux d'humidité. Le retrait du bois n'est cependant pas identique selon les différentes directions du bois :

Longitudinale (axe de l'arbre), radiale (de la moelle vers l'écorce) et tangentielle (tangente à l'écorce). Le retrait longitudinal est très faible par rapport aux deux autres (de l'ordre de grandeur de dix fois moindre, cette valeur variant en fonction des espèces).

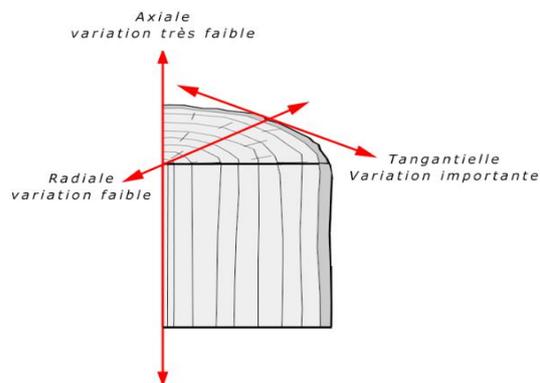


Figure 1.2 : Schéma de la rétractabilité du bois.

L'intensité du retrait, ainsi que le point de saturation des fibres, dépendent essentiellement de l'espèce de l'arbre, bien qu'on observe une variabilité individuelle.

c) La densité :

La densité est le rapport existant entre la masse d'un certain volume d'un corps et celle du même volume d'eau. Evidemment, la densité varie beaucoup selon la teneur en eau, la structure du bois et la croissance de l'arbre. Il est donc important de préciser la teneur en humidité de l'échantillon au moment de la mesure de la masse et du volume.

ESSENCE	Densité a 15%	Qualifications des bois
Résineux	$D < 0.4$	Très léger
	$0.4 < D < 0.5$	Léger
	$0.5 < D < 0.6$	Mi-lourd
	$0.6 < D < 0.7$	Lourd
	$0.7 < D$	Très lourd

Tableau 1.2 : Classement des bois en fonction de leur masse volumique.

d) Résistance et flexibilité :

Les résistances sont différentes selon l'utilisation que l'on fait de la pièce de bois et, bien entendu elles sont influencées par sa structure, son humidité et surtout par la disposition de ses veines.

- La compression : la charge de compression est un élément important dans la construction d'une charpente. Cette compression peut être axiale : poutre en position verticale, montant de menuiserie, pieds de meuble ; ou horizontale : résistance à l'écrasement d'une poutre assemblée en T ou munie de semelles, dans les constructions lourdes.

La résistance de la pièce de bois sera plus ou moins forte selon la position des fibres et la disposition des veines.

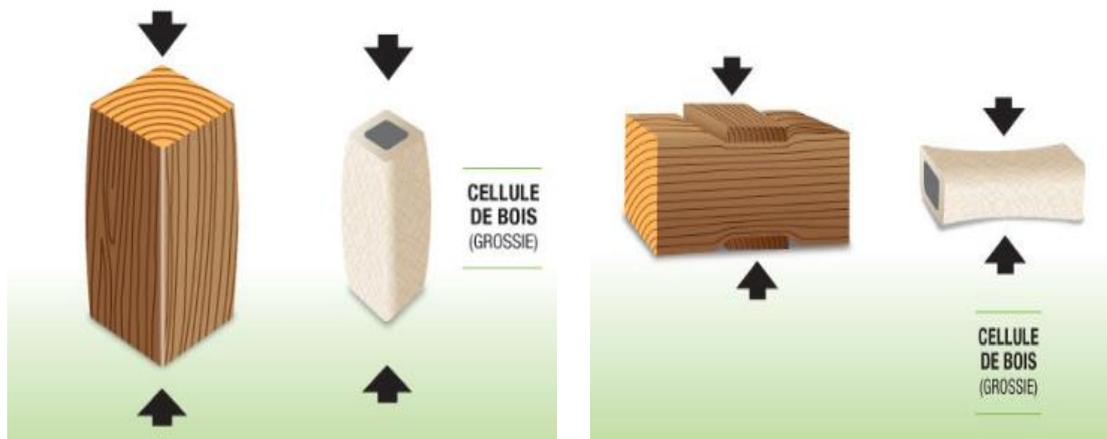


Figure 1.3 : Compression parallèle et perpendiculaire au fil.

- La traction : la résistance a la traction est très bonne, pour autant qu'on utilise une pièce d'une certaine section et sans défaut. Si la résistance est bonne dans le sens axial, il n'en va pas de même lorsque la traction s'exerce dans le sens perpendiculaire aux fibres, ce qui peut provoquer un décollement des cernes annuels.



Figure 1.4 : Traction parallèle et perpendiculaire au fil.

- Cisaillement : c'est effort qui provoque le décollement des fibres d'une pièce de bois, par exemple d'une traverse ou d'un manche d'outil.

Le cisaillement doit être pris en considération dans les travaux d'assemblage en charpente lorsque, par exemple on entaille un bras dans une extrémité de poutre.

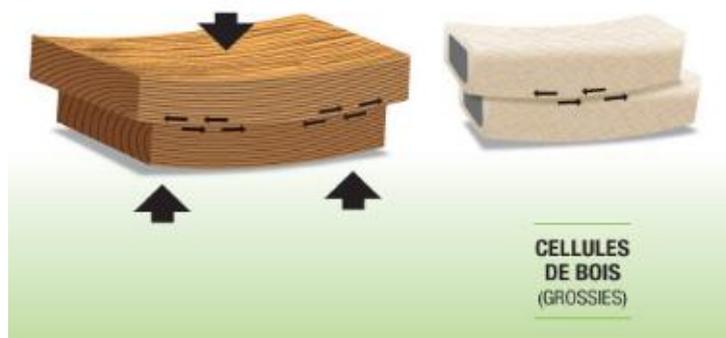


Figure 1.5 : cisaillement.

- La flexion : les bois tendres, ainsi que les résineux, sont en général flexibles. Un bois flexible subit une certaine déformation sous l'effet d'une pression, mais résiste, tandis qu'un bois dur résistera peut-être davantage à la charge, mais cassera subitement sans avoir fléchi. Pour une pièce de charpente, on augmente la résistance à la flexion par la forme de l'équarrissage et la disposition des veines. Une zone de nœuds diminue fortement la résistance à la flexion.

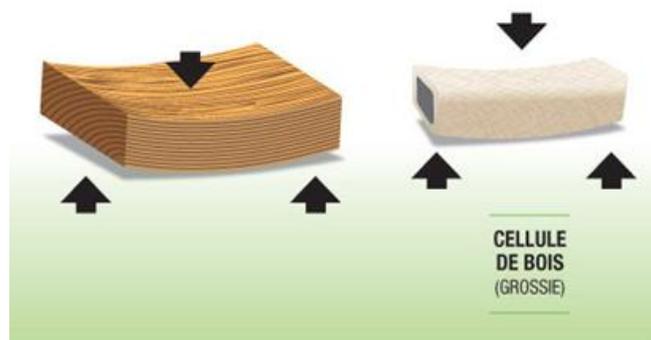
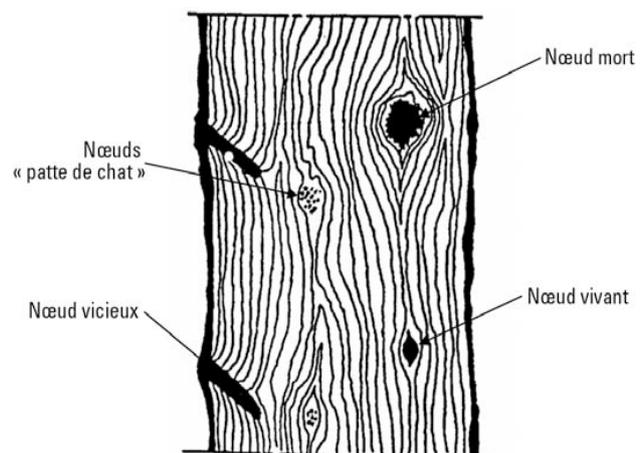


Figure 1.6 : flexion du bois.

1.1.3. Les défauts du bois

Le bois est une matière naturelle qui peut présenter des défauts et des irrégularités. Selon leur nature, leur importance ou l'utilisation du bois, elles pourront être considérées comme des défauts, mais aussi recherchées pour leur effet décoratif.

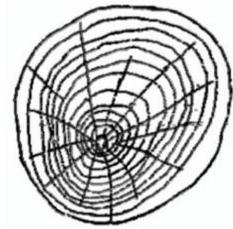
a) Les nœuds : Le nœud est une modification de la structure du bois lié à l'existence d'une branche. Celle-ci provoque un détournement local des fibres du fil. Les nœuds entraînent une irrégularité du fil autour de ceux-ci ce qui peut rendre la surface esthétiquement disgracieuse et mécaniquement fragile. De plus les usinages sont particulièrement difficiles à réaliser au niveau des nœuds.



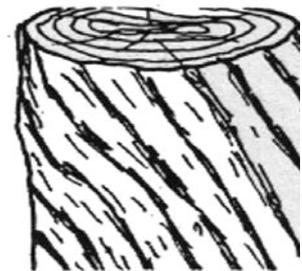
b) Le cœur excentré : On constate ce défaut qui poussent sur des terrains pentus ou lorsque le tronc s'est penché sous l'action du vent ou du poids des branches. En somme ce défaut apparaît lorsque les racines ou la cime ont des raisons de se développer plus d'un côté que de l'autre.



chez les arbres



c) Le fil tors : Sur pied, l'arbre à un aspect très décoratif. Par contre les bois débités dans de tels arbres ont leurs fibres tranchées et sont amenés à se gauchir. Ils sont impropres pour l'assemblage.



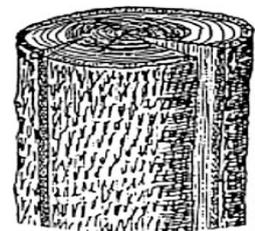
d) Les irrégularités de croissance : Il s'agit d'un arbre qui présente des épaisseurs inégales des couches annuelles sur divers points du pourtour du tronc. Ces défauts peuvent entraîner des troncs d'arbre de forme méplat.



e) Les roulures : Elles consistent en un décollement des couches annuelles plus ou moins prononcé. Elles proviennent de la gelée ou très souvent de grands vents qui soumettent l'arbre à des flexions exagérées.



f) Gélivures : Fente radiale partant de l'écorce jusqu'à la moelle. La gélivure se produit principalement lorsque le froid survient très brutalement après une période relativement douce.



g) Gerçure : C'est un défaut dû à la sécheresse qui fait éclater l'écorce du bois. Ce défaut se retrouve sur les plateaux de menuiserie qui sont restés exposés en plein soleil.



1.1.4. L'utilisation du bois dans la construction :

Le bois peut être très largement utilisé dans la construction puisque des ouvrages peuvent être complètement réalisés avec ce matériau.

Après de longues années où le béton surtout, mais aussi le métal et le verre, ont été les principaux matériaux de construction, un nouvel engouement ou un retour vers le matériau bois s'opère aujourd'hui. La sensibilité des populations vis-à-vis de l'environnement, les atouts que présente le bois pour la protection de la planète, les qualités de celui-ci, sont vraisemblablement les éléments moteurs, qui font que les ingénieurs en génie civil et les architectes, les maîtres d'ouvrages, les maîtres d'œuvre accordent aujourd'hui une plus grande attention à ce matériau.

De nos jours, le bois est utilisé à tous les stades de l'exécution des ouvrages, notamment sous forme de : Blindage et étayages des feuilles, coffrage des éléments en béton, réalisation de la charpente et des couvertures, menuiserie (portes, fenêtres) et parquets.

Le bois est également très utilisé comme matériel de chantier. On s'en sert comme : échafaudages, plateaux de levage, baraques préfabriquées et 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 leurs conditions d'emplois.

1.1.5. Avantage du bois dans la construction :

a) Aspect écologique :

- La seule matière première renouvelable de la planète.
- Un grand consommateur de CO₂.
- Il aide activement à la lutte contre le réchauffement climatique.

b) Aspect technique :

- Matériau facile à travailler et à assembler.
- Rapidité de mise en œuvre.
- Performance thermique élevées.
- Adaptation aux terrains difficiles.
- Adaptation aux zones sismiques.
- Combustion lente.

c) Aspect économique :

- Réductions des délais de construction et des frais financiers.
- Réduction des couts de fondations (matériau léger).
- Réduction des couts de construction.
- Matériau recyclable.

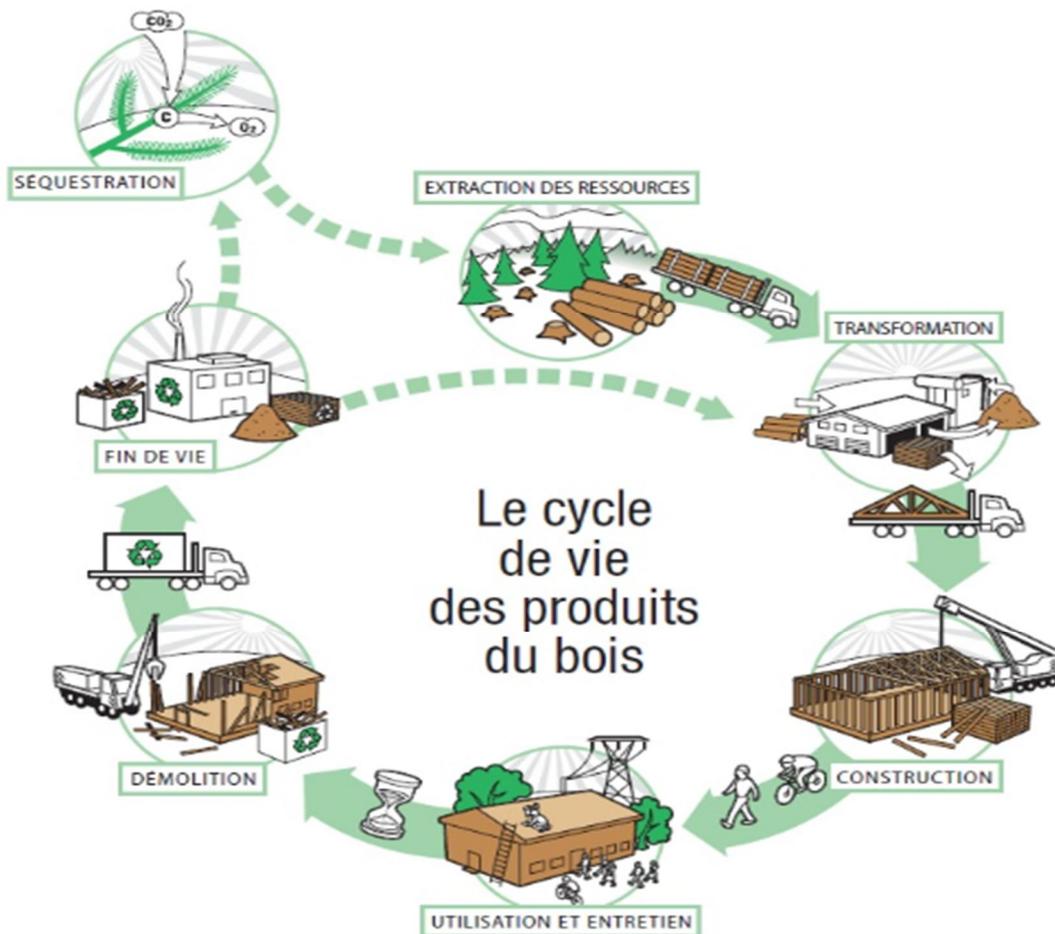


Figure 1.7 : Cycle de vie des produits du bois.

1.1.6. Différents systèmes constructifs du bois :

Le bois est un matériau écologique utilisé dans la construction de différents types d'habitations, qu'il s'agisse de maisons basses ou d'immeubles à plusieurs niveaux. Son utilisation permet plusieurs techniques de constructions.

a) Ossature bois :

- Principe :

L'ossature bois est parfaitement adaptée à la construction des murs, des planchers des étages et de la charpente de la toiture. Ce système permet de fabriquer en atelier les murs et les pièces de la maison sous forme de module, qui seront ensuite assemblés sur place pour former le logement.

La construction se réalise niveau par niveau, chaque plateau constitue le plafond du niveau inférieur et le plancher du niveau suivant. Les murs en bois peuvent accueillir les isolants, les revêtements intérieurs et extérieurs, ainsi que l'isolation.

- Avantages :

Cette technique de construction en bois est rapide et propre. Elle permet une bonne isolation thermique et donc une consommation énergétique restreinte. Elle ne présente aucune limite en matière d'architecture et offre un excellent confort intérieur.



Figure 1.8 : Maison à ossature bois.

b) Poteaux-poutres :

Ce principe de construction bois très ancien a également de nombreux avantages.

- Principe :

Ce principe consiste à élever la structure porteuse de la maison, composée des poteaux et des poutres en bois massif ou lamellé-collé de fortes sections. Cette structure est entièrement réalisée en atelier et acheminée sur le chantier. Elle est ensuite érigée pour former l'ossature à partir de laquelle va naître la maison.

- Avantages

La technique offre une grande diversité architecturale, avec des possibilités de transformation sans limites. Elle permet l'intégration de très larges baies vitrées, la création de pièces de vie spacieuses et est parfaitement adaptée aux grands ouvrages comme les halls de sports, les piscines, etc. Côté esthétique, on peut l'utiliser à l'intérieur comme l'extérieur de l'édifice.



Figure 1.9 : Chalet poteaux-poutres.

c) Les constructions bois empilés

- Principe :

Le principe du bois massif empilé est un processus d'empilement de billes et bois brutes ou massives. La superposition du matériau et son épaisseur assurent l'isolation et l'étanchéité, ce qui réduit l'utilisation d'isolants. Pour plus d'esthétique, on peut utiliser des madriers en bois massif contrecollé. On distingue plusieurs procédés : le madrier plat, le madrier demi-rond et le rondin ou bois rond.

- Avantages :

La maison bénéficie d'un excellent niveau d'isolation acoustique et thermique, ce qui permet notamment des économies d'énergie. La construction est rapide, entre six à dix semaines, et existe également en kit préfabriqué pour les personnes qui souhaitent bâtir elles-mêmes leur habitation.



Figure 1.10 : Maison en bois empilé.

d) Panneaux massifs contrecollés :

- Technique

Le principe des panneaux bois massifs contrecollés combine la technique de construction d'ossature bois et celle des bois massifs empilés. Ces panneaux sont constitués de 3 à 7 couches de lamelles entrecroisées et entre collées en surface. Le bois contrecollé est produit à partir de lames de bois collées ou clouées entre elles.

Comme l'ossature à bois, ce système peut être utilisé pour les murs porteurs, la toiture et les planchers en étage. Il s'adapte à n'importe quel matériau pour le parement extérieur ou intérieur. On peut laisser l'intérieur à l'état brut, ce qui correspond à un certain style de décoration.

- Avantages

Les avantages de la technique sont nombreux :

- Une isolation thermique et phonique renforcée
- Une très bonne solidité et stabilité de la structure
- Une construction rapide. Les panneaux en bois massifs se montent sur le chantier avec une simple grue de levage.



Figure 1.11 : Panneaux massifs contrecollés.

1.1.7. Panneaux dérivés du bois :

Les matériaux dérivés du bois ont pris une importance considérable dans tous les domaines de la filière bois. Ils sont incontournables en construction où ils permettent des réalisations que n'autorise pas le bois massif. En effet, ils présentent deux avantages : une disponibilité en grandes dimensions et une faible sensibilité aux variations d'humidité. Par conséquent, les panneaux dérivés du bois peuvent entrer dans la composition d'une énorme variété de produits, allant des applications de décoration jusqu'aux utilisations en structure.

Aujourd'hui, il existe un vaste choix de panneaux dérivés du bois, voici les principaux utilisés sur le marché :

a) Panneau OSB (Oriented Strand Board):

Le panneau OSB est un panneau à particules généralement composé de 3 couches de lamelles de bois collées, de taille et d'épaisseur déterminées. Les lamelles de la couche extérieure sont disposées dans le sens de la longueur du panneau, alors que les lamelles de la couche centrale sont orientées aléatoirement ou perpendiculairement à la longueur. Les lamelles des couches externes confèrent les propriétés mécaniques et les lamelles de la couche interne assurent la cohésion du panneau.

Comparé aux autres panneaux à particules et à fibres de bois, le panneau OSB présente des propriétés mécaniques intéressantes. La résistance mécanique est très élevée parallèlement à l'orientation des plaquettes ce qui lui permet de concurrencer les panneaux contreplaqués.



Figure 1.12 : Panneaux OSB.

b) Panneaux contreplaqués :

Panneaux à base de bois constitués d'un nombre variable, le plus souvent impair, de couches de placage assemblées par collage et dont le fil est croisé à angle droit. Les plis sont placés de façon successive, symétriquement par rapport au pli central.

Un panneau contreplaqué peut être composé d'une ou deux essences, avec ou sans croisement des placages, etc. Les combinaisons sont en réalité infinies.

Ce type de panneau permet la valorisation d'essences de qualité moyenne ainsi que la diminution de l'influence des défauts sur le comportement mécanique. Ce sont les joints de colle et les essences qui constituent le panneau qui vont être déterminants pour l'usage final de celui-ci (intérieur, extérieur, résistant à l'humidité ou non, etc.)

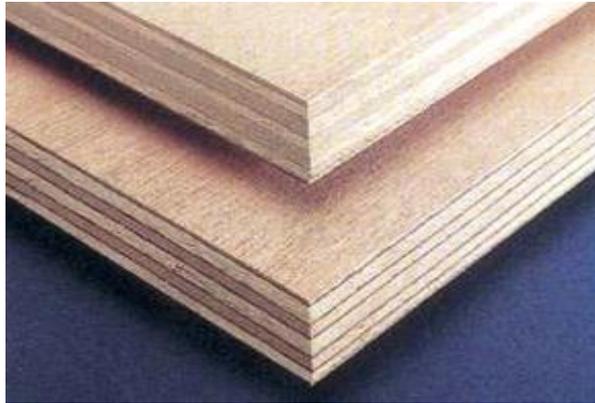


Figure 1.13 : Panneaux contreplaqués.

c) Panneau MDF (MEDIUM DENSITY FIBERBOARD):

Le panneau MDF est un panneau composé de fibres de bois ou d'autres matières lignocellulosiques, d'une épaisseur de 1,5 mm, formé par pression et/ou application de chaleur de manière à constituer un matériau isotrope. Le MDF est obtenu par un procédé "sec".

Le MDF est un matériau industriel récent présentant de multiples avantages. En effet, c'est un panneau homogène dans les trois dimensions, esthétique du fait de sa texture fine. Mais aussi plus économique que le bois massif car permettant l'utilisation de bois de première éclaircie (arbres de faible diamètre, qui ne peuvent être valorisés en bois massif).

Du point de vue technique, le MDF est un matériau d'usage facile. Il ne se fend pas, résiste au feu, n'éclate pas, ne se déforme pas. Le sciage est également net et sans bavure et il peut être peint, lasuré ou verni. Contrairement au bois brut, il n'y a pas de sens de fibres à observer pour le rabotage ou le ponçage. La finesse de sa texture permet d'obtenir des surfaces aptes à la mouluration et au laquage.



Figure 1.14 : Panneaux MDF.

d) PANNEAU DE PARTICULES – AGGLOMERE :

Panneaux fabriqués sous pression et chaleur, constitués de particules de bois et/ou d'autre matériau lignocellulosique également sous forme de particules. Ces composants sont liés au moyen de colle. La masse volumique des panneaux de particules n'est pas homogène dans toute l'épaisseur du panneau (plus élevée en surface). D'autre part, la taille des particules est variable dans l'épaisseur des panneaux, les plus grossières se retrouvant au centre du panneau.



Figure 1.15 : Panneau de particule.

1.2. LE LAMELLE-COLLE

1.2.1. Introduction :

Le lamellé-collé est un bois d'ingénierie composé de pièces individuelles de bois d'œuvre qui sont jointées et collées ensemble pour créer les lamelles. Ces lamelles sont empilées pour créer une poutre droite et courbée.

Le lamellé-collé n'est donc rien d'autre que le bois massif mais en dimensions illimitées, ce qui offre aux architectes une grande liberté de conception.

Parmi les matériaux de construction, le lamellé-collé est l'un des plus intéressants. Il est beau et résistant. Le fait de coller les planches de résineux entre elles et de répartir les nœuds de manière équitable augmente sa résistance.

Ce matériau prend toute sa valeur lorsqu'il s'agit de grandes portées (donc, de grandes surfaces). Le lamellé-collé participe au confort des complexes sportifs et autres bâtiments public, non seulement en raison de ses qualités acoustiques. Hormis ses avantages techniques qui sont considérables, il faut également souligner sa grande souplesse architecturale dans la conception.

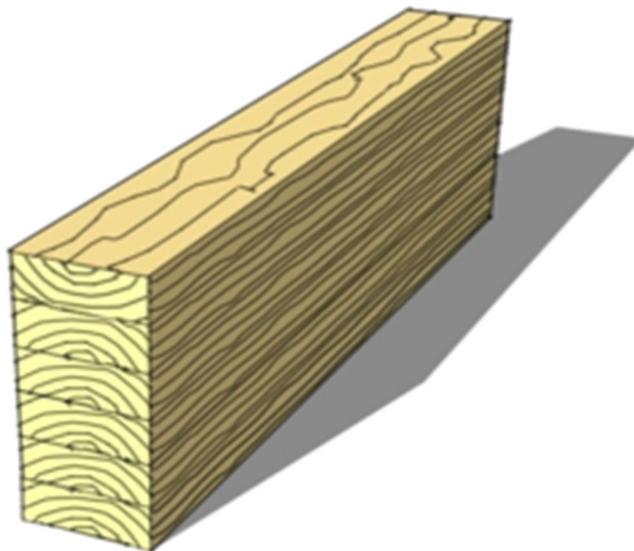


Figure 1.16 : Structure d'un panneau Lamellé-collé.

1.2.2. Historique :

- Apparition du principe :

L'histoire du bois lamellé est constituée d'évolutions, de progrès et d'hommes de génie. Le premier d'entre eux fut Philibert Delorme, Architecte qui, dès 16^{ème} siècle, eu l'idée de faire avec du bois ce que, jusque-là, on ne faisait qu'avec de la pierre : des arcs, autorisant de grandes portées. Familier de la charpente marine, il invente une nouvelle forme de charpente, révolutionnaire pour l'époque. En arches, composées de courtes sections de bois, solidarisées entre elles par des clavettes afin de réaliser des fermes cintrées. Le procédé de la lamellation était né.

- Évolution de la technique :

À la fin du 18^{ème} siècle, les militaires reprennent cette technique pour la construction de leurs manèges et casernes. Ils modifient cependant légèrement la technique pour obtenir des toits plans et supprimer les soucis de couverture. Plusieurs charpentiers, architectes ou ingénieurs font également évoluer la technique comme, par exemple, le charpentier Hans Grubenmann, qui, en suisse, réalisait des ponts grâce à des arcs composés de madriers assemblés. Mais c'est Carl Friedrich Von Wiebeking qui, en 1809, eu l'idée d'une liaison par collage. Le colonel Emmy perfectionne ce principe en constituant des arcs de plus grande portée. Son idée : l'empilement de planches disposées horizontalement cintrées et serrées avec des colliers en métal.

- Invention du bois lamellé :

A l'aube du 20^{ème} siècle, le bois lamellé, tel qu'on le définit aujourd'hui, est inventé par l'Allemand Otto Hetzer. Ce charpentier inventif a l'idée de remplacer les pièces métalliques du colonel Emmy par des collages à la caséine, permettant d'assembler les lamelles entre elles. Ce qui supprime toute déformation. Entre 1906 et 1907, le brevet de ce nouveau matériau est déposé en Allemagne, en France et en Suisse ; et il prouve d'un tel génie que son application en charpente est évidente et son développement immédiat.

1.2.3. Fabrication du lamellé collé

✓ 1^{ère} opération : Séchage des Bois sciés :

Les sciages de résineux passent d'abord au séchoir pour ramener leur teneur en humidité à environ 12%. Ils sont ensuite rabotés.

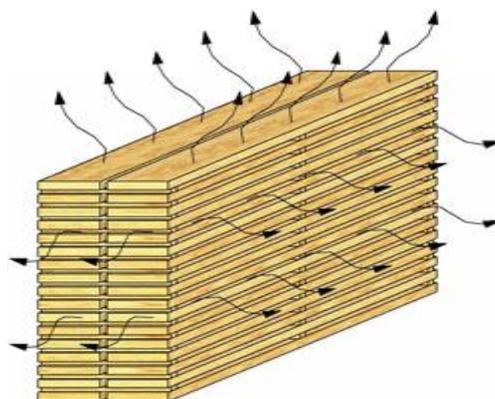


Figure 1.17 : Séchage des bois sciés.

✓ 2^{ème} opération : Purge et tri en classe de résistance :

Après le séchage et un premier rabotage les planches sont inspectées et classées selon la qualité du bois (classes de résistance mécanique). Ce tri (purge) se fait de plus en plus par des machines. Les critères de tri font aussi intervenir des critères de qualité sur l'état de surface des pièces.

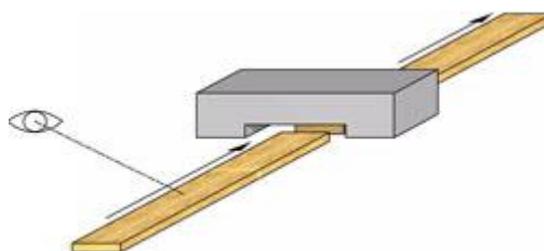


Figure 1.18 : Purge et tri en classe de résistance.

✓ 3^{ème} opération : Enlèvement des nœuds et des défauts :

Le tri (purge) élimine les pièces ou les sections de pièces présentant des altérations ou des défauts rédhibitoires pour la classe de tenue mécanique et/ou la qualité d'état de surface recherchée (gerces, piqûres, fente de cœur, nœuds pourris, poches de résine, etc.). Les planches peuvent ensuite être encollées bout à bout dans leur grande longueur pour former des pièces de grande dimension (encollage des extrémités taillées en dents de scie, dit encore aboutage à entures multiples).

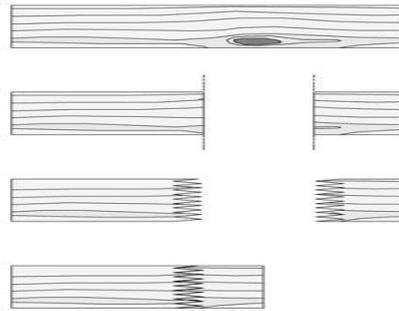


Figure 1.19 : Enlèvement des nœuds et des défauts.

- ✓ 4^{ème} opération : Rabotage des lames (ou lamelles) :
- Les lames sont rabotées jusqu'à une épaisseur de 4.

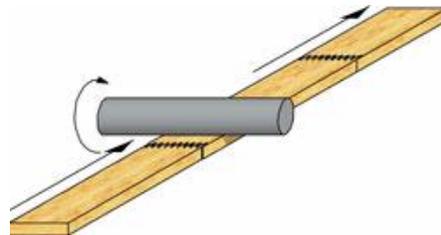


Figure 1.20 : Rabotage des lames (ou lamelles).

- ✓ 5^{ème} opération : Encollage :
- L'application de colle se fait sur les faces des lames.

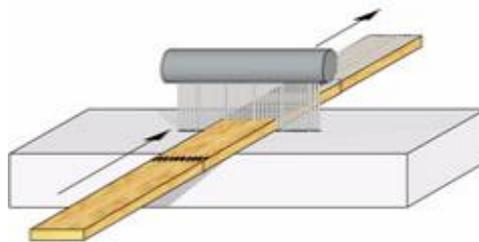


Figure 1.21 : Encollage.

- ✓ 6^{ème} opération : Pressage des lamelles :
- Le serrage se fait sur au moins trois lames (ou lamelles) sur un banc de presse de géométrie droite ou cintrée.

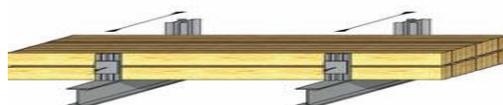


Figure 1.22 : Pressage des lamelles.

✓ 7^{ème} opération : Rabotage :

Les plans de collage des pièces obtenues (lamellé collé) durcissent sous l'effet de la pression. Après le durcissement les pièces passent à la raboteuse.

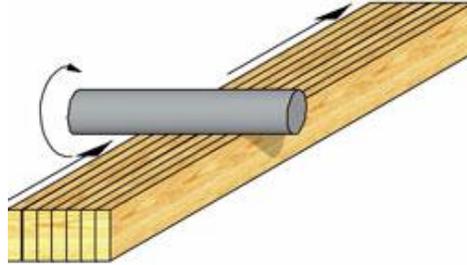


Figure 1.23 : Rabotage.

✓ 8^{ème} opération : Taillage et finitions :

Les fabricants sont souvent amenés à effectuer des opérations de taillage et de finition, pose de connecteurs, de ferrures, etc. Le cas échéant les pièces sont traitées avec un produit de préservation anti-intempérie et emballées.

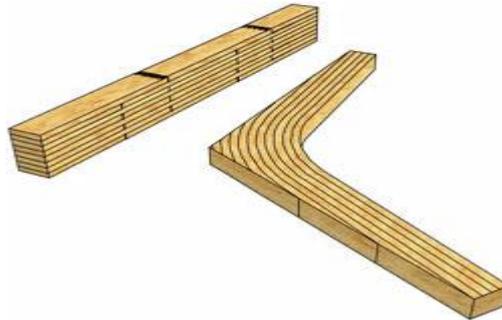


Figure 1.24 : Taillage et finitions.

Les joints encollés sont très minces. La part en poids de la colle est de moins de 1% dans le produit fini.

Suite aux opérations de séchage, de tri des bois de sciage en classes homogènes de résistance mécanique, les pièces en lamellé collé présentent en final des caractéristiques très intéressantes en termes de tenue mécanique : elles supportent des contraintes en flexion largement supérieures, jusqu'à 50%, à celles admises pour les bois de coupe habituels.

Les lamelles présentant une certaine souplesse avant l'encollage, la fabrication de pièces cintrées présente relativement peu de difficulté. La fabrication de pièces à fortes courbures demande plus de préparations.

1.2.4. Caractéristiques du matériau :

En charpente, le lamellé-collé est constitué de lamelles de bois, souvent de l'épicéa, du Douglas ou du pin sylvestre d'une épaisseur de 33 mm à 45 mm et collées entre elles. La masse volumique du bois lamellé-collé est fonction des essences de bois utilisées pour le fabriquer : aux environs de 500 kg/m³ pour les résineux cités plus haut, supérieure à 700 kg/m³ pour le bois lamellé-collé de chêne.

Les résistances mécaniques des classes les plus courantes de bois lamellé-collé vont de 20 à 40 MPa pour la résistance en flexion, de 13,6 à 22,5 MPa pour la résistance en traction et de 21 à 29 MPa pour la résistance en compression.

1.2.5. Avantages du lamellé-collé :

Construire aujourd'hui avec du bois lamellé collé présente de nombreux avantages :

✓ Aux caractéristiques constantes et garanties :

- Séchage maîtrisé,
- Stabilité dimensionnelle,
- Dimensionnement précis et (en théorie !) infini,
- Association possible (acier, béton, LVL...),
- Esthétique des formes (poteaux ronds, charpentes cintrées...).

✓ D'une très grande résistance :

- Mécanique (flexion, compression, torsion),
- Au feu et à la chaleur (faible conductivité thermique et maintien des caractéristiques jusqu'à 100 C° avec une colle appropriée),
- Aux ambiances agressives notamment aux produits chimiques stockés (potasse, soufre, chlorure de sodium, acide sulfurique...).

✓ Les dimensions courantes (poutre droite) :

- Largeur de 60 à 240 mm,
- Hauteur : 100 à 600 mm,
- Longueur : jusqu'à 40 m.

1.3. LES NORMES D'ESSAIS

Les Normes internationales sont des rouages indispensables. Elles établissent des spécifications de premier ordre pour les produits, les services et les systèmes dans une optique de qualité, de sécurité et d'efficacité.

1.3.1. Eurocode 5 :

Les pays de l'union européenne ont décidé d'harmoniser les normes régissant les domaines du bâtiment, des travaux publics et du génie civil. Appelées Eurocodes structuraux, elles regroupent un ensemble de normes expérimentales réglementant le calcul, la conception et la justification des structures.

Les eurocodes reproduisent également les adaptations nationales, dont la réunion constitue le " Document d'application national (DAN) ", qui prend en compte les particularités de chaque pays. Les eurocodes sont applicables, en totalité ou en partie, dans le cadre contractuel d'un marché public ou privé, s'ils sont mentionnés dans le cahier des clauses administratives particulières dans le premier cas, ou dans les documents particuliers du marché, dans le second cas. Ils remplaceront dans quelques années les normes nationales en vigueur dans les secteurs correspondants.

L'eurocode 5 énonce les règles concernant le calcul des structures en bois, et plus particulièrement les règles générales et règles pour le bâtiment.

1.3.2. ISO :

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une organisation internationale non gouvernementale, indépendante, dont les 163 membres sont les organismes nationaux de normalisation. Par ses membres, l'Organisation réunit des experts qui mettent en commun leurs connaissances pour élaborer des Normes internationales d'application volontaire, fondées sur le consensus, pertinentes pour le marché, soutenant l'innovation et apportant des solutions aux enjeux mondiaux.

1.3.3. AFNOR :

Créée en 1926, AFNOR est une association régie par la loi de 1901, composée de près de 2 500 entreprises adhérentes. Sa mission est d'animer et de coordonner le processus d'élaboration des normes et de promouvoir leur application.

Reconnue par les pouvoirs publics - qui ont confié au Ministère chargé de l'industrie un rôle de coordination interministérielle et de contrôle - AFNOR est le noyau central du système français de normalisation. Rassemblant autour d'elle tous les grands acteurs socio-économiques, elle est à l'écoute de leurs besoins et collabore étroitement avec les 25 bureaux de normalisation et autres instances professionnelles. Elle développe une collection de normes répondant à leurs objectifs stratégiques. L'une des normes avec laquelle nous allons travailler est la norme NF EN 408:1995 qui nous aidera à déterminer certaines propriétés physiques et mécanique du bois lamellé.

CHAPITRE 2 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

2.1. INTRODUCTION

Les valeurs obtenues lors de toute détermination des propriétés du bois dépendent des méthodes d'essai utilisées. Il est par conséquent souhaitable que ces méthodes soient normalisées afin que les résultats, provenant de différents entres d'essai, puissent être corrélés. Par ailleurs, avec l'adoption du calcul aux états limites et le développement du classement visuel et mécanique, l'attention se portera de plus en plus sur la détermination et le contrôle des caractéristiques de résistance et de leur variabilité dans le bois aux dimensions d'emploi. Ceci également peut être entrepris avec plus d'efficacité si les données de base sont définies et obtenues dans des conditions comparables.

Par absence de normes algériennes dans le domaine de la caractérisation physico-mécanique du bois, nos essais et mesures sont faites en suivant les recommandations de la norme européenne et française.

La caractérisation physico-mécanique d'un matériau se fait sur des éprouvettes normalisées. Dans notre cas, la fabrication d'éprouvettes de bois passe par plusieurs étapes qui sont :

a. La réception du bois brut :

- Le bois est réceptionné dans les locaux du laboratoire sous forme de morceaux de tronc de 1m de longueur.



Figure 2.1 : troncs d'arbre reçus au laboratoire.

b. Découpe et séchage du bois :

- Les troncs d'arbre sont par la suite découpés en madriers de petites dimensions pour accélérer l'opération de séchage. Le bois est gardé dans les locaux pour séchage naturel pendant une durée de plus d'un mois seulement pour cause de retard.



Figure 2.2 : Troncs d'arbre découpés au laboratoire.

c. Confection des pièces de lamellé de bois :

- Les madriers sont alors découpés en lamellés de 10mm d'épaisseur qui serviront à la fabrication des éprouvettes.



Figure 2.3 : Les lamellés de bois avec défauts.

- Les défauts sont éliminés par coupe.



Figure 2.4 : Les défauts éliminés.



Figure 2.5 : Les lamellés de bois sans défauts.

d. Usinage des entures :

- Sur les lamellés sont usinés des entures multiples.



Figure 2.6 : les entures multiples.

e. Encollage :

➤ Les éprouvettes sont enfin obtenues par encollage et serrage des pièces de lamellé de bois.



Figure 2.7 : Collage des éprouvettes.

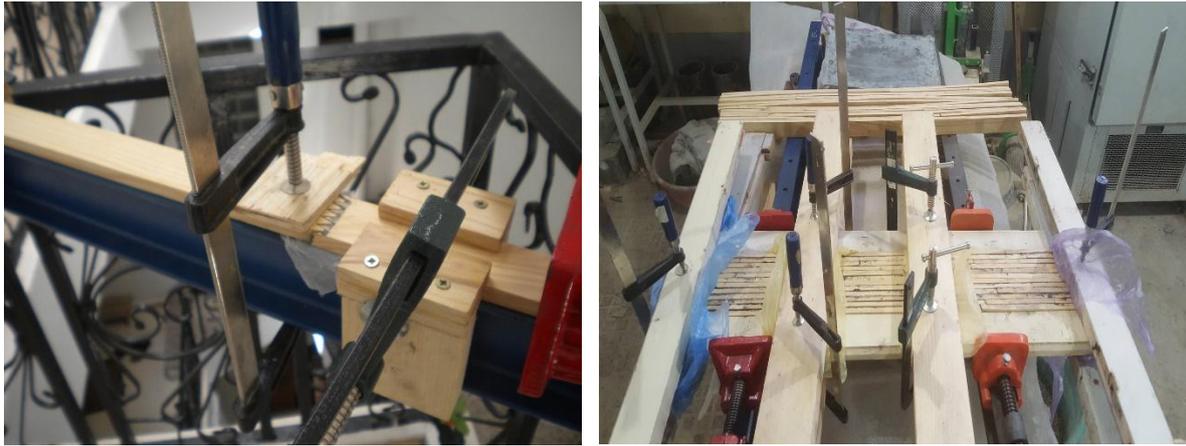


Figure 2.8 : Mise sous pression des éprouvettes.



Figure 2.9 : Eprouvettes brutes

- Les éprouvettes sont par la suite nettoyées et mises aux dimensions finales.



Figure 2.10 : Eprouvette finie.

❖ Colle utilisé : Par absence de colle industrielle pour le bois sur le marché algérien, On a fait une recherche sur la colle la plus appropriée. Finalement, on a utilisé la colle O.BASF MasterBrace ADH 2200 . Le MasterBrace ADH 2200 Pâte époxydique, de haute résistance pour travaux de collage d'éléments en béton et d'autres matériaux.



Figure 2.11: O.BASF MasterBrace ADH 2200.

2.2. CARACTÉRISATION PHYSIQUE

2.2.1. Densité :

La densité ou densité d'un corps ou densité relative d'un corps est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un corps pris comme référence.

La densité, notée d , s'exprime de la sorte :

$$d = \frac{\rho_{\text{corps}}}{\rho_{\text{eau}}}$$

où ρ_{corps} est la masse volumique du corps considéré, et ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau (1 000 kg/m³).

S'agissant d'un rapport entre deux mesures de même unité, la densité s'exprime par un ratio et donc n'a pas d'unité.

- Éprouvettes utilisées :

Pour la détermination de la densité anhydre de notre bois, on a utilisé au total 22 éprouvettes parallélépipédiques (voir figure2.12).



Figure 2.12: Epreuves pour la mesure de la densité et teneur en eau.

La mesure des dimensions des éprouvettes est effectuée en utilisant un pied à coulisse à 0.01 mm de précision (Figure 2.13).



Figure 2.13 : Pied à coulisse à 0.01 [mm] de précision.

Par la suite, toutes les éprouvettes sont pesées avec une balance de précision de 0.01g (Figure 2.14) avant et après la dessiccation.



Figure2.14 : Balance de précision de 0.01g

2.2.2. Mesure de taux d'humidité :

La mesure du taux d'humidité est effectuée sur les mêmes éprouvettes de la densité, en respectant les recommandations de la norme européenne EN 408:2010+A1:2012., qui définit les étapes à suivre.

a. Appareillage utilisé :

- Balance précise à 0.01 gramme (Figure 2.14).
- Etuve ventilée permettant de maintenir une température de 100°C. (Figure 2.15).



Figure 2.15: Etuve ventilée.

b. Eprouvettes :

On reprend les mêmes éprouvettes utilisées dans la détermination de la densité (Figure 2.12).

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 des éprouvettes après 24 heures de déshydratation à 100°C).

d. Mesure du taux d'humidité :

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

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{m_h - m_s}{m_h} * 100$$

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).

2.3. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE

2.3.1. Mode opératoire :

- L'éprouvette doit être chargée symétriquement en flexion en deux points, sur une portée égale à 18fois la hauteur comme représenté sur la figure 2.16.
- L'éprouvette doit être supportée sur des appuis simples.
 - NOTE 1 : Pour réduire les risques d'écrasement, on peut interposer entre l'éprouvette et les points de chargement ou les appuis, des petites plaques métalliques de longueur inférieure ou égale à la moitié de la hauteur.

- ❖ Pour la détermination de module d'élasticité en flexion statique, la norme exige de :
 - Une contrainte latérale doit être exercée pour éviter le déversement. Cette contrainte doit permettre la déformation de l'éprouvette sans friction significative.
 - La force doit être appliquée à vitesse constante. La vitesse de déplacement de la traverse ne doit pas dépasser 0,003 h mm/s (voir figure 2.16).
 - La force maximale appliquée ne doit pas dépasser la limite de proportionnalité et provoquer l'endommagement de l'éprouvette.

- ❖ Pour la détermination de la résistance à la flexion, la norme exige de :
 - Une contrainte latérale doit être exercée pour éviter le déversement. Cette contrainte doit permettre la déformation de l'éprouvette sans résistance de friction significative.
 - Le dispositif de chargement utilisé doit permettre de mesurer la force avec une précision de 1 % de la force appliquée à une éprouvette.
 - La force doit être appliquée à vitesse constante de déplacement de la traverse et telle que la force maximale soit atteinte en (300 ± 120) s.
 - NOTE 2 : Il convient que cette vitesse soit déterminée à partir des résultats d'essais préliminaires.
 - L'objectif est d'obtenir la valeur F_{max} pour chaque pièce essayée pour un temps de 300 s.

➤ Le temps à la rupture de chaque éprouvette doit être noté ainsi que la valeur moyenne. Les éprouvettes dont le temps à la rupture diffère de plus de 120 s de la valeur cible de 300 s doivent être notées.

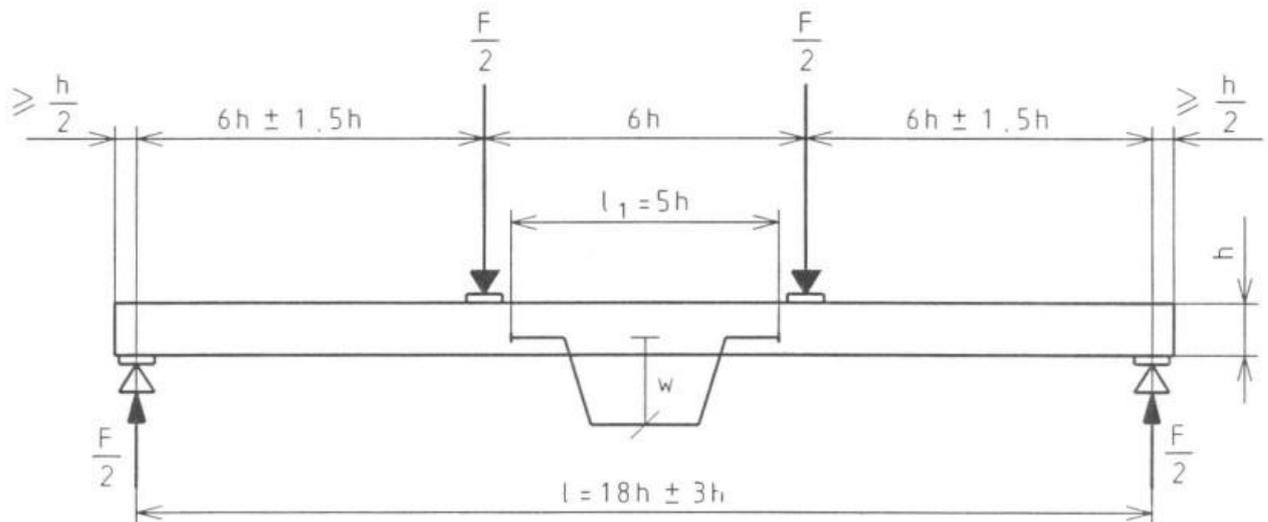


Figure 2.16 : Dispositif d'essai pour le mesurage du module d'élasticité en flexion.

2.3.2. Machine d'essais

La machine utilisée dans notre cas est un Bâti d'essais de flexion servo-hydraulique de marque Controls modèle : 50-C1201/BFR, de capacité 100 KN, avec cellule de charge et capteur de déplacement et une console de commande assistée par Ordinateur. Figure 2.17.



Figure 2.17: Machine d'essais.

2.3.3. Présentation des cas testés :

Les poutres testées ont toute une longueur de $L = 900$ mm, une section (transversale) droite rectiligne pour une largeur $b = 40$ mm et une hauteur $h = 60$ mm. Elles sont sollicitées en flexion quatre points. Deux types sont testés :

Le premier type : Poutres en bois de coffrage ("bois blanc" acheté dans le commerce), elles sont au nombre de quatre (04).



Figure 2.18 : Poutre en bois seulement.

Le deuxième type : Poutres en bois d'Alep lamellé-collé avec entures multiples sur chaque lamelle. Elles sont en nombre de quatre (04).



Figure 2.19 : Poutre lamellée collée.

2.3.4. Expression des résultats :

❖ Le module d'élasticité en flexion statique $E_{m,g}$, est donné par la formule :

$$E_{m,g} = \frac{\ell^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4\ell} \right) - \left(\frac{a}{\ell} \right)^3 \right]$$

Le module d'élasticité doit être calculé avec une précision de 1 %.

Où :

$E_{m,g}$: module d'élasticité en flexion, en newtons par millimètre carré.

$F_2 - F_1$: est un accroissement de force sur la partie linéaire de la courbe force/déplacement, en newtons, voir figure 2.16 ;

$w_2 - w_1$: est l'accroissement de déplacement correspondant à $F_2 - F_1$ en millimètres, voir figure 2.16 ;

a : distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche dans un essai de flexion, en millimètres ;

l_1 : longueur de base de mesure servant à la détermination du module d'élasticité, en millimètres ;

I : moment quadratique d'une aire, en millimètres à la puissance quatre.

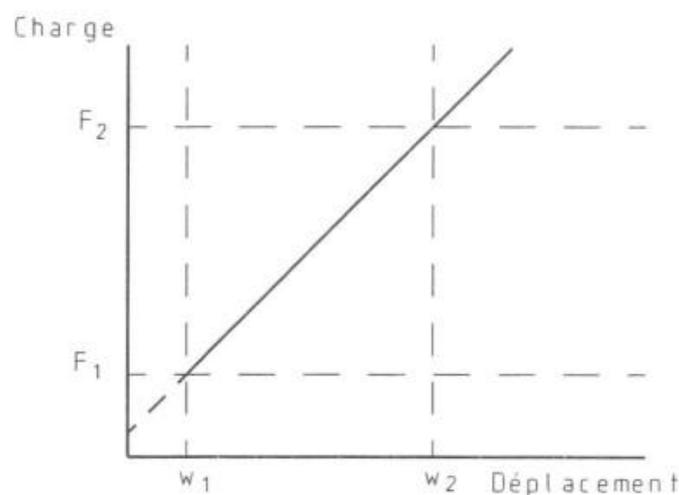


Figure 2.20 : Courbe force/déplacement indiquant la plage des déplacements élastiques.

❖ La résistance à la flexion f_m est donnée par la formule :

$$f_m = \frac{a F_{\max}}{2 W}$$

Où :

f_m : résistance à la flexion parallèle aux fibres, en newtons par millimètre carré.

a : distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche dans un essai de flexion, en millimètres.

F_{\max} : force maximale, en newtons.

W : module d'inertie ou de résistance de la section, en millimètres cubes.

2.3.5. Rapport d'essai

- Généralités : Le rapport d'essai doit contenir des indications détaillées sur les éprouvettes, les méthodes d'essai utilisées et les résultats d'essai.
- Éprouvettes : Les informations suivantes doivent être fournies :
 - a) les essences ;
 - b) les dimensions des éprouvettes. En plus pour le bois lamellé-collé, le type de colle, l'orientation et le nombre de lamelles ;
 - c) les pays, régions ou scieries ou fabriques d'origine du matériel échantillonné. En plus, pour le bois lamellé-collé, le nom de l'usine de production ;
 - d) la méthode de sélection des éprouvettes ;
 - e) la qualité ou tout autre critère de présélection ;
 - f) la méthode de conditionnement ;
 - g) tout autre facteur ayant pu influencer sur les résultats d'essai, par exemple le déroulement du séchage.
- Méthode d'essai : Les informations suivantes doivent être normalement fournies :
 - a) les méthodes d'essais utilisées ;
 - b) la température et l'humidité relative au moment de l'essai ;
 - c) l'appareillage utilisé ;

d) tout autre facteur pouvant influencer sur l'utilisation des résultats d'essai.

- Résultats d'essai

Les informations suivantes doivent normalement être fournies pour chaque éprouvette :

a) l'humidité au moment de l'essai ;

b) la masse volumique ;

c) les dimensions effectives ;

d) les modules et/ou les valeurs de résistance ;

e) le mode de rupture ;

f) le temps à la rupture et leur valeur moyenne ;

g) tout autre facteur pouvant influencer sur l'utilisation des résultats d'essais, par exemple les caractéristiques de croissance ou la machine de mesure indiquant le paramètre à la section de fracture.

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS**3.1. CARACTÉRISATION PHYSIQUE****3.1.1. Densité**

Nous ne présentons ici, qu'un récapitulatif des résultats (Tableau 3.1 et 3.2), l'ensemble est porté à la fin du mémoire sous Annexe2.

a) Densité humide :

Caractéristique	Nombre	Moyenne	Ecart type	Maximum	Minimum
Densité	22	0.71	0.05	0.79	0.65

Tableau 3.1: Récapitulatif des résultats de mesure de la densité humide.

b) Densité sèche :

Caractéristique	Nombre	Moyenne	Ecart type	Maximum	Minimum
Densité	22	0.57	0.04	0.64	0.51

Tableau 3.2: Récapitulatif des résultats de mesure de la densité sèche.

D'après les résultats trouvés (tableau 1.2), qui sont en concordance avec celles trouvés dans la littérature, le bois de pin d'Alep en notre possession peut être classé comme "bois mi-lourd".

3.1.2. Le taux d'humidité :

Nous ne présentons ici, qu'un récapitulatif des résultats (Tableau 3.3), l'ensemble est porté à la fin du mémoire sous Annexe2.

Caractéristique	Nombre	Moyenne	Ecart type	Maximum	Minimum
Taux d'humidité	22	20.56%	1.19%	24.29%	18.82%

Tableau 3.3: Récapitulatif des résultats de mesure du taux d'humidité.

D'après les résultats trouvés (tableau 1.1), notre bois est classé comme "commercialement sec".

3.2. CARACTÉRISATION MECANIQUE

Après avoir exécuté les tests des cas étudiés, nous extrayons les résultats. Ces résultats sont classés comme suit :

- ❖ Le module de YOUNG.
- ❖ La résistance en flexion.

3.2.1. Module de YOUNG :

Afin de rester dans le domaine élastique comme le recommande la norme, et après des essais préliminaires, la charge maximale est fixée ici à 3 kN. Nous ne présentons ici, qu'un récapitulatif des résultats (tableau 3.4), l'ensemble est porté à la fin du mémoire sous Annexe 2. On trouve les valeurs numériques du module de YOUNG des deux types de poutres :

Type de poutre	Nombre de poutre	« E » moyenne des poutres (MPa)	Ecart type (MPa)
Type 01 (Bois de coffrage)	4	11875,6	151,1
Type 02 (Lamellé collé)	4	10794,2	758,0

Tableau 3.4 : Récapitulatif des résultats de calcul de module de YOUNG.

On observe que la valeur moyenne du module de YOUNG [type 1] du bois blanc (11875.6MPa) est légèrement plus forte comparée à celles trouvées dans [type 2] du lamellé collé (10794.2 MPa) ce qui laisse croire que les poutres en bois lamellé-collé sont moins rigide.

L'écart type des deux types présente une différence significative ($151.1 \ll 758.0$ Mpa). Cela peut être expliqué par le fait que la 3ème poutre du bois lamellé-collé n'a pas été bien collé parce que on n'a pas serré les lamellées comme il faut ou la quantité de la colle était inférieure comparée aux autres essais (erreur commise lors du collage des poutres) ce qui a donné une faible valeur de E pour cette poutre.

Les figures 3.1 et 3.2 montrent des exemples de courbes charge-déplacement obtenues lors des essais.

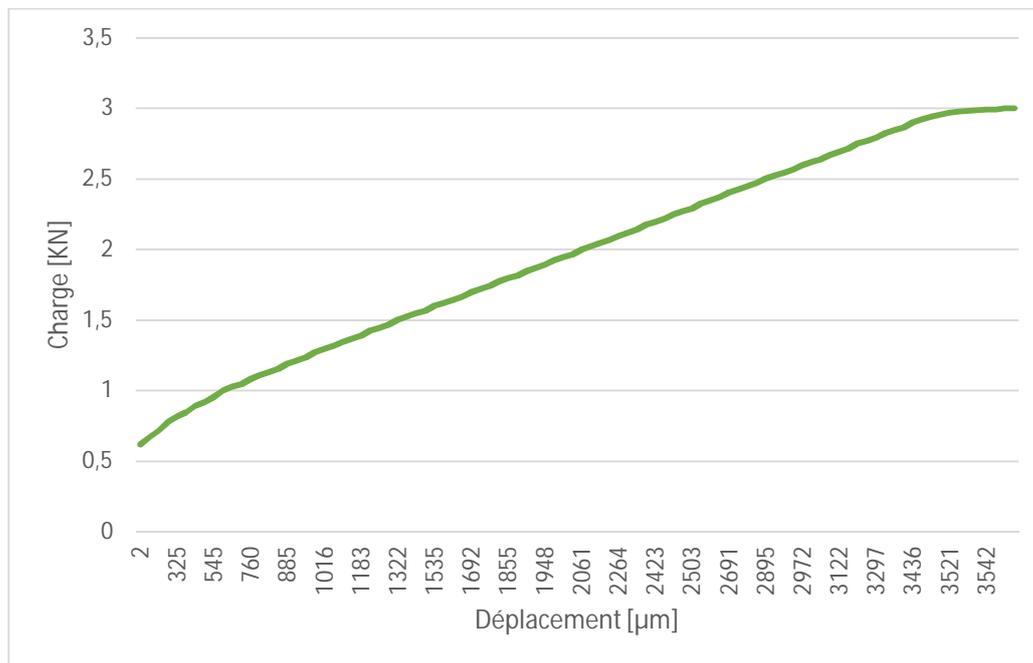


Figure 3.1 : Exemple de courbe charge-déplacement (poutre de type 01)

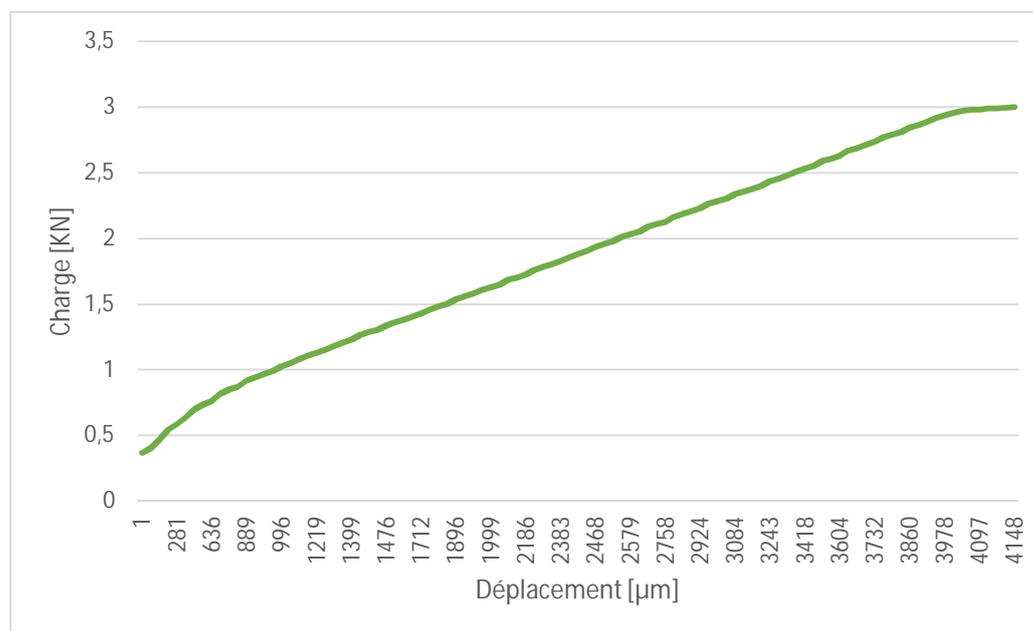


Figure 3.2 : Exemple de courbe charge-déplacement (poutre type 02)

Dans les deux courbes on constate une proportionnalité entre la charge et le déplacement.

3.2.2. La résistance en flexion :

Pour chaque poutre et après avoir mené les essais de mesure du module de Young, On procède à l'essai de détermination de la résistance en flexion. L'éprouvette est sollicité jusqu'à rupture. Nous ne présentons ici un récapitulatif des résultats (tableau 3.6), l'ensemble est porté à la fin du mémoire sous Annexe 2. On trouve les valeurs numériques de la résistance en flexion des deux types :

Type de poutre	Nombre de poutre	Moyenne des poutres (MPa)	Ecart type (MPa)
Type 01 (Bois de coffrage)	4	63,9	4,3
Type 02 (Lamellé collé)	3	72,9	5,1

Tableau 3.5 : Récapitulatif des résultats de calcul de résistance en flexion.

On remarque que les valeurs de la résistance en flexion du bois blanc sont plus petites que celles du bois lamellé-collé ($63.9 < 72.9 \text{ Mpa}$).

Les écart type pour les deux types sont comparables (4.3 MPa et 5,1MPa).

NB : la valeur moyenne de la résistance des poutres du lamellé collé est obtenue pour seulement 3 poutres, parce que le 4ème essai n'a pas pu être enregistré.

Les figures 3.1 et 3.2 montrent des exemples de courbes charge-déplacement obtenues lors des essais.

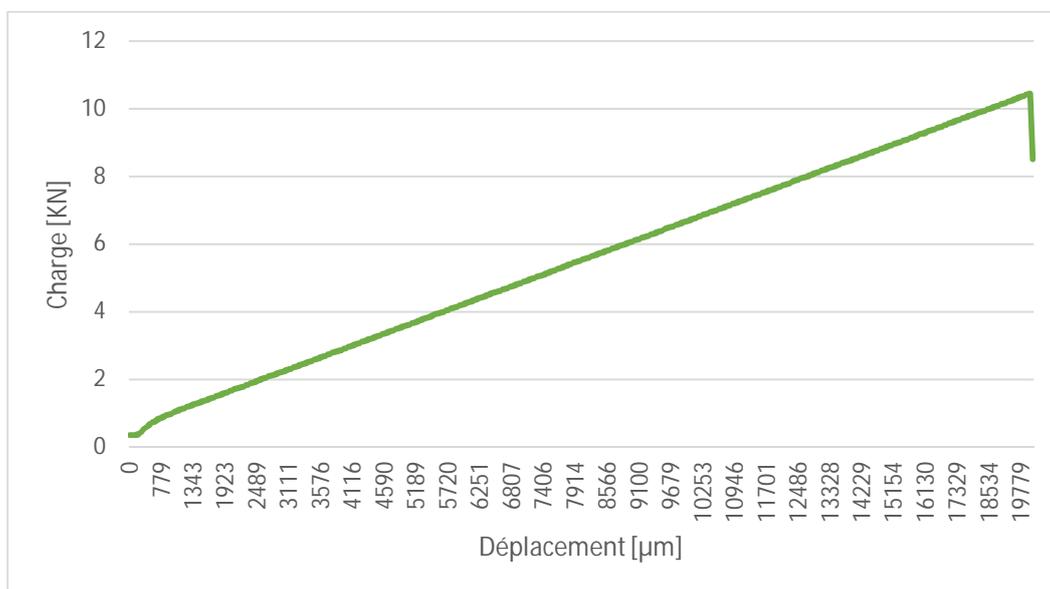


Figure 3.3 : Exemple de courbe charge-déplacement (poutre type 01).

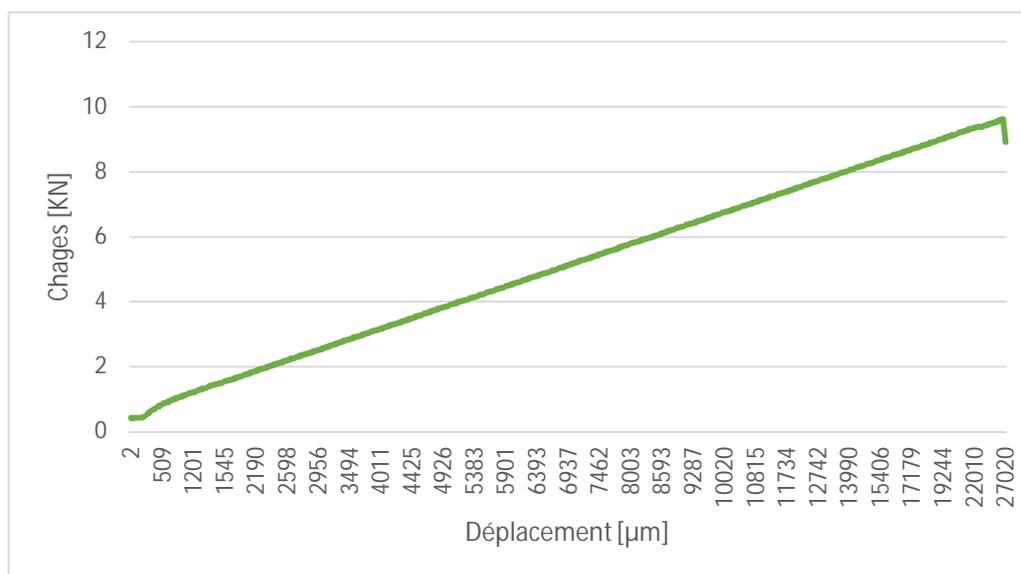


Figure 3.4 : Exemple de courbe charge-déplacement (poutre type 02).

Le figures 3.3 et 3.4 montrent deux exemples de courbe charge-déplacement obtenues. Dans les 2 courbes on constate une zone étendue de proportionnalité entre la charge et le déplacement avant rupture, qui intervient brusquement ce qui indique que le matériau est fragile.

3.2.3. Mode de rupture :

Les ruptures de toute les poutres sont quasi-fragiles. Les modes de ruptures observés sont de natures différentes. Pour les poutres de bois de coffrage, les ruptures sont les mêmes, elles surviennent dans la zone tendue généralement au niveau des nœuds. Pour les poutres en bois de pin d'Alep lamellé-collé, on observe plusieurs types ; des ruptures le long de la troisième poutre (sens longitudinal), des ruptures transversales sur une ou deux lamelles de la quatrième poutre et aussi deux poutres qui sont cassées complètement en deux et même trois morceaux.



Figure 3.5 : les ruptures sur les poutres de bois de coffrage.



Figure 3.6 : Mode de rupture de 2^{ème} et 3^{ème} poutre de bois de coffrage.



Figure 3.7 : Les ruptures sur les poutres lamellée-collées.



Figure 3.8 : mode de rupture de la troisième poutre.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce projet était l'occasion idéale pour nous d'exploiter les connaissances acquises durant nos cinq ans de formation à l'université et plus particulièrement ces deux dernières années de Master.

Le but principal de ce mémoire est d'étudier expérimentalement la flexion de poutres de bois de pin d'Alep (local), abouté et lamellé collé et de comparer les résultats avec ceux du bois de coffrage trouvé dans le commerce (importé).

La présente étude nous a permis dans un premier temps de connaître un nouveau matériau de construction (le bois), ses avantages surtout environnementaux et ses inconvénients ainsi que les différentes techniques de transformation et d'obtention de bois d'engineering. Dans un deuxième temps les résultats obtenus lors de cette étude expérimentale nous ont permis de conclure que la technique d'aboutage et de lamellé-collé permet d'obtenir à partir d'un bois local, un produit techniquement comparable avec les produits importés.

Il est difficile et parfois frustrant, pour un étudiant en master, de s'apercevoir que dans un projet réel, il n'est pas simple de mettre en adéquation les aspects techniques esthétiques et financiers, ce dernier représente bien souvent l'enjeu majeur d'une opération d'élaboration de nouveau produit. Malheureusement, et pour faute de temps, seul l'aspect technique a été étudié dans ce projet de fin d'étude, on espère que le côté financier soit traité dans des études futures afin de conclure de la faisabilité de ce nouveau produit.

Enfin, nous souhaitons que ce modeste travail nous soit bénéfique dans notre vie professionnelle.

Bibliographie :

- YVES BENOIT., BERNARD LEGRAND., VINCENT TASTET : Eurocode 5 et document d'application nationale - "Calcul des structures en bois"- Sous-titre : Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments.
- ERNEST CHEVALLEY., LE BOIS : PANNEAUX ET MATERIAUX – technologie à l'usage des métiers du bois. EDITION DELTA & SPES.
- LUDWIG STEIGER., BASICS : CONSTRUIRE EN BOIS. BIRKHAUSER.
- HADRI K., OULEDIEF W., COMPORTEMENT EN FLEXION D'UNE POUTRE EN BOIS ABOUTÉ, mémoire de master, Université 08 mai 1945, Guelma,2015.
- NF EN 408 Mai 1995 BOIS MASSIF ET LAMELLE COLLE
- DJOUAIBIA F., AMROUN A., DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE JOINTS COLLES DU BOIS DE PIN D'ALEP, mémoire de master, Université 08 mai 1945, Guelma 2017.
- HALOUI R., DOUAKHA K., Détermination expérimentale de la résistance au vieillissement de joints collés du bois de pin d'Alep, mémoire de master, Université 08 mai 1945, Guelma 2018.

Webographie :

- Anatomie du bois (15/02/2019) : <https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/partie2/bois.pdf>
- Retrait du bois (15/02/2019) : https://fr.wikipedia.org/wiki/Retrait_du_bois
- Défauts de bois (18/02/2019) : <http://lapins.menuisier.free.fr/Stage%204/Cours%20/Connaitre%20les%20defauts%20du%20bois.pdf>
- Systèmes constructifs du bois (18/02/2019) : <https://www.spinellibois.fr/construction-bois/differents-systemes-constructifs-bois/>
- Panneaux dérivés du bois (18/02/2019) : <https://www.mery-bois.com>
- Historique de lamellé collé (25/02/2019) : <http://www.glulam.org/>
- Fabrication du lamellé collé (25/02/2019) : https://www.boisencolle.info/bois-lamelle-colle/fabrication/mn_43528
- Les caractéristiques du bois lamellé collé (25/02/2019) : https://fr.wikipedia.org/wiki/Bois_lamell%C3%A9-coll%C3%A9
- Les avantages du bois lamellé collé (27/02/2019) : <http://www.bois.com/construire/bois-matériau/bois-lamelle>
- ISO (03/03/2019) : <https://www.iso.org/fr/standard/13413.html?browse=tc>
- AFNOR (04/03/2019) : <https://www.iso.org/fr/member/1738.html>

ANNEXE 1

CEN/TC 124

Date: 2000-11

prEN 408

CEN/TC 124

Secretariat: DS

Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties

**Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer
Eigenschaften**

**Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé collé – Détermination de certaines propriétés
physiques et mécaniques**

ICS : 91.080.20

Descriptors : Timber construction, sawn timber, laminated board, determination, physical properties, mechanical properties, laboratory tests

Document type :
Document subtype :
Document stage : CEN Enquiry
Document language : **E**

D:\Dokumente\CEN TC 124\Standards\Standards - voluntary - in production\prEN 408\CEN 124 Editing\N 398 rev
1 prEN 408 (E).doc CEN BASIC VERSION 1.3

prEN 408

Foreword

This document has been prepared by CEN/TC 124, "Structural timber".

This document is currently submitted to the CEN Enquiry.

This document replaces EN 408:1995

Contents

Foreword	2
Introduction	6
1 Scope	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	7
4 Symbols and abbreviations	7
5 Determination of dimensions of test pieces	8
6 Determination of moisture content of test pieces	8
7 Determination of density of test pieces	8
8 Conditioning of test pieces	8
9 Determination of local modulus of elasticity in bending	9
9.1 Test piece.....	9
9.2 Procedure.....	9
9.3 Expression of results.....	10
10 Determination of global modulus of elasticity in bending	11
10.1 Test piece.....	11
10.2 Procedure.....	11
10.3 Expression of results.....	12
11 Determination of shear modulus — Single span method	12
11.1 General.....	12
11.2 Determination of modulus of elasticity in bending.....	12
11.3 Determination of apparent modulus of elasticity.....	12
11.3.1 Test piece.....	12
11.3.2 Procedure.....	12
11.3.3 Expression of results.....	13
11.4 Calculation of shear modulus.....	14
12 Determination of shear modulus — Variable span method	14
12.1 General.....	14
12.2 Test piece.....	14
12.3 Procedure.....	14
12.4 Expression of results.....	15
12.4.1 General.....	15
12.4.2 Apparent modulus of elasticity.....	15
12.4.3 Shear modulus.....	15
13 Determination of bending strength	16
13.1 Test piece.....	16
13.2 Procedure.....	16
13.3 Expression of results.....	17
14 Determination of modulus of elasticity in tension parallel to the grain	17
14.1 Test piece.....	17
14.2 Procedure.....	17
14.3 Expression of results.....	17
15 Determination of tension strength parallel to the grain	18
15.1 Test piece.....	18
15.2 Procedure.....	18
15.3 Expression of results.....	18
16 Determination of modulus of elasticity in compression parallel to the grain	18

16.1	Test piece	18
16.2	Procedure	18
16.3	Expression of results	19
17	Determination of compression strength parallel to grain	19
17.1	Test piece	19
17.2	Procedure	19
17.3	Expression of results	20
18	Determination of tension and compression strengths perpendicular to the grain	20
18.1	Requirements for test pieces	20
18.1.1	Fabrication	20
18.1.2	Surface preparation	20
18.2	Procedure	21
18.3	Expression of results	22
18.3.1	Compression perpendicular to the grain.....	22
18.3.2	Tension perpendicular to the grain	23
19	Determination of modulus of elasticity perpendicular to the grain	23
19.1	Requirements for test pieces	23
19.2	Procedure	23
19.3	Expression of results	23
19.3.1	Compression perpendicular to the grain.....	23
19.3.2	Tension perpendicular to the grain	24
20	Determination of shear strength parallel to the grain.....	25
20.1	Requirements for test pieces	25
20.1.1	Fabrication	25
20.1.2	Surface preparation	25
20.2	Procedure	26
20.3	Expression of results	26
21	Test report.....	27
21.1	General	27
21.2	Test piece	27
21.3	Test method	27
21.4	Test results	27
Annex A	(informative) Example of compression perpendicular to grain test arrangement.....	28
Annex B	(informative) Example of tension perpendicular to grain test arrangement with rigid fixings.....	30
Annex C	(informative) Bibliography	31

Introduction

This revised edition adds a global bending modulus of elasticity, whilst renaming the existing test as the local modulus of elasticity. It also includes the methods for determination of shear strength and mechanical properties perpendicular to the grain, previously given in EN 1193 which has now been withdrawn

The values obtained in any determination of the properties of timber depend upon the test methods used. It is therefore desirable that these methods be standardized so that results from different test centres can be correlated. Moreover, with the adoption of limit state design and with the development of both visual and machine stress grading, attention will be increasingly centred on the determination and monitoring of the strength properties and variability of timber in structural sizes. Again, this can be more effectively undertaken if the basic data are defined and obtained under the same conditions.

This European Standard, which is based on ISO 8375, specifies laboratory methods for the determination of some physical and mechanical properties of timber in structural sizes. The methods are not intended for the grading of timber or for quality control.

For the determination of shear modulus, alternative methods have been specified. The choice of which to use will depend upon the objective of the investigation and, to some extent, on the equipment available. It is recognized that the methods may not give the same results.

Following testing to this standard it is intended that the determination of characteristic values will normally be obtained according to procedures specified in other European Standards.

Attention is drawn to the advantages that may be gained, often with little extra effort, in extending the usefulness of test results by recording additional information on the growth characteristics of the pieces that are tested, particularly at the fracture sections. Generally, such additional information should include grade-determining features such as knots, slope of grain, rate of growth, wane, etc., on which visual grading rules are based, and strength indicating parameters such as localized modulus of elasticity, on which some machine stress grading is based.

1 Scope

This standard specifies test methods for determining the following properties of structural timber and glued laminated timber: modulus of elasticity in bending; shear modulus; bending strength; modulus of elasticity in tension parallel to the grain; tension strength parallel to the grain; modulus of elasticity in compression parallel to the grain; compression strength parallel to the grain; modulus of elasticity in tension perpendicular to the grain; tension strength perpendicular to the grain; modulus of elasticity in compression perpendicular to the grain; compression strength perpendicular to the grain and shear strength.

In addition, the determination of dimensions, moisture content, and density of test pieces are specified.

The methods apply to rectangular and circular shapes (of substantially constant cross section) of solid unjointed timber or finger-jointed timber and glued laminated timber.

2 Normative references

This incorporates by dated or undated reference, provisions from other publications. These normative references are cited at the appropriate places in the text and the publications are listed hereafter. For dated references, subsequent amendments to or revisions of any of these publications apply to this only when incorporated in it by amendment or revision. For undated references the latest edition of the publication referred to applies.

prEN 13818-1

Round and sawn timber – Method of measurement moisture content - Method for determining the moisture content of a piece of sawn timber (oven dry method).

3 Terms and definitions

None.

4 Symbols and abbreviations

A	cross-sectional area, in square millimetres;
a	distance between a loading position and the nearest support in a bending test, in millimetres;
b	width of cross section in a bending test, or the smaller dimension of the cross section, in millimetres;
$E_{c,0}$	modulus of elasticity in compression parallel to the grain, in newtons per square millimetre;
$E_{c,90}$	modulus of elasticity in compression perpendicular to the grain, in newtons per square millimetre;
$E_{m,g}$	global modulus of elasticity in bending, in newtons per square millimetre;
$E_{m,l}$	local modulus of elasticity in bending, in newtons per square millimetre;
$E_{m,app}$	apparent modulus of elasticity in bending, in newtons per square millimetre;
$E_{t,0}$	modulus of elasticity in tension parallel to the grain, in newtons per square millimetre;
$E_{t,90}$	modulus of elasticity in tension perpendicular to the grain, in newtons per square millimetre;
F	load, in newtons;
$F_{c,90}$	compressive load perpendicular to the grain, in newtons;
$F_{c,90,max}$	maximum compressive load perpendicular to the grain, in newtons;
$F_{c,90,max,est}$	estimated maximum compressive load perpendicular to the grain, in newtons;
F_{max}	maximum load, in newtons;
$F_{max,est}$	estimated maximum load, in newtons;
$F_{t,90}$	tensile load perpendicular to the grain, in newtons;
$F_{t,90,max}$	maximum tensile load perpendicular to the grain, in newtons;
$f_{c,0}$	compressive strength parallel to the grain, in newtons per square millimetre;
$f_{c,90}$	compressive strength perpendicular to the grain, in newtons per square millimetre;
f_m	bending strength, in newtons per square millimetre;
$f_{t,0}$	tensile strength parallel to the grain, in newtons per square millimetre;
$f_{t,90}$	tensile strength perpendicular to the grain, in newtons per square millimetre;
f_v	shear strength parallel to the grain, in newtons per square millimetre;
G	shear modulus, in newtons per square millimetre;
h	depth of cross section in a bending test, or the larger dimension of the cross section, or the test piece height in perpendicular to grain tests, in millimetres;
h_0	gauge length, in millimetres;

prEN 408

I	second moment of area, in millimetres to the fourth power;
K, k	coefficients;
k_G	coefficient for shear modulus;
l	span in bending, or length of test piece between the testing machine grips in compression and tension, in millimetres;
l_1	gauge length for the determination of modulus of elasticity, in millimetres;
T	plate thickness, in millimetres;
W	section modulus, in millimetres to the third power;
w	deformation, in millimetres;

Suffixes

1, 2 refer to loads or deformations at particular points of a test and are referred to as necessary in the text.

5 Determination of dimensions of test pieces

The dimensions of the test piece shall be measured to an accuracy of 1%. All measurements shall be made when the test pieces are conditioned as specified in clause 8. If the width or thickness varies within a test piece, these dimensions should be recorded as the average of three separate measurements taken at different positions on the length of each piece.

The measurements shall not be taken closer than 150 mm to the ends.

Specimens for perpendicular to grain tests shall be planed.

6 Determination of moisture content of test pieces

The moisture content of the test piece shall be determined in accordance with prEN 13181-1 on a section taken from the test piece. For structural timber the section shall be of full cross section, free from knots and resin pockets. For perpendicular to grain test specimens the moisture content shall be determined from the whole specimen.

In strength tests for bending and tension parallel to grain and compression parallel to grain, the section shall be cut as close as possible to the fracture.

7 Determination of density of test pieces

The density of the whole cross section of the test piece shall be determined on a section taken from the test piece. For structural timber the section shall be of full cross section, free from knots and resin pockets.

In strength tests, the section shall be cut as close as possible to the fracture.

For perpendicular to grain test specimens the density of the test pieces shall be determined prior to test after conditioning from the measurements of mass and volume of the whole test piece.

8 Conditioning of test pieces

The tests shall be carried out on pieces which are conditioned at the standard environment of $(20 \pm 2)^\circ \text{C}$ and $(65 \pm 5)\%$ relative humidity. A test piece is conditioned when it attains constant mass. Constant mass is considered to be attained when the results of two successive weighings, carried out at an interval of 6 h, do not differ by more than 0,1% of the mass of the test piece.

Where the timber to be tested is not readily conditionable to the above standard environment (e.g. for hardwoods with high densities), that fact shall be reported.

For small specimens, unless otherwise protected, test pieces shall not be removed from the conditioning environment more than 1 h before testing.

NOTE. Test pieces can be stored in the test area for up to 24 h provided they are close piled and wrapped in vapour tight sheeting.

9 Determination of local modulus of elasticity in bending

9.1 Test piece

The test piece shall have a minimum length of 19 times the depth of the section. Where this is not possible, the span of the beam shall be reported.

9.2 Procedure

The test piece shall be symmetrically loaded in bending at two points over a span of 18 times the depth as shown in figure 1. If the test piece and equipment do not permit these conditions to be achieved exactly, the distance between the load points and the supports may be changed by an amount not greater than 1,5 times the piece depth, and the span and test piece length may be changed by an amount not greater than three times the piece depth, while maintaining the symmetry of the test.

The test piece shall be simply supported.

NOTE. Small steel plates of length not greater than one-half of the depth of the test piece may be inserted between the piece and the loading heads or supports to minimize local indentation.

Lateral restraint shall be provided as necessary to prevent buckling. This restraint shall permit the piece to deflect without significant frictional resistance.

Load shall be applied at a constant rate. The rate of movement of the loading head shall be not greater than 0,003h mm/s (see figure 1).

The maximum load applied shall not exceed the 0,4 F_{max} .

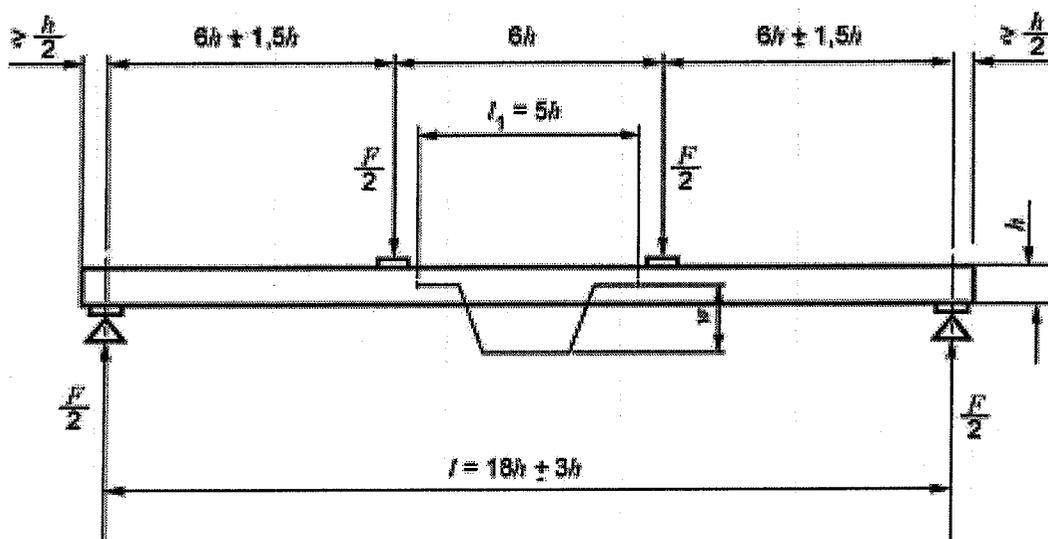


Figure 1. Test arrangement for measuring local modulus of elasticity in bending

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1% of the load applied to the test piece or, for loads less than 10% of the applied maximum load, with an accuracy of 0,1% of the maximum applied load.

The deformation w shall be taken as the average of measurements on both faces at the neutral axis, and shall be measured at the centre of a central gauge length of five times the depth of the section.

The measuring equipment used shall be capable of measuring deformation to an accuracy of 1% or, for deformations less than 2mm, with an accuracy of 0,02mm.

9.3 Expression of results

The mean fracture load (F_{max}) of the material under test shall be obtained either from tests on a least 10 pieces of the appropriate species, size and grade or from appropriate existing data.

Using data obtained from the local modulus of elasticity test, plot the load/deformation graph.

Use that section of the graph between $0.1F_{max}$ and $0.4 F_{max}$ for a regression analysis.

Find the longest portion of this section that gives a correlation coefficient of 0.99 or better. Provided that this portion covers at least the range $0.2F_{max}$ to $0.3F_{max}$, calculate the local modulus of elasticity from the following expression:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)}$$

where

$F_2 - F_1$ is an increment of load in newtons on the regression line with a correlation coefficient of 0.99 or better and

$w_2 - w_1$ is the increment of deformation in millimetres corresponding to $F_2 - F_1$ (see figure 2).

The local modulus of elasticity shall be calculated to an accuracy of 1%.

If a portion of the graph cannot be found with a correlation coefficient of 0.99 or better covering the range $0.2F_{max}$ to $0.3 F_{max}$, check the test equipment and take measures to eradicate any errors caused by distorted specimens. If 0.99 is still not achieved, discard the specimen.

The modulus of elasticity shall be calculated to an accuracy of 1%.

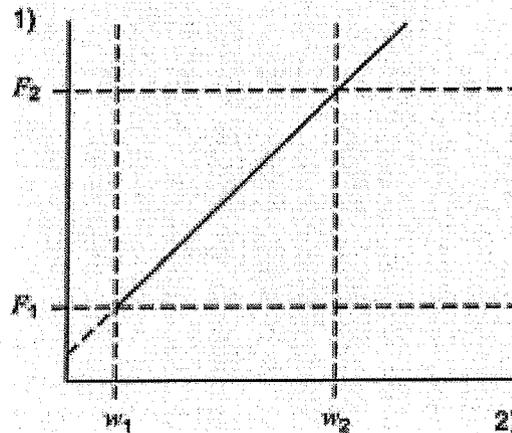


Figure 2. Load-deformation graph within the range of elastic deformation

- 1) Load
- 2) Deformation

10 Determination of global modulus of elasticity in bending

10.1 Test piece

The test piece shall have a minimum length of 19 times the depth of the section. Where this is not possible, the span of the beam shall be reported.

10.2 Procedure

The test piece shall be symmetrically loaded in bending at two points over a span of 18 times the depth as shown in figure 3. If the test piece and equipment do not permit these conditions to be achieved exactly, the distance between the load points and the supports may be changed by an amount not greater than 1,5 times the piece depth, and the span and test piece length may be changed by an amount not greater than three times the piece depth, while maintaining the symmetry of the test.

The test piece shall be simply supported.

NOTE. Small steel plates of length not greater than one-half of the depth of the test piece may be inserted between the piece and the loading heads or supports to minimize local indentation.

Lateral restraint shall be provided as necessary to prevent buckling. This restraint shall permit the piece to deflect without significant frictional resistance.

Load shall be applied at a constant rate. The rate of movement of the loading head shall be not greater than 0,003h mm/s (see figure 3).

The maximum load applied shall not exceed $0,4 F_{max}$ or cause damage to the piece.

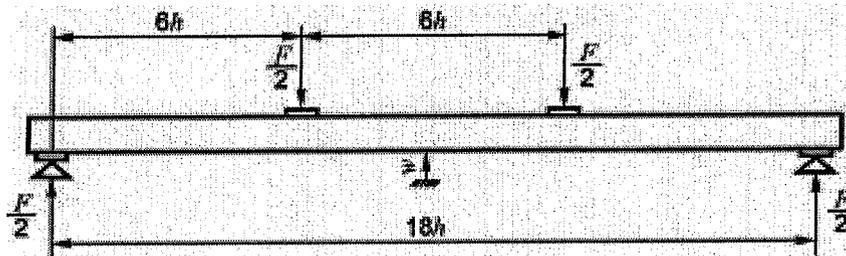


Figure 3. Test arrangement for measuring global modulus of elasticity in bending

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1% of the load applied to the test piece or, for loads less than 10% of the applied maximum load, with an accuracy of 0,1% of the maximum applied load.

The deformation w shall be measured at the centre of the span and at the centre of the tension or compression edge. When w is measured at the neutral axis it shall be the mean of measurements made on both sides of the test piece.

Deformations shall be determined with an accuracy of 1% or, for deformations less than 2mm, with an accuracy of 0,02mm.

NOTE. If the test configuration differs from the above in any way then these differences must be recorded and adjustment factors must be determined.

NOTE. The deformation w includes any local indentations that might occur at the supports and loading points.

10.3 Expression of results

The global modulus of elasticity in bending $E_{m,g} = \frac{\ell^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4\ell} \right) - \left(\frac{a}{\ell} \right)^3 \right]$

where

$F_2 - F_1$ is an increment of load on the straight-line portion of the load deformation curve, in newtons (see figure 2);

$w_2 - w_1$ is the increment of deformation corresponding to $F_2 - F_1$, in millimetres (see figure 2).

The other symbols are as given in clause 4.

If $E_{m,g}$ is calculated from a load/deflection linear regression the square of the correlation coefficient should be greater than 0.99.

The modulus of elasticity shall be calculated to an accuracy of 1%.

11 Determination of shear modulus — Single span method

NOTE. Measurement of the shear modulus of structural timber and glued laminated timber presents considerable difficulty but values suitable for use in design can be obtained by either one of the methods described in clauses 11 and 12.

11.1 General

This method involves the determination of the local modulus of elasticity in bending $E_{m,\ell}$ and the apparent modulus of elasticity $E_{m,app}$ for the same length of test piece.

11.2 Determination of modulus of elasticity in bending

The local modulus of elasticity in bending shall be determined in accordance with clause 9.

11.3 Determination of apparent modulus of elasticity

11.3.1 Test piece

The test piece shall be that used for the determination of the local modulus of elasticity in bending, see 11.2.

11.3.2 Procedure

The test piece shall be loaded in centre point bending over a span equal to the gauge length used in 11.2 and including the same test length, as shown in figure 4 (see also figure 1). In this case $\ell = \ell_1$

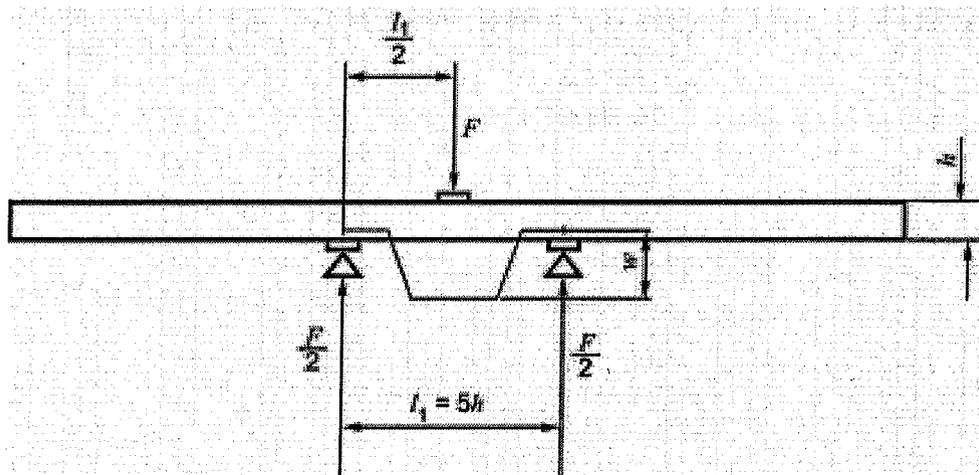


Figure 4. Test arrangement for measuring apparent modulus of elasticity

The test piece shall be simply supported.

NOTE. Small steel plates of length not greater than one-half of the depth of the test piece may be inserted between the piece and the loading heads or supports to minimize local indentation.

Lateral restraint shall be provided as necessary to prevent buckling. This restraint shall permit the piece to deflect without significant frictional resistance.

Load shall be applied at a constant rate. The rate of movement of the loading head shall be not greater than 0,0002hmm/s.

The maximum load applied shall not exceed the proportional limit or cause damage to the piece.

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1% of the load applied to the test piece or, for loads less than 10% of the maximum applied load, with an accuracy of 0,1% of the maximum applied load.

Deformations shall be measured at the centre of the span.

Deformations shall be determined with an accuracy of 1% or, for deformations less than 2mm, with an accuracy of 0,02mm.

11.3.3 Expression of results

The apparent modulus of elasticity $E_{m,app}$ is given by the equation

$$E_{m,app} = \frac{\ell_1^3 (F_2 - F_1)}{48I(w_2 - w_1)}$$

where

$F_2 - F_1$ is an increment of load on the straight line portion of the load deformation curve, in newtons (see figure 2);

$w_2 - w_1$ is the increment of deformation corresponding to $F_2 - F_1$, in millimetres (see figure 2).

The other symbols are as given in clause 4.

prEN 408

If $E_{m,app}$ is calculated from a load/deflection linear regression the square of the correlation coefficient should be greater than 0.99

The apparent modulus of elasticity shall be calculated to an accuracy of 1%.

11.4 Calculation of shear modulus

The shear modulus G is given by the equation

$$G = \frac{k_G h^2}{\ell_1^2 \left[\frac{1}{E_{m,app}} - \frac{1}{E_{m,\ell}} \right]}$$

where

$k_G = 1,2$ for rectangular or square cross sections.

The other symbols are as given in clause 4.

The shear modulus shall be calculated to an accuracy of 1%.

12 Determination of shear modulus — Variable span method

12.1 General

This method involves the determination of the apparent modulus of elasticity $E_{m,app}$ for each test piece over a number of spans with the same cross section at the centre.

12.2 Test piece

The test piece shall have a minimum length of 21 times the depth of the section.

12.3 Procedure

The test piece shall be loaded in centre point bending over at least four different spans with the same cross section at the centre of each. The spans shall be chosen so as to have approximately equal increments of $\left(\frac{h}{\ell}\right)^2$ between them, within the range 0,0025 to 0,035.

The test piece shall be simply supported.

NOTE. Small steel plates of length not greater than one-half of the depth of the test piece may be inserted between the piece and the loading heads or supports to minimize local indentation.

Lateral restraint shall be provided as necessary to prevent buckling. This restraint shall permit the piece to deflect without significant frictional resistance.

Load shall be applied at a constant rate. The rate of movement of the loading head shall be not greater than $5 \times 10^{-5} \ell^2 / 6h$ mm/s

The symbols are as given in clause 4.

The maximum load applied shall not exceed the proportional limit load or cause damage to the piece.

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1% of the load applied to the test piece or, for loads less than 10% of the applied maximum load, with an accuracy of 0,1% of the maximum applied load.

Deformations shall be measured at the centre of the spans.

Deformation shall be determined with an accuracy of 1% or, for deformations less than 2mm, with an accuracy of 0,02mm.

12.4 Expression of results

12.4.1 General

The apparent modulus of elasticity and shear modulus for each piece and each test span shall be calculated as described in 12.4.2 and 12.4.3 respectively.

12.4.2 Apparent modulus of elasticity

The apparent modulus of elasticity $E_{m,app}$ is given by the equation

$$E_{m,app} = \frac{\ell_1^3 (F_2 - F_1)}{48I(w_2 - w_1)}$$

where

$F_2 - F_1$ is an increment of load on the straight line portion of the load deformation curve, in newtons (see figure 2);

$w_2 - w_1$ is the increment of deformation corresponding to $F_2 - F_1$, in millimetres (see figure 2).

The other symbols are as given in clause 4.

If $E_{m,app}$ is calculated from a load/deflection linear regression the square of the correlation coefficient should be greater than 0.99

For each piece, the values of $1/E_{m,app}$ shall be plotted against $\left(\frac{h}{\ell}\right)^2$ as shown in figure 5 and the slope K_1 of the best straight line through the points shall be determined.

NOTE. A value for the modulus of elasticity E_m is given by $1/K_2$, where K_2 is the intercept of the line at zero $\left(\frac{h}{\ell}\right)^2$.

12.4.3 Shear modulus

The shear modulus G is given by the equation $G = k_G / K_1$

where

$k_G=1,2$ for rectangular or square cross sections, and K_1 is the slope of the straight line (see figure 5).

The shear modulus shall be calculated to an accuracy of 1%.

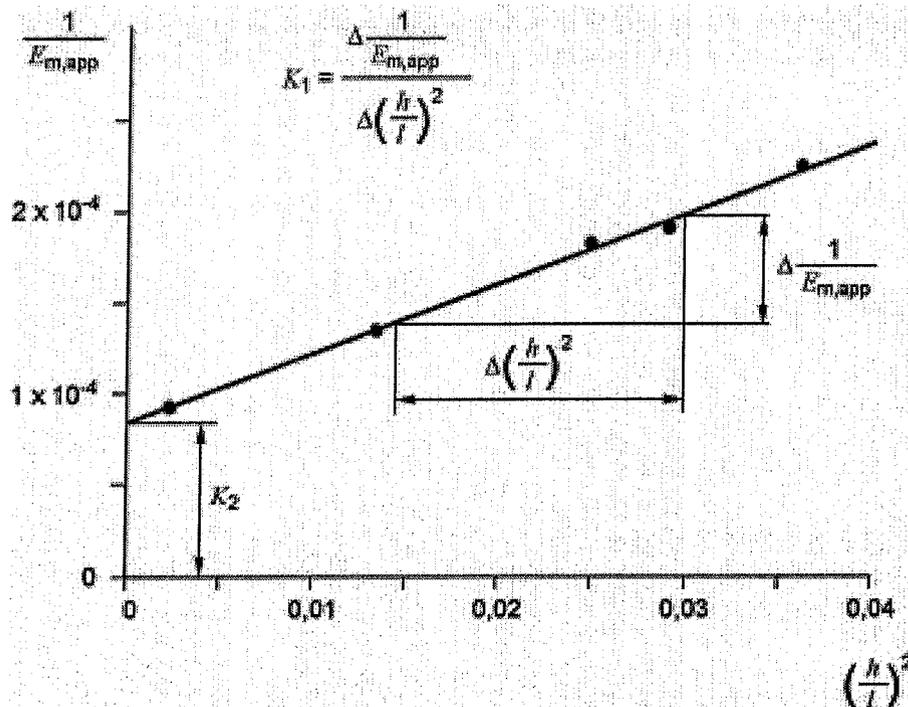


Figure 5. Determination of shear modulus - Variable span method

13 Determination of bending strength

13.1 Test piece

The test piece shall normally have a minimum length of 19 times the depth of the cross section. Where this is not possible, the span of the beam shall be reported.

13.2 Procedure

The test piece shall be symmetrically loaded in bending at two points over a span of 18 times the depth as shown in figure 3. If the test piece and equipment does not permit these conditions to be achieved exactly, the distance between the inner load points and the supports shall be changed by an amount not greater than 1,5 times the depth of the test piece, and the span and test piece length may be changed by an amount not greater than three times the depth of the test piece, while maintaining the symmetry of the test.

The test piece shall be simply supported.

NOTE.1. Small steel plates of length not greater than one-half of the depth of the test piece may be inserted between the piece and the loading heads or supports to minimize local indentation.

Lateral restraint shall be provided as necessary to prevent buckling. This restraint shall permit the piece to deflect without significant frictional resistance.

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1% of the load applied to the test piece.

Load shall be applied at a constant loading-head movement so adjusted that maximum load is reached within (300 ± 120) s.

NOTE 2. This rate should be determined from the results of preliminary tests. The objective is that the time to reach F_{\max} for each piece is 300s.

The time to failure for each test piece shall be recorded and its average reported. Any single piece diverging more than 120s from the target of 300s shall be reported.

13.3 Expression of results

The bending strength f_m is given by the equation $f_m = a F_{\max} / (2W)$

The symbols are as given in clause 4.

The bending strength shall be calculated to an accuracy of 1%.

The mode of fracture and the growth characteristics at the fracture section of each test piece shall be recorded.

14 Determination of modulus of elasticity in tension parallel to the grain

14.1 Test piece

The test piece shall be of full structural cross section, and of sufficient length to provide a test length clear of the testing machine grips of at least nine times the larger cross-sectional dimension.

14.2 Procedure

The test piece shall be loaded using gripping devices which will permit as far as possible the application of a tensile load without inducing bending. The gripping devices and loading conditions actually used shall be reported.

Load shall be applied at a constant rate. The rate of strain in the piece shall be not greater than 0,00005 per s.

The maximum load applied shall not exceed the proportional limit load or cause damage to the test piece. If significant movement occurs, for example with wedge type grips, preliminary tests may be needed to establish a rate of movement of the machine cross-head.

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1% of the load applied to the test piece or, for loads less than 10% of the applied maximum load, with an accuracy of 0,1% of the maximum applied load.

Deformation shall be measured over a length of five times the width of the piece, located not closer to the ends of the grips than twice this width. Two extensometers shall be used, and shall be positioned to minimize the effects of distortion.

Deformations shall be determined with an accuracy of 1% or for deformations less than 2mm, with an accuracy of 0,02mm.

14.3 Expression of results

The modulus of elasticity in tension $E_{t,0}$ is given by the equation
$$E_{t,0} = \frac{\ell_1 (F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)}$$

where

$F_2 - F_1$ is an increment of load on the straight line portion of the load deformation curve, in newtons (see figure 2);

$w_2 - w_1$ is the increment of deformation corresponding to $F_2 - F_1$, in millimetres (see figure 2).

The other symbols are as given in clause 4.

prEN 408

If $E_{t,0}$ is calculated from a load/deformation linear regression the square of the correlation coefficient should be greater than 0.99

The modulus of elasticity in tension shall be calculated to an accuracy of 1%.

15 Determination of tension strength parallel to the grain

15.1 Test piece

The test piece shall be of full structural cross section, and of sufficient length to provide a test length clear of the testing machine grips of at least nine times the larger cross-sectional dimension.

15.2 Procedure

The test piece shall be loaded using gripping devices which will permit as far as possible the application of a tensile load without inducing bending. The gripping devices and loading conditions actually used shall be reported.

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1% of the load applied to the test piece.

Load shall be applied at a constant loading-head movement so adjusted that maximum load is reached within (300 ± 120) s.

NOTE. This rate should be determined from the results of preliminary tests. The objective is that the time to reach F_{max} for each piece is 300s.

The time to failure for each test piece shall be recorded and its average reported. Any single piece diverging more than 120s from the target of 300s shall be reported.

15.3 Expression of results

The tensile strength $f_{t,0}$ is given by the equation $f_{t,0} = F_{max} / A$

The symbols are as given in clause 4.

The tensile strength shall be calculated to an accuracy of 1%.

The mode of fracture and growth characteristics at the fracture section of each test piece shall be recorded. If failure is associated with the grips, this shall be reported.

16 Determination of modulus of elasticity in compression parallel to the grain

16.1 Test piece

The test piece shall be of full cross section, and shall have a length of six times the smaller cross-sectional dimension. The end surfaces shall be accurately prepared to ensure that they are plane and parallel to one another and perpendicular to the axis of the piece.

16.2 Procedure

The test piece shall be loaded concentrically using spherically seated loading-heads or other devices which permit the application of a compressive load without inducing bending. After an initial load has been applied the loading-heads shall be locked to prevent angular movement. The gripping devices and loading conditions actually used shall be reported.

Load shall be applied at a constant rate. The rate of movement of the loading-head shall be not greater than 0,00005 ℓ mm/s.

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1% of the load applied to the test piece, or for loads less than 10% of the applied maximum load, with an accuracy of 0,1% of the maximum applied load.

Deformation shall be measured over a central gauge length of four times the smaller cross-sectional dimension of the piece. Two extensometers shall be used, and shall be positioned to minimize the effects of distortion.

Deformations shall be determined with an accuracy of 1% or, for deformations less than 2mm, with an accuracy of 0,02mm.

16.3 Expression of results

The modulus of elasticity in compression $E_{c,0}$ is given by the equation

$$E_{c,0} = \frac{\ell_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)}$$

where

$F_2 - F_1$ is an increment of load on the straight line portion of the load deformation curve, in newtons (see figure 2);

$w_2 - w_1$ is the increment of deformation corresponding to $F_2 - F_1$, in millimetres (see figure 2).

The other symbols are as given in clause 4.

If $E_{c,0}$ is calculated from a load/deformation linear regression the square of the correlation coefficient should be greater than 0.99

The modulus of elasticity in compression shall be calculated to an accuracy of 1%.

17 Determination of compression strength parallel to grain

17.1 Test piece

The test piece shall be of full cross section, and shall have a length of six times the smaller cross-sectional dimension. The end surfaces shall be accurately prepared to ensure that they are plane and parallel to one another and perpendicular to the axis of the piece.

17.2 Procedure

The test piece shall be loaded concentrically using spherically seated loading-heads or other devices, which permit the application of a compressive load without inducing bending. After an initial load has been applied the loading-heads shall be locked to prevent angular movement. The gripping devices and loading conditions actually used shall be reported.

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1% of the load applied to the test piece.

Load shall be applied at a constant loading-head movement so adjusted that maximum load is reached within (300 ± 120) s.

NOTE. This rate should be determined from the results of preliminary tests. The objective is that the time to reach F_{max} for each piece is 300 s.

The time to failure of each test piece shall be recorded and its average reported. Any single piece diverging more than 120s from the target of 300s shall be reported.

17.3 Expression of results

The compressive strength $f_{c,0}$ is given by the equation $f_{c,0} = F_{max} / A$

The symbols are as given in clause 4.

The compressive strength shall be calculated to an accuracy of 1%.

The mode of fracture and growth characteristics at the fracture section of each test piece shall be reported.

18 Determination of tension and compression strengths perpendicular to the grain

18.1 Requirements for test pieces

18.1.1 Fabrication

The fabrication of the test pieces shall be such as will allow for the application of the loads to the test piece.

NOTE 1. Suitable arrangements are shown in annexes A and B.

For tension tests, the test piece shall be glued to steel plates. The gluing process shall be capable of ensuring the specified position of the test piece during testing.

NOTE 2. A suitable adhesive for fixing the steel plates to the timber test piece is a two-part epoxy. Immediately prior to gluing, the surfaces to be joined should be prepared by planing the timber test piece surfaces and sandblasting the steel plates.

18.1.2 Surface preparation

The loaded surfaces shall be accurately prepared to ensure that they are plane and parallel to each other and perpendicular to the test piece axis. This preparation shall be carried out after conditioning.

18.1.2.1 Structural timber

The test pieces shall have the dimensions given in table 1 and be as shown in figure 6a.

18.1.2.2 Glued laminated timber

The test pieces shall have the dimensions given in table 1, with the object of achieving a volume of 0,01 m³ for tension test pieces, and be as shown in figure 6b.

Table 1. Dimensions of structural timber or glued laminated timber test pieces

Specimen characteristics						
Structural timber			Glued laminated timber			
<i>B</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	Volume	<i>b</i> × <i>l</i> (mm ²)	<i>b</i> minimum (mm)	<i>h</i> (mm)
Tension						
45	180	70	0,01 m ³	25000	100	400
Compression						

45	90	70	—	25000	100	200
The symbols are as given in clause 4.						
The permitted deviation of the test piece dimensions b , h and l shall be 1 %.						

18.2 Procedure

The test piece shall be mounted vertically between the test machine platens and the appropriate compression or tension loads applied. The gauge length, h_0 (approximately $0,6 h$), shall be located centrally in the test piece height and not closer than $b/3$ to the loaded ends of the test piece, see figure 7.

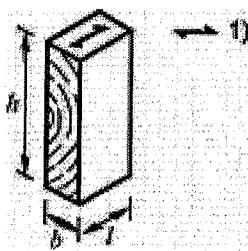


Figure 6a. Structural timber test piece

1) Grain direction

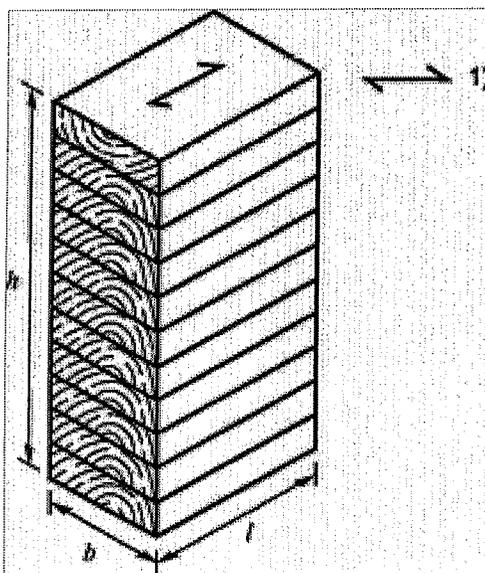


Figure 6b. Glued laminated timber test piece

1) grain direction

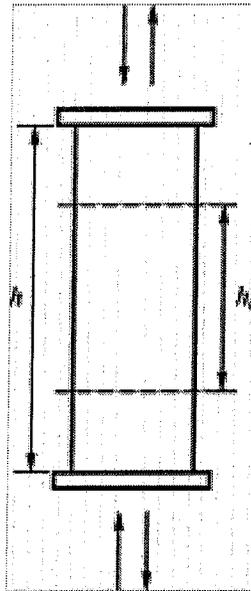


Figure 7. Test principle

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1 % of the load applied to the test piece or, for loads less than 10 % of the maximum load, with an accuracy of 0,1% of the maximum load.

The test piece shall be loaded concentrically.

NOTE 1. This can be achieved using spherically seated loading-heads (see also annexes A and B).

In the case of the compression test, after an initial load has been applied, the loading-heads shall be locked to prevent rotation or angular movement during the test.

NOTE 2. Suitable devices are shown in annex A.

In the case of either a tension test or a compression test the longitudinal axis of the test piece shall be aligned with the axis of the machine and fixed in such a way that no initial stresses in the test piece are introduced, except those due to the weight of the test piece and the equipment.

In the case of tension tests on solid timber the test piece shall have pinned ends, with the axis of the pin parallel to the grain direction of the test piece.

The load F shall be applied at a constant rate of cross head movement throughout the test. The rate of loading shall be adjusted so that the maximum load $F_{c,90,max,est}$ or $F_{t,90,max}$ is reached within (300 ± 120) s.

NOTE 3. This rate should be determined from the results of preliminary tests. The objective is that the time to reach F_{max} for each test piece is 300 s.

NOTE 4. The relationship between $F_{c,90,max,est}$ and $F_{c,90,max}$ is discussed in 19.3.1.

18.3 Expression of results

18.3.1 Compression perpendicular to the grain

The compressive strength $f_{c,90}$ shall be determined from the equation:

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{b \ell}$$

The compressive strength shall be calculated to an accuracy of 1 %. The method for determining $F_{c,90,max}$ is given in 19.3.

The symbols are as given in clause 4.

18.3.2 Tension perpendicular to the grain

The tensile strength $f_{t,90}$ shall be determined from the equation:

$$f_{t,90} = \frac{F_{t,90,max}}{b\ell}$$

The tensile strength shall be calculated to an accuracy of 1 %.

The symbols are as given in clause 4.

The result of a test shall be disregarded where failure occurs on the system used to connect the test piece to the testing machine (e.g. in the glue line between the steel plates and the timber of the test piece). If the failure occurs partly in the glued area of the test piece/steel plate interface, the result is valid only if this area is less than 20 % of the area of failure.

19 Determination of modulus of elasticity perpendicular to the grain

19.1 Requirements for test pieces

The shape and dimensions of the test pieces shall comply with 18.1.

19.2 Procedure

The test pieces shall be mounted in the loading equipment as specified in 18.2, and the loading procedure described in 18.2 shall be followed.

Two extensometers shall be used, and shall be positioned to minimize the effects of distortion. The extensometers shall measure the deformations which shall be determined to an accuracy of 1 %. The deformation in the load direction refers to the centre of the loaded section and is calculated on the basis of measurements on two opposite sides of the test piece.

The data from each extensometer shall be recorded separately.

19.3 Expression of results

19.3.1 Compression perpendicular to the grain

The modulus of elasticity $E_{c,90}$ shall be calculated from the equation:

$$E_{c,90} = \frac{(F_{40} - F_{10})h_0}{(w_{40} - w_{10})b\ell}$$

where:

$F_{40} - F_{10}$ is an increment of load on the straight line portion of the load-deformation curve, in newtons. F_{10} shall be 10 % and F_{40} shall be 40 % of $F_{c,90,max}$.

$w_{40} - w_{10}$ is the increment of deformation corresponding to $F_{40} - F_{10}$, in millimetres.

The other symbols are as given in clause 4.

The modulus of elasticity shall be calculated to an accuracy of 1 %.

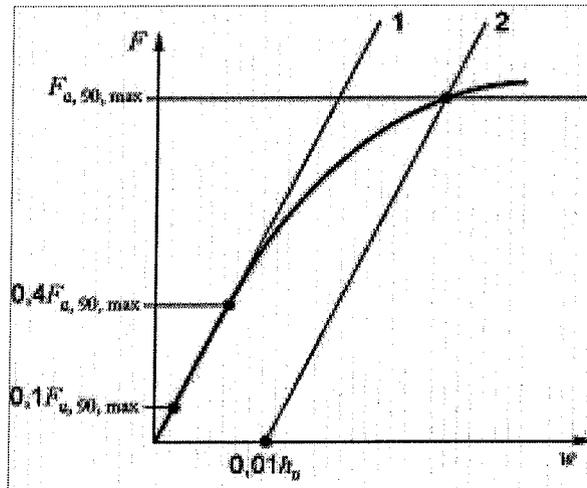


Figure 8. Load-deformation diagram (compression)

The determination of $F_{c,90,max}$ may be carried out using the iterative process as follows:

Estimate a value for the load $F_{c,90,max}$. Using the test results, plot the load/deformation curve in the form shown in figure 8. Calculate $0,1 F_{c,90,max}$ and $0,4 F_{c,90,max}$ and determine where these two values intersect the load/deformation curve. Through these two points draw the straight line 1 as shown in figure 8. Parallel to line 1, draw line 2 having its origin at load $F = 0$ and at a distance from it equivalent to a deformation of $0,01 h_0$ as shown in figure 8. Where line 2 intersects the curve of the test results is $F_{c,90,max}$. If the value of $F_{c,90,max}$ as determined is within 5 % of $F_{c,90,max,est}$ then that value may be used to determine the compressive strength; otherwise, repeat the procedure until a value of $F_{c,90,max}$ within that tolerance is obtained.

19.3.2 Tension perpendicular to the grain

The modulus of elasticity $E_{t,90}$ shall be calculated from the equation:

$$E_{t,90} = \frac{(F_{40} - F_{10})h_0}{(w_{40} - w_{10})b\ell}$$

where:

$F_{40} - F_{10}$ is an increment of load on the straight line portion of the load-deformation curve, in newtons. F_{10} shall be 10 % and F_{40} shall be 40 % of $F_{t,90,max}$.

$w_{40} - w_{10}$ is the increment of deformation corresponding to $F_{40} - F_{10}$, in millimetres.

The other symbols are as given in clause 4.

The modulus of elasticity shall be calculated to an accuracy of 1 %.

20 Determination of shear strength parallel to the grain

20.1 Requirements for test pieces

20.1.1 Fabrication

The test piece shall be glued to steel plates. The steel plates shall be tapered as shown in figure 9.

NOTE1. A suitable adhesive for fixing the steel plates to the timber test piece is a two-part epoxy. Immediately prior to gluing, the surfaces to be joined should be prepared by planing the timber test piece surfaces and sandblasting the steel plates.

20.1.2 Surface preparation

All surfaces shall be accurately prepared to ensure that adjacent surfaces are perpendicular and opposite surfaces are parallel to each other. This preparation shall be carried out after conditioning.

The test pieces shall satisfy the requirements shown in figure 9. The values of the dimensions shall be as follows:

$$l = (300 \pm 2) \text{ mm}$$

$$b = (32 \pm 1) \text{ mm}$$

$$h = (55 \pm 1) \text{ mm}$$

The steel plate thickness shall be $(10 \pm 1) \text{ mm}$.

Drafters note: Consideration needs to be given to thicker plates for stronger species and hardwoods

NOTE1. Variations in these dimensions are permissible within the stated tolerances, to achieve the object of an angle of 14° in the test.

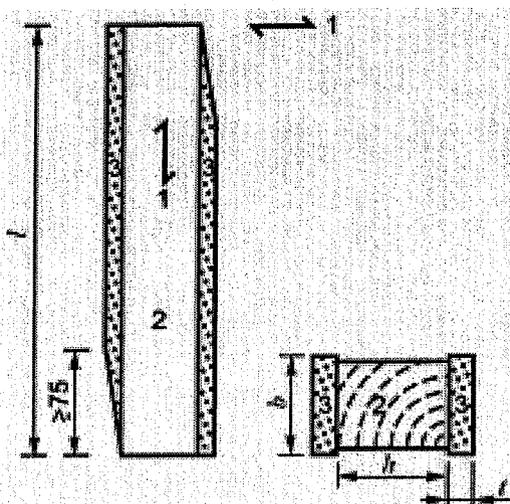


Figure 10. Timber test piece shown glued to steel plates

1) grain direction; 2) timber test piece; 3) steel plate. All dimensions in mm

20.2 Procedure

The test piece shall be mounted in a test machine as shown in figure 10. The test piece shall be aligned such that continuous contact is maintained where the line loads F are applied. The angle between the load direction and the longitudinal axis of the test piece shall be 14° .

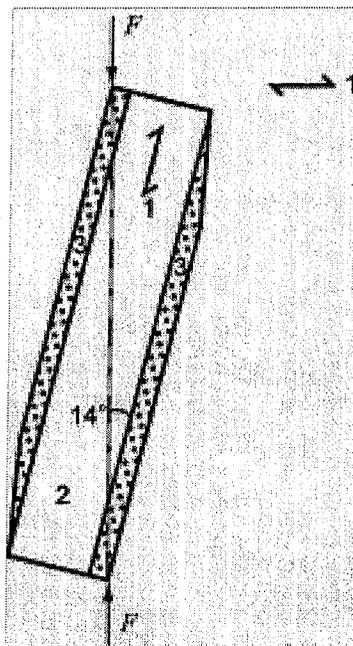


Figure 11. Loading arrangement

1) grain direction; 2) timber test piece; 3) steel plate

The loading equipment used shall be capable of measuring the load to an accuracy of 1 % of the load applied to the test piece or, for loads less than 10 % of the maximum load, with an accuracy of 0,1% of the maximum load.

If the failure occurs partly in the glued area of the test piece/steel plate interface, the result is valid only if this area is less than 20 % of the area of failure.

Load F shall be applied at a constant rate of loading-head movement so adjusted that the load F_{\max} is reached within (300 ± 120) s.

NOTE. This rate should be determined from the results of preliminary tests. The objective is that the time to reach F_{\max} for each test piece is 300 s.

Single test pieces diverging more than 120 s from the target of 300 s shall be reported. The time to failure shall be recorded and its average reported.

20.3 Expression of results

The shear strength f_v shall be determined from the equation:

$$f_v = \frac{F_{\max} \cos 14^\circ}{\ell b}$$

and shall be calculated to an accuracy of 1 %.

The symbols are as given in clause 4.

21 Test report

21.1 General

The test report shall include details of the test piece, the test method used and the test results.

21.2 Test piece

The following information shall be given:

- a. description of the test piece, specification and quality of material: species or type, grade, density. Deviations from specifications, strength reducing characteristics, size of defects;
- b. size of test piece. In addition, for glued laminated timber, the type of glue used and the orientation and the number of laminations;
- c. country, region or mill of origin of the material sampled. In addition, for glued laminated timber, the factory of origin;
- d. method of selection of test pieces;
- e. method of conditioning;
- f. any other information which may have influenced the test results, for example drying history.

21.3 Test method

The following information shall be given:

- a. methods of test used;
- b. temperature and relative humidity at the time of test;
- c. description of the load testing device, the test equipment and the measuring instruments used;
- d. any other information which may influence the use of the test results.

21.4 Test results

The following information for each test piece shall normally be given:

- a. moisture content at time of test;
- b. density;
- c. actual dimensions;
- d. moduli of elasticity and/or strength values;
- e. location and mode of failure. Any parts of glued areas in the failure section shall be recorded;
- f. times to reach the maximum load;
- g. any other information which may influence the use of the test results.

Annex A (informative)

Example of compression perpendicular to grain test arrangement

Figure A.1 shows an example of a compression perpendicular to grain test arrangement

The load can be transferred to the test piece through steel plates. To ensure uniform deformation from the beginning of the load application, a pair of steel wedges can be inserted between the steel plate and the pressure disc of the testing machine. This enables the equalization of small deviations in parallelity.

The use of the devices shown in figure A.2 will:

- facilitate the correct alignment of the test piece between the platens of the test machine; and
- facilitate full contact between the end surfaces of the test piece and the platens of the test machine; and
- following the initial loading, prevent any further rotation of the platens.

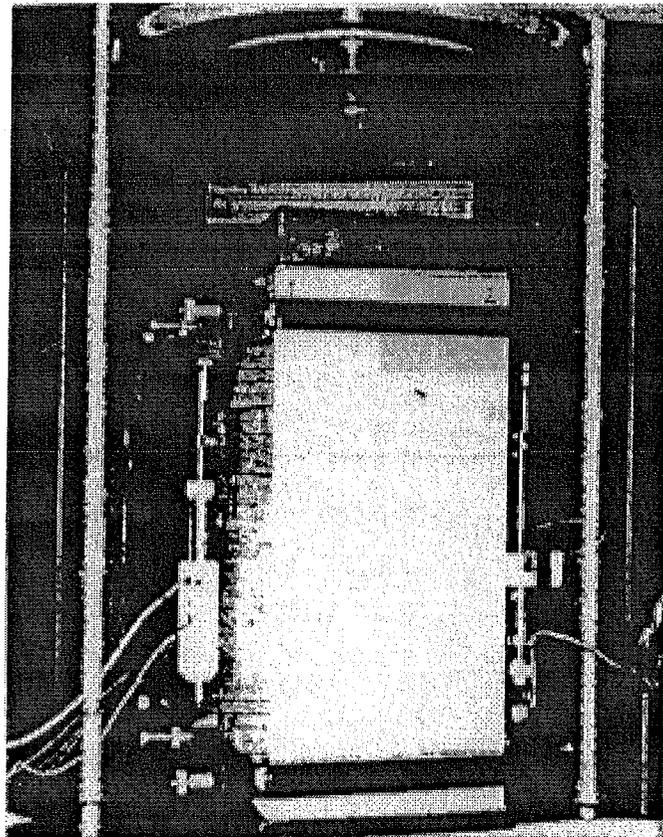


Figure A.1 Compression test arrangement

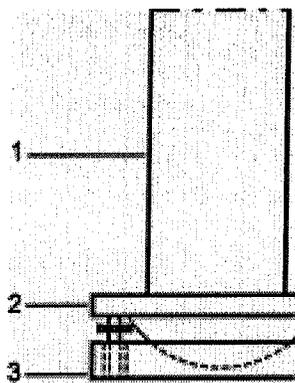


Figure A.2 Compression test locking device

1) Test piece; 2) Square plate with hemispherical knee joint; 3) Adjustment and locking system

Annex B (informative)

Example of tension perpendicular to grain test arrangement with rigid fixings

The load can be transferred to the test piece through steel plates glued to the test piece. A suitable adhesive is a two-component epoxy. Just before the gluing, the interface surfaces should be prepared by sandblasting the steel and planing the wood.

To better ensure failure in the wood away from the glue plane, a block of wood with grain parallel to the load direction can be inserted between it and the steel plate. An example of the arrangement is shown in figure B.1.

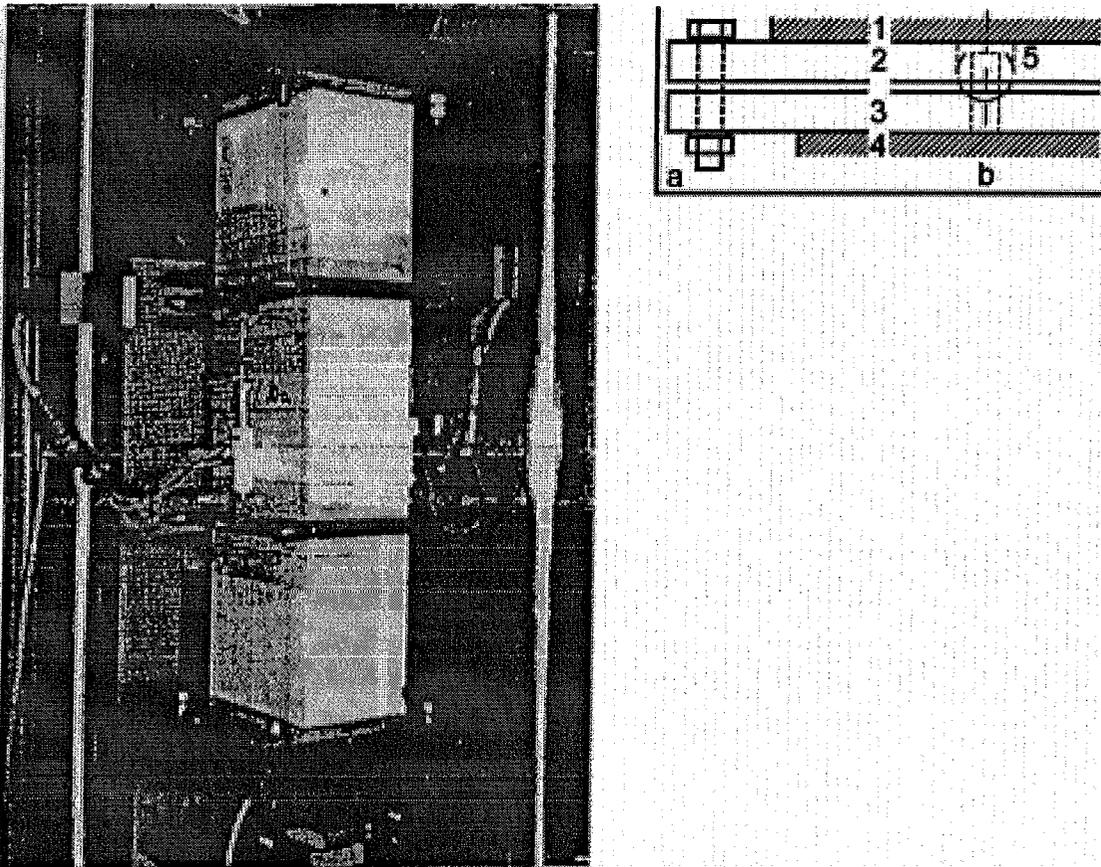


Figure B.1 Tension test arrangement

1) Test piece; 2) Steel plate; 3) Steel plate rigidly connected to grip of testing machine; 4) Grip of testing machine; 5) Hole in plate 2 for tight-fitting spherical dowel fixed to plate 3; a) Bolt-connection at corner. The spherical washers resting in conical counter-sinkings allow mutual rotation of the steel plates; b) Dowel-connection of steel plates allows mutual vertical and rotational movements of the steel plates, but prevents horizontal movement.

Annex C
(informative)
Bibliography

ISO 8375:1985 Solid timber in structural sizes - Determination of some physical and mechanical properties

ANNEXE 2

ANNEXE 2

Tableau 1 : Résultat de la mesure de la densité sèche.

	moy haut(cm)	moy larg(cm)	moy long(cm)	volume(cm3)	M1 (g)	M2 (g)	densité sèche
1	1	3,5	3,925	13,7375	10,9	8,8	0,64058235
2	0,965	3,3	3,925	12,4991625	8,6	6,9	0,55203699
3	1	3,5	3,99	13,965	11	8,8	0,6301468
4	1	3,55	3,945	14,00475	10,3	8,3	0,59265606
5	0,865	3,9	4,4	14,8434	10	8,1	0,54569708
6	1	3,7	3,9	14,43	11,3	9	0,62370062
7	1	3,9	3,9	15,21	10,5	8,3	0,54569362
8	0,9	3,65	3,9	12,8115	8,7	7	0,54638411
9	1	2,6	3,9	10,14	7	5,3	0,52268245
10	0,9	3,9	4,5	15,795	10,7	8,4	0,53181387
11	1	3,85	4,4	16,94	11	8,7	0,51357733
12	1	3,9	4,4	17,16	11,7	9,3	0,54195804
13	1	3,8	3,9	14,82	11,2	8,8	0,59379217
14	1	3,35	3,9	13,065	9,5	7,6	0,58170685
15	1,1	3,2	3,9	13,728	10	7,9	0,5754662
16	1,1	3,8	3,9	16,302	11,6	9,1	0,55821372
17	1	3,5	3,9	13,65	9,8	7,7	0,56410256
18	0,95	3,65	3,9	13,52325	9,7	7,8	0,57678443
19	1	3,7	3,9	14,43	9,6	7,6	0,52668053
20	1	3,5	3,9	13,65	8,5	6,9	0,50549451
21	1	3,6	3,95	14,22	10,9	8,6	0,604782
22	1	2,1	3,95	8,295	6,2	4,9	0,5907173

Tableau 2 : Résultat de la mesure de la densité humide.

	moy haut(cm)	moy larg(cm)	moy long(cm)	Volume cm ³	M1 (g)	M2 (g)	densité humide
1	1	3,5	3,925	13,7375	10,9	8,8	3,50
2	0,965	3,3	3,925	12,4991625	8,6	6,9	3,18
3	1	3,5	3,99	13,965	11	8,8	3,50
4	1	3,55	3,945	14,00475	10,3	8,3	3,55
5	0,865	3,9	4,4	14,8434	10	8,1	3,37
6	1	3,7	3,9	14,43	11,3	9	3,70
7	1	3,9	3,9	15,21	10,5	8,3	3,90
8	0,9	3,65	3,9	12,8115	8,7	7	3,29
9	1	2,6	3,9	10,14	7	5,3	2,60
10	0,9	3,9	4,5	15,795	10,7	8,4	3,51
11	1	3,85	4,4	16,94	11	8,7	3,85
12	1	3,9	4,4	17,16	11,7	9,3	3,90
13	1	3,8	3,9	14,82	11,2	8,8	3,80
14	1	3,35	3,9	13,065	9,5	7,6	3,35
15	1,1	3,2	3,9	13,728	10	7,9	3,52
16	1,1	3,8	3,9	16,302	11,6	9,1	4,18
17	1	3,5	3,9	13,65	9,8	7,7	3,50
18	0,95	3,65	3,9	13,52325	9,7	7,8	3,47
19	1	3,7	3,9	14,43	9,6	7,6	3,70
20	1	3,5	3,9	13,65	8,5	6,9	3,50
21	1	3,6	3,95	14,22	10,9	8,6	3,60
22	1	2,1	3,95	8,295	6,2	4,9	2,10

ANNEXE 2

Tableau3 : Résultat de la mesure de la teneur en eau.

	moy haut(cm)	moy larg(cm)	moy long(cm)	volume(cm3)	M1 (g)	M2 (g)	teneur en eau (%)
1	1	3,5	3,925	13,7375	10,9	8,8	19,266055
2	0,965	3,3	3,925	12,4991625	8,6	6,9	19,7674419
3	1	3,5	3,99	13,965	11	8,8	20
4	1	3,55	3,945	14,00475	10,3	8,3	19,4174757
5	0,865	3,9	4,4	14,8434	10	8,1	19
6	1	3,7	3,9	14,43	11,3	9	20,3539823
7	1	3,9	3,9	15,21	10,5	8,3	20,952381
8	0,9	3,65	3,9	12,8115	8,7	7	19,5402299
9	1	2,6	3,9	10,14	7	5,3	24,2857143
10	0,9	3,9	4,5	15,795	10,7	8,4	21,4953271
11	1	3,85	4,4	16,94	11	8,7	20,9090909
12	1	3,9	4,4	17,16	11,7	9,3	20,5128205
13	1	3,8	3,9	14,82	11,2	8,8	21,4285714
14	1	3,35	3,9	13,065	9,5	7,6	20
15	1,1	3,2	3,9	13,728	10	7,9	20,9677419
16	1,1	3,8	3,9	16,302	11,6	9,1	20,9677419
17	1	3,5	3,9	13,65	9,8	7,7	20,9677419
18	0,95	3,65	3,9	13,52325	9,7	7,8	20,9677419
19	1	3,7	3,9	14,43	9,6	7,6	20,9677419
20	1	3,5	3,9	13,65	8,5	6,9	20,9677419
21	1	3,6	3,95	14,22	10,9	8,6	20,9677419
22	1	2,1	3,95	8,295	6,2	4,9	20,9677419

Tableau 4 : résultats de calcul de module de YOUNG (poutre en bois lamellé-collé)

Charge (kN)	Déplacement (μm)	Time(s)
0,367	1	6,5
0,368	2	7
0,405	56	7,5
0,466	178	8
0,546	281	8,5
0,591	410	9
0,636	500	9,5
0,699	588	10
0,737	636	10,5
0,766	709	11
0,819	850	11,5
0,851	874	12
0,872	889	12,5
0,919	932	13
0,944	956	13,5
0,969	973	14
0,993	996	14,5
1,028	1047	15
1,053	1091	15,5
1,078	1122	16
1,107	1219	16,5
1,13	1304	17
1,155	1335	17,5
1,184	1368	18
1,205	1399	18,5
1,233	1418	19
1,265	1441	19,5
1,288	1459	20
1,304	1476	20,5
1,338	1533	21
1,362	1572	21,5
1,383	1616	22
1,407	1712	22,5
1,428	1806	23
1,459	1856	23,5
1,482	1880	24
1,503	1896	24,5
1,536	1917	25
1,562	1933	25,5
1,581	1955	26
1,611	1999	26,5
1,63	2040	27

ANNEXE 2

1,648	2082	27,5
1,688	2159	28
1,704	2186	28,5
1,725	2236	29
1,761	2322	29,5
1,784	2351	30
1,804	2383	30,5
1,83	2410	31
1,858	2438	31,5
1,883	2454	32
1,905	2468	32,5
1,936	2494	33
1,959	2516	33,5
1,98	2534	34
2,012	2579	34,5
2,035	2639	35
2,054	2677	35,5
2,092	2715	36
2,112	2758	36,5
2,127	2837	37
2,163	2887	37,5
2,186	2904	38
2,21	2924	38,5
2,233	2971	39
2,264	3044	39,5
2,284	3069	40
2,306	3084	40,5
2,338	3105	41
2,359	3135	41,5
2,378	3191	42
2,403	3243	42,5
2,434	3272	43
2,454	3297	43,5
2,481	3326	44
2,511	3418	44,5
2,534	3464	45
2,555	3505	45,5
2,591	3580	46
2,608	3604	46,5
2,63	3630	47
2,667	3670	47,5
2,688	3695	48
2,712	3732	48,5
2,739	3794	49

ANNEXE 2

2,77	3825	49,5
2,79	3844	50
2,812	3860	50,5
2,842	3883	51
2,864	3901	51,5
2,886	3931	52
2,915	3978	52,5
2,938	4013	53
2,955	4041	53,5
2,97	4065	54
2,98	4097	54,5
2,981	4116	55
2,988	4134	55,5
2,991	4142	56
2,994	4148	56,5
3	4159	57

Tableau 5 : résultats de calcul de module de YOUNG (poutre en bois de coffrage)

Charge (kN)	Déplacement (μm)	Time (s)
0,559	2	6,5
0,618	57	7
0,668	150	7,5
0,714	202	8
0,772	325	8,5
0,813	368	9
0,848	445	9,5
0,893	509	10
0,92	545	10,5
0,953	599	11
1	718	11,5
1,026	745	12
1,046	760	12,5
1,084	802	13
1,11	828	13,5
1,131	854	14
1,155	885	14,5
1,189	924	15
1,214	947	15,5
1,237	972	16
1,273	1016	16,5
1,296	1071	17
1,316	1126	17,5
1,346	1169	18
1,368	1183	18,5
1,39	1195	19
1,424	1230	19,5
1,442	1265	20
1,466	1322	20,5
1,504	1389	21
1,526	1422	21,5
1,548	1474	22
1,567	1535	22,5
1,601	1583	23
1,62	1605	23,5
1,641	1632	24
1,664	1692	24,5
1,699	1795	25
1,719	1814	25,5
1,741	1828	26
1,773	1855	26,5
1,795	1877	27

ANNEXE 2

1,816	1899	27,5
1,846	1926	28
1,87	1948	28,5
1,891	1963	29
1,925	1995	29,5
1,945	2030	30
1,964	2061	30,5
2,001	2103	31
2,025	2127	31,5
2,047	2166	32
2,068	2264	32,5
2,096	2311	33
2,119	2335	33,5
2,143	2382	34
2,176	2423	34,5
2,195	2441	35
2,219	2460	35,5
2,249	2484	36
2,271	2503	36,5
2,292	2529	37
2,326	2576	37,5
2,351	2618	38
2,37	2691	38,5
2,404	2784	39
2,427	2832	39,5
2,448	2864	40
2,471	2895	40,5
2,502	2931	41
2,525	2945	41,5
2,546	2959	42
2,568	2972	42,5
2,597	2996	43
2,621	3025	43,5
2,639	3059	44
2,671	3122	44,5
2,693	3181	45
2,717	3212	45,5
2,75	3261	46
2,772	3297	46,5
2,791	3333	47
2,825	3385	47,5
2,846	3409	48
2,867	3436	48,5
2,901	3479	49

ANNEXE 2

2,923	3498	49,5
2,942	3511	50
2,956	3521	50,5
2,971	3529	51
2,977	3534	51,5
2,982	3537	52
2,986	3542	52,5
2,992	3546	53
2,994	3549	53,5
2,999	3552	54
3,002	3554	54,5

Tableau 6 : résultats de calcul de résistance en flexion (poutre en bois lamellé-collé).

Charge (kN)	Déplacement (μm)	Time (s)
0,353	0	5
0,353	1	5,5
0,356	4	6
0,359	6	6,5
0,36	6	7
0,384	16	7,5
0,446	91	8
0,521	211	8,5
0,575	257	9
0,62	381	9,5
0,695	491	10
0,72	557	10,5
0,754	667	11
0,809	739	11,5
0,835	779	12
0,866	820	12,5
0,893	845	13
0,928	864	13,5
0,955	883	14
0,984	916	14,5
1,015	983	15
1,041	1014	15,5
1,066	1039	16
1,099	1094	16,5
1,118	1211	17
1,14	1253	17,5
1,178	1290	18
1,195	1312	18,5
1,218	1343	19
1,255	1389	19,5
1,274	1419	20
1,302	1492	20,5
1,324	1634	21
1,35	1714	21,5
1,373	1741	22
1,395	1767	22,5
1,425	1792	23
1,445	1811	23,5
1,47	1831	24
1,502	1857	24,5

ANNEXE 2

1,524	1873	25
1,546	1894	25,5
1,578	1923	26
1,605	1940	26,5
1,621	1959	27
1,656	2010	27,5
1,675	2068	28
1,702	2111	28,5
1,722	2140	29
1,743	2166	29,5
1,772	2214	30
1,793	2255	30,5
1,817	2298	31
1,85	2346	31,5
1,872	2396	32
1,893	2442	32,5
1,923	2489	33
1,948	2516	33,5
1,968	2550	34
2,006	2627	34,5
2,024	2661	35
2,047	2684	35,5
2,082	2717	36
2,1	2748	36,5
2,12	2808	37
2,144	2857	37,5
2,176	2888	38
2,197	2909	38,5
2,221	2981	39
2,249	3085	39,5
2,277	3111	40
2,298	3131	40,5
2,317	3158	41
2,348	3210	41,5
2,37	3246	42
2,392	3272	42,5
2,424	3297	43
2,447	3318	43,5
2,468	3353	44
2,504	3434	44,5
2,519	3469	45
2,542	3493	45,5
2,577	3529	46
2,6	3554	46,5

ANNEXE 2

2,624	3576	47
2,656	3605	47,5
2,679	3619	48
2,699	3631	48,5
2,725	3652	49
2,755	3709	49,5
2,778	3742	50
2,798	3773	50,5
2,827	3804	51
2,849	3827	51,5
2,872	3847	52
2,909	3889	52,5
2,928	3977	53
2,949	4050	53,5
2,982	4116	54
3,002	4148	54,5
3,024	4173	55
3,057	4214	55,5
3,08	4243	56
3,101	4283	56,5
3,124	4309	57
3,153	4348	57,5
3,178	4380	58
3,201	4414	58,5
3,223	4441	59
3,251	4481	59,5
3,273	4504	60
3,296	4534	60,5
3,328	4590	61
3,346	4687	61,5
3,371	4731	62
3,403	4766	62,5
3,425	4788	63
3,448	4817	63,5
3,479	4858	64
3,501	4875	64,5
3,526	4888	65
3,556	4919	65,5
3,577	5007	66
3,6	5050	66,5
3,623	5091	67
3,657	5161	67,5
3,68	5189	68
3,701	5213	68,5

ANNEXE 2

3,733	5235	69
3,752	5252	69,5
3,783	5270	70
3,809	5298	70,5
3,833	5328	71
3,853	5424	71,5
3,884	5491	72
3,911	5529	72,5
3,93	5587	73
3,964	5653	73,5
3,986	5679	74
4,004	5697	74,5
4,036	5720	75
4,059	5736	75,5
4,081	5763	76
4,106	5790	76,5
4,127	5827	77
4,156	5885	77,5
4,18	5921	78
4,2	5947	78,5
4,229	5976	79
4,251	6013	79,5
4,274	6083	80
4,305	6129	80,5
4,329	6162	81
4,35	6214	81,5
4,383	6251	82
4,404	6279	82,5
4,427	6310	83
4,458	6380	83,5
4,484	6433	84
4,503	6472	84,5
4,537	6525	85
4,564	6563	85,5
4,584	6599	86
4,604	6629	86,5
4,625	6655	87
4,655	6683	87,5
4,677	6703	88
4,699	6724	88,5
4,731	6807	89
4,755	6844	89,5
4,776	6866	90
4,807	6900	90,5

ANNEXE 2

4,83	6951	91
4,85	7001	91,5
4,884	7060	92
4,907	7080	92,5
4,925	7101	93
4,962	7194	93,5
4,983	7226	94
5,002	7249	94,5
5,037	7282	95
5,06	7310	95,5
5,078	7406	96
5,098	7445	96,5
5,129	7473	97
5,154	7508	97,5
5,177	7562	98
5,209	7602	98,5
5,23	7628	99
5,254	7648	99,5
5,283	7670	100
5,305	7685	100,5
5,328	7713	101
5,363	7785	101,5
5,388	7869	102
5,407	7883	102,5
5,441	7914	103
5,462	7931	103,5
5,485	7959	104
5,507	7996	104,5
5,538	8055	105
5,558	8130	105,5
5,584	8205	106
5,603	8254	106,5
5,637	8307	107
5,657	8327	107,5
5,678	8350	108
5,714	8477	108,5
5,731	8530	109
5,756	8543	109,5
5,786	8566	110
5,805	8586	110,5
5,828	8608	111
5,861	8630	111,5
5,879	8644	112
5,902	8657	112,5

ANNEXE 2

5,936	8684	113
5,957	8710	113,5
5,981	8751	114
6,006	8802	114,5
6,039	8838	115
6,06	8936	115,5
6,081	9031	116
6,102	9051	116,5
6,131	9100	117
6,15	9137	117,5
6,177	9160	118
6,207	9184	118,5
6,228	9208	119
6,249	9234	119,5
6,285	9296	120
6,308	9340	120,5
6,326	9422	121
6,357	9574	121,5
6,38	9599	122
6,401	9615	122,5
6,437	9640	123
6,461	9658	123,5
6,483	9679	124
6,502	9711	124,5
6,532	9776	125
6,557	9829	125,5
6,575	9875	126
6,607	9942	126,5
6,632	9981	127
6,653	10028	127,5
6,684	10089	128
6,705	10138	128,5
6,728	10164	129
6,761	10188	129,5
6,779	10203	130
6,801	10220	130,5
6,836	10253	131
6,863	10304	131,5
6,882	10375	132
6,906	10409	132,5
6,933	10459	133
6,958	10546	133,5
6,977	10592	134
7,007	10621	134,5

ANNEXE 2

7,032	10668	135
7,052	10735	135,5
7,078	10779	136
7,109	10814	136,5
7,132	10845	137
7,151	10889	137,5
7,18	10946	138
7,206	11001	138,5
7,227	11084	139
7,26	11180	139,5
7,282	11215	140
7,304	11259	140,5
7,336	11327	141
7,354	11360	141,5
7,379	11394	142
7,412	11453	142,5
7,431	11503	143
7,454	11542	143,5
7,473	11594	144
7,505	11669	144,5
7,524	11701	145
7,551	11736	145,5
7,582	11802	146
7,605	11847	146,5
7,63	11904	147
7,65	11985	147,5
7,682	12126	148
7,701	12147	148,5
7,728	12174	149
7,757	12222	149,5
7,776	12273	150
7,799	12314	150,5
7,835	12404	151
7,863	12456	151,5
7,877	12486	152
7,912	12561	152,5
7,936	12608	153
7,956	12643	153,5
7,98	12692	154
8,008	12780	154,5
8,032	12873	155
8,055	12916	155,5
8,084	12961	156
8,112	12994	156,5

ANNEXE 2

8,127	13025	157
8,162	13114	157,5
8,179	13201	158
8,205	13248	158,5
8,242	13328	159
8,257	13373	159,5
8,279	13427	160
8,301	13494	160,5
8,336	13615	161
8,356	13647	161,5
8,388	13729	162
8,416	13790	162,5
8,433	13880	163
8,458	13951	163,5
8,478	14002	164
8,506	14068	164,5
8,531	14122	165
8,549	14161	165,5
8,58	14229	166
8,602	14261	166,5
8,627	14324	167
8,66	14395	167,5
8,676	14434	168
8,702	14494	168,5
8,735	14613	169
8,752	14673	169,5
8,772	14764	170
8,809	14901	170,5
8,836	14946	171
8,853	14991	171,5
8,88	15048	172
8,91	15104	172,5
8,929	15154	173
8,955	15229	173,5
8,983	15322	174
9,007	15400	174,5
9,026	15463	175
9,052	15538	175,5
9,08	15637	176
9,1	15663	176,5
9,126	15688	177
9,153	15823	177,5
9,178	15926	178
9,2	15985	178,5

ANNEXE 2

9,236	16048	179
9,256	16083	179,5
9,273	16130	180
9,308	16212	180,5
9,332	16341	181
9,354	16424	181,5
9,386	16531	182
9,403	16582	182,5
9,426	16654	183
9,445	16695	183,5
9,479	16789	184
9,502	16875	184,5
9,523	16954	185
9,558	17085	185,5
9,577	17149	186
9,603	17253	186,5
9,634	17329	187
9,656	17389	187,5
9,679	17463	188
9,713	17566	188,5
9,735	17628	189
9,754	17698	189,5
9,787	17859	190
9,811	17919	190,5
9,828	18006	191
9,861	18100	191,5
9,887	18162	192
9,906	18263	192,5
9,93	18343	193
9,951	18433	193,5
9,982	18534	194
10,001	18607	194,5
10,027	18698	195
10,057	18820	195,5
10,079	18892	196
10,102	18959	196,5
10,132	19044	197
10,158	19158	197,5
10,173	19238	198
10,207	19365	198,5
10,232	19459	199
10,251	19541	199,5
10,291	19652	200
10,31	19721	200,5

ANNEXE 2

10,332	19779	201
10,363	19918	201,5
10,386	19988	202
10,406	20077	202,5
10,427	20164	203
10,451	20286	203,5

Tableau 7 : résultats de calcul de résistance en flexion (poutre en bois de coffrage)

Charge (kN)	Déplacement (μm)	Time (s)
0,42	2	4
0,421	5	4,5
0,421	6	5
0,424	7	5,5
0,424	10	6
0,427	14	6,5
0,44	43	7
0,488	134	7,5
0,554	211	8
0,623	297	8,5
0,672	342	9
0,712	380	9,5
0,764	438	10
0,803	509	10,5
0,838	562	11
0,889	614	11,5
0,909	636	12
0,935	676	12,5
0,979	792	13
1,005	830	13,5
1,03	900	14
1,057	961	14,5
1,087	999	15
1,113	1017	15,5
1,137	1041	16
1,17	1128	16,5
1,19	1201	17
1,213	1221	17,5
1,243	1246	18
1,266	1267	18,5
1,288	1295	19
1,327	1333	19,5
1,342	1345	20
1,365	1360	20,5
1,402	1387	21
1,425	1413	21,5
1,446	1446	22
1,467	1483	22,5
1,499	1520	23
1,517	1545	23,5
1,542	1654	24
1,564	1758	24,5

ANNEXE 2

1,596	1790	25
1,617	1808	25,5
1,637	1824	26
1,666	1845	26,5
1,692	1858	27
1,714	1871	27,5
1,744	1893	28
1,767	1918	28,5
1,787	1942	29
1,822	2021	29,5
1,845	2190	30
1,868	2268	30,5
1,898	2303	31
1,921	2318	31,5
1,939	2330	32
1,964	2342	32,5
1,997	2355	33
2,02	2365	33,5
2,044	2377	34
2,076	2400	34,5
2,096	2427	35
2,117	2466	35,5
2,148	2554	36
2,169	2598	36,5
2,191	2637	37
2,227	2714	37,5
2,248	2743	38
2,263	2762	38,5
2,302	2799	39
2,323	2839	39,5
2,348	2870	40
2,366	2885	40,5
2,399	2905	41
2,421	2916	41,5
2,443	2929	42
2,466	2938	42,5
2,496	2956	43
2,519	2969	43,5
2,54	2991	44
2,572	3064	44,5
2,592	3122	45
2,618	3153	45,5
2,648	3220	46
2,67	3269	46,5

ANNEXE 2

2,692	3292	47
2,728	3324	47,5
2,751	3358	48
2,771	3406	48,5
2,805	3476	49
2,827	3494	49,5
2,85	3513	50
2,871	3531	50,5
2,901	3572	51
2,923	3626	51,5
2,945	3662	52
2,974	3701	52,5
2,998	3727	53
3,018	3758	53,5
3,052	3846	54
3,075	3904	54,5
3,096	3937	55
3,121	3964	55,5
3,148	4011	56
3,17	4038	56,5
3,193	4059	57
3,227	4088	57,5
3,242	4111	58
3,278	4167	58,5
3,302	4207	59
3,324	4247	59,5
3,345	4276	60
3,365	4301	60,5
3,397	4334	61
3,422	4359	61,5
3,445	4381	62
3,474	4425	62,5
3,497	4455	63
3,517	4489	63,5
3,551	4528	64
3,571	4550	64,5
3,591	4577	65
3,627	4660	65,5
3,646	4734	66
3,665	4787	66,5
3,703	4812	67
3,723	4824	67,5
3,747	4847	68
3,784	4900	68,5

ANNEXE 2

3,806	4926	69
3,825	4954	69,5
3,847	4980	70
3,878	5019	70,5
3,902	5055	71
3,924	5100	71,5
3,946	5145	72
3,977	5201	72,5
4	5234	73
4,019	5269	73,5
4,052	5304	74
4,07	5326	74,5
4,095	5352	75
4,126	5383	75,5
4,148	5407	76
4,171	5450	76,5
4,205	5542	77
4,228	5580	77,5
4,25	5607	78
4,28	5632	78,5
4,3	5655	79
4,325	5685	79,5
4,347	5715	80
4,378	5756	80,5
4,404	5784	81
4,424	5830	81,5
4,445	5901	82
4,475	5964	82,5
4,497	5985	83
4,519	6012	83,5
4,549	6047	84
4,573	6075	84,5
4,596	6108	85
4,625	6162	85,5
4,649	6192	86
4,67	6232	86,5
4,702	6283	87
4,727	6317	87,5
4,746	6342	88
4,781	6393	88,5
4,8	6434	89
4,826	6481	89,5
4,847	6530	90
4,876	6579	90,5

ANNEXE 2

4,899	6638	91
4,918	6695	91,5
4,952	6755	92
4,976	6778	92,5
4,996	6795	93
5,032	6820	93,5
5,053	6845	94
5,076	6884	94,5
5,105	6937	95
5,124	6958	95,5
5,149	6978	96
5,184	7011	96,5
5,201	7047	97
5,221	7080	97,5
5,258	7125	98
5,28	7147	98,5
5,302	7180	99
5,324	7215	99,5
5,352	7259	100
5,379	7291	100,5
5,398	7347	101
5,422	7462	101,5
5,451	7545	102
5,476	7589	102,5
5,498	7619	103
5,53	7656	103,5
5,55	7682	104
5,574	7708	104,5
5,606	7749	105
5,627	7783	105,5
5,651	7809	106
5,687	7854	106,5
5,708	7882	107
5,729	7928	107,5
5,763	8003	108
5,788	8040	108,5
5,807	8087	109
5,836	8156	109,5
5,859	8222	110
5,881	8289	110,5
5,903	8343	111
5,926	8375	111,5
5,954	8405	112
5,977	8420	112,5

ANNEXE 2

5,995	8432	113
6,03	8453	113,5
6,051	8510	114
6,074	8593	114,5
6,103	8648	115
6,126	8700	115,5
6,144	8745	116
6,182	8802	116,5
6,199	8831	117
6,218	8870	117,5
6,257	8922	118
6,279	8960	118,5
6,3	9000	119
6,322	9057	119,5
6,356	9156	120
6,377	9235	120,5
6,396	9287	121
6,425	9345	121,5
6,452	9388	122
6,475	9409	122,5
6,503	9440	123
6,527	9470	123,5
6,55	9531	124
6,576	9632	124,5
6,599	9689	125
6,619	9744	125,5
6,656	9824	126
6,68	9862	126,5
6,7	9924	127
6,734	10020	127,5
6,756	10051	128
6,776	10100	128,5
6,797	10168	129
6,817	10222	129,5
6,852	10296	130
6,875	10351	130,5
6,894	10398	131
6,926	10471	131,5
6,949	10553	132
6,969	10621	132,5
7,001	10685	133
7,022	10759	133,5
7,046	10815	134
7,08	10867	134,5

ANNEXE 2

7,1	10932	135
7,123	11005	135,5
7,16	11136	136
7,176	11188	136,5
7,196	11254	137
7,232	11336	137,5
7,253	11383	138
7,277	11443	138,5
7,302	11518	139
7,331	11627	139,5
7,352	11685	140
7,372	11734	140,5
7,395	11782	141
7,424	11908	141,5
7,447	11967	142
7,469	12047	142,5
7,503	12157	143
7,522	12225	143,5
7,546	12285	144
7,579	12380	144,5
7,595	12435	145
7,618	12496	145,5
7,652	12609	146
7,676	12695	146,5
7,692	12742	147
7,727	12867	147,5
7,751	12924	148
7,77	13015	148,5
7,805	13113	149
7,827	13234	149,5
7,848	13363	150
7,875	13475	150,5
7,903	13544	151
7,924	13602	151,5
7,947	13669	152
7,975	13753	152,5
7,997	13857	153
8,017	13990	153,5
8,048	14082	154
8,074	14151	154,5
8,094	14248	155
8,127	14422	155,5
8,152	14506	156
8,172	14584	156,5

ANNEXE 2

8,202	14742	157
8,226	14856	157,5
8,246	14921	158
8,273	15028	158,5
8,291	15131	159
8,322	15276	159,5
8,345	15406	160
8,362	15538	160,5
8,4	15665	161
8,419	15777	161,5
8,444	15890	162
8,477	16097	162,5
8,499	16182	163
8,52	16270	163,5
8,55	16415	164
8,569	16566	164,5
8,594	16685	165
8,622	16872	165,5
8,646	17041	166
8,67	17179	166,5
8,7	17358	167
8,722	17468	167,5
8,746	17621	168
8,769	17777	168,5
8,798	17968	169
8,823	18098	169,5
8,846	18268	170
8,868	18381	170,5
8,896	18599	171
8,921	18749	171,5
8,939	18878	172
8,976	19080	172,5
9	19244	173
9,019	19423	173,5
9,055	19687	174
9,073	19846	174,5
9,095	20016	175
9,126	20307	175,5
9,143	20450	176
9,169	20653	176,5
9,206	20936	177
9,228	21107	177,5
9,252	21350	178
9,282	21607	178,5

ANNEXE 2

9,303	21826	179
9,327	22010	179,5
9,347	22246	180
9,372	22487	180,5
9,392	22785	181
9,368	23206	181,5
9,416	23636	182
9,436	24057	182,5
9,465	24432	183
9,483	24767	183,5
9,51	25282	184
9,537	25643	184,5
9,561	26048	185
9,601	26684	185,5
9,617	27020	186

Tableau 8 : Récapitulatif des résultats de calcul de la résistance en flexion.

Les modes	Les poutres	Résistance moyenne de chaque poutre (MPa)	Moyenne des poutres (MPa)	Ecart type (MPa)
Type 01 (Bois de coffrage)	1	64,4	63,9	4,3
	2	68,1		
	3	56,7		
	4	66,3		
Type 02 (Lamellé collé)	1	74,0	72,9	5,1
	2	78,7		
	3	66,1		