

Le projet Efeur5 de caractérisation des feuillus à mi-course

Laurent Bléron
ENSTIB
Épinal, France



1. Introduction

La France est la première forêt de feuillus d'Europe avec près de 1200 Millions de m³ de hêtre, chêne, frêne et châtaignier [1]. Actuellement en Europe, le marché de la construction bois s'approvisionne essentiellement en bois résineux, en Allemagne la situation devient critique avec l'utilisation de 80% de l'accroissement naturel des forêts de résineux en bois d'œuvre et en produits dérivés du bois [2]. Selon les chiffres édités datant de 2016 [3], nous consommons en France les deux tiers de l'accroissement naturel de nos forêts de résineux. De par le fait, l'augmentation du marché de la construction bois en France et la ressource locale feuillue mobilisable, poussent logiquement les acteurs de la filière bois à réfléchir et commencer à mettre en œuvre ces essences feuillues dans le bâtiment.

Les Eurocodes et les normes européennes associées sont bâtis sur les expériences et recherches sur les résineux menés au cours des 30 dernières années. Une meilleure utilisation du bois feuillu dans les structures ne pourra se faire qu'en conduisant des études similaires sur ces essences et ainsi permettre de redéfinir les paramètres de calcul ainsi que les propriétés mécaniques des bois feuillus. Le programme EFEUR5 (Comportements structurels des Essences de bois Feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux EURocodes 5) a cet objectif et cette ambition. Le programme, centré sur les essences de chêne, de hêtre et de peuplier, essences majoritaires et au plus fort potentiel, repose sur la mise en commun des équipes de recherche les plus expérimentées en termes de structures bois.

Ce projet vise à développer des outils et des connaissances nécessaires à la mise sur le marché de produits structurels en feuillus français. L'objectif est de fiabiliser l'utilisation de ces essences pour les structures en bois justifiées selon les règles Eurocode 5 par les validations ou les corrections nécessaires. Bien que quelques rares études sur certaines essences feuillues existent, elles doivent être complétées par de nouvelles données scientifiques et expérimentales. Plusieurs incertitudes sont à lever, dont :

- La connaissance des comportements à long terme des bois d'essences feuillues
- La connaissance des propriétés mécaniques dites secondaires des essences feuillues
- La définition des modèles de calcul des assemblages des pièces de bois de feuillus
- L'anticipation des propriétés mécaniques : connaissance de l'impact du développement de l'arbre sur les propriétés du matériau, lien entre anatomie et physique

Une partie de ces recherches sont réalisées au sein du Laboratoire LERMAB (Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le MATériau Bois). L'hypothèse principale est que les propriétés mécaniques régissant le comportement des bois feuillus dans les structures sont différentes du comportement des bois résineux et qu'il convient de modifier les corrélations entre propriétés mécaniques établies dans le cadre de l'EN338 [4] (relations entre les résistances en flexion, traction, compression cisaillement, module d'élasticité et masse volumique). Dans un second temps, l'analyse du comportement des assemblages permettra si besoin de corriger les équations définies dans le code de calcul (Eurocode) pour prendre en compte les spécificités propres à la justification des structures en bois feuillu.

A ce jour, la norme EN 338 encadre les propriétés mécaniques des bois d'œuvres utilisés dans toute l'Europe. On retrouve ainsi, soit dans l'EN 338, soit dans l'EN 384 [5] toutes les corrélations entre propriétés mécaniques principales (Résistance en flexion, Masse volumique et Module d'élasticité) et les propriétés dites secondaires (Résistances en traction/compression axiale/transversale, résistance en cisaillement, Module d'élasticité transverse, Module de cisaillement). Pour être classé dans une classe, la pièce de bois doit avoir des caractéristiques supérieures aux caractéristiques principales (Résistance en flexion, Masse volumique et Module d'élasticité) fixée pour cette classe. Si les deux premières caractéristiques peuvent être définies précisément par des essais non destructifs, la contrainte de rupture en flexion ne peut qu'être estimée (Plus ou moins correctement en fonction des essences de bois).

Tableau 1 : Evolution des corrélations dans la norme EN 384

EN 384 - 1995	EN 384 - 2004	EN 384 - 2010	EN 384 - 2016
$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k}$	$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k}$	$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k}$	$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k}$ (1)
$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0.45}$	$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0.45}$	$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0.45}$	$f_{c,0,k} = 4.3 (f_{m,k})^{0.5}$ (2)
$f_{v,k} = 0,2 (f_{m,k})^{0.8}$	$f_{v,k} = \min [3,8 ; 0,2 (f_{m,k})^{0.8}]$	Donné dans l'EN 338	Pour $f_{m,k} \leq 60 \text{ MPa}$ $f_{v,k} = 3,0 + 0,03 f_{m,k}$ Pour $f_{m,k} > 60 \text{ MPa}$ $f_{v,k} = 5,0 \text{ MPa}$
$f_{t,90,k} = 0,001 \rho_k$	$f_{t,90,k} = \min [0,6 ; 0,001 \rho_k]$	$f_{t,90,k} = 0,6 \text{ MPa}$	$f_{t,90,k} = 0,6 \text{ MPa}$
$f_{c,90,k} = 0,015 \rho_k$	$f_{c,90,k} = 0,015 \rho_k$ (3)	$f_{c,90,k} = 0,015 \rho_k$ (3)	Pour $\rho_k < 700 \text{ kg/m}^3$ $f_{c,90,k} = 0,010 \rho_k$ Pour $\rho_k \geq 700 \text{ kg/m}^3$ $f_{c,90,k} = 0,015 \rho_k$
$E_{0,05} = 0,84 E_{0,mean}$	$E_{0,05} = 0,84 E_{0,mean}$	$E_{0,05} = 0,84 E_{0,mean}$	$E_{0,05} = 0,84 E_{0,mean}$
$E_{90,mean} = E_{0,mean} / 15$	$E_{90,mean} = E_{0,mean} / 15$	$E_{90,mean} = E_{0,mean} / 15$	$E_{90,mean} = E_{0,mean} / 15$
$G_{mean} = E_{0,mean} / 16$	$G_{mean} = E_{0,mean} / 16$	$G_{mean} = E_{0,mean} / 16$	$G_{mean} = E_{0,mean} / 16$
	$\rho_{mean} = 1,2 \rho_k$	$\rho_{mean} = 1,2 \rho_k$	$\rho_{mean} = 1,2 \rho_k$

(1) Modification de la corrélation pour les résineux selon les recherches de N. NURGER et P. GLOS [6] $f_{t,0,k} = -3,07 + 0,73 \times f_{m,k}$.

(2) Modification de corrélation identique pour les feuillus et les résineux.

(3) Modification pour les résineux : $f_{c,90,k} = 0,007 \rho_k$.

Les feuillus tel que le châtaignier et le peuplier sont à considérer comme des résineux.

L'évolution de ces corrélations (Cf. tableau 1) se fait principalement avec les essais réalisés dans le cadre des colloques scientifiques CIB – INTER. A titre d'exemple, en 2006 P. GLOS et J.K. DENZIER [6] ont proposé une modification des valeurs de module d'élasticité à la suite d'une campagne d'essais sur du Hêtre et du Chêne Allemand, modification ayant été prise en compte pour la mise à jour des caractéristiques mécaniques données dans la version de 2009 de l'EN 338.

2. Essais de flexion

Des essais de flexion (Cf. tableau 2), ainsi que la détermination des propriétés physiques associées, ont été réalisés selon les normes EN 408 [7], EN 384 et EN 13183 [8]. Avant essais, les bois ont été rabotés et stabilisés à une température de 20 ± 2 °C et une humidité de 65 ± 5 % pour assurer une stabilisation autour de 12% d'humidité.

Tableau 2: Synthèses des dimensions d'essais

Matériaux	Section [mm ²]	Nombre	Longueur [mm]
Peuplier	35x90	40	1620
	45x140	40	2520
	60x190	40	3420
Hêtre Classe C/D	35x90	40	1620
	45x140	40	2520
	60x190	40	3420
Hêtre Classe A/B	35x90	40	1620
	45x140	40	2520
	60x190	40	3420
Chêne	35x87,25	60	1572
	40x135	60	2430
	55x180	60	3240

Afin de comparer les propriétés mécaniques entre les éprouvettes de hêtre des billons de classe A&B et des billons de classe C&D, une analyse statistique a été réalisée. Pour le hêtre, les résistances et modules d'élasticité sont équivalents quand on travaille sur de petites sections. Dès lors que la hauteur des éprouvettes augmente, les singularités (nœuds, fentes, pente de fil) appariassent plus aisément dans les billons de classes C&D par rapport aux billons de classe A&B. Néanmoins, au niveau des modules d'élasticité, il n'apparaît pas de différence en fonction de la qualité initiale des billons.

Un phénomène important transparait à travers la campagne d'essais : plus la section augmente et plus les propriétés mécaniques diminuent. En effet, plus la section est importante et plus la probabilité de voir apparaître un défaut majeur augmente jusqu'à tendre vers une constante propre à chaque essence. Cette analyse directement issue de la loi de WEIBULL est intégrée dans l'EUROCODE sous la forme du coefficient k_h . C'est pour cela que la norme EN 384 impose de recalculer les résistances pour se ramener à une hauteur de référence de 150mm. Cette valeur définie pour le bois résineux est-elle acceptable pour les feuillus ?

Sur ces courbes (Cf. figure 1), on remarque que le coefficient k_h actuel doit être modifié pour les grandes hauteurs. Pour être représentatif de ces phénomènes, il est indispensable de définir une hauteur standard de 200mm. On trouve de cette manière une équation k_h qui correspond plus aux phénomènes observés au cours des essais tout en se plaçant du point de vue de la sécurité.

$$f_{m,h=200} = \frac{f_{m,h < 200}}{k_h} \text{ Avec } k_h = \min \left\{ \left(\frac{200}{h} \right)^{0.50}, 1,4 \right\}$$

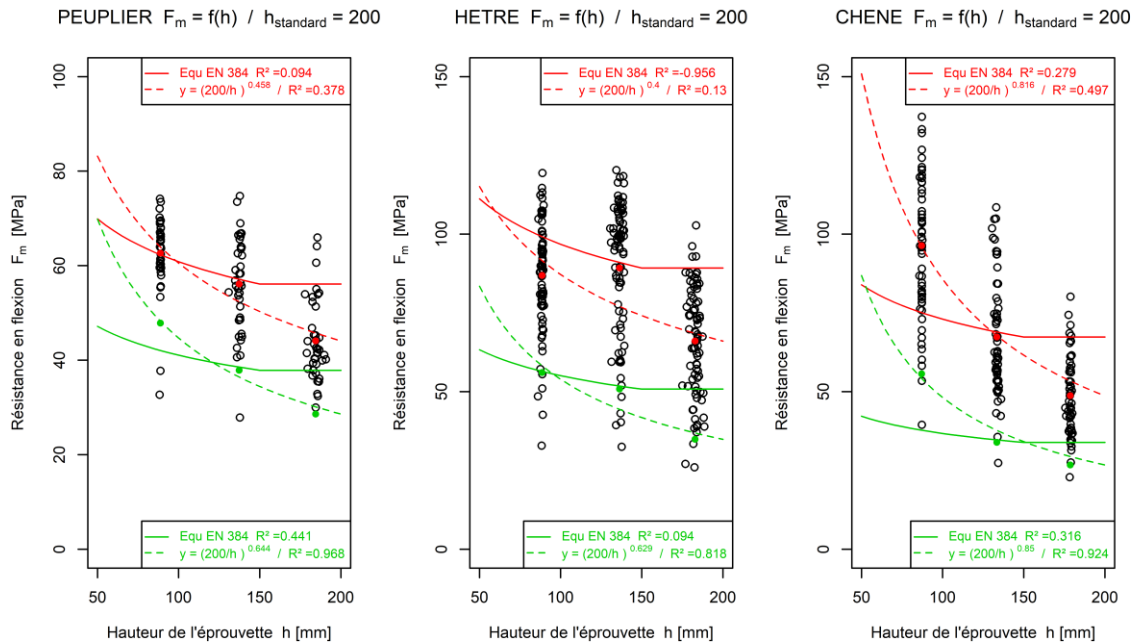


Figure 1 : Courbes par essences des résistances en flexion sans la correction de EN 384 en fonction des sections.

3. Essais de compression

Des essais de compression transversale et axiale ont été effectués sur machine d'essais ZWICK Z250. L'effort est amené par un vérin de 250 kN couplé à une cellule de forces de 250kN. Avant essai, les bois ont été rabotés et stabilisés à une température de 20 ± 2 °C et une humidité de 65 ± 5 % pour assurer une stabilisation autour de 12% d'humidité. Pour obtenir les corrélations les plus « propres » possible il a été fait le choix de récupérer sur les éprouvettes de flexion une partie du bois non soumis aux contraintes de flexion. Dans ces éprouvettes, le débit réalisé suit le plan suivant :

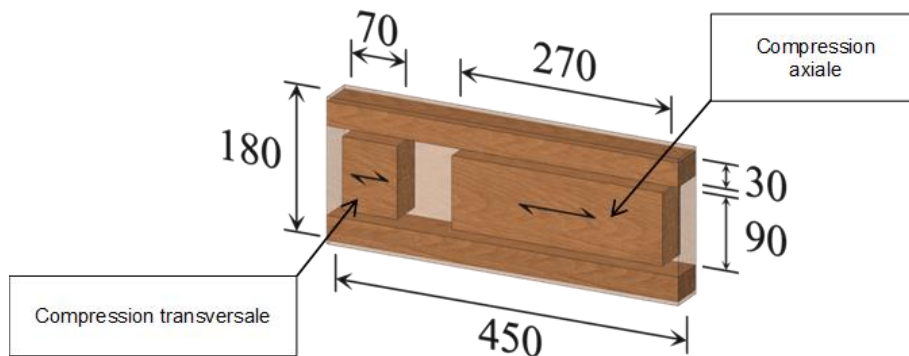


Figure 2 : Débit des éprouvettes de compression

L'EN 384 définit un lien direct entre la masse volumique et la résistance caractéristique en compression transversale tel que : $f_{c,90,k} = 0,10 \rho_k$. Les résultats obtenus démontrent la validité de la formule proposée (Cf. tableau 3)

Tableau 3 : Relation entre résistance caractéristique en compression et masse volumique caractéristique par essence.

	COV Masse Volumique	Masse Volumique [Kg/m ³]	COV Résistance	Résistance en compression [MPa]
PEUPLIER	5%	399	16%	3,07
$f_{c,90,k} = X \rho_k$				0,08
HETRE	6%	647	21%	7,22
$f_{c,90,k} = X \rho_k$				0,11
CHENE	6%	639	21%	5,47
$f_{c,90,k} = X \rho_k$				0,09

Pour ce qui concerne la compression axiale, l'EN 384 définit un lien direct entre résistance en compression axiale et la résistance en flexion tel que : $f_{c,0,k} = 4,3 f_{m,k}^{0,5}$. Cette formule est en adéquation avec les essais réalisés pour le chêne et le peuplier. On note toutefois qu'elle est pénalisante pour le hêtre. Par ailleurs, il convient également de minorer ou majorer la résistance en compression en fonction du taux d'humidité du bois. La correction proposée dans l'Eurocode 5 est de 3% par pourcentage d'humidité. Dans notre cas, nos essais ont montré que cette variation était optimiste puis que nos résultats démontrent une variation de l'ordre de 7% par pourcentage d'humidité dans le cas du hêtre. Enfin, nous avons mesuré une variation de 2% par pourcentage d'humidité pour le module de Young.

4. Essais de portance locale

Des essais de portance locale ont été réalisés sur les trois essences : chêne, hêtre et peuplier. Pour chaque essence, des essais longitudinaux et transversaux, pour des diamètres de broche de 12, 16 et 20mm, ont été menés. Tous les essais ont suivi le protocole recommandé dans la norme NF EN 383, « Structures en bois - Méthodes d'essai - Détermination de caractéristiques de fondation et de la portance locale d'éléments d'assemblage de type broche ».

Au préalable, les bois ont été rabotés et stabilisés à une température de 20 ± 2 °C et une humidité de 65 ± 5 % pour assurer une stabilisation autour de 12% d'humidité. L'humidité sera mesurée afin de corriger nos valeurs de portance et de masse volumique à 12 % d'humidité. Les pinces des éprouvettes sont présentées dans les schémas qui suivent conformément à la norme NF EN 383. Celles-ci sont fonction de l'épaisseur de l'éprouvette et du diamètre de la tige étudiée (Cf. figures 3 et 4). L'appareillage d'essai doit être tel qu'il n'existe entre les plaques d'acier et les éprouvettes aucune friction pouvant influencer la prise de mesure. Pour cela, un système de roulements à aiguilles sera mis en place entre notre éprouvette et le banc de compression. Le montage est constitué de deux joues en acier comportant une entaille afin de positionner la broche. La broche est considérée encastrée sur les joues. Pour ce faire, un fermoir vissé vient sur cette broche. La figure 19 présente ce dispositif.

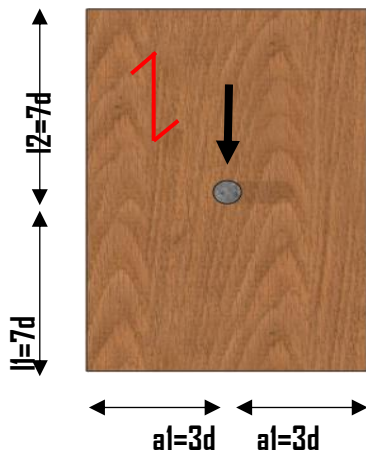
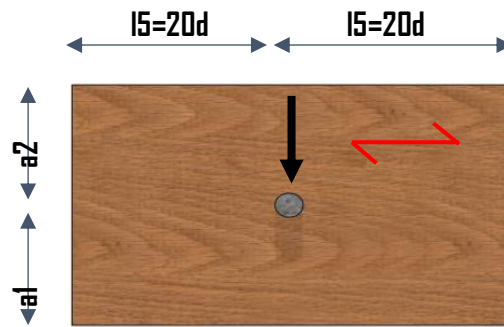
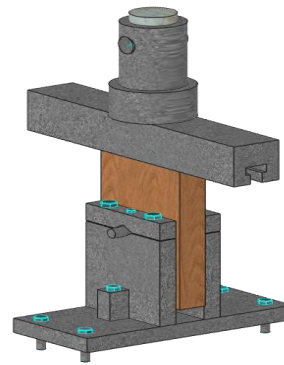
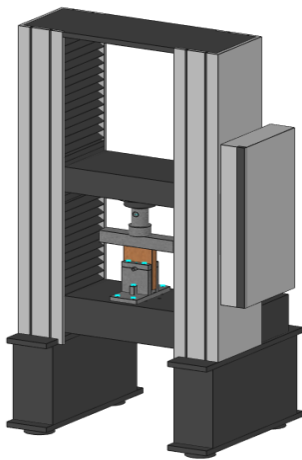
Figure 3: Pincés essais $\alpha = 0^\circ$ Figure 4 : Pincés essais $\alpha = 90^\circ$ 

Figure 5 : Dispositif de mesure ZWICK

Une loi de comportement pour la portance locale parallèle et perpendiculaire au sens du fil a pu être déterminée. Nous observons une forte différence avec l'eurocode 5. En effet, la portance locale perpendiculaire au sens du fil est inférieure à celle donnée par l'Eurocode 5 en valeur caractéristique. Pour calculer la portance locale à différent angle par rapport au fil du bois, l'Eurocode 5 utilise la formule d'Hankinson. Pour ce faire, il y a l'intégration d'un facteur correctif K_{90} qui correspond au ratio $f_{h,0}/f_{h,90}$. Rappelons que ces valeurs sont fonction du type de matériau :

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d & \text{pour les résineux} \\ 1,30 + 0,015d & \text{pour le LVL} \\ 0,90 + 0,015d & \text{pour les feuillus} \end{cases}$$

Les essais réalisés montrent que le facteur correctif K_{90} proposé par l'eurocode 5 est inférieur aux valeurs expérimentales mesurées. Cette différence est principalement due à la surestimation de la valeur de la portance transverse.

5. Références bibliographiques

- [1] Restitution de l'étude EU-HARDWOOD – HOLZFORSCHUNG AUSTRIA ; FVA BADEN-WURTTENBERG ; UNIVERSIRY OF LJUBLJANA ; MPA STUTTGART ; FCBA ; CBD CONTEMPORARY BUILDING DESIGN - Garmisch-Partenkirchen – 2016.
- [2] Creation of new markets and applications for native hardwoods – Research activities in Göttingen - Antje GELLERICH - Forum Construction Bois – 2017.
- [3] Mémento FCBA 2016 – FCBA – 2016.
- [4] NF EN 338 : Bois de structure – Classes de résistance – 2016.
- [5] NF EN 384 : Bois de structure – Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique – 2016
- [6] Allocation of central European hardwoods into EN 1912 – P. GLOS ; J. K. DENZIER - CIB W18/ 39-6-1 – 2006.
- [7] NF EN 408 + A1 : Structures en bois. Bois de structure et bois lamellé-collé. Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques – 2012.
- [8] NF EN 13183-1 : Teneur en humidité d'une pièce de bois scié. Partie 1 : Détermination par la méthode par dessiccation – 2002