

ADEME

Direction Régionale Normandie

Mme DUFOUR

Les Galées du Roi

30 avenue Henri Gadeau de Kerville

76100 Rouen

ETUDE COLLECTIVE « PROBOIS NORMAND »
Caractérisation de BLC Hêtre fabriqué à partir de
bois de petites longueurs

Rapport final

Chef de projet : Jean-Denis LANVIN

Équipe projet : Laboratoire Essais et Simulation ; Pôle IB&C ; FCBA

Date : 30 juillet 2021

Siège social

10, rue Galilée
77420 Champs-sur-Marne
Tél +33 (0)1 72 84 97 84

www.fcba.fr

Siret 775 680 903 00132
APE 7219Z
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Institut technologique FCBA :
Forêt, Cellulose, Bois – Construction
Ameublement

SOMMAIRE

1.	Contexte et enjeux	4
2.	Organisation de l'étude	5
3.	Tâche 4 – Caractérisation de la matière première HETRE en vue de sa lamination	7
	3.1 Réception des éprouvettes	7
	3.2 Tri des bois destinés aux essais par qualité	7
	3.3 Méthodologie expérimentale.....	9
	3.3.1 Essais de flexion statique	10
	3.3.2 Essai de traction statique.....	12
	3.3.3 Correspondance entre test de traction et de flexion.....	14
	3.4 Affectation des classes de résistance	16
	3.4.1 Classe de résistance en flexion.....	16
	3.4.2 Classe de résistance en traction	18
	3.5 Synthèse de la tâche 4 :	19
4.	Tâche 1 – Etablissement du cahier des charges pour le collage des aboutages pour une utilisation structurale.....	20
	4.1 Choix des entures	20
	4.2 Synthèse de la tâche 1 :	22
5.	Tâche 3 : Caractérisation mécanique de l'aboutage de type structural pour validation du choix de l'aboutage.....	22
	5.1 Bois aboutés - Essai de flexion à plat	22
	5.2 Bois aboutés - Essai de traction	24
	5.3 Bois aboutés - Essai de flexion à chant	26
6.	Tâche 6 : Caractérisation mécanique de sciages représentatifs des coursons et des lames aboutées.....	28
7.	Tâche 7 : Performances des poutres BLC - exigences de la norme NF EN 14080	30
	7.1 Test de flexion	30
	7.1.1 Fabrication des poutres BLC Plus Hêtre	30
	7.1.2 Test de flexion poutres BLC Plus Hêtre	31
	7.1.3 Analyse des tests de flexion sur les poutres BLC Plus Hêtre	33
	7.1.4 Fabrication des poutres BLC Hêtre	34
	7.1.5 Test de flexion sur les poutres BLC Hêtre classique.....	34
	7.1.6 Analyse des tests de flexion sur les poutres BLC Hêtre classique	37
	7.2 Essais de compression sur poutres BLC+ hêtre	38
	7.2.1 Description des essais.....	39
	7.2.2 Compression axiale	40
	7.2.3 Compression perpendiculaire.....	44
	7.2.4 Essais de compression - conclusions.....	46
8.	Tâche 8 : établissement de la relation entre les performances des lames, des aboutages et des poutres BLC	48
9.	Tâche 9 : Validation des bois aboutés en ligne par CND.....	49
10.	Synthèses	52

11. Références bibliographiques	55
12. Annexes	56
12.1 Annexe 1 : Rappel des règles de tri du hêtre français par méthode visuelle (extrait NF B 52-001 parties 1 et 2).....	56
12.2 Annexe 2 : Comment comprendre la distribution des résultats d'une grandeur en boîte à moustaches	59
12.3 Annexe 3 : Résultats des tests de flexion sur les poutres BLC Plus en Hêtre 60	
12.4 Annexe 4 : Résultats des tests de compression axiale sur les poutres BLC+ en hêtre	61
12.5 Annexe 5 : Résultats des tests de compression perpendiculaire sur les poutres BLC+ en hêtre	61

1. Contexte et enjeux

Malgré une abondante ressource française, la production de sciages feuillus a fortement diminué en France depuis vingt ans mais on redécouvre aujourd'hui l'immense potentiel de ces essences dans la construction et plus particulièrement en élément à usage structural.

Avec plus de 1,5 Mha de forêt, le hêtre est une des essences les plus répandues en France avec un volume sur pied du bois fort tige au sein des peuplements à hêtre prépondérants estimé à 212 Mm³ (9.3 Mm³ en Normandie). Toutefois seul 1 Mm³ est récolté annuellement (0,123 Mm³ pour la Normandie) pour un volume de sciage de 0,454 Mm³ (EAB 2018). Force est de constater que les parts de marché de cette essence restent marginales.

Toutefois, la conception de structures, parfois très techniques, exige un classement pour la résistance (bois massif et bois reconstitué) dans le cadre réglementaire du marquage CE en liaison avec le règlement « produits de construction ».

Les travaux menés durant l'étude de caractérisation du hêtre français ont permis de lever certains freins réglementaires et normatifs en apportant les outils à même de mettre plus facilement sur le marché de la construction bois des produits hêtre à qualité identifiée et reconnue suivant les règles de classement par méthode visuelle définies dans la norme française.

- Les sciages structurels de hêtre classés par méthode visuelle (NF B 52 001-1 mai 2016) peuvent être assignés à une classe de résistance mécanique (EN 338) en D35 & D18 voire D40 & D24.
- Les sciages de hêtre destinés au lamellé collé classés par méthode visuelle (NF B 52 001-2 mai 2016) peuvent être assignés à une classe de résistance mécanique (EN 338) en D45.

La reconstitution par collage du hêtre est encore peu répandue en France et le domaine d'application des normes actuelles sur ce type de produit se concentre essentiellement sur les essences résineuses. Quand on évoque les produits reconstitués, on pense bien sûr aux bois massifs reconstitués (BMR) ou aux bois lamellés collés (BLC). Ces produits sont aujourd'hui positionnés sur un marché très concurrentiel où les prix sont tirés vers le bas. Les produits de ce type en hêtre bien plus chers, auraient cependant l'avantage d'une résistance mécanique bien plus élevée. Ceci qui permettrait d'en optimiser les sections ou de faire des portées plus importantes. L'augmentation actuel des coûts d'approvisionnement des bois résineux donne également la légitimité à des produits en hêtre.

Cependant, quelques initiatives ont fait la preuve de l'intérêt du hêtre dans le bâtiment :

- Projet dénommé « Woodstock » à Bâle sur le site de Swissbau, le salon professionnel du secteur de la construction et de l'immobilier. Le bâtiment a nécessité pas moins de 45 m³ de hêtre, et satisfait aux exigences du label Minergie-P, ce qui signifie qu'il consomme trois fois moins d'énergie qu'un bâtiment conventionnel.
- Bâtiment périscolaire¹ de la commune de Tendon (88) faisant largement appel au hêtre en structure.

D'autres réalisations suivent, constituant une véritable vitrine pour l'utilisation du hêtre en structure comme les maisons de XERTIGNY sous la conduite de l'association « Terre de Hêtre ».

¹ Valentin C « Le périscolaire de Tendon, 1er bâtiment français intégrant du hêtre en structure » 3^{ème} Forum International Bois Construction 2013.



Figure 1: bâtiment périscolaire de la commune de Tendon (88) en 2012 ².



Figure 2: projet «Woodstock» réalisé en suisse



Figure 3: exemple d'un bâtiment à Xertigny (88)

Le terme « bois lamellé » correspond à un mode de fabrication industrielle précis et particulièrement contrôlé (marquage CE niveau 1 selon la norme harmonisée EN 14080). En l'occurrence, ce matériau est composé de lamelles de bois purgées de défauts critiques, aboutées puis collées entre elles dans le sens du fil du bois :

- Le bois lamellé est dit "homogène" lorsque les caractéristiques mécaniques de toutes les lamelles sont de la même classe de résistance (EN 338);
- le bois lamellé "panaché" correspond à une juxtaposition étudiée de lamelles de caractéristiques mécaniques différentes sachant que les plus faibles qualités sont au centre des produits, zone la moins sollicitée en flexion.

2. Organisation de l'étude

La caractérisation de poutres BLC Hêtre fabriquées à partir de bois de petites longueurs comporte les tâches suivantes :

- **Tâche 1** : établissement du cahier des charges pour le collage des aboutages pour une utilisation structurale dont la longueur des entures est comprise entre 10 et 30 mm (**à la charge de FCBA**).
- **Tâche 2** : fourniture de la matière première / Fabrication préliminaire des aboutages (**à la charge de Manubois**) selon le cahier des charges défini en tâche 1.
- **Tâche 3** : caractérisation mécanique de l'aboutage de type structural pour validation du choix de l'aboutage (15 essais prévus) (**à la charge de FCBA**).
- **Tâche 4** : Classement visuel sur des planches pour un usage structural de l'ensemble des sciages utilisés dans la campagne de caractérisation comprenant des essais sur les éléments constitutifs (lames massives et aboutées) et poutres BLC (**à la charge de FCBA**).

² Lauffer J-S «Périscolaire de Tendon » 3^{ème} Forum International Bois Construction 2013.

- L'objectif est d'établir de façon précise des lots de qualité mécanique équivalente entre des sciages qui seront testés de façon destructive et entre les sciages qui seront débités en coursons pour la fabrication des BLC
- **Tâche 5** : fourniture de la matière première / Fabrication / Préparation / Livraison à FCBA de l'ensemble des prototypes (**à la charge de Manubois**). Au total :
 - 60 poutres BLC en hêtre seront fabriquées avec une longueur telle que les essais de flexion, de compression (perpendiculaire et longitudinale) et de délamination seront intégrés,
 - 120 planches aboutées pour mener les essais de caractérisation de la Tâche 6
 - 80 planches massives de longueur de 2,4 m pour mener des essais de caractérisation des sciages avant découpe en coursons,
- **Tâche 6** : caractérisation mécanique de sciages représentatifs des coursons et des lames aboutées listés en Tâche 5 (**à la charge de FCBA**).
- **Tâche 7** : caractérisation mécanique des prototypes en BLC hêtre listés en Tâche 5 à savoir 60 essais de flexion (30 poutres homogènes / 30 poutres combinées), 15 essais de compression perpendiculaire, 15 essais de compression parallèle, 16 essais de délamination (**à la charge de FCBA**).
- **Tâche 8** : établissement de la relation entre les performances des lames, des aboutages et des poutres BLC sur la base des résultats obtenus dans les phases précédentes (**à la charge de FCBA**).
- **Tâche 9** : dans un souci de rentabilité du process industriel, cette tâche a pour objectif d'étudier une méthode de simplification de la vérification des performances des lames constitutives des poutres BLC qui comprennent plusieurs aboutages (**à la charge de FCBA**).

Le rapport final reprend le

- rapport FCBA N°403-19-091-1 du 30 octobre 2020 amendé du 30 juillet 2021 qui décrit les actions menées selon les étapes chronologiques suivantes :
 - Tâche 4
 - Tâche 1
 - Tâche 3
 - Tâche 6

Grâce à la fourniture des bois massifs et la fabrication des bois aboutés en tâche 2, MANUBOIS a permis la réalisation de ces travaux.

- rapport FCBA N°403-19-091-2 du 30 octobre 2020 amendé le 30 juillet 2021 qui décrit les actions menées selon les étapes chronologiques suivantes :
 - Tâche 7
 - Tâche 8
 - Tâche 9

Grâce à la fourniture des bois massifs et la fabrication des bois aboutés en tâches 2 & 5, MANUBOIS a permis la réalisation de ces travaux de caractérisation.

Les résultats de qualification des produits PROBOIS en hêtre ont permis d'alimenter pour partie les dossiers techniques permettant de mettre sur le marché les produits reconstitués en hêtre.

3. Tâche 4 – Caractérisation de la matière première HETRE en vue de sa lamination

L'objectif de cette tâche est multiple. Dans un premier temps, on vérifiera la procédure de tri effectuée par MANUBOIS pour valider les seuils mécaniques des classes du hêtre bois massif en dimension commerciale destinés à être abouté pour faire du BMA & BLC. Le bois doit être classé selon la résistance conformément à l'EN 14081-1 (marquage CE). D'autre part cette étude va déterminer les coefficients de passage entre test de flexion et test de traction.

3.1 Réception des éprouvettes

FCBA a réceptionné les bois (43*105*2000 mm) à tester le vendredi 22 février 2019 à Bordeaux, Pôle Construction, soit :

- 108 planches en H0 (référence du tri effectué par MANUBOIS) identifié comme classe de résistance **H0-D45** selon NF B 52-001 partie 2
 - 50% des tests en traction
 - 50% des tests en flexion
- 104 planches en H1 (référence du tri effectué par MANUBOIS) identifié comme classe de résistance **H2-D35** selon NF B 52-001 partie 1
 - 50% des tests en traction
 - 50% des tests en flexion
- 35 planches en H2 (référence du tri effectué par MANUBOIS) identifié comme classe de résistance **H4-D18** selon NF B 52-001 partie 1
 - 50% des tests en traction (test non prévu)
 - 50% des tests en flexion (test non prévu)
- 11 planches en « rebut » (référence du tri effectué par MANUBOIS) dont la classe reste à identifier
 - 100% des tests en flexion(test non prévu)

Pour la classe H2 (référence du tri effectué par MANUBOIS), le but est de savoir s'il y a un intérêt à utiliser ces qualités.

3.2 Tri des bois destinés aux essais par qualité

Par chaque classe de résistance déterminée par méthode visuelle, il convient de trier les bois de manière à avoir des lots homogènes pour réaliser les tests de traction et de flexion. Pour cela, nous avons utilisé l'appareil portable MTG développé par Brookhuis (NL).

Chaque planche a été évaluée en termes de masse volumique et de module d'élasticité. Les distributions (sous forme de boîte à moustache) sont présentées sur la figure suivante. Les moyennes par lot sont statistiquement différentes au seuil de 95% de la moyenne générale et corroborent le classement effectué par méthode visuelle par MANUBOIS.

Seuls les résultats d'essais destructifs nous permettront de vérifier la classe des trois lots (H0, H1 et H2-hors classe ou rejet).

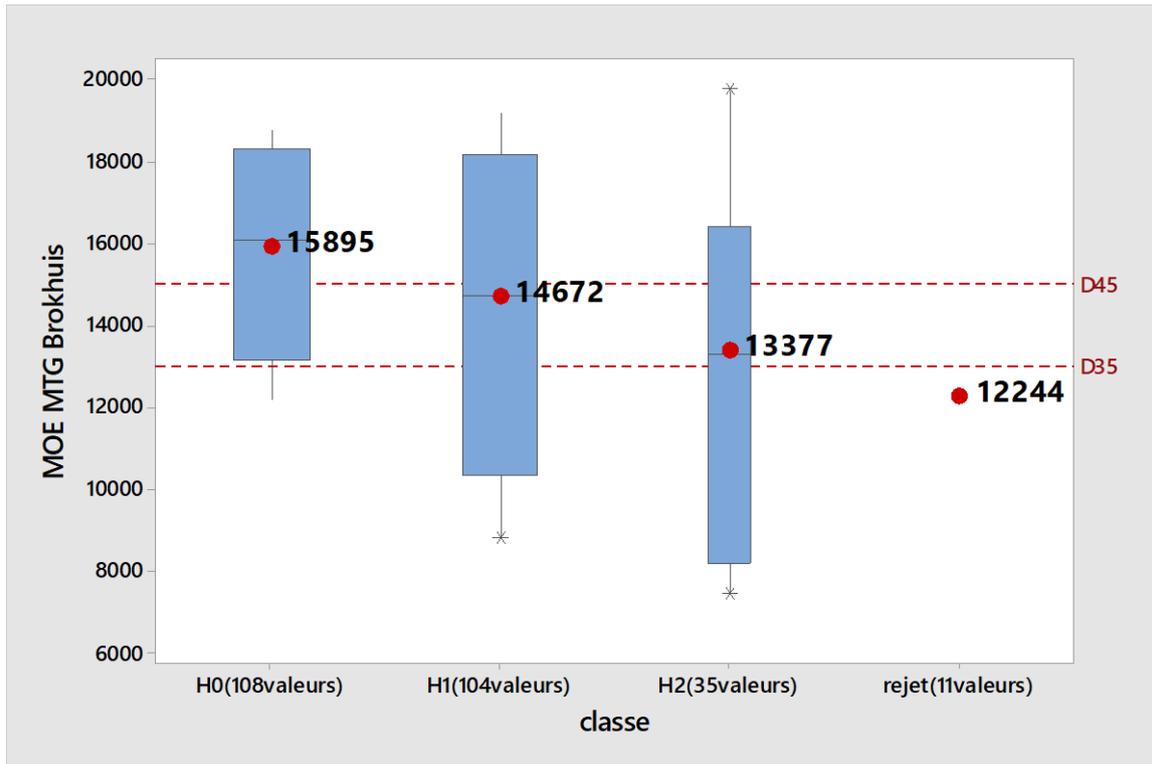


Figure 4: distribution des modules d'élasticité des planches au moyen du MTG, l'étendue des distribution a été fixée à 95%, l'extrémité inférieure de la boîte donne les valeurs caractéristiques de la variable (il n'a pas assez de valeurs pour le lot vu comme rebut pour représenter la boîte 5-95%). Le point rouge illustre la valeur moyenne.

Par qualité, le classement par ordre croissant du module a permis de sélectionner une planche sur deux respectivement pour les tests de flexion et de traction. L'ajustement des distributions (sous forme de loi normale) sont présentées sur la figure suivante. Nous pouvons constater un léger décalage entre les valeurs de flexion et de traction pour les classes H2 et rejet.

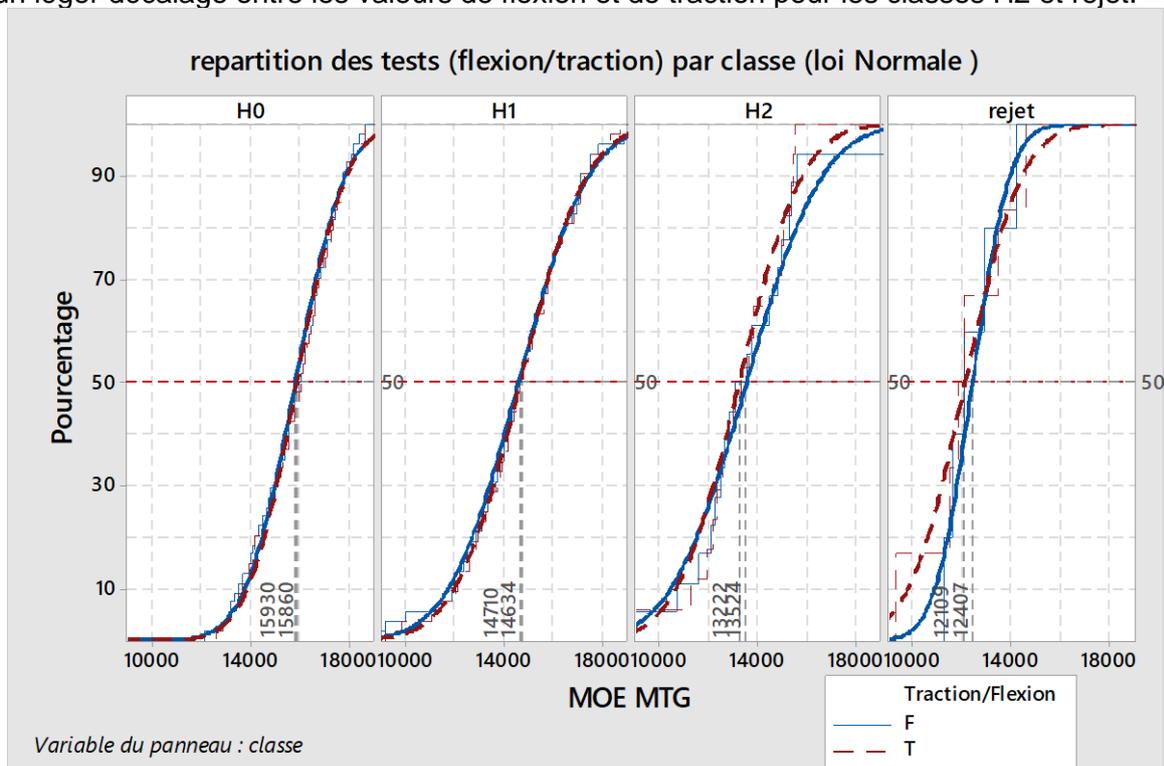


Figure 5: vérification des distributions des modules d'élasticité mesurées au MTG des planches entre le lot de planches destinées aux tests de flexion et de traction.

L'apport du MTG nous permet de pronostiquer si une planche peut prétendre à une classe de résistance (EN 338) dont le tableau suivant résume les propriétés.

Tableau 1: Correspondance entre classes visuelles de résistance du hêtre français et classes de résistance (EN 338).

Classes visuelles NF B 52-001	Classes de Résistance EN 338	Fractile 5% MOR (MPa)	MOE moyen (GPa)	Fractile 5% MV (kg/m3)
	D 50	50	14	620
LH0	D 45	45	13,5	580
H1	D 40	40	13	550
H3	D 24	24	10	485
H2	D 35	30	11	530
H4	D 18	18	9,5	475

Certaines planches ne présentent pas les propriétés requises au sein du lot H0-D45, en particulier la pente de fil.

Il est à noter, malgré tout, que les lots identifiés H1, H2 et Rejet par MANUBOIS sont classés en D35 « par machine ». Dans le cas où la classe H1 est assimilée à une classe D40, les planches suivantes seraient exclues. Ce tableau comprend les propriétés mécaniques identifiées à l'issue des tests pour indication.

Tableau 2 : identification des planches ne présentant pas les performances mécaniques par lot au moyen du MTG

Numéro du lot	numéro des pièces	Classement machine	Sélection du test	MOE	MOR	MV	Singularité
Probois H0-D45	23	RJ	Flexion	13729	84,8	650	Fil
Probois H0-D45	38	RJ	Flexion	18429	50,8	786	Nœud
Probois H0-D45	39	RJ	Flexion	18850	59,6	685	Nœud
Probois H0-D45	29	RJ	Traction				
Probois H0-D45	94	RJ	flexion	14140	72,3	677	Fil
Probois H1-D40	68	RJ	Flexion	16149	89,7	732	
Probois H1-D40	30	RJ	Flexion	17447	90,7	654	
Probois H1-D40	71	RJ	Flexion	17687	90,3	658	Fil
Probois H1-D40	27	RJ	Flexion	18904	86,8	703	Fil
Probois H1-D40	34	RJ	Flexion	15073	76,4	619	
Probois H1-D40	68	RJ	flexion	16149	89,7	732	

Raisonnement, il nous semble illusoire d'utiliser le MTG comme outil de diagnostic des planches à propriétés mécaniques « dégradées » ou du moins pas dans son état actuel.

Dans le cadre de cette étude, le MTG a répondu cependant au besoin pour séparer de façon identique les planches entre test de flexion et de traction.

3.3 Méthodologie expérimentale

Avant essai destructif (flexion & traction), chaque planche va être de nouveau vérifiée au sens de la norme NF B 52-001 parties 1 ou 2. L'annexe 1 rassemble les règles de tri de la norme.

Après chaque test d'épreuve, le numéro sera reporté sur les différentes parties de la planche lors de la rupture pour analyse complémentaire.

3.3.1 Essais de flexion statique

Réalisée selon la norme EN 408, la planche est chargée symétriquement en flexion en quatre points sur une portée égale à 18 fois la hauteur. Une force est appliquée à vitesse constante qui ne dépasse pas 0.003 h mm/s jusqu'à la rupture de la pièce.

- La flèche est mesurée au centre de la rive de compression de l'éprouvette entre 0 et 40% de la force maximale (F_{max}). Ainsi nous obtenons un module global d'élasticité (MOE_g) en flexion quatre points, qui est le rapport entre l'accroissement de force en newtons et l'accroissement de flèche en millimètre.

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

- La mesure du déplacement est équipée de trois capteurs inductifs séparés de 0,5 Lu mesurant localement des déplacements latéraux (TRIDENT placé en face comprimée). Le capteur central (f) mesure la flèche absolue de la pièce.

$$E_{m,\ell} = \frac{a\ell_1^2 (F_2 - F_1)}{16I (w_2 - w_1)}$$

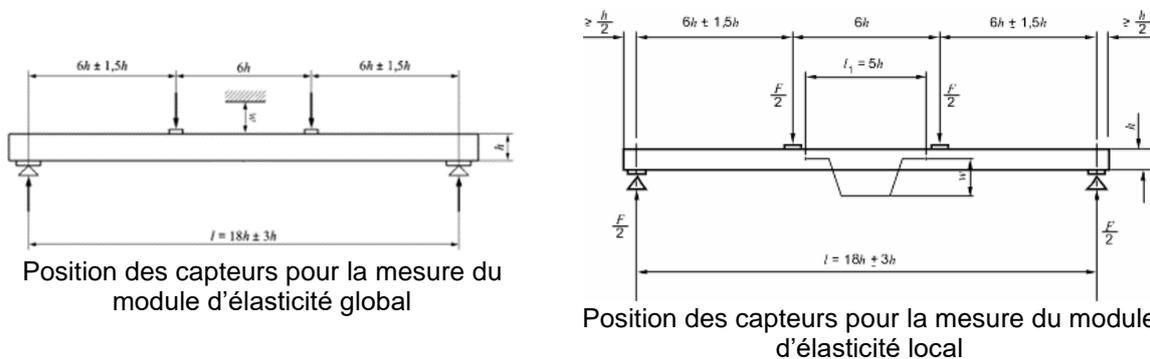


Figure 6 : description du test de flexion avec en a) mesure du module d'élasticité global en b) mesure du module d'élasticité local

L'essai porte jusqu'à la destruction mesurée grâce aux capteurs, nous donnant ainsi, pour chaque planche, une contrainte à la rupture (MOR).

$$f_b = \frac{M_b}{I/v} = \frac{3 * P_1 * L}{(2 * b * H^2)}$$



Planche H0-106 : Pente de fil



Planche H1 – 56 : pente de fil + nœud

Figure 7 : Exemple de facies de rupture rencontré lors des tests de flexion

Les modules d'élasticité sont ajustés à un taux d'humidité de 12% par une correction de 1% pour chaque variation de 1% de teneur en humidité (norme EN 384).

$$MOE_{12\%} = MOE * (1 - ((12 - H\%) * 2 / 100))$$

La contrainte à la rupture est ramenée à une section référentielle de 50*150 mm² pour les comparaisons de performances mécaniques entre essences en divisant par le coefficient kh (§ 5.3.5.3 EN 384 ; l'exposant retenu est égal à 0.2).

$$MOR_{150} = MOR_H * \left[\frac{H}{150} \right]^{-0.2}$$

La figure suivante illustre la relation entre la contrainte en flexion et le module d'élasticité en flexion.

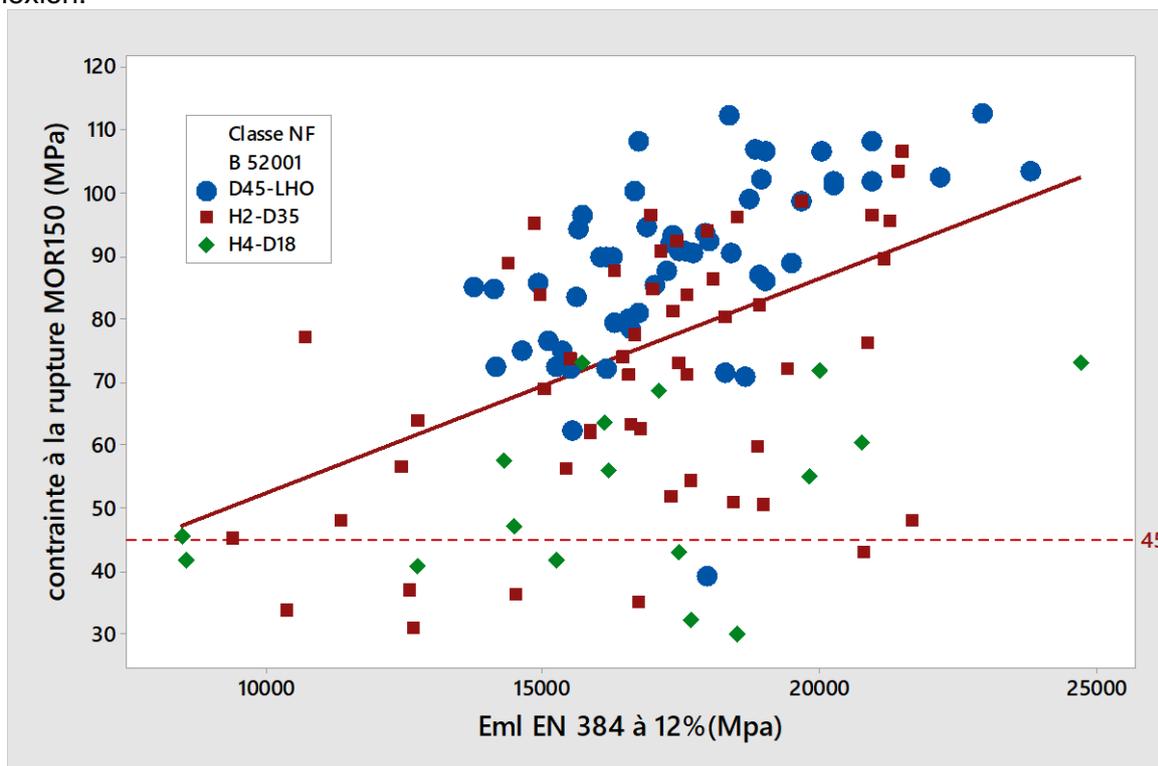
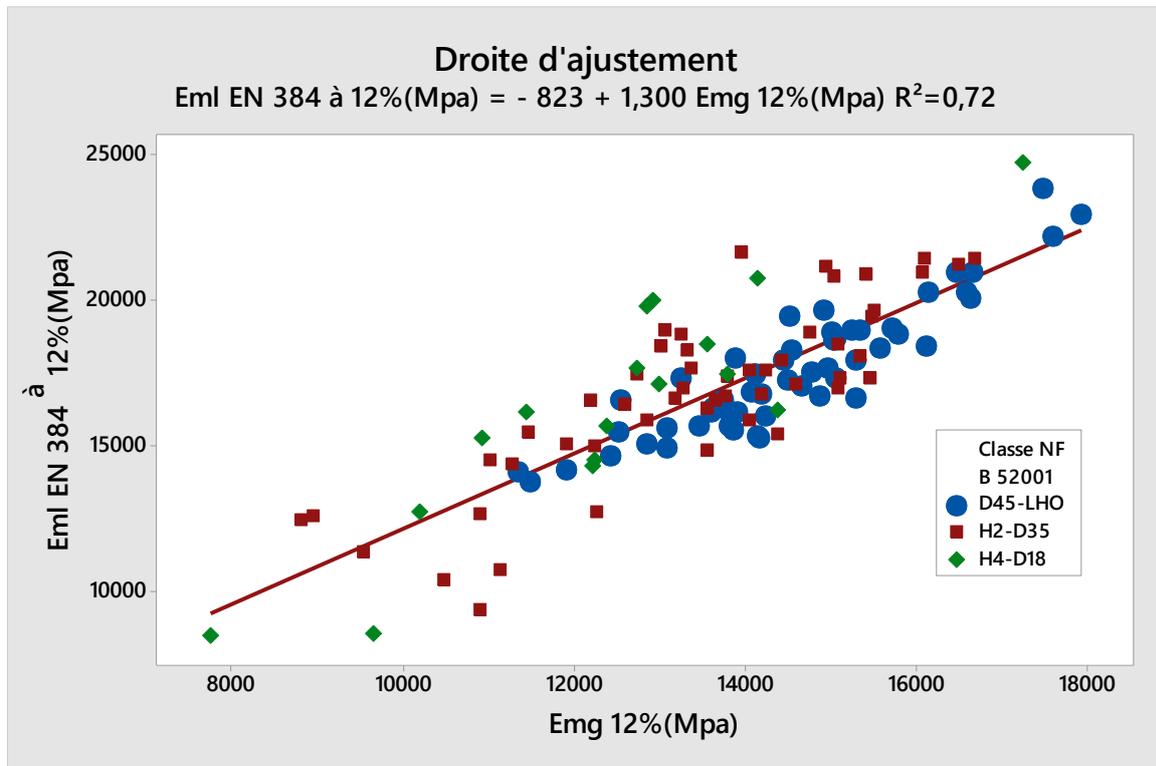


Figure 8 : représentation de la contrainte de flexion avec le module d'élasticité local selon le tri visuel des planches.

Le module d'élasticité local peut être déterminé à partir de la mesure du module d'élasticité global au moyen de la relation suivante.

$$MOE_{mL}^{EN384} = 1.3 * MOE_{m,g} - 2690$$

Bien que cette équation ait été déterminée sur des essais de flexion obtenus sur résineux, la norme EN 384 ne limite pas son utilisation qu'aux résineux sauf preuve du contraire. Toutefois, l'analyse des résultats de cette campagne montre que le coefficient directeur de la régression suit quand même la même loi.



3.3.2 Essai de traction statique

La machine de traction FCBA mesure la charge avec une précision de 1% de la charge appliquée à l'éprouvette. La charge doit être appliquée à un mouvement constant de la tête de chargement de sorte que la charge maximale soit atteinte en (300 ± 120) s. Toute pièce unique s'écartant de plus de 120 secondes de la cible de 300 secondes doit être signalée. La résistance à la traction est donnée par l'équation.

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

La figure ci-dessous montre un aperçu de l'expérience.

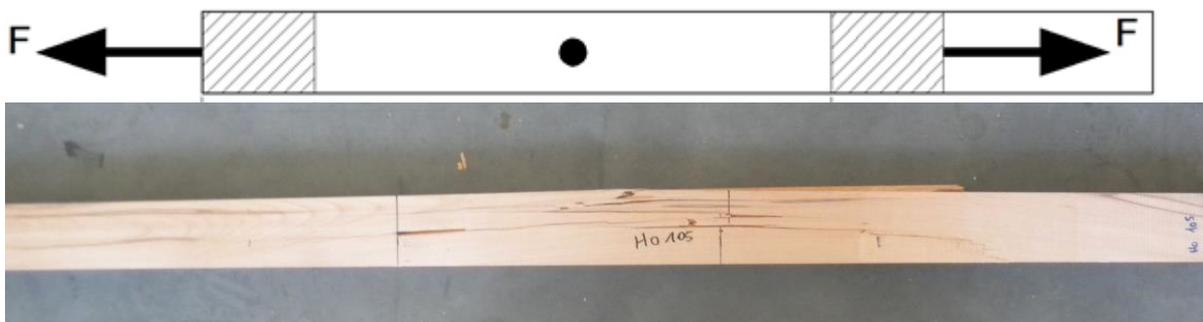


Figure 9 : principe de l'essai de traction

Les modules d'élasticité sont ajustés à un taux d'humidité de 12% par une correction de 1% pour chaque variation de 1% de teneur en humidité (norme EN 384).

$$MOE_{12\%} = MOE * (1 - ((12 - H\%) * 2 / 100))$$

La contrainte à la rupture est ramenée à une section référentielle de 50*150 mm² pour les comparaisons de performances mécaniques entre essences en divisant par le coefficient kh (§ 5.3.5.3 EN 384 ; l'exposant retenu est égal à 0.2).

$$MOR_{150} = MOR_H * \left[\frac{H}{150} \right]^{0.2}$$

La figure suivante illustre la relation entre la contrainte en traction et le module d'élasticité en traction.

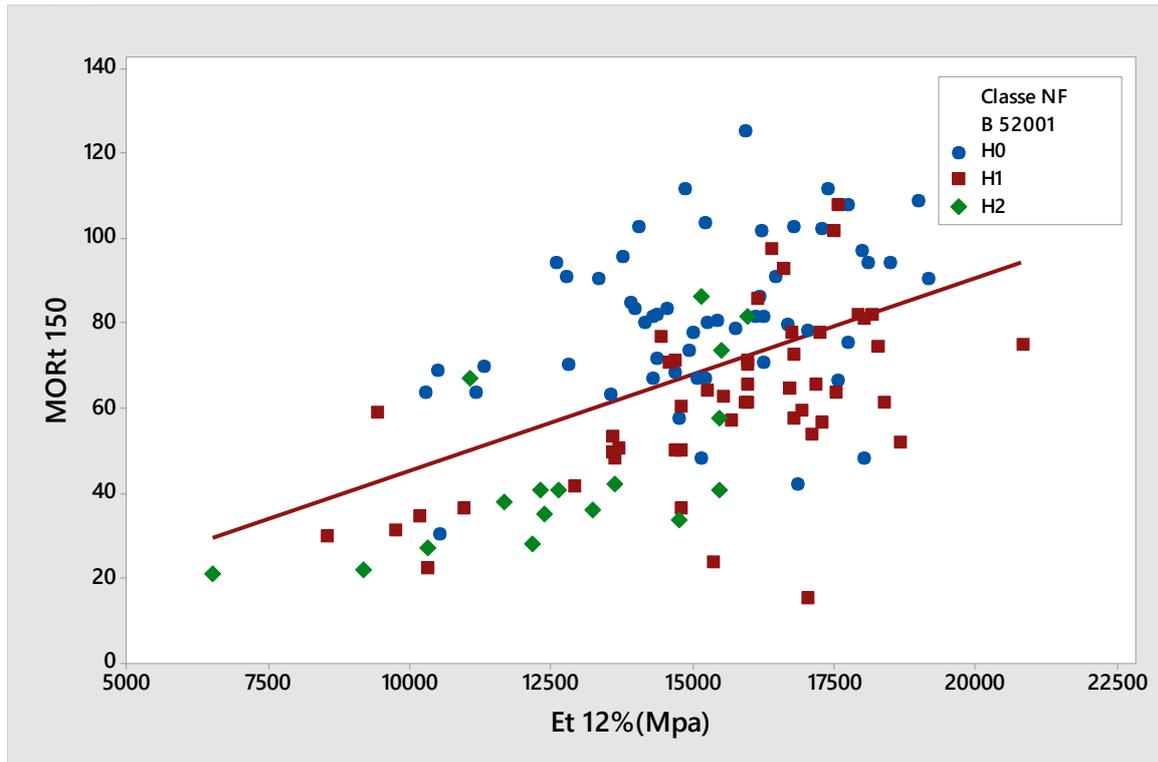


Figure 10 : représentation de la contrainte de traction avec le module d'élasticité selon le tri visuel des planches.

La mesure du module d'élasticité est très difficile en traction, les déplacements sont minimes, il faut donc s'équiper en capteurs à haute précision.

Tableau 3: comparaison des modules d'élasticité entre test de traction et de flexion.

Variable	N	Moyenne	CV(%)	Minimum	Q1 (25%)	Médiane (50%)	Q3 (75%)	Maximum
Et 12%(MPa)	121	14956	17,06	6509	13613	15252	16766	20809
Eml EN 384 12%(MPa)	121	17002	16,75	8466	15498	17091	18776	24714

Comme les modules d'élasticité en traction semblent inférieurs à ceux de flexion, on pourrait penser à une erreur de mesure. Toutefois, Ehrhart (2016) a déjà constaté ces plus faibles valeurs avec une valeur moyenne du MOEt entre 13300-14000 MPa. Par ailleurs, la courbe suivante illustre la corrélation entre les mesures faites au moyen du MTG (moyen externe de contrôle) et expérimentales.

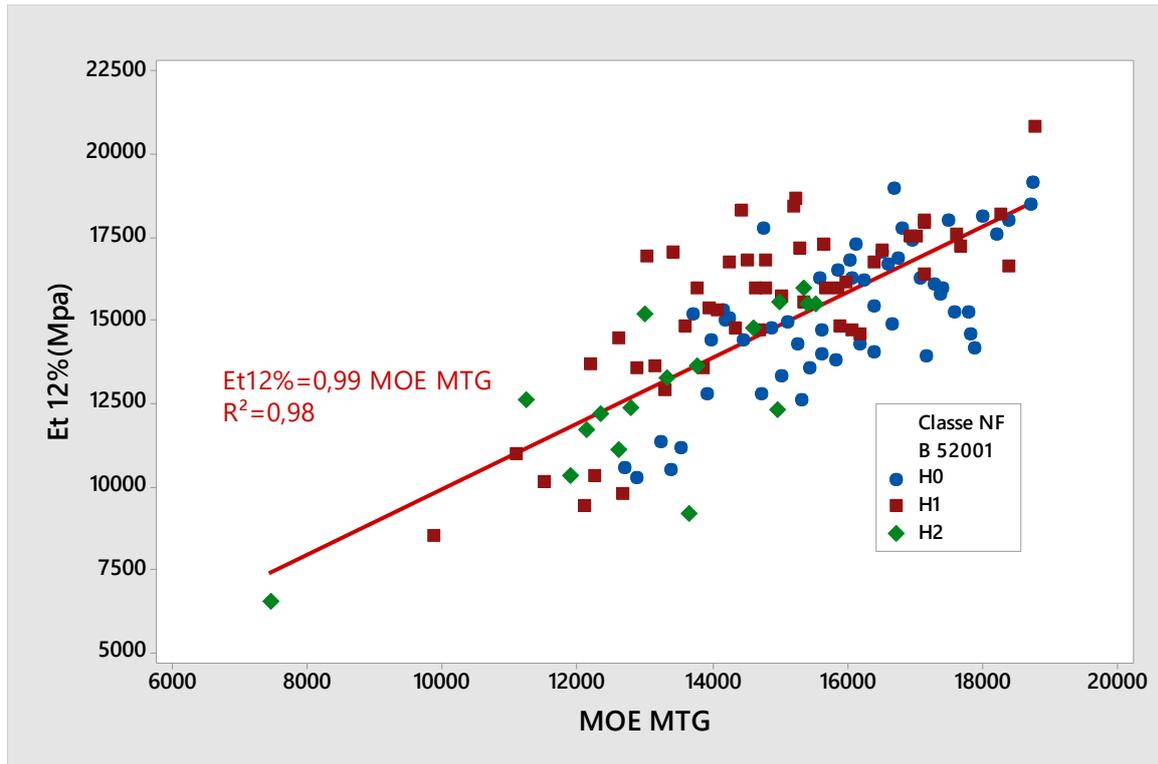


Figure 11 : correspondance entre les valeurs du module d'élasticité en flexion et du MTG par type de lot de bois massifs. La régression est affichée dans le graphique.

On peut raisonnablement penser que les mesures expérimentales du module d'élasticité sont « correctes ».

3.3.3 Correspondance entre test de traction et de flexion

Pour mieux comprendre, la norme EN 384 propose à partir des coefficients de passage entre les valeurs de traction et les valeurs de flexion à partir des classes de résistances en flexion (et vice versa) par les formules suivantes.

Tableau 4: équations entre classes de traction - flexion extraites de la norme EN 384 (2016).

Propriétés de résistance en N/mm ²	Classes C bois résineux	Classes T bois résineux	Classes D bois feuillus
Basée sur	flexion sur chant	traction	flexion sur chant
Flexion $f_{m,k}$	donnée	$3,66 + 1,213 * f_{t,0,k}$	donnée
Traction axiale $f_{t,0,k}$	$-3,07 + 0,73 * f_{m,k}$	donnée	$0,6 * f_{m,k}$

En triant par ordre croissant les valeurs obtenues lors des tests de flexion et traction, il nous est possible d'associer la ligne 1 en flexion équivalente à la ligne 1 en traction sans passer par des courbes fractile-fractile. Cela est dû à notre mode de sélection des bois pour les tests mécaniques (population de planches comparables grâce au tri par MTG).

Les courbes suivantes illustrent les tendances pour les deux contraintes et les modules.

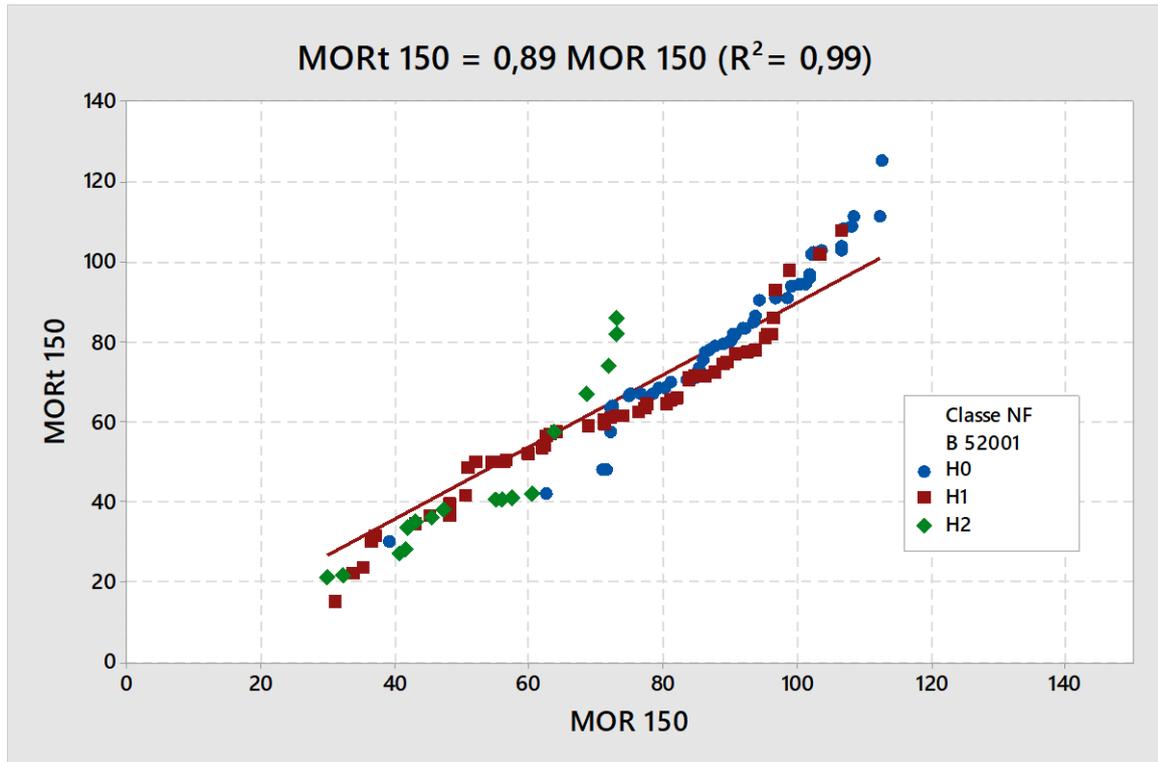


Figure 12 : correspondance entre les valeurs de contrainte à la rupture en traction et flexion par type de lot de bois massifs. La régression est affichée en tête de graphique.

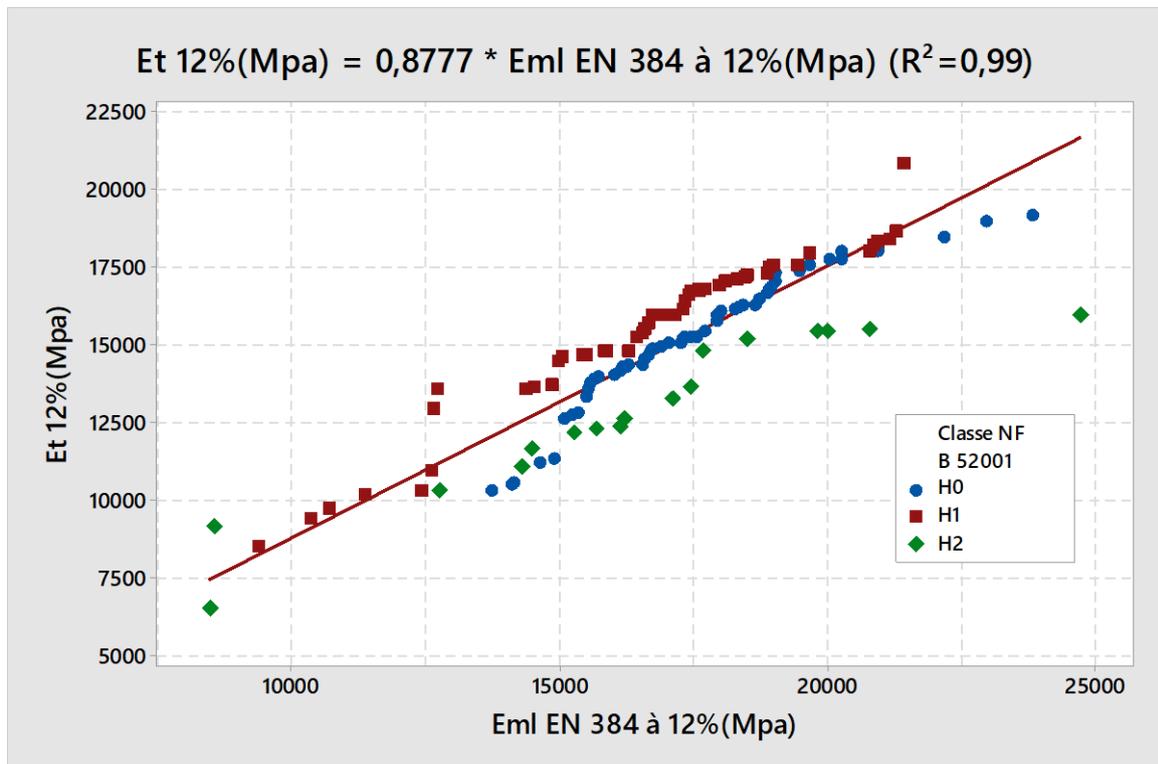


Figure 13 : correspondance entre les valeurs du module d'élasticité en traction et flexion par type de lot de bois massifs. La régression est affichée en tête de graphique.

L'analyse des courbes permet de convertir des données en flexion pour avoir des données en traction au moyen d'un coefficient de passage suivant :

$$f_{t,0,k} = 0,85 * f_{m,0,k}$$

$$E_{t,0,moy} = 0,85 * E_{m,0,moy}$$

Tableau 5 : Proposition de classe de résistance en traction des bois feuillus européens - correspondance avec les valeurs de flexion.

classe Suisse	classe France	Ft,0,k	Et,0,moy	Mv	correspondance en flexion	Fm,0,k	Em,0,moy	EN 338
	T18	18	12,5		H2-D18	21,2	14,7	9,5
T26		26	13			30,6	15,3	
	T27	27	13,5		H1-D35	31,8	15,9	12
T33		33	14			38,8	16,5	
T42		42	14,5			49,4	17,1	
	TD45	45	15		H0-D45	52,9	17,6	13,5
T50		50	15,5			58,8	18,2	

De plus en plus, les industriels fabricants des poutres en lamellé-collé de résineux classent leurs bois en traction, l'analyse comparée du Tableau 5 montre tout le potentiel en traction du hêtre. A qualité égale, on obtient de meilleures performances et donc un plus grand nombre de planches dans la classe de traction.

Ces valeurs devront être complétées avec d'autres travaux européens pour avoir un consensus avant d'envisager un tableau de classe de résistance des feuillus en traction au sein de la norme EN 338 .

3.4 Affectation des classes de résistance

A l'issue des tests de performance mécanique, il est important d'assigner une classe de résistance (cf. Tableau 1) aux lots de hêtre sélectionnés par MANUBOIS selon le type de test. Pour cela, il est nécessaire de rappeler que pour qu'une planche puisse être identifiée comme étant d'une classe de résistance, il faut vérifier au même moment sur le lot classé :

- Le fractile d'exclusion à 5% de la contrainte à la rupture
- La moyenne du module d'élasticité
- Le fractile d'exclusion à 5% de la masse volumique

3.4.1 Classe de résistance en flexion

En ce qui concerne le test de flexion, les figures suivantes illustrent la distribution des résultats (contrainte à la rupture en flexion, module d'élasticité axiale en flexion et masse volumique). On peut constater la diminution des propriétés mécaniques dès qu'il y a présence de singularités.

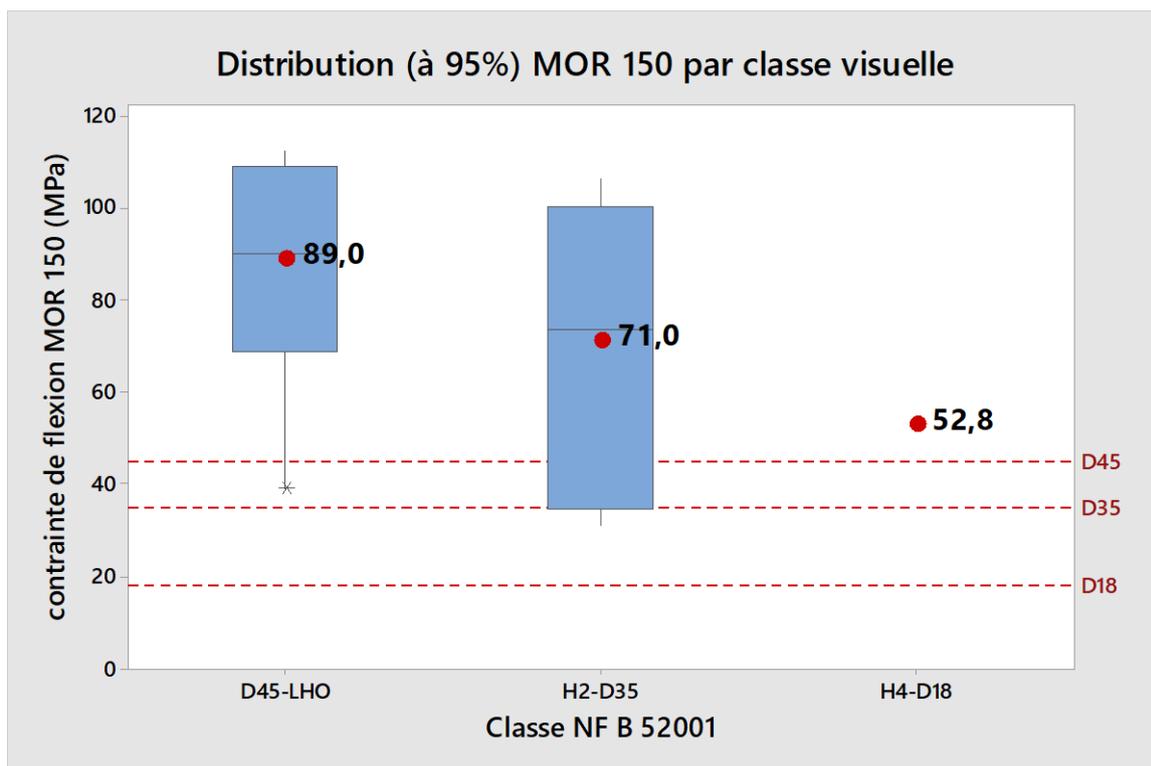


Figure 14 :distribution en boîtes à moustache de la contrainte de rupture des planches en flexion. L'étendue du rectangle bleu représente les 5 à 95% de la distribution.

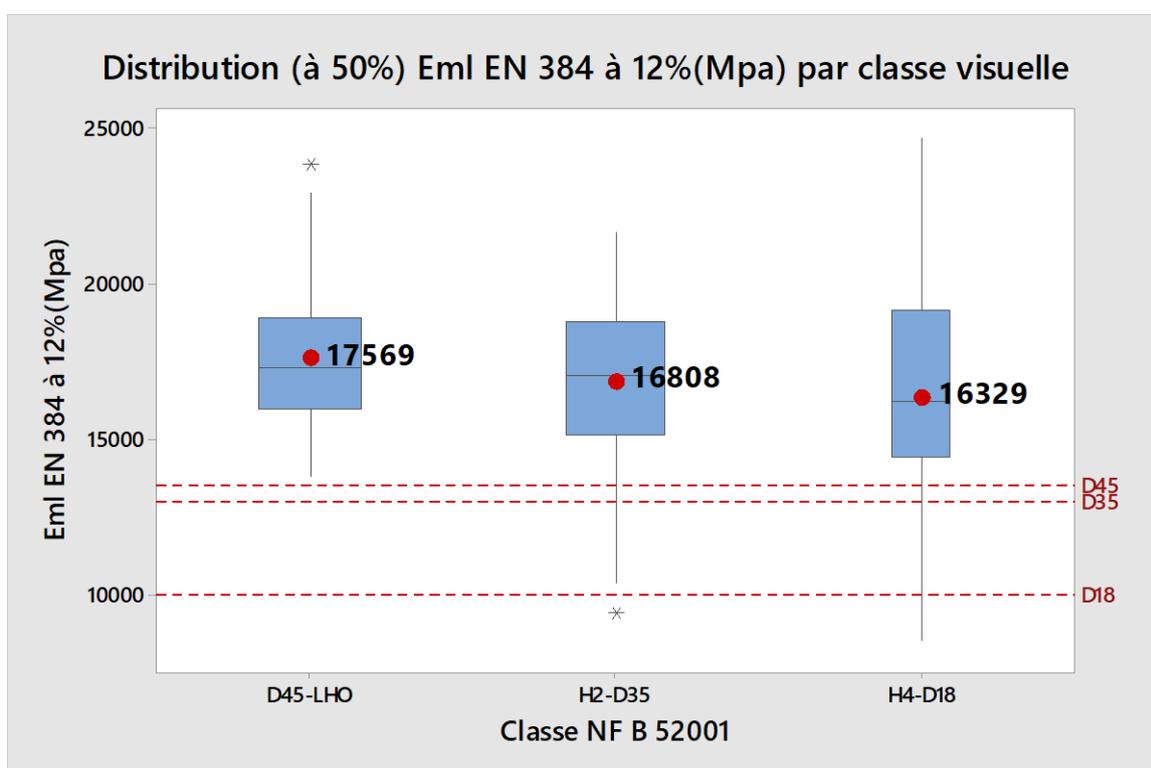


Figure 15 :distribution en boîtes à moustache du module d'élasticité des planches en flexion. L'étendue du rectangle bleu représente les 5 à 95% de la distribution.

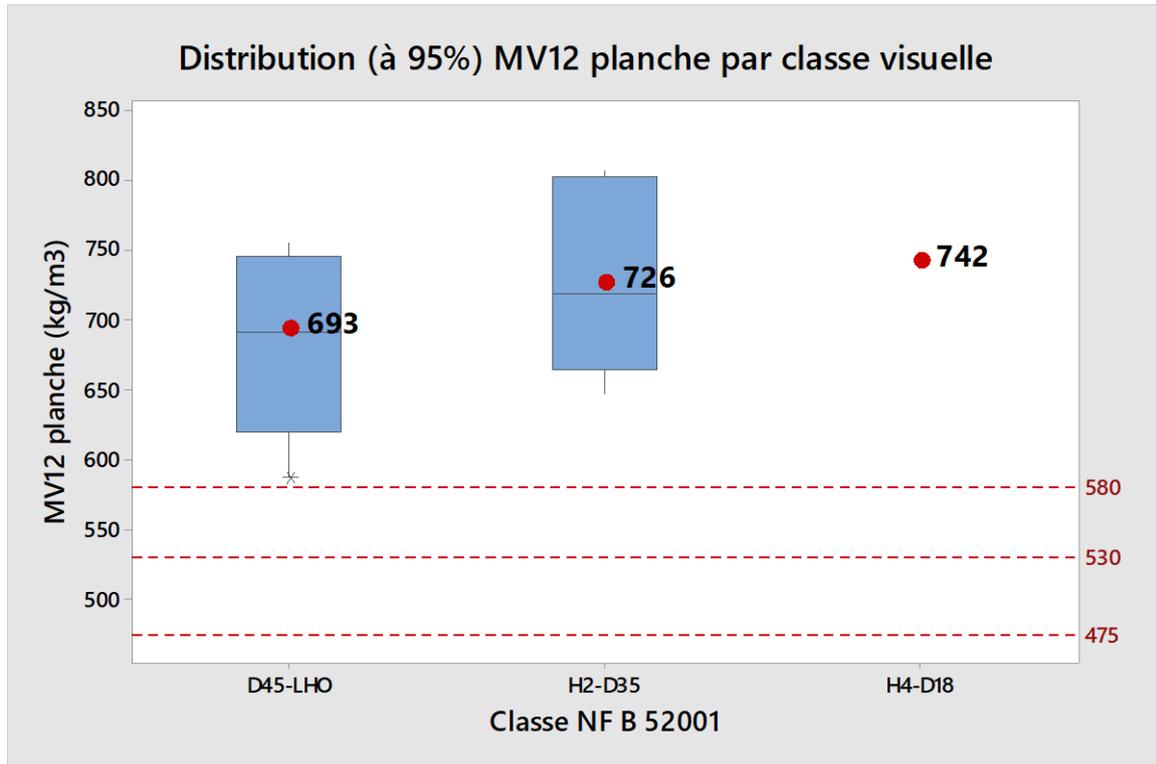


Figure 16 : distribution en boîtes à moustache de la masse volumique des planches en flexion. L'étendue du rectangle bleu représente les 5 à 95% de la distribution.

Tableau 6: Correspondance entre classes visuelles de résistance du hêtre français et classes de résistance EN 338 (* lot estimé selon EN 14358 ; ** PAR LOI NORMALE ; en bleu les valeurs arrondies)

Classes visuelles NF B 52-001	Classes de Résistance	Fractile 5% MOR (MPa)	MOE moyen (GPa)	MOEt 5% (GPa)	Fractile 5% MV (kg/m ³)	Nbre valeurs
LH0	D45	68,7	17,5	14.1 (>11.3-D45)	619	54
	D50 possible	68,7	17,5	14.1 (>11.8-D35)	619 (620)	54
H2	D35	34,5* (35)	16,8	10.5 (>10.1-D35)	664	52
H4	D18	29.4* (30)	16,3	9.5**(>9.2-D30)	695	17
H2+H4	D30 possible	32.8	16,9	9.8 (>9.2-D30)	667	69

Le point bloquant pour classer le hêtre sélectionné dans l'étude PROBOIS en D45 et plus, reste la masse volumique. En effet, les seuils normalisés de masse volumique au sein des classes EN 338 sont optimisés pour les bois tropicaux et non pour les bois feuillus européens. Un long travail de normalisation va être entrepris pour intégrer nos valeurs et lancer une modification des seuils.

3.4.2 Classe de résistance en traction

Ces classes de résistance en traction (classe T – EN 338) ne sont accessibles qu'aux résineux et ce jusqu'à la classe extrême référencée T30. il n'est pas exclu qu'un jour ces classes puissent être déclinées aux feuillus. C'est pourquoi, nous avons volontairement indiqué des

classes de résistance en traction sous l'acronyme TDXX au-delà de la classe T30 pour être au plus près des performances attendues du hêtre.

Le tableau suivant illustre la distribution des résultats (contrainte à la rupture, module d'élasticité axiale et masse volumique) de manière à affecter une classe de résistance TXX (EN 338).

Tableau 7: Correspondance entre classes visuelles de résistance du hêtre français et classes de résistance (traction) EN 338 (* lot estimé selon EN 14358 ; ** par loi normale)

Classes visuelles NF B 52-001	Classes de résistance	Fractile 5% MORT (MPa)	MOEt moyen (GPa)	MOEt 5% (GPa)	Fractile 5% MV (kg/m ³)	Nbre valeurs
LH0	TD 45 ³	46.2 (>27-D45)	15.1 (>13.5-D45)	10.5 (>11.3-D45)	609 (>580-D45)	52
H2	TD 23	23.0 (>21-D35et+)	15.4 (>12-D35et+)	9.5 (>10.5-D35et+)	642 (>540-D35)	52
H4	TD 21	21.3(>21-D35)	12.7 (>12-D35)	8.5**(>10.1-D35)	647 (>540-D35)	17
	TD 17 possible	17.5*(>16-D27)	12.7 (>10.5-D27)	8.5**(>8.8-D27)	647 (>510-D27)	17
H2+H4	TD 21	21.7 (>21-D35)	14.7 (>12-D35)	9.2 (>10.1-D35)	641 (>540-D35)	67

Le point bloquant, pour classer le hêtre sélectionné dans l'étude PROBOIS en classe TD45 et plus, est le module d'élasticité ; il est inférieur à 2000 MPa par rapport à celui obtenu en flexion. Ehrhart (2018) propose des classe T26, T33, T42 et T50 sans forcément expliquer les seuils. On pense malgré tout que les classes TXX proposées respectent la valeur caractéristique XX en contrainte de traction.

3.5 Synthèse de la tâche 4 :

Les trois lots de bois (H0, H1 & H2) classés visuellement par MANUBOIS présentent des performances mécaniques à même de fabriquer des poutres lamellées collées. Les trois classes de performances ont été identifiées suite à la mise en place d'un CPU (Contrôle Production Usine) chez MANUBOIS, soit :

- vérification à la sollicitation en Flexion
 - Lot H0 MANUBOIS → D50
 - Lot H1 MANUBOIS → D35
 - Lot H2 MANUBOIS → D30

Ou

- Lot H0 MANUBOIS → D50
- Lot H1+H2 MANUBOIS → D30 et mieux
- vérification à la sollicitation en traction
 - Lot H0 MANUBOIS → TD45 (équivalent à D50 par coef de passage PROBOIS)
 - Lot H1 MANUBOIS → TD23 (équivalent à D35 par coef de passage PROBOIS)
 - Lot H2 MANUBOIS → TD21 (équivalent à D30 par coef de passage PROBOIS)

Ou

³ La norme EN 338 ne propose que des classes de traction inférieur à T30 (cas des résineux).

- Lot H0 MANUBOIS → TD45 (équivalent à D50 par coef de passage PROBOIS)
- Lot H1+H2 MANUBOIS → TD21 et mieux (D30 par coef de passage PROBOIS)

Il reste quand même à définir les classes potentielles en BLC (Tâche 7) pour mieux tirer profit de la ressource.

Nous préconisons des poutres « combinées » alliant des planches à plus hautes performances en bordure et d'autres de plus faibles propriétés au milieu. Ainsi, le rendement matière reste le plus grand possible.

Les essais expérimentaux menés en traction font ressortir des classes mécaniques plus intéressantes, MANUBOIS pourrait envisager aussi cette solution alternative dans le choix du tri des bois après une révision de la norme EN 338.

4. Tâche 1 – Etablissement du cahier des charges pour le collage des aboutages pour une utilisation structurale

Le principe même de la fabrication des poutres en lamelle collé réside dans l'obtention de lamelles unitaires aboutées pour constituer un lit de longueur souhaitée. L'aboutage peut être réalisé soit aux extrémités d'une planche ou soit au niveau d'un désordre constitué par un nœud ou pente de fil qu'il convient de purger au sein de la planche. Dans ces deux cas de figure, la matière première est « déstructurée », il convient donc de la recréer au moyen d'un aboutage par enture multiple.

L'aboutage par enture multiple est un paramètre réducteur en terme de résistance à la rupture des poutres multi-couches en bois reconstitué. Ce point de fragilité doit alors être pris en compte dans la fabrication des lamelles aboutées. Pour résoudre cette difficulté, il est naturel de réfléchir sur une modification de la géométrie de l'enture afin d'augmenter la surface de collage et améliorer ainsi la résistance des aboutages par entures multiples. Bien que les aspects d'adhésion et d'adhésifs soient très importants et jouent un rôle crucial dans la résistance mécanique de l'aboutage, ils ne seront pas traités dans cette partie.

4.1 Choix des entures

Le profil d'enture des aboutages des feuillus doivent suivre les recommandations de la norme EN 14080 à partir de bois résineux. Le facteur d'affaiblissement, rapport entre l'épaisseur à fin d'enture (b_t) et le pas (p), doit être supérieur ou égal à 0,11

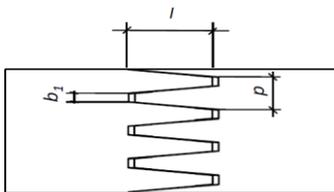


Figure 17 : Définition du profil d'enture

Tableau I.I.1 — Géométries recommandées

Longueur d'enture l (mm)	Pas p (mm)	Largeur de la pointe b_t (mm)	Facteur d'affaiblissement v
15	3,8	0,42	0,11
20	5,0	0,5	0,10
20	6,2	1,0	0,16
30	6,2	0,6	0,10

Figure 18 : Description des profils d'enture recommandés pour les résineux selon la norme EN 14080

Lors de la première étude FCBA de caractérisation du hêtre, l'utilisation volontaire de bois courts et aux matériels industriels présents nous ont imposé le profil d'enture comme suit .

- Longueur d'enture $l = 10$ mm

- Pas $p = 3.7/3.8$ mm
- Largeur de pointe $b_1 = 0.6/0.7$ mm

Dans sa thèse, TRAN (2014) a travaillé sur l'optimisation des entures et propose les configurations résumées dans la figure suivante.

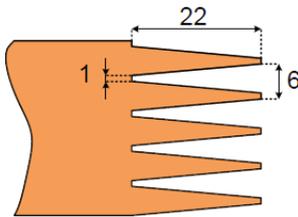


Figure 19 : Géométrie de l'enture avant optimisation

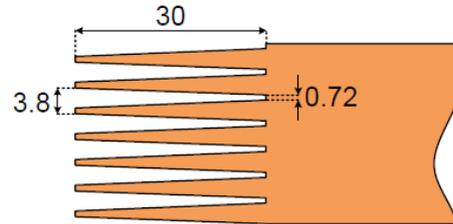


Figure 20 : Géométrie de l'enture après optimisation

Des simulations numériques ont été effectuées, en flexion 4 points sur la lamelle aboutée, avec la géométrie optimale de l'enture multiple. Il apparaît que la résistance en flexion de la lamelle aboutée a augmenté de 10405 N à 13803 N, soit un gain de résistance d'environ 33%.

Tableau 8: Paramètres géométriques des entures multiples avant et après optimisation [TRAN 2014]

Paramètres	Min	Max	Initial	Optimal
L (mm)	15	30	22	30
P (mm)	3.8	6.8	6.0	3.8
b_1 (mm)	0.42	1.0	1.0	0.72
F_{MAX} (N)			10405	13803

L'optimisation des entures repousse les limites de faisabilité au-delà de celles imposées par la norme européenne EN 14080 pour obtenir des entures plus longues et donc des aboutages plus résistants. Augmenter la longueur d'enture implique toutefois des problèmes d'usinage. Il faudrait dans ce cas vérifier les conditions d'usinabilité de telles entures.

La recherche des performances des produits en lamellé collé de hêtre a conduit l'équipe slovène [FORTUNA 2019] à travailler sur le profil des entures d'aboutages caractérisé en traction. La modélisation et les mesures expérimentales indiquent une longueur de joint optimale pour 30mm mais sans jouer sur l'épaisseur des dents. Cela pose malgré tout un problème d'exécution des entures car les équipementiers ne commercialisent que très peu ce type de fraises.

Quel que soit l'enture retenu, il convient de se prémunir d'une proximité d'un aboutage avec une singularité du bois. Dans ce but, la norme EN 14080 préconise une distance de « sécurité d'au moins 3 fois la taille du défaut comme le montre la figure suivante. Dans le cas d'une pente de fil, cela est plus complexe car l'inclinaison du fil peut être grande, la purge va donc être « sévère » ; L'étude technico-économique devra être prise en compte par les industriels.

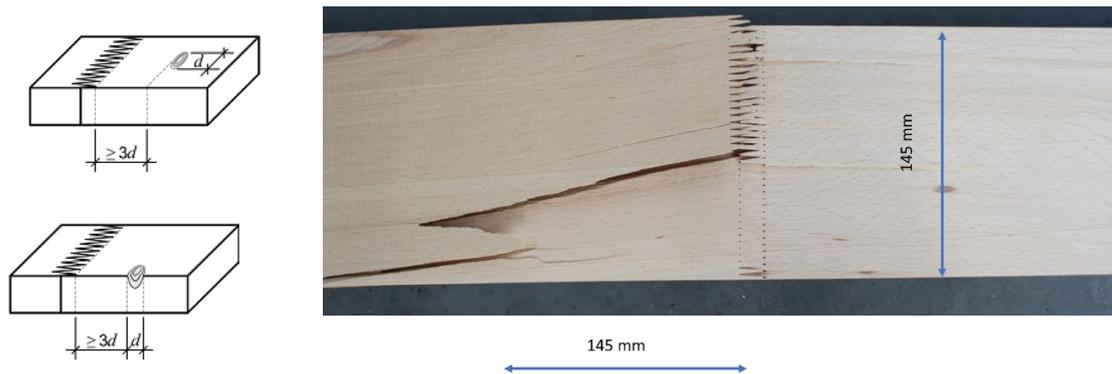


Figure 21 : Distance minimale entre la base de l'aboutage à entures multiples et un nœud

4.2 Synthèse de la tâche 1 :

L'opération d'aboutage présente un assez grand nombre d'avantages comme la réalisation d'éléments de grandes longueurs (qui peuvent être ensuite tronçonnés). Dans une certaine mesure, l'aboutage permet de valoriser des bois de « qualité secondaire » par purge des défauts (nœud, pente de fil, ...).

Force est de constater que les contraintes financières liées aux investissements et les délais de fourniture du matériel ont poussé MANUBOIS à sélectionner des profils « classiques » issus de la norme harmonisée EN 14080 (résineux).

La géométrie des entures a été fixée comme suit:

- L = 16,5 mm
- P = 3,8 mm
- b_1 = Variable pour le moment.

5. Tâche 3 : Caractérisation mécanique de l'aboutage de type structural pour validation du choix de l'aboutage

Suite au choix technologique retenu précédemment, une campagne de fabrication de planches aboutées (tâche 2) a été entreprise chez MANUBOIS pour déterminer la résistance des aboutages. Deux lots d'au moins 50 lamelles aboutées chacun ont été envoyés au FCBA pour les tests en flexion et en traction. La longueur des planches est en adéquation avec les configurations expérimentales préconisées par la norme EN 408 préalablement présentées.

5.1 Bois aboutés - Essai de flexion à plat

Les essais sont réalisés selon la norme NF EN 14080 d'août 2013 – Annexe E : Essais de flexion 4 points des lamelles avec ou sans aboutages à entures multiples. Dans le cadre du Référentiel ACERBOIS, la norme NF EN 14080 est complétée par la méthode interne FCBA-LBO-MECA-022 pour la détermination de la masse volumique et de la caractérisation de croissance.

La masse volumique de chaque éprouvette d'essai est déterminée par pesées et mesures des dimensions avant essai. Les éprouvettes sont conditionnées dans une chambre climatique de température $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et d'humidité relative de l'air de $(65 \pm 5) \%$ avant essais. La teneur en humidité est mesurée à l'aide d'un humidimètre à pointes de manière à être comprise entre 9% et 15% et consignée.

La hauteur nominale des éprouvettes est la moyenne arithmétique des hauteurs de chacune des éprouvettes préalablement mesurées. Cette hauteur nominale h_n est utilisée pour le réglage du montage d'essai.

Les essais sont réalisés sur une machine d'essais hydraulique électromécanique verticale pilotée et asservie informatiquement, d'une capacité nominale de 15 000 daN. Cette machine est de classe 1, c'est à dire que la force est mesurée avec une précision de 1 % sur la mesure.

Les éprouvettes d'essais sont placées centrées à plat sur deux appuis inférieurs, aboutages centrés.. Les efforts de flexion sont transmis aux éprouvettes en deux points de chargement par le biais de deux appuis supérieurs (Cf. figure 1).

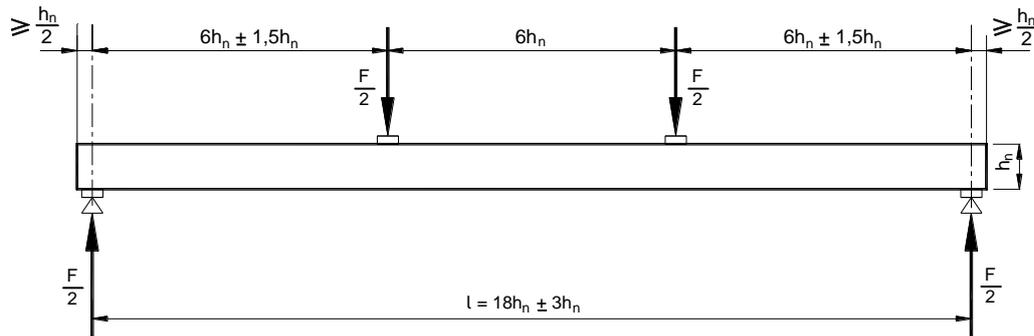


Figure 22 : Schéma de principe de l'essai

Les résultats d'essais sont présentés comme suit :

- F_{max} : force maximale, en N
- L : longueur de l'éprouvette, en mm
- b : largeur de la section transversale de l'éprouvette, en mm
- h_e : hauteur de la section transversale de l'éprouvette, en mm
- h_n : hauteur nominale de la section transversale des éprouvettes, en mm
- t : temps d'essai avant rupture, en s
- a : distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche en mm
- l : portée en flexion, en mm
- W : module d'inertie ou de résistance de la section transversale, en mm^3
- H : humidité, en %

La résistance à la flexion est calculée à l'aide de la formule suivante :

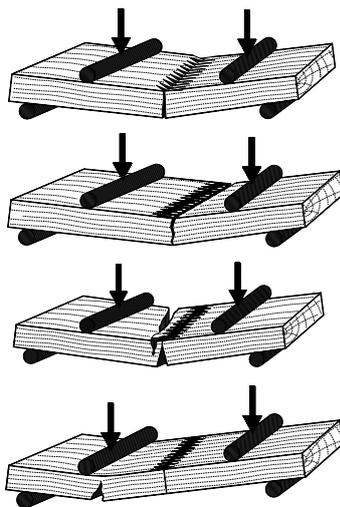
$$f_m = \frac{a F_{max}}{2 W}$$

avec $a = 6 h_n$

$$W = \frac{b h_e^2}{6}$$

La rupture des éprouvettes est classée selon les modes ci-dessous

(cf. Figure 23):



A1 : Aboutage par déchaussement

A2 : Aboutage en bout de dent

A3 : Aboutage mixte bois aboutage

B1 : Bois présence nœud

B2 : Bois présence pente de fil

B3 : Bois présence autre singularité

Figure 23 : Mode de rupture constaté lors des essais de flexion sur lamelles aboutées

Les résultats expérimentaux sont présentés ci-après.

Tableau 9: résultats des tests d'aboutage en flexion (lamelles unitaires)

Lot	Grandeurs statistiques	Contrainte (MPa)	Masse volumique (kg/m ³)
Bois D45	Moyenne	80,5	689
	CV	15,6%	3,2 %
	Fractile	59,1	646
Section 38*145 mm ² Longueur > 800 mm	Seuil	58,5	
	Nombre d'éprouvette	49	49
	Facies de rupture	Environ 20% pour chaque type de facies	

5.2 Bois aboutés - Essai de traction

Les essais sont réalisés selon la norme NF EN 14080 d'août 2013 – Annexe E : Essais de flexion 4 points des lamelles avec ou sans aboutages à entures multiples.

La masse volumique de chaque éprouvette d'essai est déterminée par pesées et mesures des dimensions avant essai. Les éprouvettes sont conditionnées dans une chambre climatique de température (20 ± 2) °C et d'humidité relative de l'air de (65 ± 5) % avant essais. La teneur en humidité est mesurée à l'aide d'un humidimètre à pointes de manière à être comprise entre 9% et 15% et consignée.

Les essais sont réalisés sur une machine d'essais hydraulique verticale pilotée et asservie informatiquement, d'une capacité nominale de 200 000 daN. Cette machine est de classe 1, c'est à dire que la force est mesurée avec une précision de 1 % sur la mesure.

Les éprouvettes d'essais sont placées dans deux mors hydrauliques, aboutages centrés de manière à ce que la longueur d'essai soit égale à neuf fois la plus petite dimension des éprouvettes (Cf. Figure 24).

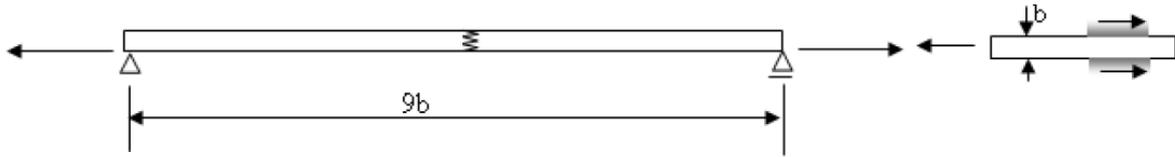


Figure 24 : Schéma de principe de l'essai de traction sur lamelles aboutées

Les résultats d'essais sont présentés comme suit :

- F_{max} : force maximale, en N
- L : longueur de l'éprouvette, en mm
- l : largeur de la section transversale de l'éprouvette, en mm
- t : temps d'essai avant rupture, en s
- b : épaisseur de la section transversale de l'éprouvette, en mm
- H : humidité, en %

La résistance à la traction est calculée à l'aide de la formule suivante :

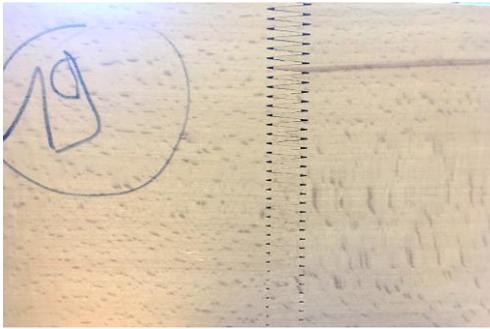
$$f_t = \frac{F_{max}}{W}$$

avec $W = b \cdot l$ La rupture des éprouvettes en traction est classée selon les modes ci-dessous (Cf. Figure 25):

Les résultats expérimentaux de 2 lots sont présentés ci-après. Le premier lot a été réalisé au début de l'étude, le 2^{ème} lot est issu d'un contrôle usine réalisé à la fin de l'étude dans le cadre de la future certification des produits.

Tableau 10: résultats des tests d'aboutage en traction (lamelle unitaire)

Lot	Grandeurs statistiques	Contrainte (MPa)	Masse volumique (kg/m ³)
Lot 1 : Section 38*145 mm ² Longueur > 1200 mm	Moyenne	34,3	682
	CV	22,8%	2,9%
	Fractile	21,3	652
	Seuil selon D45	En dehors des limites	
	Nombre d'éprouvettes	49	49
	Facies de rupture	87 % en A3	
Lot 2 : Section 40*60 mm ² Longueur > 1000 mm	Moyenne	47,3	732
	CV	18,5%	4,6%
	Fractile	32,7	666
	Seuil selon D45	32,2	
	Nombre d'éprouvettes	50	50
	Facies de rupture	45% en A2 ; 35 en A3	



A1 : Aboutage par déchaussement



A2 : Aboutage en bout de dent



A3 : Aboutage mixte bois aboutage



B2 : Bois présence pente de fil

Figure 25 : Mode de rupture constaté lors des essais de traction sur lamelles aboutées

5.3 Bois aboutés - Essai de flexion à chant

L'étude de la réglementation en vigueur nous a permis de constater que les lamelles multi aboutés pourraient être mis sur le marché sous forme de BMA (bois massif aboutés) à travers un marquage CE. La norme EN 15497 indique la démarche bien que ce référentiel ne parle pas de produit de la construction à partir de feuillus. C'est également le cas pour le marquage CE des poutres lamellée-collées au sens de la norme EN 14080.

Toutefois, il convient de faire des tests de flexion à chant pour valider le produit. Un lot de 31 planches aboutés (lot 21155-3 ; section nominale = 133*32 mm² ; longueur = 3 m) a été testé en flexion à chant. La hauteur fléchie est de 133 mm.

Les essais sont réalisés selon la norme NF EN 15497 – Juin 2014 : Bois massif de structure à entures multiples – Exigences de performances et exigences minimales de fabrication (Annexe C : Essais de flexion avec des aboutages à entures multiples). La procédure reste malgré tout celle citée précédemment (§ 3.3.1 Essais de flexion statique).

Les éprouvettes d'essais sont placées centrées à plat sur deux appuis inférieurs, aboutages centrés. Les efforts de flexion sont transmis aux éprouvettes en deux points de chargement par le biais de deux appuis supérieurs.

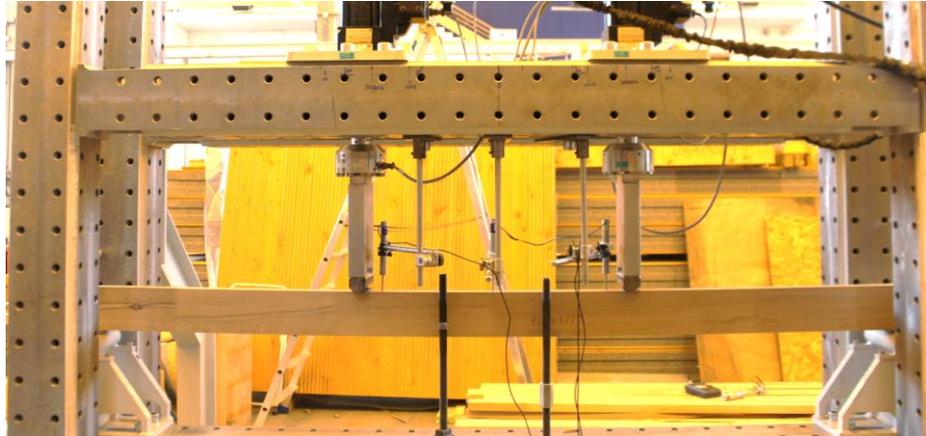


Figure 26 : essai de flexion à chant sur lamelles multi-aboutées

La rupture des éprouvettes est classée selon les modes ci-dessous.



A1 : Aboutage par déchaussement

A2 : Aboutage en bout de dent

A3 : Aboutage mixte bois aboutage

B1 : Bois présence nœud

B2 : Bois présence pente de fil

B3 : Bois présence autre singularité

Figure 27 : Mode de rupture constaté lors des essais de flexion à chant sur lamelles aboutées – test BMA

Tableau 11: résultats des tests d'aboutage en flexion à chant (section 130*40 mm²)

N° ép.	MV (kg/m ³)	Mode de rupture	F _{max} (N)	f _m (MPa)	Temps de rupture (s)	E _{mg} (MPa)	E _{ml} (MPa)
1	693,7	A3	20305	68,7	207	14085	19599
2	729,9	A3	17360	58,8	177	16460	24423
3	723,4	A3	15067	50,6	154	13994	18873
4	704,1	A3	24505	83,6	353	15117	19946
5	714,1	A3	12142	41,0	176	12254	18140
6	693,7	A3	13407	45,4	194	13209	15712
7	701,9	A3	12942	43,8	188	14082	/
8	715,2	A3	24438	82,4	352	14848	/
9	717,5	A3	30757	104,3	495	15105	16435
10	669,8	A3	18389	61,8	266	14779	16097
11	696,3	A3	16162	54,8	234	13568	15364
12	701,7	A3	15602	52,9	226	13319	14783
13	688,6	A3	21365	73,1	308	13378	14363
14	699,1	A3	18682	62,8	270	14321	15348
15	741,9	A3	19687	66,6	284	14458	15296
16	652,6	A3	10731	36,4	156	12180	15272
17	688,4	A3	16506	55,5	238	13857	16076
18	748,6	A3	16573	56,2	242	13354	14312
19	689,6	A3	16391	55,3	237	13787	15534
20	695,3	A3	19549	65,8	282	13338	14570
21	716,9	A3	16025	54,2	232	13349	14467
22	691,0	A3	20577	69,3	297	14360	14893
23	668,7	A3	13785	46,7	200	11649	13290
24	703,9	A3	18594	62,8	269	12727	12054
25	700,5	A3	13053	43,8	189	12645	14364
26	705,4	A3	22548	76,5	325	13822	16193
27	723,6	A3	16505	56,1	239	14684	18324
28	705,7	A3	7041	23,8	103	12159	16887
29	681,9	A3	10822	36,6	157	12154	13001
30	690,1	A3	18762	63,4	271	13908	12915
31	723,2	A3	24841	83,8	358	15095	14910
32	702,3	A3	15843	53,6	229	11968	11771
Moyenne			17467	59,1		13688	15774
Max			30757	104,3		16460	24423
Min			7041	23,8		11649	11771
Ecart type			4814	16,3		1110	2594
Cv %			28%	28%		8%	16%
Fractile				28,8			

6. Tâche 6 : Caractérisation mécanique de sciages représentatifs des coursons et des lames aboutées

Très vite avec le savoir-faire de MANUBOIS autour des tablettes pour agencement intérieur, les discussions se sont portées sur la fabrication d'une lamelle unitaire sus appelée BAP « Bois Aboutés Panneautés » correspondant donc à des lamelles aboutés et panneautés en vue de la réalisation des poutres BLC en hêtre. Ces lamelles unitaire BAP ont été fabriquées à partir de hêtre classés en D40 sous forme de lamelles de faible longueur en bois massif multi-aboutées (largeur en multiple de 60 mm ; épaisseur de 40 mm). Le schéma suivant illustre le principe de fabrication des BAP.

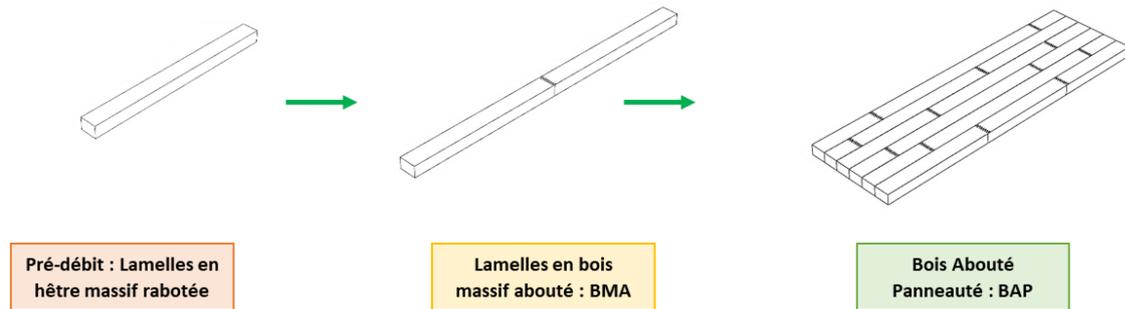


Figure 28: Fabrication d'une lamelle unitaire BAP hêtre chez Manubois en vue des essais de flexion.

Les premiers tests d'orientation ont permis de constater une meilleure tenue des aboutages en flexion de par le calepinage des aboutages à la fois sur la longueur et sur la largeur comme le montre la figure suivante. La décohésion ou la faiblesse d'un aboutage est repris par la section de travail résiduelle.

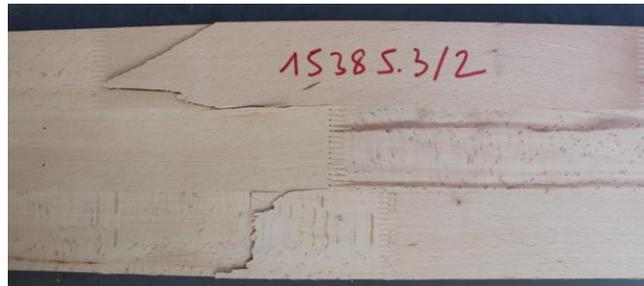
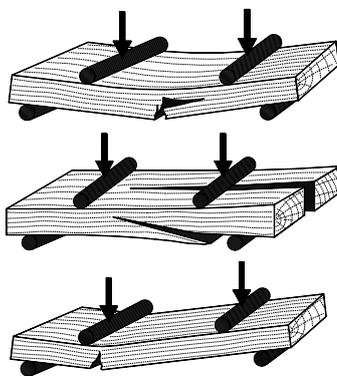


Figure 29: test de flexion des lamelles BAP hêtre

Sur la base d'un échantillonnage nécessaire à l'établissement de valeurs de référence pour la future certification, les essais ont été réalisés selon la norme NF EN 14080 d'août 2013 – Annexe E : Essais de flexion 4 points des lamelles avec ou sans aboutages à entures multiples. La méthodologie expérimentale reprend la procédure expliquée au paragraphe 5.1 Bois aboutés - Essai de flexion à plat. Seul diffère la cotation des facies de rupture qui est expliqué comme suit :



T : Rupture en flexion par traction

F : Rupture dans le fil du bois

B1 : Bois présence nœud

B2 : Bois présence pente de fil

B3 : Bois présence autre singularité

Figure 30 : Modes de rupture BAP en flexion à plat

Tableau 12: résultats des tests d'aboutage en flexion des BAP à plat.

N°ép.	Référence	MV (kg/m ³)	Mode de rupture	F _{max} (N)	f _m (MPa)	Temps de rupture (s)
1	63 - 41 x 240 mm	687	T	43417	81,2	181
2	63 - 41 x 240 mm	679	T	42870	80,5	205
3	63 - 41 x 240 mm	703	T	48065	90,4	218
4	63 - 41 x 240 mm	677	T	39339	73,0	188
5	66 - 40 x 240 mm	723	F	42557	81,4	188
6	66 - 40 x 240 mm	746	F	42692	81,2	182
7	66 - 40 x 240 mm	712	T	46946	89,3	147
8	66 - 40 x 240 mm	751	T	45033	85,5	196
9	99 - 40 x 240 mm	704	T	47488	87,8	173
10	99 - 40 x 240 mm	699	T	46712	86,7	183
11	99 - 40 x 240 mm	688	T	45219	83,5	184
12	103 - 40 x 240 mm	696	T	41016	76,9	196
13	103 - 40 x 240 mm	693	T	40858	76,4	141
14	103 - 40 x 240 mm	704	T	49715	92,9	186
15	103 - 40 x 240 mm	685	T	48301	89,8	203
16	103 - 40 x 240 mm	697	T	47381	88,4	193
17	230 - 40 x 300 mm	776	F	49720	74,4	226
18	230 - 40 x 300 mm	705	T	52676	78,0	196
19	230 - 40 x 300 mm	717	T	56311	84,9	182
20	268 - 40 x 360 mm	703	F	55055	68,1	214
MOYENNE				46569	78,4	
MAX				56311	92,9	
MIN				39339	0,0	
ECART TYPE				4620	19,6	
CV %				10%	25%	
Fractile par dénombrement					64.7	

7. Tâche 7 : Performances des poutres BLC - exigences de la norme NF EN 14080

7.1 Test de flexion

7.1.1 Fabrication des poutres BLC Plus Hêtre

Au fur et à mesure de la maîtrise des équipements et du process par Manubois pour la réalisation de poutres BLC hêtre, plusieurs lots de poutres BLC ont été envoyés au FCBA Bordeaux pour des tests de flexion en grandeur d'emploi. Ces poutres ont été fabriquées à partir de hêtre classés D40 sous forme de lamelles de faible longueur en bois aboutées puis panneautés en multiple de 40*60 mm² de section sur 8 m de long. Le schéma suivant illustre le principe de fabrication des poutres.

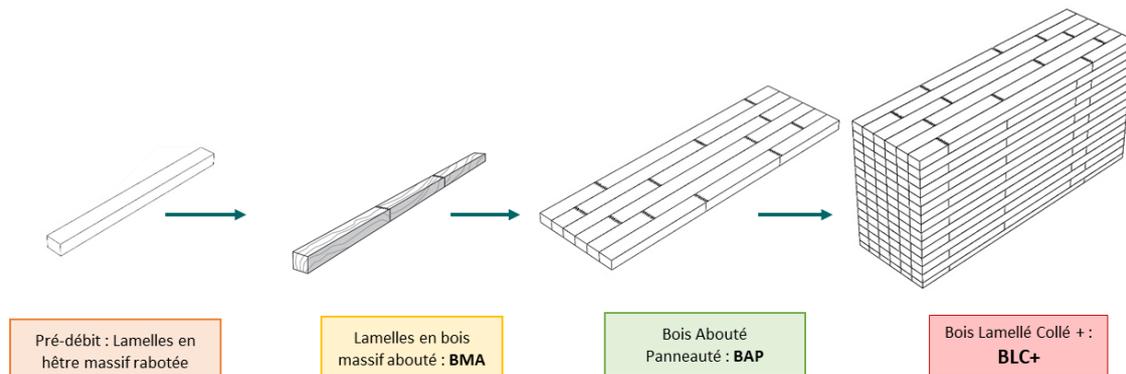


Figure 31: Fabrication d'une poutre BLC hêtre «PLUS» chez Manubois en vue des essais de flexion.

Les dimensions des poutres sont variables selon la future gamme de produits :

- Section nominale allant de 280*240 mm² à 400*240 mm²
- Longueur 7.7 à 8 m (limite du process de fabrication MANUBOIS).

7.1.2 Test de flexion poutres BLC Plus Hêtre

Chaque poutre BLC a été positionnée sur le bâti de façon à suivre une flexion 4 points dite « circulaire » de par la position des appuis (18 fois la hauteur fléchie) et des vérins de chargement (6 fois la hauteur fléchie) selon la norme EN 408.

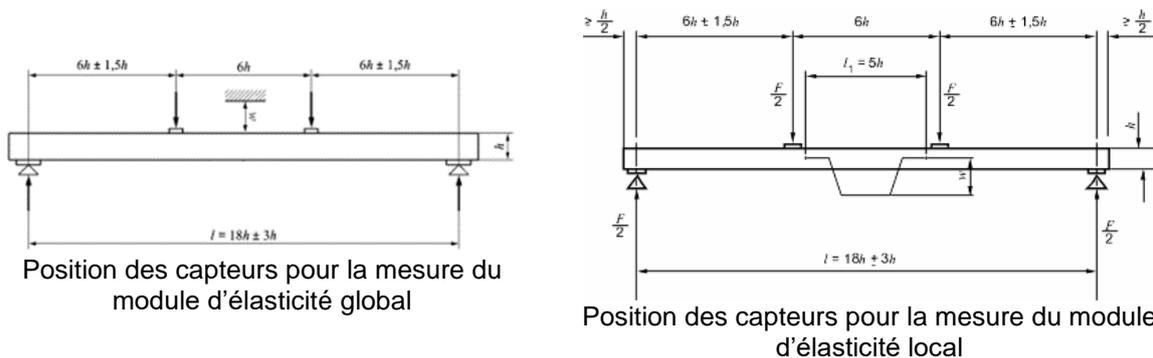


Figure 32 : description du test de flexion avec en a) mesure du module d'élasticité global en b) mesure du module d'élasticité local

La lamelle tendue située en partie basse de la poutre a été sélectionnée aléatoirement, la position des aboutages (point faible des poutres) a été identifiée sur la partie centrale des éprouvettes et sur les lamelles les plus mécaniquement sollicitées.

Les essais sont réalisés sur deux machines d'essais hydrauliques verticales pilotées et asservies informatiquement, d'une capacité nominale de 25 000 et 50 000 daN. Ces machines sont de classe 1, c'est à dire que la force est mesurée avec une précision de 1 % sur la mesure.

Les déplacements sont mesurés à l'aide de trois capteurs de déplacement de type LVDT qui sont sélectionnés et contrôlés pour obtenir une précision de 1% sur la mesure.

Au cours de chaque essai, la force appliquée, le temps et les glissements des trois capteurs LVDT sont enregistrés.

Pour chaque essai, les résultats expérimentaux sont exprimés de la façon suivante:

- Charge maximale (N) F_{\max}
- Masse (kg) de la poutre m
- Masse volumique (kg/m³) MV
- Humidité (%) de la poutre lors de l'essai H
- Longueur (mm) de la poutre L
- Largeur (mm) de la poutre b
- Hauteur (mm) de la poutre h_e
- Hauteur nominale (mm) h_n

La résistance à la flexion est calculée à l'aide de la formule suivante :

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

Avec $a = 6 h_n$

$$W = \frac{b h_e^2}{6}$$

Si la hauteur du bois lamellé-collé est inférieure à 600 mm, la résistance à la flexion parallèle au fil $f_{m,g}$ pour le bois lamellé-collé déterminée par des essais, doit être multipliée par k_h .

$$k_h = \max \left\{ \left(\frac{h}{600} \right)^{0.1} \right. \\ \left. 0.9 \right.$$

Le module local d'élasticité est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$E_{m,l} = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)}$$

Avec $a = 6 h_n$

$l_1 = 5 h_n$

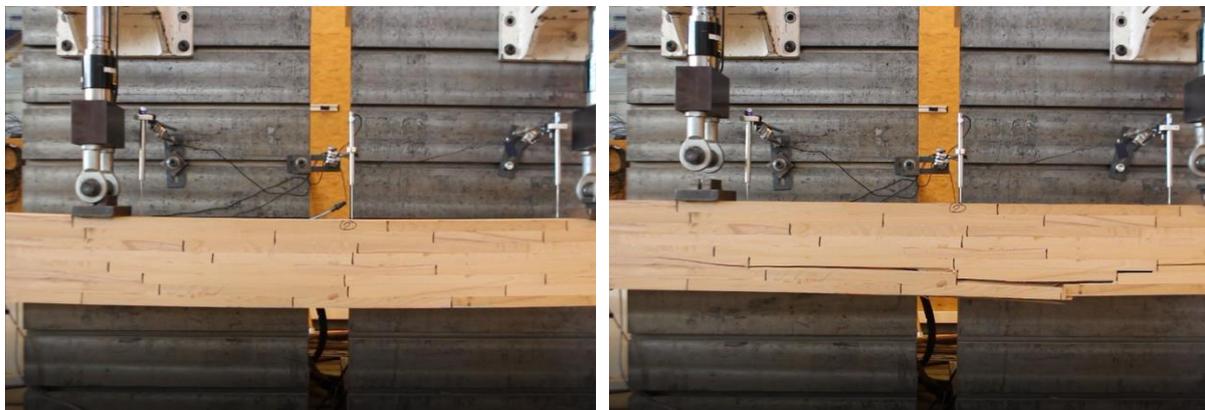
$$I = \frac{b h_e^3}{12}$$

Le module global d'élasticité est calculé à l'aide de la formule suivante :

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

Avec $a = 6 h_n$

$l = 18 h_n$



Avant rupture

Après rupture

Figure 33: Exemple d'une poutre BLC Plus hêtre sollicitée en flexion

L'analyse des faciès de rupture montre que la ligne des fissures suit la position des aboutages, de ce fait, les performances mécaniques sont « amoindries » de par une trop grande concentration d'aboutage à une position donnée.

La figure suivante illustre quelques courbes de la contrainte en flexion en fonction du déplacement central pour deux types de poutres testées. Les décrochements (saut de courbe) proviennent certainement des ruptures d'aboutage.

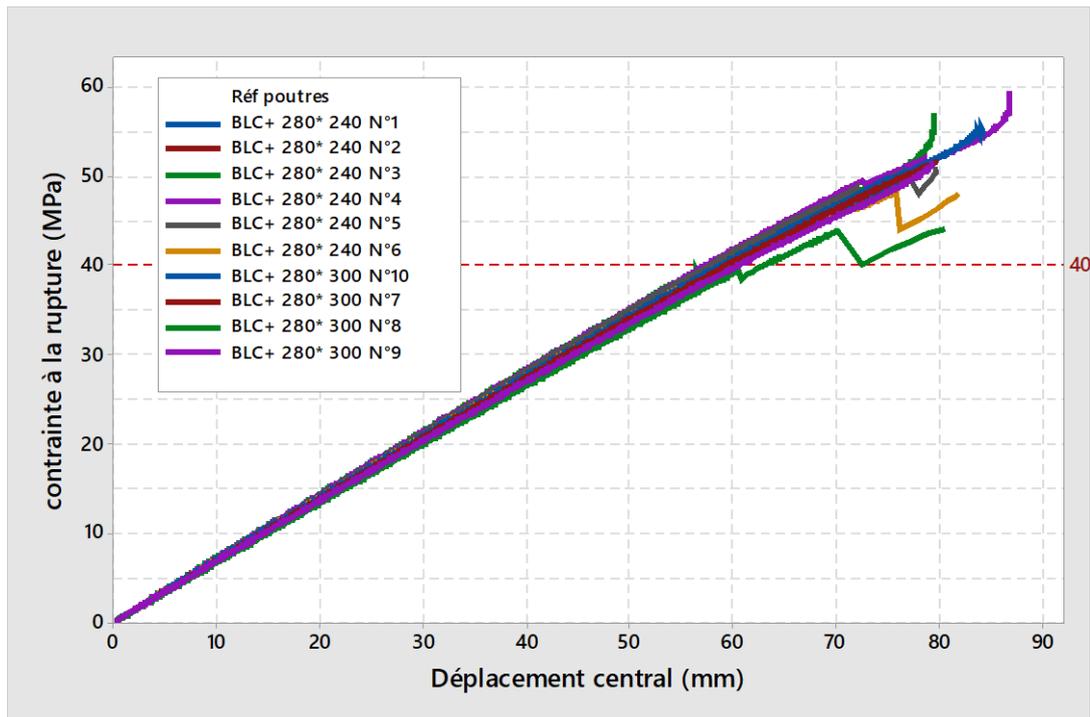


Figure 34 : courbe "contrainte - déplacement central" des 10^{èmes} poutres BLC Plus hêtre testées en flexion

7.1.3 Analyse des tests de flexion sur les poutres BLC Plus Hêtre

Le tableau suivant rassemble les données physico-mécaniques obtenu par section des poutres testées. L'annexe 1 rassemble les données sachant que le numéro incrémental reprend les numéros « usine » de Manubois pour un recalage de données entre le process et les performances mécanique finales. Le calcul des fractiles est également indiqué.

Tableau 13 : résultats physico-mécaniques des essais des poutres BLC « PLUS » en hêtre par section

Section mm ²	Nombre de poutres	Module d'élasticité		Contrainte en flexion		Masse volumique	
		Moyenne (MPa)	CV%	Moyenne (MPa)	CV%	Moyenne (kg/m ³)	CV%
280*240	10	17112	5	49,6	12,2	728	1,6
280*300	6	16334	2	47,2	8,5	708	1,6
280*360	11	16699	2	54,1	8,1	717	1,7
315*240	5	17665	1,8	50,4	10,1	725	1,8
320*360	3	*	*	48,5	3	712	1,2
400*240	13	17060	2	51,7	6,5	731	2,8
	48	16974	4	51,0	9,4	723	2,2

Une analyse des résultats selon le paragraphe 3.2.2 de NF EN 14358 :2016 pour une loi log-normale pour la résistance, corrigée par le coefficient k_h , et normale pour le module et la masse volumique donne les résultats présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 14 : Analyse des résultats des essais des poutres BLC « PLUS » en hêtre

Classe de résistance des 48 Poutres BLC Plus Hêtre	
$f_{m,g,k}$ (MPa)	43,0
$E_{m,0,g,moyen}$ (MPa)	16970
$E_{m,0,g,k}$ (MPa)	15880
$\rho_{g,moyen}$ (kg/m ³)	723
$\rho_{g,k}$ (kg/m ³)	693

Raisonnement, on pourrait classer le lot en classe de résistance GLD40h sur la base des résultats expérimentaux.

7.1.4 Fabrication des poutres BLC Hêtre

Un lot de 17 poutres BLC « classique » en hêtre a été envoyé au FCBA Bordeaux pour des tests de flexion en grandeur d'emploi. Ces poutres ont été fabriquées à partir de hêtre classés en D40 sous forme de lamelles de faible longueur en bois massif multi-aboutées de 130 * 40 mm² de section sur 8 m de long. Le schéma suivant illustre le principe de fabrication des poutres. Il n'y a pas dans ce cas de figure du panneautage de lamelles, d'où la dénomination « classique ».

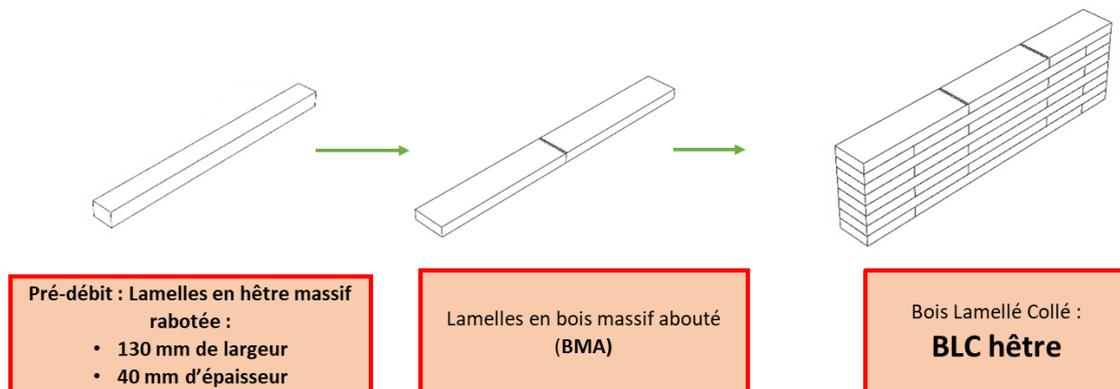


Figure 35: Fabrication d'une poutre BLC hêtre « classique » chez Manubois en vue des essais de flexion.

Les dimensions des poutres sont :

- Section nominale 400*130 mm²
- Longueur 7.7 m (limite du process de fabrication MANUBOIS).

7.1.5 Test de flexion sur les poutres BLC Hêtre classique

Chaque poutre BLC a été positionnée sur le bâti de façon à suivre une flexion 4 points dite « circulaire » de par la position des appuis (18 fois la hauteur fléchie - 7200 mm) et des vérins de chargement (6 fois la hauteur fléchie) selon la norme EN 408 (cf. Figure 32).

La lamelle tendue située en partie basse de la poutre a été sélectionnée aléatoirement, la position des aboutages (point faible des poutres) a été identifiée sur la partie centrale des éprouvettes et sur les lamelles les plus mécaniquement sollicitées.

Les essais sont réalisés sur deux machines d'essais hydrauliques verticales pilotées et asservies informatiquement, d'une capacité nominale de 25 000 et 50 000 daN. Ces machines sont de classe 1, c'est à dire que la force est mesurée avec une précision de 1 % sur la mesure.

Les déplacements sont mesurés à l'aide de trois capteurs de déplacement de type LVDT qui sont sélectionnés et contrôlés pour obtenir une précision de 1% sur la mesure.

Au cours de chaque essai, la force appliquée, le temps et les glissements des trois capteurs LVDT sont enregistrés.

Pour chaque essai, les résultats expérimentaux sont exprimés de la façon suivante:

- | | |
|---|------------|
| • Charge maximale (N) | F_{\max} |
| • Masse (kg) de la poutre | m |
| • Masse volumique (kg/m ³) | MV |
| • Humidité (%) de la poutre lors de l'essai | H |
| • Longueur (mm) de la poutre | L |
| • Largeur (mm) de la poutre | b |
| • Hauteur (mm) de la poutre | h_e |
| • Hauteur nominale (mm) | h_n |

La résistance à la flexion est calculée à l'aide de la formule suivante :

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

Avec $a = 6 h_n$ et

$$W = \frac{b h_e^2}{6}$$

Si la hauteur du bois lamellé-collé est inférieure à 600 mm, la résistance à la flexion parallèle au fil $f_{m,g}$ pour le bois lamellé-collé déterminée par des essais, doit être multipliée par k_h .

$$k_h = \max \left\{ \left(\frac{h}{600} \right)^{0.1} \right. \\ \left. 0.9 \right.$$

Le module local d'élasticité est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$E_{m,l} = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)}$$

Avec $a = 6 h_n$

$$l_1 = 5 h_n$$

$$I = \frac{b h_e^3}{12}$$

Le module global d'élasticité est calculé à l'aide de la formule suivante :

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

Avec $a = 6 h_n$

$$l = 18 h_n$$



Poutre N°6 après rupture



Poutre N°15 après rupture

Figure 36: Exemple de rupture de certaines poutres BLC hêtre « classique » en flexion

La figure suivante illustre les courbes contrainte en flexion en fonction du déplacement central par poutre testée. On constate un point bas obtenu durant le test de la poutre N°5.

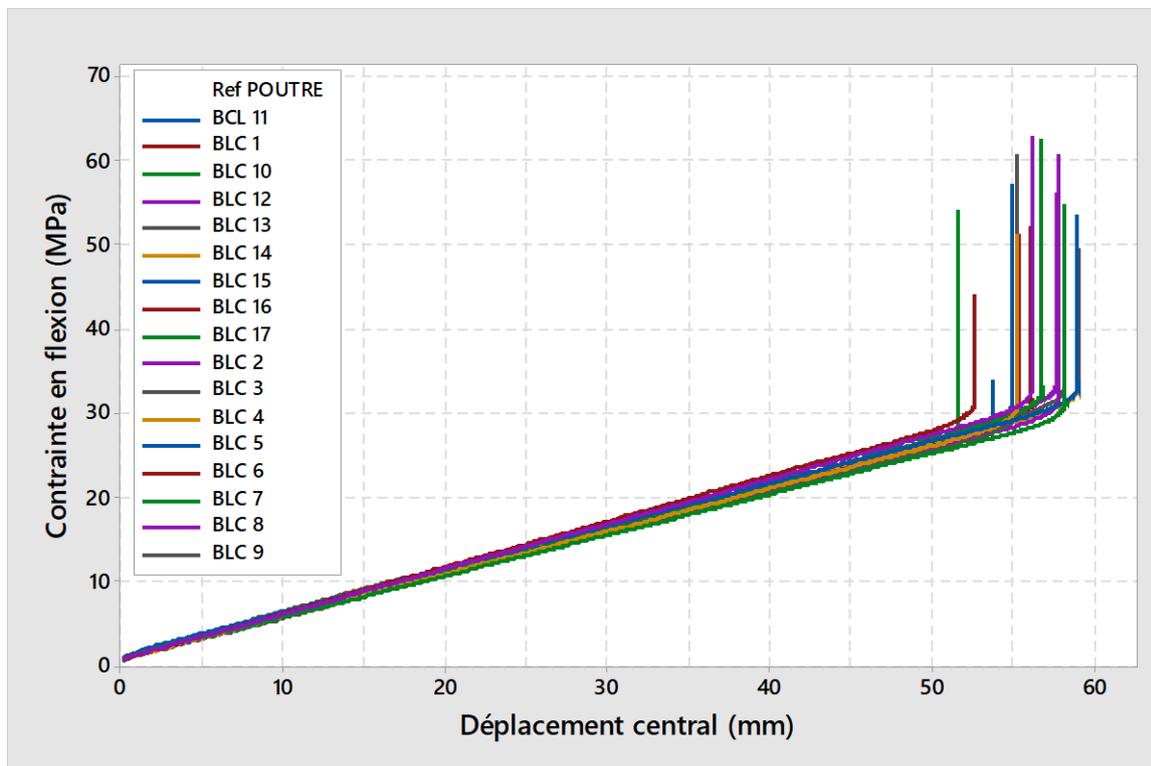
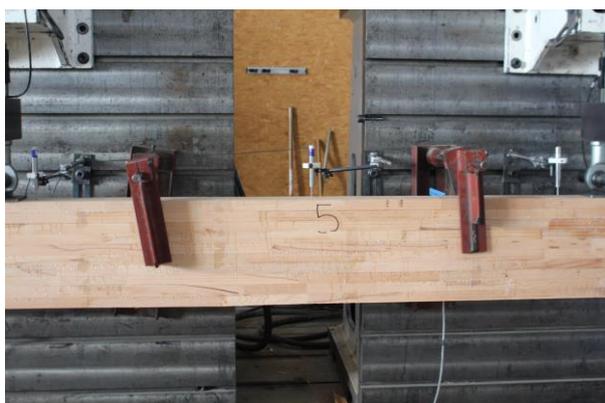


Figure 37 : courbe "contrainte - déplacement central" des 17 poutres BLC "classique" hêtre

La poutre N° 5 présente une faible contrainte (32 MPa). Le temps d'essais est de 179 s alors que la moyenne des temps de rupture du lot est de 300 s. Aucune rupture n'apparaît sur les côtés mais l'aboutage du bas est ouvert, facies « classique » d'un déchaussement de l'aboutage par manque de colle.



pas de fissures apparente après rupture



Déchaussement des dents de l'aboutage dû à un manque de colle en fond d'enture

Figure 38: Facies de rupture de la poutre N°5 BLC hêtre « classique » en flexion

7.1.6 Analyse des tests de flexion sur les poutres BLC Hêtre classique

Le tableau suivant rassemble les données physico-mécaniques obtenu par poutre. Le numéro incrémental reprend les numéros « usine » de Manubois pour un recalage de données entre le processus et les performances mécaniques finales. Le calcul des fractiles est indiqué comme suit.

Tableau 15 : valeurs de résistance des poutres BLC "classique" en hêtre - 130 mm de largeur)

N éprouvette	Humidité méthode résistive	Cause de ruine	$E_{m,12\%}$ (MPa)	$E_{m,12\%}$ (MPa)	$E_{m,EN384 12\%}$ (MPa)	MOR _{h600} (MPa)	MV ₁₂ poutre
21555.4-1	12,9	Aboutage	14096	13402	17502	50,1	717,0
21555.4-2	14,8	Aboutage	15029	15572	18714	60,5	700,5
21555.4-3	13,2	Aboutage	14275	14322	17734	43,3	718,9
21555.4-4	14,1	Aboutage	14139	13721	17557	51,1	715,1
21555.4-5	13,7	Aboutage	14094	13399	17499	32,6	709,2
21555.4-6	12,3	Aboutage	13748	14585	17049	49,3	716,1
21555.4-7	14,1	Aboutage	13928	14557	17283	52,0	703,0
21555.4-8	13,5	Aboutage	14806	15021	18425	53,9	725,1
21555.4-9	13,0	Aboutage	14030	14630	17416	47,6	720,8
21555.4-10	13,1	Aboutage	14589	14930	18143	60,1	721,1
21555.4-11	13,2	Aboutage	14323	15419	17797	55,0	712,8
21555.4-12	12,9	Aboutage	13834	14398	17161	58,3	704,8
21555.4-13	12,1	Aboutage	13686	14475	16969	58,3	723,5
21555.4-14	13,4	Aboutage	14154	14472	17578	49,3	709,1
21555.4-15	13,1	Aboutage	14107	13691	17516	51,5	726,6
21555.4-16	12,2	Aboutage	15098	16030	18804	42,4	734,8
21555.4-17	12,5	Aboutage	13373	13525	16562	52,7	716,0
Nombre échantillon (coef Student = 1.96)						17	
Moyenne			14195	14479	17630	51,1	716
Ecart type			465	770	604	7,1	9
Fractile à 5% selon loi de Student			13283	12970	16445	37,2	698
COV			3%	5%	3%	14%	1%
Fractile à 5% calculé selon EN 14358						37,5	
Valeur minimale				13402		32,6	700

Une analyse des résultats selon le paragraphe 3.2.2 de NF EN 14358 :2016 pour une loi log-normale pour la résistance, corrigée par le coefficient k_h , et normale pour le module et la masse volumique donne les résultats présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 16 : Analyse des résultats des essais des poutres BLC « classique » en hêtre

Classe de résistance des 17 Poutres BLC « classique » en hêtre	
$f_{m,g,k}$ (Mpa)	37.5
$E_{m,0,g,moyen}$ (MPa)	14470
$E_{m,0,g,k}$ (MPa)	12970
$\rho_{g,moyen}$ (kg/m ³)	716
$\rho_{g,k}$ (kg/m ³)	698

Raisonnement, on pourrait classer le lot en classe de résistance GLD36h sur la base des résultats expérimentaux.

7.2 Essais de compression sur poutres BLC+ hêtre

Des contraintes de compression axiale se produisent dans de nombreux éléments des structures porteuses (poteaux, entretoises et membrures des fermes). Dans ces éléments, les propriétés du matériau (la résistance à la compression axiale $f_{c,0}$ et le module d'élasticité à la compression axiale $E_{c,0}$) sont déterminantes pour la conception. La connaissance approfondie de ces deux propriétés des matériaux est donc d'une importance capitale.

Toutefois, peu de chercheurs ont étudié les propriétés mécaniques du bois lamellé-collé de hêtre soumis à une compression axiale. Les études récentes sur des éprouvettes en bois lamellé-collé de hêtre soumises à une compression axiale ont montré que la résistance réelle à la compression est nettement plus élevée que celle obtenue à partir de BLC résineux. On peut citer les informations suivantes :

- Bien que le bois de hêtre de faible qualité ait été utilisé intentionnellement par Westermayr (2018), la valeur de résistance à la compression la plus faible trouvée dans tous les tests était de 49 MPa.
 - Section lamelle et BLC
 - Lamelle 20 mm rabotée
 - BLC 80*80 mm² et 110*80 mm²
 - classe des bois
 - tout venant
 - Colle aboutage et BLC
 - BASF MUF Kauramin 683 + 688
 - Dimensions des aboutages
 - Pas d'aboutage
 - classe GL
 - estimé à GL_h40
 - Valeurs moyennes en compression axiale ($f_{c,0}$ & $E_{c,0}$)
 - 80*80 mm² 60.5 MPa (Cv=10%) ; 13270 MPa (Cv=15%)
 - 110*80 mm² 57.2 MPa (Cv=8 %) ; 13780 MPa (Cv=12%)
- Les travaux réalisés par Ehrhart (2019) durant sa thèse ont également démontré une très bonne performance des poutres en lamellé collé de hêtre réalisée à partir de bois massif triés cette fois ci par machine.
 - Section lamelle et BLC
 - 20 mm raboté
 - BLC 150*150 mm² ; 200*200 mm² ; 280*180 mm²
 - classe des bois (respectivement)
 - T33 ; T42 ; T50
 - Colle aboutage et taille aboutage
 - Non publié dans sa thèse mais faisant état de la publication LEHMANN (2018) qui a travaillé sur 2 colles PUR, 1 colle MUF et 1 colle PRF
 - Colle lamellation
 - HENKEL PUR HBS 709 (180 g/m² et 20g/m² primaire)
 - classe GL_h (respectivement)
 - GL40 - T33 ; GL48 - T42 ; GL55 - T50
 - Valeurs moyennes en compression axiale ($f_{c,0}$ & $E_{c,0}$)
 - GLh40 - T33 ; 60,4 MPa 1 % ; 15100 MPa 3%
 - GLh48 - T42 ; 60.6 MPa 2,3% ; 15700 MPa 3%
 - GLh55 - T50 ; 58.2 MPa 2 % ; 17000 MPa 1 %

Pour sa part, les essais menés au FCBA lors de l'étude nationale de qualification de la ressource autour du volet BLC hêtre en 2016 (Lanvin 2019) convergeaient aussi vers de hautes propriétés de résistance en compression

- Section lamelle et classe des bois
 - 20 mm raboté – D35
- Dimension aboutage
 - Longueur 10 mm
- Colle aboutage & lamellation
 - MUF AKZO Grip Pro Design
- classe GL
 - GL_h32
- Valeurs moyennes en compression
 - Axiale (100*100* l=600 mm³) ; effort appliqué sur la section 100*100 mm²
 - 49.7 MPa 7% ; 14880 MPa 17%
 - Perpendiculaire (100*h=100*l=250 mm³) ; effort appliqué sur h*l
 - 10.0 MPa 13% ; 420 MPa 10%

Sur le marché, les poutres commercialisées sous l'appellation « Fagus » proposent les valeurs de calcul (valeur caractéristique $f_{c,0,k}$) en compression comme suit :

- GLh40 - T33 ; 45 MPa
- GLh48 - T42 ; 50 MPa

Face à une sollicitation en compression, l'avantage performancielle du hêtre en poutre lamellée collée est acquis mais n'est à ce jour pas reconnu au niveau normatif. Pour mémoire, la norme harmonisée EN 14080 décrit les processus à contrôler et donne pour les résineux les classes de résistance GL.

Tableau 17: Propriétés caractéristiques de résistance et de rigidité en N/mm² et masses volumiques en kg/m³ pour le bois lamellé-collé homogène

Propriété	Symbole	Classe de résistance du bois lamellé-collé						
		GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Résistance à la compression	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Module d'élasticité	$E_{0,g,moyen}$	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
	$E_{0,g,05}$	7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
	$E_{90,g,moyen}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Masse volumique	$\rho_{g,k}$	340	370	380	400	420	430	440
	$\rho_{g,moyen}$	370	410	420	450	460	480	500

7.2.1 Description des essais

La norme EN 408 décrit non seulement la dimension des éprouvettes mais aussi la méthodologie expérimentale permettant la détermination des propriétés mécaniques. Deux tests ont été prévus pour qualifier la compression du bois :

- Compression axiale (l'effort exercé est parallèle au fil du bois), c'est une sollicitation principale rencontrée dans le cas d'un poteau. L'effort tend à raccourcir les fibres de bois.

- Compression perpendiculaire (l'effort exercé est perpendiculaire au fil du bois), c'est une sollicitation que l'on retrouve au droit des appuis de poutre, lors d'un solivage par exemple. Cette action tend à provoquer une pénétration dans l'élément bois par un écrasement des fibres.

7.2.2 Compression axiale

Dans un 1^{er} temps, les tests de compression ont été réalisés sur 5 poutres extraites du 1^{er} lot de poutres BLC (section 317 * 240 mm² ; longueur > 1m) qui ont été testées préalablement en flexion. La dimension des éprouvettes suit les recommandations de la norme EN 408. L'éprouvette d'essai doit être de section complète et doit avoir une longueur égale à six fois la plus petite dimension de la section. Les surfaces des extrémités doivent être usinées de façon précise pour s'assurer qu'elles soient planes et parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe de la pièce.

Volontairement, nous avons gardé la section initiale des poutres car le vérin d'application des charges disponible au FCBA monte jusqu'à 100 tonnes. L'idée était de vérifier si le lamellé panneauuté offrait une meilleure résistance.

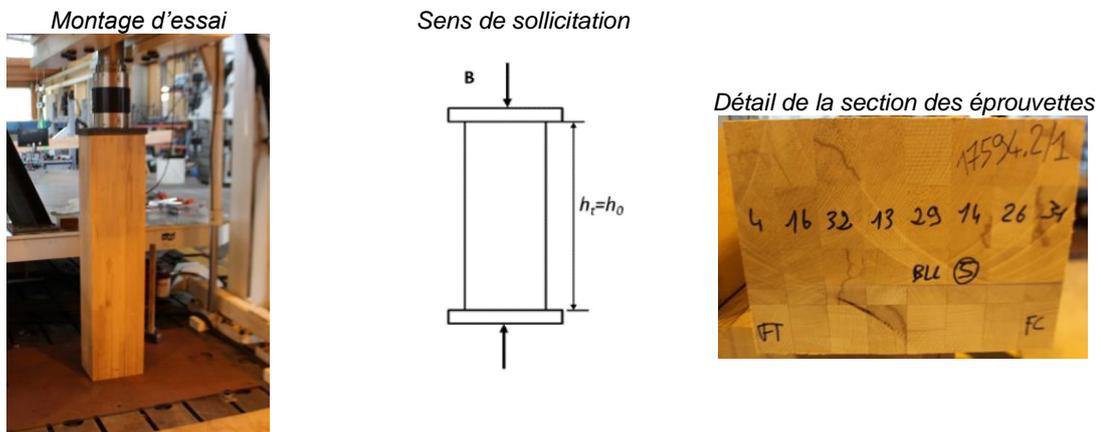
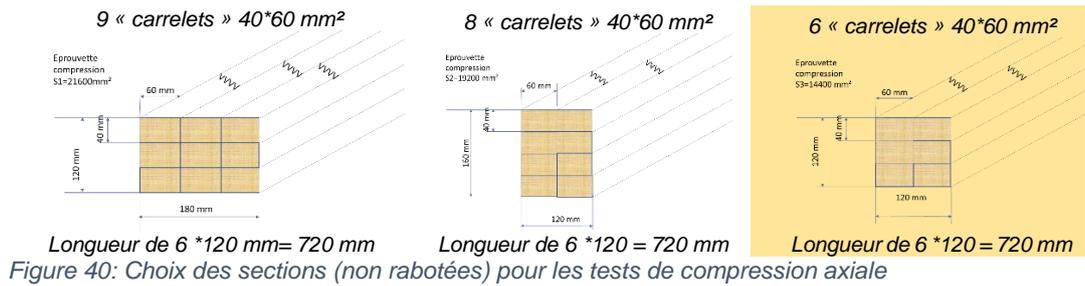


Figure 39 : description des montages d'essais

Le vérin applique la charge en 300 secondes, soit 20 tonnes par minute. Force est de constater qu'à 100 tonnes, les poutres ne cassaient pas, nous n'étions donc pas en capacité de fournir des valeurs caractéristiques.

Deux solutions furent proposées pour résoudre cette difficulté :

- Faire des essais au sein d'un laboratoire disposant d'un vérin de chargement plus important que ceux disponibles au FCBA, un laboratoire espagnol disposant d'un vérin de 500 tonnes fut contacté pour connaître les coûts et délais.
- Réduire la section des éprouvettes d'essais de manière à diminuer la charge à appliquer. Si l'on considère que la contrainte de compression serait de l'ordre de 50 MPa comme évoqué précédemment, la section réduite doit être inférieure à 20000 mm² à 100 tonnes. La figure suivante illustre les possibilités de section car nous souhaitons garder la notion de lamellé – panneauuté des carrelets.



Par sécurité, nous avons gardé la section collée-panneautée à base de 6 carrelets.

Deux capteurs LVDT⁴ ont été positionnés de part et d'autre de l'éprouvette pour mesurer le déplacement moyen. Pour une meilleure acquisition, les capteurs sont positionnés à une précharge de 6 tonnes sur les éprouvettes.

Le chargement (force-déplacement LVDT ou vérin) permet de déterminer le module d'élasticité et la contrainte à la rupture en compression comme évoqué sur la figure suivante.

Le module d'élasticité en compression $E_{c,0}$ est donné par l'équation :

$$E_{c,0} = \frac{l_1 (F_2 - F_1)}{A (w_2 - w_1)}$$

où :

- $F_2 - F_1$ est un accroissement de force, en newtons, sur la partie linéaire de la courbe force/déplacement LVDT
- $w_2 - w_1$ est l'accroissement des écrasements mesurés par les capteurs LVDT correspondant à $F_2 - F_1$, en millimètres
- A aire de la section transversale, en millimètres carrés ;
- l_1 longueur de base pour la détermination du module d'élasticité ou du module de cisaillement, en millimètres ;

⁴ La technologie LVDT (Linear Variable Differential Transformer) utilisée dans les capteurs absolus de déplacement consiste en une disposition cylindrique d'enroulements primaires et secondaires avec un noyau cylindrique séparé qui passe au centre. L'alimentation des enroulements primaires avec un courant alternatif d'amplitude constante à une fréquence de 1 à 10 KHz produit un champ magnétique alternatif dans le centre du capteur qui induit un signal dans les enroulements secondaires lequel varie suivant une relation linéaire avec le déplacement mécanique du noyau. Un des avantages des capteurs LVDT est que le déplacement du noyau s'effectue sans contact garantissant fiabilité et longue vie.

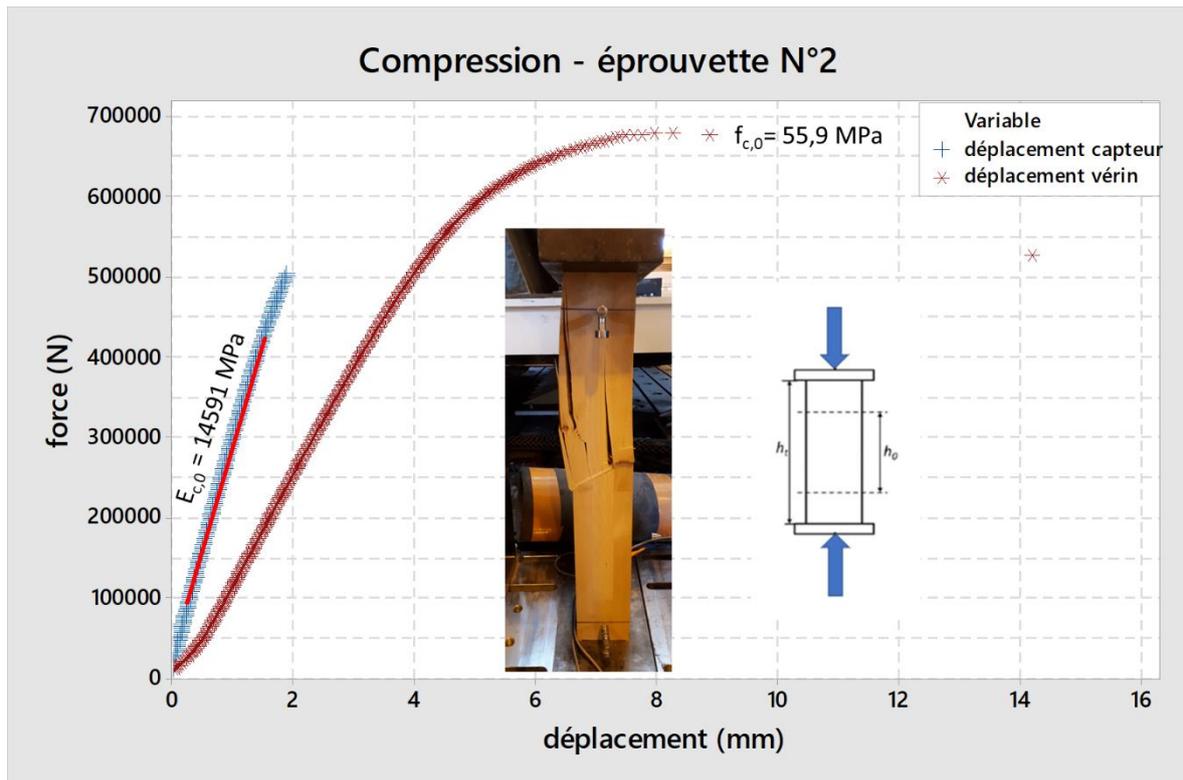


Figure 41 : représentation des courbes Force -déplacement (LVDT et vérin) observée sur l'éprouvette N° 2 (section après rabotage de 110*110 mm² ; longueur = 720 mm) pour le calcul du module d'élasticité ($H_0 = 610$ mm) et de la contrainte à la rupture.

La résistance (calculée avec une précision de 1 %) à la compression $f_{c,0}$ est donnée par l'équation :

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{A}$$

où :

- F_{\max} force maximale, en newtons ;
- A aire de la section transversale, en millimètres carrés ;

La figure suivante illustre les courbes de la contrainte de compression en fonction du déplacement vérin, on peut constater que les courbes dépassent toutes le seuil de 50 MPa avant rupture.

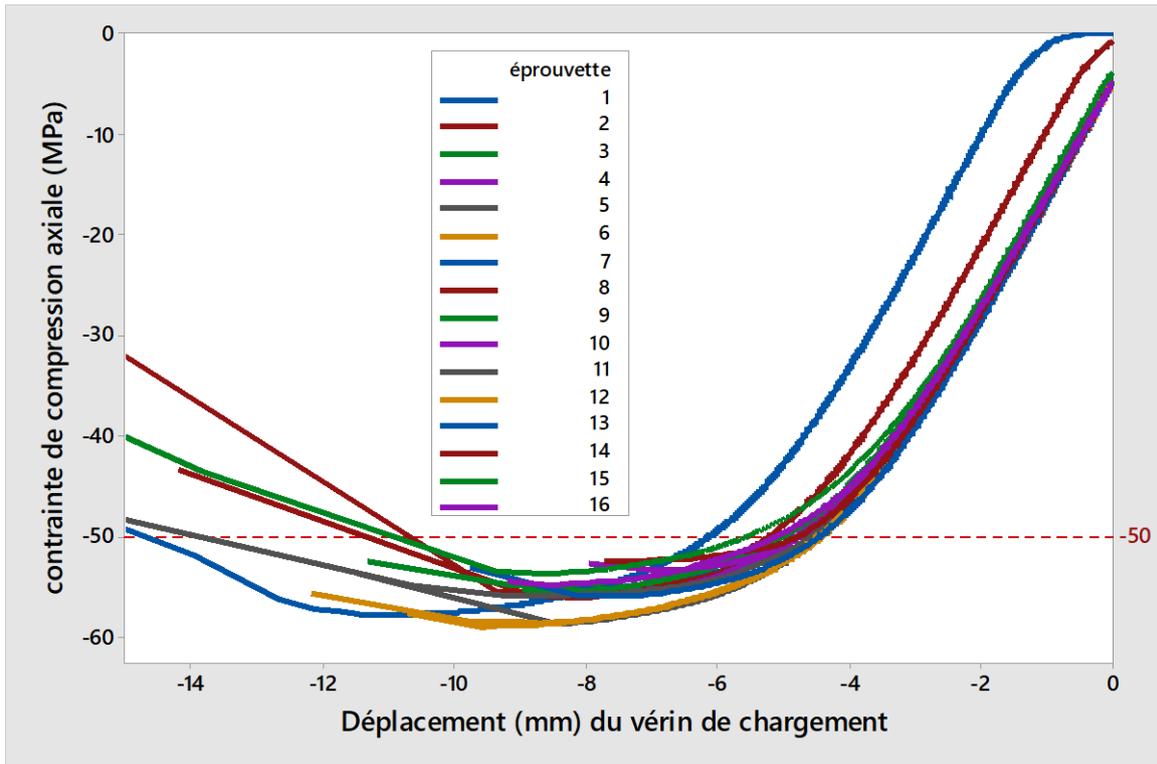


Figure 42 : courbes cumulées de la contrainte de compression axiale - déplacement vérin du lot testé.

Pour chaque éprouvette, le temps pour obtenir la rupture doit être enregistré et sa valeur moyenne notée dans le rapport d'essai. Toute éprouvette individuelle divergeant de plus de 120 s par rapport à la cible de 300 s doit être enregistrée dans le rapport d'essai.

Le mode de rupture (selon la codification de la norme ASTM D143 - 2007) et les caractéristiques de croissance au niveau de la section de rupture de chaque éprouvette d'essai ont été enregistrés dans le rapport d'essai (cf. annexe 1).

Exemple de facies B
(éprouvette 10)



A		<i>Crushing</i> This term shall be used when the plane of rupture is approximately horizontal.	Écrasement
B		<i>Wedge Split</i> The direction of the split, that is whether radial or tangential, shall be noted.	Fendage en coin
C		<i>Shearing</i> This term shall be used when the plane rupture makes an angle of more than 45 deg with the top of the specimen.	Cisaillement
D		<i>Splitting</i> This type of failure usually occurs in specimens having internal defects prior to test and shall be the basis for culling the specimen.	Fendage
E		<i>Compression and Shearing Parallel to Grain</i> This failure usually occurs in cross-grained pieces and shall be the basis for culling the specimen.	Écrasement et fendage
F		<i>Brooming or End-Rolling</i> This type of failure is usually associated with either an excess moisture content at the ends of the specimen, improper cutting of the specimen, or both. This is not an acceptable type of failure and usually is associated with a reduced load. Consideration should be given to remedial conditions when this type of failure is observed.	Flambement cellulaire

Figure 43 : facies de rupture de l'éprouvette N°10 et codification des facies de rupture selon ASTM D143 (2007)

7.2.3 Compression perpendiculaire

Les tests de compression perpendiculaire suivent la méthodologie de la norme EN 408 (2013) pour la dimension des éprouvettes et le traitement des courbes force – déplacement.

- Les surfaces chargées doivent être préparées avec soin de façon à ce qu'elles soient planes, parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette d'essai. Cette préparation doit être effectuée après conditionnement.

Caractéristiques de l'éprouvette						
Bois de structure			Bois lamellé collé			
b (mm)	h (mm)	ℓ (mm)	Volume	b × ℓ (mm ²)	b minimum (mm)	h (mm)
Compression						
45	90	70	—	25 000	100	200
Les symboles sont tels que donnés à l'article 4.						
L'écart admissible des dimensions b, h et ℓ de l'éprouvette d'essai doit être de 1 %.						

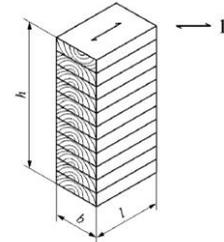


Figure 44 : définition de la géométrie des éprouvettes testées en compression perpendiculaire selon EN 408

Principalement dédié à la caractérisation des résineux, la dimension des éprouvettes reste inadaptée face à un lamellé collé ou les joints de colle sont à la fois parallèle et perpendiculaire à la sollicitation.

C'est pourquoi, nous avons réalisé deux types de test sur nos éprouvettes

- Test de compression perpendiculaire sur des éprouvettes (2 exemplaires non conformes)
 - B = 110 mm ; L = 300 mm ; (b*ℓ= 33000 mm²) ; H = 110 mm
- Test de compression perpendiculaire sur des éprouvettes (3 exemplaires non conformes)
 - B = 110 mm ; L = 200 mm (b*ℓ= 22000 mm²) ; H = 110 mm
- Test de compression perpendiculaire sur des éprouvettes EN 408 (15 exemplaires conformes)
 - B = 119 mm ; L = 221 mm ; (b*ℓ= 26300 mm²) ; H = 200 mm

La force F doit être appliquée à vitesse constante de déplacement de la tête de chargement pendant tout l'essai. Cette vitesse de chargement doit être ajustée de telle façon que la charge maximale $F_{c,90,max}$ soit atteinte en (300 +/- 120 s).

Le module d'élasticité $E_{c,90}$ doit être calculé à partir de l'équation :

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

où :

- $F_{40} - F_{10}$ est un accroissement de force sur la partie linéaire de la courbe force/déplacement, en newtons. F_{10} doit être 10 % et F_{40} doit être 40 % de $F_{c,90,max}$ est ;
- $w_{40} - w_{10}$ est l'accroissement de l'écrasement correspondant à $F_{40} - F_{10}$ en millimètres.
- h_0 longueur de base, en millimètres
- b largeur de la section transversale dans un essai de flexion, ou la plus petite dimension de la section transversale, en millimètres ;
- ℓ longueur de base pour la détermination du module d'élasticité ou du module de cisaillement en millimètres ;

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

La détermination de $F_{c,90,max}$ est effectuée en utilisant le procédé itératif suivant :

- Estimer une valeur pour la charge $F_{c,90,max}$. En utilisant les résultats d'essai, tracer la courbe force/flèche selon la forme représentée à la Figure 45. Calculer $0,1 \cdot F_{c,90,max}$ et $0,4 \cdot F_{c,90,max}$ et déterminer où ces deux valeurs interceptent la courbe force/déplacement.
- Tracer la ligne droite 1 passant par ces deux points, comme représenté à la Figure 45.
- Tracer la ligne 2 ayant son origine en $F = 0$ parallèlement à la ligne 1 et à une distance de celle-ci équivalente à un déplacement de $0,01 h_0$, tel que représenté à la Figure 45.

L'intersection de la droite 2 avec la courbe des résultats d'essai est $F_{c,90,max}$. Si la valeur de $F_{c,90,max}$, telle que déterminée, se trouve dans un intervalle de 5 % de $F_{c,90,max,estimé}$, cette valeur peut alors être utilisée pour déterminer la résistance à la compression ; sinon, répéter la procédure jusqu'à ce qu'une valeur de $F_{c,90,max}$ soit obtenue dans cet intervalle. La figure suivante montre le protocole.

La résistance à la compression $f_{c,90}$ doit être déterminée à partir de l'équation :

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

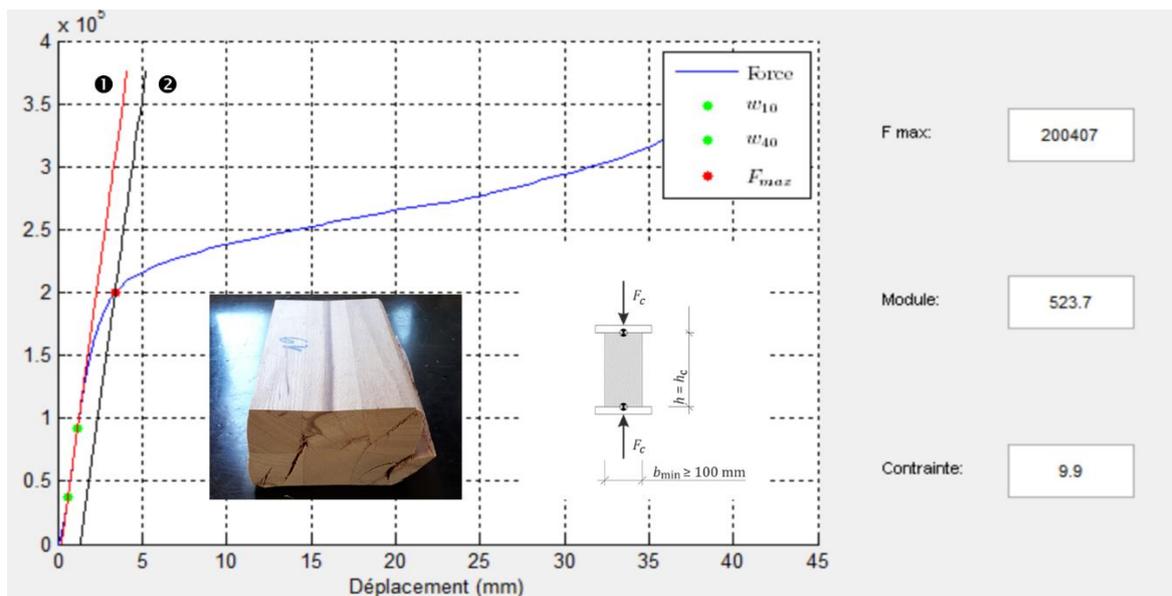


Figure 45 : Détermination de la contrainte de compression perpendiculaire selon la norme EN 408 (éprouvette N°19 – éprouvette non conforme).

On constate facilement que la contrainte ultime de compression exercée de façon transverse au fil du bois est loin de la contrainte $f_{c,90,max}$. Les sections diverses et variées ne semblent pas être un facteur d'influence expliquant les valeurs de contrainte. La figure suivante illustre la variation des propriétés mécaniques selon le type d'éprouvette.

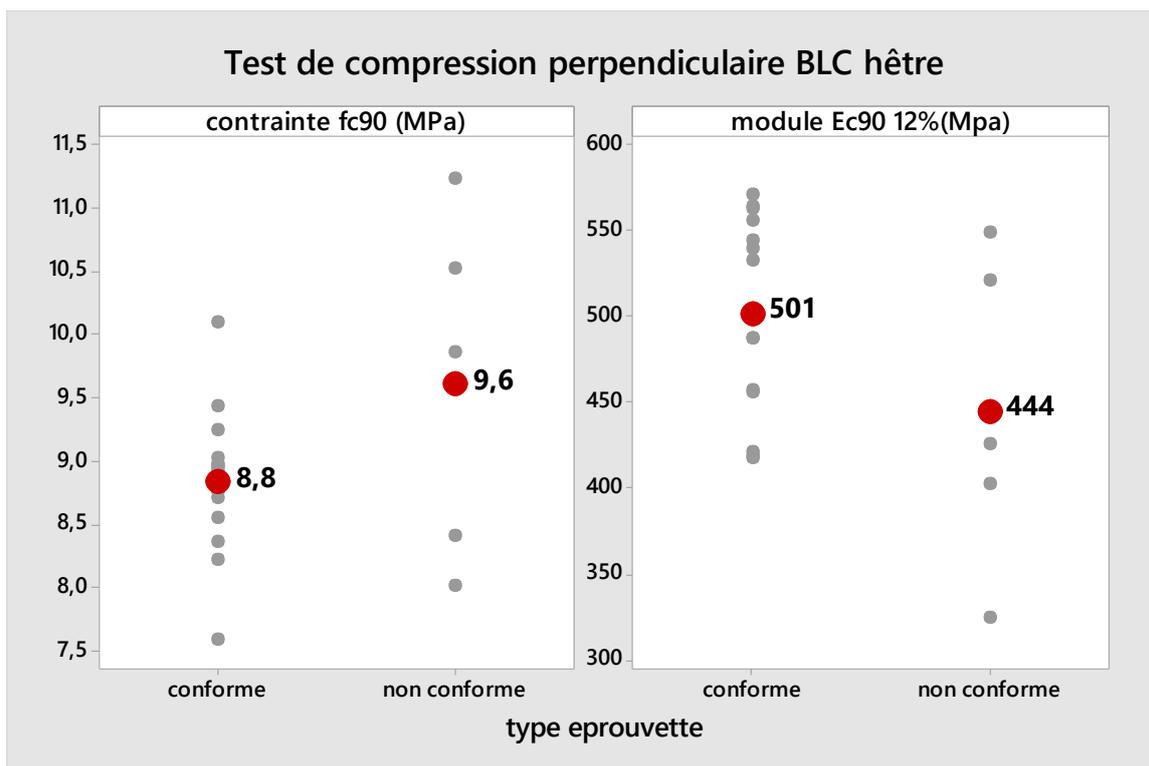


Figure 46 : Impact du design des éprouvettes sur les propriétés de compression perpendiculaire.

L'utilisation des éprouvettes conformes à la norme EN 408 montre une sensibilité au type de débit des éprouvettes sous l'effort. Les cas les plus critiques ont été rencontrés pour les débits en quartier.

7.2.4 Essais de compression - conclusions

En parallèle des tests de flexion, une campagne d'essais de compression a été menée sur des morceaux des poutres de flexion de manière à enrichir la base de données BLC feuillus selon la norme EN 408. Deux types de tests de compression ont été mis en œuvre :

- axiale (bloc de 720 mm de longueur)
- perpendiculaire (bloc de 220 mm de longueur)

Les performances de compression sont indiquées dans les tableaux suivants.

Tableau 18: Test de compression axiale (16 éprouvettes)

performances déclarées	Valeur mesurée moyenne	Valeur mesurée minimale	Coef de variation	valeur caractéristique $k_s=1.98$
Contrainte de compression $f_{c,0}$ (MPa)	55.7	52.3	3.4%	51.9
Module élasticité $E_{c,0}$ (MPa) 12%MC	14670	12030	14%	12200
Masse volumique	729	698	3.2%	683
Condition validée pour MANUBOIS (bois massif D45 - classe GL40 _h)				

Tableau 19: Test de compression perpendiculaire (15 éprouvettes)

performances déclarées	Valeur mesurée moyenne	Valeur mesurée minimale	Coef de variation	valeur caractéristique $k_s=1.98$
Contrainte de compression $f_{c,90}$ (MPa)	8.8	7.6	10%	7.1
Module élasticité $E_{c,90}$ (MPa) 12%MC	501	417	11%	388
Masse volumique	714	672	3%	673
Condition validée pour MANUBOIS (bois massif D45 - classe GL40h)				

Un des avantages des poutres BLC à partir de feuillus est de présenter des contraintes de compression (axiale et perpendiculaire) environ au double des performances normatives tabulées des poutres résineux. Le graphe suivant présente donc cette spécificité par classe de résistance GL via les données provenant de la littérature et de la norme EN 384 qui propose une relation entre contrainte de flexion et contrainte de compression. Cette relation est la même pour résineux et feuillus.

$$f_{c,0,k} = 4,3 * (f_{m,k})^{0,5}$$

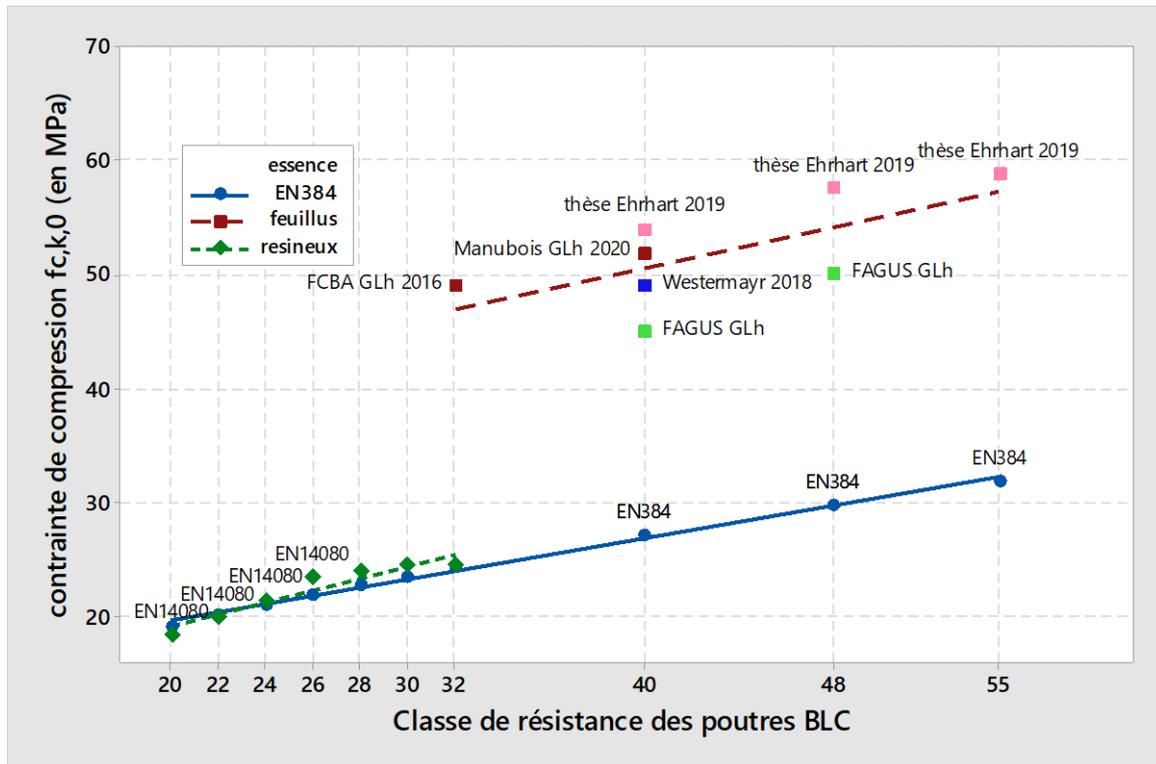


Figure 47 : comparaison de la contrainte de compression axiale versus les différentes études

Le rapport $f_{c,0,k} / E_{c,0,05}$ requis pour la conception des colonnes selon la méthode des longueurs équivalentes conformément à l'Eurocode 5 est considéré comme sensiblement plus élevé que celui du bois lamellé collé en bois résineux. Il s'élève à environ 1/220 (0,45%).

Les résultats de compression perpendiculaire sont similaire aux travaux de thèse de Hübner en 2013 obtenus sur BLC hêtre (valeur moyenne =9.6 MPa).

8. Tâche 8 : établissement de la relation entre les performances des lames, des aboutages et des poutres BLC

La société MANUBOIS souhaite commercialiser du lamellé-collé à usage structural à partir de lamelles en hêtre dont la fabrication s'appuie dans une certaine mesure sur les préconisations de la norme EN 14080 (2013). D'une part, le hêtre n'est pas couvert par cette norme et d'autre part, le produit comportant des lamelles en bois aboutés - panneautées.

Il est donc nécessaire de disposer d'un document qui précise les performances mécaniques du produit et les adaptations nécessaires par rapport à la norme pour le produit considéré afin de constituer un référentiel complet. C'est le rôle du dossier technique.

Sous réserve que :

- Les contrôles de production démontrent que chacune des trois exigences que sont : la classe de résistance des lamelles, la valeur minimale de résistance à la flexion des aboutages dans les lamelles unitaires et la valeur minimale de résistance à la flexion des lamelles panneautées satisfassent aux exigences du tableau suivant

Tableau 20 : Classe de résistance des lamelles, valeur minimale de résistance à la flexion des aboutages dans les lamelles unitaires et des lamelles panneautées pour la classe de résistance du bois lamellé-collé à lamelles panneautées en hêtre GLD40h

Classe de résistance des lamelles (selon critères de tri spécifiques MANUBOIS)			Valeur minimale de résistance à la flexion des aboutages dans les lamelles unitaires		Valeur minimale de résistance à la flexion des lamelles panneautées
$f_{m,j,k,dc}$ (Mpa)	$E_{m,g,0,mean,dc}$ (MPa)	$\rho_{k,dc}$ (kg/m ³)	$f_{m,j,k,dc,avec PF}$ (MPa) Avec Pente de Fil	$f_{m,j,k,dc,sans PF}$ (MPa) Sans Pente de Fil	$f_{m,lp,k,dc}$ (MPa)
64	13409	635	63	74	70

- Que les essais de délamination réalisés dans le cadre des contrôles de production démontrent que la résistance du collage est conforme aux exigences de NF EN 14080 ;

Alors, le bois lamellé-collé à lamelles panneautées en hêtre peut se prévaloir de la classe de résistance définie dans le tableau 13 du présent document.

- Classe de résistance du bois lamellé-collé à lamelles panneautées en hêtre
- Classe de résistance des lamelles (selon critères de tri spécifiques MANUBOIS)
- Valeur minimale de résistance à la flexion des aboutages dans les lamelles unitaires
- Valeur minimale de résistance à la flexion des lamelles panneautées

Pour la différencier de celles des résineux définies dans NF EN 14080 :2013 et de celles définies dans le projet de norme lamellé-collé feuillus dont nous disposons à ce jour, la classe de résistance du lamellé-collé à lamelles panneautées en hêtre objet du présent rapport est dénommée GLD40h sur la base des résultats obtenus.

Tableau 21 : Propriétés caractéristiques de résistance et de rigidité en N/mm² et de masse volumique en kg/m³ du bois lamellé-collé à lamelles panneautées en hêtre

Propriété	Symbole	Classe de résistance du bois lamellé-collé à lamelles panneautées en hêtre
		GLD40h
Résistance à la flexion (N/mm ²)	$f_{m,g,k}^{(1)}$	40,0
Résistance à la traction (N/mm ²)	$f_{t,0,k}^{(1)}$	30,0
	$f_{t,90,k}^{(2)}$	0,5
Résistance à la compression (N/mm ²)	$f_{c,0,k}^{(1)}$	50,0
	$f_{c,90,k}^{(1)}$	7,0
Module d'élasticité local (N/mm ²)	$E_{0,g,moyen}^{(1)}$	14800
	$E_{0,g,05}^{(1)}$	12700
Module de cisaillement (N/mm ²)	$G_{g,moyen}^{(2)}$	650
Masse volumique (kg/m ³)	$\rho_{g,k}^{(1)}$	650
	$\rho_{g,moyen}^{(1)}$	720

(1) Valeur issue de résultats d'essais.
 (2) Valeur issue du tableau 5 de NF EN 14080 :2013 en l'absence de résultats d'essais spécifiques.

Le suivi de la production doit être effectué dans le cadre des procédures internes d'autocontrôle et doit faire l'objet d'un contrôle externe au moins deux fois par an selon le volume produit par un organisme reconnu compétent

9. Tâche 9 : Validation des bois aboutés en ligne par CND

L'utilisation des bois massifs de courte longueur permet de valoriser une ressource au sein d'une entreprise pour fabriquer du lamellé-collé mais la qualification des lamelles unitaires par la résistance reste problématique. Les machines de classement par méthode vibratoire peuvent être difficilement utilisables pour assurer un tri efficace à cause des faibles longueurs. Il est admis qu'en dessous d'un mètre, ces machines ne sont pas efficaces.

C'est pourquoi nous avons décidé de tester lors d'une campagne de caractérisation des aboutages le contrôle de la qualité de l'aboutage par machine. La « planche à tester » est de ce fait plus longue.

Un nouveau lot de 18 planches multi-aboutées (lot 21155-2 ; section nominale 132*40 mm² ; longueur = 1m) a été sélectionné pour être mesuré au moyen de la machine MTG avant un test en flexion à plat (hauteur fléchie = 40 mm). Un des aboutages doit se trouver au centre des appuis de chargement. Dans le cadre du dossier technique, il nous a été demandé de mesurer également le module d'élasticité statique que nous comparerons avec le Edyn provenant de la machine.

Tableau 22 : Mesures (non destructives et destructives) des propriétés des bois aboutés hêtre (132*40 mm²)

N°	aboutages	fm (MPa)	Emg 12% (MPa)	rupture	Humidité bois	Edyn 12%
1	1	75,2	12172	A2	8,9	13762
2	1	72	12616	A3	9,0	14105
3	1	76,3	12841	A3	8,4	14819
4	1	74,7	16107	A1	9,3	17864
5	1	56,3	11297	A3	8,5	12869
6	1	43	11416	A1	8,7	13402
7	3	83,4	13913	A2	9,5	14807
8	3	93,9	14679	A3	9,6	16325
9	3	83,5	13195	A3	9,8	14555
10	1	86,6	14410	A1	9,5	15737
11	2	76,7	14941	A1	8,9	16324
12	1	100,8	17068	A1	9,7	19189
13	1	74,7	14654	A3	9,3	16532
14	2	68,1	12926	A3	9,4	14195
15	3	73,6	13145	A2	9,9	14692
16	2	64,7	12557	A3	8,7	14444
17	3	60,9	12249	A2	8,6	14405
18	3	65,5	13680	A3	9,7	15992
Moyenne		73,9	13548			15223
Maximum		100,8	17068			19189
Minimum		43	11297			12869
Ecart type		13,5	1543,4			1596,7
COV		18%	11%			10%
Fractile 5%		47,5				

Les relations entre les propriétés mécaniques sont représentées sur le graphique suivant. La qualité des régressions nous indique que la mesure non destructive par MTG pourrait être une solution pour assurer un contrôle qualité interne durant le process.

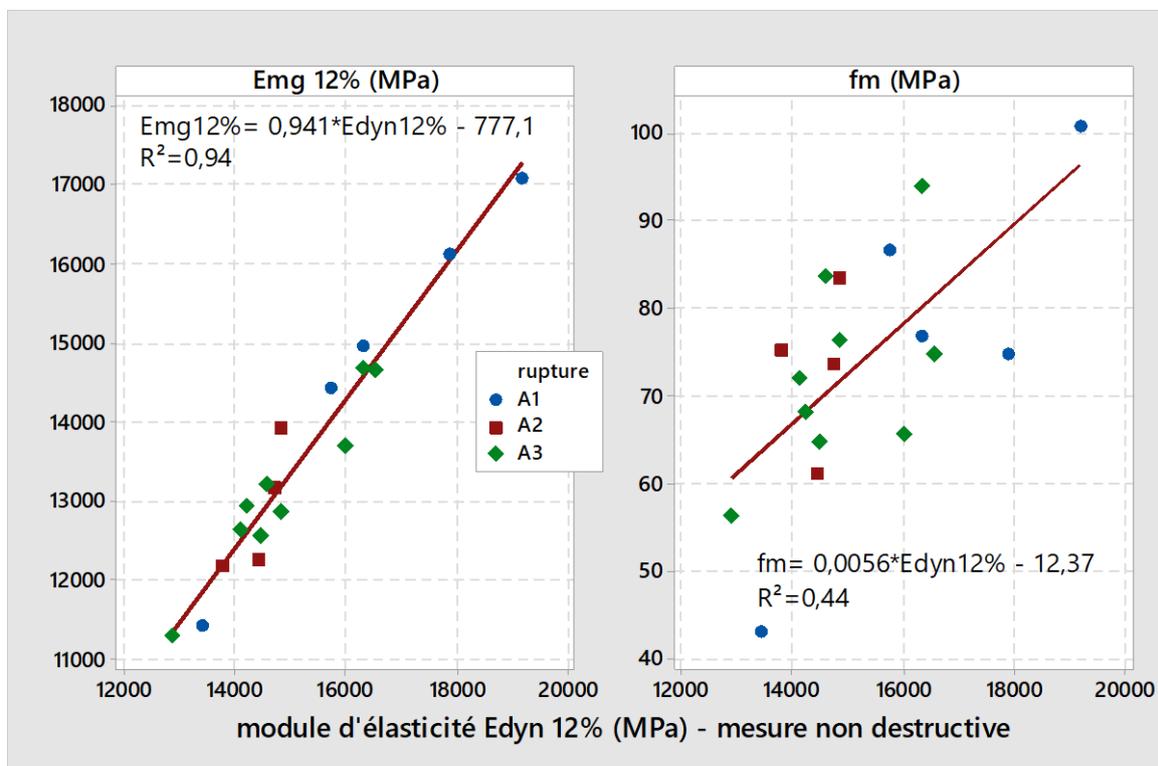


Figure 48 : régression entre les valeurs de contrainte et module du hêtre abouté à partir des mesures non destructives du module Edyn.

Couplé avec les résultats des planches aboutées testées en flexion à chant (Rapport final FCBA N°403/19/091/1 du 30 octobre 2020 amendé), il nous est possible aussi de déterminer un coefficient de passage entre les valeurs de résistance (plat/chant). La figure suivante illustre la régression obtenue sur la base d'une courbe fractile – fractile.

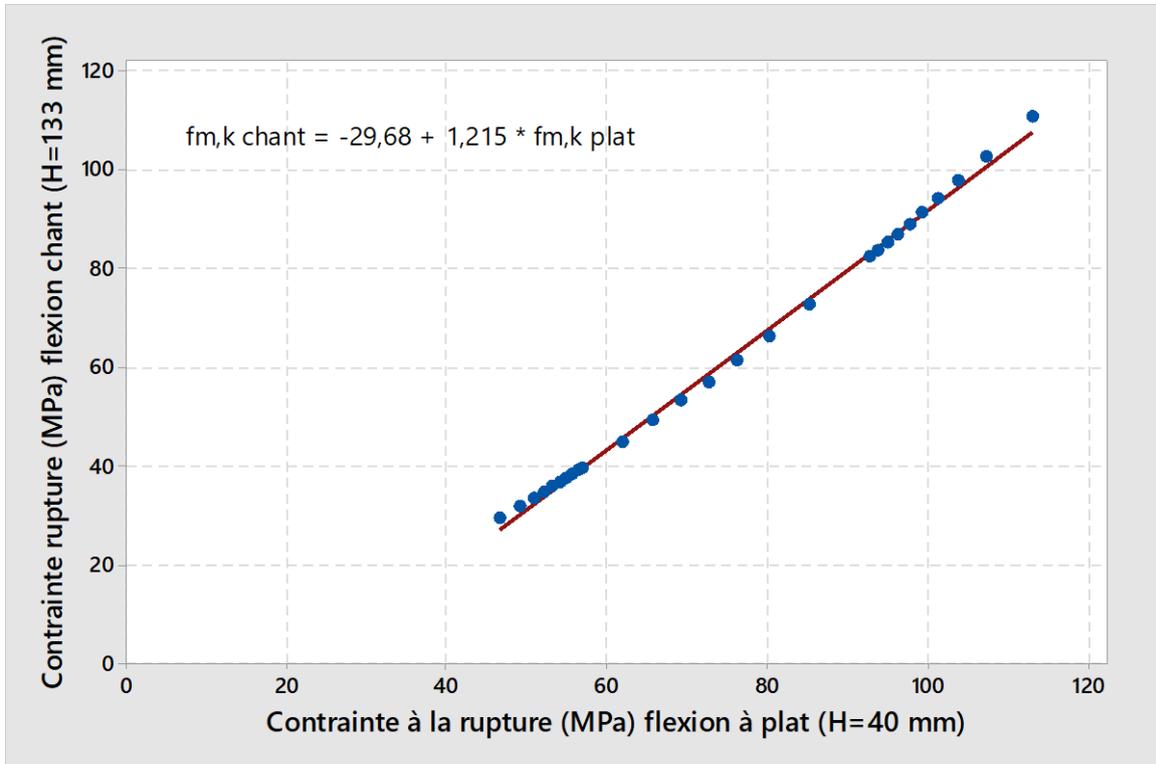


Figure 49 : coefficient de passage pour les valeurs de contrainte caractéristiques du hêtre abouté entre les tests de flexion à plat versus flexion à chant ; courbe fractile-fractile.

10. Synthèses

Avec plus de 1,5 Mha de forêt, le hêtre est une des essences les plus répandues en France avec un volume sur pied du bois fort tige au sein des peuplements à hêtre prépondérants estimé à 212 Mm³ (9.3 Mm³ en Normandie). Toutefois seul 1 Mm³ est récolté annuellement (0,123 Mm³ pour la Normandie) pour un volume de sciage nationale de 0,454 Mm³ (EAB 2018). Fort de cette ressource, de nouveaux débouchés de produits techniques sont à l'étude avant leur mise sur le marché.

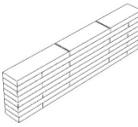
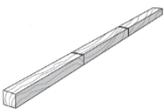
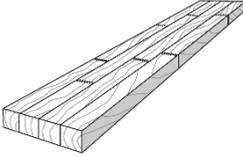
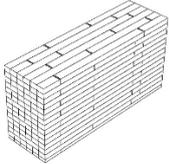
Avec plus de 90000 m³ de bois de hêtre sciés par an avec deux lignes de sciage (une ligne bois de choix et gros bois et une ligne bois d'emballage et palette), le groupe Lefebvre est entré dans une phase de développement du «hêtre en structure». Cette diversification des marchés des produits en hêtre vers la construction requiert une nouvelle technicité, car le hêtre très performant mécaniquement est « nerveux » et demande des process adaptés et évalués.

La mise au point des process a été rendue possible par les travaux conduits par FCBA grâce à de nombreux partenaires, pour caractériser et classer le hêtre en structure (NF B 52-001 partie 1 et 2) et le lamellé-collé de hêtre (étude FCBA 2016). La sélection des bois massifs hêtre par MANUBOIS permet d'atteindre des seuils de performance mécanique intéressante comme la classe D50 pour mettre sur le marché des bois lamellé-collé d'exception.

Les bois de qualité préalablement triés ont été ensuite aboutés en vue d'une vérification des performances en flexion et traction mais il n'est pas nécessaire d'avoir des planches de haute qualité plus que nécessaire car c'est le process usine de fabrication des lamelles aboutés qui fixera et assurera une qualité de production constante au fil des arrivages de bois. Les propriétés mécaniques respectent bien les seuils, seuils incluant un coefficient de sécurité.

Des tests de performances des produits BLC hêtre ont été menés dans les laboratoires FCBA en termes de résistance en flexion et de compression et en parallèle de la montée en puissance du groupe Lefebvre pour la fabrication des produits à tester.

Tableau 23 : identification des produits testés durant l'étude PROBOIS

Pre-débit (lamelle unitaire)	Lamelle en bois massif aboutée BMA	Lamelle en bois abouté panneauté BAP	Bois lamellé collé	Classe de performance
			BLC 	GLD36h  BOIS LAMELLÉ COLLÉ A BASE DE HÊTRE CERTIFICATION INDIVIDUELLE (N°529)
			BLC+ 	GLD40h  BOIS LAMELLÉ COLLÉ A BASE DE HÊTRE CERTIFICATION INDIVIDUELLE (N°529)
ETUDE COLLECTIVE « PROBOIS NORMAND » Caractérisation de BLC Hêtre fabriqué à partir de bois de petites longueurs				Démarche industrielle de certification

Fort des résultats de l'étude PROBOIS, le nouveau produit a alors fait l'objet d'un dossier technique puis le process Lefebvre a obtenu une certification individuelle «CTB Bois lamellé-collé de hêtre pour un usage en structure» attestant des performances et qualités du produit.

En effet, dans le cadre notamment d'une démarche de certification d'un produit bois de structure non complètement couvert par une norme produit en vigueur et pour lequel il n'existe pas de référentiel, il est nécessaire de disposer d'un document qui précise les adaptations nécessaires par rapport à la norme pour le produit considéré afin de constituer un référentiel complet. C'est le rôle du dossier technique. Il précise en outre certaines performances spécifiques au produit, les exigences requises au regard de ces derniers ainsi que les contrôles à effectuer pour garantir la constance des performances. »

Tableau 24 : Propriétés caractéristiques de résistance et de rigidité en N/mm² et de masse volumique en kg/m³ du bois lamellé-collé à lamelles panneautées en hêtre « BLC+ »

Caractéristiques	BLC+ Hêtre
Classe de résistance	GLD40h
Contrainte de flexion	40 MPa
Contrainte de traction	27 MPa
Contrainte de compression axiale	50 MPa
Contrainte de compression perpendiculaire	7,1 MPa
Résistance au cisaillement	6,0 MPa
Module d'élasticité	14 800 MPa
Masse volumique	720 kg/m ³

Suite aux essais menés dans le cadre du projet PROBOIS, le comportement du hêtre en compression lui permet de reprendre des efforts verticaux très importants comparativement à du BLC résineux. L'optimisation des sections pour la même reprise d'une charge verticale est illustrée à titre indicatif par le tableau ci-dessous pour des poteaux BLC en résineux (GL24h) et hêtre (GLD40h).

Tableau 25 : calcul des sections à titre indicatif pour reprise d'une charge verticale des poteaux BLC en résineux (GL24h) et hêtre (GLD40h)

Bois lamellé-collé	RESINEUX GL24h	HETRE GLD40h	RESINEUX GL24h	HETRE GLD40h
Résistance compression axiale $f_{c,0,k}$ (MPa)	24	50	24	50
Module d'élasticité $E_{0,g, moyen}$ (MPa)	11500	14800	11500	14800
Module d'élasticité $E_{0,g,5}$ (MPa)	9600	12700	9600	12700
Charge verticale ponctuelle (kN)	1300		5100	
Longueur du poteau (m)	3,6		3,6	
Largeur poteau b (mm)	300	240	580	410
Epaisseur poteau h (mm)	300	240	580	410
Réduction du volume du poteau	35%		50%	

Cette performance parvient à diminuer les sections des poteaux de manière significative avec le hêtre dans des conditions optimales, rendant l'utilisation du hêtre compétitive.

Dans l'attente d'une norme harmonisée EN 14080 destinée aux produits collés à base de feuillus, la certification individuelle CTB N°529 devrait incorporer de nombreux produits hêtre (BAP, BMA, ...) à destination de la construction bois.

Dans le cadre de cette étude, nous avons donc pu caractérisé un nouveau produit qui pourra être décliné sur le marché de la construction sous l'acronyme BAP. Il est fort à parier que dans un proche avenir, d'autres essences feuillues puissent proposer ce genre de produit car il valorise des « sous-produits ».

11. Références bibliographiques

Ehrhart T., Fink G., Steiger R., Frangi A. « Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT & CLT » INTER/49-05-1 2016

Ehrhart T., Palma P, Steiger R, Frangi A. « numerical and experimental studies on mechanical properties of glued laminated timber beams made from european beech wood » WTCE 2018

Ehrhart T « European Beech Glued Laminated Timber » Thèse (No. 26173) présentée en 2019 à l' ETH ZURICH

Fortuna B & All « Tension strength capacity of finger jointed beech lamellas » 7th International Scientific Conference on Hardwood Processing ISCHP 2019 27th – 30th August 2019, Tu Delft, The Netherlands

Hübner Ulrich “Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile” thèse présentée en 2013, 409 pages;

Lehmann M, Clerc G, Lehringer C, Strahm T, Volkmer T (2018) Investigation of the bond quality and the finger joint strength of beech glulam. World Conference on Timber Engineering. Seoul, Republic of Korea.

Lanvin JD , Reuling D, Legrand G “French beech – a new opportunity in wood housing” 7th International Scientific Conference on Hardwood Processing ISCHP 2019 27th – 30th August 2019, Tu Delft, The Netherlands

Rapport FCBA 2016 « caractérisation du hêtre pour une utilisation structurelle répondant aux exigences du marquage CE ».

Tran V « Caractérisation et modélisation numérique des poutres en Bois Massif Reconstitué (BMR) réalisées avec une essence locale feuillue » Thèse de l'Université de Lorraine Spécialité : Sciences du bois et des fibres (décembre 2014)

Westermayr M, Stapel P, Van de Kuilen J.-W. G. « Tensile and compression strength of small cross section beech glulam members »; Paper 51-12-2. In International Network on Timber Engineering Research - Meeting Fifty-One, pages 307–322, Tallinn, Estonia, 2018.

12. Annexes

12.1 Annexe 1 : Rappel des règles de tri du hêtre français par méthode visuelle (extrait NF B 52-001 parties 1 et 2)

Les sciages de hêtre à destination du marché de la construction classés selon la norme de classement visuel française (NF B 52 001-1) peuvent être assignés à une classe mécanique au moyen d'une table commune :

- Classe hêtre 1 – D40
 - Classe hêtre 3 – D24 et mieux
- Ou
- Classe hêtre 2 – D35 et mieux
 - Classe hêtre 4 – D18 et mieux

Tableau 26 : Critères de classement visuel du hêtre (extrait de la NF B 52-001 partie 1)

Critères	Combinaison 1		Combinaison 2	
	H 1	H 3	H 2	H 4
Largeur de cerne	≤ 10 mm			
Diamètre des nœuds				
- Sur la face	∅ < 1 / 5 larg.	∅ < 3 / 5 larg.	∅ < 1 / 2 larg.	∅ < 3 / 4 larg.
- Sur la rive	∅ < 1 / 5 épais.	∅ < 3 / 5 épais.	∅ < 1 / 2 épais.	∅ < 3 / 4 épais.
Pente de fil locale	< 1 : 5 (20 %)	< 1 : 2,5 (40 %)	< 1 : 5 (20 %)	< 1 : 2,5 (40 %)
Pente de fil globale	< 1 : 10 (10 %)	< 1 : 5	< 1 : 10 (10 %)	< 1 : 5 (20 %)
Flaches	Moins de 10 % de la largeur de la face et de la rive sur moins de 25 % de la longueur			
Altérations biologiques	Admis			
- Bleu	Admissibles si elles apparaissent sur une seule face			
- Piqûres noires	Non admise			
- Echauffure	Non admise			
Déformation maximale en mm pour une longueur de 2 m				
- Flèche de face (mm)	< 10		< 20	
- Flèche de rive (mm)	< 8		< 12	
- Gauchissement	1 mm/25 mm large		2 mm/25 mm large	
Tuilage	Maximum 5 mm			
Fentes	Gélivure	Exclus		
	Gerces	Permis		
	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	Admissibles	≤ 1/3 de la longueur
Discoloration	Cœur rouge	Permis		

Le tableau suivant donne le rendement des avivés hêtre dans les deux classes visuelles équivalentes de la classe D40 et D24. L'analyse de la répartition des planches par région d'approvisionnement, imposée par la procédure EN 384, limite les planches vues classe 3 en D24.

Tableau 27 : Rendement du classement par méthode visuelle pour des classes D40 et D24 (lot de référence France – étude FCBA 2016).

Classes	MOR (MPa) Fractile 5%	MOEL (GPa) moyen	MV (Kg/m3) Fractile 5%	Nombre de pièces	Rendements (%)
1 – D40	47	14,6	603	1113	59,5
3 – D24	24,2	13,5	614	570	30,4
Hors classe	21,4	12,3	597	189	10,1
Total				1872	100

Le tableau suivant donne le rendement des avivés hêtre dans les deux classes visuelles équivalentes de la classe D35 et D18. L'analyse de la répartition des planches par région d'approvisionnement, imposée par la procédure EN 384, vérifie les planches vues en classe 4 en D18.

Tableau 28 : rendement du classement par méthode visuelle pour des classes D35 et D18 (lot de référence France – étude FCBA 2016).

Classes	MOR (MPa) Fractile 5%	MOEL (GPa) moyen	MV (Kg/m3) Fractile 5%	Nombre de pièces	Rendements (%)
2 – D35	39,4	14,4	604	1436	76,7
4 – D18	21,6	13,6	613	337	18
Hors classe	15,5	11,7	589	99	5,3
Total				1872	100

Les sciages de hêtre à destination de produits contrecollés classés visuellement selon la norme de classement visuel française (NF B 52 001-2) peuvent être assignés à une classe mécanique au moyen d'une table 1 :

- Classe hêtre LH0 – D45

Tableau 29: Critères de classement visuel du hêtre dans le but de produire du BLC et du BMR (extrait de la NF B 52-001 partie 2)

Classes		LH0
Critères		
Section		< 10 000mm ²
Largeur de cernes (mm)		≤ 10 mm
Diamètre des nœuds		
- sur la face		Pas de nœud
- sur la rive		Pas de nœud
Pente de fil locale et globale		< 10 % - 1 : 10
Flaches		Non admise
Altérations biologiques		
- bleu		Admis
- piqûres noires		Admises si elles apparaissent sur une seule face
- échauffure		Non admise
Déformation maximale en mm pour une longueur de 2 m		
- flèche de face (mm)		< 10
- flèche de rive (mm)		< 8
- gauchissement		1 mm/25 mm large
Tuilage		Maximum 5 mm
Fentes	Gélivures	Exclues
	Gerces	Permisses
	Roulure	Exclue
	Fentes de cœur	Exclues
	Fentes traversantes	Non admises
	Fentes non traversantes	≤ 1/3 de la longueur
Discoloration	Cœur rouge	Pas d'incidence mécanique, mais esthétique

Le tableau suivant donne le rendement des avivés hêtre dans la classe visuelle équivalente de la classe D45.

Tableau 30 : Rendement du classement par méthode visuelle pour des classes D45 (lot de référence France – étude FCBA 2016).

Classes	MOR (MPa) Fractile d'exclusion à 5%	MOEL (GPa) moyen	MV (Kg/m ³) Fractile d'exclusion à 5%	Nombre de planches testées	Rendements (%)
LH0 – D45	52,7	14,6	598	594	31,7
Hors classe	29,6	13,8	611	1278	68,3
			Total	1872	100

La classe D50 n'est pas atteignable, le fractile de la masse volumique n'est pas respecté (le fractile d'exclusion de la masse volumique de la classe de résistance D50 selon l'EN 338 est de 620 kg/m³).

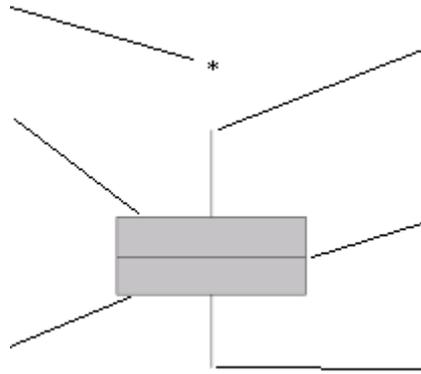
12.2 Annexe 2 : Comment comprendre la distribution des résultats d'une grandeur en boîte à moustaches

Les boîtes à moustaches sont un moyen graphique pour évaluer et comparer des distributions d'échantillons. La figure ci-dessous présente les composants par défaut d'une boîte à moustaches, l'étendue des distributions a été fixée à 50%.

Valeur aberrante - Observation inhabituellement élevée ou faible. Les valeurs situées au-delà des moustaches sont des valeurs aberrantes.

Par défaut, le haut de la boîte est le troisième quartile (Q3) - 75% des valeurs sont inférieures ou égales à cette valeur.

Par défaut, le bas de la boîte est le premier quartile (Q1) - 25% des valeurs sont inférieures ou égales à cette valeur)



Par défaut, la moustache supérieure s'étend vers la valeur la plus élevée dans la limite supérieure.

Limite supérieure = $Q3 (75\%) + 1,5 (Q3 - Q1)$

Médiane - Moitié des données (50%). La moitié des observations sont inférieures ou égales à cette valeur.

Par défaut, la moustache inférieure s'étend vers la valeur la plus basse dans la limite inférieure.

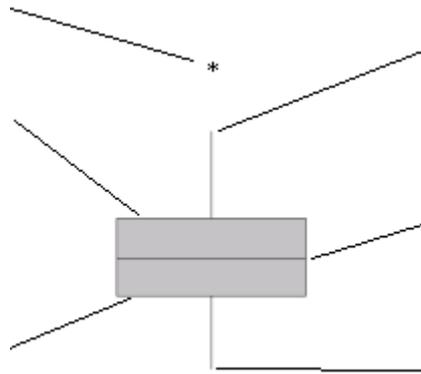
Limite inférieure = $Q1 (25\%) - 1,5 (Q3 - Q1)$

La figure ci-dessous présente les composants par défaut d'une boîte à moustaches, l'étendue des distributions a été fixée à 95%.

Valeur aberrante - Observation inhabituellement élevée ou faible. Les valeurs situées au-delà des moustaches sont des valeurs aberrantes.

Par défaut, le haut de la boîte est le troisième quartile (Q3) - 95% des valeurs sont inférieures ou égales à cette valeur.

Par défaut, le bas de la boîte est le premier quartile (Q1) - 5% des valeurs sont inférieures ou égales à cette valeur)



Par défaut, la moustache supérieure s'étend vers la valeur la plus élevée dans la limite supérieure.

Limite supérieure = $Q3 (75\%) + 1,5 (Q3 - Q1)$

Médiane - Moitié des données (50%). La moitié des observations sont inférieures ou égales à cette valeur.

Par défaut, la moustache inférieure s'étend vers la valeur la plus basse dans la limite inférieure.

Limite inférieure = $Q1 (25\%) - 1,5 (Q3 - Q1)$

La limite inférieure de la boîte illustre donc le fractile à 5% d'exclusion, c'est à dire que 95% des résultats dépasse cette valeur.

12.3 Annexe 3 : Résultats des tests de flexion sur les poutres BLC Plus en Hêtre

Tableau 31 : résultats des tests de flexion des poutres BLC plus en hêtre

N éprouvette	Humidité des bois	Section	E _{mg} 12% (MPa)	E _{mi} 12% (MPa)	E _{mi} EN384 12%(MPa)	MOR _{h600} (MPa)	MV ₁₂ planche
1	12,5	280*240	13278	12195	16439	46,3	722,0
2	14,1	280*240	13697	13155	16983	41,7	706,8
3	12,2	280*240	13742	13192	17042	52,9	744,7
4	11,8	280*240	13723	13438	17017	55,2	735,1
5	12,3	280*240	13723	12753	17017	47,0	741,1
6	12,1	280*240	13293	14218	16458	44,7	718,7
7	12,0	280*300	13305	16094	16474	47,8	711,3
8	11,8	280*300	12851	13529	15883	40,9	695,1
9	12,3	280*300	13093	14283	16198	47,7	697,4
10	12,0	280*300	13341	15871	16520	51,4	704,4
11	11,7	280*240	13741	17039	17041	60,8	718,4
12	11,9	280*240	13884	15651	17226	52,4	728,3
13	12,6	280*240	15561	14632	19406	52,7	727,5
14	12,0	280*240	13315	15254	16487	43,0	735,3
15	11,5	280*360	13897	17041	17243	54,9	738,4
16	12,0	280*360	13694	15629	16979	52,7	735,8
17	12,0	280*360	13345	14004	16525	55,5	712,6
18	12,6	280*360	13630	15713	16896	56,1	717,1
19	12,1	280*360	13258	15237	16412	50,7	715,9
20	11,4	280*360	13048	15379	16139	57,3	721,4
21	12,1	280*360	13495	15198	16721	57,8	718,5
22	12,0	280*300	13400	14637	16597	51,1	724,2
23	12,5	280*360	13293	15941	16458	59,5	696,0
24	12,4	280*360	13413	14352	16614	49,9	707,9
25	13,1	280*360	13715	15170	17007	57,0	725,2
26	13,1	400*240	14103	16221	17511	50,1	747,4
27	13,0	400*240	14179	15933	17610	55,4	755,8
28	12,4	400*240	13647	15618	16918	51,7	743,8
29	12,9	400*240	13595	13948	16850	51,4	753,6
30	11,8	400*240	13666	14258	16943	45,0	724,3
31	13,0	400*240	13819	13455	17142	52,6	721,8
32	12,4	400*240	13707	15371	16997	55,8	693,1
33	12,9	400*240	13773	15237	17082	50,9	697,9
34	11,2	400*240	13606	15011	16865	50,6	724,6
35	11,9	400*240	13904	15018	17252	54,3	727,0
36	13,0	400*240	13854	15312	17187	56,6	758,9
37	11,4	400*240	13127	14887	16242	52,1	727,6
38	12,1	400*240	13847	14584	17178	46,7	731,3
1	14,3	315*240	14312	19380	17782	56,9	732,0
2	14,1	315*240	14470	20694	17987	49,6	742,1
3	14,0	315*240	13845	18110	17175	50,5	726,2
4	14,2	315*240	14358	20204	17842	52,3	710,7
5	14,3	315*240	14124	19562	17538	42,8	714,4
1		320*360				47,5	720,7
2		320*360				47,9	712,4
3		320*360				50,2	703,4
4		280*360				44,4	704,3
5		280*300				44,5	717,2
Nombre échantillon (coef Student = 1.81)						48	
Moyenne			13690	15405	16974	51,0	723
Ecart type			463	1885	601	4,8	16
Fractile à 5% selon loi de Student			12853	11993	15886	42,2	693
COV			3%	12%	4%	9%	2%
Fractile à 5% calculé selon EN 14358						42,6	

12.4 Annexe 4 : Résultats des tests de compression axiale sur les poutres BLC+ en hêtre

Tableau 32 : résultats des tests de compression axiale (section 110*110 mm²) sur poutre BLC+ hêtre

N	masse en kg	Hauteur (mm)	largeur (mm)	Longueur (mm)	Force max (N)	Fc,0 (MPa)	Ec,0 (MPa)	Temps (sec)	Ec,0 12% (MPa)	fc,0 (MPa)	MV12 Kg/m3	Facies
1	6,65	110,02	108,15	720	686 327	57,7	15 399	258	15722	57,7	768	E
2	6,44	110,16	110,13	720	677 846	55,9	14 591	255	14693	55,9	735	B
3	6,32	110,14	110,46	720	663 916	54,6	14 022	247	14191	54,6	717	E
4	6,37	109,23	110,24	720	644 735	53,5	15 216	238	15231	53,5	734	B
5	6,47	109,84	110,21	720	675 609	55,8	16 572	251	16738	55,8	739	C
6	6,23	109,89	110,45	720	708 316	58,4	14 134	263	14191	58,4	711	B
7	6,84	110,21	109,13	720	676 046	56,2	14 386	251	14558	56,2	785	B
8	6,53	110,03	110,25	720	634 247	52,3	12 988	234	12988	52,3	748	B
9	6,12	110,02	110,31	720	648 474	53,4	13 727	240	13836	53,4	698	B
10	6,26	110,14	110,08	720	662 648	54,7	13 603	245	13671	54,7	715	B
11	6,19	110,08	109,87	720	708 693	58,6	15 695	264	15774	58,6	709	B
12	6,45	109,99	109,79	720	713 061	59,0	15 152	266	15319	59,0	738	B
13	6,27	110,2	110,09	720	665 936	54,9	14 355	247	14614	54,9	711	B
14	6,14	110,05	109,98	720	674 757	55,7	12 047	251	12035	55,7	705	E
15	6,33	110,11	110,03	720	670 459	55,3	14 455	249	14484	55,3	725	B
16	6,34	110,02	110,05	720	668 561	55,2	16 568	248	16684	55,2	725	B
					673 727	Moyenne		250	14671	55,7	729	
						Ecart type			1248	1,9	23	
						CV			8,5%	3,4%	3,2%	
						Nb			16	16	16	
						Fractile à 5% selon loi de Student			12199	57,9	683	
						Fractile à 5% calculé selon EN 14358			Trop peu d'éprouvettes			

12.5 Annexe 5 : Résultats des tests de compression perpendiculaire sur les poutres BLC+ en hêtre

Tableau 33 : résultats des tests de compression perpendiculaire (section 110*110 mm²) sur poutre BLC+ hêtre

N	MASSE en kg	HAUTEUR h (mm)	LARGEUR b (mm)	Longueur L (mm)	Force max 90 (N)	Fc90 (MPa)	Ec90 (MPa)*	Temps (sec)	Ec90 12%(MPa)	fc90	MV12	
17 NC	2,65	110,04	109,99	310	383 186	11,2	422,1	207	425	11,2	703	
18 NC	2,24	110,02	110,08	280	246 795	8,0	322,4	166	324	8,0	659	
19 NC	1,61	110,05	109,93	185	200 407	9,9	523,7	138	521	9,9	722	
20 NC	1,72	109,98	110,25	195	180 535	8,4	398,6	187	402	8,4	724	
21 NC	1,9	110,11	109,87	208	240 377	10,5	545,7	157	548	10,5	753	
1	3,77	198,7	119,3	221	230 716	8,8	419,8	202	418	8,8	721	
2	3,60	199,3	119,4	221	237 948	9,0	565,0	73	563	9,0	685	
3	3,89	198,9	119,3	221	265 984	10,1	495,8	224	487	10,1	747	
4	3,73	198,8	119,2	221	225 257	8,6	497,8	258	487	8,6	719	
5	3,66	198,7	120,1	221	221 781	8,4	575,6	217	571	8,4	696	
6	3,57	198,9	119,1	221	216 348	8,2	563,9	194	544	8,2	694	
7	3,82	200	119,2	221	243 554	9,2	552,0	186	533	9,2	737	
8	3,64	199,1	119,3	221	248 469	9,4	467,9	204	457	9,4	702	
9	3,69	199,7	119,2	221	234 569	8,9	429,5	178	421	8,9	708	
10	3,50	199,3	119,4	221	199 995	7,6	424,7	179	417	7,6	672	
11	3,70	198,9	119,1	221	236 262	9,0	577,9	211	564	9,0	714	
12	3,79	199,1	119,2	221	231 259	8,8	464,9	201	456	8,8	729	
13	3,70	198,9	119,3	221	235 659	8,9	552,6	193	539	8,9	715	
14	3,77	199,5	119,1	221	228 983	8,7	512,9	218	505	8,7	724	
15	3,87	199,3	119,3	221	236 004	9,0	563,7	194	555	9,0	741	
						Moyenne		195	501	8,8	714	
						Ecart type			56	0,9	21	
						CV			11%	10%	3%	
						Nb			15	15	15	
						Fractile à 5% selon loi de Student			388,9	7,1	672,9	
						Fractile à 5% calculé selon EN 14358			Trop peu d'éprouvettes			