

Faculté des bioingénieurs

Caractérisation du comportement mécanique de panneaux CLT de hêtre : apport d'un classement visuel des lamelles

Auteur :	Simon Noiret
Promoteurs :	Pr. Caroline Vincke Ir. Hugues Frère
Lecteurs :	Dr. Benoit Jourez Pr. Pierre Latteur
Année académique :	2018 - 2019
Bioingénieur :	Gestion des forêts et des espaces naturels

Remerciements

Ces remerciements sont dédiés à toutes les personnes m’ayant accompagné durant la réalisation de ce mémoire.

Mes premiers remerciements s’adressent à mes deux co-promoteurs, Caroline Vincke, professeure à L’UCLouvain et Hugues Frère, directeur de HoutinfoBois, pour m’avoir proposé ce sujet et permis de le réaliser au sein de la scierie Scidus. Je les remercie également pour leur écoute et leurs conseils lors de moments incertains.

Au sein de l’entreprise, je remercie Bertrand Dubois et Julien Geno, sans lesquels ce mémoire n’aurait jamais pu se concrétiser. Outre la demande de réalisation de ce travail émanant de leur part, ils ont pris de leur temps afin de me permettre une compréhension des notions qui m’étaient lacunaires, malgré l’importance de la tâche.

Je souhaite également remercier Johnny, ouvrier chez Scidus, avec qui j’ai passé trois jours pour la fabrication des panneaux CLT.

Je remercie également l’équipe du laboratoire LEMSC, en particulier Christophe Bayart, pour la mise en œuvre des essais et l’accueil qu’il m’a réservé.

Merci à Benoît Jourez et Pierre Latteur d’avoir accepté de lire et évaluer mon travail.

Finalement, un grand merci à mes proches, qui m’ont soutenu tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Table des matières

I	Introduction	1
II	État de l’art	3
1	Le hêtre	3
1.1	Les besoins stationnels du hêtre	3
1.2	Le hêtre wallon	4
1.3	Le bois de hêtre	6
1.4	Historique de l’utilisation du hêtre	9
1.5	Synthèse : Analyse AFOM du hêtre	10
2	La technologie CLT	11
2.1	Lien entre la structure du CLT et la structure interne du bois	11
2.2	Historique et objectifs du CLT	12
2.3	Le point sur le CLT dans la construction en Belgique	13
2.4	Les éléments limitant la résistance des panneaux	15
2.5	Les exigences en matière de normes pour les bois de structure	16
2.6	Évaluation des propriétés mécaniques de panneaux CLT	22
2.7	Les connaissances en matière de CLT de hêtre	23
3	Objectifs	24
III	Matériel et méthode	25
4	Détermination du nombre d’échantillons	25
5	Étapes de fabrication des panneaux	26
5.1	Sélection et classement des planches	26
5.2	Conditionnement	28
5.3	Dimensionnement	29
5.4	Rabotage et mise à longueur	29
5.5	Mise en plis et encollage des panneaux	30
5.6	Pressage	31
5.7	Découpe finale	32
6	Réalisation des essais	32
6.1	Configuration des essais	32

6.2	Conditions des tests	33
7	Traitement des données	34
7.1	Formules de traitement des données	34
7.2	Analyse visuelle	36
7.3	Analyse statistique	37
IV	Résultats	40
8	Classement et dimensionnement	40
8.1	Classement visuel des lamelles	40
8.2	Dimensionnement des panneaux	40
9	Observations - Analyse visuelle	41
10	Résultats des tests en flexion 4 points	42
10.1	Résultats individuels	42
10.2	Synthèse des résultats	43
11	Lien entre analyse visuelle et résultats chiffrés	46
V	Discussion	48
12	Vraisemblance du protocole et des résultats	49
13	Validation de l'hypothèse posée pour chaque objectif	51
13.1	Objectif 1 : Validation d'une méthode de dimensionnement par des essais pratiques	51
13.2	Objectif 2 : Les propriétés mécaniques contrastées (D24 et D40) des lamelles se reflètent lors de leur utilisation dans un panneau CLT	51
13.3	Objectif 3 : Indépendance de la qualité des lamelles du pli central par rapport à la résistance globale du panneau	53
14	Répercussion des résultats obtenus, pour la scierie	53
15	Apport pour la filière bois	55
VI	Conclusion et perspectives	58
	Bibliographie	60
	Annexes	67

Abréviations

AFOM	Atouts - Faiblesses - Opportunités - Menaces
BMT	Bois modifié thermiquement
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CDAF	Centre de Développement Agroforestier de Chimay
CE	Conformité européenne
CLT	Cross Laminated Timber
FNEF	Fédération Nationale des Experts Forestiers
FCBA	Institut technologique chargé des secteurs de la Forêt, de la Cellulose, de Bois-construction et de l'Ameublement
IPRFW	Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie
LEMSC	Laboratoire Essais mécaniques, Structures et Génie civil (UCLouvain)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MUF	Mélamine-urée-formaldéhyde
OEWB	Office Économique Wallon du Bois
PSF	Point de saturation des fibres
PU	Polyuréthane
RES	Rénovation-Extension-Surélévation
SPW	Service public de Wallonie
TSF	Taillis-sous-futaie

Symboles

a	Distance entre l'appui et le point d'application de la charge du banc d'essai, en mm
b	Largeur d'un panneau CLT, en mm
E	Module d'élasticité, en N/mm^2
$E_{m,0,k}$	Valeur caractéristique à 5% d'exclusion du module d'élasticité en flexion axiale, en N/mm^2
$E_{m,0,moyen}$	Valeur moyenne du module d'élasticité en flexion axiale, en N/mm^2
$E_{m,90,moyen}$	Valeur moyenne du module d'élasticité en flexion transversale, en N/mm^2
$E_{m,g}$	Module global d'élasticité en flexion axiale, en N/mm^2
$E_{m,l}$	Module local d'élasticité en flexion axiale, en N/mm^2
F	Force, en N
$f_{c,0,k}$	Valeur caractéristique à 5% d'exclusion de la résistance à la compression axiale, en N/mm^2
$f_{c,90,k}$	Valeur caractéristique à 5% d'exclusion de la résistance à la compression transversale, en N/mm^2
f_m	Résistance à la flexion axiale, en N/mm^2
F_{max}	Force appliquée pour atteindre le module de rupture, N
$f_{m,0,k}$	Valeur caractéristique à 5% d'exclusion de la résistance à la flexion axiale, en N/mm^2
$f_{m,0,moyen}$	Valeur moyenne de la résistance à la flexion axiale, en N/mm^2
$f_{R,v,k}$	Valeur caractéristique à 5% d'exclusion de la résistance au cisaillement roulant, en N/mm^2
$f_{t,90,k}$	Valeur caractéristique à 5% d'exclusion de la résistance à la traction transversale, en N/mm^2
$f_{t,0,k}$	Valeur caractéristique à 5% d'exclusion de la résistance à la traction axiale, en N/mm^2
$f_{v,k}$	Valeur caractéristique à 5% d'exclusion de la résistance au cisaillement, en N/mm^2
G	Module de cisaillement, N/mm^2
G_{moyen}	Valeur moyenne du module de cisaillement, en N/mm^2
$G_{r,moyen}$	Valeur moyenne du module de cisaillement roulant, en N/mm^2
h	Hauteur d'une lamelle, en mm
H	Hauteur du panneau CLT, en mm
h_2	Hauteur du pli central, en mm
I	Inertie, en mm^4
K	Coefficient
k_s	Facteur de correction pour le passage d'une valeur moyenne à une valeur caractéristique

M	Moment, en $N.m$
M_{max}	Moment maximal, en $N.m$
l	Largeur d'une lamelle, en mm
L	Longueur du panneau CLT, en mm
μ	Moyenne
o	Distance entre les appuis du banc d'essai, en mm
o_1	Distance entre les points de fixation du dispositif de mesure de la flèche locale, en mm
R^2	Coefficient de détermination
S	Section, en mm^2
σ	Écart-type
u	Humidité du bois, en %
u_{ref}	Humidité du bois de référence de 12%
V_k	Valeur caractéristique
V_m	Valeur moyenne
W_g	Flèche globale, en mm
W_l	Flèche locale, en mm
W_v	Déplacement du vérin, en mm

Table des figures

1	Carte de distribution de <i>Fagus sylvatica</i> L. (EUFORGEN, 2009).	3
2	Proportion de la surface forestière de chaque cantonnement constitué par de la hêtraie pure (SPW - Inventaire forestier wallon, 2016).	5
3	Principaux défauts du hêtre : fibre torse, cœur rouge, fente et retrait (Crédits : B. Jourez, trois premières photos - quatrième image : [https://constructionbois.bilp.fr]).	8
4	Exemple de panneau CLT 3 plis et illustration de la rive et de la face pour une planche individuelle.	11
5	Panneau CLT 5 plis utilisé « dans le plan » (gauche) et panneau CLT 5 plis sollicité « hors plan » (droite) (Gagnon et Pirvu, 2011).	11
6	Évolution de la production mondiale de CLT, en m^3 , jusqu'en 2013. Au-delà de 2013, il s'agit d'estimations (Brandner <i>et al.</i> , 2016).	12
7	Répartition des constructions neuves et RES en bois selon le mode de construction utilisé pour l'année 2018 (HoutinfoBois, 2018).	13
8	Schématisation des efforts dans une poutre contrainte en flexion 4 points, librement inspiré de Bary-Lenger <i>et al.</i> (1999).	15
9	Schématisation de la déformation due au cisaillement roulant (Winter <i>et al.</i> , 2008).	15
10	Résistances caractéristique et moyenne.	17
11	Configuration de chargement pour des essais en flexion dont les lamelles ont un rapport largeur/hauteur ≤ 4 , d'un panneau CLT 5 plis (Norme NBN EN 16351).	21
12	Représentation de la loi de Hooke, librement inspiré de Bary-Lenger <i>et al.</i> (1999).	22
13	Proportion de l'influence de la déformation due au cisaillement et à la flexion, selon le rapport longueur/épaisseur (L/H) d'un panneau CLT de 60 mm d'épaisseur, en bois de résineux (Fellmoser et Blass, 2004).	23
14	Chronologie des différentes étapes de la partie pratique de ce mémoire.	25
15	Schéma général de la production des panneaux CLT (Photographies personnelles chez Scidus).	26
16	Exemple d'échauffure (gauche) et de nœud (droite) (Photographies personnelles).	28
17	Exemple de pente globale (gauche) et fil parfaitement droit (droite) (Photographies personnelles).	28
18	Exemple de rabotage non conforme (gauche) et rabotage conforme (droite) (Photographies personnelles).	30
19	Étapes d'encollage pour un seul panneau CLT (Photographies personnelles).	31

20	Dispositif mis en place pour la réalisation des essais en flexion 4 points sur des panneaux CLT dont les lamelles ont un rapport largeur/hauteur ≤ 4 (Photographie personnelle).	32
21	Dispositif mis en place pour la mesure de la flèche locale (Photographie personnelle).	33
22	Délamination du panneau n°3 (Photographie personnelle).	41
23	Exemple de cisaillement roulant observé après essais (Photographie personnelle).	41
24	Compression visible sur le pli supérieur, entre les 2 points d'application de la charge (gauche) et rupture suivant parfaitement la pente de fil au sein d'une lamelle (droite) (Photographies personnelles).	42
25	Rupture au niveau de deux nœuds (gauche) et rupture suivant parfaitement la séparation entre le cœur rouge et le bois blanc (droite) (Photographies personnelles).	42
26	Exemple de mesure de flèches locales acceptables (gauche) et incohérentes (droite).	43
27	Mise en graphique des résultats de l'essai en flexion 4 points du panneau n°22.	43
28	Résistance à la flexion en fonction du module d'élasticité moyen par catégorie de panneau.	44
29	Lien entre l'analyse visuelle et les résultats chiffrés.	46
30	Lien entre la résistance à la flexion et le diamètre des nœuds du pli inférieur. Les chiffres indiquent le numéro du panneau concerné.	47
31	Lien entre la résistance à la flexion et l'angle de la pente de fil locale. Les chiffres indiquent le numéro du panneau concerné. Les nombres entourés en rouge indiquent que ces panneaux possèdent à la fois un nœud et une pente de fil locale sur leur face inférieure.	48
32	Lien entre la résistance à la flexion et l'angle de la pente de fil locale, sans les panneaux présentant également un ou plusieurs nœuds sur leur pli inférieur. Les chiffres indiquent le numéro du panneau concerné.	48

Liste des tableaux

1	Évolution des superficies (en hectares) des hêtraies pures en Wallonie accompagnée de leur proportion quant à leur régime forestier (SPW - Inventaire forestier wallon, 2016).	6
2	Caractéristiques mécaniques du hêtre wallon à 12% (Debleser et Schumacher, 2014).	7
3	Analyse AFOM concernant le bois de hêtre et sa ressource wallonne.	10
4	Comparatif des quatre systèmes constructifs possible pour la construction en bois. (HoutinfoBois, 2012).	14
5	Comparaison du module de cisaillement roulant ($G_{r,moyen}$) pour différentes essences (Ehrhart et al., 2015).	16
6	Module de cisaillement roulant moyen ($G_{r,moyen}$) pour le hêtre, selon différents modes de sciage (Aicher et al., 2016).	16
7	Classes de résistance des bois feuillus en fonction des essais de flexion sur chant : valeurs de résistance et de rigidité (NBN EN 338 : 2016).	18
8	Critères visuels de classement de la norme NF B 52-001-1 (FCBA). En rouge, les éléments à ne pas prendre en compte pour le hêtre, car inappropriés.	20
9	Propriétés mécaniques de CLT de hêtre chargé "hors plan" (Franke, 2016).	24
10	Quantité de panneaux produits pour répondre aux objectifs de ce mémoire .	26
11	Exigences de classement pour les planches destinées au thermotraitement. .	27
12	Valeurs du classement visuel adaptées à la section finale des planches classées.	27
13	Temps d'ouverture et pression mesurés pour chaque production de deux panneaux.	31
14	Données relatives à la configuration du banc d'essai.	36
15	Fréquences des défauts du bois dans le lot de planches classées en D24. . .	40
16	Valeur théorique de la force de rupture obtenue par dimensionnement. . . .	40
17	Valeurs moyennes et écarts-types du module d'élasticité global, du module d'élasticité local et de la résistance à la flexion.	44
18	Coefficient de détermination (R^2) et résultats du test de Fisher (p-valeur) portant sur les régressions linéaires.	45
19	Résultat de l'analyse ANOVA pour les paramètres $E_{m,g}$ et f_m . (DDL signifie degré de liberté, F est la valeur résultante du test de Fisher et $Pr > F$ est la valeur associée à F).	45
20	Valeurs moyennes ($E_{m,0,moyen}$; $f_{m,0,moyen}$) et caractéristiques ($f_{m,0,k}$) finales, corrigées à 12 % et exprimées en $[N/mm^2]$	45
21	Comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'étude de Franke (2016). .	50
22	Comparaison des résultats obtenus avec ceux d'autres études portant sur le CLT.	56

Première partie

Introduction

Ces dix dernières années, la construction bois en Belgique a le vent en poupe. Que ce soit pour leurs qualités esthétiques, structurelles ou dans une optique de développement plus durable, les projets ne font que se multiplier, représentant un peu plus de 10% des nouvelles constructions belges en 2018, contre seulement 6,5% en 2011 (HoutinfoBois, 2018). À l'heure actuelle, les défis ne sont plus nécessairement liés à la construction de maisons individuelles comme cela a pu être le cas par le passé. Le matériau bois cherche à concurrencer le béton et l'acier dans des structures plus imposantes : centres d'affaires, immeubles d'appartements, etc. Autant de possibilités qui offrent un panel varié de constructions.

Plusieurs raisons peuvent expliquer cet engouement. Tout d'abord, le matériau bois possède de nombreuses qualités en rapport avec ses propriétés mécaniques, acoustiques, isolantes, etc. Il a par ailleurs des atouts qui le rendent attractif dans un contexte de nécessaire diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES). Matériau renouvelable, il est considéré comme un réel réservoir de carbone : L'arbre absorbe le CO_2 atmosphérique à partir duquel il produit le bois, ce qui rend ce matériau compétitif en rapport à des matériaux consommateurs d'énergie fossile. Si en outre le matériau valorisé est issu de forêts locales, cela permet d'éviter les émissions de GES liées au transport. Sans compter que cela valorise un savoir-faire et une main-d'œuvre locale. Au-delà de ses atouts, le matériau bois présente également des caractéristiques qui compliquent sa mise en œuvre. Celles-ci sont liées à ses propriétés intrinsèques mais peuvent aussi être dues aux conditions de croissance, avec une variabilité interspécifique. Citons l'hétérogénéité et l'anisotropie¹ du matériau, son hygroscopicité² et sa biodégradabilité.

Actuellement, la majeure partie des entreprises wallonnes de transformation du bois actives dans le domaine de la construction se contente d'une seule essence : l'épicéa (*Picea abies*). Il y a donc une pression sur celui-ci ; en 2017, par exemple, le taux de récolte était de 150% (OEWB, 2017). Sa ressource sur pied diminue annuellement, poussant la réflexion sur la diversification des essences utilisées dans l'industrie du bois au sens large, et dans la construction en particulier. Une essence envisagée en complément est le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), qui représente 12% de la surface forestière wallonne (OEWB, 2017). Cette essence présente de meilleures propriétés mécaniques que l'épicéa (Sell et Kropf, 1990) et possède un prix faible en raison de la raréfaction de ses débouchés. En effet, historiquement utilisé en bois de chauffe puis dans l'ameublement, il est fortement concurrencé, dans ce domaine, par l'industrie des meubles fabriqués à base de panneaux de bois. Il souffre également de la

1. Propriétés différentes suivant la direction envisagée.

2. Capacité d'absorber l'humidité de l'air, provoquant des mouvements au sein du matériau.

concurrence liée à l'intensification du commerce international de ces 30 dernières années, ce à quoi s'ajoutent les exportations massives de grumes de hêtre, surtout à destination de la Chine. Les acheteurs asiatiques menacent les marchés locaux en offrant des prix élevés, ce qui limite l'achat des grumes de hêtre par les scieries wallonnes.

Au vu de ses propriétés et de la ressource sur pied actuellement disponible, et en vue de redynamiser la filière de transformation du hêtre en Wallonie, il est urgent de lui trouver de nouveaux débouchés. D'autant que les risques sanitaires potentiellement imminents qui planent sur cette essence, liés au dérèglement climatique (sécheresses répétées du sol et de l'air) imposent de se préparer à une possible crise sanitaire telle que celle subie actuellement en Europe de l'Ouest avec les scolytes sur l'épicéa, ce qui délivrerait de grandes quantités de bois sur le marché.

Dans ce contexte, « Comment améliorer, ou tout simplement créer des produits répondant à la demande de valorisation du hêtre wallon ? » est la question à laquelle Scidus, scierie partenaire pour ce mémoire, tente de répondre au quotidien. Une possibilité de valorisation du hêtre se trouve notamment dans le domaine de la construction. C'est dans ce contexte que ce mémoire s'inscrit puisqu'il porte sur la mise en œuvre d'essais sur panneaux CLT (*Cross Laminated Timber*) 3 plis réalisés en bois de hêtre, dans l'optique de les utiliser en construction. Le CLT est une technique de fabrication formant des panneaux multicouches, elles-mêmes constituées de lamelles, chaque couche étant encollée orthogonalement vis-à-vis des couches voisines. Ces panneaux sont destinés à être utilisés en tant que murs et planchers. De nombreuses inconnues sont présentes, notamment sur l'utilisation du hêtre en construction ou encore sur les performances mécaniques de panneaux CLT en hêtre.

Dans le but de combler une partie de ces lacunes, l'objectif principal de ce mémoire est de tester les performances mécaniques en flexion de panneaux CLT de hêtre, conçus avec des lamelles de classes de résistance contrastées, estimées par classement visuel selon la norme NF B 52-001-1. L'hypothèse sous-tendant ces tests est que la résistance des panneaux CLT sera proportionnelle à celle des lamelles avec lesquelles ils sont conçus. Pour parvenir à cet objectif, il a été nécessaire d'appliquer la norme de classement visuel du bois de hêtre pour une utilisation en construction, norme française qui vient d'être validée pour son utilisation en Belgique en 2018. Ainsi, les particularités et défauts apparents des lamelles sont recensés afin d'évaluer *a posteriori* leur impact sur les propriétés mécaniques du panneau. De plus, pour chaque catégorie de panneau testée, une comparaison des résultats avec deux méthodes de calcul théorique (méthode gamma et analogie au cisaillement) est effectuée afin de valider l'utilisation de ces méthodes théoriques pour la conception ultérieure d'ouvrages.

Ce présent document s'organise de la façon suivante : une introduction menant aux objectifs, une mise en contexte accompagnée de l'état de l'art, une description de la démarche expérimentale ainsi qu'une analyse des résultats aboutissant sur une discussion de ceux-ci.

Deuxième partie

État de l'art

À la demande des partenaires et avec une vision de bioingénieur-forestier, l'état de l'art se concentre, outre sur la technologie CLT, sur le hêtre et sa ressource en Wallonie. Cela permet de contextualiser l'idée de développement de l'industrie de transformation du bois de hêtre à destination de la construction.

1 Le hêtre

Le hêtre commun (*Fagus sylvatica* L.) est une espèce indigène emblématique de nos forêts européennes, abondamment présente entre le 40° et 55° parallèle nord (Figure 1) bien qu'on le retrouve également plus au sud, en région montagneuse (Latte *et al.*, 2017). Quelques massifs anecdotiques en Sicile, Grèce ou encore Turquie sont par ailleurs répertoriés.

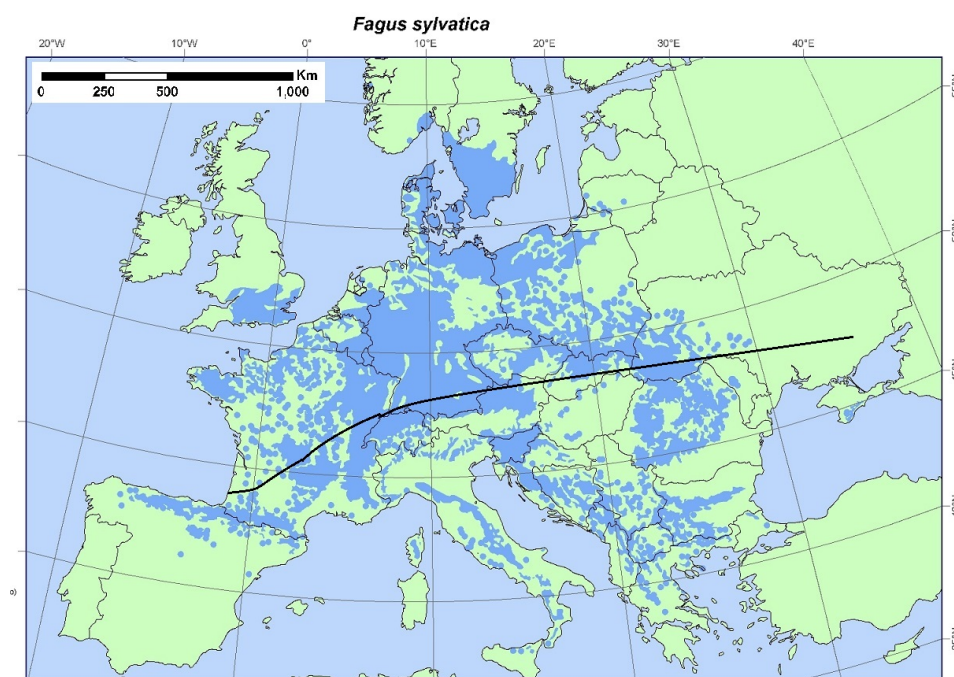


FIGURE 1 – Carte de distribution de *Fagus sylvatica* L. (EUFORGEN, 2009).

1.1 Les besoins stationnels du hêtre³

Bolte *et al.* (2007) considèrent le hêtre comme la principale espèce feuillue en Europe, cette occurrence s'explique par les besoins stationnels du hêtre. La gamme des sols sur lesquels se développe le hêtre balaye des pH allant de 4 (sols acides) à 8 (sols carbonatés),

3. Les données présentées pour ce point proviennent principalement du *Fichier écologique des essences - Fiche du Hêtre commun*, outil de référence en Wallonie.

il supporte par conséquent des stations relativement peu fertiles. Ce comportement flexible s'observe également dans les variations de température que supporte le hêtre, passant par des valeurs extrêmes de -28 et 41°C . Mais cela n'est valable que pour de courtes périodes exceptionnelles puisque la température annuelle moyenne doit se situer entre 3 et 12°C . Ceci explique le caractère montagnard de l'essence dans le sud de son aire de distribution tandis qu'on la retrouve plutôt en plaines et plateaux au nord de la ligne de séparation des habitats, représentée par un trait noir sur la Figure 1 (Latte *et al.*, 2017).

Une autre raison admise de son succès se trouve dans son caractère de tolérance à l'ombrage. En effet, là où il est en station, l'efficacité de l'utilisation des rayons lumineux le rend dominant et grand compétiteur face aux autres essences présentes (von Wuehlisch, 2012). Une fois bien en place, il restreint fortement le passage de la lumière ce qui limite la croissance de la végétation. En revanche, étant très tolérants à l'ombrage, ses jeunes semis peuvent tout de même croître sous le couvert.

La plus grande sensibilité du hêtre se marque par ses exigences hydriques. En effet, l'apport en eau doit être relativement constant au travers des saisons, représentant un minimum de 750 mm de pluie à l'échelle d'une année. Une région sèche ou un sol peu profond présentant une réserve en eau faible ou inexistante sont dès lors défavorables à la croissance de l'essence (von Wuehlisch, 2012). Il en est de même pour les sols présentant de la compaction puisque ces derniers empêchent la bonne circulation hydrique. À contrario, l'essence ne supporte pas l'engorgement racinaire (Rudow, 2014).

1.2 Le hêtre wallon

1.2.1 La ressource sur pied

En Belgique, l'essence est principalement présente au sud du pays, occupant $9,3\%$ de la surface forestière wallonne, soit 45.500 ha de peuplements purs⁴. Ce à quoi il faut ajouter 29.300 ha de peuplements mélangés, principalement hêtre/chêne⁵. Au total, la surface couverte est d'environ 12% de la surface forestière wallonne, ce qui représente un peu plus de 15 millions de m^3 de bois (OEWB, 2017). Au sein de la Wallonie, une disparité est présente, puisque la majeure partie des peuplements se trouvent en basse Ardenne et en région jurassique, comme illustré à la Figure 2 (Alderweireld *et al.*, 2015).

En 2008, 95% des peuplements étaient sous un régime de futaie. La majeure partie des arbres composant la hêtraie wallonne présente à $1,3\text{ m}$ de hauteur, une circonférence de 100 cm et plus avec une proportion de tiges de plus de 220 cm de circonférence non négligeable (Alderweireld *et al.*, 2015). Cela a un impact sur la gestion forestière. Pour cause, les arbres de plus grosses dimensions sont plus difficilement récoltables et demandent des installations adaptées à leur taille lors de leur sciage. De plus, les hêtraies présentaient en

4. Hêtraie pure : peuplement où le hêtre représente plus de $2/3$ de la surface terrière totale (SPW, 2016)

5. Peuplements où les chênes indigènes et le hêtre constituent ensemble plus de $2/3$ de la surface terrière totale sans atteindre individuellement cette valeur (SPW, 2016)

1984 un important déficit de régénération. Ce constat s'est, fort heureusement, amélioré puisque d'importants efforts de plantation et de stimulation de régénération naturelle se sont déroulés entre 1984 et 2008, comblant ainsi le déficit de jeunes peuplements. Cette tendance s'est prolongée au-delà de 2008 puisqu'à l'heure actuelle, le renouvellement et/ou la mise en place de hêtraies sont encore fréquents (Alderweireld *et al.*, 2015). Un dernier point important est la continuelle augmentation du volume sur pied. En effet, le taux de récolte ⁶ n'atteint pas les 90% (OEWB, 2017; IPRFW, 2016).

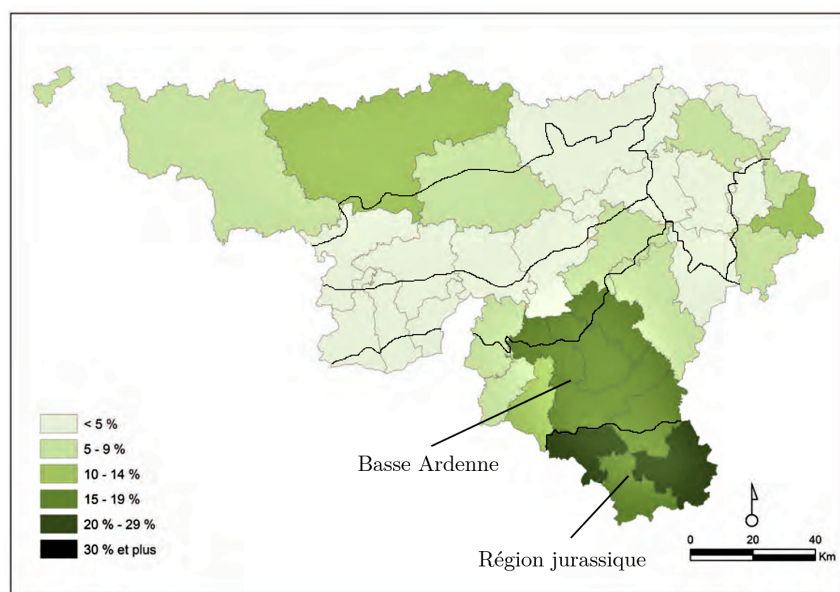


FIGURE 2 – Proportion de la surface forestière de chaque cantonnement constitué par de la hêtraie pure (SPW - Inventaire forestier wallon, 2016).

Afin d'évaluer la qualité de la ressource, une classification visuelle qualitative de bois sur pied ou abattu existe, faisant l'objet d'une norme européenne ⁷. Le système se subdivise en quatre classes (A, B, C et D) correspondant respectivement à une qualité exceptionnelle, une qualité courante, une qualité moyenne et enfin la classe D reprenant tout élément ne correspondant pas à une classe précédente, pour autant que 40% en volume de la grume soit utilisable (Brunin *et al.*, 2012). Les critères de classification se trouvent à l'Annexe 1. La classe la plus représentée pour le hêtre wallon est la qualité C, représentant 75,5% des bois sur pied. Suivi de loin par la qualité B (22,3%) et la qualité A (2,2%). La qualité D n'étant pas prise en compte dans ces statistiques (Alderweireld *et al.*, 2015). Les qualités A et B sont destinées à des usages nobles, comme le déroulage des grumes pour réaliser des panneaux multiplis. La catégorie C, de qualité inférieure, est destinée aux usages en menuiserie ainsi qu'au thermotraitement (Aicher *et al.*, 2016a).

6. Le taux de récolte est le rapport entre la récolte annuelle (m^3) et l'accroissement annuel (m^3) multiplié par 100.

7. NBN EN 1316-1 : Bois ronds feuillus – Classement qualitatif – Partie 1 : Chêne et hêtre.

1.2.2 La sylviculture du hêtre : historique et données actuelles

Depuis la création de la Belgique, la forêt wallonne a connu de nombreux rebondissements, la plupart du temps liés aux besoins anthropiques mais également aux types de propriétaires – publics ou privés (Tallier, 2004). Historiquement, en Wallonie, deux régimes de hêtraies sont observés. Soit le peuplement était sous régime sylvicole de taillis, afin de répondre à une demande importante en bois de chauffe, comme utilisé dans les aires de faulde (Jacquemin *et al.*, 2014; Kervyn *et al.*, 2017). Soit soumis à un régime de futaie ou taillis-sous-futaie, en vue de produire des bois de plus grande dimension tels qu'utilisés pour les chemins de fer. Au fil du temps, les différents traitements sylvicoles ont laissé place, en majeure partie, à la futaie équienne ou irrégulière (Jacquemin *et al.*, 2014; Bastien *et al.*, 2005; Cours, 2017). Certaines de nos futaies actuelles sont donc un reliquat de taillis, ayant un impact considérable sur la qualité des arbres (voir point 1.3.3, page 8).

Ces trente dernières années, la surface occupée par les taillis-sous-futaie n'a cessé de diminuer comme le montre le Tableau 1 (la proportion de taillis est négligeable pour le hêtre). Ces valeurs concernent uniquement les peuplements purs, les données pour les peuplements mélangés sont compliquées à obtenir puisque ces derniers présentent une grande hétérogénéité de structure (Rondeux *et al.*, 1997).

TABLEAU 1 – Évolution des superficies (en hectares) des hêtraies pures en Wallonie accompagnée de leur proportion quant à leur régime forestier (SPW - Inventaire forestier wallon, 2016).

Régime	1984		2008	
	Surface [ha]	%	Surface [ha]	%
Futaie	36.450	93,34	41.700	95,42
Taillis-sous-futaie	2.600	6,66	2.000	4,58
Total	39.050	100	43.700	100

1.3 Le bois de hêtre

1.3.1 Les caractéristiques du bois

Le hêtre est considéré comme un bois lourd, possédant une densité moyenne de 700 kg/m^3 à 12% d'humidité (Armand, 2002). La porosité du bois étant diffuse (illustration Annexe 2, page 68), cela apporte une homogénéité de la densité au sein d'un cerne (Cours, 2017). Il s'agit d'un bois non-durable (classe de durabilité 5)⁸ mais facilement imprégnable-classe 1 d'imprégnabilité, sauf pour le cœur rouge qui n'est pas imprégnable (CIRAD, 2012).

Du point de vue de ses propriétés mécaniques, le bois de hêtre est considéré comme dur et solide. Ci-dessous, un tableau récapitulatif des différentes valeurs de résistance du hêtre face aux sollicitations qu'il peut subir lors de son utilisation. Pour rappel, les propriétés

8. Très peu durable - moins de 5 ans pour un poteau de $50 \times 50 \text{ mm}$ partiellement enfoui dans le sol (HoutinfoBois - norme de référence : EN 350.2)

mécaniques du bois varient selon le plan de sollicitation, cela est dû à l'anisotropie du matériau bois. Au besoin, une explication visuelle des différents plans et des différentes sollicitations est donnée à l'Annexe 2, page 68.

TABLEAU 2 – *Caractéristiques mécaniques du hêtre wallon à 12% (Debleser et Schumacher, 2014).*

Sollicitations	Résistance moyenne [N/mm ²]	Module d'élasticité [N/mm ²]
Compression axiale	56	14.882
Compression transversale	8	852
Traction axiale	53	13.833
Traction transversale	6	1.047
Flexion	90	15.741
Cisaillement	10	1.810

1.3.2 Les principaux défauts du bois

Les auteurs s'accordent sur quatre défauts principaux du hêtre : la fibre torse, le cœur rouge, les contraintes de croissance et le retrait. Ces défauts sont illustrés à la Figure 3, dans l'ordre de description donné ci-dessous.

La fibre torse se définit comme : « Une disposition spiralée des éléments axiaux dans le bois » (Brunin *et al.*, 2012). Il en résulte une diminution des propriétés mécaniques du bois ainsi que des déformations plus conséquentes que la normale lors du séchage. Plusieurs auteurs s'accordent à dire qu'elle possède d'importantes dispositions héréditaires (CDAF, 2011; Teissier du Cross *et al.*, 1981; Armand, 2002).

Le cœur rouge tiendrait son origine de l'oxydation des tissus internes de l'arbre. Cette théorie n'expliquant pas une si forte coloration, d'autres phénomènes seraient associés à cette entrée d'oxygène (Arnal et De Potter, 2011). D'après de nombreuses observations, l'âge est le facteur prépondérant dans l'apparition du cœur rouge, apparaissant à partir de 100-120 ans (Nepveu *et al.*, 2005; Cours, 2017; Becker *et al.*, 2005). Une corrélation positive existe entre la probabilité d'apparition du cœur rouge et le nombre de cicatrices présentes sur le tronc, ces dernières étant des possibles portes d'entrée pour l'oxygène. Il est à noter que cette coloration n'influence pas les propriétés mécaniques du bois (Arnal et De Potter, 2011). La FNEF considère le cœur rouge comme facteur prépondérant dans le prix du hêtre, ce qui diminue son prix de moitié (comparativement aux hêtres blancs) pour les arbres de grosses dimensions.

Les contraintes de croissance résultent d'un phénomène tout à fait naturel selon lequel les fibres subissent des forces internes. Le cœur du tronc subit ainsi une compression, au contraire des éléments périphériques qui sont mis sous tension. Chez le hêtre, ces contraintes sont importantes, contribuant à lui donner l'appellation de bois nerveux. Tant que l'arbre

est sur pied, il connaît un équilibre de ces forces. Une fois l'arbre abattu, les contraintes sont relâchées instantanément. Les parties auparavant sous tension se compriment et inversement. L'éclatement de grumes par libération de ces contraintes peut alors être observé. Elles peuvent également être relâchées lors du sciage, laissant apparaître des fentes importantes. Afin de réduire ce phénomène, il est déconseillé de réaliser le sciage en plot, ce dernier accentuant l'effet des contraintes. La méthode de sciage optimale consiste à sortir des plateaux sur dosse, en tournant le billon de 90° à chaque nouveau trait de scie (Teissier du Cross *et al.*, 1981).

Le retrait est la variation du volume d'une pièce de bois en fonction de son humidité. Le retrait total en volume, sous le point de saturation des fibres⁹ (PSF), est de l'ordre de 12% à 18%, ce qui le classe parmi les bois indigènes les plus sensibles aux variations hygrométriques et contribue à sa qualification de bois nerveux (Teissier du Cross *et al.*, 1981). Le retrait est directement lié à la densité. Au plus cette dernière est élevée, au plus le phénomène de retrait sera important (Armand, 2002). Il est essentiel de différencier le retrait du relâchement des contraintes de croissance. En effet, les contraintes se relâchent immédiatement lors de l'abattage/sciage tandis que le retrait se produit tout au long de la vie de la pièce en bois, dès que son humidité est inférieure au PSF. Il limite donc l'usage du bois pour des utilisations où les conditions d'humidité de l'air varient fortement.



FIGURE 3 – Principaux défauts du hêtre : fibre torse, cœur rouge, fente et retrait (Crédits : B. Jourez, trois premières photos - quatrième image : [<https://constructionbois.bilp.fr>]).

1.3.3 Lien entre la qualité du bois de hêtre et la sylviculture

Une partie des défauts précités est évitable par le biais de la sylviculture. La fibre torse a comme principale explication une origine génétique. Elle peut voir son occurrence diminuer en évitant la transmission de ce caractère aux générations futures. Il est conseillé d'éliminer les tiges présentant ce défaut lors des différents passages en éclaircie. Le cœur rouge, quant à lui, peut être évité en abaissant le terme d'exploitation entre 90 et 120 ans (Schutz et Barnola, 1996).

Comme expliqué précédemment, le pourcentage de retrait est lié à la densité du bois. Or, la densité a un lien direct avec la vitesse de croissance, elle-même influencée par la sylviculture appliquée. De prime abord, hormis dans le bois de tension, plus la croissance est rapide, au plus la proportion de vaisseaux est importante et donc au moins la densité est

9. Le Point de saturation des fibres (ou PSF) correspond au taux d'humidité du bois saturé en eau liée, taux en dessous duquel le bois subit des variations dimensionnelles dues aux variations d'humidité ambiante (CIRAD, 2015).

élevée (Teissier du Cross *et al.*, 1981). Afin d'obtenir cette croissance rapide, c'est-à-dire une largeur de cerne de l'ordre de 4 mm, la surface terrière ne peut dépasser 20 m²/ha après éclaircie (Bastien *et al.*, 2005). Outre cette faible valeur de surface terrière, il est recommandé de travailler avec une répartition spatiale homogène, afin de laisser le bon développement de houppier ce qui permet une croissance soutenue.

Enfin, le point le plus important porte sur l'influence du régime sylvicole sur les contraintes de croissance, défaut le plus contraignant avec le retrait, tous deux impactant la nervosité du bois. Ferrand annonçait en 1982, que « plus la compétition entre arbres est élevée, plus ils développent des contraintes ». Or, la compétition peut être liée à la surface terrière. Polge (1981) confirme ce propos en étudiant l'influence de l'éclaircie sur les contraintes de croissance du hêtre. Les auteurs sont également d'accord sur la présence moins importante des contraintes de croissance sous régime de taillis-sous-futaie (TSF) qu'en futaie équienne (Ferrand, 1982; Becker *et al.*, 2005; Teissier du Cross *et al.*, 1981). En TSF, les tiges du taillis sont en forte compétition durant les premières années de croissance, mais une fois les tiges sélectionnées pour le passage à la futaie, celles-ci connaissent une perte drastique de compétition. Les arbres peuvent alors développer leur houppier. Malheureusement, nous avons vu précédemment que le mode de régime de TSF est devenu anecdotique, laissant place au régime de futaie. Le principe de futaie jardinée (également nommée futaie irrégulière) paraît un bon compromis entre production et qualité du bois, puisqu'elle apporte la même logique que le taillis-sous-futaie, générant moins de contraintes. Le régime équienne est de loin le plus défavorable à l'obtention de bois non ou peu contraint. Il est néanmoins le plus répandu.

1.4 Historique de l'utilisation du hêtre

Historiquement, le hêtre n'eut que très peu d'utilisation. En effet, les défauts cités auparavant rendaient la manutention de ce dernier difficile. Début des années 1900, 80% du hêtre récolté était destiné au bois de chauffage (Armand, 2002). Ensuite, des produits transformés tels que des parquets et meubles sont arrivés petit à petit sur le marché, répondant à la demande croissante en bois. Au milieu du siècle passé, le développement de l'industrie automobile déclencha un nouvel engouement pour le hêtre, utile à la fabrication de la carcas (Armand, 2002). L'arrivée du tranchage, il y a une cinquantaine d'années, permit au hêtre d'être élevé au rang des feuillus dits « nobles », utilisés principalement en plaquage pour l'ameublement. À l'heure actuelle, sa principale utilisation est faite en menuiserie intérieure et ameublement (CDAF, 2011). Cependant, ces 15 dernières années, de nombreuses recherches sont effectuées afin de valoriser le hêtre dans la construction. Les pays où la ressource en hêtre est importante financent de grands projets ¹⁰.

10. Tels que « HêtreFort » (Wallonie), EU-Hardwood ou encore « Bâtir en Hêtre » (Suisse).

1.5 Synthèse : Analyse AFOM¹¹ du hêtre

Au terme de ce premier point concernant le hêtre wallon et sa ressource, les points clefs, tant positifs que négatifs ont été réunis dans le Tableau 3. Certains éléments ont été décrits précédemment tandis que d'autres sont issus de la littérature portant sur le hêtre.

TABLEAU 3 – Analyse AFOM concernant le bois de hêtre et sa ressource wallonne.

Atouts	Faiblesses
Ressource sur pied importante Prix plus bas que l'épicéa Bonnes propriétés mécaniques Couleur claire du bois très appréciée Masse volumique importante *	Défauts du bois rencontrés Courte longueur des planches * Découpe impossible à automatiser Faible résistance aux attaques fongiques et aux insectes
Opportunités	Menaces
Gestion de la qualité du bois en fonction de la sylviculture Valorisation possible en construction	Changements climatiques Crise sanitaire Capacité de transformation (sciage) très réduite

* Comparativement aux essences résineuses

11. Atouts-Faiblesses-Opportunités-Menaces.

2 La technologie CLT

Les panneaux CLT, acronyme de *Cross Laminated Timber* (bois lamellé-croisé en français) se composent de plusieurs couches, appelées « plis », formés de planches de bois d'œuvre assemblées par leurs faces, bien qu'elles puissent également être encollées sur leur rive. Le fil du bois de chaque pli forme un angle de 90° avec celui de son ou ses plis voisins. Le nombre de plis minimum est de 3 (FPInnovations, 2011 ; Cecobois, 2019), une illustration est donnée à la Figure 4. Il n'y a pas de limite maximum de couche, bien que les auteurs proposent généralement un maximum de 11 plis (Brandner *et al.*, 2016; Jeleč *et al.*, 2018).

Les couches peuvent être soit collées (le plus fréquemment) mais également clouées, vis-sées ou chevillées, limitant les besoins en équipement et en connaissance des adhésifs (Harris *et al.*, 2013).

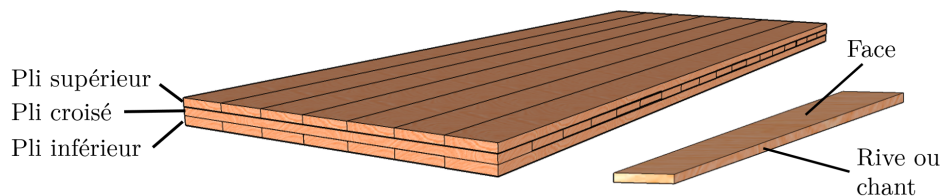


FIGURE 4 – Exemple de panneau CLT 3 plis et illustration de la rive et de la face pour une planche individuelle.

Les panneaux CLT peuvent être utilisés selon deux directions. Premièrement, verticalement (par exemple, en tant que mur) ; ils sont alors sollicités « dans le plan ». Deuxièmement, ils peuvent être utilisés horizontalement (en tant que plancher) ; ils sont alors sollicités « hors plan » (Figure 5).



FIGURE 5 – Panneau CLT 5 plis utilisé « dans le plan » (gauche) et panneau CLT 5 plis sollicité « hors plan » (droite) (Gagnon et Pirvu, 2011).

2.1 Lien entre la structure du CLT et la structure interne du bois

Et si le CLT n'était qu'une « simple » imitation de l'organisation interne du bois ? En effet, au regard de l'organisation des différents éléments du bois feuillu¹², une analogie peut être relevée. La majorité du bois chez les feuillus est composé de fibres libriformes

12. Fibres-trachéides, fibres libriformes, vaisseaux et rayons ligneux.

orientées dans l'axe vertical de l'arbre et ayant un rôle principal de soutien. Les rayons ligneux perpendiculaires aux fibres libriformes contribuent au renforcement de la matrice. À l'échelle de l'ultrastructure, à l'intérieur des parois cellulaires des éléments anatomiques, on retrouve une majorité des microfibrilles dans l'axe vertical (couche S2). Mais, comme précédemment, on retrouve des microfibrilles orientées perpendiculairement à l'axe (couche S1 et S3). Tous les détails sont illustrés à l'Annexe 3, page 70.

Enfin, sans entrer dans les détails, au sein de la microfibrille, la majorité de la cellulose est orientée dans l'axe vertical, donnant la résistance à la fibrille. Cette résistance est renforcée par les hémicelluloses et la lignine dans la direction transversale (Salmén, 2004).

Cette organisation, semblable à tous niveaux, est retrouvée dans le CLT avec une majeure partie des éléments longitudinaux (plis inférieur et supérieur de la Figure 4), générant une résistance à la flexion, ainsi que la couche croisée, transversale aux deux autres couches, renforçant la tenue du panneau.

2.2 Historique et objectifs du CLT

La datation précise de l'apparition de la technologie CLT est incertaine, mais le réel engouement pour cette dernière débuta dans les années 1990 en Allemagne ainsi qu'en Autriche (Brandner *et al.*, 2016; Mohammad *et al.*, 2012; Espinoza *et al.*, 2015). Depuis, comme nous le montre la Figure 6, la production mondiale n'a cessé de croître, traversant les frontières européennes. Cette croissance, dans un premier temps assez lente, est due au changement de mentalité lent mais également au réel besoin d'établissement de normes spécifiques au CLT. À l'heure actuelle, les pays les plus avancés dans la recherche technologique et la production de CLT sont l'Autriche, l'Allemagne et la Suisse en Europe (timber-online.net, non daté) et pour le reste du globe : les États-Unis, le Canada, la Chine, le Japon et la Nouvelle-Zélande (Jeleč *et al.*, 2018). La plupart des essences utilisées sont résineuses, bien que la valorisation de feuillus en CLT fasse l'objet de recherches, principalement en Europe, notamment avec le projet européen EU-Hardwood.

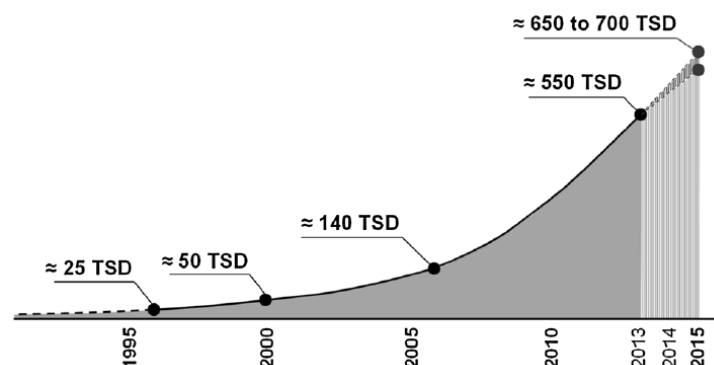


FIGURE 6 – Évolution de la production mondiale de CLT, en m^3 , jusqu'en 2013. Au-delà de 2013, il s'agit d'estimations (Brandner *et al.*, 2016).

Le concept de CLT est né de deux problématiques. Premièrement, la recherche de solutions visant à contrer le retrait total ¹³ du bois présent dans le bois massif, plus important dans la direction tangentielle que dans la direction radiale et longitudinale (retrait total négligeable de l'ordre de 0,1 à 0,3% dans le dernier cas). Deuxièmement, la recherche continue de l'amélioration du rendement matière ¹⁴ par la valorisation d'éléments de petite section résultant du sciage du bois massif (Harris *et al.*, 2013; Espinoza *et al.*, 2015). Un objectif sous-tendu s'y est associé, à savoir la concurrence du CLT par rapport aux constructions en béton et en acier. En effet, avant l'apparition de la technologie, le bois n'était pas vu comme un matériau lourd, assez solide pour construire des bâtiments de grandes dimensions (Gagnon et Pirvu, 2011; Mohammad *et al.*, 2012). Cette manière de penser vient généralement du caractère léger du bois comparativement aux autres matériaux de construction.

2.3 Le point sur le CLT dans la construction en Belgique

Le CLT entre dans la catégorie des panneaux en bois massif, représentant l'un des quatre systèmes constructifs en bois existants ¹⁵. Comme dit dans l'introduction, la construction bois en Belgique représente environ 10 % des constructions résidentielles. Mais, de grandes différences se marquent quant au système utilisé. Les deux graphiques ci-dessous montrent la proportion de chacune des techniques utilisées pour l'année 2018, en construction neuve et en RES ¹⁶. On observe que la part de CLT est très faible par rapport à l'ossature bois, largement majoritaire sur le marché de la construction bois.

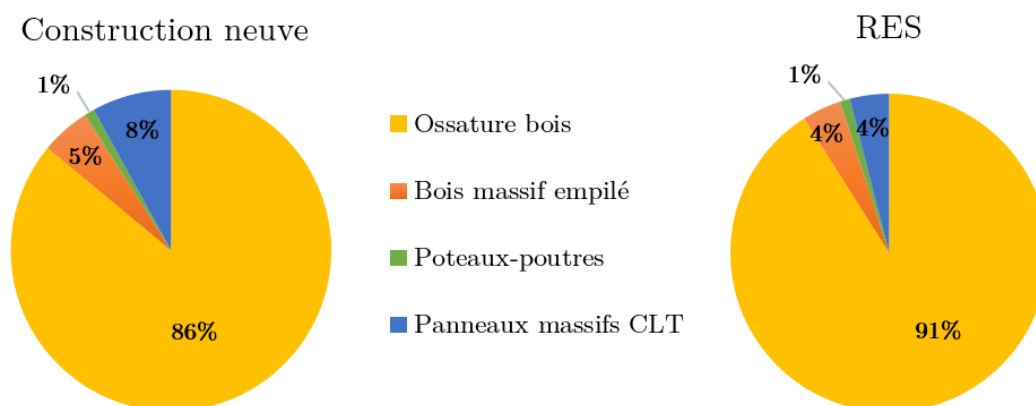


FIGURE 7 – Répartition des constructions neuves et RES en bois selon le mode de construction utilisé pour l'année 2018 (HoutinfoBois, 2018).

13. Le retrait total exprime la variation de volume (en %) que le bois subit lorsque son humidité interne varie du point de saturation des fibres (32% pour le hêtre) à 0%.

14. Le rendement matière exprime la quantité de produits finis obtenus par une quantité initiale de matière première, en %.

15. Les trois autres systèmes sont : l'ossature bois, le poteaux-poutres et le bois empilé.

16. Rénovation, Extension, Surélévation.

2.3.1 Les avantages et inconvénients du CLT par rapport aux autres moyens de construction en bois

Le Tableau 4 compare les différents systèmes constructifs en Belgique. Les paramètres notés en gras représentent les avantages clefs de la technologie CLT. Outre ces éléments, il existe de nombreux autres avantages tels que : faible épaisseur des murs, résistance au feu ou encore comportement favorable face aux tremblements de terre (Espinoza *et al.*, 2015). C'est pour ce dernier avantage que le Japon et la Nouvelle-Zélande entreprennent d'importantes recherches dans ce domaine.

Les principaux désavantages du CLT sont : les contraintes de manutentions des pièces de grande taille, les équipements nécessaires à la réalisation des panneaux (notamment en matière de presse), la sensibilité très élevée à la reprise d'humidité lors du transport et de l'installation sur chantier. Enfin, le coût de cette technologie est un frein important à son emploi. Ce phénomène est renforcé avec l'utilisation d'essence feuillue, dont le coût de la manutention en scierie est très élevé (Franke, 2016).

TABLEAU 4 – Comparatif des quatre systèmes constructifs possible pour la construction en bois. (HoutinfoBois, 2012).

Légende : +++ = excellent, ++ = très bon et + = bon. En gras, les avantages clefs du CLT.

Systèmes constructifs	Ossature bois	Bois empilés	Panneaux massifs (CLT)	Poteaux-poutres
Nombre de niveaux maximum	Rez+2+toiture	Rez+1+toiture	Rez+6	Rez+4
Facilité de mise en oeuvre	++	+++	+++	++
Transport et manutention	+++	++	+	++
Possibilité de préfabrication	+++	+++	+++	++
Économie de système structurel	++	++	+	+
Rapidité de mise en oeuvre	++	+	+++	+
Facilité de transformation intérieure	++	+	++	+++
Potentiel structurel (porte-à-faux, portées)	++	+	+++	+++
Souplesse d'aménagement intérieur	+	+	++	+++
Stabilité au tassement	++	+	+++	+++
Potentiel d'isolation	+++	+	+	++
Inertie thermique de la construction	+	++	+++	+
Possibilité de bois apparent à l'intérieur	+	+++	+++	++
Application courante	Habitation individuelle	Habitation individuelle	Habitation individuelle, Immeuble	Habitation individuelle, Petits immeubles

2.4 Les éléments limitant la résistance des panneaux

Les auteurs d'ouvrages de référence s'accordent à dire que, pour des panneaux sollicités « hors plan », les couches de grandes longueurs sont limitées par leur résistance à la flexion. Tandis que les couches croisées sont limitées par leur résistance au cisaillement roulant (Wallner-Novak *et al.*, 2014; Gagnon et Pirvu, 2011; Mohammad *et al.*, 2012; Aicher *et al.*, 2016a). En effet, la ou les couches croisées ne sont pas soumises à la contrainte longitudinale (Wallner-Novak *et al.*, 2014). Un troisième élément crucial est la résistance à la délamination des joints de colle, ce point n'est cependant pas traité dans ce travail. L'influence, sur la résistance globale, du premier ou second paramètre est fonction des dimensions du panneau.

2.4.1 La résistance en flexion

La flexion est un mode de sollicitation d'élément longitudinal combinant à la fois de la compression au-dessus de l'axe neutre de l'élément, de la traction sur la partie inférieure ainsi que du cisaillement. Ces différents éléments sont schématisés à la Figure 8.

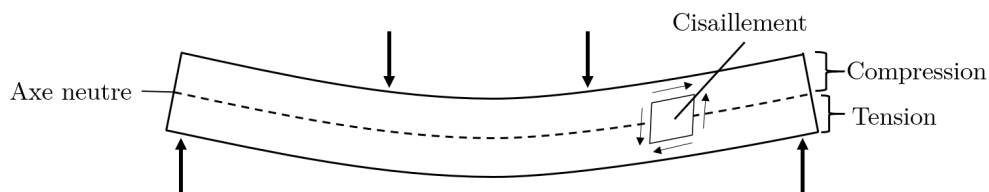


FIGURE 8 – Schématisation des efforts dans une poutre contrainte en flexion 4 points, librement inspiré de Bary-Lenger *et al.* (1999).

La résistance à la flexion est donnée par la classe de résistance des planches (voir explication point 2.5.1, page 17).

2.4.2 Le cisaillement roulant

Définition : « Le cisaillement roulant est défini comme une contrainte de cisaillement menant à des déformations de cisaillement dans un plan perpendiculaire à la direction des fibres » (Fellmoser et Blaß, 2004). Le phénomène est illustré à la Figure 9.

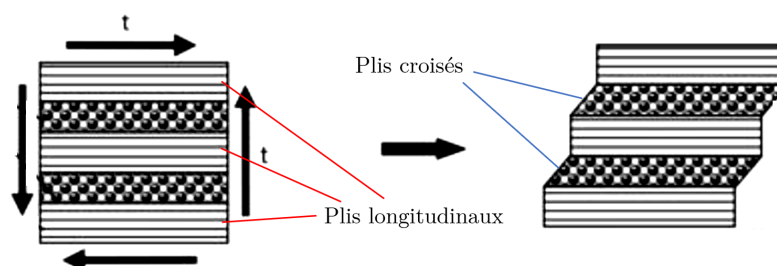


FIGURE 9 – Schématisation de la déformation due au cisaillement roulant (Winter *et al.*, 2008).

Il est fonction principalement de l'essence du bois mais également du mode de sciage de la planche : quartier, faux-quartier et dosse (Gagnon et Pirvu, 2011). L'étude d'Ehrhart *et al.* (2015), donne les modules de cisaillement roulant moyen pour différentes essences, avec une découpe des planches sur dosses (Tableau 5).

TABLEAU 5 – Comparaison du module de cisaillement roulant ($G_{r,moyen}$) pour différentes essences (Ehrhart *et al.*, 2015).

Essence	Module de cisaillement roulant moyen : $G_{r,moyen}$ [N/mm^2]
Épicéa (<i>Picea abies</i> L. Karst.)	50
Frêne (<i>Fraxinus excelsior</i> L.)	350
Peuplier (<i>Populus spp.</i>)	120
Hêtre (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	350
Pin sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	150

On remarque une valeur élevée pour le module de cisaillement du hêtre, environ 7 fois supérieure à celle de l'épicéa, essence principale utilisée pour la fabrication du CLT. Une autre étude réalisée par Aicher *et al.* (2016a) s'applique à déterminer le module de cisaillement roulant du hêtre en fonction de son mode de découpe (Tableau 6).

TABLEAU 6 – Module de cisaillement roulant moyen ($G_{r,moyen}$) pour le hêtre, selon différents modes de sciage (Aicher *et al.*, 2016).

Mode de découpe	Module de cisaillement roulant moyen : $G_{r,moyen}$ [N/mm^2]
Dosse	381
Faux-quartier	419
Quartier	298
Tout type	370

Toutes ces données concernent des planches possédant un rapport largeur/hauteur (l/h) > 4. Si ce ratio est inférieur à 4, alors la résistance au cisaillement roulant diminue (Brandner *et al.*, 2016; Ehrhart *et al.*, 2015).

2.5 Les exigences en matière de normes pour les bois de structure

Les principes et calculs de structure pour la construction bois en Union européenne sont réunis dans un outil, énoncé sous forme de norme : l'Eurocode 5¹⁷. Ce dernier, spécifiquement appliqué au bois, vise à l'harmonisation des savoir-faire en termes de construction, et ce, à l'échelle européenne. Cela permet une compréhension et un libre-échange de produit

17. Appellation complète de la norme : NBN EN 1995-1-1.

entre les différents membres de l'Union européenne. Une connaissance des propriétés mécaniques du matériau bois est nécessaire afin d'utiliser les formules proposées dans l'Eurocode. Cependant, les calculs de structure à partir d'élément CLT ne sont pas encore intégrés dans l'Eurocode 5, mais cela ne saurait tarder au vu du réel engouement autour de celui-ci. De plus, depuis le 1er janvier 2012, les matériaux bois utilisés en structure sont sous obligation d'un marquage **CE**^{18 19}. Il est donc nécessaire que tout bois utilisé en structure soit marqué **CE**, sauf conditions particulières²⁰. Ce marquage permet d'assurer la qualité d'un produit face aux exigences des différentes normes de construction. Il exige un classement, visuel ou mécanique, afin de déterminer la résistance de la pièce face à une sollicitation en flexion axiale. Cette valeur permet de déterminer la classe de résistance, associée à la lettre D pour les feuillus et C pour les résineux. Par exemple, D24 exprime une résistance de 24 N/mm^2 sous une sollicitation en flexion pour un feuillu.

2.5.1 Les classes de résistance pour le bois massif

La résistance en flexion est chiffrée avec une valeur caractéristique, au percentile 5 selon une loi normale. Cela signifie que 95% des éléments testés obtiennent au minimum la valeur caractéristique (V_k) lorsqu'ils sont testés en flexion. Une explication visuelle est donnée à la Figure 10, V_m exprimant la valeur moyenne de la distribution normale (aussi appelée μ en théorie statistique).

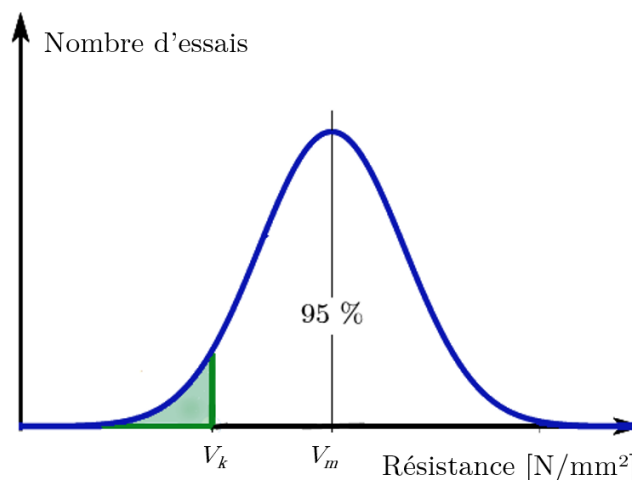


FIGURE 10 – Résistances caractéristique et moyenne.

L'expression de la valeur caractéristique (V_k) en fonction de la valeur moyenne (V_m) se fait via l'équation²¹ :

$$V_k = \mu - k_s * \sigma \quad (1)$$

18. **CE** : Conformité européenne.

19. Les informations de ce paragraphe proviennent d'un document intitulé : « Le marquage **CE** des bois de structure à section rectangulaire et le classement pour leur résistance » co-rédigé par Deneufbourg F., Defays E. et Frère H. (2011).

20. Par exemple, lorsque le produit construit n'est pas mis sur le marché.

21. Provient de la norme NBN EN 14358.

Le facteur k_s est égal à 1,64 pour une population de taille infinie, ce qui n'est jamais le cas en pratique. Dès lors, la norme NBN EN 14358 donne la valeur de ce facteur en fonction du nombre d'éprouvettes testées.

La détermination de cette résistance permet alors de déduire les valeurs de résistance théorique selon d'autres sollicitations, ainsi que les différents modules d'élasticité et de cisaillement selon la norme NBN EN 338 : 2016 (Tableau 7). De ce fait, le classement par classe de résistance apporte toutes les données nécessaires au dimensionnement pour la conception de structure. Les données présentées dans la norme ont été déterminées pour des éléments sollicités en flexion sur chant (c'est-à-dire que les chants sont horizontaux et les faces placées verticalement).

TABLEAU 7 – Classes de résistance des bois feuillus en fonction des essais de flexion sur chant : valeurs de résistance et de rigidité (NBN EN 338 : 2016).

<i>Sollicitations</i>	<i>Symbole</i>	D24	D40
Propriétés de résistance en N/mm^2			
Flexion axiale	$f_{m,0,k}$	24	40
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	14	24
Traction transversale	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	21	27
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	4,9	5,5
Cisaillement	$f_{v,k}$	3,7	4,2
Propriétés de rigidités en kN/mm^2			
Module d'élasticité moyen en flexion axiale	$E_{m,0,moyen}$	10	13
Module d'élasticité caractéristique à 5 % d'exclusion en flexion axial	$E_{m,0,k}$	8,4	10,9
Module d'élasticité transversal moyen	$E_{m,90,moyen}$	0,67	0,87
Module de cisaillement moyen	G_{moyen}	0,63	0,81

2.5.2 Le classement

Comme cité précédemment, le classement peut être soit visuel, soit mécanique. Les classements mécaniques sont, en général, réalisés sur les essences résineuses, qui circulent sur des chaînes de productions automatisées. Dans le cas du hêtre, il n'existe pas de classement mécanique réalisé en Belgique. Il faut alors se tourner vers une norme de classement visuel. Malheureusement, lors de la mise en place du marquage **CE**, il n'existait pas en Belgique de norme de classement visuel pour le hêtre. Cette essence n'était donc pas autorisée en construction. La recherche s'est alors tournée vers des normes étrangères, car ces dernières sont applicables sous 2 conditions : posséder un classeur agréé et ne pas avoir de restriction territoriale de la norme.

La norme NF B52-001-1²²

Cette norme est à l'origine destinée aux essences résineuses. En 2011, la norme a intégré les chênes indigènes²³, juste avant la mise en place du marquage **CE**. Au fil des années et des études menées, plusieurs essences ont intégré la norme. C'est ainsi le cas du hêtre, ajouté dans la mise à jour de janvier 2016 (NF B 52-001-1/A3). Le FCBA (France) avait entrepris la caractérisation du hêtre français lors d'une étude démarrée en 2011 (Richter, 2015). Une étape ultime rebutait encore l'utilisation de la norme en Belgique : sa restriction territoriale. Il était donc nécessaire de valider ce classement pour le hêtre belge. Cette tâche a été réalisée par HoutinfoBois, sous la direction de D. Reuling et H. Frère en 2018. Cette validation réalisée permet alors l'emploi de la norme pour ce travail.

Il faut bien comprendre que la norme n'a en aucun cas été adaptée au hêtre mais il s'agit d'une validation de l'utilisation de la norme pour cette essence. On peut donc voir dans le Tableau 8 ci-dessous, des éléments inappropriés notés en rouge pour le classement visuel du hêtre. En effet, selon une étude dendrochronologique menée par Latte *et al.* (2015), la largeur de cerne du hêtre en Belgique ne dépasse pas 6 mm. De plus, le défaut "gui" ne s'installe jamais sur le hêtre. Enfin, la gélivure²⁴ et la roulure²⁵ ne sont jamais présentes chez le hêtre (Brunin *et al.*, 2012).

Tout comme pour la norme EN 338, cette norme est valable pour des éléments employés sur chant. Or, dans une conception d'élément CLT employé "hors plan", les éléments sont encollés sur leurs faces.

Note : La présence de pente de fil locale est due principalement à la présence d'une branche à proximité ou d'une blessure extérieure. *A contrario*, la pente de fil globale est présente sur toute la longueur de la planche.

Un dernier mot d'explication semble nécessaire quant aux classes déterminées par cette norme. La norme considère 4 classes de résistance (D40, D35, D24 et D18). Cependant, les classes étant très proches les unes des autres, elles ont été réunies selon deux combinaisons, afin d'éviter un chevauchement trop important des classes. Selon ce principe, lors d'un classement en D40, il n'est pas possible d'extirper des éléments en D35, cette classe étant trop proche de la classe D40 (Defays, 2017). Ainsi, la combinaison H1 réunit les classes D40 et D24 tandis que la combinaison H2 reprend les classes D35 et D18 (Tableau 8). Il est donc possible de travailler que dans une des deux combinaisons à la fois. De ce fait, des éléments classés en D24 peuvent tout à fait comporter les propriétés mécaniques de la classe D35.

Pour ce travail, la combinaison H1 (Classes D40 et D24) a été sélectionnée.

22. Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus - Partie 1 : bois massif.

23. Chêne sessile et pédonculé.

24. Fente longitudinale radiale produite par l'action du froid (Brunin *et al.*, 2012).

25. Décollement de deux cernes annuels successifs provoquant une fente totale (circulaire) ou partielle (en arc de cercle) (Brunin *et al.*, 2012).

TABEAU 8 – Critères visuels de classement de la norme NF B 52-001-1 (FCBA). En rouge, les éléments à ne pas prendre en compte pour le hêtre, car inappropriés.

Classes/critères		H1-1 - D40	H2-2 - D35	H1-3 - D24	H2-4 - D18
Largeur de cernes (<i>mm</i>)		<10 <i>mm</i>			
Diamètre des nœuds - sur la face - sur la rive		<1/5 larg. <1/5 épais.	<1/2 larg. <1/2 épais.	<3/5 larg. <3/5 épais.	<3/4 larg. <3/4 épais.
Pente de fil locale		<20 % - 1 : 5		<40 % - 1 : 2,5	
Pente de fil global		<10 % - 1 : 10		<20 % - 1 : 5	
Flaches		Moins de 10 % de la largeur de la face et de la rive sur moins de 25 % de la longueur			
Altérations biologiques - bleu - traces de gui - piqûres noires ²⁶ - échauffure		Admis Non admis Admises si elles apparaissent sur une seule face Non admise			
Déformation maximale en <i>mm</i> sur une longueur de 2 <i>m</i> - flèche de face (<i>mm</i>) - flèche de rive (<i>mm</i>) - gauchissement		<10 <8 1 <i>mm</i> / 25 <i>mm</i> large		<20 <12 2 <i>mm</i> / 25 <i>mm</i> large	
Tuilage		Maximum 5 <i>mm</i>			
Fentes	Gélivure	Exclus			
	Gerces	Permisses			
	Roulure	Exclus			
	Fentes de cœur	Exclus			
	Fentes traversantes	Admissible en bout avec une longueur <à la largeur			
	Fentes non traversantes	≤ 1/3 de la longueur		Admises	
Discoloration - coeur rouge		Permis			

2.5.3 Les essais

Le CLT a connu une réelle avancée à l'automne 2015 avec l'adoption d'une nouvelle norme : « NBN EN 16354 : 2015 – Structure en bois - Bois lamellé croisé - Exigences ». Cette norme se repose sur les principes de l'EN 408 : 2010+A1²⁷, avec une adaptation pour le CLT. Malheureusement, cette norme n'est applicable que pour les résineux et les peupliers. Cependant, étant la seule réglementation existante pour le bois lamellé-croisé, elle est également utilisée pour d'autres essences, notamment le hêtre. Elle fournit les exigences et configurations à réaliser pour les essais pratiques.

26. Les piqûres noires chez le hêtre sont dues à *Trypodendron domesticum* et *Trypodendron signatum* (Huart et Rondeux, 2001).

27. Structure en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques.

2.5.4 Les essais en flexion

Dans le cas de panneau CLT, la configuration et les mesures à respecter pour une sollicitation en flexion 4 points sont données par la norme EN 16351 (Figure 11). Lors de tels essais, les mesures de la flèche globale, locale et de la force appliquée sur le panneau sont effectuées.

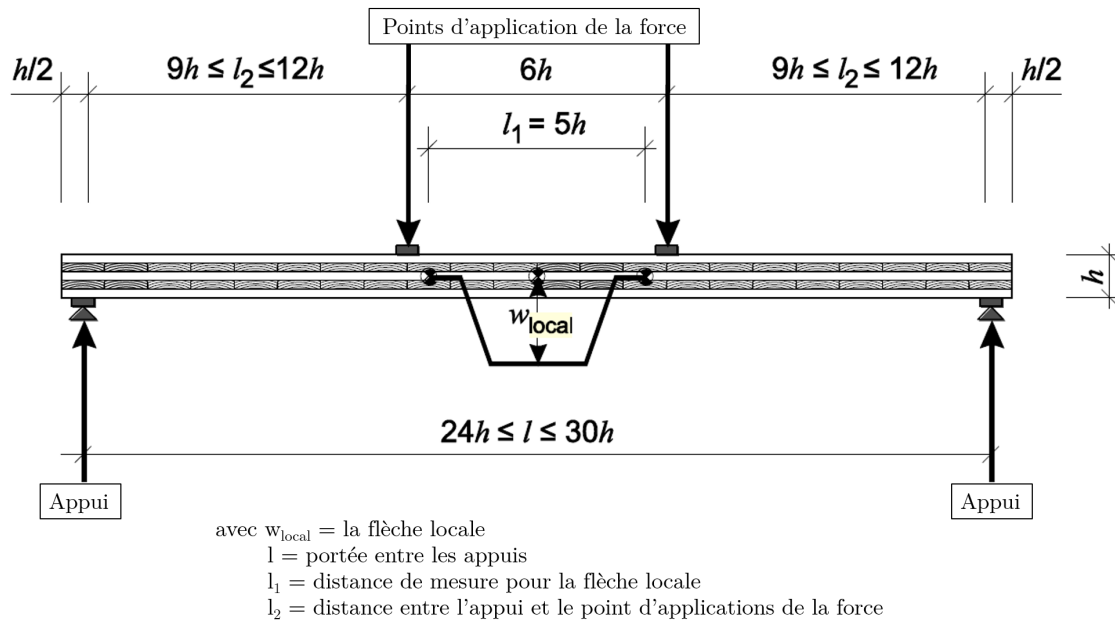


FIGURE 11 – Configuration de chargement pour des essais en flexion dont les lamelles ont un rapport largeur/hauteur ≤ 4 , d'un panneau CLT 5 plis (Norme NBN EN 16351).

La réponse de la déformation (exprimée par la flèche) en fonction de la contrainte (force appliquée) suit la loi de Hooke, comportant une phase élastique précédant une phase plastique menant jusqu'à la rupture (Figure 12). Le module d'élasticité (E) correspond à la pente de la droite de la phase élastique. La pente de cette droite est calculée entre $0,1 \times F_{max}$ et $0,4 \times F_{max}$, là où le graphe est considéré comme parfaitement linéaire.

La mesure de la flèche locale s'opère entre les deux points d'application de la force (Figure 11), où l'effort tranchant est nul. Tandis que la flèche globale prend en compte les déformations dues au moment fléchissant (M) et à l'effort tranchant (V).

Conditions

Selon la norme EN 408+A1, la rupture du panneau doit se faire dans un temps imparti de 300 ± 120 secondes. L'humidité du bois, quant à elle, doit être égale à 12 ± 3 %. Afin de minimiser le poinçonnement local et l'influence des appuis sur la mesure de la flèche locale, la largeur des deux appuis supérieurs (points d'application de la force, Figure 11) doit être inférieure ou égale à la moitié de la hauteur du panneau.

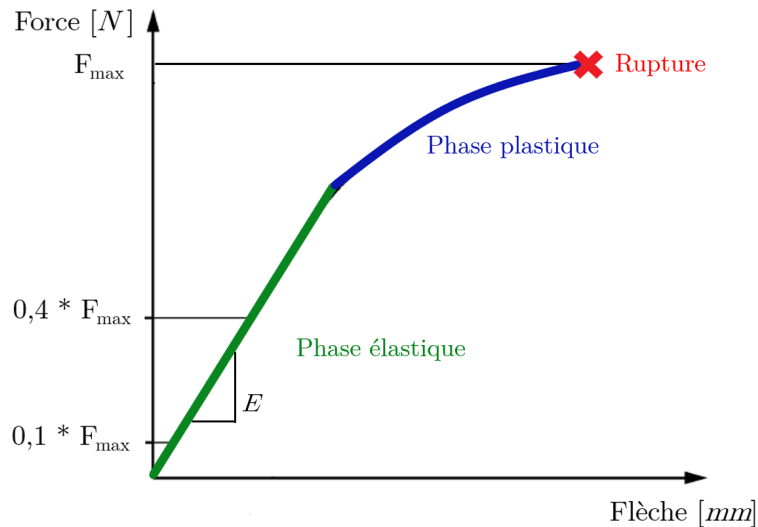


FIGURE 12 – Représentation de la loi de Hooke, librement inspiré de Bary-Lenger et al. (1999).

2.6 Évaluation des propriétés mécaniques de panneaux CLT

Pour évaluer les caractéristiques mécaniques d'un panneau CLT, il existe deux méthodes :

- I. Premièrement, le test de résistance de panneau pris au hasard dans un lot en production. Cette méthode n'est pas recommandée car au moindre changement (changement de colle, de largeur de lamelle, ...) les tests sont à recommencer (Gagnon et Pirvu, 2011; Jeleč et al., 2018; Mohammad et al., 2012).
- II. La deuxième méthode consiste à prédire le comportement mécanique du panneau à partir des caractéristiques des lamelles qui le composent. On parle alors de dimensionnement. Il faut ensuite procéder à une validation de celui-ci. Mais une fois la méthode de dimensionnement validée, celle-ci peut être appliquée à des changements de conformation (par exemple, la hauteur du panneau). Ces méthodes doivent porter une attention particulière sur la résistance à la flexion et le cisaillement roulant.

Ce mémoire suit le principe de la deuxième méthode puisqu'un des objectifs est de valider deux méthodes de dimensionnement par des essais pratiques.

2.6.1 Les méthodes de dimensionnements existantes

Il existe plusieurs méthodes afin de réaliser le dimensionnement de panneaux CLT. Le dimensionnement ne faisant pas l'objet de ce travail, ces méthodes ne seront pas détaillées mais simplement citées. Les quatre méthodes communes sont (Gagnon et Pirvu, 2011) :

- L'analogie au cisaillement ;
- La méthode de Timoshenko ;
- La méthode gamma ;
- La méthode k ;

Il n'y a actuellement pas de méthode universellement acceptée. Cependant, Thiel et Schickhofer (2010) ont souligné que la méthode k offrait les moins bons résultats par rapport à la réalité. Cette méthode ne prend pas en compte la déformation due au cisaillement. De plus, les trois autres méthodes offrent des valeurs justes pour un rapport $L/H > 15$ ²⁸. La Figure 13 montre la proportion de l'influence de la déformation à la flexion et de celle du cisaillement en fonction de ce rapport L/H . L'analogie au cisaillement est meilleure que la méthode gamma (Blass et Fellmoser, 2004). Quant à la méthode de Timoshenko, la plus juste, elle est en pratique rarement utilisée car plus compliquée à mettre en œuvre.

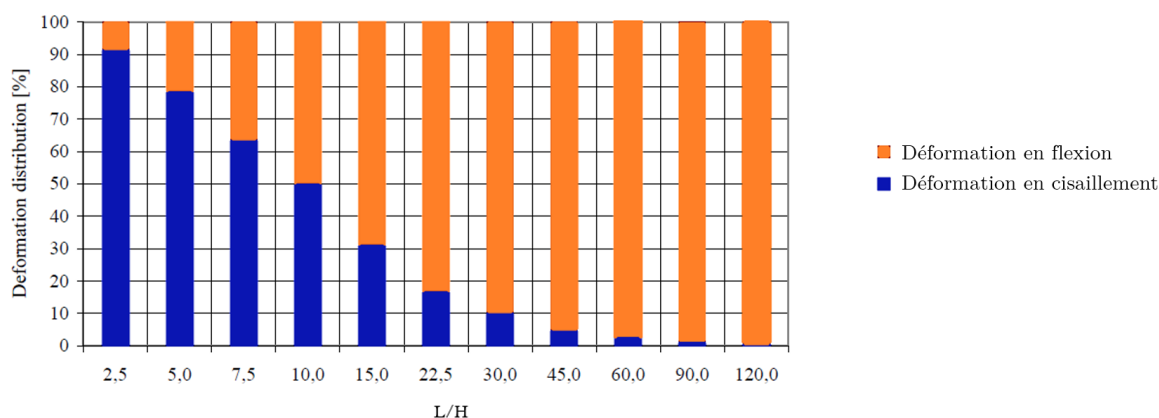


FIGURE 13 – Proportion de l'influence de la déformation due au cisaillement et à la flexion, selon le rapport longueur/épaisseur (L/H) d'un panneau CLT de 60 mm d'épaisseur, en bois de résineux (Fellmoser et Blass, 2004).

2.7 Les connaissances en matière de CLT de hêtre

Il existe peu d'études concernant le CLT de hêtre. D'une part par la faible tendance à utiliser le hêtre dans la construction, mais également car il existe de réelles lacunes quant au CLT en matière de normes et réglementations (Thiel et Schickhofer, 2010; Espinoza *et al.*, 2015; Wallner-Novak *et al.*, 2014; Jeleč *et al.*, 2018).

La majorité des études réalisées sur le hêtre porte sur la détermination des propriétés mécaniques de planches ou lamelles unitaires. Franke (2016) a réalisé une étude sur le CLT de hêtre afin de prouver le potentiel de celui-ci comparativement à l'épicéa commun (*Picea abies*) (Tableau 9). Malheureusement, cette étude ne détaille pas la qualité des lamelles utilisées pour la réalisation des panneaux.

Toutes les valeurs présentées pour le hêtre sont nettement supérieures à celle de l'épicéa. En ne regardant que ces propriétés mécaniques, le hêtre a donc un bien meilleur potentiel que l'épicéa, en matière de CLT.

²⁸. L : la longueur du panneau et H : l'épaisseur du panneau. À ne pas confondre avec le rapport l/h , qui concerne une lamelle.

TABLEAU 9 – *Propriétés mécaniques de CLT de hêtre chargé "hors plan" (Franke, 2016).*

	Symbole	Valeurs caractéristiques pour le hêtre [N/mm ²]	Valeurs caractéristiques pour l'épicéa [N/mm ²]
Résistance à la flexion	$f_{m,0,k}$	43,8	26,4
Résistance au cisaillement roulant	$f_{R,v,k}$	3,8	0,8
Résistance à la compression axiale	$f_{c,0,k}$	61,5	12,6
Résistance à la compression transversale	$f_{c,90,k}$	9,3	2,5
Résistance au cisaillement	$f_{v,k}$	5,9	4
Module d'élasticité moyen en flexion axiale	$E_{m,0,moyen}$	12.306	9.700

3 Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier l'impact du classement visuel selon la norme NF B 52-001-1 sur le comportement mécanique du CLT en hêtre, utilisé ultérieurement horizontalement (i.e. les lamelles de bois constitutives des panneaux sont donc utilisées sur leur face, et non sur leur chant comme le veut la norme). Pour atteindre cet objectif, plusieurs sous-objectifs ont été dégagés, chacun comportant une hypothèse.

- **Objectif 1** : Prédire théoriquement la force de rupture de panneaux CLT, composés de lamelles de bois de différentes qualités mécaniques, sous une sollicitation en flexion et valider ces prédictions par des essais pratiques.

Hypothèse : Les valeurs prédites concordent avec les valeurs réelles.

- **Objectif 2** : Comparer des panneaux de propriétés mécaniques contrastées.

Hypothèse 2 : Les panneaux réalisés avec des lamelles de classe de résistance inférieure présentent une moins bonne résistance à la flexion que les panneaux constitués de lamelles de classe supérieure.

- **Objectif 3** : Confirmer la théorie selon laquelle la couche croisée d'un panneau CLT 3 plis sert de liaison entre les plis inférieur et supérieur en conséquence de quoi la qualité du bois n'apporte pas de différence à la qualité du panneau.

Hypothèse 3 : Le pli central n'influence pas la résistance globale du panneau, quelles que soient ses propriétés mécaniques.

Troisième partie

Matériel et méthode

Une des originalités de ce mémoire est d’avoir été réalisé en partenariat avec la scierie Scidus, spécialisée dans le sciage des feuillus et particulièrement du hêtre mais aussi du peuplier. Scidus, partie intégrante du groupe liégeois MOBIC a vu le jour en 2015. Anciennement scierie Dusausoit, le rachat de la scierie familiale spécialisée en hêtre s’est vu apporter d’innovants produits sur le marché, tels que le bois modifié thermiquement (BMT), produit phare de l’entreprise. Dans l’optique d’apporter des données quant à leur recherche de confection de nouveaux produits à base de hêtre, leur choix s’est porté sur des panneaux en bois lamellé-croisé (CLT).

Les différentes étapes du déroulement de ce mémoire sont présentées à la Figure 14. Les longs délais entre les différentes étapes se justifient selon plusieurs facteurs :

- Approche théorique de la problématique (au départ destinée des étudiants en ingénierie civile ou industrielle) ;
- Délais de production ;
- Synchronisation avec le laboratoire d’essais (LEMSC).

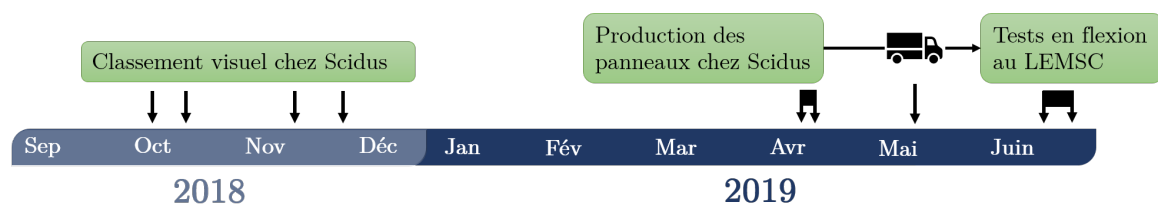


FIGURE 14 – Chronologie des différentes étapes de la partie pratique de ce mémoire.

Cette partie débute par une description complète du classement et de la fabrication des panneaux CLT. Ensuite, elle détaille la réalisation des essais en flexion 4 points. Enfin, une explication des différents moyens de traitement des résultats récoltés est donnée.

4 Détermination du nombre d'échantillons

Pour répondre aux différents objectifs de ce travail, la prise de décision du nombre de panneaux à confectionner s’est faite en concertation avec Scidus. Au total, 10 panneaux de $1,2\text{ m} \times 2,5\text{ m} \times 75\text{ mm}$ ont été fabriqués : 3 panneaux CLT composés entièrement de D24, 3 autres uniquement composés de D40 ainsi que 4 panneaux de CLT mixtes, c’est-à-dire avec une qualité D40 pour les plis extérieurs et une qualité D24 pour le pli central (Tableau 10). Les panneaux mixtes sont conçus pour répondre à l’objectif 3. Tous ces panneaux sont ensuite testés par des essais en flexion 4 points, chargés « hors plan ».

TABLEAU 10 – *Quantité de panneaux produits pour répondre aux objectifs de ce mémoire*

Appellation		D24	D40	Mixte
Classe de résistance mécanique du	pli supérieur	D24	D40	D40
	pli croisé	D24	D40	D24
	pli inférieur	D24	D40	D40
Nombre de panneaux produit		3	3	4

5 Étapes de fabrication des panneaux

La Figure 15 illustre les différentes étapes de production des panneaux CLT. Une description de chaque étape est réalisée en soulignant les conditions et les difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre.

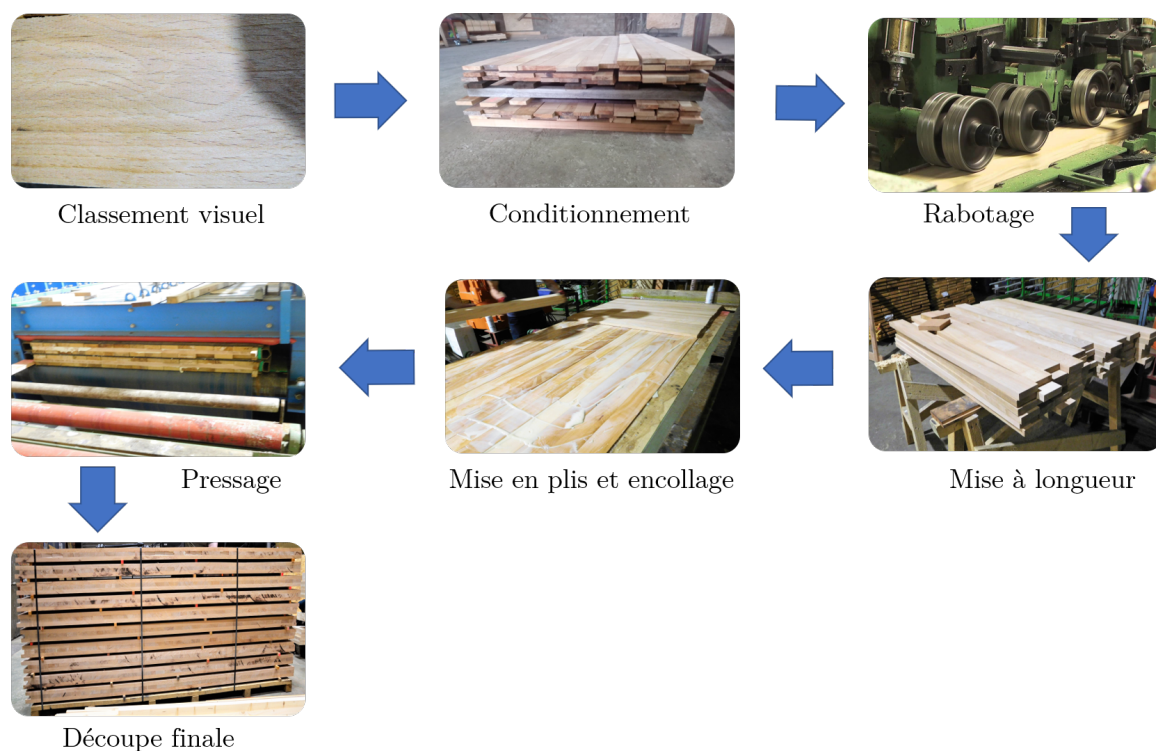


FIGURE 15 – *Schéma général de la production des panneaux CLT (Photographies personnelles chez Scidus).*

5.1 Sélection et classement des planches

Par la production de CLT de hêtre, Scidus agrandit la gamme de produits proposés sur le marché et valorise également des avivés qui étaient destinés au processus de thermotraitement mais qui ont été écartés en raison de leur déformation ou de leur qualité insuffisante. Les planches de hêtre sciées et séchées par la scierie subissent un classement visuel avant leur entrée dans le four de thermotraitement. Les critères pris en compte et leur exigence se trouvent au Tableau 11. Le processus de thermotraitement étant coûteux en main-d'œuvre et en énergie, le classement doit être scrupuleusement respecté afin d'éviter toute perte à

la sortie du four de thermotraitement. Toutes les conditions énumérées dans le Tableau 11 sont plus restrictives que celles du classement visuel (norme NF B 52-001-1, page 20) excepté pour les flèches de rive et de face de la catégorie D40 dont les valeurs sont inférieures à celles présentées dans ce tableau. Les avivés écartés peuvent donc encore présenter des propriétés mécaniques telles que pour justifier une qualité D40.

TABLEAU 11 – *Exigences de classement pour les planches destinées au thermotraitement.*

Critères	Conditions
Fissure traversante ou non traversante	Exclus
Flache de section	Exclus
Flèche de rive	Max 8 mm / 3 m
Flèche de face	Max 15 mm / 3 m
Gauchissement	Max 10 mm / 3 m
Défait de rectitude	Max 5 mm
Échauffure	Exclus
Cœur rouge	Exclus
Défait sur la face	Admis si nœud non traversant et inférieur à 10 mm Nœud de 20 mm accepté dans les 50 derniers cm, si présent sur une seule face

Deux lots différents de rebut au thermotraitement étaient disponibles afin de réaliser les expériences du CLT. Le premier lot était composé de planches sciées sur quartier et faux-quartier de section rectangulaire de 20 x 160 mm² sur une longueur de 2,5 à 3 m. Les premiers essais de classement visuel ont été réalisés sur ce lot. Malheureusement, la flèche de rive était, pour la plupart des planches auscultées, supérieure à 20 mm, rejetant la majeure partie du lot. De plus, après concertation avec la responsable commerciale de Scidus, ces planches pouvaient être valorisées pour un autre produit que la conception de CLT. Le choix s'est alors tourné vers le deuxième lot de rebut à valoriser, composé d'avivés de 100 x 30 mm² sur 3 m de longueur. Ce lot, très hétérogène, comprend tous types de sciage (dosse, quartier, faux-quartier). Le classement s'est réalisé sur base des dimensions finales des avivés : 25 x 85 mm² (après le rabotage réalisé juste avant l'encollage). Le tableau ci-dessous reprend les valeurs du Tableau 8 (page 20) variant avec la dimension des planches.

TABLEAU 12 – *Valeurs du classement visuel adaptées à la section finale des planches classées.*

Classes/critères		H1-1 - D40	H1-3 - D24
Diamètres des nœuds			
- sur la face		< 17 mm	< 51 mm
- sur la rive		< 5 mm	< 18 mm
Fente	Fentes traversantes	Admissible en bout avec une longueur < 85 mm	
	Fentes non traversantes	≤ 84 cm	Admises

Le classement visuel a été réalisé planche par planche, afin de ne laisser passer aucun défaut. Les défauts qui nécessitent une inspection minutieuse des 4 faces sont : l'échauffure, la pente de fil (globale et locale) et le diamètre des noeuds. Le premier se remarque aisément par sa décoloration blanche (Figure 16). Quant au diamètre des noeuds, il est facilement mesurable.



FIGURE 16 – Exemple d'échauffure (gauche) et de nœud (droite) (Photographies personnelles).

Enfin, la pente de fil, tant globale que locale est plus difficilement repérable. En effet, il faut regarder le sens des rayons ligneux. Deux illustrations sont données à la Figure 17. L'image de gauche montre une pente de fil globale. La deuxième image (droite) illustre un fil totalement droit. La disposition des rayons ligneux les uns par rapport aux autres est trompeuse, mais le fil est bien parallèle à l'axe (en longueur) de la planche.

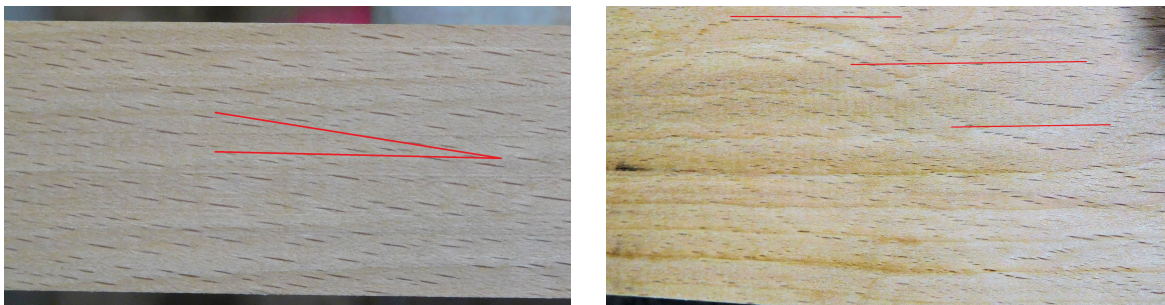


FIGURE 17 – Exemple de pente globale (gauche) et fil parfaitement droit (droite) (Photographies personnelles).

Les défauts de chaque planche classée en D24 ont été comptabilisés afin de dégager les éléments contraignants du classement. Les éléments qui ont été rejetés de la classe D24 avaient pour cause principale l'échauffure. Ce défaut résulte d'un mauvais stockage des bois dans le parc à grumes.

5.2 Conditionnement

Après classement, les paquets de planches ont été placés en chambre chaude (20°C) pendant environ 2 semaines afin d'atteindre un taux d'humidité homogène situé entre 10 et 14 % dans tout le lot.

5.3 Dimensionnement

Bien que cette étape ne soit pas reprise dans la Figure 15, elle était nécessaire pour la détermination des dimensions finales des panneaux. En effet, puisque l'objectif des essais sur ces panneaux est l'obtention d'une rupture en flexion, il faut à tout prix éviter la rupture par cisaillement roulant. Pour ce faire, la norme EN 16351 offre une conception de montage des essais afin d'éviter cette rupture en cisaillement (voir point 2.5.4, page 21). Cette norme impose des rapports d'élancement (L/H) de 24 à 30. Étant donné que cette norme n'est normalement pas applicable pour le hêtre, un dimensionnement a été réalisé afin de confirmer théoriquement la rupture en flexion et non en cisaillement roulant.

Dans les quatre méthodes de dimensionnement disponibles (voir point 2.6.1), deux d'entre-elles ont été sélectionnées pour leur justesse et leur facilité de mise en oeuvre : la méthode gamma et l'analogie au cisaillement. La mise en oeuvre de la table de calcul a été faite par J. Geno. Pour rappel, le principe est de déterminer, sur base des valeurs de résistance d'une lamelle individuelle, la résistance d'un panneau entier. Les valeurs individuelles utilisées pour ce dimensionnement proviennent de l'EN 338 (Tableau 7, page 18) ainsi que de la publication de Aicher *et al.* (2016a); Tableau 6, page 16. L'exercice de dimensionnement à proprement dit ne rentrant pas dans le cadre de ce mémoire, les détails et mécanismes ne sont pas explicités.

Toutes les valeurs de rapport d'élancement entre 24 et 30 ont été testées une à une, autant pour les panneaux D24, D40 et mixtes. Une conclusion unanime ressort de chaque rapport d'élancement testé : théoriquement, la rupture se fera toujours en flexion et non en cisaillement, conséquence directe de la valeur élevée du module de cisaillement roulant pour le hêtre par rapport à celle de l'épicéa. La détermination de la force de rupture a également permis le choix du vérin à utiliser lors des tests en flexion quatre points. Théoriquement, un vérin de 5 tonnes est suffisant. En pratique, un vérin de 10 tonnes a été utilisé, seul vérin disponible au laboratoire au moment des essais.

5.4 Rabotage et mise à longueur

5.4.1 Rabotage

Selon la norme NBN EN 16351, le rabotage doit se faire au maximum 24h avant l'encollage. Cette procédure permet de limiter l'oxydation superficielle du bois, qui pourrait nuire à l'adhérence de la colle. La surface en sortie de raboteuse doit être parfaitement plane et lisse. Un certain nombre de planches ont dû être écartées car présentant des défauts trop importants en sortie de raboteuse, comme illustré à la Figure 18. Les sciures produites lors du rabotage doivent être brossées, toujours dans un souci de bonne adhérence de la colle.



FIGURE 18 – *Exemple de rabotage non conforme (gauche) et rabotage conforme (droite) (Photographies personnelles).*

5.4.2 Mise à dimension des planches

Les planches pour le pli central ont été découpées à 119 *cm*, correspondant à 14 fois la largeur individuelle d'une planche. Cette mesure était imposée par les dimensions de la presse, qui se limite à une largeur maximale des panneaux de 120 *cm*.

5.5 Mise en plis et encollage des panneaux

5.5.1 Caractéristiques de la colle²⁹

La colle utilisée est de type polyuréthane mono-composant (PU) : *Loctite Purbond*® *HB S309*. Le temps d'ouverture³⁰ maximum est de 30 minutes. Le temps de pressage, quant à lui, est de 75 minutes (pour du bois à $12 \pm 2\%$ d'humidité). Cette exigence est valable pour les résineux. Les feuillus étant plus difficiles à encoller, on multiplie ce temps par deux. Le grammage à appliquer doit se situer entre 120 et 160 *g/m*².

Note : Deux grandes familles de colles sont utilisées pour la fabrication de panneau CLT : les polyuréthanes mono-composants (PU) et les mélamine-urée-formaldéhyde (MUF). La deuxième famille se compose de deux produits (résine et durcisseur) qui nécessitent d'être mis au contact juste avant l'encollage. Tandis que les colles PU présentent l'avantage d'être composées d'un seul produit, plus facile à appliquer.

5.5.2 Mise en œuvre

Comme énoncé précédemment, la dimension des panneaux a été justifiée par la capacité de la presse disponible chez Scidus. Chaque pressage comportait deux panneaux superposés et séparés par une plaque en plastique rigide d'une épaisseur de 1,5 *cm*. L'illustration des étapes d'encollage des différents plis se trouve à la Figure 19.

Comme il est possible de voir à la Figure 19, l'application de la colle s'est faite manuellement. L'appareil applicateur habituellement utilisé n'étant pas utilisable au moment de la confection des panneaux, le grammage maximal a dès lors été dépassé (confirmation par les surplus de colle débordants visible en sortie de presse). Cette application manuelle a eu des conséquences sur le temps d'ouverture de la colle, dépassant légèrement la durée maxi-

29. Fiche technique de la colle présentée à l'Annexe 10, page 83

30. Temps écoulé entre la sortie de la colle de son contenant jusqu'à la mise sous presse.

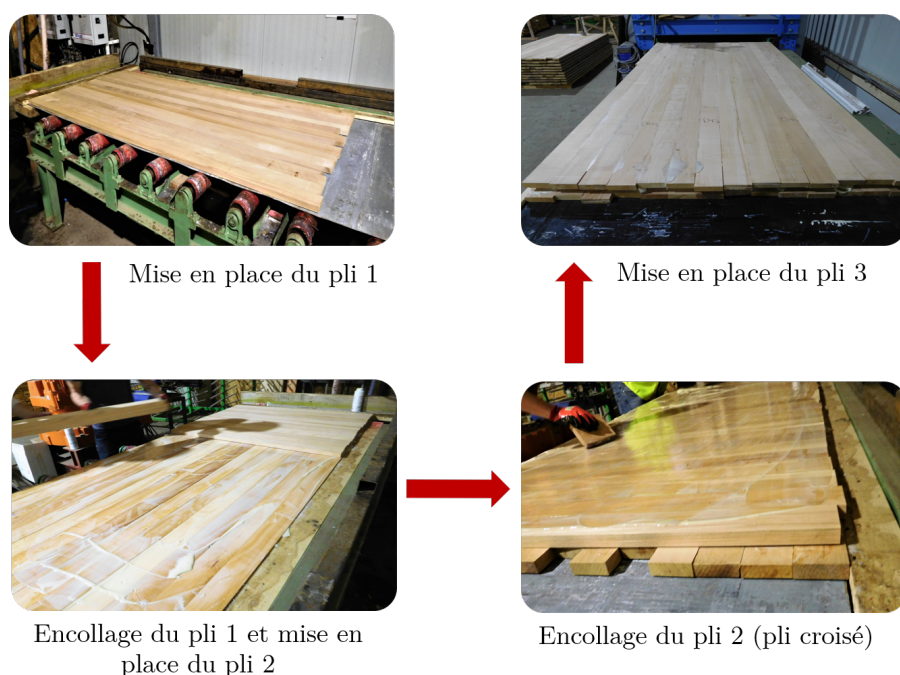


FIGURE 19 – Étapes d’encollage pour un seul panneau CLT (Photographies personnelles).

male autorisée, comme le montre le Tableau 13. Il n’y a pas de données disponibles pour les deux derniers panneaux fabriqués car les retards de production accumulés ont reporté la fabrication de ceux-ci à un jour où je n’ai pu être présent.

TABEAU 13 – Temps d’ouverture et pression mesurés pour chaque production de deux panneaux.

	Temps d’ouverture [<i>minutes</i>]	Pression [N/mm^2]
2 x D40	40	1
1 x D40 1 x Mixte	38	0,9
2 x Mixte	29	1,3
1 x Mixte 1 x D24	27	1,3
2 x D24	<i>Pas de donnée</i>	<i>Pas de donnée</i>

5.6 Pressage

La presse peut accueillir deux panneaux empilés de dimensions maximums de $1,2\text{ m} \times 3\text{ m}$. Elle est munie d’un système de serrage latéral permettant la minimisation des joints de colle entre les planches des plis inférieur et supérieur. Les conditions de pressage sont fournies par le fabricant de colle. Ce dernier énonce une pression minimum de $0,6\text{ N/mm}^2$. Le Tableau 13 montre les pressions réelles, toutes supérieures au minimum exigé.

Une fois les panneaux réalisés, le fabricant de colle suggère un temps de repos de minimum 4 heures à 20°C . Ce temps permet une polymérisation complète de la colle. Dans ce cas-ci, le temps de repos a été d’une semaine, dans les mêmes conditions de température et humidité de l’air que celles de la phase d’encollage.

5.7 Découpe finale

Chaque panneau confectionné a été découpé en trois panneaux d'environ 36 cm de large afin de multiplier les échantillons. Les 30 panneaux ont alors été transportés jusqu'au laboratoire de réalisation des essais (LEMSC³¹, UCLouvain) et entreposés dans l'attente du démarrage des essais.

6 Réalisation des essais

Les essais en flexion 4 points ont été réalisés au laboratoire LEMSC de l'UCLouvain, sous la direction de C. Bayart. Ils ont pour but de déterminer le module local d'élasticité en flexion, le module global d'élasticité en flexion ainsi que la résistance à la flexion axiale. Afin d'évaluer ces éléments, il faut pour chaque essai, mesurer la flèche locale, la flèche globale et la force appliquée par le vérin en fonction de temps.

Avant le début des essais, chacun des trente panneaux a été photographié sur ses quatre faces afin de procéder à une analyse visuelle avant-après essais. Dans cet esprit, chaque panneau a également été photographié après l'essai de rupture en flexion.

6.1 Configuration des essais

La configuration des essais suit la norme EN 16351, selon les exigences données à la Figure 11 (page 21), valable pour des rapports $b/h \leq 4$ ³². Afin d'éviter la rupture en cisaillement roulant dans la couche croisée, la longueur du panneau choisie équivaut à $30 \times H$, soit 2,25 m de portée. Une photographie du montage du banc d'essai est présentée à la Figure 20.

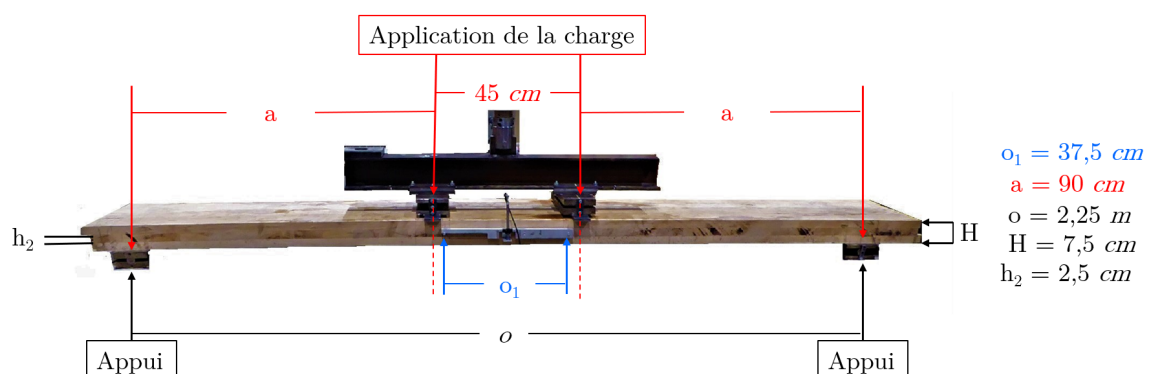


FIGURE 20 – Dispositif mis en place pour la réalisation des essais en flexion 4 points sur des panneaux CLT dont les lamelles ont un rapport largeur/hauteur ≤ 4 (Photographie personnelle).

La mesure de la flèche globale est effectuée par capteur laser positionné en dessous du banc d'essai, pointant le centre du panneau. La mesure de la flèche locale, quant à elle, se fait de

31. Laboratoire Essais mécaniques, Structures et génie civil.

32. Rapport valable pour une lamelle constitutive du panneau.

part et d'autre du panneau, entre les deux points d'application de la charge. Le dispositif de mesure est présenté à la Figure 21. La barre horizontale en aluminium fournit un support au capteur de déplacement de type *LVDT*³³. La prise de données se fait sur les deux rives du panneau, afin de pouvoir réaliser une moyenne des deux capteurs pour une meilleure précision. De plus, ces capteurs étant très sensibles aux mouvements internes du panneau, il arrive que l'un d'eux soit déplacé suite à une microrupture au sein du panneau, donnant alors des valeurs biaisées.

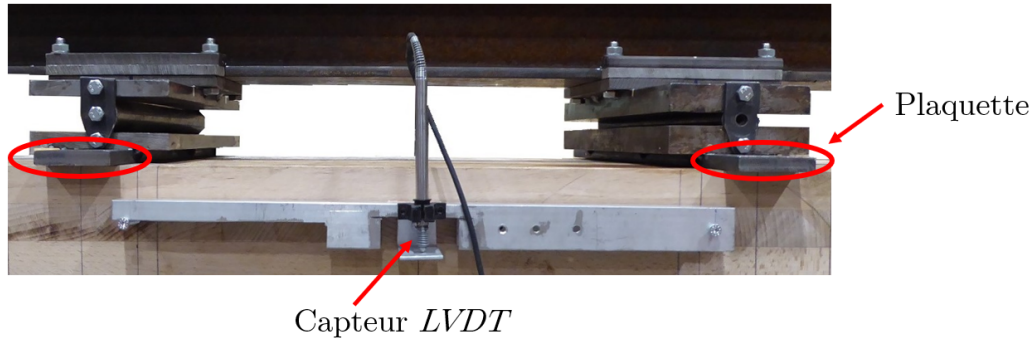


FIGURE 21 – Dispositif mis en place pour la mesure de la flèche locale (Photographie personnelle).

6.2 Conditions des tests³⁴

1. Le temps imparti de 300 ± 120 secondes exigé par la norme permet de déterminer la vitesse de chargement du vérin, à l'aide d'un test sur un premier panneau. Une vitesse de $0,4 \text{ mm/s}$ a été déterminée afin de respecter cette condition.
2. Pour minimiser le poinçonnement local et l'influence des appuis sur la mesure de la flèche locale, une plaquette d'une largeur de 37 mm ($1/2 \times h$) a été placée entre l'appui et le panneau (Figure 21).
3. La rupture est détectée par le système lorsqu'il y a une diminution soudaine de la charge exercée par le vérin de 25%.
4. L'humidité du bois, quant à elle, doit être égale à $12 \pm 3 \%$. Cette humidité doit être mesurée à la fin de l'essai, le plus proche possible du point de rupture. Pour cela, un humidimètre³⁵ a été utilisé et 4 mesures par panneau ont été relevées. De plus, la mesure de l'humidité permet de corriger les valeurs obtenues lors des tests. En effet, les valeurs des propriétés mécaniques des bois sont toujours exprimées à 12 % d'humidité. Dans ce cas, la norme NBN EN 384 : 2016 a été utilisée afin de corriger les valeurs, selon ces formules :

$$f_m = f_m(u) * (1 + 0,03 * (u - u_{ref})) \quad [N/mm^2] \quad (2)$$

$$E_m = E_m(u) * (1 + 0,01 * (u - u_{ref})) \quad [N/mm^2] \quad (3)$$

33. Linear Variable Differential Transformer, un capteur électrique de déplacement linéaire.

34. Énoncées par la norme NBN EN 408+A1.

35. L'humidimètre se place dans le sens du fil, avec un angle d'environ 15° par rapport à l'axe du fil.

où f_m = résistance à la flexion axiale [N/mm^2]

E_m = module d'élasticité en flexion [N/mm^2]

u = moyenne des humidités prélevées à l'aide de l'humidimètre [%]

$u_{ref} = 12$ [%]

7 Traitement des données

7.1 Formules de traitement des données

7.1.1 Détermination du module global d'élasticité en flexion : $E_{m,g}$

Le module d'élasticité, E , se calcule entre $0,1 \times F_{max}$ et $0,4 \times F_{max}$, là où le graphe de la flèche en fonction de la force est linéaire. Afin de vérifier la linéarité, on opère alors selon une régression linéaire, qui doit obtenir un coefficient de corrélation (R^2) minimum de 0,99. Dans le cas où ce coefficient ne serait pas obtenu, il est permis de réduire l'intervalle entre $0,2 \times F_{max}$ et $0,3 \times F_{max}$. La valeur de la pente donnée par l'équation de la courbe de régression peut alors être injectée dans l'équation générale (4), donnée par l'EN 408+A1 :

$$E_{m,g} = \frac{3ao^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{W_{g2} - W_{g1}}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5GbH} \right)} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4)$$

où a = distance entre l'appui et l'application de la charge a [mm]

o = portée entre appuis [mm]

b = largeur du panneau [mm]

H = hauteur du panneau [mm]

G = module de cisaillement [N/mm^2]

$\frac{F_2 - F_1}{W_{g2} - W_{g1}}$ = pente de la droite d'interpolation de la force en fonction de la flèche globale [N/mm]

a. Représentation à la Figure 20

Deux corrections doivent alors être apportées à cette formule. Premièrement, la portée du panneau étant beaucoup plus grande que sa hauteur ($L \gg H$), on pose l'hypothèse : $G = \infty$. Deuxièmement, l'inertie de la couche croisée ne doit pas être prise en compte dans le calcul puisque celle-ci est proche de l'axe neutre et peut être vue comme le simple lien entre les plis inférieur et supérieur. Une correction de la formule a dû être faite. Les détails d'adaptation de formule se trouvent à l'Annexe 4. L'équation (4) devient alors :

$$E_{m,g} = \frac{3ao^2 - 4a^3}{2(bH^3 - bh_2^3) \left(2 \frac{W_{g2} - W_{g1}}{F_2 - F_1} \right)} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (5)$$

où h_2 = hauteur de la couche croisée [mm]

7.1.2 Détermination du module local d'élasticité en flexion : $E_{m,l}$

La détermination du module d'élasticité local suit le même raisonnement que pour le module d'élasticité global. Le jeu de données utilisées correspond à celui obtenu par les capteurs de mesure de la flèche locale. L'équation (6) est utilisée. De même que pour le module d'élasticité global, la formule de l'inertie du panneau a dû être adaptée :

$$E_{m,l} = \frac{3ao_1^2}{4(bH^3 - bh_2^3)} \left(\frac{F_2 - F_1}{W_{l2} - W_{l1}} \right) \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (6)$$

où o_1 = portée entre points de fixation du dispositif de mesure de la flèche locale [mm]

$\frac{F_2 - F_1}{W_{l2} - W_{l1}}$ = pente de la droite d'interpolation de la force en fonction de la flèche locale [N/mm]

7.1.3 Détermination de la résistance à la flexion axiale : f_m

La résistance à la flexion axiale s'obtient facilement avec la force maximale appliquée pour obtenir la rupture en flexion, ainsi qu'avec la conformation géométrique du panneau et de banc d'essai selon l'équation (7). Une fois de plus, l'inertie a dû être corrigée :

$$f_m = \frac{3aF_{max}}{bH^2 - bh_2^3} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (7)$$

où F_{max} = force appliquée pour arriver à la rupture en flexion [N]

7.1.4 Détermination du module de cisaillement : G

La détermination du module de cisaillement consiste en une configuration particulière de test qui n'a pas été mise en œuvre pour ce travail. Cependant, par la manipulation d'équation, on peut tenter d'obtenir le module G .

Deux méthodes ont été utilisées pour la détermination du module de cisaillement.

Méthode 1 En isolant " G " dans l'équation (4), il est possible de l'exprimer en fonction de valeurs connues, selon l'équation (8). Il est à noter qu'il s'agit d'une tentative de détermination du module de cisaillement, sans connaître si cette transformation de formule donnera des résultats probants.

$$G = \left[\frac{5bH}{6a} \left(2 \frac{W_{g2} - W_{g1}}{F_2 - F_1} - 2 \frac{W_{l2} - W_{l1}}{F_2 - F_1} \frac{(3o^2 - 4a^2)}{3o_1^2} \right) \right]^{-1} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (8)$$

Méthode 2 À la place de partir des mesures des flèches locales et globales, cette méthode se base sur la mesure du déplacement du vérin³⁶ en fonction de la force appliquée, selon :

$$G = \left[\frac{5bH}{6a} \left(2 \frac{W_{v2} - W_{v1}}{F_2 - F_1} - \frac{a}{\frac{4bh^3 E_{m,l}}{3}} \left(\frac{(3o^2 - 4a^2)}{3} + a(0 - 2a) \right) \right) \right]^{-1} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (9)$$

où $\frac{F_2 - F_1}{W_{v2} - W_{v1}}$ = pente de la droite d'interpolation de la force en fonction du déplacement vérin [N/mm]

Les données de la configuration du banc d'essai sont reprises dans le Tableau 14 ci-dessous et sont communes à tous les panneaux testés. La valeur de « b » variant légèrement d'un panneau à l'autre, celle-ci est reprise dans le tableau présenté à l'Annexe 7.

TABLEAU 14 – *Données relatives à la configuration du banc d'essai.*

Symbole	Valeur	Unité
a	900	mm
h	75	mm
o	2.250	mm
o ₁	375	mm

7.2 Analyse visuelle

L'objectif de l'analyse visuelle est, dans un premier temps, de lier le mode de rupture aux défauts présents sur le pli sollicité en traction (pli inférieur) lors de l'essai en flexion. Pour ce faire, chacune des 4 lamelles composant la largeur de chaque panneau a été étudiée séparément, entre les points d'application de la charge ainsi que 20 cm de part et d'autre de cette zone, lieu où l'occurrence de la rupture en flexion est la plus élevée. Premièrement, une observation pré-essais a été effectuée afin de noter la présence (ou absence) de pente de fil globale et locale, ainsi que la présence de nœuds et de cœur rouge. Bien que ce dernier soit accepté dans la norme de classement visuel (car présentant les mêmes propriétés mécaniques que le bois blanc, Arnal et De Potter (2011)), il est intéressant de réaliser des observations afin de le confirmer. Deuxièmement, les observations post-essais ont pour but de noter le mode de rupture (compression, traction ou cisaillement roulant) ainsi que le nombre de lamelles rompues au sein de chaque panneau et dans ce cas, d'identifier s'il y a présence de défauts. Les modes de rupture pouvant être multiples pour un seul panneau, une vidéo du moment de rupture pour chaque panneau a été enregistrée afin d'observer le premier type de rupture apparu lors de l'essai. Les observations post-essais ont aussi relevé les cas où une délamination du joint de colle s'est opérée.

Dans un deuxième temps, une tentative de lien entre les observations visuelles et les résultats chiffrés a été entreprise.

36. Sous conditions que la rigidité du dispositif d'essai soit supérieur à la rigidité du panneau CLT testé.

7.3 Analyse statistique

Les données obtenues à la suite des tests en flexion ont été traitées à l'aide du logiciel *Microsoft Excel*[®] et son extension « *XLSTAT* ».

7.3.1 Moyennes et écart-type

Pour chacune des trois catégories de qualité de panneau testées, la moyenne (μ) a été calculée accompagnée de son écart-type (σ) suivant les formules :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{et} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (10)$$

où x_i = valeur obtenue pour le i^{eme} panneau d'une des trois catégories

n = nombre de panneaux testés par catégorie

7.3.2 Analyse de la variance : ANOVA³⁷

Principe : L'ANOVA cherche à expliquer une variable numérique (donnée quantitative) par des variables catégorielles (donnée qualitative). Dans ce cas-ci, l'ANOVA permet de vérifier si $E_{m,g}$, $E_{m,l}$ et f_m sont significativement différents selon le type de panneau : D40, D24 ou Mixte.

L'analyse repose sur un test de Fisher, ayant pour but de vérifier l'égalité des moyennes des différentes variables catégorielles. Le modèle envisagé s'exprime comme suit :

$$y_{i,k} = \mu_i + \alpha_i + \varepsilon_{i,k} \quad (11)$$

où i = type de panneau (D40, D24 ou mixte)

k = numéro du panneau

$y_{i,k}$ = variable quantitative étudiée ($E_{m,g}$, $E_{m,l}$ ou f_m)

μ_i = moyenne pour la catégorie i

α_i = effet du niveau i du facteur type de panneau

$\varepsilon_{i,k}$ = écart résiduel entre l'observation k et la moyenne μ_i , suivant une loi normale

$$\varepsilon = \mathcal{N}(0, \sigma^2)$$

Les hypothèses à tester sont :

$$\begin{cases} H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \\ H_1 : \exists(i, j) \text{ tel que } \mu_i \neq \mu_j \end{cases}$$

37. ANalysis Of VAriance.

Si la p-valeur obtenue par le test de Fisher $< 0,05$, alors l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée. Dans notre cas, cela signifie qu'au moins une moyenne est significativement différente des deux autres.

Il existe 4 conditions de validité de l'ANOVA qui portent sur les hypothèses sur les résidus, à vérifier pour chaque itération :

1. Indépendance des résidus : chaque panneau est testé indépendamment des autres.
2. Normalité : les résidus suivent une distribution normale, à vérifier via un test de normalité des résidus (sur *XLSTAT*), via un test de Shapiro-Wilk.
3. Homogénéité des variances des résidus : à vérifier via un test de comparaison des variances de k échantillons (Test de Levene sur *XLSTAT*)
4. Diagnostic des résidus hors normes : à contrôler via le graphique des résidus normalisés fourni par l'analyse ANOVA dans *XLSTAT*.

7.3.3 Régression linéaire

« La régression linéaire est un modèle de régression qui cherche à établir une relation linéaire entre une variable, dite expliquée (Y), et une variable, dite explicative (X) » (Wikipédia, 2016). La proportion de variabilité de Y influencée par X se traduit via le coefficient de détermination R^2 . Ce dernier varie entre 0 et 1. Au plus il est proche de 1, au plus Y est lié à X. La droite d'une régression linéaire s'exprime sous forme : $Y = a + bX$.

Un test de Fisher peut être effectué afin de démontrer que le coefficient de pente de la droite de régression (b) est non-nul. Les hypothèses à tester sont :

$$\begin{cases} H_0 : b_i = 0 \\ H_1 : b_i \neq 0 \end{cases}$$

Si la p-valeur obtenue par le test de Fisher $< 0,05$, alors l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée. Dans notre cas, cela signifie que le coefficient b est non-nul et donc que la corrélation est significative.

7.3.4 Passage des valeurs moyennes aux valeurs caractéristiques

Comme expliqué au point 2.5.1 (page 17) il existe une équation pour passer de valeurs moyennes (obtenues via les essais) aux valeurs caractéristiques, pour les propriétés de résistance (f_m). Cette transformation dépend d'un facteur k_s , lui-même fonction de la taille de la population.

La norme NBN EN 14358 annonce un facteur $k_s = 2,1$ pour un échantillon constitué de 10 éprouvettes et un facteur $k_s = 1,87$ pour une population constituée de 30 éprouvettes. Les propriétés de rigidité (E_m), communément exprimées en valeurs moyennes, doivent être corrigées en fonction du nombre d'échantillons. La valeur moyenne est alors obtenue suivant l'équation (1), avec un k_s très faible puisqu'il s'agit d'une correction de la valeur moyenne. La norme NBN EN 14358 annonce un facteur $k_s = 0,222$ pour un échantillon constitué de 10 éprouvettes et un facteur $k_s = 0,125$ pour une population constituée de 30 éprouvettes.

Quatrième partie

Résultats

8 Classement et dimensionnement

8.1 Classement visuel des lamelles

Quatre jours de classement ont été nécessaires afin d'obtenir suffisamment de planches pour la fabrication des panneaux, soit un total de 232 planches en D24 et 282 en D40. Les défauts justifiant une classification en D24 sont présentés au Tableau 15, accompagnés de leur fréquence.

Pour rappel, la pente de fil globale a une prédisposition génétique et est difficilement contrôlable lors de l'achat de bois. En revanche, le nombre de nœuds dépend directement de l'essence et de la sylviculture.

TABLEAU 15 – Fréquences des défauts du bois dans le lot de planches classées en D24.

Défauts		Nombre	Pourcentage [%]
Pente de fil	globale	16	7
	locale	112	48
Nœuds		103	44
Fente		1	< 1
Total		232	100

8.2 Dimensionnement des panneaux

Après la découpe finale des panneaux, chacun de ceux-ci possédait une largeur de $36,2 \pm 0,3$ cm. Cette variabilité de la largeur étant faible, la valeur de 36,2 cm a été testée pour l'ensemble d'une classe de résistance (D40, D24 et mixte) et non pour chacun des panneaux (Tableau 16). Les deux méthodes de dimensionnement utilisées concordent parfaitement. De plus, théoriquement, la classe de résistance de la couche croisée (D24 ou D40) influence peu (< 1 % de différence) la résistance globale du panneau utilisé horizontalement (« hors plan »).

TABLEAU 16 – Valeur théorique de la force de rupture obtenue par dimensionnement.

Classe de résistance	Force de rupture [N] Méthode gamma	Force de rupture [N] Analogie au cisaillement
D24	25.500	25.500
D40	43.500	43.500
Mixte	43.250	43.250

9 Observations - Analyse visuelle

D'après l'analyse vidéo, tous les panneaux ont connu une rupture en flexion, mis à part le panneau n°3 dont le joint de colle entre le pli central et le pli supérieur s'est délaminé avant une rupture en flexion (Figure 22). Pour cette raison, ce panneau n'est pas pris en compte dans l'analyse statistique.



FIGURE 22 – *Délamination du panneau n°3 (Photographie personnelle).*

Outre cet événement isolé, plusieurs panneaux présentent une rupture en cisaillement roulant et une délamination du joint de colle de certaines lamelles. À l'aide de l'analyse vidéo, il a été confirmé que la première rupture s'est déroulée selon la flexion, les autres ruptures apparaissent simultanément mais ne sont pas pionnières. La Figure 23 montre un exemple de cisaillement roulant.



FIGURE 23 – *Exemple de cisaillement roulant observé après essais (Photographie personnelle).*

De plus, pour certains panneaux, une rupture en compression est observable entre les appuis supérieurs (Figure 24). Des différences se marquent suivant la qualité des lamelles du pli supérieur. Si celles-ci appartiennent à la classe de résistance D40, on observe de la compression dans 55% des cas. Par contre, lorsque le pli supérieur est constitué de lamelle D24, ce pourcentage est réduit de moitié. Théoriquement, ce phénomène devrait être inversé étant donnée la résistance à la compression moins bonne pour la classe de résistance D24 que celle de la classe D40.

Toutes les observations visuelles sont reprises sous forme de tableaux à l'Annexe 5, page 74.

Pente de fil : Sur les 120 lamelles analysées, 29 d'entre elles présentaient une pente de fil locale et 4 autres présentaient une pente de fil globale (Figure 24). Dans 100% des cas, la rupture a suivi la pente de fil, tant globale que locale.

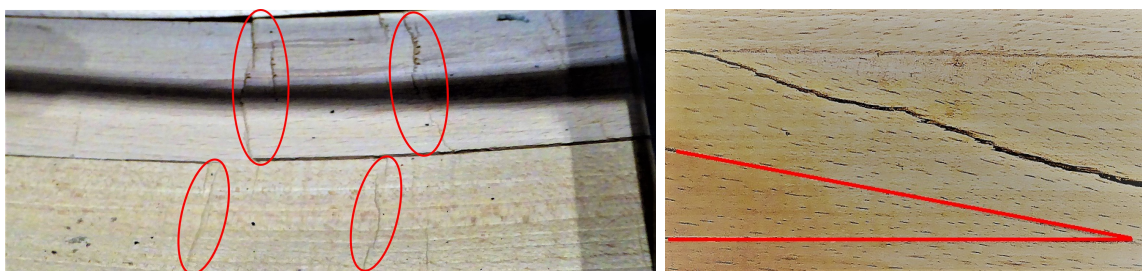


FIGURE 24 – Compression visible sur le pli supérieur, entre les 2 points d'application de la charge (gauche) et rupture suivant parfaitement la pente de fil au sein d'une lamelle (droite) (Photographies personnelles).

Nœuds : Treize nœuds ont été dénombrés lors de l'analyse pré-essais, la plupart d'entre eux situés sur les panneaux de qualité D24. La rupture s'est effectuée sur 8 d'entre eux (Figure 25). Une observation importante sur la taille des nœuds a été dégagée. Si le nœud mesure moins de 1 cm, alors la rupture se déroule suivant une autre mode de rupture.

Cœur rouge : Vingt lamelles comportaient du cœur rouge. Pour huit d'entre elles, la rupture suivait parfaitement la séparation entre le cœur rouge et le bois blanc (Figure 25).



FIGURE 25 – Rupture au niveau de deux nœuds (gauche) et rupture suivant parfaitement la séparation entre le cœur rouge et le bois blanc (droite) (Photographies personnelles).

10 Résultats des tests en flexion 4 points

10.1 Résultats individuels

Avant de procéder à toute manipulation de données, certaines vérifications ont dû être faites. La première vérification porte sur la flèche locale. En effet, comme explicité précédemment, les capteurs sont très sensibles aux mouvements au sein même du panneau. Pour chacun d'eux, les mesures de flèches locales ainsi que leur moyenne ont été représentées graphiquement en fonction du temps (entre 0,1 et 0,4 x F_{max}) dans le but d'éliminer les données aberrantes. Les graphes ci-dessous donnent l'exemple de mesures cohérentes (gauche) et incohérentes (droite). Dans ce cas, la donnée incohérente n'est pas prise en compte, seule la mesure du deuxième capteur est valable.

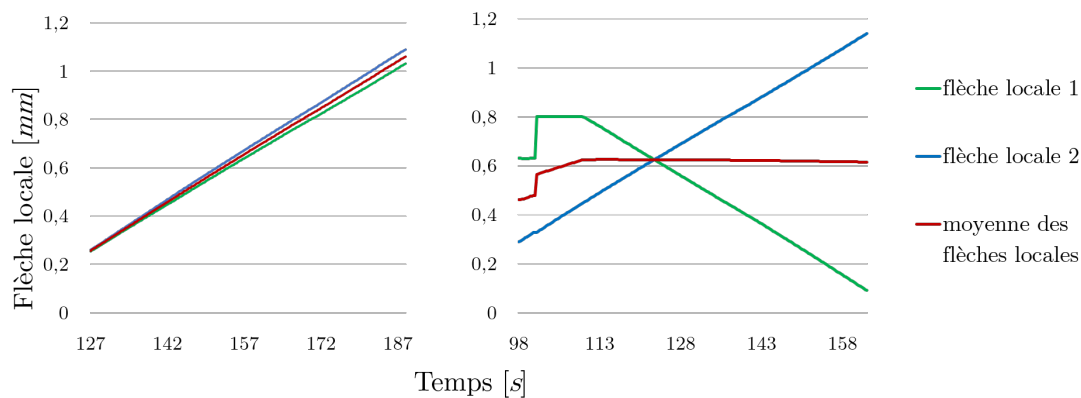


FIGURE 26 – Exemple de mesure de flèches locales acceptables (gauche) et incohérentes (droite).

Ensuite, panneau par panneau, les résultats ont été mis sous forme graphique afin de déterminer la pente de la partie élastique du graphe exprimant la force en fonction de la flèche. Une illustration est donnée à la Figure 27. Les résultats pour les autres panneaux sont regroupés par type de panneaux (D40, D24 et Mixte) et sont présentés à l'Annexe 6 (page 77).

La parfaite correspondance entre la course du vérin et celle mesurée à l'aide du capteur laser nous confirme le bon fonctionnement de ce dernier.

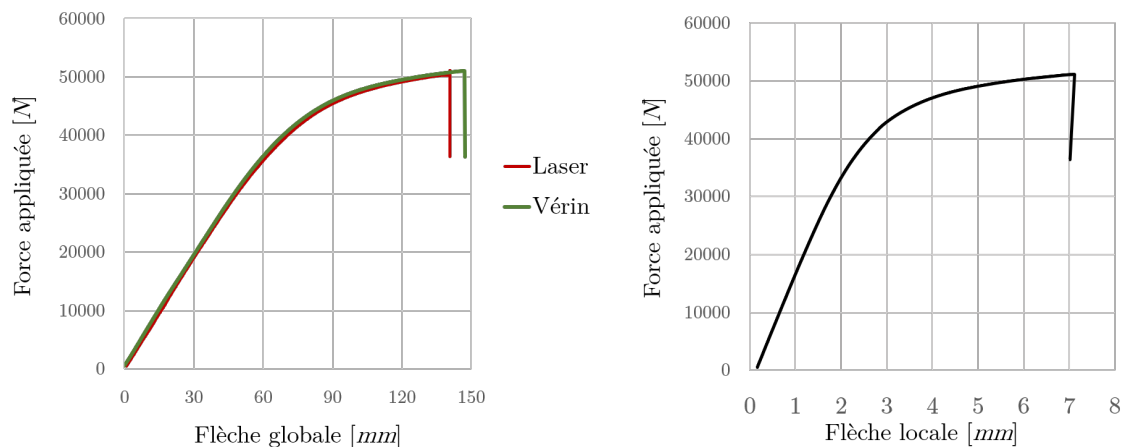


FIGURE 27 – Mise en graphique des résultats de l'essai en flexion 4 points du panneau n°22.

10.2 Synthèse des résultats

L'ensemble des résultats obtenus par le traitement de toutes les données est présenté sous forme de tableau général à l'Annexe 7 (page 80). Les tableaux et graphiques donnés ci-dessous ne représentent que la partie significative des données. En effet, la tentative de détermination du module de cisaillement (G) selon deux méthodes différentes n'a fourni que des valeurs incohérentes pour chacune des méthodes.

Après expression des valeurs obtenues à 12% d'humidité, les moyennes et écarts-types du module d'élasticité global, module d'élasticité local et résistance à la flexion ont été exprimés pour chaque type de panneau testé. Le Tableau 17 présente les résultats obtenus.

TABLEAU 17 – Valeurs moyennes et écarts-types du module d'élasticité global, du module d'élasticité local et de la résistance à la flexion.

	$E_{m,g} - 12\% [N/mm^2]$		$E_{m,l} - 12\% [N/mm^2]$		$f_m - 12\% [N/mm^2]$	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
D40	12.397	648	13.039	1.445	76	3,7
D24	12.000	458	13.183	612	71,7	8,5
Mixte	12.470	741	13.011	765	78	4,5

Ensuite, les résultats de la résistance à la flexion ont été exprimés sous forme graphique en fonction de leur module d'élasticité global (Figure 28). Ce graphe poursuit le but d'émettre des hypothèses quant à certaines tendances, raison pour laquelle une régression linéaire pour chaque type de panneau a été ajoutée.

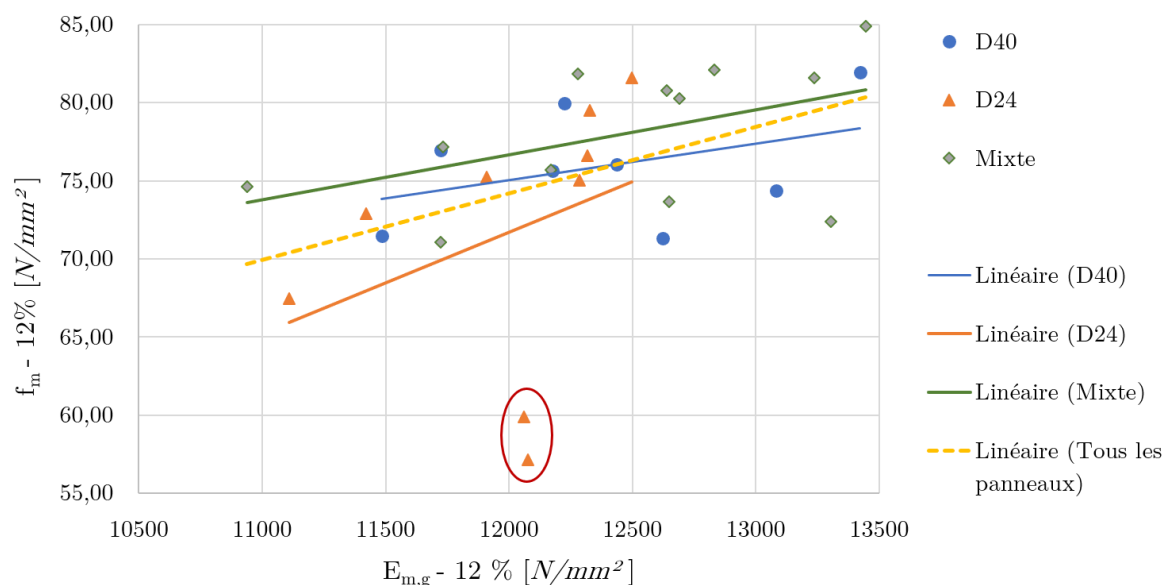


FIGURE 28 – Résistance à la flexion en fonction du module d'élasticité moyen par catégorie de panneau.

Pour les panneaux de la catégorie D24, on remarque deux triangles oranges éloignés du reste de la distribution (entourés en rouge sur le graphe, Figure 28). Il s'agit du panneau 27 et du panneau 30 qui présente des nœuds de diamètre important sur leur pli inférieur (diamètre donné à la Figure 30).

Suite à cette mise en graphique, les régressions linéaires ont été testées afin de montrer qu'elles ont lieu d'être. Les données obtenues sont données au Tableau 18. Pour chacune des catégories de panneaux prises individuellement, la p-valeur résultante du test de Fisher

est supérieure à 0,05. En conséquence de quoi l'on ne peut rejeter l'hypothèse nulle (H_0). Par contre, si l'on prend l'ensemble des panneaux (toutes catégories confondues), alors la p-valeur est inférieure à 0,05. La régression linéaire, cherchant à montrer que la variabilité du module d'élasticité est fonction de la force de résistance à la flexion axiale, est significative. La quantité des échantillons testés par catégorie est probablement insuffisante.

TABLEAU 18 – Coefficient de détermination (R^2) et résultats du test de Fisher (p-valeur) portant sur les régressions linéaires.

	R^2	p-valeur
D40	0,164	0,320
D24	0,122	0,357
Mixte	0,226	0,118
Tous panneaux	0,197	0,016

10.2.1 ANOVA

Les résultats de l'analyse ANOVA sont présentés au Tableau 19. Les deux p-valeurs obtenues sont supérieures à 0,05 (seuil de signification de 5%). L'hypothèse nulle (H_0) selon laquelle les moyennes sont égales ne peut être rejetée. Les valeurs moyennes ne sont donc pas significativement différentes, au seuil de 5%, selon le type de panneau testé (D40, D24 ou Mixte).

TABLEAU 19 – Résultat de l'analyse ANOVA pour les paramètres $E_{m,g}$ et f_m . (DDL signifie degré de liberté, F est la valeur résultante du test de Fisher et $Pr > F$ est la valeur associée à F).

Paramètre	Facteur	DDL	F	Pr > F
$E_{m,g} - 12\%$	Type de panneau	2	1,499	0,242
$f_m - 12\%$	Type de panneau	2	3,004	0,067

10.2.2 Valeurs moyennes et valeurs caractéristiques

Le Tableau 20 ci-dessous reprend les valeurs moyennes et caractéristiques pour le module d'élasticité et la résistance à la flexion. La dernière colonne indique les valeurs obtenues pour tous les panneaux confondus, puisque l'analyse ANOVA ne nous permet pas de distinguer les valeurs obtenues en fonction des types de panneaux testés.

TABLEAU 20 – Valeurs moyennes ($E_{m,0,moyen}$; $f_{m,0,moyen}$) et caractéristiques ($f_{m,0,k}$) finales, corrigées à 12 % et exprimées en $[N/mm^2]$.

	D40	D24	Mixte	Toutes classes confondues
$E_{m,0,moyen}$	12.253	11.899	12.305	12.223
$f_{m,0,moyen}$	76	71,7	78	75,5
$f_{m,0,k}$	68,1	53,9	68,4	63,7

Ces résultats sont issus du tableau présenté à l'Annexe 7 et les valeurs caractéristiques sont obtenues à l'aide de l'équation (1) considérant un k_s de 1,87 valable pour 30 éprouvettes (voir point 7.3.4). La valeur caractéristique de la résistance à la flexion ($f_{m,0,k}$) de 63,7 N/mm^2 nous permet alors de déterminer théoriquement les valeurs caractéristiques (pour la plupart) des autres sollicitations (comme la résistance à la compression, résistance à la traction, ...) à l'aide de la norme NBN EN 338 (Annexe 8, page 81). Les valeurs moyennes du module d'élasticité ont également été corrigées en fonction du nombre d'échantillons.

11 Lien entre analyse visuelle et résultats chiffrés

Pour terminer cette partie résultats, le lien entre les observations et les résultats chiffrés a été établi. La Figure 29 reprend la résistance à la flexion de chacun des panneaux testés. En dessous du graphique, les observations visuelles sont associées à chaque panneau. La croix dans le tableau indique la présence du défaut, sans préciser si le défaut apparaît plusieurs fois au sein du pli inférieur du panneau.

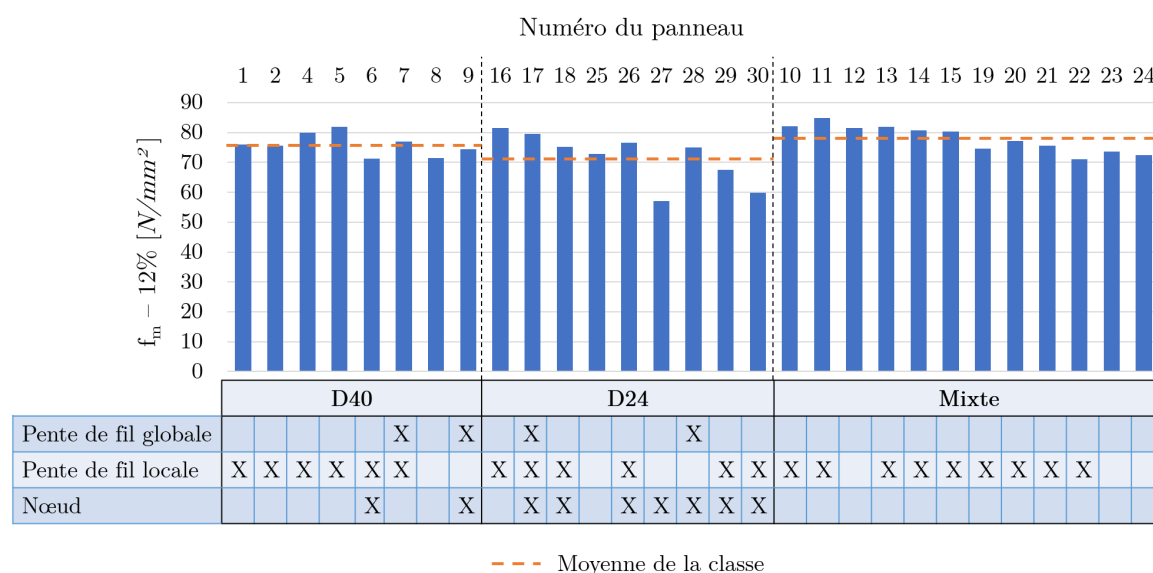


FIGURE 29 – Lien entre l'analyse visuelle et les résultats chiffrés.

Ensuite, la résistance à la flexion a été étudiée séparément pour chacune des observations visuelles (nœuds et pentes de fil), afin de s'intéresser à l'influence des défauts sur cette dernière. Premièrement, la résistance à la flexion des panneaux possédant des nœuds sur la face inférieure a été exprimée en fonction du diamètre des nœuds, sous forme graphique (Figure 30).

Une régression linéaire a été représentée, donnant un coefficient de détermination (R^2) de 0,7. Un test de Fisher a également été réalisé sur cette régression linéaire afin de connaître sa significativité. La p-valeur obtenue est de 0,005, ce qui permet de rejeter H_0 et conclure que la force de résistance à la flexion axiale est significativement liée au diamètre des nœuds présent sur le pli inférieur du panneau.

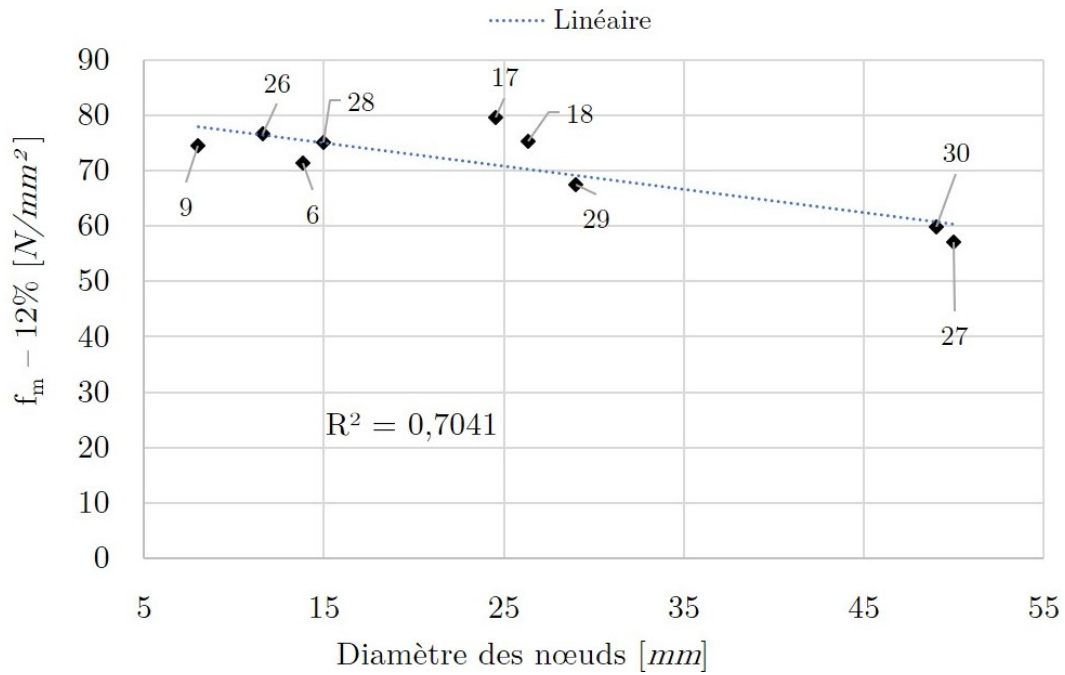


FIGURE 30 – Lien entre la résistance à la flexion et le diamètre des nœuds du pli inférieur. Les chiffres indiquent le numéro du panneau concerné.

Le même exercice a été réalisé pour la pente de fil globale. Malheureusement, au vu du faible nombre de pentes de fil globales présentes (Figure 29), la régression linéaire n'est pas significative.

Enfin, une mise en graphique de la résistance à la flexion en fonction de l'angle de la pente de fil locale a été réalisée (Figure 31). Le coefficient de détermination (R^2) est de 0,12. Le test de Fisher effectué sur cette régression ne nous permet pas d'affirmer sa significativité.

Dès lors, un nouveau graphique a été réalisé (Figure 32) en enlevant les panneaux comportant à la fois une ou plusieurs pentes de fil locales et un ou plusieurs nœuds, le lien entre le diamètre des nœuds ayant été démontré précédemment. De la sorte, il est possible d'établir le lien entre la pente de fil locale et la résistance à la flexion, sans l'influence de la présence de nœuds.

Le coefficient de détermination (R^2) de la régression linéaire est égal à 0,61. Un test de Fisher a également été réalisé sur cette régression linéaire afin de connaître sa significativité. La p-valeur obtenue est de 0,001, ce qui permet de rejeter H_0 et conclure que la force de résistance à la flexion axiale est significativement liée à la présence de pente de fil locale visible sur le pli inférieur du panneau.

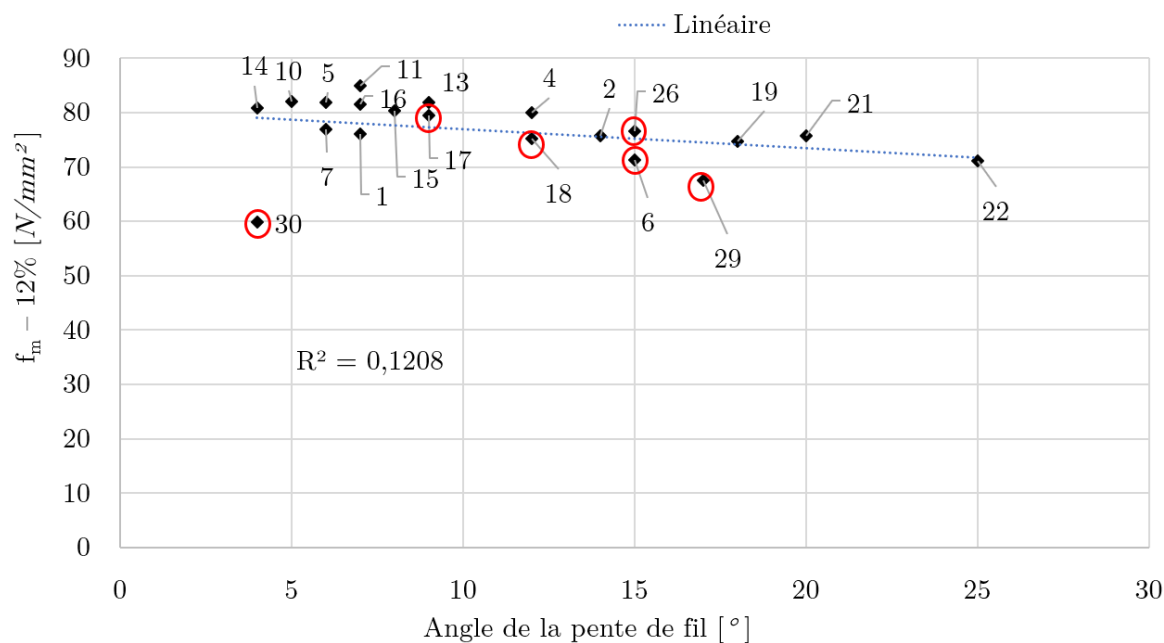


FIGURE 31 – Lien entre la résistance à la flexion et l'angle de la pente de fil locale. Les chiffres indiquent le numéro du panneau concerné. Les nombres entourés en rouge indiquent que ces panneaux possèdent à la fois un nœud et une pente de fil locale sur leur face inférieure.

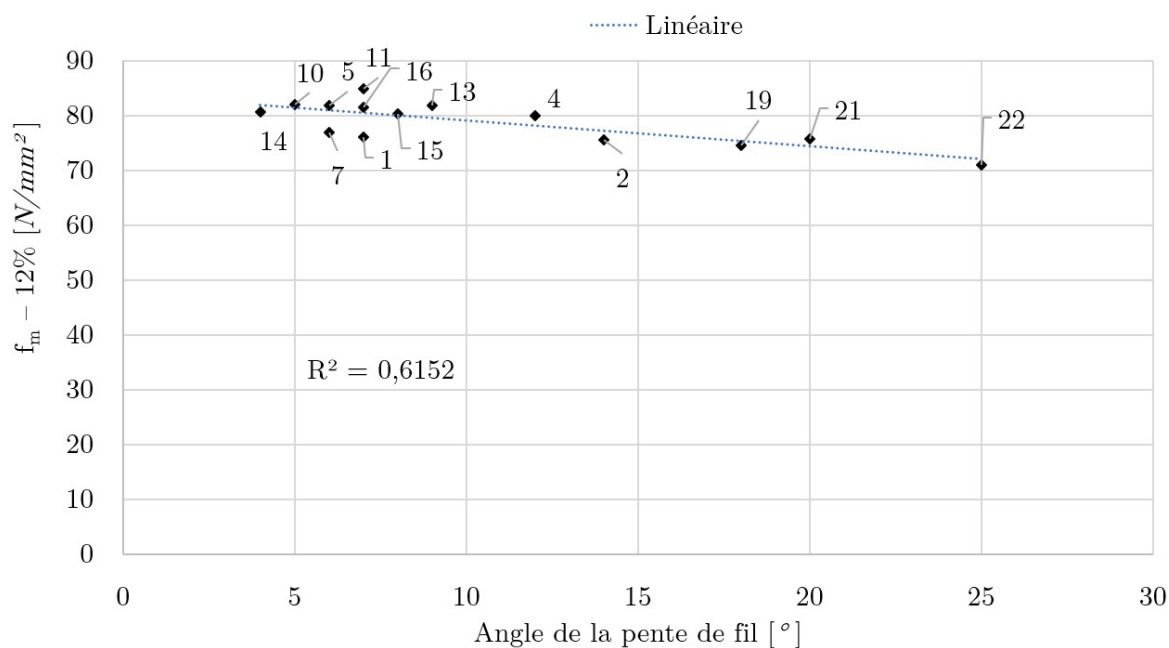


FIGURE 32 – Lien entre la résistance à la flexion et l'angle de la pente de fil locale, sans les panneaux présentant également un ou plusieurs nœuds sur leur pli inférieur. Les chiffres indiquent le numéro du panneau concerné.

Cinquième partie

Discussion

L'objectif de ce mémoire est de valider l'utilisation d'une norme de classement visuel du bois de hêtre pour une utilisation dans des panneaux de type CLT mais également d'apporter des données chiffrées quant au comportement mécanique du CLT de hêtre, très peu documenté actuellement.

Cette cinquième partie a pour objectif de commenter les résultats obtenus en s'appuyant, notamment, sur d'autres publications scientifiques, à titre de comparaison. Afin de pouvoir construire les diverses réflexions quant aux résultats, il faut tout d'abord établir une critique du protocole ainsi qu'une comparaison des résultats avec la littérature existante afin de valider la recevabilité de ceux-ci.

12 Vraisemblance du protocole et des résultats

Critique du protocole

Le classement visuel est considéré comme étant bien réalisé puisque la norme NF B 52-001-1 a été rigoureusement appliquée sur chaque lamelle. De plus, en sortie de raboteuse (phase précédant l'encollage), les lamelles présentant des défauts de rabotage ont été exclues du processus de fabrication. Cette étape de rabotage a respecté les délais de 24h avant l'encollage. Le temps d'ouverture de la colle n'a pu être respecté pour les panneaux D40 et une partie des panneaux mixtes (panneau n°19, 20 et 21). Ces derniers ne se démarquent pas du reste des panneaux de leur catégorie, ce qui suppose que cela n'a pas joué un rôle prépondérant.

Les essais ont été réalisés selon la norme spécialement éditée pour le CLT (NBN EN 16351). Toutes les conditions énoncées par cette norme ont été respectées, que ce soit au niveau des dimensions des panneaux et du banc d'essai ou encore du temps de réalisation de l'essai individuel. Selon cette norme, le nombre d'éprouvettes (i.e. panneau) doit être minimum de 15 par combinaison³⁸ (i.e. catégorie : D40, D24 et Mixte). Cette condition n'est donc pas respectée. Cela peut potentiellement expliquer le test de Fisher non-concluant sur les régressions linéaires prises par catégorie mais significatif lorsqu'on prend en compte tous les panneaux testés (Tableau 18). Bien que le nombre de panneaux testés ne soit pas suffisant selon la norme, cela permet de dégager des tendances générales, qui pourront être vérifiées par des études ultérieures respectant le nombre d'échantillons minimum requis. Au

38. Pour des largeurs de panneaux inférieures à 500 mm. Pour rappel, dans notre cas, la largeur moyenne des panneaux est de 360 mm.

regard de la littérature scientifique, ce fonctionnement n'est pas anodin. C'est notamment le cas pour deux études portant sur le CLT menées par Zhou *et al.* (2014) et Buck *et al.* (2016b) qui ne prennent chacun respectivement que 9 et 10 échantillons par configuration de panneaux CLT testés.

La détermination du module de cisaillement roulant ne s'est pas faite selon la configuration du test énoncée par la norme EN 16351, schéma présenté à l'Annexe 9 (page 82). Or, la majeure partie de la communauté de chercheurs qui étudient le CLT procède principalement selon cette configuration spécifiquement prévue pour sa détermination (Ehrhart *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2014). Dans notre cas, il s'agissait d'une tentative de détermination par manipulation de formule théorique. Aucune des méthodes testées n'a donné de résultats concluants ; soit parce que les valeurs obtenues sont négatives soit parce qu'elles ne concordent pas avec les valeurs trouvées dans la littérature, notamment dans la publication de Aicher *et al.* (2016a) ainsi que dans l'article de Ehrhart *et al.* (2015) portant sur la comparaison du cisaillement roulant de plusieurs essences.

Comparaison des résultats avec la littérature

Avant d'entamer toutes discussions et conclusions sur les résultats obtenus, ceux-ci doivent être comparés à la littérature afin de les valider. La Tableau 21 compare les résultats obtenus pour ce mémoire portant sur l'ensemble des panneaux à ceux de l'étude de Franke (2016), qui étudie des panneaux CLT exclusivement composés de hêtre. Malheureusement, Franke n'énonce pas la qualité (classe de résistance) du hêtre utilisé, il indique uniquement la provenance suisse des hêtres. Il n'indique pas non plus le type de colle utilisé.

TABLEAU 21 – Comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'étude de Franke (2016).

	Résistance à la flexion, valeur caractéristique, en $[N/mm^2]$	Module d'élasticité global, valeur moyenne, en $[N/mm^2]$
Symbole	$f_{m,0,k}$	$E_{m,0,moyen}$
Valeurs pour le CLT de hêtre, (Franke ,2016)	43,8	12.306
Valeurs pour le CLT de hêtre, résultant de ce travail	63,7	12.222

La valeur moyenne pour la résistance à la flexion est tout à fait acceptable, celle-ci est même plus élevée que celle énoncée par Franke. Cependant, la configuration des panneaux pour cette étude est différente, puisqu'il s'agit de panneau CLT 5 plis d'une épaisseur totale (H) de 120 mm contre des panneaux CLT 3 plis d'une hauteur totale de 75 mm dans notre cas. Les modules d'élasticité sont, quant à eux, proches validant nos résultats.

13 Validation de l'hypothèse posée pour chaque objectif

13.1 Objectif 1 : Validation d'une méthode de dimensionnement par des essais pratiques

L'hypothèse posée était : « Les valeurs prédites par le dimensionnement concordent avec les valeurs réelles, obtenues à l'aide d'essais ».

Pour rappel, le dimensionnement estimait la force que le panneau devait subir pour atteindre sa rupture. Les estimations obtenues étaient : 25.500 N pour le D24, 43.500 N pour le D40 et 43.250 N pour les panneaux mixtes (Tableau 16).

Sur l'ensemble des 29 panneaux offrant des résultats acceptables, seul le panneau n°30 est en deçà de la valeur calculée pour les panneaux de la catégorie D40, avec une valeur de 41.283 N . Tous les autres obtiennent une force de rupture nettement supérieure à la valeur théorique, avec une valeur moyenne de $53.339 \pm 4.021,2$ N . Cette différence importante peut s'expliquer par le fait que les valeurs utilisées pour ce dimensionnement (provenant de l'EN 338) sont valables pour des éléments utilisés sur leur chant et non sur leur face, comme c'est le cas dans un panneau CLT. De plus, cette norme concerne les éléments singuliers (poutres, planches) et non les éléments composites, tels que le CLT, lamellé-collé, ...

Les essais pratiques ne nous permettent donc pas de valider une méthode de dimensionnement, puisque chacune des méthodes testées sous-évalue fortement la force réelle nécessaire pour obtenir la rupture du panneau en flexion.

13.2 Objectif 2 : Les propriétés mécaniques contrastées (D24 et D40) des lamelles se reflètent lors de leur utilisation dans un panneau CLT

L'hypothèse posée était : « Les panneaux constitués de lamelles classées en D24 présentent des propriétés mécaniques significativement différentes comparativement aux panneaux réalisés à l'aide de lamelles classées en D40 ».

Que ce soit pour la force de résistance à la flexion axiale ($f_{m,0,k}$) ou le module moyen d'élasticité ($E_{m,0,moyen}$), les différences de comportement mécanique ne sont pas significatives entre la classe D24 et D40 (Tableau 19).

Deux explications sont données à ce résultat. D'une part, la norme de classement est prévue pour des planches sollicitées sur leur chant. Or, dans la conformation de panneau CLT employé « hors plan », les lamelles sont sollicitées sur leurs faces, modifiant le sens de sollicitations appliquées sur les défauts des planches et donc leurs propriétés de résistance. D'autre part, la mise en panneau des lamelles estompe fortement l'impact de leurs "défauts" sur les propriétés mécaniques du panneau. Ces derniers sont alors confondus dans la masse du panneau. Cependant, la position de certains défauts sur les plis du panneau CLT a un impact direct. C'est le cas pour les nœuds et les pentes de fil présents sur le pli inférieur³⁹ ;

- Dans le cas des nœuds, il a pu être montré un lien entre la résistance à la flexion et la taille des nœuds présents sur le pli inférieur, comme le montre la Figure 30.
L'influence des nœuds sur les propriétés mécaniques d'éléments en bois est bien connue dans le domaine du bois. En effet, les nœuds apportent une discontinuité des fibres dans le sens axial, diminuant ainsi les propriétés de résistance (Burgers, 2016). La présence d'un nœud est une contrainte mineure pour une sollicitation en compression, mais prend un impact considérable lors d'une sollicitation en traction (Gagliardini, 2019 ; AgroParisTech, non daté). C'est ce qui est observé ici, puisque c'est la présence de nœuds sur le pli inférieur (pli sollicité en traction) qui influence la résistance à la flexion axiale du panneau.
- Le même constat a été fait pour la pente de fil locale ; l'angle créé par la direction du fil par rapport à l'axe principal de la lamelle est inversement proportionnel à la résistance à la flexion. Au plus l'angle est important, au moins la résistance à la flexion sera bonne (Figure 32). Cette constatation est confirmée par Grazide (2014) dans son étude sur la modélisation de la résistance en flexion de bois utilisé en construction. Cependant, pour arriver à cette conclusion, les panneaux possédant à la fois au moins un nœud et au moins une pente de fil locale sur leur pli inférieur ont dû être enlevés, afin de ne pas prendre en compte l'influence des nœuds. Bien que les nœuds et les pentes de fil locales aient tous deux un impact sur la résistance à la flexion, l'influence des nœuds prédomine sur la présence de pentes de fil locales, en termes de résistance à la flexion.
- Les pentes de fil globales ne sont pas assez présentes sur le pli inférieur des panneaux testés, il n'est donc pas possible de tirer une conclusion quant à leur impact sur la résistance à la flexion.

39. voir point 8 : Observation - Analyse visuelle, page 41.

13.3 Objectif 3 : Indépendance de la qualité des lamelles du pli central par rapport à la résistance globale du panneau

L'hypothèse posée était : « La classe de résistance (D24 ou D40) de pli central n'a pas d'impact sur la résistance globale du panneau. Seule la qualité des plis inférieur et supérieur influence les propriétés mécaniques du panneau testé en flexion axiale ».

Tant pour le module d'élasticité global que pour la résistance à la flexion axiale, les valeurs obtenues pour les panneaux CLT mixtes sont supérieures à celles obtenues pour les panneaux de classe D40 (Tableau 17).

Le fait que les panneaux type « Mixte » obtiennent au moins une aussi bonne résistance à la flexion que les panneaux D40 nous démontre effectivement que la couche croisée n'influence pas la résistance globale du panneau. Cependant, une anomalie réside dans les valeurs plus élevées pour le CLT mixte que pour le CLT D40. Or, intuitivement et théoriquement, le calcul par dimensionnement prévoit des valeurs légèrement inférieures pour les panneaux de type « Mixte » que pour le D40. L'explication de cette incohérence se trouve dans la norme de classement visuel. En effet, cette norme prévoit quatre catégories de classement⁴⁰ pour le hêtre. Or, ce bois peut connaître des propriétés mécaniques supérieures, pouvant le classer dans une catégorie fictive D50 voire plus, non prise en compte par la norme (FCBA, 2017). Il faut comprendre que, lorsqu'on classe une planche dans une catégorie, par exemple en D40, cela signifie qu'elle possède au minimum les propriétés de la classe, mais elle peut également présenter de meilleures propriétés mécaniques. Cette particularité explique alors les valeurs plus élevées pour les panneaux mixtes que pour les panneaux D40.

14 Répercussion des résultats obtenus, pour la scierie

En résumé, le classement visuel de lamelles en différentes classes de résistances mécaniques n'apporte pas une plus-value pour des panneaux CLT 3 plis sollicités horizontalement (« hors plan »). En effet, les deux classes testées présentent toutes deux des propriétés de résistance mécanique comparables. Les résultats obtenus ont donc une conséquence directe quant aux prises de décision de la scierie pour l'ajout du CLT à leur gamme de produits.

Applicabilité du protocole à la chaîne de production

Outre le fait qu'un classement en D24 et D40 ne constitue pas une réelle plus-value, le classement visuel, tel que nous l'avons réalisé, est difficilement applicable en pratique dans

40. D18, D24, D35 et D40.

une chaîne de production. En effet, les coûts liés à ce classement sont trop élevés, en raison du temps nécessaire pour ce dernier. Pour rappel, trois personnes et plusieurs jours de classement ont été nécessaires pour la fabrication des 10 panneaux CLT trois plis de $1,2\text{ m} \times 2,5\text{ m}$.

De plus, il a été souligné que les éléments limitant la résistance à la flexion des panneaux sont la taille des nœuds ainsi que la pente de fil, quand ils sont présents sur le pli inférieur. L'échauffure présente en quantité est, en effet, évitable lors du stockage de la grume dans le parc à grumes.

Étant donné que le classement en différentes classes de résistance n'est pas nécessaire, seuls les critères de diamètre de nœuds et de pente de fil nécessitent une vérification. Pour le premier critère, deux possibilités sont envisageables. Premièrement, réaliser la mesure du diamètre des nœuds par un opérateur formé, tel qu'opéré pour ce mémoire lors du classement des lamelles. Ce tri pourrait alors être fait lors du classement des planches réalisé pour le thermotraitement. De la sorte, il n'y a pas besoin de personnel supplémentaire dans la chaîne de production puisque une seule personne pourrait mettre en œuvre simultanément le classement envisagé pour les planches destinées au thermotraitement et la mesure des nœuds. C'est la méthode que je préconise puisque la mesure du diamètre des nœuds est une opération facile à joindre au classement actuellement réalisé. Une autre solution est d'étudier la possibilité d'un classement automatisé par lecture optique : la méthode laser. Cette méthode a été observée lors d'une visite chez le constructeur wallon de maisons en CLT, *Stabilame*. Le gros désavantage de ce genre de technologie est son coût extrêmement élevé qui peut représenter un investissement difficile à justifier pour la société. En effet, l'utilité de ce type de matériel pourrait être mise en cause puisque le CLT serait un des produits proposés sur le marché par Scidus, et non son produit numéro 1.

Pour ce qui est de la pente de fil, ce défaut prend plus de temps à être déterminé puisque une observation minutieuse doit être réalisée, surtout pour la pente de fil locale. De nouveau, deux alternatives sont possibles. Soit un classement par un opérateur, mais cela reviendrait au problème énoncé précédemment : le temps d'auscultation trop long. Soit par une lecture optique de la planche, pour déterminer la pente des rayons ligneux. Plusieurs méthodes de lectures optiques existent, par exemple une lecture laser⁴¹ ou encore un scanner à micro-ondes⁴² (Jehl *et al.*, 2011; Ehrhart *et al.*, 2017). Comme pour l'analyse des nœuds, ces outils représentent un coût conséquent, non justifiable pour Scidus. Pour contourner le problème financier, Ehrhart *et al.* (2017) proposent une approche à faible coût, au départ de matériel facilement accessible dans le commerce (appareil photo commercial, logiciel *open*

41. Envoi d'un ou plusieurs faisceaux lumineux (lumière laser) sur la lamelle de bois et analyse des formes lumineuses formées par la diffusion de la lumière incidente, à la surface du bois. C'est une méthode superficielle, il n'y a pas d'analyse de l'intérieur de la pièce de bois.

42. Modélisation complète de la lamelle par envoi d'onde de courte longueur (micro-ondes). Méthode analysant la surface mais aussi l'intérieur de la lamelle de bois.

source). Le principe est alors une analyse photographique, semblable à celle réalisée pour ce mémoire, mais automatisée par programme informatique. Bien que l'outil proposé dans la publication d' Ehrhart *et al.* (2017) ne soit pas encore totalement abouti, il présente de bons résultats et perspectives d'application en industrie. La mise en œuvre de ce genre de dispositif est tout à fait imaginable pour Scidus, car il est peu coûteux et demande peu de place.

Tant pour la mesure des nœuds que pour celle de la pente de fil, des solutions ont été proposées. Mais, cela n'apporte en rien une solution pour contourner l'influence de ces défauts sur la résistance du panneau, lorsqu'ils sont présents sur le pli inférieur. Une solution pour limiter l'influence des nœuds est alors de ne pas placer les lamelles présentant ces défauts sur le pli sollicité en traction mais, par exemple, sur le pli supérieur (sollicité en compression). Il en est de même pour les lamelles comportant une ou plusieurs pentes de fil. Malheureusement, cette « solution » n'est, en pratique, pas applicable à l'échelle industrielle. Une alternative serait alors de séparer, lors du classement, les lamelles présentant des nœuds/pentes de fil des autres lamelles pour ensuite les utiliser dans le pli central. Cela est imaginable pour la scierie puisque les lamelles employées pour le pli central doivent être mises à longueur et, au vu de la configuration actuelle de la scierie, ces dernières doivent transiter dans un hall différent de celui où se fait la fabrication des panneaux CLT. Donc, il faut dans tous les cas mettre de côté une partie des lamelles classées afin qu'elles puissent être mises à longueur. En procédant de la sorte, on évite de positionner les lamelles présentant des nœuds/pentes de fil sur le pli inférieur.

En conclusion, Scidus a tout intérêt à développer une gamme de produits CLT puisqu'avec des lots de rebut, l'entreprise peut manufacturer des panneaux CLT présentant de bonnes propriétés mécaniques. L'intégration dans la chaîne de production du classement des lamelles est tout à fait envisageable. La mesure des nœuds peut être intégrée au classement visuel effectué pour les avivés destinés au BMT. La mesure de la pente de fil est, quant à elle, envisageable selon le dispositif à faible coût proposé dans la publication d'Ehrhart *et al.* (2017).

15 Apport pour la filière bois

Pour terminer cette partie discussion, il est important de comparer les résultats obtenus pour le CLT de hêtre avec d'autres études portant sur d'autres essences de bois, afin de démontrer ou non l'intérêt du hêtre pour cette technologie.

Les recherches sur le CLT sont de plus en plus nombreuses, avec des systèmes toujours plus imaginatifs, comme par exemple une diminution de l'angle⁴³ formé par la couche croisée

43. L'angle est normalement de 90° (voir définition point 2 : La technologie CLT), mais Buck *et al.* (2016b) ont testé un angle de 45°.

avec les plis inférieur et supérieur (Buck *et al.*, 2016b), ou encore un mélange d'essences au sein d'un panneau, voire un mixte de feuillus-résineux (Aicher *et al.*, 2016b). À titre de comparaison, le Tableau 22 donne quelques valeurs trouvées dans la littérature.

Dans ce tableau, on remarque que les panneaux CLT uniquement fabriqués en hêtre offrent de meilleures caractéristiques de résistance et de rigidité que tous les autres types de CLT. La recherche sur le CLT hybride, composé d'épicéa commun pour les plis extérieurs et de hêtre pour le pli croisé a pour but d'améliorer la résistance au cisaillement roulant de la couche croisée (Aicher *et al.*, 2016b). De plus, Buck *et al.* (2016b) obtiennent de meilleurs résultats lorsque l'angle formé entre la couche croisée et les plis extérieurs est de 45° au lieu de 90°, et ce pour des panneaux de même conformation. La valeur pour le CLT d'eucalyptus dans ce tableau est donnée à titre d'information, pour montrer les recherches qui se font par ailleurs dans le monde.

TABLEAU 22 – Comparaison des résultats obtenus avec ceux d'autres études portant sur le CLT.

	Résistance à la flexion, valeur caractéristique, en $[N/mm^2]$	Module d'élasticité, valeur moyenne, en $[N/mm^2]$	Nombre de pli	Épaisseur du panneau, en $[mm]$	Source
Symbole	$f_{m,0,k}$	$E_{m,0,moyen}$	/	/	/
CLT de hêtre	63,7	12.223	3	75	Noiret (2019)
CLT de hêtre	43,8	12.306	5	120	Franke (2016)
CLT d'épicéa commun	26,4	9.700	5	120	Franke (2016)
CLT d'épicéa commun	28,3	8.243	5	95	Buck <i>et al.</i> (2016a)
CLT d'épicéa commun avec un angle de 45° de la couche croisée	41,8	9.517	5	95	Buck <i>et al.</i> (2016b)
CLT hybride : épicéa commun et hêtre pour la couche croisée	43,3	10.100	3	110	Aicher <i>et al.</i> (2016b)
CLT d'eucalyptus ⁴⁴	24,5	11.466	3	54	Liao <i>et al.</i> (2016)

Ce tableau souligne une partie des possibilités que possède la technologie CLT, tant au niveau du choix des essences que de la conformation des panneaux. De plus, au vu de ce tableau, le hêtre apparaît comme l'essence présentant les meilleures propriétés mécaniques lorsque celle-ci est usinée sous forme de panneaux CLT employés horizontalement.

44. *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*.

Pour aller plus loin ...

Pour revenir à une vision de bioingénieur, maintenant que l'intérêt d'utilisation du hêtre en construction a été démontré, plus particulièrement sous forme de CLT, essayons d'établir le lien entre la ressource sur pied et la fabrication de CLT en hêtre. Nous avons vu dans la deuxième partie : État de l'art, que la ressource sur pied de hêtre en Wallonie est composée d'un pourcentage non-négligeable de gros arbres (circonférences pouvant facilement dépasser 210 *cm*, à 1,3 *m* de hauteur). Or, nous avons également vu qu'un des objectifs du CLT est de valoriser les produits connexes du sciage de grume. De ce fait, au plus les arbres présentent un diamètre important, au plus la quantité de ces connexes utilisables pour faire du CLT sera importante. Cela est d'autant plus vrai dans la situation concrète de la scierie Scidus qui valorise les rebuts du BMT. Un autre élément qui me semble important avec la découpe de gros arbres, est la présence potentiellement plus importante de défauts internes, non-visibles avant la découpe de la grume. C'est notamment le cas des branches mortes dont la cicatrice formée sur l'écorce s'est estompée avec le temps, jusqu'à disparaître. Or, ce travail propose des solutions quant à la gestion de certains défauts, notamment des pentes de fil et des nœuds dans le cas de la conception de panneaux CLT.

Sixième partie

Conclusion et perspectives

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés aux propriétés mécaniques de panneaux CLT trois plis, fabriqués en hêtre et testés horizontalement. L'objectif principal étant d'apporter de nouvelles données quant à la possible utilisation du hêtre dans la construction. Outre cela, l'application de la récente norme de classement visuel NF B 52-001-1 était un point clef de ce travail.

Il ressort de nos travaux que le classement visuel des lamelles constitutives des panneaux CLT, selon différentes classes de résistance mécanique (D40 et D24) n'impacte pas significativement les propriétés mécaniques du panneau CLT. Par ailleurs, l'utilisation de deux méthodes de dimensionnement (méthode gamma et analogie au cisaillement) n'a pu être validée par les essais pratiques. En effet, les valeurs calculées sont bien en deçà des valeurs obtenues par les essais pratiques.

Cependant, par suite d'une analyse visuelle approfondie, certains liens ont pu être établis entre la résistance de panneaux sollicités en flexion et les défauts présents sur leur pli inférieur. C'est le cas pour les nœuds et la pente de fil. Au plus le diamètre des nœuds présents sur le pli inférieur est important, au moins la résistance à la flexion est élevée. Il en est de même avec l'angle formé par la pente de fil : au plus la valeur de l'angle est élevée, au moins la résistance à la flexion est bonne. L'influence des nœuds étant prépondérante sur la pente de fil.

Les valeurs obtenues, autant pour le module d'élasticité que pour le module de rupture, sont plus de 35% supérieures à celles obtenues par des panneaux CLT similaires fabriqués à partir d'épicéa commun. Et cela malgré que les panneaux aient été réalisés avec des rebuts que la scierie Scidus ne sait valoriser autrement. Le CLT de hêtre représente donc un produit potentiellement intéressant à ajouter à la gamme de produits proposés par Scidus. En plus d'afficher les avantages d'un bois local, à la ressource abondante en forêts wallonnes, le hêtre surpasse l'épicéa en termes de propriétés mécaniques.

Ce mémoire peut être vu comme un point de départ concernant la fabrication de panneau CLT en hêtre par Scidus. Dans l'optique de compléter ce travail, plusieurs idées sont proposées.

Premièrement, réitérer les expériences réalisées mais en respectant le nombre minimum de 15 échantillons à tester, énoncé par la norme NBN EN 16351.

Deuxièmement, il a été relevé qu'en présence de cœur rouge sur l'une des lamelles du pli inférieur, une rupture entre ce cœur rouge et le bois blanc était observable dans 30% des

cas. Bien que de nombreuses études portent sur le cœur rouge du hêtre, il n'y a pas de données quant à l'adhérence entre le cœur rouge et le bois blanc. Dès lors, ce phénomène serait intéressant à quantifier.

Troisièmement, l'étude de l'efficacité et de l'impact de la colle utilisée sur la résistance du panneau pourrait voir le jour. En effet, les essences feuillues sont plus difficiles à encoller et leur utilisation sous forme d'éléments nécessitant de la colle est très récente. De ce fait, les connaissances sur l'efficacité des colles dans ce domaine sont faibles. De plus, pour l'un des panneaux, la délamination du joint de colle a été observée, renforçant le besoin de connaissances des colles utilisées.

Bibliographie

- AICHER, S., CHRISTIAN, Z. et HIRSCH, M. (2016a). Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations. *Holzforschung*, Stuttgart, Germany, volume 70, n°8, pp.773–781.
- AICHER, S., HIRSCH, M. et CHRISTIAN, Z. (2016b). Hybrid cross-laminated timber plates with beech wood cross-layers. *Construction and Building Materials*, 124:1007–1018.
- ALDERWEIRELD, M., BURNAY, F., PITCHUGIN, M. et LECOMTE, H. (2015). Inventaire forestier wallon-résultats 1994-2012. SPW, DGO3, DNF, Direction des Ressources forestières, Jambes, Belgique, 236 pages.
- ARMAND, G. (2002). *Le hêtre autrement*. Institut pour le développement forestier, Paris, France, 262 pages.
- ARNAL, D. et DE POTTER, B. (2011). Hêtre au coeur rouge et hêtre blanc : les feux jumeaux. *Forêt Wallonne*, n°113, Forêt Wallone a.s.b.l, Belgique, pp. 32–41.
- BARY-LENGER, A., PIERSON, J., PONCELET, J. et DAVID, C. (1999). *Transformation, utilisation et industries du bois en Europe*. Editions du Perron Liège, Belgique, 557 pages.
- BASTIEN, Y., HEIN, S. et CHAVANE, A. (2005). Sylviculture du hêtre : contraintes, enjeux, orientations de gestion. *Revue Forestière Française*, n°57, AgroParisTech, Nancy, France, pp. 111–122.
- BECKER, G., SEELING, U. et WERNSDORFER, H. (2005). Relations entre la sylviculture et la qualité du bois de hêtre : L'expérience allemande. *Revue forestière française*, n°57 (2), AgroParisTech, Nancy, France, pp. 227-238.
- BLASS, H. J. et FELLMOSE, P. (2004). Design of solid wood panels with cross layers. *In 8th world conference on timber engineering, Lahti, Finland*, volume 14, 6 pages.
- BOLTE, A., CZAJKOWSKI, T. et KOMPA, T. (2007). The north-eastern distribution range of european beech - a review. *Forestry*, Germany, volume 80, pp.416–429.
- BRANDNER, R., FLATSCHER, G., RINGHOFER, A., SCHICKHOFER, G. et THIEL, A. (2016). Cross laminated timber (clt) : overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, Graz, Austria, volume 74, n°3, pp.331–351.
- BRUNIN, E., HEYNINCK, C. et ARNAL, D. (2012). *Carnet d'assistance pour l'évaluation qualitative des bois sur pied et abattus : Conséquence, tolérance, mesure, normes*. Forêt Wallonne asbl, Belgique, 102 pages.
- BUCK, D., HAGMAN, O., WANG, A. et GUSTAFSSON, A. (2016a). Further development of cross-laminated timber (clt) : Mechanical tests on 45° alternating layers. *In World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), Vienna, August 22-25 2016*. Vienna University of Technology, Austria.
- BUCK, D., WANG, X. A., HAGMAN, O. et GUSTAFSSON, A. (2016b). Bending properties of cross laminated timber (CLT) with a 45 alternating layer configuration. *BioResources*, volume 11, Lulea University of Technology, Sweden:pp. 4633–4644.

- BURGERS, A. (2016). Caractérisations physico-mécaniques de bois "sans défauts" pour la conception mécanique : application aux pins de la région méditerranéenne française. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, France, 139 pages.
- CDAF (2011). Orientation sylvicole/guide n°5 : Hêtre. Centre de développement agroforestier de Chimay, Belgique, 3 pages.
- CIRAD (2012). Fiche technique du hêtre. Tropix 7, Paris, France, 4 pages.
- COURS, J. (2017). Sylviculture du hêtre commun (*Fagus sylvatica* L.) en réponse à la demande des transformateurs primaires dans un contexte de changement climatique. (Synthèse bibliographique). France, 30 pages.
- DEBLESER, E. et SCHUMACHER, J. (2014). *Caractérisation du bois de hêtre pour les applications structurales*. Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique. Mémoire de fin d'études.
- DEFAYS, E. (2017). Note informative sur les raisons de combinaisons entre classes isuelles de résistance pour le classement du hêtre. Belgique, 3 pages.
- DENEUFBOURG, F., DEFAYS, M. et FRÈRE, H. (2011). Le marquage ce du bois de structure à section rectangulaire et le classement pour leur résistance. Belgique, 31 pages.
- EHRHART, T., BRANDNER, R., SCHICKHOFER, G. et FRANGI, A. (2015). Rolling shear properties of some european timber species with focus on cross laminated timber (clt) : Test configuration and parameter study. *In International Network on Timber Engineering Research : Proceedings of Meeting, ETH Zurich, Switzerland*, volume 48, pp. 61–76. Timber Scientific Publishing, KIT Holzbau und Baukonstruktionen.
- EHRHART, T., FINK, G., STEIGER, R. et FRANGI, A. (2016). Strength grading of european beech timber for the production of glt & clt. *In International Network on Timber Engineering Research : Proceedings of Meeting, ETH Zurich, Switzerland*, volume 49, pp. 29-44. Timber Scientific Publishing, KIT Holzbau und Baukonstruktionen.
- EHRHART, T., STEIGER, R. et FRANGI, A. (2017). A non-contact method for the determination of fibre direction of european beech wood (*fagus sylvatica* l.). *European journal of wood and wood products*, 76(3):pp. 925–935.
- ESPINOZA, O., TRUJILLO, V. R., MALLO, M. F. L. et BUEHLMANN, U. (2015). Cross-laminated timber : Status and research needs in europe. *BioResources*, Volume 11, n°1, pp. 281–295.
- FCBA (2017). Caractérisation du hêtre pour une utilisation structurelle répondant aux exigences du marquage CE. FCBA INFO du 31 novembre 2017, France, 6 pages.
- FELLMOSER, P. et BLASS, H. J. (2004). Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements. *In CIB-W18 meeting, n°37*. Edinburgh, United Kingdom, 8 pages.
- FERRAND, J.-C. (1982). Etude des contraintes de croissance deuxième partie : Variabilité en forêt des contraintes de croissance du hêtre (*fagus sylvatica* l.). *In Annales des Sciences forestières, n°39 (3)*. EDP Sciences, Seichamps, France, pp.187-218.

- F.N.E.F (2019). Mercuriale des prix moyens du bois sur pied – Printemps-été 2019. Diffusée par la Fédération Nationale des Experts Forestiers A.S.B.L, Belgique, 1 page.
- FRANKE, S. (2016). Mechanical properties of beech clt. *In Proceedings of the WCTE 2016 World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria*. 7 pages.
- GAGLIARDINI, O. (2019). Construction Bois selon l’Eurocode 5. Université de Grenoble, France, 115 pages.
- GAGNON, S. et PIRVU, C. (2011). *CLT handbook : cross-laminated timber*. FPInnovations, Québec, Canada, 642 pages.
- GRAZIDE, C. (2014). *Une modélisation de la résistance en flexion du Pin Maritime utilisé en construction*. Université de Bordeaux, France, 172 pages. Thèse de doctorat.
- GÜLZOW, A., RICHTER, K. et STEIGER, R. (2011). Influence of wood moisture content on bending and shear stiffness of cross laminated timber panels. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(2):193–197.
- HARRIS, R., RINGHOFER, A. et SCHICKHOFER, G. (2013). *European Conference on Cross Laminated Timber (CLT) : The State-of-the-Art in CLT Research*. Graz University of Technology, Austria, 266 pages.
- HOLMBERG, S. (2000). A numerical and experimental study of initial defibration of wood. University Of Lund, Sweden, 216 pages.
- HOUTINFOBOIS (2012). Bois - guide pour le bon usage. Bruxelles, Belgique, 227 pages.
- HOUTINFOBOIS (2018). Etat de la construction en bois en belgique en 2017–2018. Bruxelles, Belgique, 30 pages.
- HUART, O. et RONDEUX, J. (2001). Genèse, évolution et multiples facettes d’une maladie inhabituelle affectant le hêtre en région wallonne. *Forêt Wallonne*, n°52, Forêt Wallone a.s.b.l, Belgique, pp. 8–19.
- IPRFW (2016). Inventaire permanent des ressources forestières de wallonie - exploitation des données et résultats de l’inventaire 2008-2015. SPW, DGO3, DNF, Direction des Ressources forestières, Jambes, Belgique, 246 pages.
- JACQUEMIN, F., KERVYN, T., BRANQUART, E., DELAHAYE, L., DUFRÊNE, M. et CLAESSENS, H. (2014). Les forêts anciennes en wallonie. 1ère partie : concepts généraux. *Forêt wallonne*, n°131, Forêt Wallone a.s.b.l, Belgique, pp. 34–49.
- JEHL, A., BLERON, L., MERIAUDEAU, F. et MARCHAL, R. (2011). Apport de la mesure de pente de fil au classement mécanique des bois de structures. *In Congrès français de mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc, 92400 Courbevoie, France
- JELEČ, M., VAREVAC, D. et RAJČIĆ, V. (2018). Cross-laminated timber (clt)–a state of the art report. *Građevinar : časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera*, Croatia, volume 70, n°2, pp. 75–95.

- KERVYN, T., SCOHY, J.-P., MARCHAL, D., COLLETTE, O., HARDY, B., DELAHAYE, L., WIBAIL, L., JACQUEMIN, F., DUFRÊNE, M. et CLAESSENS, H. (2017). La gestion patrimoniale des forêts anciennes de Wallonie (Belgique). *Revue Forestière Française*, n°69, AgroParisTech, Nancy, France, pp. 545–560.
- LATTE, N., KINT, V., DROUET, T., PENNINGCKX, V., LEBOURGEOIS, F., VANWIJNSBERGHE, S. et CLAESSENS, H. (2015). Dendroécologie du hêtre en forêt de soignes. les cernes des arbres nous renseignent sur les changements récents et futurs. *Forêt.Nature*, n°137, Belgique pp. 24–37.
- LATTE, N., LEBOURGEOIS, F., KINT, V., DROUET, T. et CLAESSENS, H. (2017). Le hêtre face au changement climatique : le cas de la Belgique. *Revue Forestière Française*, n°69, AgroParisTech, Nancy, France, pp. 205–218.
- LIAO, Y., TU, D., ZHOU, J., ZHOU, H., YUN, H., GU, J. et HU, C. (2016). Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers. *Construction and Building Materials*, 132:508–515.
- MOHAMMAD, M., GAGNON, S., DOUGLAS, B. K. et PODESTO, L. (2012). Introduction to cross laminated timber. *Wood Design Focus*, volume 22, n°2, pp. 3–12.
- NEPVEU, G., CONSTANT, T. et WERNSDORFER, H. (2005). La qualité du bois de hêtre : Vingt ans après, quoi de neuf depuis la monographie INRA ? *Revue forestière française*, n°57 (2), AgroParisTech, Nancy, France, pp. 239-248.
- OEWB (2017). PanoraBois Wallonie, ouvrage édité par l’Office Economique Wallon du Bois. Editeur responsable : Emmanuel Defays. Marche-en-Famenne, Belgique, 80 pages.
- POLGE, H. (1981). Influence des éclaircies sur les contraintes de croissance du hêtre. *In Annales des Sciences Forestières*, n°38 (4). EDP Sciences, Seichamps, France, pp. 407–423.
- REULING, D. et FRÈRE, H. (2018). Strength properties assessment for Beech (*Fagus sylvatica*) from Belgium in EN 1912 according French visual grading rules (NF B 52 001). FCBA, France et HoutinfoBois, Belgique, 15 pages.
- RICHTER, A. (2015). Utilisation du hêtre en construction : le point sur les études fcba. *5ème Forum international Bois Construction FBC 2015*, Nancy, France, 7 pages.
- RONDEUX, J., LECOMTE, H., FLORKIN, P., THIRION, M. et HEBERT, J. (1997). Quelques données inédites sur l’accroissement des peuplements de hêtre en région wallonne. Les cahiers forestiers de Gembloux, Faculté des Sciences Agronomiques, Gembloux, Belgique, 16 pages.
- RUDOW, A. (2014). Zur ökologie und entwicklungsgeschichte der buche (*fagus sylvatica* l.). Traduction : Michèle Kaennel Dobbertin (WSL). *Zürcher Wald*, n°3, Switzerland, pp. 4–8.
- SALMÉN, L. (2004). Micromechanical understanding of the cell-wall structure. *Comptes rendus biologiques*, n°327 (9-10), Elsevier, Stockholm, Sweden, pp. 873-880.

- SCHUTZ, J.-P. et BARNOLA, P. (1996). Importance de la qualité et de sa détermination précoce dans un concept d'éducation du hêtre. *Revue Forestière Française*, n°47, Agro-ParisTech, Nancy, France, pp. 417–430.
- SELL, J. et KROPF, F. (1990). *Propriétés et caractéristiques des essences de bois, Suisse*. Lignum.
- TALLIER, P.-A. (2004). Entre déboisement, boisement et reboisement, deux siècles d'histoires des forêts belges (1750-1950). *Forêt Wallonne*, n°68, Forêt Wallonne a.s.b.l., Belgique, pp. 8–19.
- Teissier du CROSS, E., LE TACON, F., NEPVEU, G., PARDÉ, J., PERRIN, R. et TIMBAL, J. (1981). *Le hêtre*. INRA, Paris, France, 613 pages.
- THIEL, A. et SCHICKHOFER, G. (2010). Cltdesigner—a software tool for designing cross laminated timber elements : 1d-plate-design. *In World conference on timber engineering, Riva del Garda, Italy*, volume 1, 6 pages.
- von WUEHLISCH, G. (2012). Fiche technique d'EUFORGEN pour la conservation génétique et l'utilisation du hêtre commun (*Fagus sylvatica*). Version française par Collin, E. et B. Musch (CRGF) et Technicis-traductions. Biodiversity International, Rome, Italie and Min. Agriculture, Paris, France, 6 pages.
- WALLNER-NOVAK, M., KOPPELHUBER, J. et POCK, K. (2014). Cross-laminated timber structural design : Basic design and engineering principles according to Eurocode. *Immenstadt : Eberl Print*, n°190, proHolz, Austria. Traduction par Translation Agency Allesprachen (Graz), 190 pages.
- WANG, Z., FU, H., GONG, M., LUO, J., DONG, W., WANG, T. et CHUI, Y. (2017). Planar shear and bending properties of hybrid CLT fabricated with lumber and LVL. *Construction and Building Materials*, volume 151:pp. 172–177.
- WINTER, S., KREUZINGER, H. et MESTEK, P. (2008). Teilprojekt 15-flächen aus brettstapeln, brettsperrholz und verbundkonstruktionen. *München Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktionen, TU München*, München, Allemagne, 232 pages.
- ZHOU, Q., GONG, M., CHUI, Y. H. et MOHAMMAD, M. (2014). Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce. *Construction and Building Materials*, volume 64, Canada:pp. 379–386.

Références normatives

NF B 52-001-1 : Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés résineux et feuillus - Partie 1 : Bois massif.

NBN EN 1310 : Bois ronds et bois sciés - Méthode de mesure des singularités.

NBN EN 1316 - 1 : Bois ronds feuillus - Classement qualitatif - Partie 1 : Chêne et hêtre.

NBN EN 16351 :2015 : Structures en bois - Bois lamellé croisé - Exigences.

NBN EN 1995-1-1 : Eurocode 5 : calcul des structures en bois, partie 1-1 : Règles générales, Règles générales et Règles pour les Bâtiments.

NBN EN 338 :2016 : Bois de structure - Classes de résistance.

NBN EN 384 :2016+A1 :2018 : Bois de structure - Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique.

NBN EN 408+A1 : Structure en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé – Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques.

NBN EN 14358 :2016 : Structure en bois - Détermination et vérification des valeurs caractéristiques.

Ressources en ligne

CECOBOIS : <https://cecobois.com/bois-lamelle-croise-clt> [Consulté le 20/02/2019]

Construction bois : <https://constructionbois.bilp.fr/> [Consulté le 09/04/2019]

EUFORGEN, fiche du hêtre commun : <http://www.euforgen.org/species/fagus-sylvatica/> [Consulté la première fois le 20/02/2019]

Fichier écologique des essences : <https://www.fichierecologique.be/#/> [Consulté la première fois le 10/12/2018]

FPInnovations : <https://fpinnovations.ca/Pages/index.aspx> [Consulté le 10/12/2019]

HoutinfoBois : <https://houtinfo Bois.be/> [Consulté la première fois le 06/09/2019]

Timber Online : <https://www.timber-online.net/> [Consulté le 09/04/2019]

Scidus : <https://www.scidus.com/> [Consulté la première fois le 06/09/2019]

Explication du mode de fonctionnement de l'ANOVA sur XLSTAT : <https://www.youtube.com/watch?v=4Aa3ek3mmz4> [Consulté le 02/07/2019]

CIRAD : <http://agritrop.cirad.fr/579756/> [Consulté le 17/07/2019]

Cours en ligne : <http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Orga/Orga.htm> [Consulté le 23/07/2019]

Société chimique de France : <http://www.societechimiquedefrance.fr/cellulose.html> [Consulté le 23/07/2019]

Régression linéaire sur Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Régression_linéaire [Consulté le 25/07/2019]

Aide XLSTAT pour la régression linéaire :
https://help.xlstat.com/customer/fr/portal/articles/2062230-régression-linéaire-simple-dans-excel?b_id=9283 [Consulté le 25/07/2019]

Cours en ligne - AgroParisTech : <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/WOODNAT/document/chapitre4-2.html> [Consulté le 29/07/2019]

Formule de flèches : <http://www.corminboeuf.net/resources/Formulaire-de-statique-barres—vert.pdf> [Consulté le 29/07/2019]

Annexes

Annexe 1 : Classement visuel de la qualité du hêtre sur pied et abattus (Brunin *et al.*, 2012)

Classement qualitatif du hêtre

Bois sur pied et abattus

	A	B	C	D ¹
Dimensions minimales :				
• Longueur (m)	3	3	2	sans limite
• Diamètre médian sur (et sous) écorce (cm)	40 (35)	35 (30)	30 (25)	sans limite
Nœuds :				
• découvert et recouvert (nbre/m)	exclu	3/3	admis	admis
• sain (découvert) (mm/m)	exclu	Σ des diamètres ≤ 200/3	admis	admis
• pourri (découvert) (mm/m)	exclu	(dont Σ des diamètres de nœuds pourris ≤ 40/3)	Σ des diamètres ≤ 120/3	admis
Courbure (cm/m)	≤ 2	≤ 4	≤ 8	admis
Cannelure	exclu	exclu	admis	admis
Fils tors (cm/m)	≤ 5	≤ 9	admis	admis
Méplat (%)	≤ 15	admis	admis	admis
Maladie du T	exclu	exclu	admis	admis
Trous de vers	exclu	exclu	exclu	admis

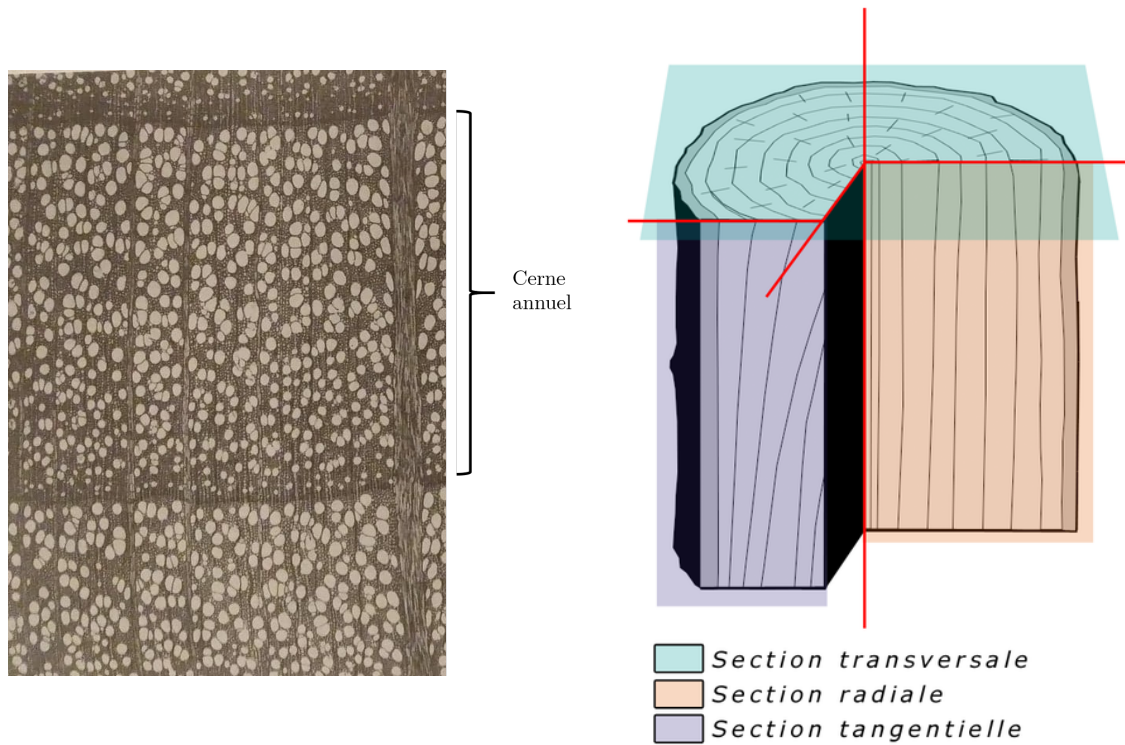
Bois abattus uniquement

	A	B	C	D ¹
Fente de cœur simple	exclu	admis	admis	admis
Cœur étoilé	exclu	exclu	admis	admis
Cœur excentré (%)	≤ 10	≤ 20	admis	admis
Taux de croissance > 4 mm	exclu	admis	admis	admis
Cœur rouge (% du diamètre)	≤ 20 ²	≤ 30 ²	admis	admis
Cœur rouge flammé (% du diamètre)	exclu	≤ 10	≤ 40	admis
Pourriture blanche (% du diamètre)	≤ 10 dans le cœur	≤ 15 dans le cœur	≤ 25 dans le cœur	admis
Discoloration	exclu	exclu	admis	admis

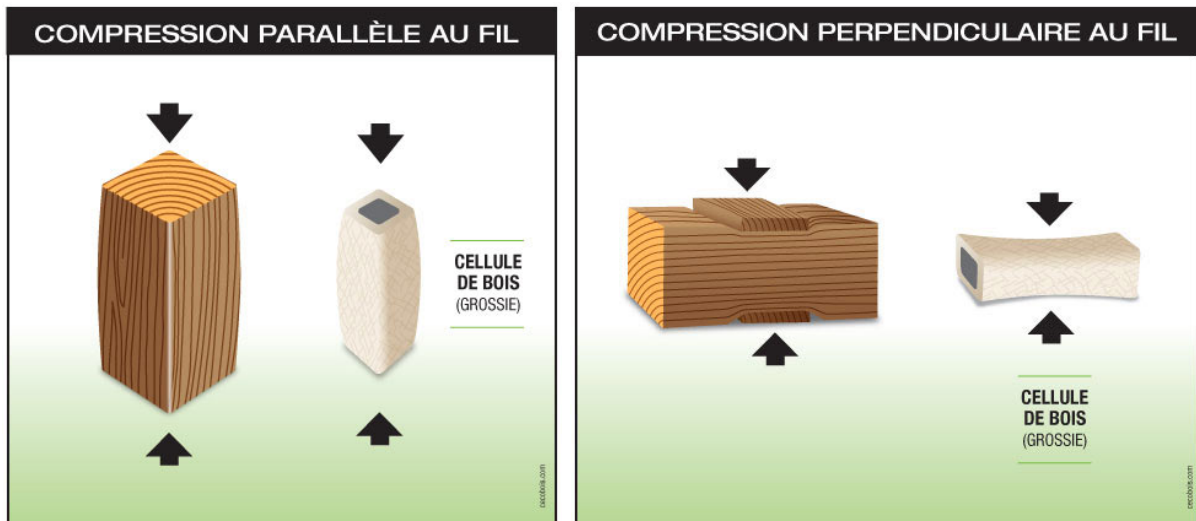
¹ Pour l'ensemble des caractéristiques de la classe D, au moins 40 % du volume de bois doit être utilisable.

² Des sous-classes « A rouge » et « B rouge » autorisent 100 % de cœur rouge sain et homogène.

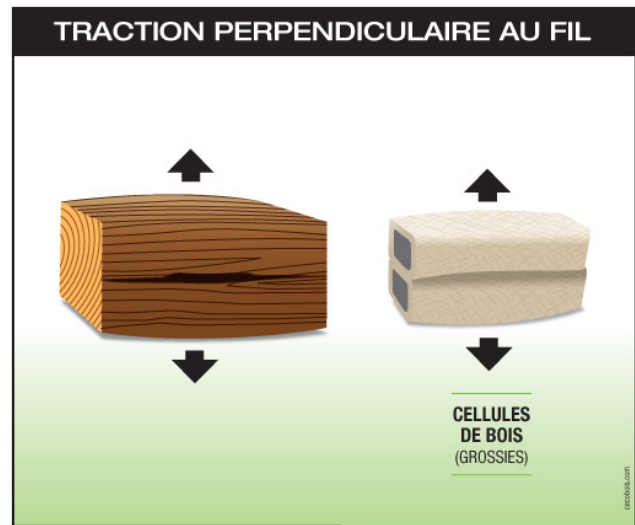
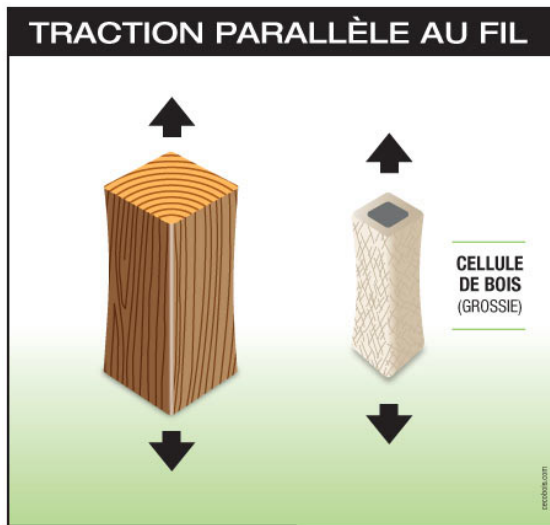
Annexe 2 : Caractéristiques du bois



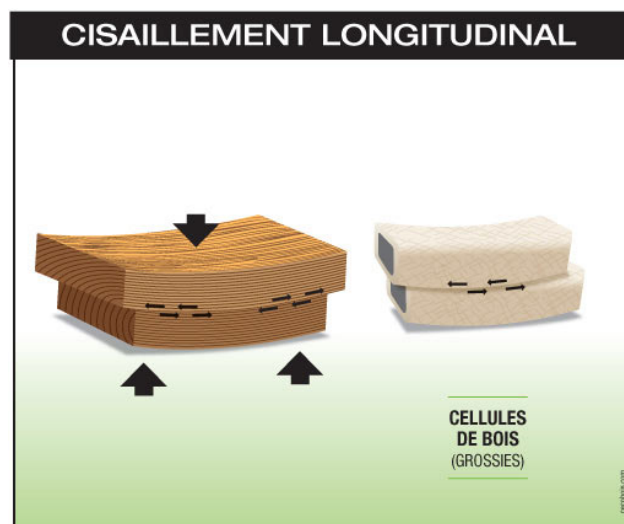
Porosité diffuse de bois de hêtre (Armand, 2002) (gauche) et plans du bois (droite) (Wikipédia, non daté).



Compression axiale (gauche) et compression transversale (droite) [cecobois.com].

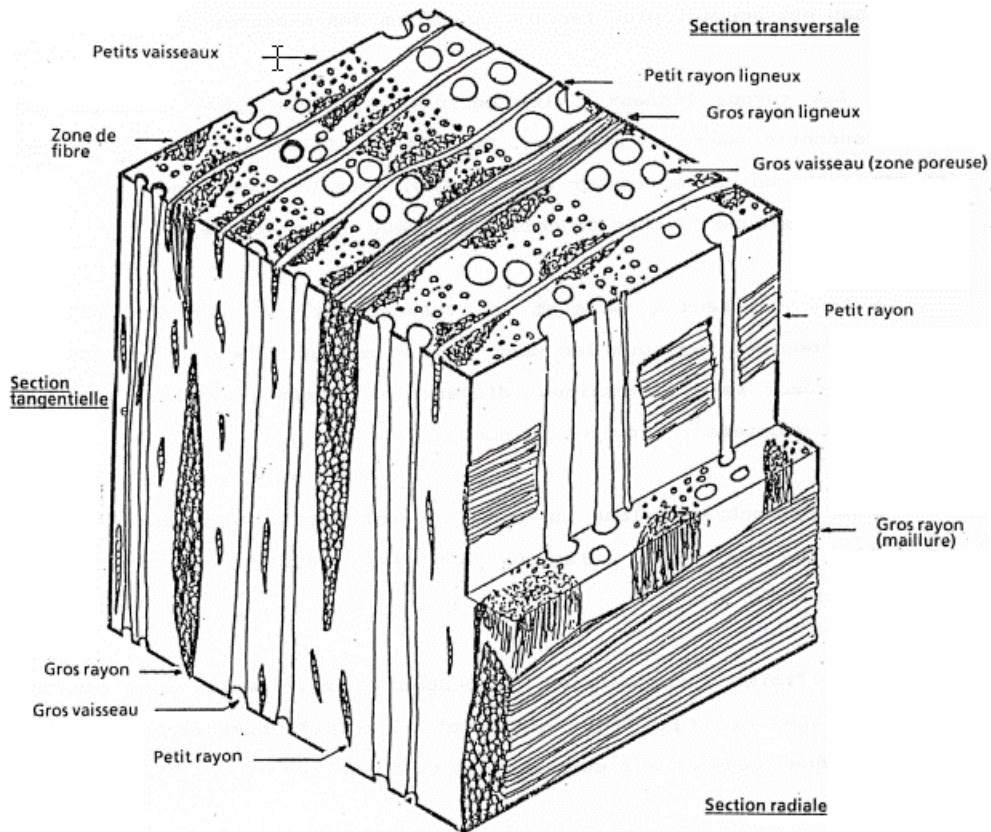


Traction axiale (gauche) et traction transversale (droite) [cecobois.com].

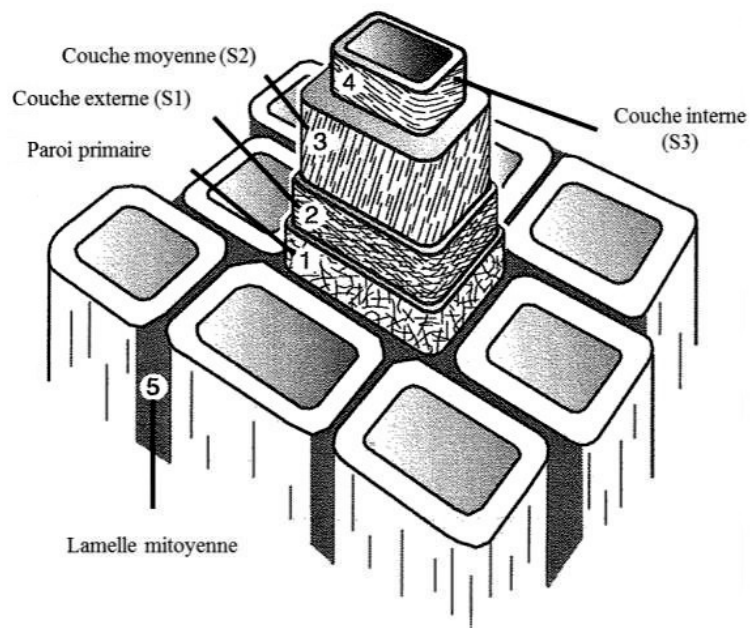


Cisaillement longitudinale [cecobois.com].

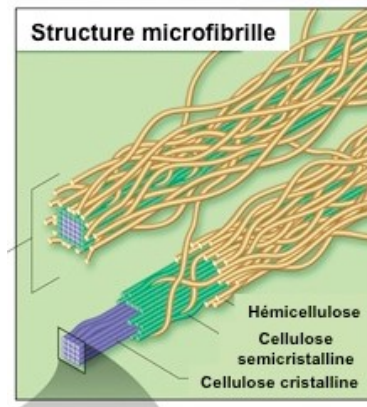
Annexe 3 : Détails de la structure interne du bois de feuillu



Organisation interne des éléments du bois feuillu (Berger, non daté, [[http ://philippe.berger2.free.fr/Bois/Orga/Orga.htm](http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Orga/Orga.htm)]).



Paroi cellulaire du bois (Holmberg, 1998).



Structure de la microfibrille (Société chimique de France, non daté, [http ://www.societechimiquedefrance.fr/cellulose.html]).

**Annexe 4 : Formules de traitement des données, réalisé par B. Dubois
(EN 408+A1 et <http://www.corminboeuf.net>)**

Détermination du module global d'élasticité en flexion : $E_{m,g}$

$$W_g = \frac{F * a * (3o^2 - 4a^2)}{48EI} = \frac{F((3ao^2 - 4a^3))}{48EI}$$

$$E_{m,g} = \frac{F((3ao^2 - 4a^3))}{48W_g I} = \frac{\Delta F}{\Delta W_g} * \frac{3ao^2 - 4a^3}{48I}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} - \frac{bh_2^3}{12}$$

$$\Rightarrow E_{m,g} = \frac{\Delta F}{\Delta W_g} * \frac{3ao^2 - 4a^3}{4(bh^3 - bh_2^3)}$$

Détermination du module local d'élasticité en flexion : $E_{m,l}$

$$W_l = \frac{M_{max} * o_1^2}{8EI} = \frac{F * a * o_1^2}{16EI}$$

$$E_{m,l} = \frac{F * a * o_1^2}{16W_l I} = \frac{\Delta F}{\Delta W_l} * \frac{a * o_1^2}{16I}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} - \frac{bh_2^3}{12}$$

$$\Rightarrow E_{m,l} = \frac{\Delta F}{\Delta W_l} * \frac{3a * o_1^2}{4(bh^3 - bh_2^3)}$$

Détermination de la résistance à la flexion axiale : f_m

$$f_m = \frac{M}{I/v} = \frac{F * a}{2(\frac{bh^2}{6} - \frac{bh_2^3}{6h})} \quad \text{où } v = h/2$$

$$I = \frac{bh^3}{12} - \frac{bh_2^3}{12}$$

$$\frac{I}{v} = \frac{I}{\frac{h}{2}} = \frac{bh^2}{6} - \frac{bh_2^3}{6h}$$

$$\Rightarrow f_m = \frac{3 * F * a}{bh^2 - \frac{bh_2^3}{h}}$$

Détermination du module de cisaillement : G - Méthode 1

$$W_g = \frac{F * a * (3o^2 - 4a^2)}{48 * E_{m,l} * I} + \frac{K * F * a}{G * S * 2}$$

$$\Delta W_g = \frac{\Delta F * a * (3o^2 - 4a^2)}{48(\frac{\Delta F}{\Delta W_l} * \frac{a * o_1^2}{16I})I} + \frac{K * \Delta F * a}{G * S * 2}$$

$$\frac{\Delta W_g}{\Delta F} = \frac{a * (3o^2 - 4a^2)}{3(\frac{\Delta F}{\Delta W_l} * a * o_1^2)} + \frac{K * a}{G * S * 2}$$

$$\frac{K * a}{2 * G * S} = \frac{\Delta W_g}{\Delta F} - \frac{a * (3o^2 - 4a^2)}{3(\frac{\Delta F}{\Delta W_l} * a * o_1^2)}$$

$$G = \left(\frac{\Delta W_g}{\Delta F} * \frac{S * 2}{K * a} - \frac{a(3o^2 - 4a^2)}{3(\frac{\Delta F}{\Delta W_l} * a * o_1^2)} * \frac{S * 2}{K * a} \right)^{-1}$$

$$\Rightarrow G = \left[\frac{S * 2}{K * a} \left(\frac{\Delta W_g}{\Delta F} - \frac{\Delta W_l}{\Delta F} \left(\frac{3o^2 - 4a^2}{3o_1^2} \right) \right) \right]^{-1}$$

Détermination du module de cisaillement : G - Méthode 2

$$W_g = \left(\frac{F * a * (3o^2 - 4a^2)}{48EI} + \frac{K * F * a}{2 * G * S} \right) - \frac{a * F * (o - 2a)}{16EI}$$

$$\frac{\Delta W_v}{\Delta F} = \frac{a * (3o^2 - 4a^2)}{48 * E_{m,l} * I} + \frac{K * a}{2 * G * S} - \frac{a(o - 2a)}{16 * E_{m,l} * I}$$

$$\frac{K * a}{2 * G * S} = \frac{\Delta W_v}{\Delta F} - \frac{a(3o^2 - 4a^2)}{48 * E_{m,l} * I} + \frac{a(o - 2a)}{16 * E_{m,l} * I}$$

$$\Rightarrow G = \left(\frac{2 * S}{K * a} \left[\frac{\Delta W_g}{\Delta F} - \frac{a}{48 * E_{m,l} * I} \left(\frac{(3o^2 - 4a^2)}{3} + a(o - 2a) \right) \right] \right)^{-1}$$

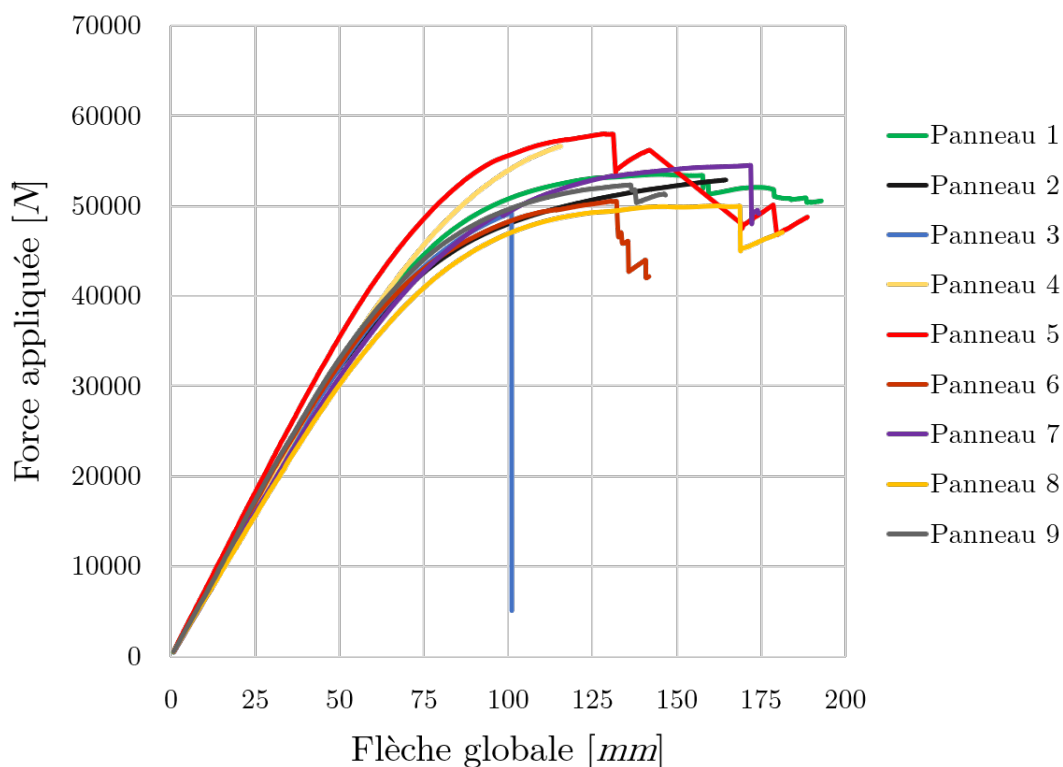
Annexe 5 : Résultats classement visuel

Classe de résistance	Numéro panneau	Numero lamelle	Présence défaut avant essais				Rupture à cause de				Compression	Joint de colle (entre plis)	Cisaillement roulant	Cassée
			Noeuds	Pente de fil globale	Pente de fil locale	Cœur rouge	Noeuds	Pente de fil globale	Pente de fil locale	Cœur rouge				
D40	1	1									X	X		X
		2			X	X			X		X			X
		3									X			X
		4												X
	2	1											X	X
		2												X
		3			X				X					X
		4											X	X
	3	1										X	X	
		2										X	X	
		3										X	X	
		4										X	X	
	4	1												
		2												X
		3			X				X					X
		4												
	5	1										X	X	X
		2			X				X				X	X
		3											X	X
		4											X	X
	6	1			X				X		X			X
		2	X			X	X				X			X
		3			X				X		X		X	X
		4			X				X		X		X	X
	7	1									X	X	X	X
		2			X				X		X			X
		3		X				X			X	X		X
		4									X	X		X
	8	1									X	X	X	X
		2									X	X		X
		3									X	X		X
		4									X	X		X
	9	1									X			
		2									X			
		3		X		X		X			X			X
		4	X				X				X	X		X

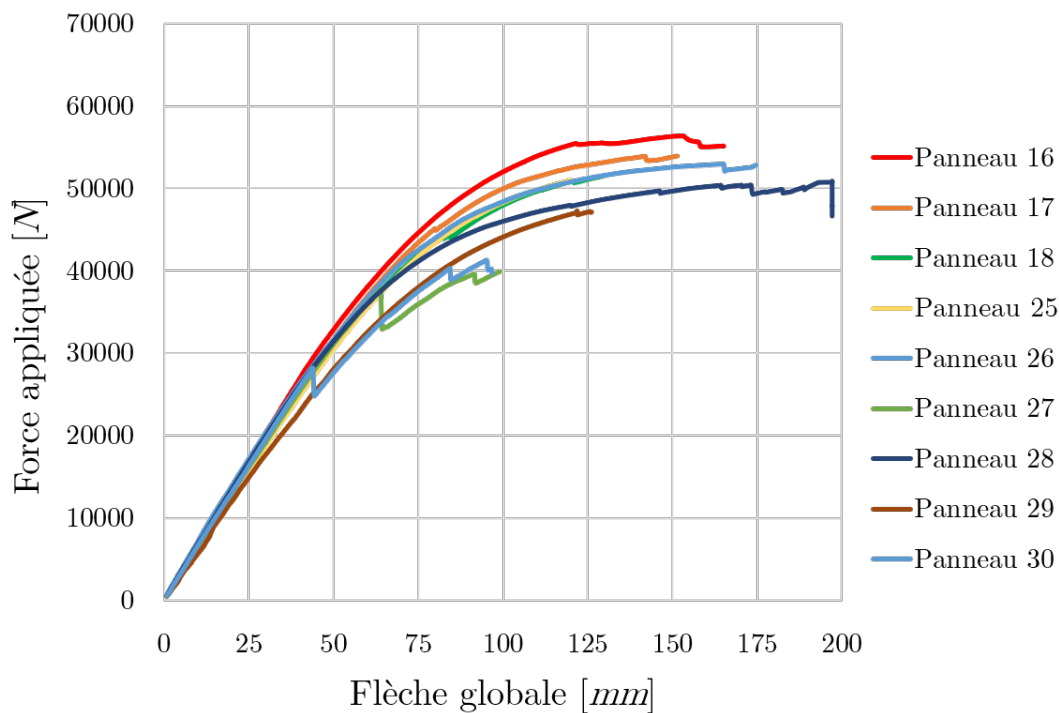
			Présence défaut avant essais				Rupture à cause de							
Classe de résistance	Numéro panneau	Numero lamelle	Nœuds	Pente de fil globale	Pente de fil locale	Cœur rouge	Nœuds	Pente de fil globale	Pente de fil locale	Cœur rouge	Compression	Joint de colle (entre plis)	Cisaillement roulant	Cassée
D24	16	1				X						X	X	X
		2												X
		3			X				X					X
		4											X	X
	17	1										X		
		2	X			X								
		3		X				X						X
		4	X		X				X			X	X	X
	18	1			X	X			X					X
		2			X				X					X
		3	X				X							X
		4												
	25	1											X	X
		2												X
		3												
		4												
	26	1									X	X	X	X
		2			X				X		X	X	X	X
		3	X			X				X	X	X	X	X
		4									X	X	X	X
	27	1	X				X				X	X	X	X
		2									X			X
		3	X				X				X	X		X
		4				X				X	X	X	X	X
	28	1	X			X				X		X	X	X
		2												X
		3		X				X						X
		4	X				X					X	X	X
	29	1				X						X	X	X
		2	X									X	X	X
		3	X		X		X		X			X	X	X
		4										X	X	X
	30	1				X						X	X	X
		2	X				X					X		X
		3			X				X					X
		4												X

Classe de résistance	Numéro panneau	Numero lamelle	Présence défaut avant essais				Rupture à cause de				Compression	Joint de colle (entre plis)	Cisaillement roulant	Cassée
			Nœuds	Pente de fil globale	Pente de fil locale	Cœur rouge	Nœuds	Pente de fil globale	Pente de fil locale	Cœur rouge				
MIXTE	10	1			X				X		X	X	X	X
		2									X	X		X
		3									X	X		X
		4									X	X		X
	11	1									X	X	X	X
		2			X				X		X	X		X
		3									X	X		X
		4			X				X		X	X		X
	12	1									X	X	X	X
		2									X	X		X
		3				X					X	X		X
		4									X	X		X
	13	1									X	X	X	X
		2									X	X	X	X
		3									X	X	X	X
		4			X				X		X	X	X	X
	14	1												
		2												
		3				X				X				X
		4			X	X			X	X				X
	15	1			X				X					X
		2			X				X					X
		3												
		4												
	19	1			X				X		X	X		X
		2									X			
		3									X			
		4			X				X		X	X		X
	20	1										X	X	X
		2										X		X
		3			X				X			X		X
		4				X						X	X	X
	21	1										X	X	X
		2			X				X			X	X	X
		3										X	X	X
		4			X				X			X	X	X
	22	1			X				X			X	X	X
		2										X	X	X
		3			X				X			X	X	X
		4										X		X
	23	1				X					X	X	X	X
		2									X	X	X	X
		3				X				X	X	X	X	X
		4				X				X	X	X	X	X
	24	1				X				X	X	X	X	X
		2				X					X	X	X	X
		3									X	X	X	X
		4									X	X	X	X

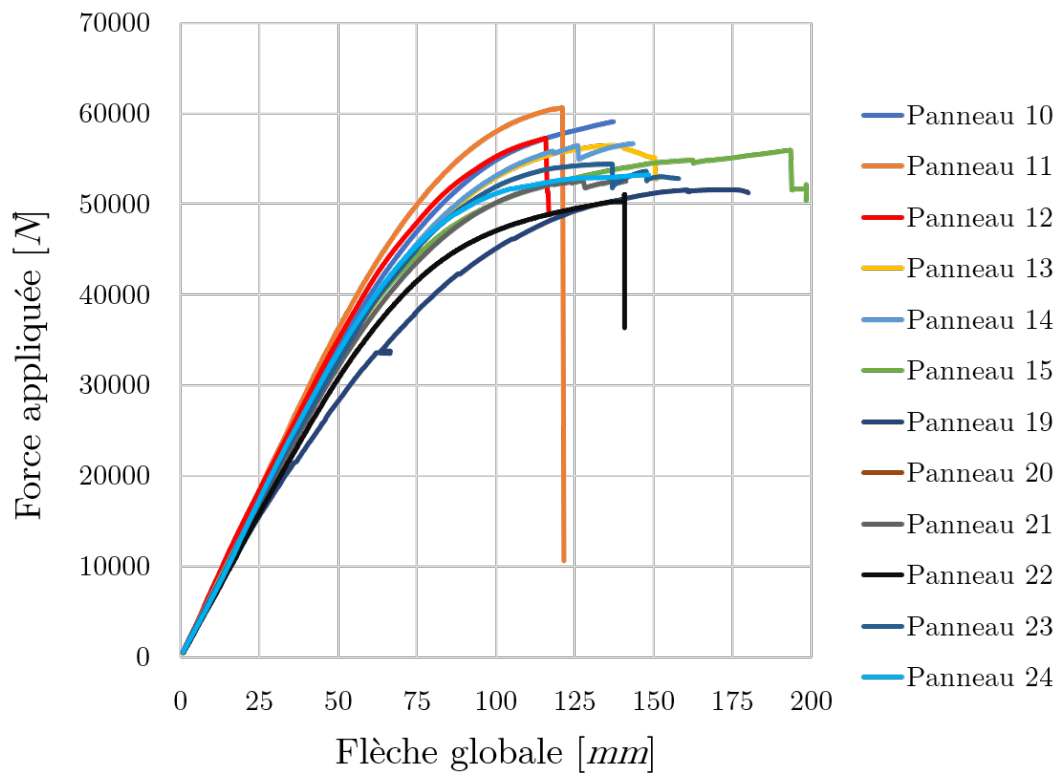
Annexe 6 : Résultats des tests en flexion, sous forme graphique



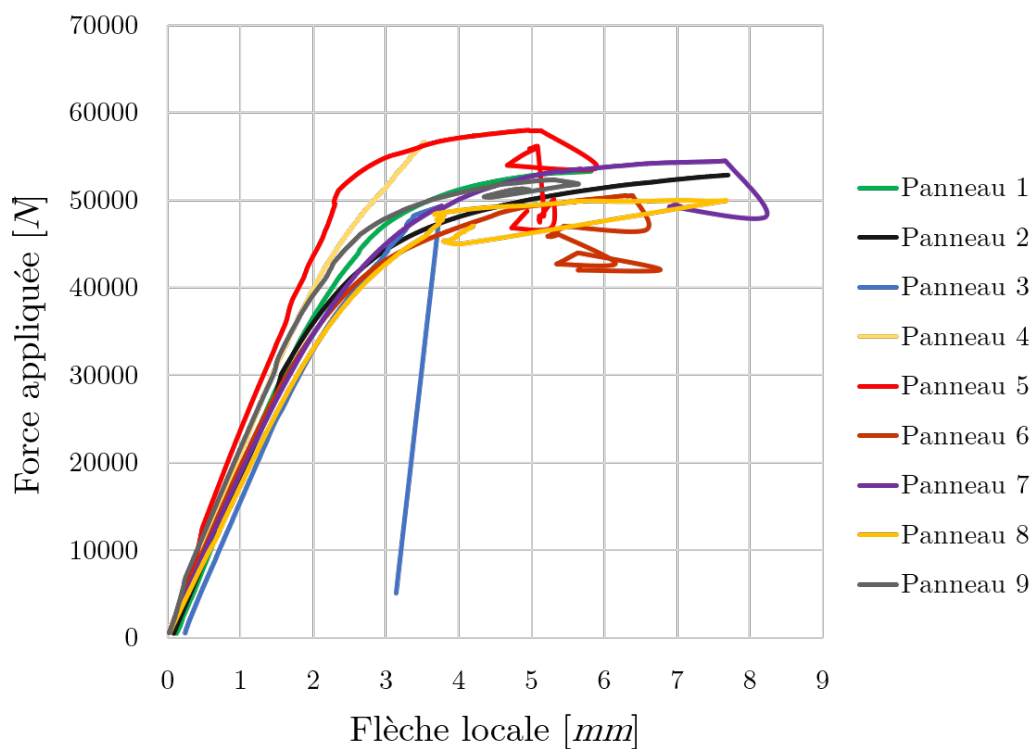
Expression de la flèche globale (mesurée au laser) en fonction de la force appliquée, pour tous les panneaux de la catégorie D40.



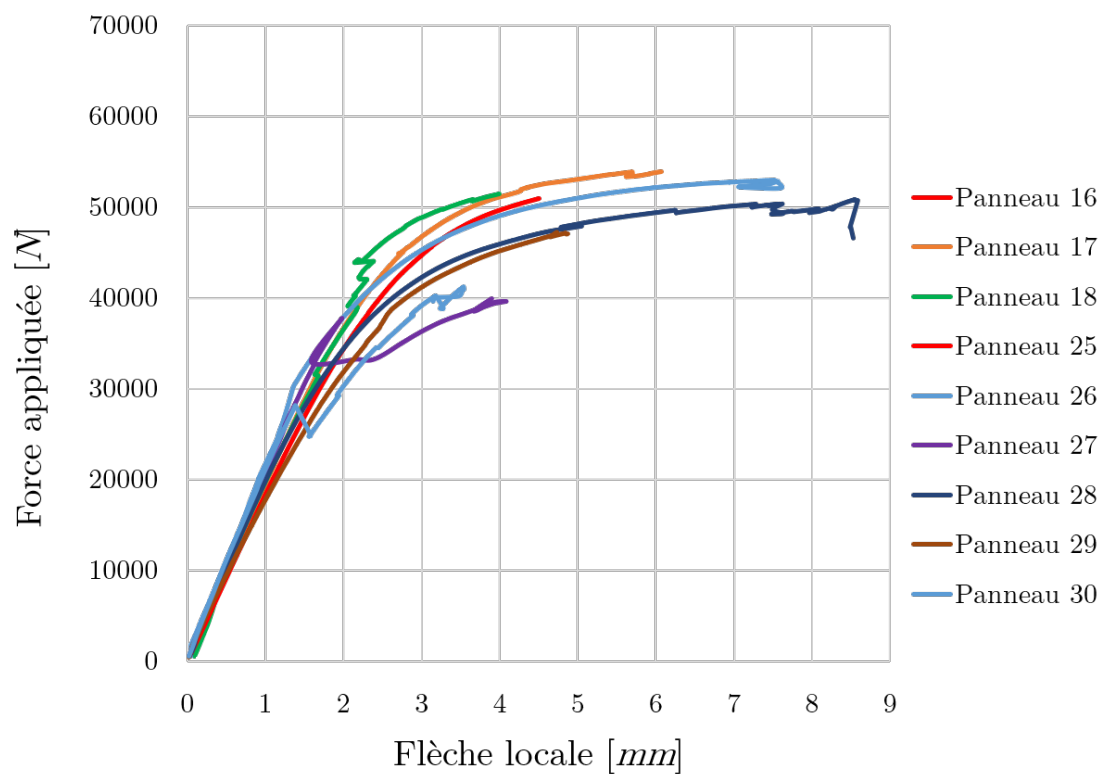
Expression de la flèche globale (mesurée au laser) en fonction de la force appliquée, pour tous les panneaux de la catégorie D24.



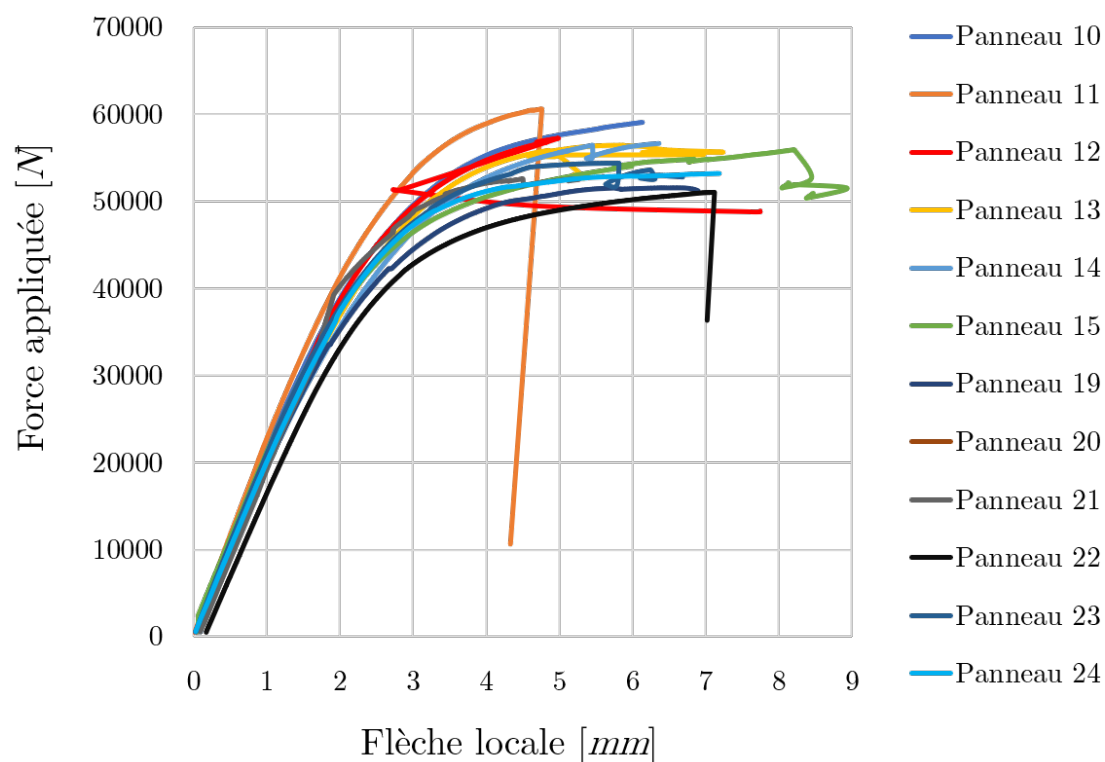
Expression de la flèche globale (mesurée au laser) en fonction de la force appliquée, pour tous les panneaux de la catégorie Mixte.



Expression de la flèche locale en fonction de la force appliquée, pour tous les panneaux de la catégorie D40.



Expression de la flèche locale en fonction de la force appliquée, pour tous les panneaux de la catégorie D24.



Expression de la flèche locale en fonction de la force appliquée, pour tous les panneaux de la catégorie Mixte.

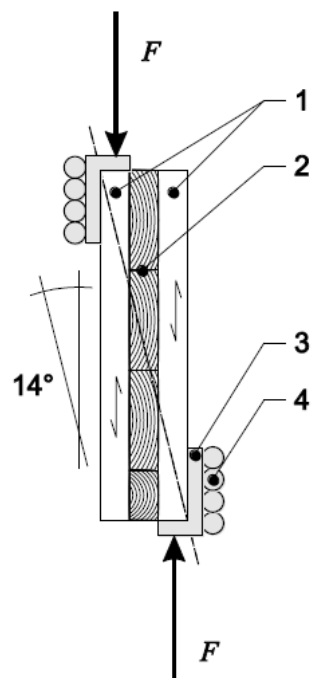
Annexe 7 : Résultats globaux

D40																		
Numéro	Humidité	Fmax	Temps	b	(ΔF/ΔW) _g	R ²	(ΔF/ΔW) _l	R ²	(ΔF/ΔW) _v	R ²	E _{m,g}	E _{m,g} [12%]	E _{m,l}	E _{m,l} [12%]	r _m	r _m [12%]	G-Méthode 1	G-Méthode 2
1	13.2	53507	347	363	674.3	0.999	21656	1	658.32	0.999	12.292	12436	13939	14103	73	76.06	113	207
2	13.7	52886	288	366	662.45	0.999	19324	0.999	654.84	0.999	11.977	12177	12336	12543	72	75.65	447	-435
3	14.1	49265	243	361	666.55	0.999	19188	1	667.9	0.999	12.218	12477	12419	12683	68	72.36	819	-304
4	13.0	56631	278	364	665.6	0.999	20686	1	653.22	0.999	12.100	12224	13278	13415	78	79.93	148	396
5	12.8	58026	371	361	726.8	1	24304	0.992	713.88	0.999	13.322	13422	15731	15849	80	81.92	95	143
6	12.9	50541	334	363	686.18	1	19051	0.999	654.66	0.999	12.508	12624	12263	12376	69	71.33	-679	-166
7	13.0	54514	412	364	638.41	0.999	18239	0.999	627.11	0.999	11.606	11724	11708	11828	75	76.95	1446	-245
8	13.3	50013	423	362	620.51	1	17177	0.999	609.51	0.999	11.342	11484	11087	11226	69	71.45	-536	-145
9	13.1	52337	347	362	708.17	0.999	19887	0.999	661.98	0.999	12.945	13084	12836	12974	72	74.39	-1664	-202
16	13.7	56339	396	362	672.05	1	19905	0.999	654.47	0.999	12.285	12496	12848	13069	78	81.59	305	-929
17	14.2	53912	359	360	656.36	0.999	19799	0.999	636.3	0.999	12.064	12377	12850	13130	75	79.52	215	3289
18	14.0	51458	314	361	637.25	1	20258	0.996	622.98	0.999	11.681	11908	13112	13367	71	75.21	116	232
25	13.4	50974	290	363	618.05	1	18359	1	617.79	0.999	11.266	11421	11817	11980	70	72.88	263	-1072
26	13.4	52938	412	359	658.98	0.999	21251	0.999	656.56	0.999	12.146	12316	13831	14025	74	76.59	108	193
27	13.2	39902	238	360	649.62	0.999	20668	0.999	641.49	0.999	11.941	12078	13414	13569	55	57.16	118	233
28	14.5	50880	419	363	657.63	0.999	19349	1	645.05	0.999	11.988	12285	12454	12763	70	75.05	348	-617
29	13.0	47274	304	360	598.33	0.998	19722	0.999	564.16	0.999	10.998	11110	12800	12932	65	67.47	85	135
30	13.5	41283	237	359	644.72	0.999	20914	0.999	637.05	0.999	11.883	12062	13612	13816	57	59.90	102	175
10	12.5	59098	329	364	702.57	1	21757	0.999	680.63	0.999	12.772	12833	13966	14032	81	82.08	163	466
11	12.4	60631	294	360	728.7	0.999	22281	0.999	9.37	0.999	13.394	13444	14461	14515	84	84.90	197	838
12	13.0	57274	278	360	713.37	0.999	19933	0.999	698.27	0.999	13.112	13237	12937	13060	79	81.56	-1055	-190
13	14.0	56458	328	364	662.48	0.999	19700	1	658.31	0.999	12.043	12278	12646	12892	77	81.84	275	-1266
14	13.0	56667	346	360	681	1	18586	0.999	664.21	0.999	12.517	12639	12063	12181	78	80.76	-362	-135
15	13.4	55947	470	362	684.69	1	19893	0.999	670.08	0.999	12.516	12691	12840	13020	77	80.27	539	-399
19	13.8	51570	352	363	589.47	0.999	19158	0.999	623.41	0.999	10.745	10939	12332	12553	71	74.64	91	155
20	13.3	52424	335	359	628.52	0.999	17997	0.999	616.09	0.999	11.585	11733	11713	11863	74	77.18	1150	-256
21	13.4	52602	331	361	654.8	0.999	20548	0.999	637.85	0.999	12.002	12170	13299	13486	73	75.68	134	307
22	12.5	51063	736	363	640.3	0.999	19003	0.999	627.69	0.999	11.672	11724	12232	12287	70	71.07	277	-1029
23	11.2	54410	373	359	691.87	0.999	20700	0.999	660.44	1	12.753	12647	13473	13361	76	73.68	260	-3307
24	11.3	53223	350	359	726.71	0.999	19925	0.999	681.27	1	13.395	13304	12968	12881	74	72.40	-443	-152
D24																		
Mixte																		
Moyenne																		
Ecart-type																		
COV																		
Min																		
Max																		

Annexe 8 : Norme NBN EN 338

	Classe	D18	D24	D27	D30	D35	D40	D45	D50
Propriétés de résistance en N/mm²									
Flexion	$f_{m,0,k}$	18	24	27	30	35	40	45	50
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	11	14	16	18	21	24	27	30
Traction transversale	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	18	21	22	24	25	27	29	30
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	4,8	4,9	5,1	5,3	5,4	5,5	5,8	6,2
Cisaillement	$f_{v,k}$	3,5	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,4	4,5
Propriétés de rigidité en kN/mm²									
Module d'élasticité moyen en flexion axiale	$E_{m,0,mean}$	9,5	10,0	10,5	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0
Module d'élasticité caractéristique à 5 % d'exclusion en flexion axiale	$E_{m,0,k}$	8,0	8,4	8,8	9,2	10,1	10,9	11,3	11,8
Module d'élasticité transversal moyen	$E_{m,90,mean}$	0,64	0,67	0,70	0,73	0,80	0,87	0,90	0,93
Module de cisaillement moyen	G_{mean}	0,59	0,63	0,66	0,69	0,75	0,81	0,84	0,88
Masse volumique en kg/m³									
Masse volumique caractéristique à 5% d'exclusion	ρ_k	475	485	510	530	540	550	580	620
Masse volumique moyenne	ρ_{mean}	570	580	610	640	650	660	700	740

Annexe 9 : Montage pour la détermination du cisaillement roulant



Légende

- 1 couches longitudinales de l'éprouvette
- 2 couche transversale de l'éprouvette
- 3 cornières en acier pour la transmission des charges
- 4 support sans frottement

Annexe 10 : Fiche technique de la colle *Loctite Purbond® HB S309*



Finger joint



Face gluing

PURBOND® HB S309

Single-component polyurethane adhesive for the manufacture of engineered wood products

PURBOND HB S309_E
Purbond Technik / 06-2013

Properties

PURBOND HB S309 is a liquid single-component polyurethane adhesive. The adhesive cures under the action of air humidity and moisture in the wood to yield a strong non-brittle film. Slight foaming of the adhesive during hardening is caused by the chemical reaction and is normal. PURBOND HB S309 is manufactured without the addition of solvents or formaldehyde.

PURBOND HB S309 is classified as a Type I adhesive and is approved and registered according to Page 4 of this data sheet (Section headed Certifications and Registrations).

This technical data sheet was co-ordinated with Stuttgart University MPA, an independent material testing laboratory.

Product data

Basis	Isocyanate prepolymer
Consistency	Good flow properties
Assembly time ¹	30 minutes
Press time / curing time ¹	75 minutes
Brookfield viscosity	Approx. 24,000 mPa.s (Sp.6 / 20 rpm / 20°C, measurement between 16 to 36 hours after production)
Colour shade	Beige
Density	1,160 kg/m ³
Solids content	100% and free from fibres and abrasive fillers
Fire hazard	Flame resistant
Resistance	To weak alkalis, acids and solvents
Declaration	The Safety Data Sheet (MSDS) for PURBOND HB S309 must be observed and is available at www.purbond.com .

Adhesive systems for engineered wood



Application	Processing guideline for finger-jointing
Preparation	PURBOND HB S309 is a single-component adhesive and is processed in a closed system directly from the container in which it is supplied. Automatic finger joint machines must be specially equipped with an appropriate application system to process PURBOND HB S309. All machine parts that come into contact with the adhesive must be treated with PURBOND Trennmittel/Release Agent resp. PURBOND Trennpaste/Release Paste before processing.
Wood moisture content	The wood moisture content at the joint surfaces that are to be glued together must be not less than 8%. The permissible upper limit of the wood moisture content is governed by the respective national product standards (e.g. EN 385 / EN 386 or DIN 68140) but must be below 18 %. According to DIN 68140-1, the maximum permissible difference in wood moisture content between the ends of the wood that are to be joined is: • for single-piece finger jointed components: max. 5% • for finger jointed lamellas for glued laminated beams: max. 4% According to EN 385, the maximum permissible difference in wood moisture content between the ends of the pieces that are to be joined is 5%.
Adhesive application	Application of the adhesive takes place via a suitable application system (comb application or contactless application in conjunction with the relevant approvals where necessary). Depending on the application system, the adhesive is applied to one or both sides at the rate of approx. 120 - 160 g/m². Uniform wetting of the finger profile of the compressed finger joint must be guaranteed. The components are pressed together immediately afterwards.
Assembly time	The components to be glued must be assembled together and the press force applied immediately, but at the latest 30 minutes after the start of adhesive application (maximum assembly time). The maximum assembly time of the moisture-reactive PURBOND HB S309 is influenced by the climate conditions prevailing in the room during processing. Higher temperature and higher air humidity shorten the assembly time. It is absolutely essential that the adhesive is still capable of adhering when the press force is applied.
Curing time	The curing time of the adhesive is 75 minutes at 20°C and 65% air humidity.
Press force	The press force applied (depending on the finger length and profile) must guarantee a precisely fitting joint. The specifications in accordance with EN 385 and/or DIN 68140-1 or other national guidelines must be observed in this respect.
Further processing	The components can undergo further processing after the curing time of the adhesive has elapsed.
Storage time after bonding	The bonded components must be stored at a temperature of approx. 20 °C for at least 4 hours after the press time has elapsed.
Additional instructions	The following supplementary instructions must be observed when manufacturing finger joints for load-bearing structural components: 1. The approvals (see the Section headed Certifications and Registrations). 2. The temperature in the production room should be 20°C and must not be lower than 18°C. This applies equally for the wood and the adhesive. 3. Suitable quality control scheme in accordance with EN 385 and/or EN 14080 or other national guidelines is recommended to guarantee a high quality of glued joints.



Application	Processing guideline for face gluing
Preparation	PURBOND HB S309 is a single-component adhesive and is processed in a closed system directly from the container in which it is supplied. The surfaces to be glued together must be clean and free from adhesive-repellent substances such as oils, greases or release agents. All machine parts that come into contact with the adhesive must be treated with PURBOND Trennmittel/Release Agent resp. PURBOND Trennpaste/Release Paste before processing.
Wood moisture content	The wood moisture content at the joint surfaces that are to be glued together must be not less than 8%. In accordance with EN 386, the moisture difference between the individual lamellas must not exceed 4%.
Adhesive application	PURBOND HB S309 is applied automatically using a special application system in a through-feed process. The adhesive is applied one-sided at the rate of 140-180 g/m². The amount of adhesive applied must guarantee uniform wetting of the joint component surface. Squeeze-out of the adhesive must be present all along the edge of the glued joint. In the event of a quantity of adhesive being in the lower permissible region, this must be co-ordinated with the adhesive manufacturer.
Assembly time	The components to be glued must be assembled together and the press force applied immediately, but at the latest 30 minutes after the start of adhesive application (maximum assembly time). The maximum assembly time of the moisture-reactive PURBOND HB S309 is influenced by the climate conditions prevailing in the room during processing. Higher temperature and higher air humidity shorten the assembly time. It is absolutely essential that the press force is applied before any skinning on the adhesive surface and while the adhesive is still capable of adhering.
Press time	The press time depends on the temperature and moisture content of the joint components and surroundings. Lower temperature and air humidity delay the curing process, higher temperature and air humidity speed up the curing process. The minimum press time for straight structural beams at 20°C with 65% relative air humidity and a wood moisture content of 12% is 75 minutes, provided optimum fit of the joint components is guaranteed (joint thickness approx. 0.1 mm). If an exactly fitting joint is not guaranteed, the press time must be at least 90 minutes.
Press force	The applied press force must guarantee optimum fitting of the joint components. Normally, a press force of 0.6 N/mm² to 1.0 N/mm², which is generally customary in glued timber construction, is applied.
Further processing	The components can undergo further processing immediately after the press time has elapsed.
Storage time after bonding	The bonded components must be stored at a temperature of approx. 20 °C for at least 4 hours after the press time has elapsed.
Additional instructions	The following supplementary instructions must be observed when manufacturing load-bearing structural components: 1. The approvals (see the Section headed Certifications and Registrations). 2. Glued joints as thin as possible (max. 0.3 mm). 3. In accordance with EN 386, the maximum permissible moisture content of the joint components to be glued together is 15%. 4. The temperature in the production room should be 20°C and must not be lower than 18°C. This applies equally for the wood and the adhesive. 5. Suitable quality control scheme in accordance with EN 386 and/or EN 14080 or other national guidelines is recommended to guarantee a high quality of glued joints.

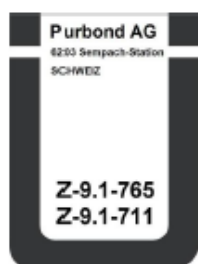
Protection/safety and cleaning
Occupational safety/protection
Plant protection and cleaning
Safety precautions and cleaning measures

The wearing of protective gloves – PURBOND Arbeitshandschuhe/Handling Gloves – and protective goggles is urgently recommended when handling liquid adhesive and release agent.

PURBOND Trennmittel/Release Agent and PURBOND Trennpaste/Release Paste prevent adhesive adhering to plant and tools. Before bringing a plant into operation, all the parts that come into contact with adhesive must be treated (see the corresponding TDS).

PURBOND Reinigungsmittel/Cleaning Agent is suitable for cured adhesive on tools or machine parts. Compatibility must be checked before using the cleaning agent.

Protective goggles and chemically resistant PURBOND Reinigungs-handschuhe/Cleaning Gloves (special black gloves) must be worn when working with PURBOND Reinigungsmittel/Cleaning Agent.

Certifications and registrations


Europe



National Technical Approval by the DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) for the "PURBOND HB S309 PUR adhesive for the fabrication of load-bearing engineered wood components."

Approval number **Z-9.1-765, Z-9.1-711**

Compliance with EN 14080 confirmed by MPA University Stuttgart. The adhesive can be used for the manufacture of glued laminated timber in accordance with EN 14080.

National Technical Approval No. ATG 12/2888 by the Union Belge pour l'Agrément Technique dans la Construction (UBAtc).

Classification Type I pursuant to EN 15425 (2008) of PURBOND HB S309 adhesives for finger-jointed and glue-laminated load-bearing wood structures, by the FCBA based on following documents:

FCBA n° LBO/GL/MP/403/09/274
 FCBA n° LBO/GL/MP/403/09/275
 FCBA n° LBO/GL/MP/403/09/276

Certificate from the South African Timber Auditing Services Pty. Ltd. in compliance with SANS 10183 for „exposure class one for finger-jointing“.

Certificate Number: **107**

JAIA F☆☆☆☆

Guarantee

Formaldehyde Classification:
JAIA (Japan Adhesive Industry Association) Independent Control Standard
against Indoor Air Pollution.

Register Number: **JAIA-008524**

This information is based on the test results of the Otto-Graf-Institute (MPA, University Stuttgart), our Purbond application laboratory and our customers' experience.

We guarantee a consistent quality of this product which is manufactured in accordance with ISO 9001 / ISO 14001 guidelines.

The product was found suitable for all applications and uses listed above; for other uses or applications we strongly suggest you to contact our technical support staff.

In general the sales and delivery conditions of Purbond AG apply.

Caractérisation du comportement mécanique de panneaux CLT de hêtre : apport d'un classement visuel des lamelles.

Présenté par Simon Noiret

Résumé

La diversification des essences de bois utilisées dans le domaine de la construction bois est un sujet au cœur de l'actualité. Pour cause, la ressource wallonne en épicéa commun, essence n°1 pour la construction bois en Wallonie, diminue annuellement. Une alternative proposée est l'utilisation d'essences feuillues. Le hêtre est un bon candidat; il possède de bonnes propriétés mécaniques, une ressource importante en Wallonie ainsi qu'un manque de débouchés qui fait baisser son prix d'achat.

En partenariat avec la scierie Scidus cherchant à développer de nouveaux produits à base de hêtre, ce mémoire a pour objectif d'apporter des données chiffrées sur le comportement mécanique de panneaux CLT (*Cross Laminated Timber*) fabriqués au départ de lamelles préalablement classées visuellement en deux classes : D40 et D24, selon la norme NF B 52-001-1. Le but est de montrer que les propriétés mécaniques des lamelles classées se reflètent dans le comportement mécanique du panneau CLT. Des tests en flexion 4 points ont été réalisés afin de définir certaines propriétés de rigidités et de résistances de panneaux CLT 3 plis, d'une hauteur de 75 *mm*. Les panneaux ont été testés horizontalement, tels que pour une utilisation en tant que plancher porteur.

Les résultats obtenus ne démontrent pas l'utilité d'application de la norme. Par contre, ils soulignent l'intérêt des panneaux CLT de hêtre puisque ces derniers offrent des propriétés mécaniques de 35% supérieures à celles de panneaux CLT d'épicéa de conformation similaire. De plus, l'influence de la présence de nœuds et de pentes de fil sur la résistance en flexion du panneau a pu être démontrée. Au plus le diamètre du nœud présent est important au moins la résistance à la flexion sera bonne. Il en est de même pour l'angle formé par la pente de fil. L'influence des nœuds est prédominante sur celle des pentes de fil.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2bte L7.05.01, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro