Caractérisation mécanique des bois feuillus Français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5

Thibault Benistand

▶ **To cite this version:**

Thibault Benistand. Caractérisation mécanique des bois feuillus Français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5. Matériaux. Université de Lorraine, 2019. Français. NNT : 2019LORR0225 . tel-02552376

HAL Id: tel-02552376
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02552376

Submitted on 23 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

École Doctorale SIMPPE - ED 608
(Sciences Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Energie)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE l'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences du bois et des fibres »

Thibault BENISTAND

Caractérisation mécanique des bois feuillus Français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5.

Le 19-11-2019

Membres du jury :

Rapporteurs : **Loïc BRANCHERIAU** : Chargé de recherche (HDR), CIRAD, Montpellier.
Jean-Luc COUREAU : Maître de conférences (HDR), I2M-Université de Bordeaux.

Examinateurs : **Christine GERARDIN** : Professeur, Université de Lorraine, Nancy
Frédéric DUBOIS : Professeur, GC2D-Université de Limoges, Egletons

Directeur de thèse : **Laurent BLERON** : Professeur, ENSTIB-Université de Lorraine, Epinal
Co-directeur : **Jean-François BOCQUET** : Maître de conférences, ENSTIB-Université de Lorraine, Epinal

Invités : **Clément BOUDAUD :** Maître de conférences, LIMBHA, ESB, Nantes
Jean-Denis LANVIN : Dr Ingénieur chef de projet, Institut technologique FCBA, Bordeaux

---

USC 1445 – Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le MAtérieau Bois (LERMAB).
27 Rue Philippe SEGUIN – CS 60036 – 88 026 – EPINAL – France.

REMERCIEMENTS

L'élaboration de ce mémoire s'est faite pas à pas. Ce travail n'aurait pu aboutir sans l'aide de plusieurs personnes à qui je tiens à rendre hommage.

Dans un premier temps je tiens à remercier L'ANR qui a financé le projet de recherche EFEUR 5. Je remercie mon directeur et co-directeur de thèse de m'avoir fait confiance pour travailler sur le sujet des bois feuillus. Je leur suis reconnaissant d'avoir toujours trouvé le temps, malgré leurs emplois du temps chargés, pour échanger, apporter des réponses, lire et relire mes rapports et surtout permis de pousser toujours plus loin les réflexions.

Je remercie Laurent BLERON pour ses précieux conseils et sa connaissance de la filière bois. Il m'a bien souvent permis de prendre du recul vis-à-vis des résultats expérimentaux et de trouver de nouveaux axes d'interprétation.

Je remercie tout particulièrement Jean-François BOCQUET, qui au cours de ces 3 années m'a encouragé à toujours pousser plus loin les raisonnements et les analyses. Merci également pour nos discussions diverses qu'y m'ont permis de porter un regard nouveau sur le monde et la société…

Merci à Nicolas SAUVAT, Maximin VARNIER, Cédric MONTERO, Julien RUELLE, Joseph GRIL, Eric MASSON, membres du projet ANR EFEUR5 et de mon comité de suivi de thèse pour leurs regards critiques et leurs commentaires sur mon travail pour en améliorer la qualité. D'une façon générale, je remercie la communauté de la recherche bois pour les très bons moments passés dans le cadre des journées du GDR bois.

Mes remerciements vont bien évidement aux membres du jury Loïc BRANCHERIAU, Jean-Luc COUREAU, Fréderic DUBOIS, Christine GERARDIN, Clément BOUDAUD et Jean-Denis LANVIN qui ont accepté d'examiner mon travail.

Je voudrais en profiter pour exprimer toute ma gratitude envers les personnes qui m'ont soutenu et supporté durant ces trois années. Je pense tout particulièrement à :

Mes collègues du bureau 6N21. Je suis reconnaissant envers Damien LATHUILLERE pour nos différents échanges au sujet des protocoles expérimentaux, son expérience dans ce domaine fut plus que précieuse. Merci à romain LEMAITRE d'avoir partagé ses connaissances et sa bibliographie sur les assemblages bois. Je remercie également Stéphane AUBERT d'avoir toujours répondu présent dès lors que je le sollicitais. Ces trois années à vos côtés resteront inoubliables.

Linda BOSSERR, gestionnaire du LERMAB, pour sa disponibilité, sa réactivité et sa joie de vivre. Au cours de ces trois années, tu es devenue comme une deuxième maman.

Merci à mes deux groupes de PFE de l'ENSTIB pour m'avoir assisté sur la caractérisation des assemblages. Benjamin, David, Bastien et Pierre-Alexandre votre aide fut extrêmement précieuse. Merci à Anthony et à Victorien de m'avoir aidé dans le cadre de vos stages. Je suis également reconnaissant envers tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce projet : Romain, Pascal, Mélanie, Eric, Christophe, Stéven, Youssef, Antoine et j'en oublie certainement pleins d'autres…

L'ENSTIB et le service technique pour la mise à disposition de la halle et des outils. La halle technologique est un lieu magique où un morceau de hêtre ou une palette de chêne peu disparaitre à tout moment…. Je remercie particulièrement Cyril DEHARBE qui m'a formé sur les machines de l'ENSTIB et qui m'a toujours aidé à trouver des solutions pour faciliter les usinages des éprouvettes.

Mes derniers mots de remerciement sont consacrés à mes proches :

Ma belle-famille pour leurs mots d'encouragement et les bons moments passés ensembles. Merci tout particulièrement à mon beau-frère pour le temps consacré aux relectures en anglais.

Ma petite famille spinalienne pour le bonheur qu'elle me procure au quotidien. Merci à Mac de m'apporter réconfort et sérénité, un simple mouvement de nez permettant bien souvent d'oublier les tracas du quotidien. Merci à Horatio pour son sens inégalé du partage. Et finalement mes plus gros remerciement vont à Marion DEGAUCHY d'avoir soutenu mes choix, supporté mes doutes et mes angoisses et d'avoir relu en intégralité plusieurs fois ce manuscrit.

Je finirais par remercier les membres de ma famille pour leur soutien inconditionnel. Les mots me manquent pour exprimer à quel point je vous suis reconnaissant… Merci tout particulièrement à mon père pour m'avoir transmis sa passion du matériau bois et à ma mère pour l'ensemble du temps consacré à relire mes manuscrits au cours de l'ensemble de ma scolarité. Je vous dédie ce travail à tous les deux.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS **3**

TABLE DES MATIERES **5**

INTRODUCTION **7**

OBJECTIFS DU PROJET EFEUR 5 ..... **10**

CHOIX DES ESSENCES POUR LE PROJET EFEUR5 ..... **12**

CHAPITRE 1 : BIBLIOGRAPHIE GENERALE **13**

1.1. GENERALITES SUR LA COMPOSITION ET LA CROISSANCE DU BOIS 14
1.2. FACTEURS AYANT UNE INFLUENCE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DES BOIS D'ŒUVRE 18

CHAPITRE 2 : DEMARCHE D'ECHANTILLONNAGE **25**

2.1. PROPRIETES SPECIFIQUES A LA GRUME 26
2.2. CLASSES DE RESISTANCE MECANIQUES ET METHODE DE CLASSEMENTS 27
2.3. CLASSEMENT DES BOIS DU PROJET EFEUR 5 29

CHAPITRE 3 : PROPRIETES MECANIQUES DES BOIS FEUILLUS **31**

3.1. BIBLIOGRAPHIE 32
3.1.1. Historique des relations entre les propriétés mécaniques *32*
3.1.2. Propriétés mécaniques principales *35*
3.1.3. Propriétés mécaniques secondaires *38*
3.1.4. Synthèse des méthodes de détermination des corrélations entre les résistances *48*
3.1.1. Conclusion de l'étude bibliographique *50*
3.2. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX 51
3.2.1. Normes *51*
3.2.2. Dispositif de mesure *51*
3.2.3. Montages, systèmes de mesures & dimensions *52*
3.2.4. Sections & matériaux *60*
3.2.5. Données d'essais complémentaires *61*
3.2.6. Cycle de chargement *62*
3.2.7. Méthode d'analyse des essais expérimentaux *63*
3.3. COMPORTEMENT TYPE DES DIFFERENTS ESSAIS 70
3.4. SYNTHESE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX 75
3.5. NOUVELLES RELATIONS ENTRE LES PROPRIETES MECANIQUES 77
3.5.1. Masse volumique moyenne $\boldsymbol{\rho mean}$ *77*
3.5.2. Module d'élasticité caractéristique $\boldsymbol{Em,0,k}$ *77*
3.5.3. Module d'élasticité transversale $\boldsymbol{E90,mean}$ *78*
3.5.4. Module de cisaillement $\boldsymbol{Gmean}$ *78*
3.5.5. Résistance en compression axiale $\boldsymbol{fc,0,k}$ *79*
3.5.6. Résistance en traction axiale $\boldsymbol{ft,0,k}$ *83*
3.5.7. Résistance en compression transversale $\boldsymbol{fc,90,k}$ *87*
3.5.8. Résistance en cisaillement $\boldsymbol{fv,k}$ *90*
3.6. RESULTATS EXPERIMENTAUX SECONDAIRES 93
3.6.1. Relation entre module local $\boldsymbol{E0,l}$ *et module local* $\boldsymbol{E0,g}$ *93*
3.6.2. Influence de la qualité des billons sur les propriétés mécaniques *94*
3.6.3. Influence de la section sur la résistance en flexion *95*
3.6.4. Influence du bois juvénile sur les propriétés mécaniques *98*
3.6.5. Influence de l'humidité sur la résistance en compression axiale *99*
3.7. CONCLUSION CHAPITRE 3 101

CHAPITRE 4 : PROPRIETES POUR LE CALCUL DES JONCTIONS 103

4.1. BIBLIOGRAPHIE 104
4.1.1. Typologies d'assemblages 104
4.1.2. Raideur des assemblages 107
4.1.3. Résistance des assemblages de type tige 110
4.1.4. Conclusions de l'étude bibliographique 122
4.2. ESSAIS DE PORTANCE LOCALE 123
4.2.1. Protocole d'essais de la portance locale 123
4.2.2. Résultats expérimentaux 131
4.2.3. Loi de portance à 0° 135
4.2.4. Loi de portance à 90° 140
4.2.5. Variation de la portance en fonction de l'angle 144
4.2.6. Conclusions 147
4.3. ESSAIS D'ASSEMBLAGE 148
4.3.1. Protocole d'essai 148
4.3.2. Résultats expérimentaux significatifs 153
4.3.3. Raideur 157
4.3.4. Résistance 165
4.3.5. Conclusions sur les lois proposées 174
4.4. CONCLUSION CHAPITRE 4 175

CHAPITRE 5 : VALORISATION DES BOIS FEUILLUS 177

5.1. TECHNIQUES DE CONSTRUCTION TRADITIONELLES 178
5.2. METHODE ALTERNATIVE DE CLASSEMENT MECANIQUE 184
5.3. METHODE DE VALORISATION DE LA LAMES GARANTIES 194
5.4. CONCLUSION CHAPITRE 5 202

CONCLUSION GENERALE 203

PERPSPECTIVES 206

BIBLIOGRAPHIE 207

LISTE DES FIGURES 212

LISTE DES TABLEAUX 215

ANNEXE A : CLASSEMENT VISUEL 217

ANNEXE B : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 220

ANNEXE C : TRAITEMENT DES DONNEES CAMERA 222

ANNEXE D : DEMARCHE D'ANALYSE STATISTIQUE SELON EN 14358 [71] 223

ANNEXE E : TABLEAUX DE DONNEES DES ESSAIS D'ASSEMBLAGES 225

ANNEXE F : ESSAIS VIBRATOIRES POUR LA VALORISATION DES LAMES 232

INTRODUCTION

Au néolithique, l'homme commence à se sédentariser en adoptant un modèle de subsistance basé sur l'élevage et l'agriculture, donnant ainsi lieu à la création des premiers villages. La terre et le bois, matériaux présents localement en abondance et facilement transformables, constituent alors les deux principaux composants des constructions.

Pendant l'antiquité, la découverte de la chaux et du système de construction par voute permet un regain d'intérêt pour les structures maçonnées. A partir de cette époque, bois et pierre vont largement cohabiter, le bois restant le matériau privilégié pour la réalisation des toitures, planchers et échafaudages. L'organisation sociale des gaulois, principalement axée sur l'agriculture et non sur la construction, explique le choix du bois et du torchis pour la construction des habitations. En effet, ces matériaux sont bien plus faciles à transporter, travailler et assembler que la pierre. Du fait de l'influence grandissante de l'empire romain, les gallo-romain se font construire en maçonnerie de confortables demeures en ville (*DOMUS*) et à la campagne (*VILLAE*).

Le début du Moyen Age est principalement caractérisé par les invasions barbares et le déclin de l'empire romain. Cette période se traduit par une réduction de l'habitat regroupé sous forme de ville (mis à part celles protégées par des remparts) et une perte des techniques de construction romaines. Les constructions sont ainsi assez similaires à celles des gaulois. Le bois est incontournable mais le travail de ce matériau s'avère toujours assez laborieux. C'est la raison pour laquelle il est principalement utilisé sous forme de bois ronds de petits diamètres justes écorcés. A partir du VII^{ème} siècle, le regroupement des habitations sous formes de bourgs et de villes va à nouveau retrouver un intérêt. La société s'organise ainsi en regroupant dans un même lieu les pouvoirs religieux politique et économique (artisanat ou commercial) le tout protégé par une force militaire. Les premières formes de châteaux forts, édifiées à la fin du IX^{ème} siècle (les mottes castrales), étaient faites en bois avant de céder leur place à la pierre au XI^{ème} siècle. Le développement des corporations de charpentiers et des savoir-faire permettent l'apparition de structures plus complexes telles que les constructions en colombage. Ces structures du type poteau-poutre sont constituées d'un exosquelette en bois travaillant principalement en compression pour la reprise des charges alors que les vides sont comblés par le hourdage (composé aux choix de briques, torchis, paille, bauge…). Que ce soit pour les constructions des habitations ou pour les charpentes des cathédrales, les bois utilisés sont principalement des bois feuillus de petit diamètre simplement équarris avec une doloire. Cependant, dans les grandes villes, les incendies fréquents conduisent à différentes interdictions de construction selon cette technique pour limiter la propagation du feu entre les habitations.

Au cours de la renaissance (fin du XV^{ème} et XVI^{ème} siècle), les influences de l'architecture italienne contribuent à une modification profonde vers le bâti «en dur » (pierre, briques crues ou cuites, pisé…). Si cette évolution touche en premier les bâtiments publics, militaires et religieux, elle supplante au fil du temps les constructions d'habitations en commençant par les maisons des nobles, bourgeois et commerçants. Jusqu'au XVIII^{ème} siècle, les constructions « en dur » prennent de plus en plus le pas sur les constructions en bois, même si en Normandie, dans les Landes, en Alsace et dans certaines zones de montagne, la tradition de la construction bois perdure, notamment avec l'implantation de scierie basée sur la force hydraulique.

En 1889, la tour Eiffel surplombe Paris, faisant de l'acier le matériau « moderne ». La révolution industrielle et l'invention du béton armé permettent une substitution du bois pour la confection des planchers. Le béton permet également de se passer de l'utilisation du bois pour la couverture avec l'apparition de toiture plate. La mécanisation et le transfert entre une société basée sur l'agriculture vers une société industrielle contribue à l'évolution de l'habitat avec l'apparition des premières citées ouvrières construites pour la plupart en briques de terre cuite. Néanmoins, c'est aussi pendant cette période que les techniques de sciages et d'usinages se modernisent, les bois sciés remplaçants les grumes simplement équarries.

En 1900 le lamellé collé apparaît en Allemagne et s'exporte dans toute l'Europe. Otto HETZER, en se basant sur l'idée originale de poutres assemblées par clavetage de type Philibert DELORME, dépose un premier brevet pour la confection des poutres composées de lamelles de pin assemblées par de la colle et un second pour la réalisation d'éléments de construction cintrés en bois lamellé-collé. Cette véritable révolution technique permet de surpasser les capacités naturelles du bois massif et apporte de nouvelles dimensions à la construction bois.

La première guerre mondiale mobilisera un nombre important de charpentiers dans les travaux d'étaiement des tranchées, contribuant ainsi à une perte massive des savoir-faire et portant un coup fatal à la profession. Le nombre de « sachant construire » (maçons, tailleurs de pierre, charpentiers…) ayant été très largement impacté par ce conflit, ils n'étaient plus assez nombreux pour répondre à la demande croissante d'habitations pour les ouvriers toujours plus nombreux dans les usines. Le parpaing en ciment, dans un premier temps plein puis ensuite creux, produit standardisé, simple à produire, peu couteux et relativement facile et rapide à mettre en œuvre, s'est peu à peu imposé dans la construction et a connu depuis la seconde guerre mondiale un grand essor. Les moyens de transport se développent, avec des capacités de chargement en constante augmentation, facilitant ainsi la consommation de produits de provenance plus lointaine qu'auparavant. Le bois utilisé dans les constructions ne se limite plus à une ressource locale.

Le XX^{ème} siècle est donc marqué par l'exode rural et le développement de la ville. La construction verticale est indispensable pour faire face au manque de place. Il faut construire rapidement à proximité des villes, d'où l'utilisation des matériaux disponibles dans les zones industrielles avoisinantes : béton, acier, aluminium, verre, plastiques… A partir des années 1975, le développement des réseaux routiers, la popularisation de la voiture et l'augmentation du prix des loyers vont pousser de nombreux foyers à investir dans des pavillons individuels de plus en plus loin des villes. C'est l'explosion des lotissements d'habitation et de l'utilisation massive de charpentes industrielles en bois résineux venues des états unis.

Depuis les années 2000 et la prise en compte des enjeux socio-environnementaux de la construction, le bois est revenu à la mode avec le développement des maisons à ossature bois mais également des projets de plus en plus ambitieux tant au niveau de leur portée que de leur hauteur avec notamment les premiers immeubles supérieurs à 10 étages.

Le mode de vie de plus en plus confortable et accessible au plus grand nombre a entraîné une surconsommation croissante des ressources naturelles. JANCOVICI l'expose très clairement dans son ouvrage [1] : les ressources se raréfient avec par exemple, depuis 1985, une consommation de pétrole supérieure aux quantités découvertes. Pour que nous puissions vivre et répondre à nos besoins sans compromettre les capacités des générations futures à répondre à leurs propres besoins une fracture brutale de la société doit se produire, basée sur la décroissance et la sobriété énergétique (comme par exemple ce qui est proposé par le scénario NEGAWATT [2]). Pour contribuer à cet objectif de développement durable, la construction doit elle aussi évoluer pour proposer des bâtiments moins énergivores, autant au cours de leur construction qu'au cours de leur exploitation. Le bois, ressource renouvelable à « court terme » est un des matériaux qui permettra cette révolution. Le bois oui, mais quelle ressource ?

Actuellement il est principalement utilisé du résineux pour construire alors que la forêt française est composée au 2/3 de feuillus. L'étude conjointe du FCBA et de l'IGN [3] sur la disponibilité forestière pour l'énergie et les matériaux montre qu'actuellement, la demande en bois d'œuvre résineuse est supérieure à l'offre obligeant l'importation de 1 Million de m^3 de bois équivalent bois rond. Selon ce document, même en mettant en place une sylviculture dynamique, selon leur prévision, la forêt n'arrivera pas à produire suffisamment de bois pour répondre à la demande croissante sur les essences résineuses. En parallèle, la consommation des bois feuillus en bois d'œuvre (5 Millions de m^3) correspond à 50% du volume de bois disponible sur pied annuellement.

Il semble même qu'actuellement, une partie des bois d'œuvre récoltés soit réorientée vers les filières bois énergie et bois industrie. Les bois feuillus, à condition qu'ils permettent de se substituer aux bois résineux pour des applications bois d'œuvre, offrent une potentielle solution pour limiter les importations ou des campagnes de reboisement mono-essence résineuse.

Dans les années 70, la Commission Européenne est arrivée à la conclusion que, pour permettre la création d'un marché unique pour les produits de construction, il était indispensable de mettre en place des normes Européennes sur les dits produits mais également d'harmoniser les règles de conception des ouvrages entre les états membres. Dans les années 1980, les premières ébauches de ces textes sont produites, leur but ultime étant de permettre le libre accès des entreprises aux marchés de construction des autres Etats membres. Le programme de rédaction des EUROCODES a pris fin en 2005, et depuis mars 2010, il n'est plus possible pour les marchés publics d'utiliser les anciennes normes nationales en contradiction avec ce nouveau référentiel (CM 66 (additifs 80), BAEL 92, CB 71). Il est dénombré 60 EUROCODES regroupés en 10 familles, comportant pour chacune une partie générale (Partie 1-1), une partie portant sur le comportement des structures vis-à-vis de l'incendie (Partie 1-2) et parfois une partie 2 concernant les ouvrages d'art. Les 4 familles principalement utilisées en construction bois sont :

- EUROCODE 0: Bases de calcul des structures (EN 1990)
- EUROCODE 1: Actions sur les structures (EN 1991)
- EUROCODE 5: Conception et calcul des structures en bois (EN 1995)
- EUROCODE 8: Calcul des structures pour leur résistance aux séismes (EN 1998)

Il est nécessaire d'ajouter les EUROCODE 3 : Calcul des structures en acier (EN 1993), pour la justification des tirants métalliques et des ferrures d'assemblage utilisées en construction bois.

La démarche de calcul repose sur une estimation semi-probabiliste de la sécurité des constructions (méthode des coefficients partiels) combinée aux méthodes de dimensionnement basées sur le principe des états limites (Etats Limites de Service (ELS) ou Etats Limites Ultimes (ELU)).

Ces codes de calculs font appel à des normes associées qui définissent des exigences particulières concernant les performances des constructions (NF-EN, DTU et normes ISO), les propriétés mécaniques des matériaux employés, les méthodes permettant d'estimer ces propriétés mécaniques, les exigences et tolérances de fabrication et de mise en œuvre… Pour la suite de la thèse, il sera appelé EUROCODE toute cette démarche de justification par le calcul d'une solution technique.

Les EUROCODES et les normes associées sont bâtis sur les expériences et recherches menées au cours des 70 dernières années, principalement sur des bois résineux. Une meilleure utilisation du bois feuillu dans les structures ne peut se faire qu'en conduisant des études similaires sur ces essences (BLERON & All [4]). Ces travaux doivent permettre de redéfinir les paramètres de calcul ainsi que les propriétés mécaniques de ces bois afin de trouver un optimum dans la mise en œuvre et ainsi lever un des premiers freins à la valorisation de cette ressource. La standardisation des produits de construction a introduit la notion de classement mécanique des bois utilisés en construction. Un deuxième frein à la valorisation des feuillus est le classement visuel des sciages qui oblige l'utilisation de bois de très bonne qualité (plutôt destinés à la menuiserie) impliquant de fait une ressource plus chère que les bois résineux. Il convient donc de s'intéresser plutôt aux bois de qualité secondaire qui constituent la seule ressource à pouvoir proposer une alternative économiquement viable aux bois résineux.

Le programme EFEUR5 (comportements structurels des **E**ssences de bois **F**euillus français en vue de leur meilleure intégration aux **EUR**ocodes **5**) a cet objectif et cette ambition pour conduire à la mise sur le marché de produits structurels issus de bois feuillus français.

OBJECTIFS DU PROJET EFEUR 5

Comme évoqué dans l'introduction, le projet vise à développer des outils et des connaissances nécessaires à une utilisation plus importante des bois feuillus français dans la construction. L'objectif principal est de fiabiliser l'utilisation de ces essences pour les structures en bois justifiées selon les règles EUROCODES par les validations ou les corrections nécessaires. Bien que des études sur certaines essences feuillues existent, elles doivent être largement complétées par de nouvelles données scientifiques et expérimentales. Le projet se construit ainsi autour des savoir-faire et des compétences scientifiques développées sur le matériau bois et les structures bois par les laboratoires LERMAB, GC2D (Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité – Egletons (19)), LMGC (Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil – Montpellier (34)) et le LERFOB (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois – Champenoux (54)). Pour favoriser l'utilisation des bois feuillus dans la construction, plusieurs incertitudes sont à lever, dont :

- La connaissance des comportements à long terme des bois d'essences feuillues (GEMH + LMGC)

- La connaissance des propriétés mécaniques dites secondaires des essences feuillues (LERMAB)

- La définition des modèles de calcul des assemblages des pièces de bois de feuillus (LERMAB)

- L'anticipation des propriétés mécaniques : connaissance de l'impact du développement de l'arbre sur les propriétés du matériau, lien entre anatomie et physique (LERFOB)

Le centre de transfert de technologie CRITT Bois coordonne ce projet, met en place le transfert des résultats et oriente les travaux pour des débouchés économiques majeurs pour la filière bois.

En ce qui concerne la connaissance des propriétés mécaniques, le corpus réglementaire définit les propriétés mécaniques secondaires (compression, traction & cisaillement) en fonction des propriétés mécaniques principales (masse volumique, module d'élasticité et résistance en flexion). Par l'expérimentation, le LERMAB cherche à valider que les relations proposées par la norme, principalement basées sur des essais réalisés sur des résineux, sont suffisamment optimales pour valoriser les essences majeures de bois feuillus français.

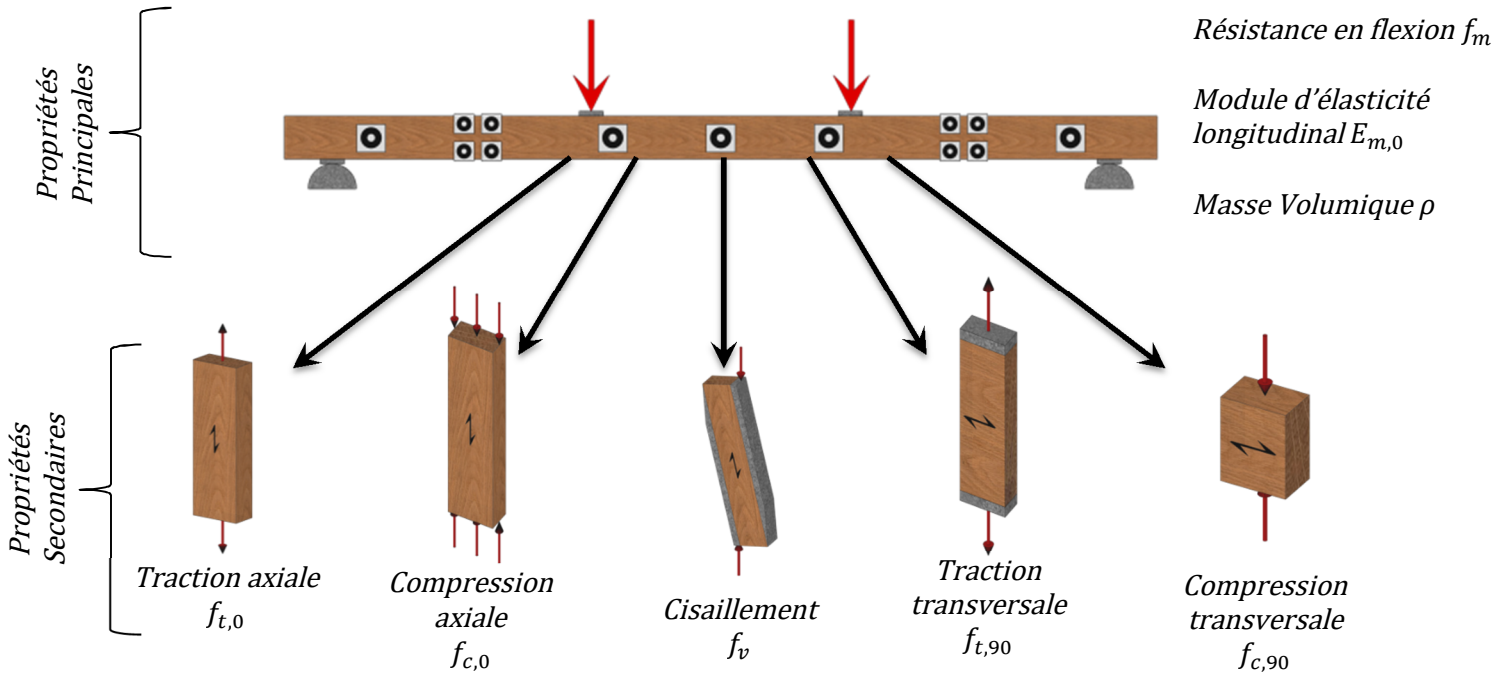
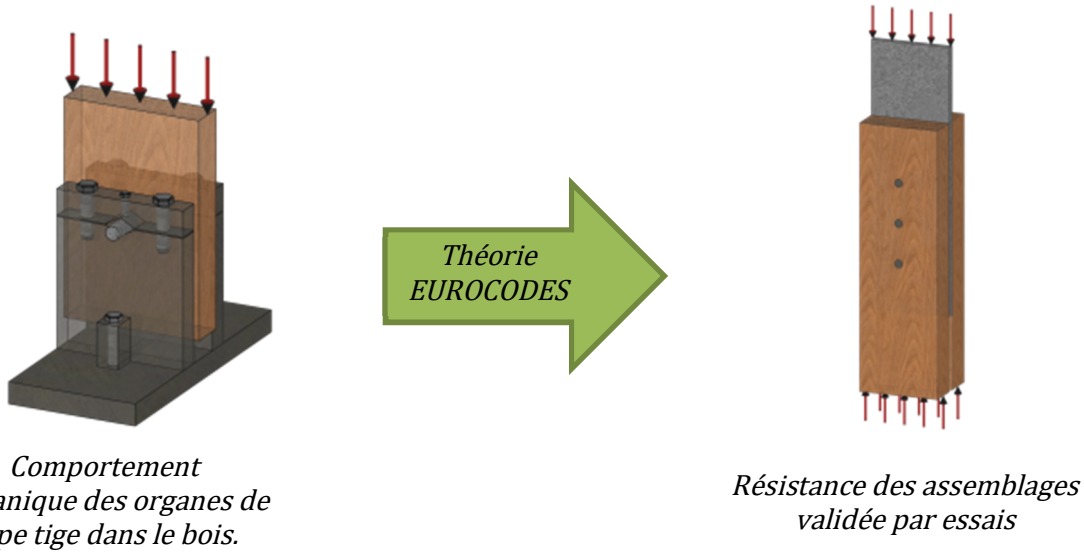


Figure 1 : Principe des relations entre propriétés mécaniques principales et secondaires.

Parmi toute la gamme d'assemblages utilisables par l'ingénieur en construction bois, il se trouve en majorité des assemblages mécaniques réalisés à l'aide de broches ou de boulons. Pour estimer les résistances mécaniques de ces assemblages, le code de calcul introduit d'une part des paramètres géométriques et d'autre part les propriétés mécaniques des matériaux utilisés (bois et acier). Dans le cadre du projet, le LERMAB doit réaliser une campagne expérimentale pour mieux comprendre le comportement des organes de type tige dans le bois et définir des lois de prédiction de ces propriétés propres aux bois feuillus. Pour valider ces lois et étudier le comportement global des assemblages, des essais sont réalisés selon différentes configurations.



Comportement mécanique des organes de type tige dans le bois.

Résistance des assemblages validée par essais

Figure 2 : Méthodologie suivie pour les assemblages de type tige.

In fine, l'analyse des données expérimentales permettra de faire le point des pistes de valorisation « traditionnelle » de la ressource bois feuillu dans la construction. Des pistes de valorisation pour des produits nouveaux seront également investiguées. En combinant les résultats obtenus par les travaux réalisés avec les principes d'une technologie développée au sein du laboratoire LERMAB, une nouvelle approche de valorisation a été formalisée. Cette approche est éprouvée dans le cadre d'un projet démonstrateur et les conclusions seront exposées.

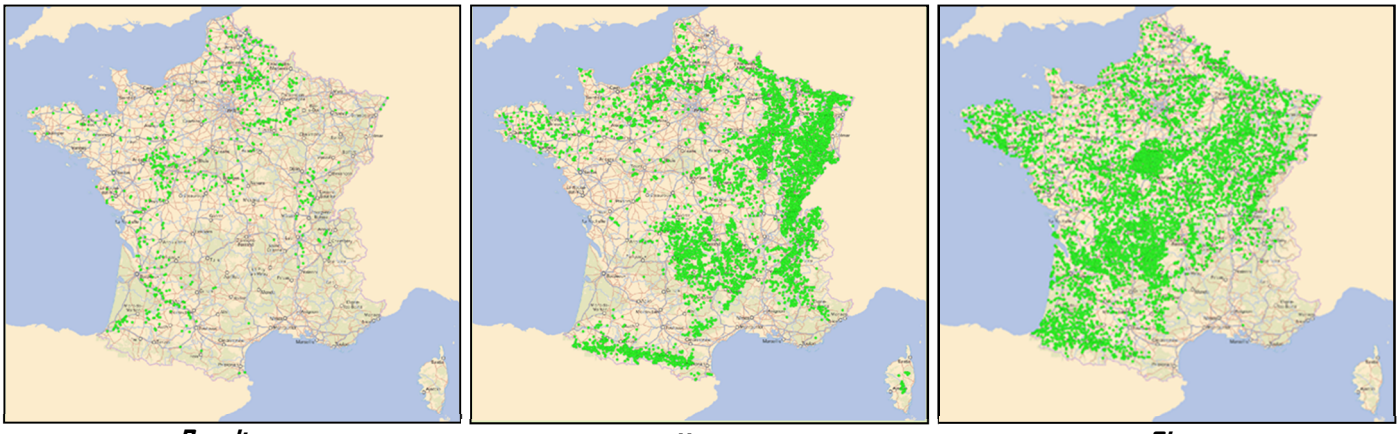
CHOIX DES ESSENCES POUR LE PROJET EFEUR5

La forêt Française est la plus grande forêt européenne avec une surface totale de quasiment 55 Millions d'hectares. Cette forêt est composée aux deux tiers de bois feuillus et au tiers de bois résineux. Les essences feuillues les plus répandues sont le chêne, le hêtre, le châtaignier et le peuplier avec un volume total sur pied de 1200 Millions de m^3.

Le projet EFEUR 5 se focalise sur les 3 essences ayant le plus gros potentiel d'emploi dans la construction. Selon les chiffres édités par FCBA [5] en 2018, sur les 5,4 Millions de m^3 de bois d'œuvre feuillu récoltés et commercialisés en France en 2016, il y a 2,4 Mm^3 de chêne, 1,4 Mm^3 de peuplier et 1,0 Mm^3 de Hêtre. Ces 3 essences représentent donc quasiment 90% des récoltes de bois d'œuvre feuillu réalisées en France et constituent donc un ensemble représentatif des bois potentiellement utilisables en construction. Le Tableau 1 donne la répartition en volume disponible sur pied ainsi que l'accroissement annuel de ces différentes essences. Ces chiffres montrent une forte disponibilité du chêne par rapport aux autres essences, que l'on remarque également au niveau de la répartition géographique (Figure 3), avec une ressource répartie uniformément sur le territoire, hormis dans le Sud-Est où les résineux (Pins, mélèzes…) sont majoritaires.

Tableau I : Volume sur pied et accroissement annuel des essences utilisées pour le projet EFEUR 5 [5].

Essence	Volume Mm^3	Accroissement annuel Mm^3 / an
Peuplier de plantation	29	2,2
Hêtre	322,7	7,96
Chêne	715,7	18,86



Peuplier ***Hêtre*** ***Chêne***

Figure 3 : Répartition géographique des essences utilisées pour le projet EFEUR 5. [https://inventaire-forestier.ign.fr/]

FCBA [6] & [7] a démontré que parmi les 24 cultivars de peupliers les plus répandus, seulement 6 (Beaupré, Robusta, Alcinde, Lambro, Lena et Soligo) ont des caractéristiques mécaniques suffisantes pour être utilisés en tant que bois de construction. Dans le cadre du projet EFEUR5, il est utilisé du Robusta planté depuis très longtemps partout en France mais principalement dans la moitié nord du pays. Malgré un faible volume disponible, le peuplier a l'avantage d'être un bois avec une croissance extrêmement rapide, permettant une sylviculture intensive et l'obtention de bois utilisable en bois de construction entre 20 et 25 ans en fonction des cultivars et du terrain [8].

FCBA s'est intéressé au hêtre français et propose une caractérisation de la ressource pour une utilisation structurelle répondant aux exigences du marquage CE [9] & [10]. Le hêtre étant la deuxième ressource feuillue française après le chêne, il représente un excellent candidat comme alternative aux bois résineux. Cela est d'autant plus vrai qu'à la suite de la tempête de 1999, l'essence est devenue compétitive en termes de prix d'achat.

CHAPITRE 1 : BIBLIOGRAPHIE GENERALE

Toute cette partie a pour but de décrire la composition et la formation du bois ainsi que ses potentiels effets sur les propriétés mécaniques utilisées pour la construction. Les informations présentées dans cette partie proviennent principalement du livre de GUITARD [11] et de la formation MOOC de TROUY [12].

1.1. GENERALITES SUR LA COMPOSITION ET LA CROISSANCE DU BOIS

L'arbre tel qu'imagé sur la Figure 1-1, se compose de différentes parties depuis le sol jusqu'à sa cime :

- Les racines qui ont pour rôle de puiser dans le sol les éléments nécessaires au développement de l'arbre (eau et éléments minéraux).
- Le collet qui désigne la zone de transition entre les parties souterraines et aériennes de l'arbre.
- Le tronc qui désigne la zone entre le sol et les premières branches, il sert principalement au soutien mécanique de l'arbre. Le bois d'œuvre provient de cette zone de l'arbre.
- Le houppier qui se compose des branches et du feuillage. C'est dans les feuilles que se produit la photosynthèse qui permet de synthétiser de la matière organique en utilisant l'énergie lumineuse. Le bois présent dans cette partie de l'arbre est plutôt destiné au bois énergie ou au bois industrie.

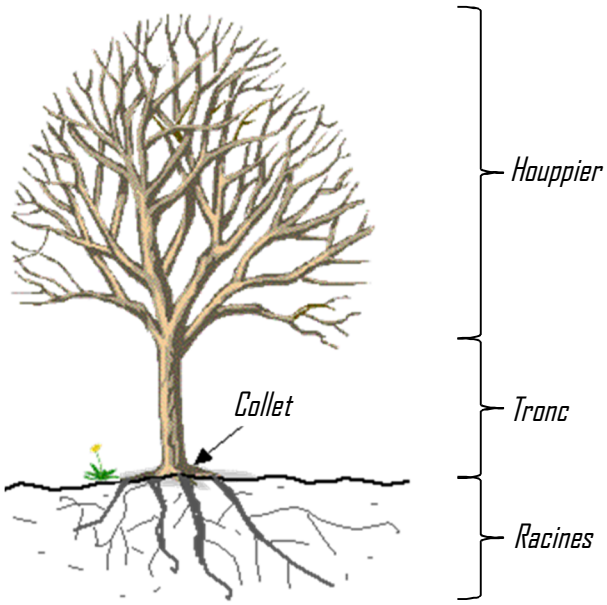


Figure 1-1 : Schéma type de l'arbre.

[http://www2.csdm.qc.ca/st-fabien/projets/arborophile/parties/parties.htm]

En plus d'assurer le rôle de soutien mécanique, le tronc et les branches permettent de faire circuler les différentes sèves (brute et élaborée) depuis les racines jusqu'aux feuilles. La structure de ces éléments est illustrée sur la Figure 1-2, ces différentes zones depuis l'extérieur vers l'intérieur jouent les rôles suivants :

- Le périderme composé du phelloderme, phellogène et du suber plus couramment appelé écorce. Cette zone permet la protection de l'arbre contre les agressions extérieures.
- Le liber est la couche de cellules permettant le transport de la sève élaborée contenant la matière organique nécessaire à la croissance de l'arbre.
- Le cambium est la zone de division cellulaire. Cette zone permet la croissance en diamètre de l'arbre, c'est dans cette zone que sont produites les nouvelles couches de liber (vers l'extérieur) et l'aubier vers l'intérieur. Les différentes cellules de bois formées la même année sont appelées un cerne.
- L'aubier est constitué des cellules récemment formées. Cette partie du tronc permet la circulation de la sève brute depuis le système racinaire jusqu'aux feuilles où se trouve stocké de l'amidon.
- Le duramen, ou bois parfait, qui est un bois plus ancien dans lequel les cellules sont mortes. Pour certaines essences, le bois parfait a une couleur différente de l'aubier, ce bois est appelé bois à aubier différencié. Cette zone a pour fonction principale le soutien mécanique de l'arbre.

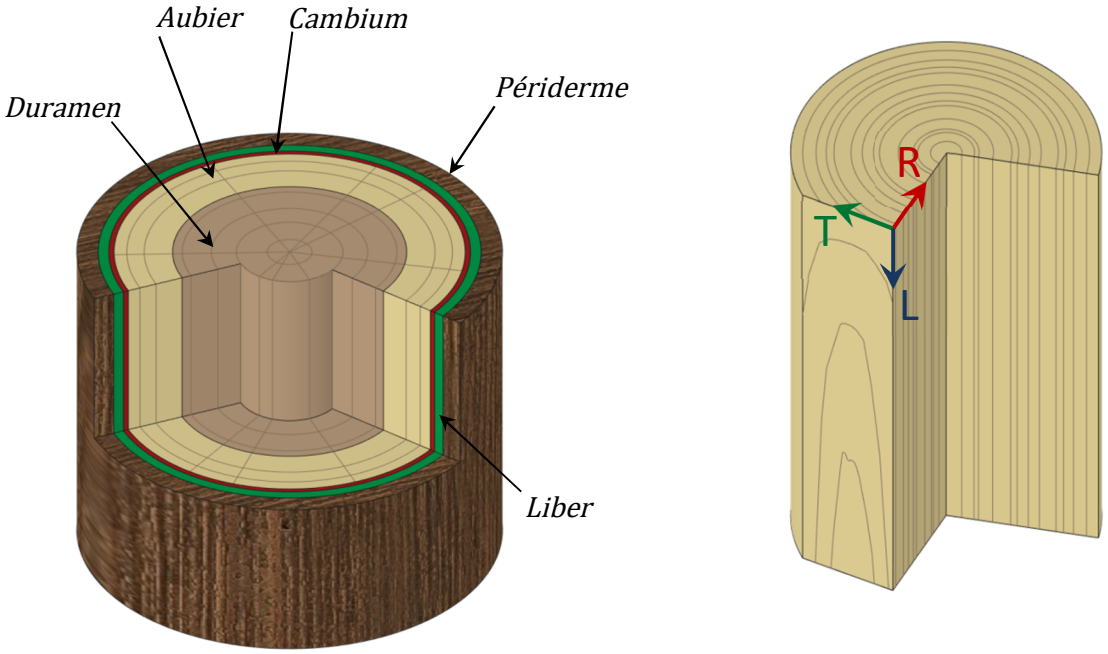


Figure I-2 : Schéma type du tronc (Gauche) – Directions principales de l'arbre (Droite).

La croissance circulaire de l'arbre ainsi que sa composition en font un matériau orienté anisotrope qui peut être repéré selon les 3 axes suivants et imagés sur la Figure 1-2 :

- Direction Longitudinale (L) qui correspond à l'axe du tronc ou de la branche.
- Direction Radiale (R) qui est perpendiculaire aux deux autres directions et qui passe par le centre biologique de l'arbre (appelé la Moelle).
- Direction Tangentielle (T) qui est la direction tangente aux cernes de croissances, donc normale au plan formé par les axes Longitudinaux et Radiaux.

La Figure 1-3 représente les différents éléments présents dans les bois feuillus ainsi que les principaux rôles :

- Les fibres sont des cellules spécialisées dans le soutien mécanique, elles se caractérisent par leur faible taille, leur paroi cellulaire épaisse et le lumen (vide à l'intérieur de la cellule) le plus réduit. Leur quantité ainsi que leur qualité (épaisseur des cellules) sont responsables de la densité du bois. Par exemple, le peuplier qui a une part de 55% de fibres est moins dense que le platane qui ne possède que 29% de fibres.
- Les vaisseaux constituent un empilement de cellules qui forment des canaux pour faire circuler la sève brute. Les diamètres de ces éléments varient entre 25 et 400 µm en fonction des espèces tout comme la densité de pores et leur répartition.
- Les rayons ligneux sont des cellules orientées selon la direction radiale et ont deux principales fonctions : permettre les échanges de sève brute entre les vaisseaux ou bien stocker des réserves nutritives constituées d'amidon.

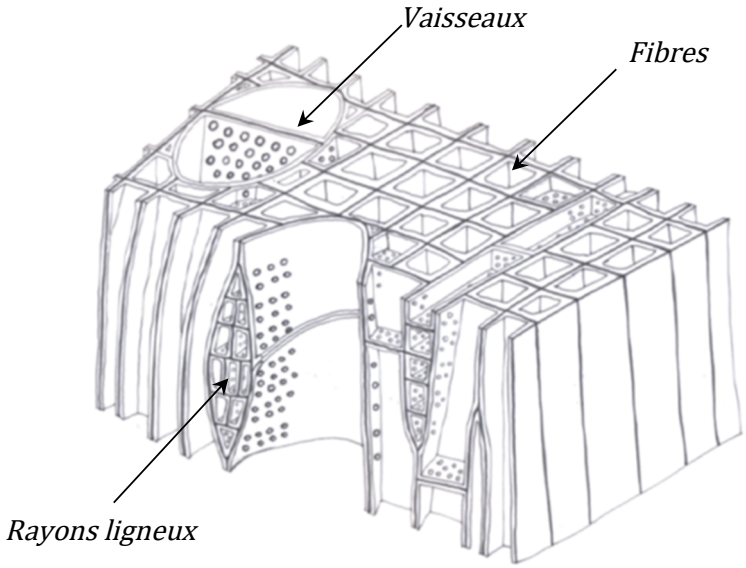


Figure I-3 : Schéma type de la microstructure des bois feuillus [12].

Les cernes d'accroissement retracent chacun une année de croissance de l'arbre. Un cerne est composé d'une zone avec du bois de printemps et d'une zone avec du bois d'été. En hiver l'activité cambiale s'arrête et le bois stoppe sa croissance. L'épaisseur des cernes ainsi que leur composition sont très dépendantes des conditions de croissance de l'arbre et de son essence.

Comme le montre la Figure 1-4, les 3 essences du projet EFEUR 5 présentent des microstructures très différentes :

- Le peuplier est un bois à aubier non différencié avec une disposition des vaisseaux homogène ayant une tendance de Zone Initiale Poreuse. Les rayons ligneux sont très fins et avec des fibres ayant une épaisseur de cellule assez faible conduisant à une densité moyenne de 0,45.
- Le hêtre est un bois à aubier non différencié avec une disposition homogène de vaisseaux. Les épaisseurs de rayons ligneux varient assez fortement et peuvent même déformer les limites de cernes.
- Le chêne est un bois à aubier différencié avec un aubier blanc et un duramen marron. C'est un bois à Zone Initiale Poreuse présentant des vaisseaux facilement observables à l'œil nu. Les rayons ligneux sont larges et présents en grandes quantités.

Figure I-4 : Coupe macroscopique des essences utilisées dans le cadre du projet EFEUR 5 [12].

La microstructure de ces essences permet de prédire en partie le comportement mécanique à l'échelle de la planche :

- Les fibres du peuplier avec une paroi cellulaire assez fine confèrent un comportement mécanique longitudinal moins résistant que les deux autres essences. Les lumens, importants dans ces cellules, présagent d'une rigidité et d'une résistance en compression transversale elle aussi inférieure.
- Pour le chêne, la zone initiale poreuse laisse pressentir un comportement en compression transversale et en cisaillement plus faible que sur le hêtre. De même, les rayons ligneux de tailles importantes constituent une faiblesse vis-à-vis du cisaillement.

La cellule de bois, qui peut être idéalisée par le schéma de la Figure 1-5, se compose de trois couches de fibres (microfibrilles de cellulose) noyées dans une matrice composée d'hémicellulose et de lignine. Il est à noter que l'orientation des microfibrilles change selon la position de la paroi dans la cellule. L'angle formé entre les fibres de la couche S2 et l'axe longitudinal de la cellule est appelé AMF (Angle des MicroFibriles). Dans le cadre de sollicitations mécaniques selon l'axe longitudinal du bois, la résistance est principalement liée à l'orientation des fibres présentes dans la couche S2 : plus l'angle d'AMF est proche de zéro et plus la cellule est capable de reprendre des charges importantes dans les directions longitudinales.

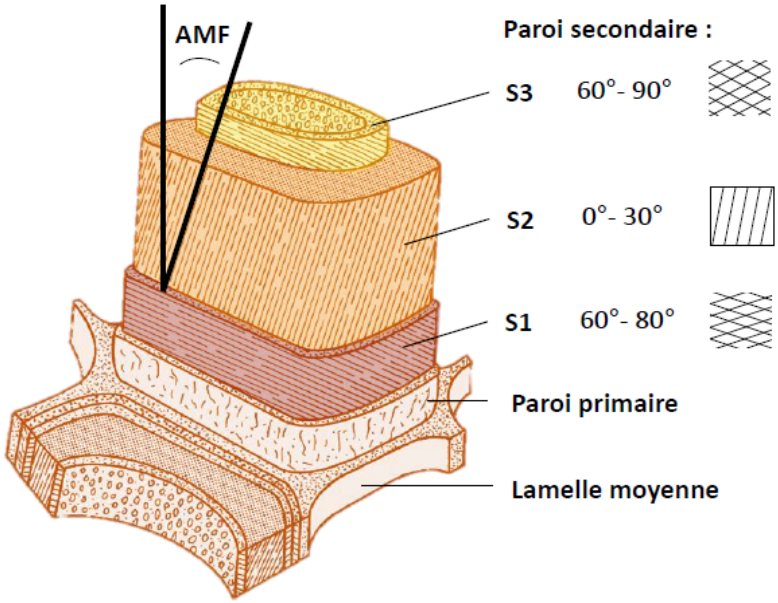


Figure I-5 : Décomposition de la paroi cellulaire du bois - Fig I.2 de BURGERS [13].

1.2. FACTEURS AYANT UNE INFLUENCE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DES BOIS D'ŒUVRE

a. Masse volumique

Comme évoqué dans la microstructure des bois, la masse volumique est principalement liée à la quantité et à la qualité des fibres. La corrélation entre masse volumique et propriétés mécaniques est donc assez facile à imaginer.

GUITARD [11] propose d'estimer les modules d'élasticité des bois feuillus et résineux, à partir de leur masse volumique, avec une équation spécifique à chaque famille d'essence. Ces équations montrent que les propriétés mécaniques s'améliorent avec l'augmentation de la masse volumique. L'étude expérimentale réalisée par GUITARD montre que pour du bois sans défaut, les relations entre masse volumique et module d'élasticité selon les 3 directions principales donnent des coefficients de corrélation compris entre 0,84 et 0,87 pour les résineux alors qu'ils sont plus faibles pour les feuillus (0,77 pour la direction longitudinale et environ 0,50 pour les directions radiales et tangentielles).

Dans ses travaux de thèse sur le classement mécanique des bois feuillus et résineux, VIGUIER [14] a mis en évidence une corrélation forte entre la masse volumique et les deux autres propriétés mécaniques principales que sont la résistance et le module d'élasticité dans les résineux (douglas et épicéa). En revanche, pour le chêne, la masse volumique ne donne aucune corrélation avec les autres propriétés mécaniques principales lorsque les essais sont réalisés sur des bois de qualité secondaire avec des sections correspondant aux dimensions des bois d'œuvre. Cette propriété est donc un indicateur mais ne peut donc pas à elle seule permettre de prédire la résistance des bois feuillus.

b. Bois juvénile – Bois mature

Tout au long de la croissance de l'arbre, la structure des cellules évolue. Dans les premières années le bois est qualifié de bois juvénile, puis il entre dans une zone de transition et devient finalement du bois mature. Le passage entre bois juvénile et bois mature ne se fait pas brusquement ; la structure du bois évolue en fonction de la maturation du cambium. Selon les travaux de recherches [15]& [16] il est estimé que la limite entre bois juvénile et bois mature se fait à partir d'une quinzaine d'années dans les résineux. Faute d'études sur les bois feuillus, il sera considéré la même hypothèse pour les feuillus du projet EFEUR 5.

Il y a deux principales différences entre bois juvénile et bois mature : une quantité de cellulose plus faible dans le bois juvénile et un angle de microfibrille de la couche S2 plus important dans le bois juvénile que dans le bois mature. L'impact de l'angle des microfibrilles sur la résistance et le module d'élasticité a été démontré par K. BORST & All [17]. La Figure 1-6 met en avant une diminution importante du module avec l'augmentation de l'angle des microfibrilles.

Les caractéristiques mécaniques inférieures du bois juvénile par rapport au bois mature constituent un réel problème pour la caractérisation mécanique des bois. A l'intérieur d'une même grume en fonction de la position de la pièce dans la grume, les propriétés mécaniques diminuent en fonction de la proximité de la moelle et de la hauteur dans l'arbre également. Ce phénomène est bien imagé par la Figure 1-7 avec une diminution de la résistance d'environ 30% dans les zones de la grume où la part de bois juvénile est plus importante.

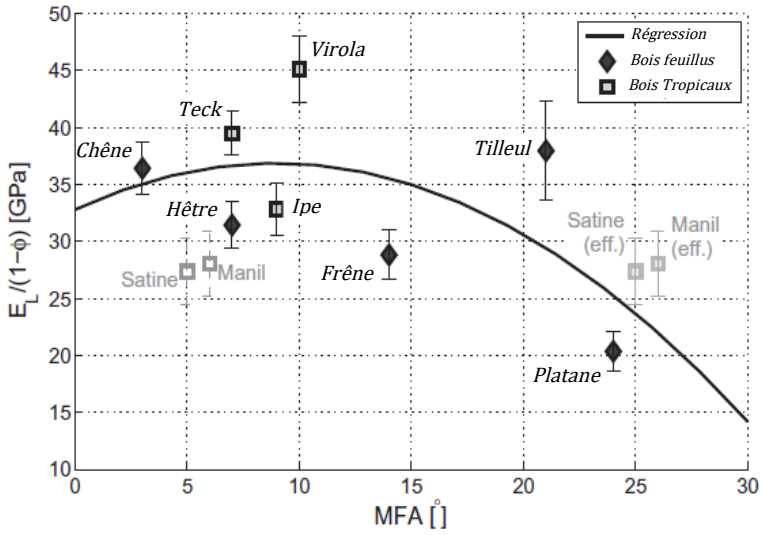


Figure 1-6 : Relation entre module d'élasticité E corrigé de la porosité ϕ en fonction de l'angle des microfibrile MFA Fig I.2 de BORST & All [17].

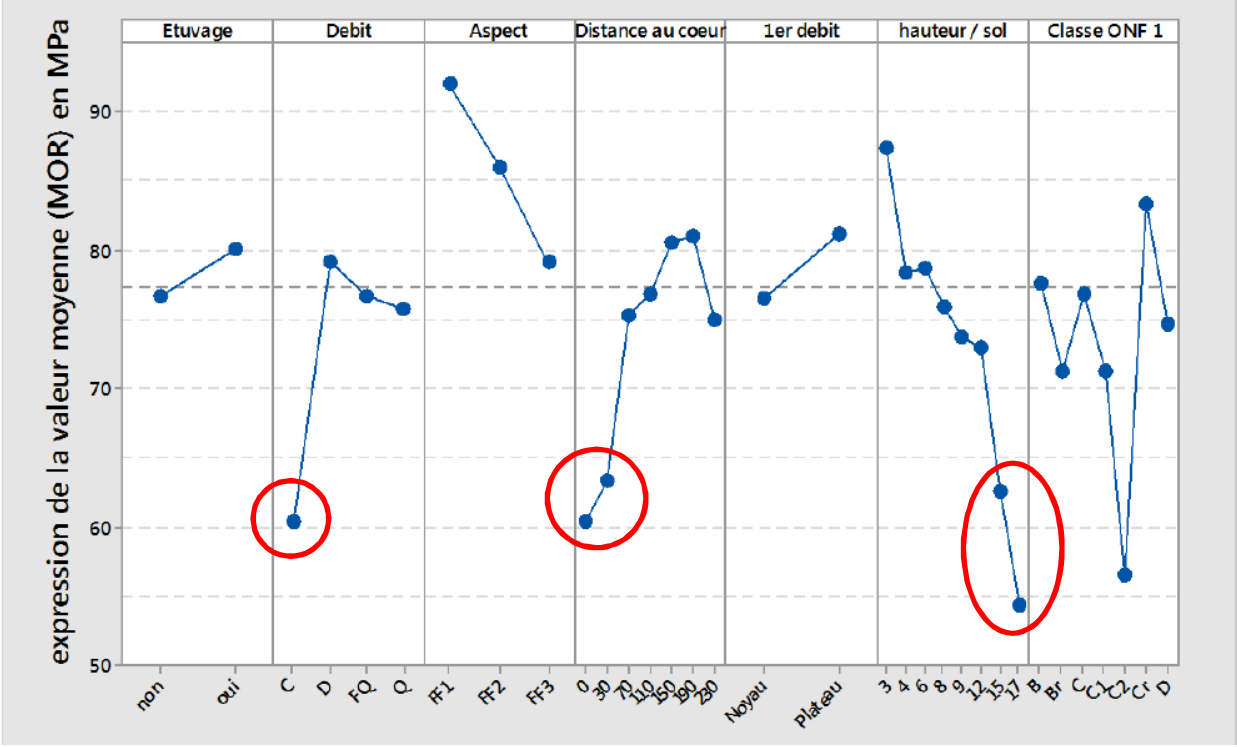


Figure 1-7 : Impact du bois juvénile sur la résistance en flexion - Fig II de LANVIN [10].

c. Bois de réaction

La lumière est indispensable à la croissance de l'arbre (Photosynthèse) c'est pour cela que par le phénomène de phototropisme, l'arbre cherche systématiquement à s'orienter vers les zones les plus lumineuses même si cela implique de ne pas pousser selon un axe vertical. Cette croissance est contrebalancée par le phénomène de gravitropisme par lequel l'arbre cherche à assurer sa stabilité mécanique vis-à-vis de la gravité en réorientant la croissance du tronc selon la verticale. Pour arriver à s'orienter selon le meilleur éclairement tout en garantissant la stabilité mécanique de l'arbre, il y a production de bois de réaction, sorte de bois précontraint, qui peut être de deux types :

- Le bois de compression, spécifiques aux résineux qui se forment dans la zone comprimée du tronc.
- Le bois de tension, spécifiques aux feuillus et qui lui se forme dans la zone de traction du tronc.

Le bois de réaction a en général une densité et un retrait plus important que le bois normalement créé par l'arbre. Le module d'élasticité est également un peu plus faible dans le bois de tension. Ce type de bois est quasiment inévitable dans les feuillus de qualités secondaire qui, du fait de leur sylviculture en taillis sous futaie, ne poussent pas selon un axe vertical. Le bois de réaction peut donc contribuer à une forme de variabilité naturelle entre les grumes et même à l'intérieur de ces dernières. Néanmoins, ce paramètre ne peut en aucun cas être pris en compte dans un quelconque code de calcul car trop complexe à évaluer. Néanmoins, il serait possible de le prendre en compte au niveau du classement mécanique du sciage en réduisant ses propriétés mécaniques.

d. Nodosité

Les nœuds qui se trouvent dans le tronc correspondent à la naissance des branches se retrouvant piégées dans le bois lors de la croissance de l'arbre. Les nœuds peuvent être de deux types :

- Les nœuds morts qui sont en général entourés d'écorce et qui représentent une discontinuité du matériau au niveau mécanique. C'est ce que l'on appelle un nœud non adhérent.
- Les nœuds sains, qui eux sont appelés adhérents.

Les nœuds, quel que soit leur type, constituent une réelle discontinuité mécanique vis-à-vis des sollicitations de traction alors que pour la compression les nœuds adhérents peuvent permettre une partie de la transmission des efforts.

L'influence des nœuds sur la résistance mécanique a fait l'objet d'études par SCHNIEWIND et LYON [18], et JOHANSSON et al. [19] qui ont mis en évidence que, pour la flexion, la rupture était liée dans plus de 90% des cas à la présence de nœuds ou à la déviation de pente de fil autour de ces derniers. Pour prendre en compte cela dans la justification des structures, la taille des nœuds est prise en compte dans l'estimation des propriétés mécaniques faite par classement visuel. Plus la taille des nœuds est importante plus la résistance estimée diminue, des nœuds trop importants en dimensions étant même synonymes d'une exclusion du sciage pour un usage en qualité de bois de structure.

e. Pente de fil

Le fil du bois n'est pas systématiquement parallèle à l'axe longitudinal de la pièce mis en œuvre. Les possibles causes de variation de la pente de fil sont les suivantes :

- Le mode de débit des planches en scieries cumulé aux fortes irrégularités des bois feuillus de qualités secondaires (forme et conicité du tronc).
- Les nœuds constituent une singularité dans la continuité de l'alignement des fibres du bois. La Figure 1-8 met en avant le changement d'angle du fil du bois (pouvant atteindre 30°) liés à la présence d'un nœud.

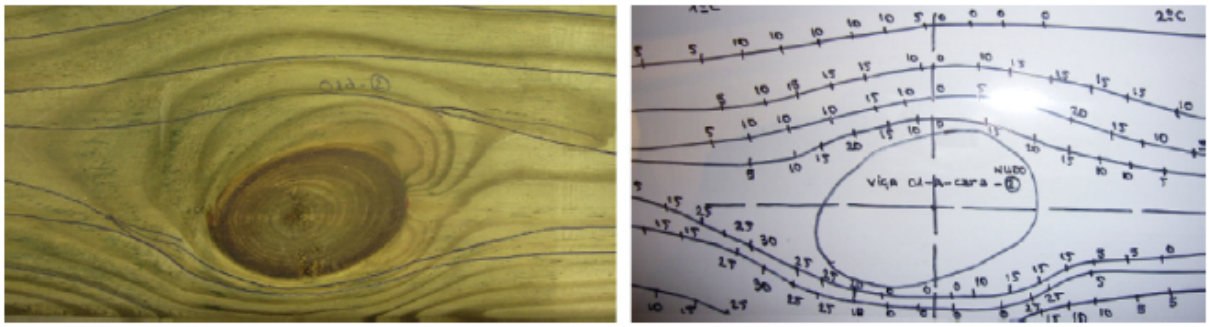


Figure 1-8 : Déviation du fil du bois autour du nœud - Fig 7 de BANO & All [20].

Les propriétés mécaniques selon le sens des fibres sont les plus importantes et elles diminuent à mesure que la sollicitation s'applique perpendiculairement au fil du bois. BODIG et JAYNE [21] ont montré que les propriétés mécaniques en dehors des axes principaux d'orthotropie (parallèlement et perpendiculairement au fil) pouvaient être estimées à partir de la formule de HANKINSON :

$$P_{\alpha^\circ} = \frac{P_{0^\circ} \times P_{90^\circ}}{P_{0^\circ} (\sin \alpha)^{n_1} + P_{90^\circ} (\cos \alpha)^{n_2}} \qquad (1.1)$$

Avec :

- P_{α° propriétés mécaniques selon un angle α entre l'effort et le fil du bois.
- P_{0° & P_{90° propriétés mécaniques selon les directions principales d'orthotropie.
- n_1 & n_2 constante de transformation dépendant de la sollicitation.

Les coefficients n_1 & n_2 ont été déterminés empiriquement et comme le montre le Tableau 1-I, elles varient entre 1,5 et 2,5. Il n'y a que pour les propriétés élastiques (module d'élasticité) que le ratio équivaut à 2, ce qui correspond à une rotation du tenseur.

Tableau 1-I : Coefficients n_1 & n_2 de l'équation de HANKINSON pour différents types de sollicitations. [22]

Sollicitation	n_1	n_2	$\frac{P_{90^\circ}}{P_{0^\circ}}$
Résistance en flexion f_m	1,5	2	0,04 -> 0,10
Résistance en compression f_c	2	2,5	0,03 -> 0,40
Résistance en traction f_t	1,5	2	0,04 -> 0,07
Module d'élasticité $E_{m,0}$	2	2	0,04 -> 0,12

f. Sollicitation par rapport à l'orientation des cernes

L'orientation des cernes a une incidence certaine sur la résistance et le module d'élasticité en compression transverse. Une étude a été réalisée par HOFFMEYER & All [23] sur de l'épicéa Norvégien en fonction de différents types d'orientation des cernes (Figure 1-9). Les courbes représentées en Figure 1-10 montrent que le module et la résistance des orientations en quartier et tangentielle sont supérieures aux propriétés observées selon une orientation radiale. Ce phénomène observable dans les résineux dans lesquels il y a une différence de morphologie à l'intérieur d'un même cerne (bois de printemps moins dense que le bois d'été) doit certainement trouver des similitudes dans les bois à Zone Initiale Poreuse (chêne) et demande à être confirmé pour les feuillus à pores diffus (hêtre et peuplier).

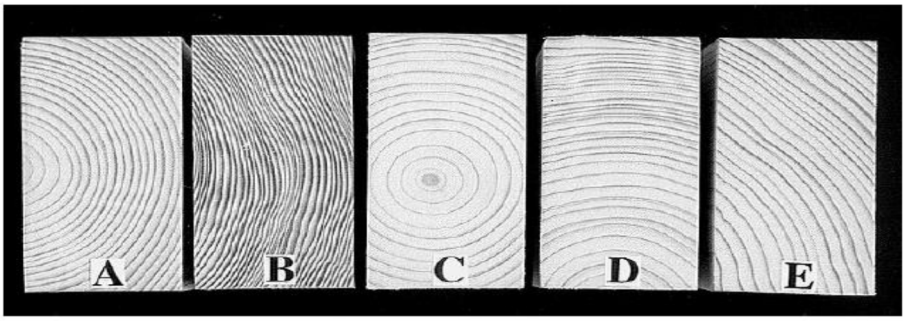


Figure I-9 : Orientation des cernes dans le cadre des essais de compression transversale - Fig I de [23].

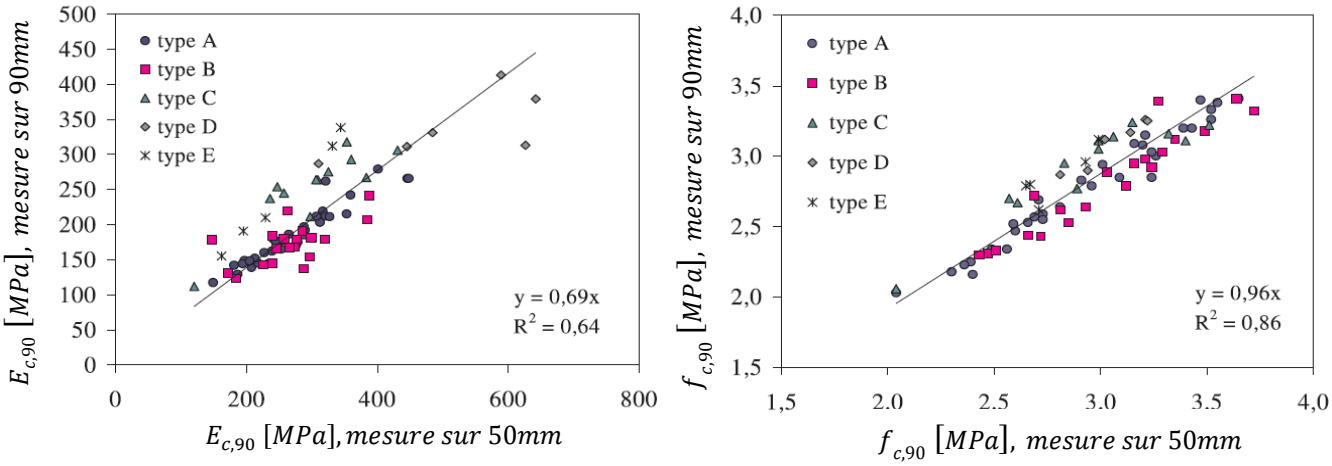


Figure I-10 : Résistance et module en compression transversale en fonction de l'orientation des cernes - Fig 3 & 4 de [23].

g. Humidité du bois

Le bois est un matériau hygroscopique, c'est-à-dire qu'il absorbe ou rejette de l'eau en fonction des conditions ambiantes (température et humidité relative de l'air). L'humidité du bois, exprimée en %, est définie comme étant le ratio entre la masse d'eau présente divisée par sa masse à l'état anhydre.

Dans le bois, l'eau est présente sous différentes formes :

- l'eau libre se trouve dans les lumens des cellules sous forme liquide ou gazeuse.
- l'eau liée chimiquement aux molécules qui composent la paroi cellulaire du bois.

Au-dessus du point de saturation des fibres (PSF), soit environ 30% d'humidité, il n'est plus possible de fixer de l'eau dans la paroi des cellules et l'eau supplémentaire se retrouve sous forme libre. En dessous du PSF, la variation de la quantité d'eau dans les cellules provoquent des déformations. Une diminution de l'humidité provoque un retrait alors qu'une augmentation conduit à un gonflement. Les variations dimensionnelles sont différentes en fonction des 3 directions principales du tronc, avec un retrait total entre le PSF et le bois anhydre tel que :

- Selon la direction axiale, les déformations sont très faibles (> 0.5% de retrait total).
- Selon la direction radiale, les déformations sont plus marquées (5% de retrait total).
- Selon la direction tangentielle, les déformations sont fortes (10% de retrait total).

Les propriétés mécaniques (résistance et module d'élasticité) sont impactées par la variation de l'humidité du bois. Globalement, les propriétés générales augmentent lorsque l'humidité des bois diminue. Le Tableau 1-II résume les effets des variations d'humidité en fonction du type de sollicitation pour les résineux.

Tableau I-II : Incidence de l'humidité sur les propriétés mécaniques - Tab B2-1 de BLASS & SANDHAAS [24].

Propriétés mécaniques	Modification pour une variation d'humidité de 1%
$f_{c,0}$: Compression parallèle au fil	6 %
$f_{c,90}$: Compression perpendiculaire au fil	5 %
f_m : Flexion	4 %
$f_{t,0}$: Traction parallèle au fil	2,5 %
$f_{t,90}$: Traction perpendiculaire au fil	2 %
f_v : Cisaillement	2,5 %
$E_{m,0}$: Module d'élasticité parallèle au fil	1,5 %

GUITARD [11] propose également les formules de correction des modules d'élasticité selon les directions principales du bois (L, R & T) en fonction des variations d'humidité :

$$\begin{aligned} E_{L,H\%} &= E_{L,12\%}\,[1-0{,}015(H\%-12)] & \quad G_{RT,H\%} &= G_{RT,12\%}\,[1-0{,}015(H\%-12)] \\ E_{R,H\%} &= E_{R,12\%}\,[1-0{,}030(H\%-12)] & \quad G_{TL,H\%} &= G_{TL,12\%}\,[1-0{,}015(H\%-12)] \\ E_{T,H\%} &= E_{T,12\%}\,[1-0{,}030(H\%-12)] & \quad G_{LR,H\%} &= G_{LR,12\%}\,[1-0{,}015(H\%-12)] \end{aligned} \qquad (1.2)$$

En France, le bois est considéré comme étant commercialement sec entre 22% et 18% d'humidité. Dans le cadre normatif européen, les propriétés mécaniques sont données selon une humidité de référence de 12%. Il est indispensable de connaître les équations de correction des propriétés pour corriger les résultats d'essais. Malgré les observations faites en bibliographie, dans la norme EN 384 [25], il n'est donné que les équations de correction pour la flexion, la compression et le module d'élasticité.

h. Dimensions de l'éprouvette

Les normes d'essais européennes imposent des dimensions minimales d'éprouvettes. En plus de limiter les effets localisés, cela permet d'inscrire les résultats dans la théorie de WEIBULL [26]. Selon cette théorie plus les dimensions d'une éprouvette augmentent et plus la probabilité de voir apparaître un défaut qui contribuerait à diminuer la résistance de la pièce augmente également jusqu'à tendre vers une limite.

Pour prendre cela en compte dans le bois, différentes études ont été réalisées par BARRET & All au début des années 1990. Si initialement, ils ont montré que les variations de section et de longueur des éprouvettes avaient une influence sur les propriétés mécaniques en traction, compression et flexion [27], il n'a été proposé, dans le cadre de la normalisation, qu'un critère basé sur la section des éprouvettes pour la flexion et la traction [28] en fixant une hauteur de référence de 200 mm :

$$k = \left(\frac{200}{h}\right)^{0.4} \qquad (1.3)$$

Dans le même article, il a été exprimé que la variation de la résistance en fonction de la hauteur pouvait s'exprimer par le ratio $k_w = \left({}^{A}/_{B}\right)^{0{,}23}$ et pour la variation de longueur $k_L = \left({}^{A}/_{B}\right)^{0{,}17}$ (avec A la dimension de référence et B la dimension pour laquelle l'estimation de la résistance doit être réalisée). En 1994, ROUGER & FEWELL [29] ont mis en avant que les méthodes de sciage et de classement visuel avaient un impact non négligeable sur la variation des ratios d'ajustement de la résistance en fonction des dimensions des éprouvettes. Ils proposent d'étudier plus en détails les facteurs qui influencent ce paramètre géométrique.

Dans l'EUROCODE 5 [30], cette théorie est prise en compte à travers le coefficient $\mathrm{k_h}$ qui propose d'augmenter la résistance en traction et en flexion si la hauteur $h\,[mm]$ de la section est inférieure à 150mm selon la relation :

$$k_h = \min \begin{cases} \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \\ 1,3 \end{cases} \quad (1.4)$$

Cette équation est basée sur une hauteur de référence h fixée par l'EN 384 [25] à 150mm pour la flexion et la traction. Pour ces essais, des longueurs de références sont respectivement de $18 \times h$ pour la flexion et $9 \times h$ pour la traction selon la norme décrivant la réalisation des essais mécaniques (EN 408 [31]). Si les essais sont réalisés avec des dimensions différentes, l'EN 384 exige de corriger les résultats d'essais avec l'équation présentée dans l'EUROCODE 5.

Cette équation a été principalement validée par l'expérimentation pour les bois résineux et ne s'applique que pour des bois avec une masse volumique caractéristique inférieure à 700 kg/m^3. Elle demande donc à être validée pour les bois feuillus dans le cadre de la campagne expérimentale du projet EFEUR5.

SCHLOTZHAUER & All [32] ont étudié les effets de tailles d'éprouvettes dans les bois feuillus européens. Ils ont réalisés des essais de compression, traction et flexion puis en comparant les résistances et les modules de bois obtenus sur des éprouvettes sans défauts (20x20 mm²) avec les résultats obtenus sur des échantillons d'« échelle réelle » (30x100 mm²). Selon les différentes sollicitations, les conclusions sont les suivantes :

- Pour la compression axiale, les essais sur les plus grosses dimensions donnent des résistances plus grandes que sur les éprouvettes sans défauts (20x20). Par exemple, le hêtre possède une résistance en compression axiale $f_{c,0,mean} = 58{,}6\ MPa$ (30x100 mm²) contre $f_{c,0,mean} = 49{,}33\ MPa$ (20x20 mm²). Des essais sur des bois de plus grandes dimensions devraient être réalisés pour valider ce phénomène.
- Pour la flexion, les auteurs observent bien une diminution de la résistance avec l'augmentation de la section sur toutes les essences feuillues testées. Pour le hêtre et le chêne, les résistances des éprouvettes à « taille réelle » sont, en moyenne, 15 à 20% plus faibles que sur les éprouvettes sans défauts (20x20 mm²).
- Les conclusions sont les mêmes pour la traction avec une diminution plus importante des résistances entre les bois sans défauts et les éprouvettes à taille réelle (17% pour le chêne et 25% pour le hêtre).

Ces observations démontrent qu'il existe un facteur géométrique qui tend à diminuer la résistance proportionnellement à l'augmentation de la section. Des essais sur des éprouvettes de plus grandes dimensions doivent être réalisés pour trouver la hauteur de référence à partir de laquelle l'augmentation de section n'engendre plus de diminution des propriétés mécaniques.

CHAPITRE 2 : DEMARCHE D'ECHANTILLONNAGE

2.1. PROPRIETES SPECIFIQUES A LA GRUME

L'objectif principal du projet EFEUR5 vise à mieux connaître les propriétés mécaniques des bois feuillus, plus particulièrement la ressource de qualité secondaire qui est la seule à avoir le potentiel aujourd'hui pour égaler économiquement les bois résineux sur les marchés de la construction. Le système de classement des bois par billons s'échelonne selon l'EN 1316-1 [33] de la classe A à la classe D. Les grumes de catégorie A sont les pièces les plus rectilignes et de fort diamètre (> 40cm) donc des bois de haute qualité plutôt destinés à la menuiserie. Les bois pouvant être utilisés en structure peuvent provenir de billons de classe B et C. Les billons de classe D, avec leur faible diamètre (25 < ø < 20cm) comportant de fortes singularités admises par le système de classement ne sont actuellement pas valorisés en tant que bois d'œuvre. Pour comparer les propriétés mécaniques entre les bois de haute et de faible qualité, pour le hêtre et pour le chêne, il a été retenu que la moitié des bois proviendrait de grumes de qualités C&D et l'autre partie, de grumes de qualités A&B.

Pour le projet, les grumes ont été prélevées dans les Vosges ou dans des départements voisins :

- Le hêtre*, fagus sylvatica*, provient de la forêt de DOMFAING (88600) pour les billons de classe A/B et de la forêt de CHARMES (88130) pour les billons de classe C/D, les deux sites se situent dans un rayon de 30 km autour d'Epinal.
- Le peuplier Robusta a été cultivé à LUNEVILLE (54300), à moins de 50 km d'Epinal. Les bois sont de classe de billon A.
- Le chêne, *Quercus Robur*, provient des forêts de GRANVILLERS (88600), à moins de 20km d'Epinal et à une dizaine de kilomètres du site d'abattage des hêtres de classe A/B.

Pour permettre le traitement statistique des données, il a été prévu de réaliser 40 essais par type de sollicitation pour la caractérisation des propriétés mécaniques. Pour juger de l'incidence des qualités de billons pour chaque espèce, 40 essais devaient être réalisés sur des éprouvettes issues de billons de classe A/B et 40 essais sur les bois issus des billons de classe C/D. La perte de l'information de classe des grumes par le scieur lors du sciage du chêne n'a pas permis cette comparaison. Pour économiser de la matière et permettre plus d'essais sur les assemblages, il a donc été retenu de réaliser 60 essais pour le chêne à la place des 40+40 réalisés pour le hêtre. Chaque billon a été, à ses extrémités, munis d'un marquage colorimétrique qui gradue la distance par rapport à la moelle. Le code couleur retenu et un exemple de marquage sont donnés par la Figure 2-1. Une fois les billons sciés, le marquage permet d'estimer la position du centre de l'éprouvette par rapport au centre de la grume et ainsi juger de l'impact du bois juvénile et du bois mature sur les différentes propriétés mécaniques. S'il est assez simple de garder l'information pour les éprouvettes de grande dimension (traction, flexion) les usinages et découpes successives ont contribué à la perte de cette information pour certains échantillons de petites dimensions (cisaillement, compression, portance…).

		Distance Moelle – Pièce [mm]	
Palette 1	Palette 2	Intérieur	Extérieur
		30	50
		80	100
		130	150
		180	200

Figure 2-1 : Codes couleurs utilisés pour la graduation de la distance par rapport à la moelle et exemple de marquage.

2.2. CLASSES DE RESISTANCE MECANIQUES ET METHODE DE CLASSEMENTS

Pour pouvoir être utilisé en structure, les propriétés mécaniques des sciages doivent être estimées. La norme EN 384 [25] introduit 3 propriétés mécaniques dites principales : la masse volumique, le module d'élasticité ainsi que la résistance en flexion. Toutes les autres propriétés utilisées par le calculateur (résistance en traction, compression, cisaillement, module de cisaillement…) sont déduites de ces propriétés à partir de corrélations introduites dans cette norme (l'origine de ces différentes corrélations seront développées dans la bibliographie). Pour chaque planche, il est possible de mesurer de manière non destructive sa masse volumique et son module d'élasticité. Toute la problématique du classement mécanique des bois en structure consiste en l'estimation de la résistance réelle d'un sciage. Pour estimer les propriétés mécaniques d'un sciage et lui attribuer une classe de résistance, il existe aujourd'hui deux alternatives :

- Le classement machine qui correspond à l'estimation directe ou indirecte de manière non destructive des propriétés mécaniques principales permettant l'attribution d'une classe mécanique par corrélation. Cette méthode de classement est régie par la norme EN 14081 [34]. Les grandeurs mesurées pour estimer la résistance en flexion dépendent des fabricants de machine mais les principales mesures retenues pour estimer sont la masse volumique, le module d'élasticité, la nodosité et la pente de fil. Dans ses travaux de thèse, VIGUIER [14] a notamment proposé d'utiliser un nouveau critère basé sur la nodosité et la pente de fil permettant une amélioration de la prédiction des résistances des sciages pour les résineux.
- Pour le classement visuel, l'attribution d'une classe de résistance est réalisée sur la base de l'observation des singularités présentes dans le sciage. En fonction de la taille et de la présence de certaines singularités les propriétés mécaniques estimées diminuent. Les principales singularités prises en compte sont :

- La dimension des cernes d'accroissement. Pour le Chêne et le Hêtre les cernes doivent être inférieurs à 10mm pour permettre le classement. Pour le peuplier, plus les cernes sont faibles et plus la performance du bois s'améliore.
- La présence et la taille des nœuds : plus les nœuds sont importants et plus les propriétés mécaniques diminuent.
- La pente de fil : plus le bois est droit de fil et plus sa résistance est élevée.
- La présence et la taille des fentes.
- Les déformations initiales des pièces avant mise en œuvre.
- L'incidence de certaines altérations biologiques (bleuissement, échauffures, piqûres noires…) sur le classement mécanique des poutres.

La méthode de mesure des singularités est introduite par la norme NF EN 1309-3 [35] et les critères imposés propres à chaque essence pour attribuer la classe mécanique à chaque sciage sont, quant à eux, définis dans la norme NF B52-001 [36]. Ce texte est régulièrement mis à jour pour introduire de nouvelles essences et ainsi permettre leur valorisation dans le cadre des bois d'œuvre de construction. Les critères de classement visuel retenus par essences sont exposés en Annexe A. Le classement visuel est un classement sécuritaire qui conduit bien souvent à une sous-évaluation des propriétés mécaniques des poutres mises en œuvre et également une quantité de rejet important (dépassant fréquemment les 40% comme imagé dans l' étude conduite par ROBLOT & al [37]).

Quelle que soit la méthode utilisée, cela conduit à l'attribution d'une classe mécanique de résistance synthétisée par les tableaux de la norme EN 338 [38]. Ce système de classe différencie les résineux (préfixe C, compris entre C14 et C50) et les feuillus (préfixe D, allant de D18 à D80). Le nombre se trouvant après le préfixe correspond à la résistance caractéristique en flexion notée $f_{m,k}$ (au fractile de 5%).

Cela signifie par exemple, qu'un bois classé D24 possède 95% de chance d'avoir une résistance en flexion supérieure à 24 MPa et l'ensemble des propriétés mécaniques moyennes ou caractéristiques associées à sa classe de résistance. L'ensemble des classes de résistance des feuillus proposées par l'EN 338 et leurs propriétés mécaniques sont rappelées dans le Tableau 2-I.

Tableau 2-I : Classes de résistance et propriétés mécaniques des bois feuillus – Tableau 3 de EN 338 [38].

	Classes de résistance								
	D18	**D24**	**D30**	**D35**	**D40**	**D50**	**D60**	**D70**	**D80**
$f_{m,k}$	**18**	**24**	**30**	**35**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**
$f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42	48
$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$f_{c,0,k}$	18	21	24	25	24	30	33	36	38
$f_{c,90,k}$	4,8	4,9	5,3	5,4	5,5	6,2	10,5	12	13,5
$f_{v,k}$	3,5	3,7	3,9	4,1	4,2	4,5	4,8	5	5
$E_{m,0,mean}$	**9 500**	**10 000**	**11 000**	**12 000**	**13 000**	**14 000**	**17 000**	**20 000**	**24 000**
$E_{m,0,k}$	8 000	8 400	9 200	10 100	10 900	11 800	14 300	16 800	20 200
$E_{90,mean}$	640	670	730	800	870	930	1 130	1 330	1 600
G_{mean}	590	630	690	750	810	880	1 060	1 250	1 500
ρ_k	**475**	**485**	**530**	**540**	**550**	**620**	**700**	**800**	**900**
ρ_{mean}	570	580	640	650	660	740	840	960	1 080

Résistance caractéristiques [MPa] :
$f_{m,k}$ Flexion
$f_{t,0,k}$ Traction axiale
$f_{t,90,k}$ Traction transversale
$f_{c,0,k}$ Compression axiale
$f_{c,90,k}$ Compression transversale
$f_{v,k}$ Cisaillement

Propriétés de rigidité [MPa] :
$E_{m,0,mean}$ Module d'élasticité moyen en flexion axiale
$E_{m,0,k}$ Module d'élasticité caractéristique en flexion axiale
$E_{90,mean}$ Module d'élasticité transversal moyen
G_{mean} Module de cisaillement moyen

Masse Volumique [kg/m^3] :
ρ_k Masse volumique caractéristique
ρ_{mean} Masse volumique moyenne

En 1990, GREEN & KRETSCHMANN [38] ont étudié les différents systèmes de classes de résistance existants dans le monde pour pouvoir proposer un système analogue aux Etats-Unis.

De manière générale, il s'agit d'un système simple qui permet une standardisation de la ressource bois indépendamment des essences employées. Il offre notamment la possibilité de comparer les propriétés mécaniques du bois avec les autres produits de construction. Le système est pérenne dans le temps : une modification du système de classement mécanique (machine ou visuel) n'entrainant pas une modification des classes mécaniques.

Malgré ces avantages, le système se focalise sur des propriétés mécaniques principales ne permettant pas, par sécurité, de prédire les propriétés mécaniques secondaires optimales pour certaines essences. Cependant, le concepteur ne doit pas uniquement s'attacher aux simples propriétés mécaniques pour garantir la pérennité de sa structure. La durabilité des bois ou la mixité des matériaux utilisés (réaction entre les tanins et les métaux par exemple) sont également à prendre en considération.

2.3. CLASSEMENT DES BOIS DU PROJET EFEUR 5

Une purge initiale des plus gros défauts, non conformes aux critères visuels (taille de nœuds ou pente de fil trop importante ou avec des déformations initiales trop importantes) a été réalisée sur les bois livrés secs. Des exemples de défauts conduisant à une exclusion des sciages sont imagés sur la Figure 2-2.

Figure 2-2 : Exemples de défauts purgés par le classement visuel initial.

Ce premier tri des bois a conduit à un rejet moyen de 26% de la ressource initiale commandée pour le projet (10m^3 de Peuplier, 20m^3 de Hêtre et 20m^3 de chêne). Il est à noter que les bois issus de faibles sections (40x100) avaient un taux de purge très largement inférieur (9%) aux 30% d'exclusion observés sur les bois de fortes sections (50x150 et 65x200). Néanmoins, ce rejet était principalement dû à des déformations initiales trop importantes, majoritairement liées au séchage, ne permettant pas la réalisation des essais de flexion. De manière générale il peut être dit à ce stade qu'un billonnage court et de faible section permet de réduire l'apparition de défauts trop importants.

Une partie de la ressource purgée à cause des déformations fut tout de même utilisée pour la réalisation d'éprouvettes de petites dimensions (longueur inférieure à 20cm) utilisées principalement dans le cadre de la caractérisation mécanique des propriétés d'assemblage. Ce manque de ressource a conduit, d'une certaine manière, à la réutilisation d'une partie des pièces testées en flexion (zones non chargées ou avec des contraintes faibles) pour la réalisation des essais de compression et de cisaillement (cf Figure 2-3).

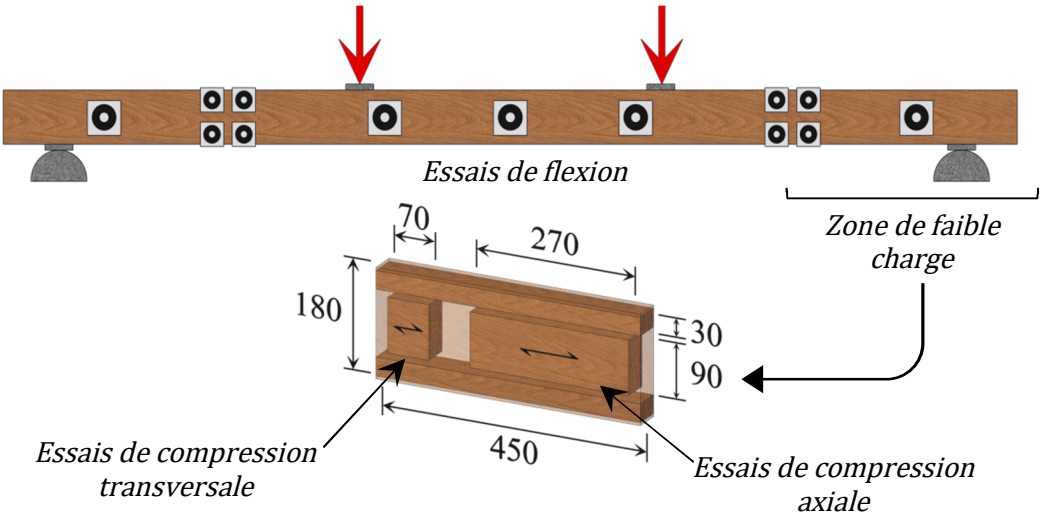


Figure 2-3 : Exemples de réutilisation de la ressource.

CHAPITRE 3 : PROPRIETES MECANIQUES DES BOIS FEUILLUS

3.1. BIBLIOGRAPHIE

La bibliographie présentée dans cette partie sera divisée en plusieurs sous-parties. La première partie retracera l'historique des relations entre les propriétés mécaniques pour les résineux et les feuillus. Les relations qui encadrent les propriétés mécaniques dites « principales » seront ensuite présentées. Finalement, pour chaque propriété mécanique secondaire, l'explication de la relation avec les propriétés mécaniques principales sera exposée ainsi que les facteurs ayant des impacts sur ces propriétés.

3.1.1. Historique des relations entre les propriétés mécaniques

Le système de classe de résistance mécanique adopté en Europe a mis l'accent sur 3 propriétés mécaniques principales (résistance en flexion, module d'élasticité en flexion et masse volumique). Selon la norme, il est possible d'estimer toutes les propriétés mécaniques dites « secondaires » (résistance en compression, traction et cisaillement, module d'élasticité transversal et module de cisaillement) à partir des propriétés principales. Le Tableau 3-I retrace l'évolution de la norme EN 384 [25] et certaines corrélations entre les propriétés mécaniques. La première version de la norme publiée en 1995 correspond au consensus établi à la suite des 4 drafts de l'EUROCODE 5 publiés à la fin des années 80. En 1989, GREEN & KRETSCHMANN [39] ont validé ces corrélations par l'expérimentation sur des sections correspondant aux bois d'œuvre standard (38x89, 38x140, 38x184 & 38x225). Les essais ont été réalisés sur des essences américaines (*Pseudotsuga menziesii, Abies grandis & Pinus echinata*) et, en étendant la plage de validité des corrélations, avec des essais de flexion conduits sur une plage de 10 à 100 MPa alors qu'une plage de 20 à 40 MPa avait été retenue pour les drafts de l'EUROCODE 5.

Tableau 3-I : Evolution des corrélations pour les bois résineux dans la norme EN 384.

EN 384 – 1995 [40]	EN 384 – 2004 [41]	EN 384 – 2010 [42]	EN 384 – 2016 [25]
$\boldsymbol{f_{t,0,k} = 0,6\, f_{m,k}}$	$f_{t,0,k} = 0{,}6\, f_{m,k}$	$f_{t,0,k} = 0{,}6\, f_{m,k}$	$\boldsymbol{f_{t,0,k} = -3,07 + 0,73 \times f_{m,k}}$
$\boldsymbol{f_{c,0,k} = 5\,(f_{m,k})^{0.45}}$	$f_{c,0,k} = 5\,(f_{m,k})^{0.45}$	$f_{c,0,k} = 5\,(f_{m,k})^{0.45}$	$\boldsymbol{f_{c,0,k} = 4.3\,(f_{m,k})^{0.5}}$ (2)
$\boldsymbol{f_{v,k} = 0,2\,(f_{m,k})^{0.8}}$	$f_{v,k} = min\left[3{,}8\,;\ 0{,}2\,(f_{m,k})^{0.8}\right]$	Donné dans l'EN 338	Pour $\boldsymbol{f_{m,k} \leq 24\ MPa}$ $\boldsymbol{f_{v,k} = 1,6 + 0,1\, f_{m,k}}$ Pour $\boldsymbol{f_{m,k} > 24\ MPa}$ $\boldsymbol{f_{v,k} = 4,0\ MPa}$
$\boldsymbol{f_{t,90,k} = 0,001\, \rho_k}$	$f_{t,90,k} = min[0{,}6\,;\, 0{,}0015\, \rho_k\,]$	$f_{t,90,k} = 0{,}4\ MPa$	$\boldsymbol{f_{t,90,k} = 0,4\ MPa}$
$\boldsymbol{f_{c,90,k} = 0,015\, \rho_k}$	$f_{c,90,k} = 0{,}007\, \rho_k$	$f_{c,90,k} = 0{,}007\, \rho_k$	$\boldsymbol{f_{c,90,k} = 0,007\, \rho_k}$
$\boldsymbol{E_{0,05} = 0,67\, E_{0,mean}}$	$E_{0,05} = 0{,}67\, E_{0,mean}$	$E_{0,05} = 0{,}67\, E_{0,mean}$	$\boldsymbol{E_{0,05} = 0,67\, E_{0,mean}}$
$\boldsymbol{E_{90,mean} = {E_{0,mean}}/{30}}$	$E_{90,mean} = {E_{0,mean}}/{30}$	$E_{90,mean} = {E_{0,mean}}/{30}$	$\boldsymbol{E_{90,mean} = {E_{0,mean}}/{30}}$
$\boldsymbol{G_{mean} = {E_{0,mean}}/{16}}$	$G_{mean} = {E_{0,mean}}/{16}$	$G_{mean} = {E_{0,mean}}/{16}$	$\boldsymbol{G_{mean} = {E_{0,mean}}/{16}}$
	$\rho_{mean} = 1{,}2\, \rho_k$	$\rho_{mean} = 1{,}2\, \rho_k$	$\boldsymbol{\rho_{mean} = 1,2\, \rho_k}$
(1) Modification de corrélation identique pour les feuillus et les résineux.			

Comme le montre le Tableau 3-II, en 2004 la révision de l'EN 384 [41] utilise les équations établies pour les résineux pour prédire les résistances en traction et compression axiale ainsi qu'en cisaillement pour les bois feuillus. C'est également au cours de cette révision que les bornes de résistance maximales ont été introduites pour le cisaillement et la traction transversale.

Tableau 3-II : Evolution des corrélations pour les bois feuillus dans la norme EN 384.

EN 384 – 1995 [40]	EN 384 – 2004 [41]	EN 384 – 2010 [42]	EN 384 – 2016 [25]
$\boldsymbol{f_{t,0,k} = 0,6\, f_{m,k}}$ (1)	$f_{t,0,k} = 0,6\, f_{m,k}$	$f_{t,0,k} = 0,6\, f_{m,k}$	$\boldsymbol{f_{t,0,k} = 0,6\, f_{m,k}}$
$\boldsymbol{f_{c,0,k} = 5\,(f_{m,k})^{0.45}}$ (1)	$f_{c,0,k} = 5\,(f_{m,k})^{0.45}$	$f_{c,0,k} = 5\,(f_{m,k})^{0.45}$	$\boldsymbol{f_{c,0,k} = 4.3\,(f_{m,k})^{0.5}}$ (2)
$\boldsymbol{f_{v,k} = 0,2\,(f_{m,k})^{0.8}}$ (1)	$f_{v,k} = min\left[3,8\,;\ 0,2\,(f_{m,k})^{0.8}\right]$	Donné dans l'EN 338	Pour $\boldsymbol{f_{m,k} \leq 60\ MPa}$ $\boldsymbol{f_{v,k} = 3,0 + 0,03\, f_{m,k}}$ Pour $\boldsymbol{f_{m,k} > 60\ MPa}$ $\boldsymbol{f_{v,k} = 5,0\ MPa}$
$\boldsymbol{f_{t,90,k} = 0,001\, \rho_k}$	$f_{t,90,k} = min[0,6\,;\ 0,0015\, \rho_k]$	$f_{t,90,k} = 0,6\ MPa$	$\boldsymbol{f_{t,90,k} = 0,6\ MPa}$
$\boldsymbol{f_{c,90,k} = 0,015\, \rho_k}$	$f_{c,90,k} = 0,015\, \rho_k$	$f_{c,90,k} = 0,015\, \rho_k$	Pour $\boldsymbol{\rho_k < 700\ kg/m^3}$ $\boldsymbol{f_{c,90,k} = 0,010\, \rho_k}$ Pour $\boldsymbol{\rho_k \geq 700\ kg/m^3}$ $\boldsymbol{f_{c,90,k} = 0,015\, \rho_k}$
$\boldsymbol{E_{0,05} = 0,84\, E_{0,mean}}$	$E_{0,05} = 0,84\, E_{0,mean}$	$E_{0,05} = 0,84\, E_{0,mean}$	$\boldsymbol{E_{0,05} = 0,84\, E_{0,mean}}$
$\boldsymbol{E_{90,mean} = {E_{0,mean}}/{15}}$	$E_{90,mean} = {E_{0,mean}}/{15}$	$E_{90,mean} = {E_{0,mean}}/{15}$	$\boldsymbol{E_{90,mean} = {E_{0,mean}}/{15}}$
$\boldsymbol{G_{mean} = {E_{0,mean}}/{16}}$	$G_{mean} = {E_{0,mean}}/{16}$	$G_{mean} = {E_{0,mean}}/{16}$	$\boldsymbol{G_{mean} = {E_{0,mean}}/{16}}$
	$\rho_{mean} = 1,2\, \rho_k$	$\rho_{mean} = 1,2\, \rho_k$	$\boldsymbol{\rho_{mean} = 1,2\, \rho_k}$

(1) Relations valables uniquement pour les résineux.

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

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

L'évolution de ces corrélations s'est fait principalement avec les essais présentés dans le cadre des colloques scientifiques CIB – INTER. A titre d'exemple, en 2006, GLOS et DENZIER [43] ont proposé une modification des valeurs de module d'élasticité à la suite d'une campagne d'essais réalisée 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 [44].

La dernière révision de l'EN 384 [25] en 2016 correspond à une version qui, grâce aux programmes de recherche récents sur les bois feuillus, a permis de corriger certaines prédictions de résistance. Néanmoins, ces travaux restent rares et doivent être complétés par de nouvelles campagnes d'essais.

Les révisions des tableaux de l'EN 338 [38] et de la norme EN 384 [25] en 2016 ont offert aux industriels la possibilité d'utiliser, pour les résineux, des classes de résistance basées sur la résistance en traction plutôt que la résistance en flexion. Ceci permet une meilleure prédiction des propriétés mécaniques des poutres en bois lamellé-collé (lamelles fonctionnant en compression ou traction). Cela s'ajoute au fait que selon RANTA-MAUNUS & All [45], les machines de classement donnent une meilleure prédiction de la résistance en traction que de la résistance en flexion.

Dans l'optique de transposer ce système de prédiction des résistances mécaniques aux bois feuillus, des travaux ont été initiés par KOVRYGA & all [46] en se basant sur près de 3000 essais réalisés sur du hêtre et du frêne. Avec cette campagne expérimentale, ils proposent des corrélations entre la résistance mécanique principale, qui est cette fois-ci la résistance en traction et les autres résistances utiles à l'ingénieur. Ces corrélations propres aux bois feuillus sont comparées aux corrélations utilisées pour les bois résineux au travers du Tableau 3-III. Par rapport aux équations définies pour les résineux, pour la même résistance en traction, KOVRYGA & all [46] proposent une résistance en flexion supérieure de 20% pour les feuillus et une résistance en compression qui évolue entre plus 46% ($f_{t,0,k} = 10\ MPa$) et plus 16% ($f_{t,0,k} = 35\ MPa$).

Tableau 3-III : Corrélations entres les propriétés mécaniques pour le système de classes mécaniques en traction pour les feuillus et les résineux.

Résineux – EN 384 [25]	Feuillus – INTER 49-10-1 [46]
$f_{m,k} = 3{,}66 + 1{,}213 \times f_{t,0,k}$	$f_{m,k} = 3{,}9 + 1{,}5 \times f_{t,0,k}$
$f_{t,0,k}$	$f_{t,0,k}$
$f_{t,90,k} = 0{,}4\ MPa$	$f_{t,90,k} = 3{,}4\ MPa$
$f_{c,0,k} = 5{,}5\ (f_{t,0,k})^{0.5}$	$f_{c,0,k} = 11{,}54 + 4{,}41\ (f_{t,0,k})^{0.5}$
$f_{c,90,k} = 0{,}007\ \rho_k$	$f_{c,90,k} = 6{,}6\ MPa$
Pour $f_{t,0,k} \leq 14\ MPa$ $f_{v,k} = 1{,}2 + 0{,}2\ f_{t,0,k}$ Pour $f_{t,0,k} > 14\ MPa$ $f_{v,k} = 4{,}0\ MPa$	$f_{v,k}$ Non étudié dans la publication mais fixé à $f_{v,k} = 7{,}5$ MPa dans une autre publication [47]
$E_{0,05} = 0{,}67\ E_{0,mean}$	$E_{0,05}$ Non étudié
$E_{90,mean} = {}^{E_{0,mean}}/_{30}$	$E_{t,90,mean}$ Donnés dans un tableau de synthèse
$G_{mean} = {}^{E_{0,mean}}/_{16}$	
$\rho_{mean} = 1{,}2\ \rho_k$	

Il est à noter que le nouveau système de classement mécanique en traction pour les feuillus associe aux résistances en traction des propriétés de masse volumique et de module d'élasticité proches de celles définies dans le système de classement en flexion. Dans le Tableau 3-IV, deux classes ayant les mêmes résistances en traction sont comparées. Les différences entre les deux systèmes de classement portent essentiellement sur la prédiction des résistances transversales (traction et compression) et sur la résistance en compression axiale des classes les plus importantes.

Tableau 3-IV : Comparaisons entres les classes de résistance en flexion et les classes de résistance en traction.

	$f_{m,k}$ [MPa]	$f_{t,0,k}$ [MPa]	$f_{c,0,k}$ [MPa]	$f_{t,90,k}$ [MPa]	$f_{c,0,k}$ [MPa]	$E_{0,mean}$ [MPa]	ρ_k [Kg/m^3]
DT 18	31	18	30	3,4	6,6	10000	550
D 30	30	18	29	0,6	8	11000	530
DT 30	48	30	36	3,4	6,6	14000	550
D50	50	30	29	0,6	9,3	14000	620

3.1.2. Propriétés mécaniques principales

a. Module d'élasticité

DENZLER & GLOS [43] ont proposé en 2006 une modification de l'EN 338 [48] après avoir remarqué le manque de corrélation entre, d'une part, la résistance et d'autre part, la masse volumique ainsi que le module d'élasticité. Pour cela, ils ont réalisé 794 essais sur du hêtre et 337 sur du chêne afin de mettre en adéquation les propriétés mécaniques de la norme par rapport à leurs mesures. Comme le montre le Tableau 3-V, ces modifications ne furent que partiellement intégrées dans la révision de l'EN 338 [44] de 2009.

Tableau 3-V : Module d'élasticité proposé par DENZLER & GLOS [43] en 2006 pour la révision de l'EN 338.

Classes de résistance		D30	D35	D40	D50
$f_{m,k}$ [MPa]		30	35	40	50
$E_{0,mean}$: [MPa]	EN 338 (2003)	10000	10000	11000	14000
	Proposé dans [43]	11500	14500	15500	16500
	EN 338 (2009)	11000	12000	13000	14000

Pour le calcul des structures et des déformations, l'ingénieur utilise dans la majorité des cas le module d'élasticité moyen. Néanmoins, pour la justification des sections comprimées et fléchies vis-à-vis des instabilités, il est nécessaire d'introduire un module caractéristique au fractile de 5%. Par exemple, un bois classé D24 a un module d'élasticité moyen de 10 000 MPa et 95% de chance d'avoir un module supérieur à 8 500 MPa. L'équation qui permet de passer d'un module moyen à un module caractéristique, définie dans l'EN 384, est directement tirée de l'estimation de la valeur au fractile de 5% d'une loi normale avec une variabilité de 10%, à savoir :

$$E_{0,05} = E_{mean} - k_s S_y = E_{mean}\left(1 - k_s \times COV_{E,mean}\right)$$
$$E_{mean}\left(1 - 1{,}64 \times 10\%\right) = 0{,}836\, E_{mean} \qquad (3.1)$$

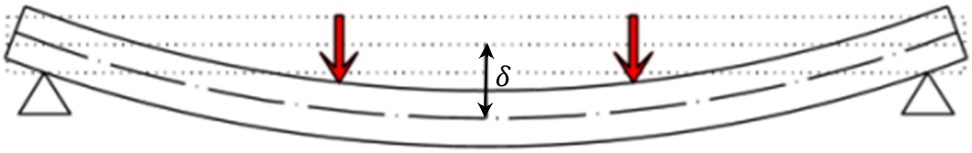
Car $k_s = 1{,}64$ pour un nombre infini d'essais.

Pour le critère de l'EN 384 sur les résineux, le même raisonnement a été mené en considérant cette fois-ci un coefficient de variation de 20% sur la mesure du module d'élasticité. GREEN & KRETSCHMANN [39] ont trouvé une variation de ce ratio comprise entre 0,48 et 0,84 en fonction des différentes essences testées. En ayant observé des modules caractéristiques proches des modules moyens pour les bois de qualité élevée, ils suggèrent d'augmenter ce ratio pour les hautes classes de résistance.

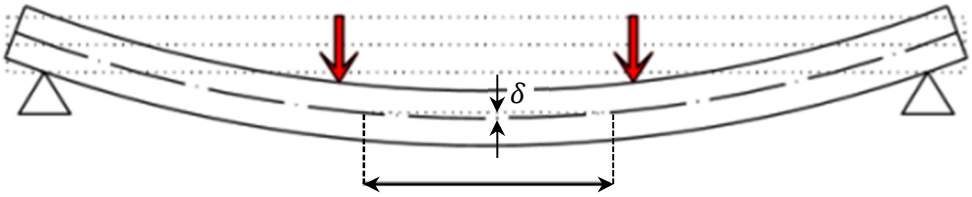
Les différentes campagnes expérimentales sur les bois feuillus trouvées en bibliographie à ce jour sont résumées dans le tableau de synthèse de l'Annexe B. Elles montrent des coefficients de variation de l'ordre de grandeur de 20%, voire plus. L'équation de l'EN 384 doit donc être modifiée pour ne pas risquer de provoquer des sinistres liés aux instabilités (flambement et déversement). Ceci apparaît d'autant plus vrai que traditionnellement, les bois feuillus sont principalement utilisés pour la réalisation de poteaux.

Dans le cadre de la réalisation d'essais mécaniques, la norme EN 408 [31] offre à l'expérimentateur deux méthodes de mesure du module d'élasticité en flexion. La Figure 3-1 présente les deux types de module qu'il est ainsi possible de mesurer. Le module global est le plus simple à mesurer et requiert le moins de matériel, il correspond à la déformation au centre de la poutre. Il intègre donc la déformée d'effort tranchant qu'il convient de corriger pour estimer au mieux le module d'élasticité. La mesure est également impactée par la déformation au niveau des appuis qui va augmenter artificiellement la déformation verticale et donc diminuer le module mesuré de cette manière. La deuxième mesure possible, celle du module d'élasticité local, est basée sur le rayon de courbure de la poutre dans la zone de moment constant. C'est cette valeur du module d'élasticité qui est retenue dans le tableau de l'EN 338. Cette deuxième méthode suppose que les qualités des zones d'extrémité est identique à la zone centrale puisque le module issu du rayon de courbure correspond uniquement au module de la zone centrale.

Module global :



Module local :



Zone de mesure du rayon de courbure

Figure 3-1 : Définition du module global et du module local selon la norme d'essais EN 408 [31].

Pour les bois résineux, l'EN 384 propose d'estimer le module local à partir du module global à partir de la relation (3.2). Cette équation a été validée par l'expérimentation en 2008 par DENZLER & All [49]. Sur 4113 essais de flexion sur différents résineux (Epicéa, Pins, Douglas et Mélèze), les légères différences trouvées entre l'équation de la norme et leur équation (3.3) sont, selon les auteurs, « marginales » et ne nécessitent pas une modification de la réglementation.

$$E_{0,local} = 1{,}3 \times E_{0,global} - 2690 \quad (3.2)$$

$$E_{0,local} = 1{,}2 \times E_{0,global} - 1400 \quad (3.3)$$

Dans leur étude sur les relations entre les modules locaux, globaux et vibratoires (1354 essais de flexion), RAVENSHORST & VAN DE KUILEN [50] ont démontré que l'équation de l'EN 384 était suffisante pour décrire la relation entre le module global et le module local pour les bois résineux, feuillus et tropicaux. Dans cette étude, les 300 essais de flexion réalisés sur du châtaignier, montrent une relation entre les deux modules telle que :

$$E_{0,local} = 1{,}26 \times E_{0,global} - 1672 \quad (3.4)$$

b. Masse volumique

La masse volumique servant de référence dans le système de classe de résistance est la masse volumique caractéristique au fractile de 5%. Cela signifie que pour une poutre classée mécaniquement, sa masse volumique à 95% de chance d'être supérieure à la valeur de ladite classe. Cette grandeur est utilisée nécessairement pour la justification de la résistance des assemblages. Pour l'ingénieur, il est nécessaire de connaître également la masse volumique moyenne des bois dans le but de prendre en compte le poids propre des éléments de structure et de pouvoir estimer la raideur des assemblages qui la composent.

Dans le tableau de l'EN 338 [38], le ratio entre la masse volumique caractéristique et la masse volumique moyenne pour les feuillus et les résineux est compris entre 1,19 et 1,21. Cette variation est liée aux arrondis sur les valeurs retenues pour l'écriture de ces tableaux. La norme EN 384 [25] définit la masse volumique comme étant égale à 1,2 fois la masse volumique caractéristique. Cela correspond au fractile de 5% d'une loi normale uniformément distribuée avec une variabilité de 10% :

$$\rho_{0,05} = \rho_{mean} - k_s S_y$$
$$\rho_{mean} = \frac{\rho_{0,05}}{\left(1 - k_s \times COV_{E,mean}\right)} = \frac{1}{(1 - 1{,}64 \times 10\%)} \rho_{0.05} = 1{,}196\, \rho_{0.05} \quad (3.5)$$

Car $k_s = 1{,}64$ pour un nombre infini d'essais.

GREEN & KRETSCHMANN [39] ont montré par leurs essais que ce ratio varie entre 1,2 et 1,8 pour les 3 principales essences utilisées dans leurs campagnes expérimentales (*Pseudotsuga menziesii, Abies grandis & Pinus echinata).* Le ratio moyen étant de 1,204 sur toutes les essences de leur étude.

Dans leur publication de 2006, DENZLER & GLOS [43] ont mis en évidence une forte différence entre les masses volumiques proposées dans la norme et celles mesurées expérimentalement. Ils ont ainsi proposé les modifications présentées dans le Tableau 3-VI. Ces dernières n'ont pas été retenues dans le cadre de la révision de l'EN 338 de 2009. Par rapport à leurs essais, réalisés sur du hêtre et du chêne, le système de classement mécanique des feuillus a donc tendance à minimiser les masses volumiques et donc minimiser l'estimation des résistances et des raideurs des assemblages calculées selon les équations de l'EUROCODE 5.

Tableau 3-VI : Masses volumiques proposées par DENZLER & GLOS [43] en 2006 pour la révision de l'EN 338.

Classes de résistance		D30	D35	D40	D50
$f_{m,k}$ [MPa]		30	35	40	50
ρ_k : [kg/m^3]	EN 338 (2003)	530	560	590	650
	Proposé dans [43]	630	650	650	650
	EN 338 (2009)	530	540	550	620
ρ_{mean} : [kg/m^3]	EN 338 (2003)	640	670	700	780
	Proposé dans [43]	710	720	720	720
	EN 338 (2009)	640	650	660	750

Si l'utilisation des masses volumiques du tableau de l'EN 338 est conservatif pour le calcul des structures en bois (minimise la résistance et la raideur), elle conduit également à minimiser le poids propre des ouvrages réalisés en bois feuillus. Par exemple, en se basant sur un bois classé mécaniquement D24 ($\rho_{mean} = 580\ kg/m^3$) et les propriétés moyennes observées (cf Tableau 3-VII), il est assez rapide de sous-estimer le poids propre de 20% pour des structures en hêtre ou en chêne. Il est donc conseillé, pour la prise en compte du poids propre, de se baser sur la masse volumique spécifique à chaque essence, en utilisant par exemple, la base de données TROPIX du CIRAD (34).

Tableau 3-VII : Masses volumiques selon la base de données tropix du CIRAD pour les essences du projet EFEUR 5.

Essence	Peuplier	Hêtre	Chêne
ρ_{mean} [kg/m^3]	450	710	740

3.1.3. Propriétés mécaniques secondaires

a. Compression axiale

A ses débuts en 1995, le système de classe de résistance a défini pour les résineux une relation entre la résistance caractéristique en flexion et la résistance caractéristique en compression de la manière suivante :

$$f_{c,0,k} = 5\left(f_{m,k}\right)^{0.45} \tag{3.6}$$

Cette équation issue du rapport d'étude de CURRY & FEWELL datant de 1977 a été validée expérimentalement par GREEN & KRETSCHMANN [39] sur des bois résineux. Malgré cela, il a été décidé d'adopter pour les feuillus la même équation dans la révision de l'EN 384 [41] de 2004.

STEIGER & All [51] ont montré que cette équation avait tendance à sous-estimer jusqu'à 20%, pour les pièces avec les plus fortes résistances en flexion, la résistance en compression des bois résineux. En utilisant des ensembles d'échantillons regroupés selon leur module d'élasticité dynamique, ils ont proposé une nouvelle relation entre la résistance en compression et la résistance en flexion pour de l'épicéa (cf Figure 3-2).

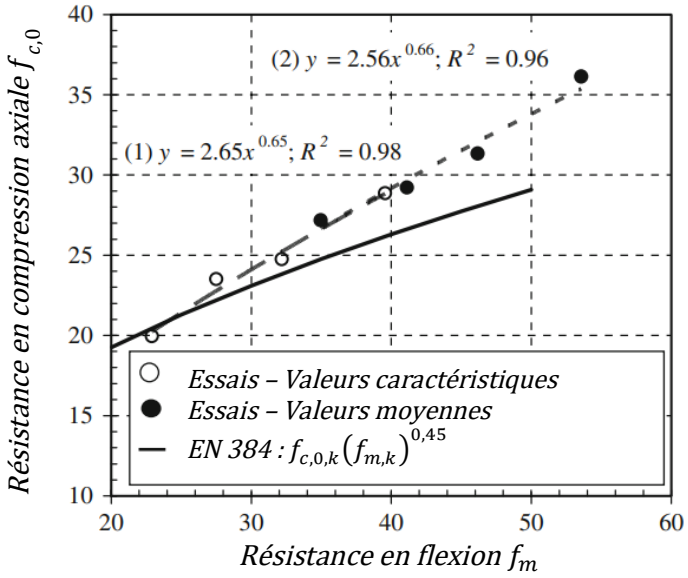


Figure 3-2 : Corrélation entre résistance en flexion et en compression pour les résineux - Fig 7 de STEIGER & All [51].

Ces travaux ont entrainé une révision de l'EN 384 en 2016 avec une augmentation maximale de 5% de la résistance en compression axiale pour les bois feuillus et résineux. La nouvelle relation pour la détermination de la résistance en compression axiale en fonction de la résistance en flexion devient :

$$f_{c,0,k} = 4{,}3\ (f_{m,k})^{0.5} \tag{3.7}$$

En 2011, MUNOZ & GETE [52] ont réalisé une campagne d'essais en vue de proposer une corrélation entre les différentes propriétés mécaniques du chêne. Pour établir cette corrélation, ils ont sorti de la même planche, une éprouvette de compression (20x20x60 mm) et une éprouvette de flexion (20x20x300 mm) en considérant que la variabilité naturelle était faible entre ces deux éprouvettes, ils arrivent à une relation linéaire entre les deux résistances telle que cela est présenté sur la Figure 3-3.

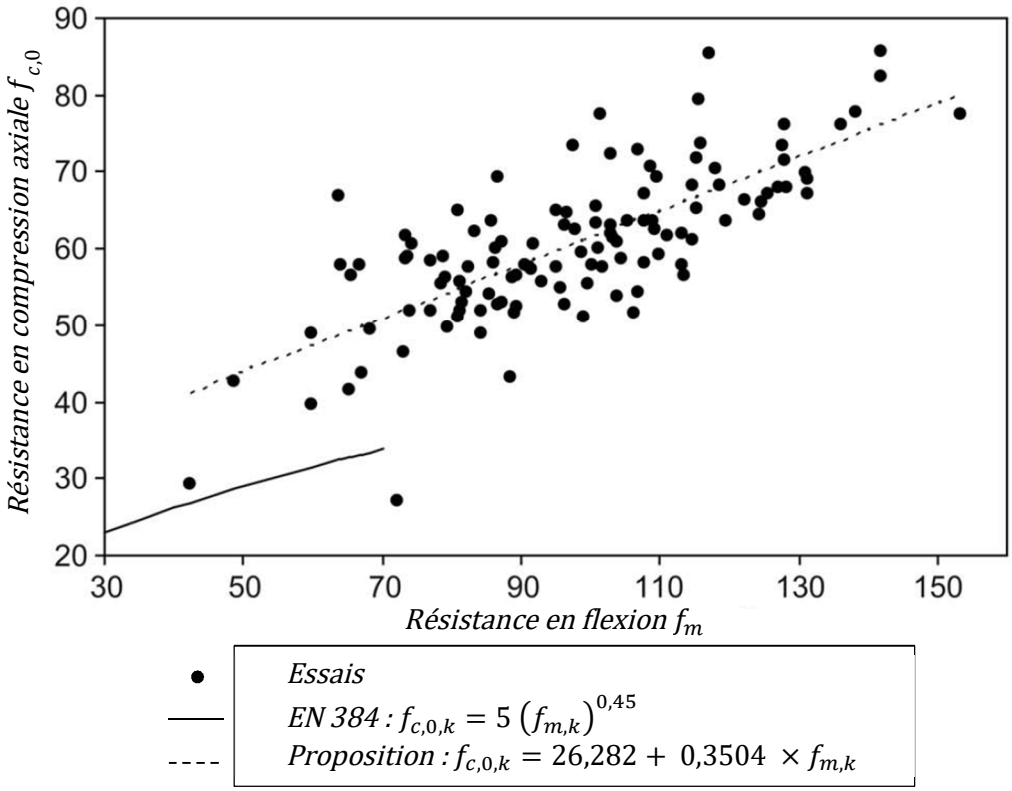


Figure 3-3 : Corrélation entre résistance en flexion et en compression pour du chêne (bois sans défauts et de droit fil) Fig 2 de MUNOZ & GETE [52].

Dans leur proposition de mise en place d'une classe de résistance en traction des bois feuillus, KOVRYGA & all [46] ont étudié la corrélation entre résistance en compression et résistance en traction pour proposer une relation du type :

$$\mathrm{f_{c,0,k}} = 11{,}54 + 4{,}41\ \left(\mathrm{f_{t,0,k}}\right)^{0,5} \tag{3.8}$$

En considérant qu'il est possible de combiner cette équation avec la corrélation qu'ils ont exprimée entre de la résistance en flexion et la résistance en traction (cf Tableau 3-III), il vient :

$$f_{m,k} = 3{,}9 + 1{,}5\ f_{t,0,k} \ \rightarrow\ f_{t,0,k} = \frac{(f_{m,k} - 3{,}9\ )}{1{,}5}$$

$$f_{c,0,k} = 11{,}54 + 4{,}41\ \left(f_{t,0,k}\right)^{0,5} \rightarrow 11{,}54 + 4{,}41\ \left(\frac{f_{m,k}-3{,}9}{1{,}5}\right)^{0,5} \tag{3.9}$$

Cette relation donne des résultats assez proches de ceux proposés par STEIGER & all [51] pour les bois de fortes classes de résistance en flexion (classe supérieure au C50) mais donne des résistances en compression plus grandes qu'en flexion pour les bois de classe inférieure à C30. Par exemple, un bois classé D24 a actuellement une résistance en compression de 21 Mpa là où l'équation (3.9) prédit une résistance en compression de 27,6 MPa, ce qui représente une différence de 30%.

Au vu des différences qu'il existe entre les données expérimentales et l'équation de prédiction de la résistance en compression de la norme, une révision de cette dernière permettrait d'utiliser les bois feuillus au meilleur de leurs capacités en compression. C'est d'autant plus vrai qu'historiquement, les bois résineux étaient destinés aux éléments fléchis et les bois feuillus aux éléments comprimés.

Comme cela a été montré dans la bibliographie, plus l'angle entre l'effort et la pente de fil est élevé et plus la résistance mesurée diminue. Pour la compression, LANG & All [53] ont proposé en 2001 une équation permettant de prédire la résistance en compression en fonction de l'orientation du fil et des cernes du bois :

$$\frac{1}{\sigma_{\theta\phi}} = \frac{1}{\sigma_L}\cos^4\phi + \frac{1}{\sigma_R}\sin^4\phi\sin^4\theta + \frac{1}{\sigma_T}\sin^4\phi\sin^4\theta + \left(\frac{4}{\sigma_{RT}^{L45°}} - \frac{1}{\sigma_R} - \frac{1}{\sigma_T}\right)\sin^4\phi\sin^2\theta\cos^2\theta + \left(\frac{4}{\sigma_{LT}^{R45°}} - \frac{1}{\sigma_R} - \frac{1}{\sigma_T}\right)\cos^2\phi\sin^2\phi\cos^2\theta + \left(\frac{4}{\sigma_{LR}^{T45°}} - \frac{1}{\sigma_L} - \frac{1}{\sigma_R}\right)\cos^2\phi\sin^2\phi\cos^2\theta$$

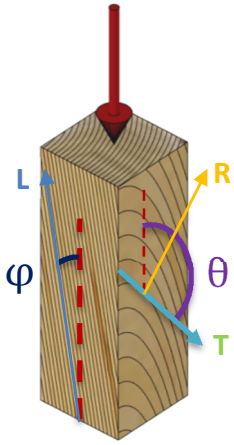


Figure 3-4 : Définition des paramètre de l'équation de LANG & All [8]

$\sigma_{\theta\varphi}$ Prédiction de la résistance

θ Orientation des cernes du bois

φ Orientation du fil du bois

σ_i Résistance en compression selon les directions principales

$\sigma_{RT}^{L45°}$ Résistance en compression avec $\varphi = 90°$ et $\theta = 45°$

$\sigma_{LT}^{R45°}$ Résistance en compression avec $\varphi = 45°$ et $\theta = 0°$

$\sigma_{LR}^{T45°}$ Résistance en compression avec $\varphi = 45°$ et $\theta = 90°$

L'implémentation d'un tel critère dans l'EUROCODE n'est pas concevable au vu du nombre de variables auquel il fait appel. C'est pour cela qu'actuellement la formule de la prédiction de la résistance selon un angle entre l'effort et le fil du bois se base sur la théorie de Hankinson. La DIN 1052 propose un critère basé sur les résistances en compression longitudinale et transversale du bois ainsi que sa résistance en cisaillement ce qui est plus judicieux, à la vue du mode de rupture en compression oblique :

$$f_{c,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,k}}{f_{c,90,k}}sin^2(\alpha)\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,k}}{1,5 \times f_{v,k}}sin(\alpha)\,cos(\alpha)\right)^2 + cos^4(\alpha)}}$$

$f_{c,0,k}$ Résistance caractéristique en compression longitudinale

$f_{c,90,k}$ Résistance caractéristique en compression transversale

$f_{c,0,k}$ Résistance caractéristique en cisaillement

α Angle entre l'effort et la pente de fil

b. Compression transversale

A l'origine de l'EN 384, la relation entre masse volumique et résistance en compression transversale a été définie par l'équation (3.10). Cette relation est basée sur le standard d'essais américain (ASTM D143-09) selon lequel il n'y a qu'une partie de l'éprouvette qui est chargée. La résistance en compression transversale fait donc intervenir obligatoirement une résistance en cisaillement selon cette méthode.

$$f_{c,90,k} = 0{,}015\ \rho_k \tag{3.10}$$

En 1990, KORIN [54] a montré expérimentalement qu'en contraignant l'éprouvette dans son intégralité, la relation entre masse volumique et résistance sur des résineux est divisible par deux :

$$f_{c,90,mean} = 0{,}006\ \rho_{mean} \tag{3.11}$$

Les mêmes observations ont été faites par DAMKILDE & all [55] en 1998 sur du bois massif et du bois lamellé-collé d'épicéa provenant de Norvège. En utilisant le référentiel d'essais européen qui comprime l'éprouvette sur toute sa surface, ils proposent, comme il est imagé sur la Figure 3-5, deux équations différentes de prédiction de la résistance en compression transversale.

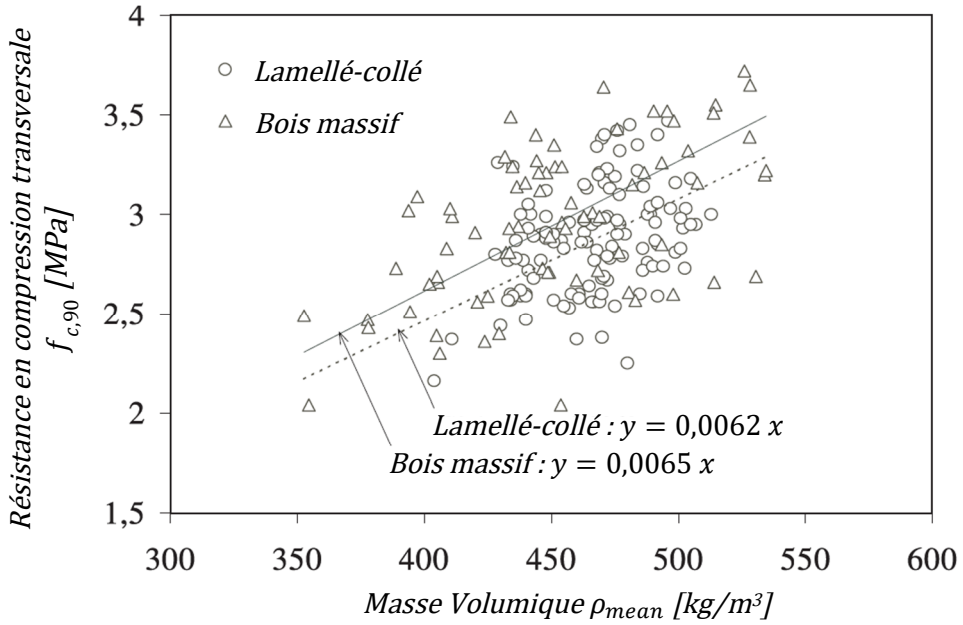


Figure 3-5 : Corrélation entre masse volumique et résistance en compression transversale pour du bois massif et du lamellé-collé d'épicéa - Fig 6 de DAMKILDE & all [55].

A partir de ces études, l'équation de l'EN 384 a été modifiée en 2004 pour correspondre à la mise en place du standard européen d'essais sur les résineux NF EN 1193 [56]. La nouvelle définition de la résistance en compression transversale (3.12) limite ainsi la surévaluation de cette propriété mécanique. Selon la bibliographie de sa thèse, HUBNER [57] attribue cette nouvelle relation à une proposition faite par GEHRI au CEN/TC 124/WG 2 en 1997. Dans ce document, GEHRI propose également de discuter de la corrélation écrite pour les bois feuillus et d'envisager pour estimer leur résistance, une relation non linéaire basée sur les travaux de ROTHMUND de 1949 (3.13). En dépit de ces observations et malgré la modification du standard d'essais, l'équation de prédiction de la résistance en compression transversale des bois feuillus est restée inchangée.

$$f_{c,90,k} = 0{,}007\ \rho_k \tag{3.12}$$

$$f_{c,90,mean} = 18.10^{-5}\ \rho_{mean}^{1,7} \tag{3.13}$$

La révision de l'EN 384 de 2016, se base sur une proposition faite par GLOS au Comité Européen de Normalisation (CEN). Cette modification permet une différenciation des résistances en compression transversale entre les feuillus des zones tempérées ($\rho_k < 700\ kg/m^3$) et les bois tropicaux. Elle conduit à la relation :

$$f_{c,90,k} = 0{,}010\ \rho_k \tag{3.14}$$

En analysant les essais réalisés par HUNGER & VAN DE KUILLEN (2015) d'une part et WESTERMAYR (2014) d'autre part, la Figure 3-6 montre que KOVRYGA & All [46] n'ont pas pu établir de relation directe entre la masse volumique et la résistance en compression transversale pour les essences testées (Hêtre et Frêne). Cela remet donc en cause l'équation de l'EN 384 et leur permet de proposer, comme pour le bois lamellé-collé de résineux, une résistance en compression transversale constante pour toutes les classes de résistance. Les résistances caractéristiques sont de 6,6 MPa pour le frêne et 6,77 MPa pour le hêtre. Il propose alors de considérer une résistance caractéristique de 6,6 MPa pour l'ensemble des feuillus européens.

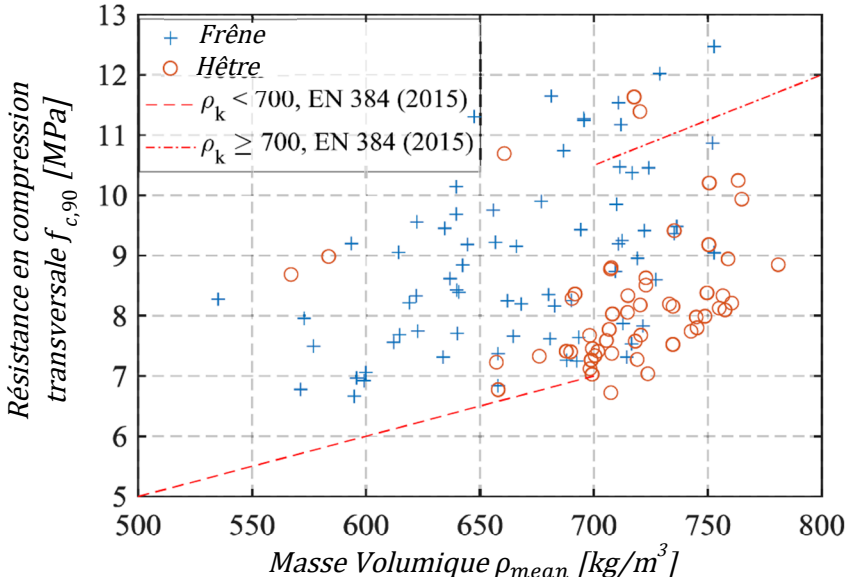


Figure 3-6 : Corrélation entre masse volumique et résistance en compression transversale pour du hêtre et du frêne Fig 8 (b) de KOVRYGA & All [46].

Dans l'EN 384 [25], la relation entre le module d'élasticité longitudinal et le module transversal n'ont pas évolué depuis la première version de la norme en 1995 et sont égales à :

$$E_{90,mean} = E_{0,mean}/30\ \textit{(résineux)} \tag{3.15}$$

$$E_{90,mean} = E_{0,mean}/15\ \textit{(feuillus)} \tag{3.16}$$

Ces ratios sont cohérents avec les valeurs moyennes exprimées par GUITARD [11] : 13,5 pour les feuillus et 21 pour les résineux. Dans son ouvrage, pour le hêtre, il exprime un ratio de 16,2 entre le module longitudinal ($E_L = 14\ 100\ MPa$) et le module transversal ($E_T = 867\ MPa$) et un ratio de 15,21 pour le chêne ($E_L = 17\ 500\ MPa$ et $E_T = 1150\ MPa$).

Les mêmes ordres de grandeur sont présentés dans le tableau 5-1 du WOOD HANDBOOK [22] avec, pour les résineux, un ratio compris entre 11,2 et 32 avec une moyenne de 19,3 et pour les feuillus (hors balsa et peuplier) un ratio fluctuant entre 11,6 et 21,2 avec une moyenne de 16,3.

Dans leurs essais, KOVRYGA & All [47] ont mesuré une relation comprise entre 14,65 et 16 pour une sollicitation transversale (entre $E_{t,0,mean}$ et $E_{t,90,mean}$) et un ratio compris entre 12,4 et 13,8 entre les modules $E_{t,0,mean}$ et $E_{c,90,mean}$.

c. Cisaillement

Avant la première version de l'EN 384, FEWEL & GLOS [58] avaient proposé de prendre une résistance au cisaillement égale à 0,1 fois la résistance en flexion. Dans le draft de l'EUROCODE et la première version de l'EN 384, une équation mettant en corrélation la résistance en flexion et la résistance en cisaillement a été proposée, telle que :

$$f_{v,k} = 0{,}2\left(f_{m,k}\right)^{0{,}8} \tag{3.17}$$

GREEN & KRETSCHMANN [39] ont commenté cette équation en expliquant que la corrélation n'était valable que pour les bois résineux « sans défauts ». Pour les auteurs, cette corrélation ne s'explique que par les corrélations fortes entre les résistances (en cisaillement et en flexion) et la masse volumique pour les bois « sans défauts ».

La révision de 2004 de l'EN 384, qui se base sur les résultats expérimentaux de GLOS & DENZLER [59] de 2003, introduit une limite supérieure de la résistance en cisaillement fixée à 3,8 MPa pour les bois avec une résistance en flexion supérieure à 40 MPa.

La DIN 1052 contrairement à l'EN 338 définit une résistance en cisaillement ne dépendant pas de la classe de résistance, telle que $f_{v,k} = 2{,}7\ MPa$. DENZLER & GLOS [60]. Avec 382 essais de cisaillement sur de l'épicéa, ils ont démontré que cette résistance en cisaillement pouvait être augmentée. Afin de proposer de nouvelles résistances en cisaillement dans les tableaux de l'EN 338, ils ont constitué 5 sous échantillons composés du même nombre d'éprouvettes en faisant en sorte que les masses volumiques de chaque lot se rapprochent d'une des masses volumiques du tableau de l'EN 338. Les résistances caractéristiques en cisaillement de chaque sous échantillon sont calculées et compilées dans le Tableau 3-VIII en vue de proposer une modification de l'EN 338. La disparition de la relation entre résistance en flexion et résistance en cisaillement provient ainsi de cette étude. Les résultats ne mettent néanmoins pas en évidence de corrélation directe entre masse volumique et résistance en cisaillement.

Par cette étude, ils montrent que, pour l'épicéa, l'orientation des cernes de l'éprouvette a une incidence sur la résistance en cisaillement (une orientation radiale étant plus résistante qu'une orientation tangentielle ou sur quartier) et que les éprouvettes avec des nœuds ont des résistances du même ordre de grandeur que les éprouvettes sans nœuds.

Tableau 3-VIII : Etude pour la modification des résistances en cisaillement des résineux - Tab 6 de DENZLER & GLOS [60].

Classe			C16	C24	C30	C35	C40	C50
EN 338 2004	$f_{v,k}$	[MPa]	1,8	2,5	3,0	3,4	3,8	3,8
	ρ_k	[kg/m^3]	310	350	380	400	420	460
E DIN 1052 2010	$f_{v,k}$	[MPa]	2,7					
	ρ_k	[kg/m^3]	Idem EN 338					
Essais DENZLER & GLOS 2007	n		48	48	48	48	48	-
	$f_{v,k}$	[MPa]	3,3	4,4	3,9	4,1	4,3	-
	ρ_k	[kg/m^3]	319	345	378	400	426	-
EN 338 2009	$f_{v,k}$	[MPa]	3,2	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
	ρ_k	[kg/m^3]	310	350	380	400	420	460

En 2011 [61] et 2018 [62] AICHER & All ont réalisé des essais de cisaillement sur du bois lamellé-collé composé de bois feuillus et tropicaux. Les essais de 2011 donnent une résistance en cisaillement de 6,3 MPa (COV 22%) dans le cas où la rupture en cisaillement est obtenue par la flexion d'une poutre recomposée (ASTM D3737). Les essais de 2018 réalisés selon l'annexe D de la norme sur la fabrication du bois lamellé collé (EN 14080 [63]) donnent des valeurs moyennes de cisaillement du bois de 19,1 MPa pour le hêtre et 14,7 MPa pour le chêne. Sur l'intégralité de leurs essais, du fait d'un coefficient de corrélation faible (R^2 = 0,25), les auteurs ne proposent pas d'équation liant la résistance en cisaillement et la masse volumique.

VAN DE KUILEN & All [64] ont réalisé des essais de cisaillement selon la norme EN408 [31] sur des bois résineux, feuillus et tropicaux. Les ruptures dans les plans de collages observées lors des essais préliminaires sur les bois feuillus et les bois tropicaux les ont obligés à modifier les préconisations de la norme pour pouvoir réaliser les essais de cisaillement. Les essais montrent que la résistance en cisaillement est fortement impactée par l'anatomie du bois et donc son essence. Selon ce principe, le hêtre et le chêne ont des masses volumiques similaires, mais les rayons ligneux de taille importante du chêne constituent une faiblesse vis-à-vis du cisaillement expliquant les résistances moindres de cette essence. In fine, à partir des résultats expérimentaux, ils proposent une modification importante de l'EN 338 avec un gain minimal de 50% de résistance en cisaillement (Tableau 3-IX).

Tableau 3-IX : Proposition de modification des résistances en cisaillement de l'EN 338 - Tab 7 de VAN DE KUILEN & All [64].

Classe	D18	D24	D27	D30	D3	D40	D45	D50	D55	D60	D65	D70	D75	D80
ρ_k	475	485	510	530	540	550	580	620	660	700	750	800	850	900
$f_{v,k}$ EN 338	3,5	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,4	4,5	4,7	4,8	5	5	5	5
$f_{v,k}$ Proposé	5,5	5,6	5,9	6,1	6,2	6,4	6,7	7,1	7,5	7,9	8,3	8,8	9,2	9,6

En reprenant les essais de VAN DE KUILEN & All [64] et en complétant ceux-ci par des essais réalisés sur du frêne, KOVRYGA & All [47], n'aboutissent pas à une corrélation entre la masse volumique et la résistance en cisaillement (cf Figure 3-7) suffisamment robuste selon eux (R^2 < 0.5). Sur le même principe que la DIN 1052, ils proposent une résistance en cisaillement indépendante de la classe de résistance avec $f_{v,k} = 7{,}5\ MPa$ pour leur système de classe de résistance en traction.

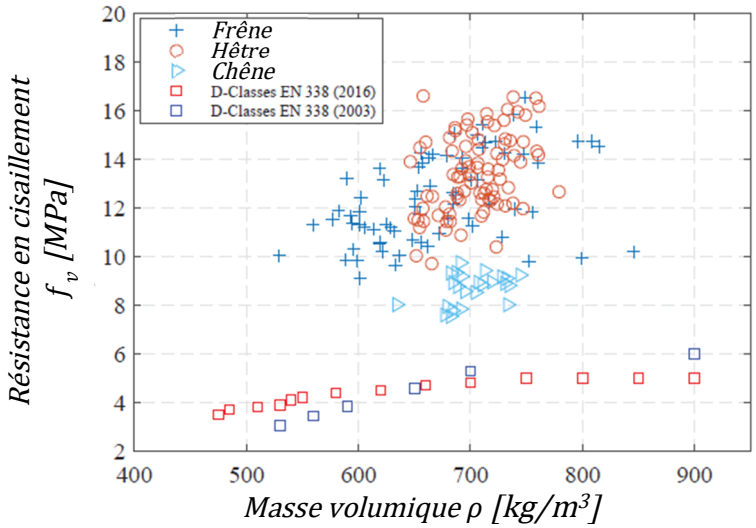


Figure 3-7 : Corrélation entre résistance en flexion et en traction pour du frêne - Fig 13 de KOVRYGA & All [47].

d. Traction axiale

La première version de l'EN 384 qui se base sur les analyses de FEWEL & GLOS [58] [65] et de GREEN & KRETSCHMANN [39] a introduit la relation (3.18) entre les résistances en traction et en flexion. Si cette relation était, dans la version de 1995 de la norme, réservée exclusivement aux bois résineux, elle a été étendue aux bois feuillus avec la révision de 2004.

Les études de BURGER & GLOS [66] et de STEIGER & ARNOLD [51] ont montré que pour les plus hautes classes de résistance, le ratio était plus important que 0,6. C'est pour cela que dans la version provisoire de l'EN 384 de 2015, un ratio de 0,73 avait été introduit pour les plus hautes classes tout en conservant le ratio de 0,6 pour les plus basses classes mécaniques.

Dans le but de conserver une équation unique pour toutes les classes de résistance, la relation (3.19) a été retenue lors de la révision de l'EN 384 [25] de 2016, équation qui est assez proche de la proposition faite par STEIGER & ARNORLD [51] en 2006 (3.20). Faute d'études sur le sujet, les bois feuillus conservent l'équation (3.18).

$$f_{t,0,k} = 0{,}6\, f_{m,k} \text{ – } EN\ 384\ 1995 \tag{3.18}$$

$$f_{t,0,k} = 0{,}73 \times f_{m,k} - 3{,}07 \text{ – } EN\ 384\ 2016 \tag{3.19}$$

$$f_{t,0,k} = 0{,}86 \times f_{m,k} - 5{,}80 \text{ - } STEIGER\ \&\ ARNORLD \text{ [51]} \tag{3.20}$$

En 2006, dans le but de caractériser le hêtre et le chêne Allemand, GLOS & DENZLER [43] ont réalisé des essais de flexion et de traction sur ces essences. Plus la qualité du bois augmente (classement visuel selon DIN 4074-5 : LS10 & LS13) et plus la différence entre la résistance en traction et la résistance en flexion diminue. Comme le montre le Tableau 3-X, le ratio entre les résistances caractéristiques en traction et en flexion est proche du ratio de 0,73 exprimé pour les bois résineux.

Tableau 3-X : Comparaison des résistance en flexion et en traction des essais de GLOS & DENZLER [43].

	LS10	LS13
$f_{m,mean}$	65,7	80
$f_{t,0,mean}$	43	79,7
ratio	0,65	1,00

	LS10	LS13
$f_{m,k}$	30,4	44,2
$f_{t,0,k}$	22,4	34,6
ratio	0,74	0,78

Grace à ses essais de traction et de flexion sur du frêne (cf Figure 3-8), KOVRYGA [46] a exprimé à partir de 3 lots de frêne une relation entre les résistances en flexion et en traction :

$$f_{m,k} = 3{,}9 + 1{,}5\, f_{t,0,k} \tag{3.21}$$

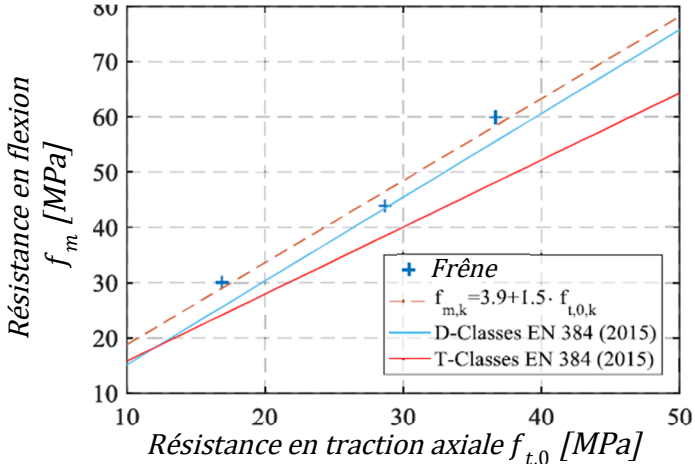


Figure 3-8 : Corrélation entre résistance en flexion et en traction pour du frêne- Fig 6 de KOVRYGA & All [46].

CAMU & AICHER [67] se sont intéressés à la modélisation des propriétés mécaniques le long des planches de chêne. Dans le cadre de cette étude, après avoir mesuré le module d'élasticité en traction de l'éprouvette dans son intégralité (1,7m de long), ils ont décidé de repartir sur la poutre 17 tronçons de 10cm de long et de mesurer le module d'élasticité local de chacun de ces tronçons. Une fois ces mesures réalisées, l'éprouvette est testée en traction jusqu'à la rupture. Comme le montre la Figure 3-9, la relation entre résistance et module global de la poutre n'a pas pu être établie (R^2 = 0,213), alors que le module local permet d'estimer convenablement la résistance en traction dans la zone de rupture.

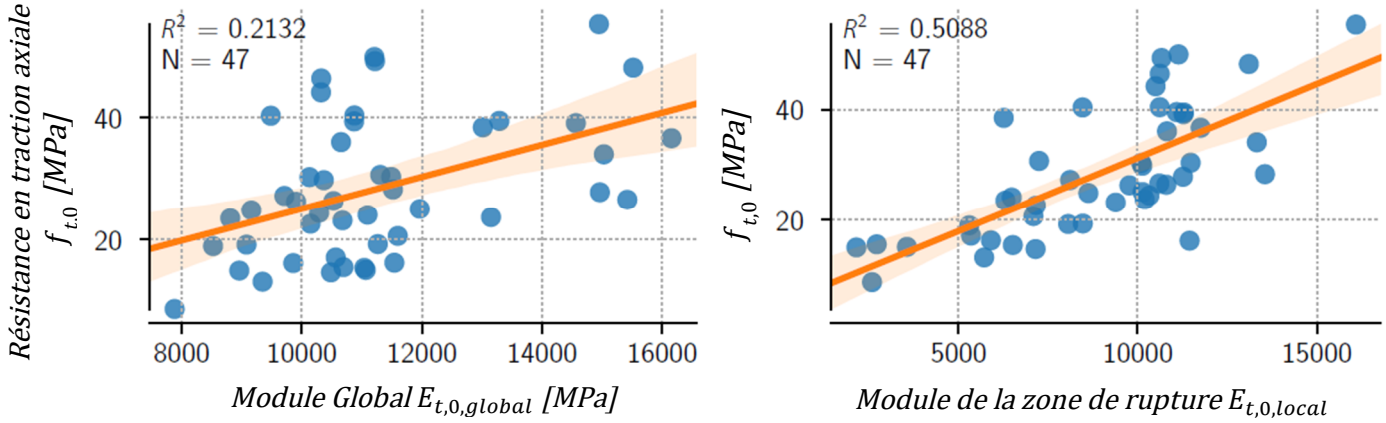


Figure 3-9 : Relation entre résistance et module d'élasticité en traction - Fig 5 de CAMU & AICHER [67].

Par leurs essais, et comme le montre la Figure 3-10, aucune corrélation directe entre la densité de nœuds (KAR) et la résistance en traction n'as pu être établie (R^2 = 0,11) alors que c'est le critère retenu pour la certification Japonaise JAS. Après la première rupture en traction, un deuxième essai est réalisé sur les deux morceaux restant de l'éprouvette. Par ces essais, les auteurs montrent une bonne corrélation entre la densité de nœuds (KAR) et l'augmentation de résistance sur les essais en traction des pièces restantes (R^2 = 0,45). Cela valide que les nœuds constituent la faiblesse principale des bois feuillus vis-à-vis des sollicitations de traction axiale. La purge des nœuds les plus importants contribuerait donc à l'augmentation de la résistance des bois aboutés feuillus.

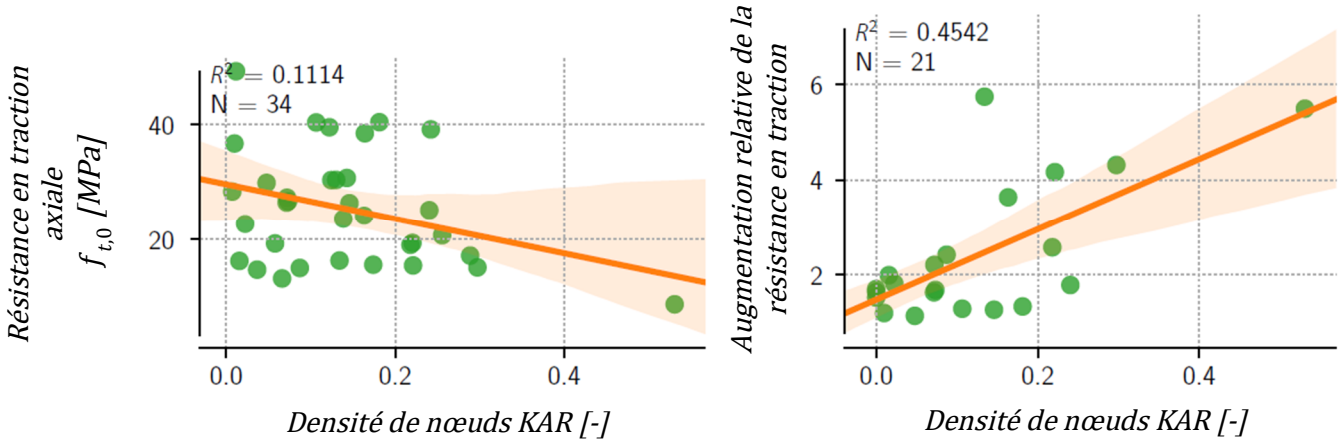


Figure 3-10 : Impact de la densité de nœuds sur la résistance en traction du chêne - Fig 8 de CAMU & AICHER [67].

e. Traction transversale

En 1998, BLASS & SCHMID [68] ont travaillé, suite à la mise en place du nouveau standard d'essais EN1193, sur la corrélation entre la résistance en traction transversale et la masse volumique pour les résineux. Ils indiquent que même si l'EN 384 propose la relation (3.22), le code de calcul allemand (DIN 1052) préconise une valeur fixe $f_{t,90,k} = 0{,}2\ MPa$ indépendante de la classe de résistance. Sur les essais réalisés, 53% des éprouvettes cassent au niveau de la zone d'assemblage avec le montage permettant l'application de la contrainte de traction transversale. Sur les 88 essais qui rompent dans le bois, la résistance moyenne observée en traction transversale est de 1,79 MPa pour l'Epicéa. Pour l'ensemble des essais, les valeurs caractéristiques de résistance varient entre 0,95 MPa (COV 29%) et 1,84 MPa (COV 26%) en fonction de l'orientation des cernes de l'éprouvette. Pour ces essais les corrélations entre masse volumique et résistance en traction transversale sont très faibles (coefficient de corrélation r variant entre -0,232 et 0,095).

$$f_{t,90,k} = 0{,}001\ \rho_k \tag{3.22}$$

L'année suivante, les mêmes auteurs [69] réalisent des essais quasiment similaires sur du bois lamellé collé et arrivent à la conclusion que la masse volumique ne permet pas d'estimer convenablement la résistance en traction transversale du bois. Ces deux publications justifient la modification de l'EN 384 et l'utilisation d'une valeur fixe de résistance indépendante de la classe de résistance mécanique.

Selon la thèse de HUBNER soutenue en 2013 [57], il n'existe pas de documents qui justifient le choix de la valeur limite de 0,6 MPa en traction transversale des bois feuillus européens, aucun test n'ayant été conduit selon le standard d'essais EN 408 [31]. Les 86 essais qu'il a réalisés sur du hêtre, montrent une résistance moyenne de 3,71 MPa et une résistance caractéristique de 2,08 MPa.

En reprenant les essais de WESTERMAYR (2014) et HUNGER & VAN DE KUILLEN (2015), présentés sur la Figure 3-11, KOVRYGA [46] n'établit pas non plus de corrélation claire entre la masse volumique et la résistance en traction transversale. Les résistances caractéristiques étant respectivement de 3,40 et 3,48 MPa pour le frêne et le hêtre, il propose pour son système de classe résistance en traction, une résistance en traction transversale indépendante de la classe de résistance tel que :

$$f_{t,90,k} = 3{,}4\ MPa \tag{3.23}$$

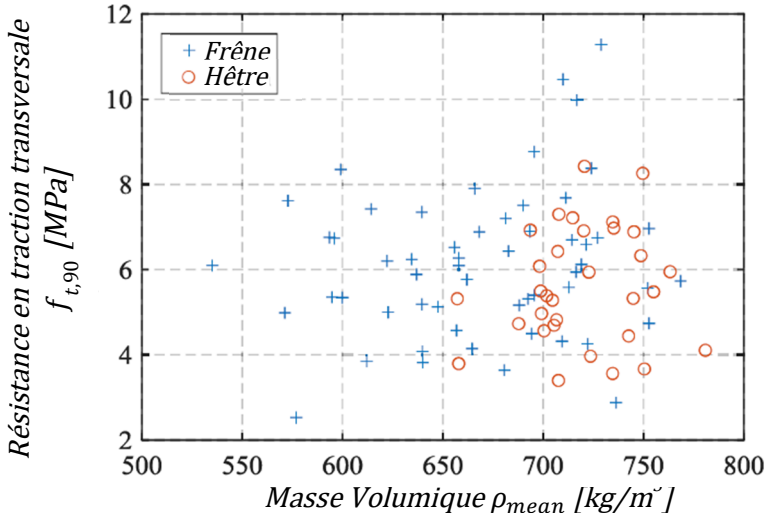


Figure 3-11 : Résistance en traction transversale en fonction de la masse volumique - Fig 8 (a) de KOVRYGA & All [46].

3.1.4. Synthèse des méthodes de détermination des corrélations entre les résistances

Parmi toutes les références trouvées en bibliographie sur les méthodes de détermination des corrélations entres les propriétés mécaniques, trois méthodes principales semblent émerger :

a. Utilisation des modules d'élasticité comme référence

Dans leur étude, STEIGER & ARNOLD [51] ont mesuré le module d'élasticité dynamique, par une méthode vibratoire, de chaque éprouvette. Ils utilisent cette mesure pour constituer, pour chaque type de sollicitation, des sous échantillons d'au moins 40 éprouvettes avec des bornes de modules identiques. Par exemple, si un lot d'éprouvettes avec un module vibratoire compris entre 10 000 et 12 000 MPa est constitué pour les essais de flexion, alors un lot avec ces mêmes bornes est constitué pour les essais de compression. Pour chaque sous échantillon, les résistances caractéristiques sont calculées pour chaque sollicitation ce qui permet de créer plusieurs points pour établir une corrélation entre les propriétés testées.

Cette méthode ne fonctionne que si la corrélation entre le module d'élasticité et la résistance est importante. Si c'est le cas pour les bois résineux, généralement, pour les feuillus, ces corrélations ne sont pas aussi évidentes. C'est notamment ce qu'ont montré VIGUIER [14] pour la flexion sur le chêne ou CAMU & AICHER [67] pour la traction. Au regard de l'étude bibliographique, l'emploi d'une méthode similaire peu efficiente n'est pas envisageable pour les bois feuillus.

En 2019, pour estimer les corrélations entre les propriétés mécaniques, KOVRYGA [47] a proposé, une méthode basée sur la prédiction de la résistance en traction. En utilisant la mesure du module d'élasticité dynamique combinée à une mesure de la nodosité, il est capable de prédire la résistance en traction de chaque échantillon. En se basant sur cette prédiction pour créer des sous échantillons, il calcule les résistances caractéristiques et établit des corrélations entres elles.

b. Utilisation de la masse volumique comme référence

Même si la corrélation entre masse volumique et résistance en cisaillement n'est pas avérée, DENZLER & GLOS [60] ont réalisé un sous échantillonnage à partir des masses volumiques caractéristiques. Cela permet de calculer, pour chaque lot, une résistance caractéristique et de l'opposer à la résistance en flexion du tableau de l'EN 338 [38] pour écrire une corrélation entre ces deux résistances.

Les résultats des différentes études bibliographiques résumés dans le tableau de synthèse en Annexe B et l'étude de DENZLER & GLOS [43] montrent qu'actuellement les masses volumiques des bois feuillus du système de classe de résistance sont assez éloignées des mesures expérimentales (pour le hêtre et le chêne en tout cas). Une analyse basée sur la masse volumique est donc impossible, car elle limiterait l'analyse aux classes D35 et supérieures.

c. Limiter la variabilité naturelle.

Quand MUNOZ & GETE [52] ont souhaité proposer de nouvelles corrélations entre la résistance en compression et la résistance en flexion, ils ont utilisé des éprouvettes de bois « sans défauts ». Selon la Figure 3-12, en considérant que la variabilité naturelle est faible lorsque les éprouvettes sont tirées d'une même planche, ils proposent d'exprimer les corrélations en comparant directement les résultats d'essais.

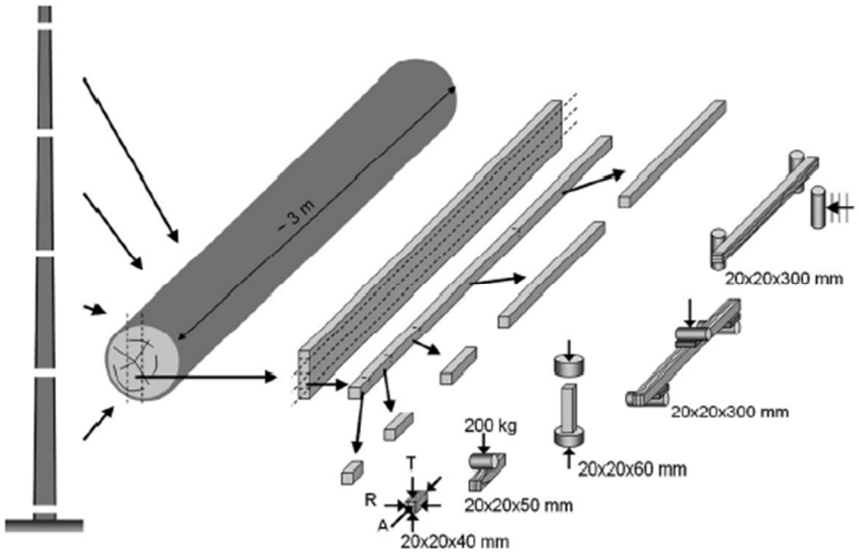


Figure 3-12 : Principe de réalisation des éprouvettes pour les différents essais - Fig 1 de MUNOZ & GETE [52].

Si cette hypothèse semble réaliste sur de petites éprouvettes de bois « sans défauts », elle semble, à la vue des résultats exprimés par CAMU & AICHER [67] sur la traction, difficilement justifiable pour des essais à l'échelle bois d'œuvre. En effet, lors de ces essais, la rupture est principalement liée à la présence d'une singularité (pente de fil ou nœud), le comportement mécanique en traction est donc largement influencé par la position de l'éprouvette dans la planche et donc la variabilité naturelle le long de l'éprouvette.

Bien que ce ne soit pas la plus parfaite des méthodes, une analyse du même type sera utilisée dans le cadre du projet EFEUR 5 pour la relation entre la résistance en compression axiale et la résistance en flexion et, si elle existe, pour la relation entre résistance en cisaillement et résistance en flexion. Néanmoins, dans le cadre de ces analyses, une prise de recul vis-à-vis des lois proposées et de la variabilité naturelle sur les propriétés mécaniques devra nécessairement être intégrée dans l'interprétation des données.

3.1.1. Conclusion de l'étude bibliographique

L'étude bibliographique a mis en avant des corrélations suffisamment significatives pour être exploitables entre la résistance en flexion d'une part et la résistance en traction ou compression axiale d'autre part. Ces mêmes études montrent qu'actuellement les équations de prédictions des propriétés dites « secondaires », mais indispensables à l'ingénieur de bureau d'études, avaient tendance à minimiser les résistances observées expérimentalement. Une meilleure valorisation des bois feuillus passe donc par une étude précise des relations qui encadrent la prédiction de ces deux propriétés mécaniques.

En ce qui concerne la résistance en cisaillement, la bibliographie n'a pas mis en avant de corrélation entre cette résistance et la résistance en flexion ou la masse volumique. Une campagne expérimentale sur les bois feuillus français permettra de valider l'hypothèse de la DIN 1052 sur une résistance indépendante de la classe de résistance ou la proposition de VAN DE KUILEN & All [64] sur de nouvelles résistances en cisaillement (augmentation de 50% par rapport aux valeurs actuelles).

Pour la compression transversale, la relation entre la résistance et la masse volumique est largement maîtrisée pour les bois résineux, mais les origines de la formule de l'EN 384 modifiée en 2016 restent « floues ». La campagne expérimentale réalisée dans le cadre du projet EFEUR5 a pour objectif de valider cette équation ou de confirmer les observations de KOVRYGA & All [46] avec une résistance indépendante de la masse volumique fixée à 6,6 MPa pour toutes les classes de résistance.

Finalement, dans l'EUROCODE, la résistance en traction transversale n'est utilisée que pour la justification des poutres lamellées collées avec des géométries particulières (poutres courbe, poutre à inertie variable, poutre à intrados courbe et inertie variable). Au vu des prix actuels des lamellés collés de bois feuillus, pouvant atteindre 3000 €/m^3 pour du chêne (prix SIMONIN 2017), la réalisation de structures utilisant ces géométries particulières est économiquement inconcevable. Compte tenu des enjeux pour la valorisation du bois feuillus et de la complexité de réalisation des essais (collages des éprouvettes) il a été décidé de ne pas rechercher précisément cette propriété mécanique dans le cadre du projet EFEUR5.

3.2. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

Les protocoles suivants décrivent l'ensemble des éléments mis en place pour réaliser les essais de caractérisation des propriétés mécaniques.

Cette campagne expérimentale a pour but de caractériser l'ensemble des propriétés mécaniques données par l'EN 338 et de définir, si elles existent, des corrélations entre elles dans le but de valider les équations proposées dans l'EN 384.

3.2.1. Normes

Les essais d'assemblage ainsi que la détermination des propriétés physiques associées sont encadrées par le corpus réglementaire suivant :

- NF EN 408 [31] : Définition des protocoles d'essais et détermination des précisions de mesures requises.
- NF EN 384 [25] : Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et des masses volumiques.
- NF EN 14358 [70] : Détermination des valeurs caractéristiques.
- NF EN 13183-1 [71] : Détermination par la méthode de dessiccation de la teneur en humidité des pièces de bois sciées.

3.2.2. Dispositif de mesure

Pour les essais réalisés sur dalle d'essais, la mesure des efforts appliqués par le vérin d'une capacité de 500 kN se sont effectués au moyen d'une cellule de force de 500 kN avec une précision de (± 0,01 kN, selon étalonnage annuel) en adéquation avec les conditions fixées par l'EN 408.

Pour les essais de petites tailles la machine d'essais universelles ZWICK, a une capacité de 250 kN et est équipée d'une cellule de force de 250 kN avec une précision de (± 0,001 kN, selon étalonnage annuel) en adéquation avec les conditions fixées par l'EN 408-A1

Les différentes mesures des déplacements sont réalisées selon un des systèmes suivants :

- Acquisition vidéo avec une caméra de marque VDM ACQUISITION au format A3 à 1,0m de distance. Les essais préliminaires montrent que la précision est dépendante de la définition du plan de mesure et de la taille des cibles utilisées. L'analyse des fichiers d'essais montrent que la précision est supérieure à 0,01mm, donc en adéquation avec les recommandations de la norme EN 408 (essai de flexion, essai de cisaillement).
- Acquisition vidéo avec une caméra de marque VDM ACQUISITION au format A4 à 1,0 m de distance. Les essais préliminaires montrent une précision de l'ordre de 0,01 mm, en adéquation avec la précision de 0,02mm pour des déplacements inférieurs à 2mm. (module de cisaillement des essais de flexion, essais de compression axiale et transversale)
- Capteurs de déplacement du type LVDT de marque HBM avec une course de 20 mm pour les essais de traction et une course de 200 mm pour les essais de flexion sur éprouvettes « sans défauts » en flexion. La précision de ces capteurs dans le cadre de leur chaîne de mesure est de l'ordre de 0,02mm sur la plage d'utilisation expérimentale.
- Extensomètre de type DigiClip de marque ZWICK avec une longueur de référence l_0 de 50mm d'une classe de précision 0,5 (résolution 0,5µm).

Quel que soit le type d'essais et le type d'acquisition des déplacements, les données sont synchronisées soit directement par le logiciel de pilotage des équipements, soit par un système de trigger. (cf. Figure 3-13).

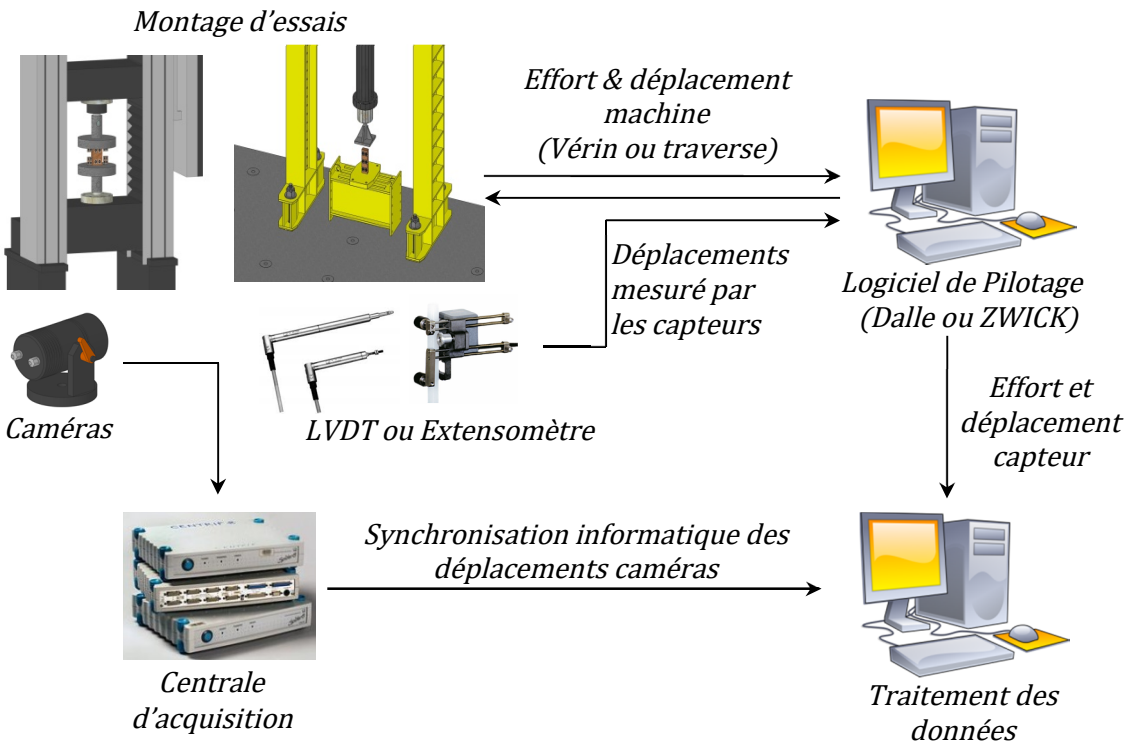


Figure 3-13 : Principe des dispositifs de mesure.

3.2.3. Montages, systèmes de mesures & dimensions

Les figures Figure 3-15 à

Figure 3-20 présentent les montages mis en place en accord avec les préconisations de la norme EN 408 pour la réalisation des essais. A la vue des dimensions et/ou des efforts estimés, une partie des essais a été réalisée sur la dalle d'essais du laboratoire et le reste sur la machine d'essais universelle (ZWICK 250).

1. Essais de flexion

Pour les essais réalisés sur la dalle d'essais, le montage utilisé est celui de la Figure 3-14. L'effort est réparti entre les deux points de chargement au moyen d'un chevêtre (en rouge sur la figure) parfaitement articulé. La cellule de force positionnée entre le vérin et le chevêtre permet de mesurer l'effort appliqué au cours de l'essai. Les appuis, ainsi qu'une ferrure placée dans la partie centrale de l'éprouvette, permettent de bloquer la rotation de torsion sans s'opposer au déplacement vertical de la pièce. Cela empêche les phénomènes d'instabilité et en particulier le déversement.

Un système de calle métallique, identique à celui de la Figure 3-14, de longueur inférieure à la demi-hauteur des éprouvettes, est interposé entre l'éprouvette et les systèmes d'appuis et de chargement. Ces dispositifs limitent les effets de compression transversale localisée qui pourraient augmenter la mesure des déformations globales.

Comme indiqué sur la Figure 3-15, les points de chargements sont espacés d'une longueur de 6 fois h, h étant la hauteur de la poutre et les appuis sont quant à eux espacés d'une distance de 18 fois cette hauteur. Par soucis de simplicité, il est retenu pour cette dimension, la section commandée

au scieur. La correction des résultats proposée dans l'EN384 étant ensuite réalisée individuellement pour chaque échantillon en fonction de sa hauteur mesurée.

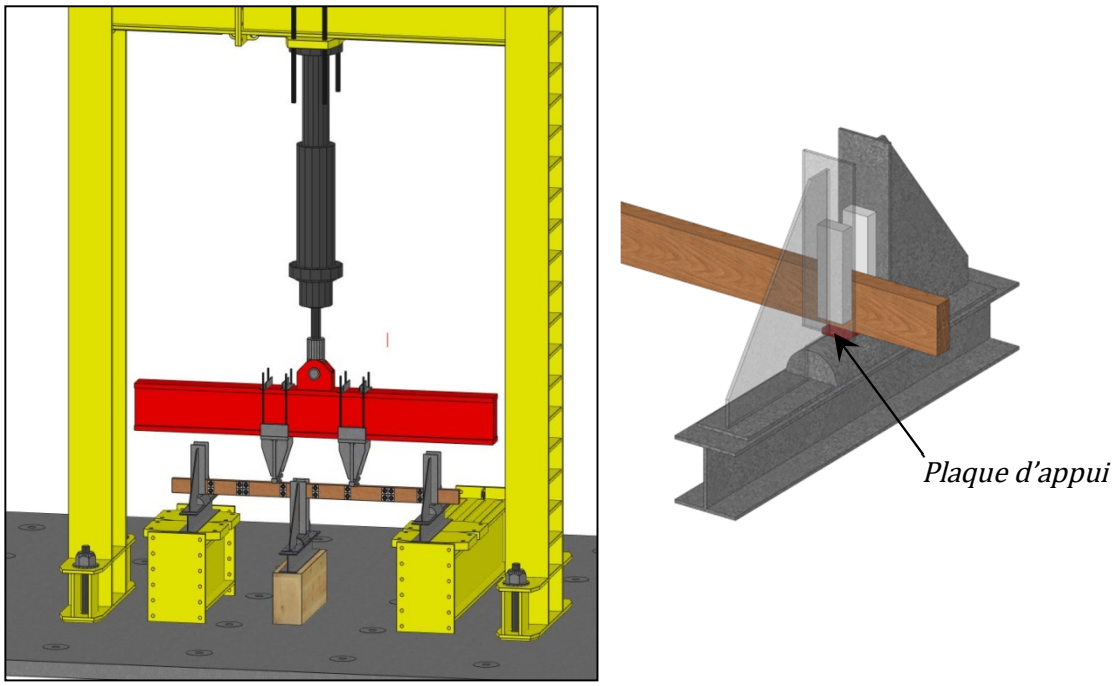


Figure 3-14 : Montage de flexion sur la dalle d'essais.

Les cibles utilisées pour l'acquisition vidéo des déplacements sont positionnées comme représenté sur la Figure 3-15 et permettent de mesurer les grandeurs suivantes :

- Le module d'élasticité global, qui se base sur la flèche au milieu de la poutre. La mesure est effectuée à partir du déplacement de la cible n°2, déplacement pouvant être corrigé par la prise en compte du tassement aux appuis, quantifié par les cibles n°1.
- Le module d'élasticité local, calculé à partir du rayon de courbure de la zone de moment constant. Les cibles n°2 et 3 sont utilisées pour quantifier les déformations de la poutre. Leur espacement, de 5 fois la hauteur de la poutre, est fixé par la norme d'essais.
- Le module de cisaillement est calculé à partir de la distorsion des cibles n°4 disposées en carré. Pour ces cibles, l'acquisition est faite via une caméra spécifique (Format A4).

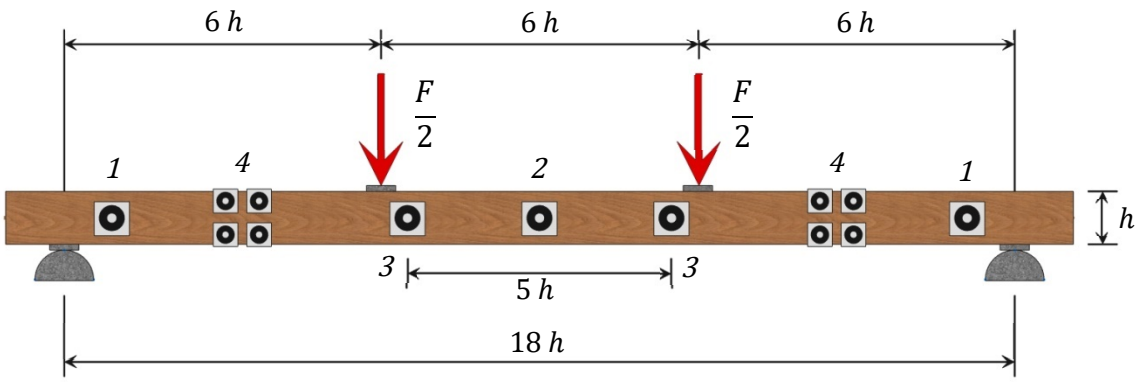


Figure 3-15 : Géométrie des essais de flexion.

2. Essais de compression axiale

Au vu des valeurs de compression axiale référencées lors de l'étude bibliographique, les essais ont été réalisés sur la dalle d'essais du laboratoire. Pour réduire le nombre d'usinages, et surtout se limiter à l'utilisation d'un seul vérin, il a été décidé d'utiliser la même section entre les essais de compression axiale et les essais de compression transversale : 45x90mm². Les dimensions décrites sur la Figure 3-16 sont conformes aux préconisations de l'EN 408 avec une longueur égale à 6 fois la plus petite dimension de l'éprouvette (45 mm dans notre cas) et un espacement entre les points de mesures de 4 fois cette même petite dimension.

Pour limiter les effets liés au frottement et l'introduction d'efforts parasites dans l'éprouvette, un système de plaques métalliques, intercalées de rouleaux permettant le glissement entre cette dernière et la tête de chargement fixée au vérin a été mis en place. Les éprouvettes sont usinées sur un centre numérique de tronçonnage garantissant des faces parallèles entre elles.

Les déformations sont mesurées via des cibles disposées sur l'ensemble de l'éprouvette et une caméra au format A4, l'utilisation d'un extensomètre n'étant pas possible compte tenu de l'épaisseur de l'éprouvette. Les différentes cibles permettent de quantifier l'évolution du module d'élasticité en compression le long de l'éprouvette dont les résultats ne seront pas présentés dans ce document. Des cibles complémentaires sont disposées au niveau du bâti pour potentiellement étudier le comportement du contact bois/métal en compression longitudinale. Ces résultats ne sont pas présenté dans ce document.

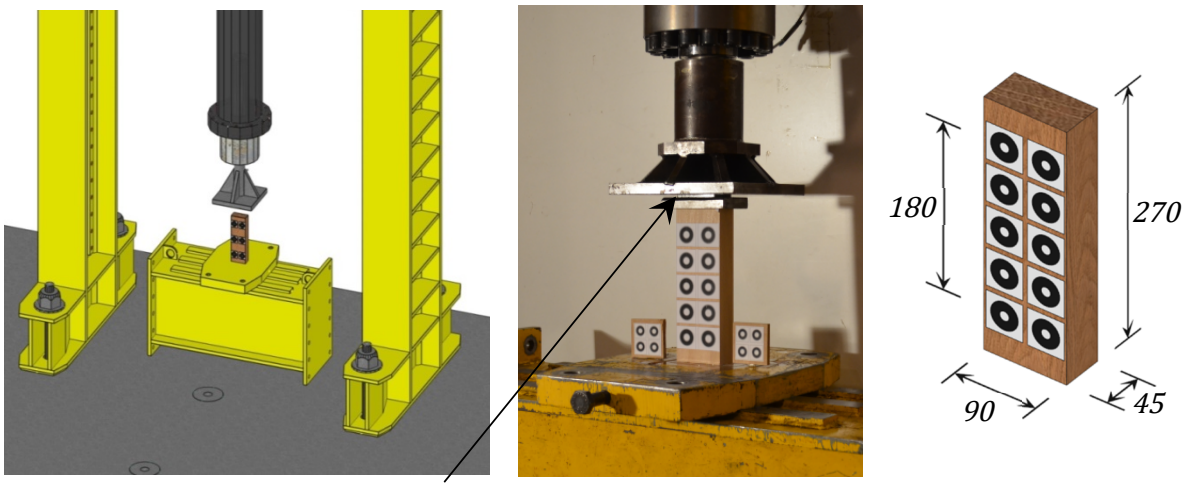


Figure 3-16 : Montage de compression axiale sur la dalle d'essais.

3. Essais de traction axiale

Les mors de traction ont été développés en se basant sur une étude de STEIGER, GEHRI & ARM [72] réalisée en 1994. Comme présenté sur la Figure 3-15, les mors sont composés de deux tôles en acier, un fixe et un qui se déplace via des vérins hydrauliques. Après mise en place de l'éprouvette, ces vérins sont montés en charges afin d'assurer une précontrainte suffisante au niveau des plaques striées et permettant ainsi le maintien de l'éprouvette dans ses mors au cours de l'essai. La distance libre de chargement entre les mors de 1500 mm respecte la condition de 9 fois la hauteur des éprouvettes (130 mm pour ces essais) fixée par l'EN 408.

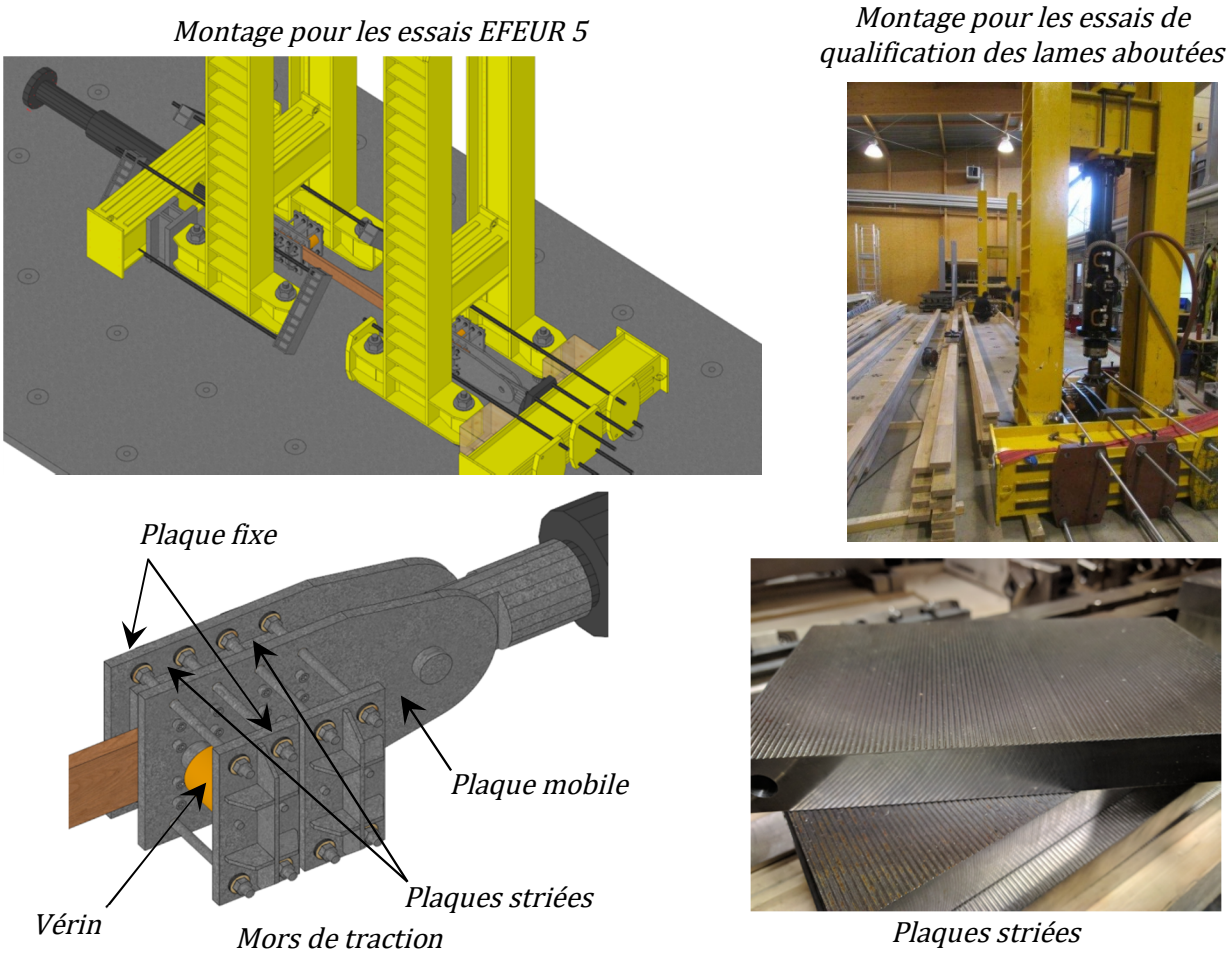


Figure 3-17 : Montage de traction axiale sur la dalle d'essais.

Pour mesurer le module d'élasticité, deux capteurs de type LVDT fixés au sol (espacés de 1155mm) viennent mesurer les déplacements horizontaux de l'éprouvette. La différence entre les deux mesures détermine l'allongement de la barre. Néanmoins, les ruptures brutales en traction ont endommagé à plusieurs reprises le système de mesure des déformations (fixation au sol, équerres servant de point de référence, capteurs eux même). Cumulé à la précision des capteurs vis-à-vis des grandeurs mesurées (une différence de 0,1mm pour 10 Mpa d'accroissement de contrainte représentant une différence de module de 15%), les mesures de module d'élasticité en traction n'ont donc pas été jugées suffisamment pertinentes sur de petites longueurs pour être exploitées convenablement.

4. Essais de compression transversale

Les essais de compression transversale sont exécutés au moyen des plateaux de compression sur la machine d'essais universelle (cf Figure 3-18).

La dimension des éprouvettes de 45x90mm² par 70mm de long est fixée par l'EN 408. Conformément aux indications de la même norme, les cibles sont disposées à une distance de 15mm du bord de l'éprouvette (b/3) offrant ainsi une hauteur de mesure de 60mm, supérieure à 0,6h recommandé.

La mesure du déplacement est réalisée, comme pour les essais de compression axiale via un système de cibles et une caméra au format A4. Des cibles ont également été mises en place entre l'éprouvette et le bâti pour quantifier la loi de comportement en contact bois-métal en compression transverse. L'analyse de ces résultats n'est pas présentée dans ce document.

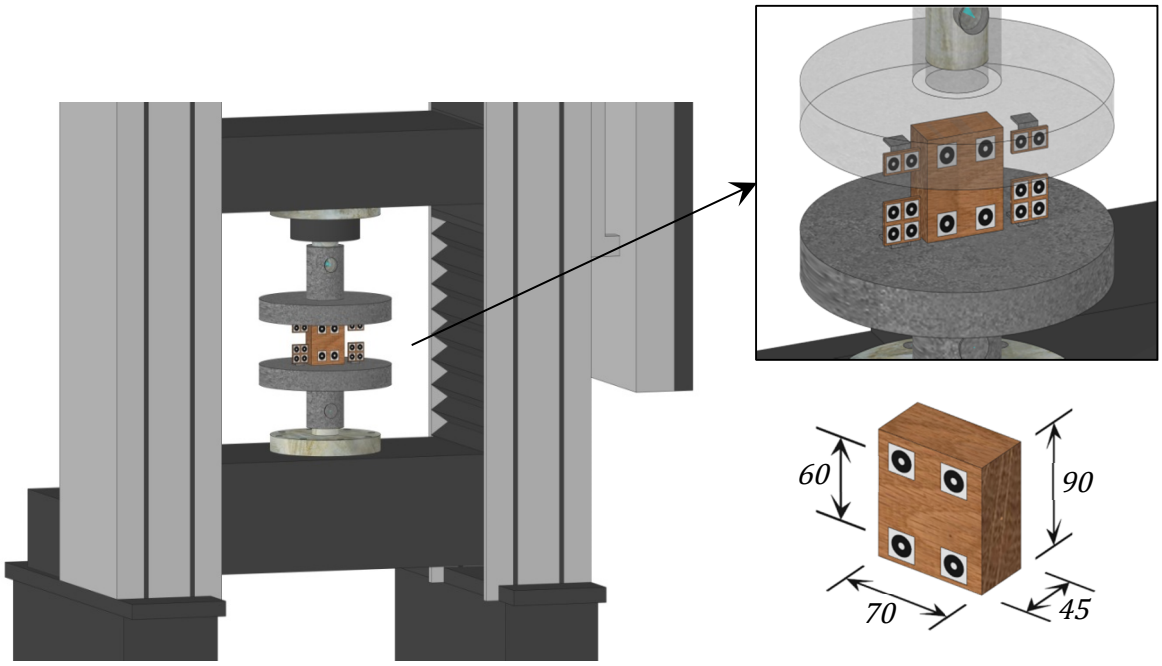


Figure 3-18 : Montage de compression transversale sur la machine d'essais universelle.

5. Essais de cisaillement

Comme imagé sur la Figure 3-19, les essais de cisaillement sont exécutés sur la machine d'essais universelle par compression en appliquant deux efforts directement opposés. Afin d'axer parfaitement ces efforts, deux demi-cylindres sont disposés sur les tôles métalliques collées à l'éprouvette. Les collages sont réalisés à l'aide d'une colle époxy bi-composante EPONAL TH 316 de marque BOSTIK en respectant le cahier des charges du fabricant. Les essais préliminaires ont conduits aux mêmes conclusions que celles de VAN DE KUILEN & All [64], à savoir une rupture systématique dans les plans de collage pour le hêtre et le chêne (cf photo supérieure droite de la Figure 3-19).

Pour y remédier, il a été décidé de remplacer les semelles métalliques par des lames de bois rainurées afin de centrer convenablement l'éprouvette, augmenter la surface de collage et d'assurer le maintien lors du collage. Avec cette adaptation, aucune rupture dans les joints de collage n'a été observée lors d'essais préliminaires. La hauteur des éprouvettes a été augmentée à 60mm et les profondeurs des rainures fixées à 2,5 mm pour garder une hauteur fixe de 55 mm, comme imposé par l'EN 408. L'angle de 14° imposé par l'EN 408 a été respecté avec cette géométrie d'éprouvette.

Le module de cisaillement est calculé à partir de la distorsion entre les cibles positionnées directement sur l'éprouvette pour lesquelles le déplacement est mesuré par acquisition vidéo.

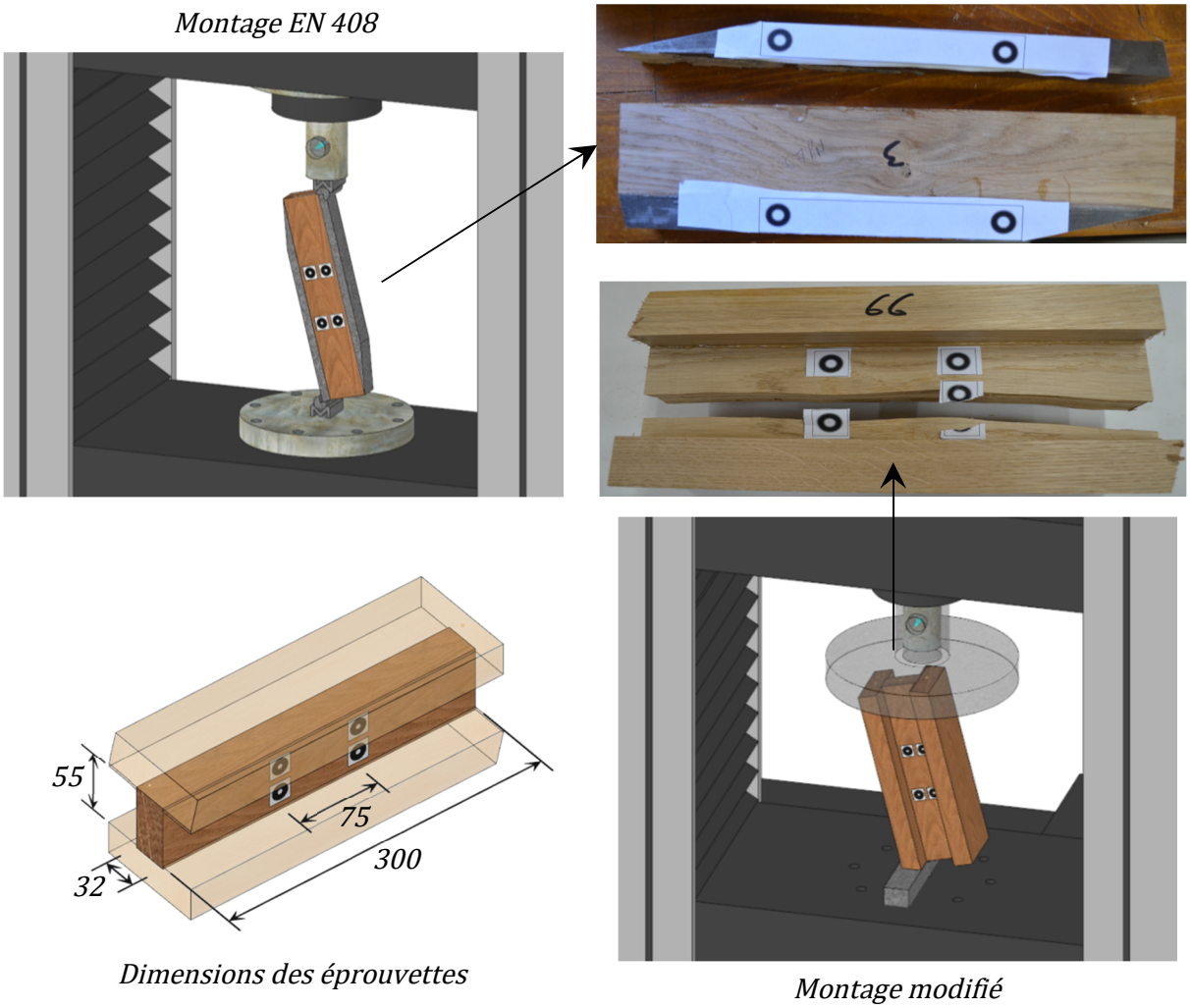


Figure 3-19 : Montage de cisaillement sur la machine d'essais universelle.

6. Essais sur bois « sans défauts »

Pour étudier certaines corrélations entres les propriétés mécaniques et l'influence de l'humidité sur la résistance, des essais sur bois « parfait » ont été réalisés sur la machine d'essais universelle.

Pour les essais de flexion (cf

Figure 3-20), les éprouvettes étant plus larges que hautes (50x30 mm²), aucun système de blocage du déversement n'a été mis en place. Comme pour les essais sur bois d'œuvre, les charges sont amenées par un système de chevêtre parfaitement articulé. Un système de plaque entre l'éprouvette et les points d'appuis (y compris chargement) ont été mis en place pour limiter le matage et donc une mauvaise mesure des déformations. Sur ces essais, la résistance en flexion ainsi que le module d'élasticité global sont mesurés à partir de deux capteurs LVDT positionnés, à mi-travée, de part et d'autre de l'éprouvette.

Sur la même figure, le montage des essais de traction réalisés au moyen de deux mors d'une capacité de 250 kN est représenté. Pour se prémunir d'une rupture dans les mors, les éprouvettes sont usinées selon le principe de la

Figure 3-20, de manière à réduire leur section dans la zone centrale. Un extensomètre du type DIGICLIP de marque ZWICK (longueur de référence 50mm) permet la mesure de l'élongation de la barre en traction. Pour éviter tout risque d'endommagement, le capteur est retiré une fois que l'effort a atteint 40% de l'effort maximal.

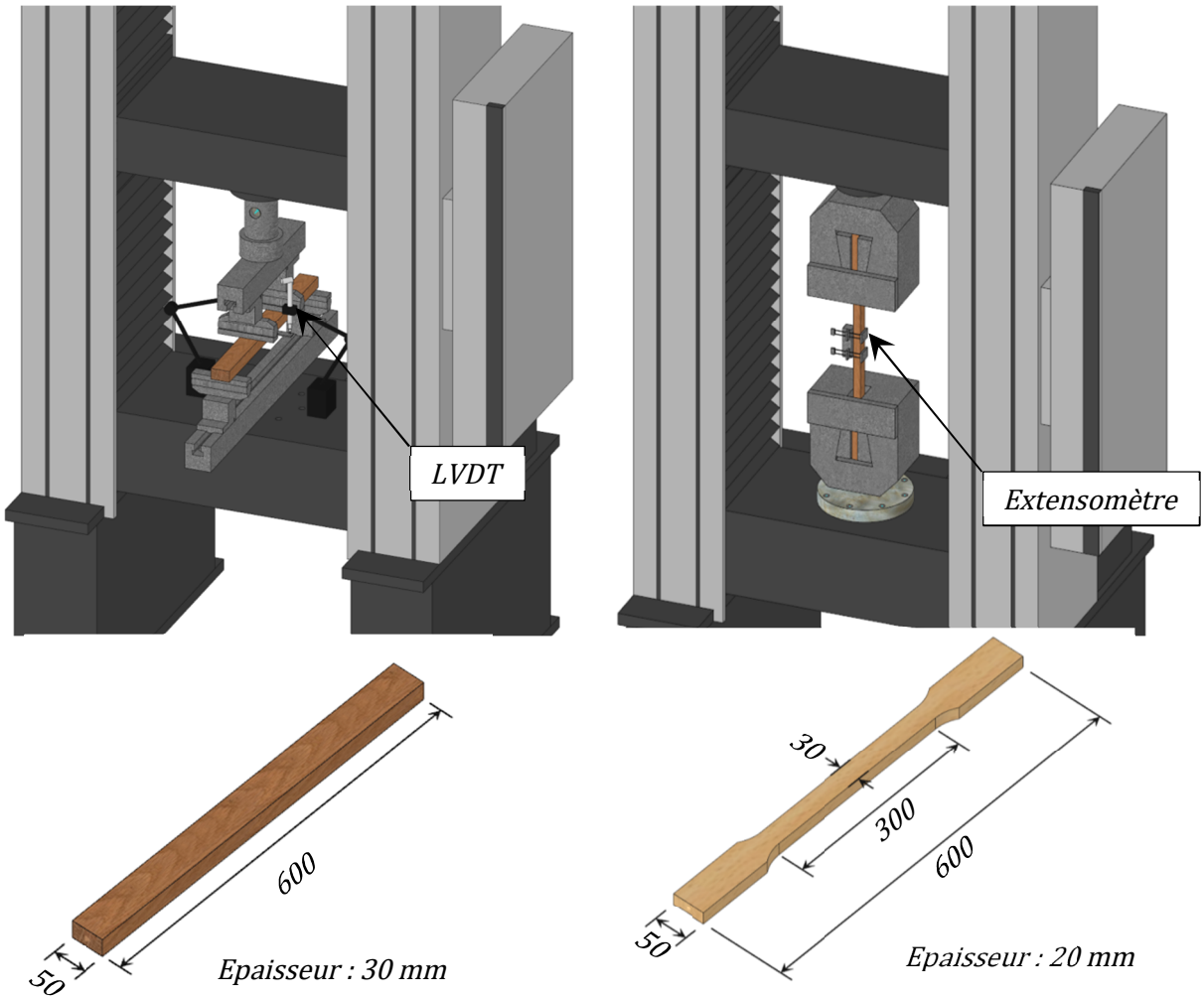


Figure 3-20 : Montages de flexion (gauche) et de traction (droite) pour les essais sur bois «sans défauts et de droit fil».

Pour les essais de compression, le montage représenté sur la Figure 3-21 permet de garantir une force de poussée axiale sans rotation de la tête de chargement. Avant essais, les éprouvettes sont usinées sur une toupie équipée de deux lames de scie circulaires espacées entres elles de la longueur finie de l'éprouvette. Cet usinage garantit que les deux faces de l'éprouvette soient parfaitement parallèles. Des essais d'acquisition vidéo ont été réalisés pour mesurer le module d'élasticité en compression. Compte tenu de la taille des éprouvettes et de l'ordre de grandeur des déformations à mesurer, ils ne furent pas concluants. Il a donc été décidé de ne pas réaliser de mesures précises des déformations sur ces essais, limitant ainsi les conclusions pouvant être faites sur les variations de modules d'élasticité en compression.

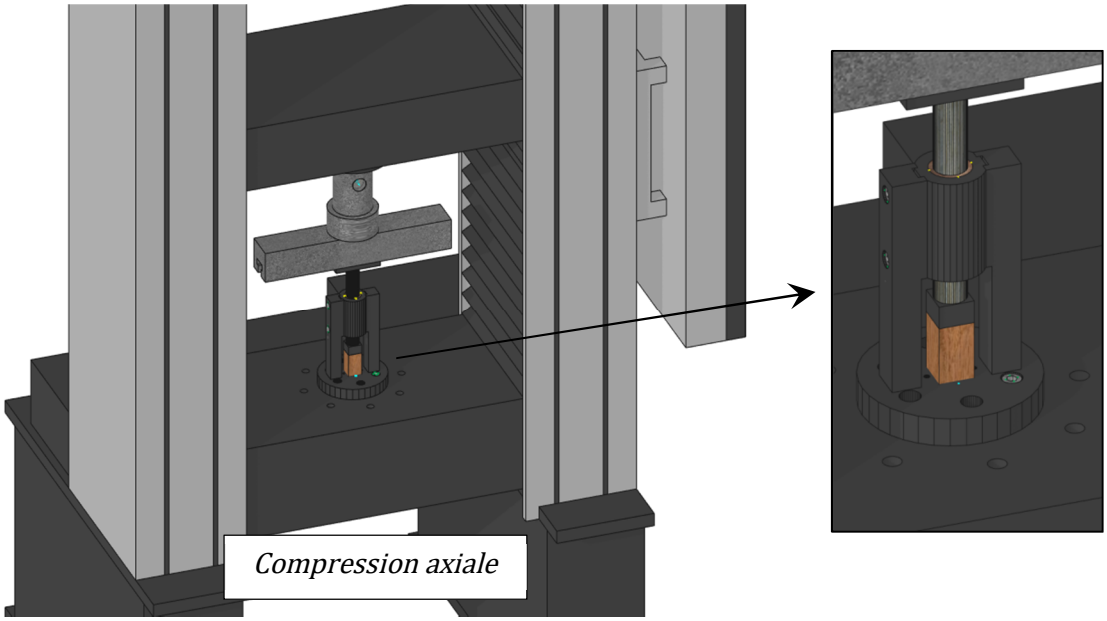


Figure 3-21 : Montage de compression pour les essais sur bois «sans défauts et de droit fil».

3.2.4. Sections & matériaux

Les dimensions de chaque éprouvette des essais précités sont synthétisées dans le Tableau 3-XI. Pour chaque configuration, 40 éprouvettes de peupliers, 40 éprouvettes de hêtre issues de qualité de grume A/B, 40 de hêtre provenant de grume de qualité C/D ainsi que 60 éprouvettes de chêne ont été testées.

Tableau 3-XI : Synthèse des dimensions d'essais.

Sollicitation	Largeur b [mm]	Hauteur h [mm]	Longueur l [mm]
Flexion f_m	35	90	2200
	45	140	3400
	60 (PEU & HET) – 55 (CHE)	190 (PEU & HET) – 180 (CHE)	4500
	50	30	540
Compression axiale $f_{c,0,k}$	45	90	270
Compression transversale $f_{c,90,k}$	45	90	70
Cisaillement f_v	32	55	300
Traction $f_{t,0,k}$	37,5 (PEU) – 28 (HET) – 35 (CHE)	130	2220
	20	30	300
Avec : PEU : Peuplier - HET : Hêtre - CHE : Chêne			

Dès lors que cela a été possible, avant usinage, les bois étaient stabilisés à une température de 20 ± 2 °C et une humidité de 65 ± 5 % pour tenter d'assurer une humidité autour de 12%.

Pour des problèmes de stockage des éprouvettes de grandes dimensions (flexion et traction) et compte tenu des usinages nécessaires pour les essais de cisaillement, une partie des éprouvettes a été stockée dans un bâtiment chauffé sans régulation de l'humidité relative de l'air (halle technologique de l'ENSTIB). Cela explique, pour certains essais, une humidité moyenne qui s'écarte des 12% requis par l'EN 384.

Pour les essais de flexion sur le chêne, les essais ont été réalisés directement après livraison des bois par le scieur, soit théoriquement directement après la sortie du séchoir. Les tests à l'humidimètre à pointe ont montré des humidités satisfaisantes vis-à-vis des exigences de l'EN 408 et l'EN 384 (12% d'humidité) sur les pièces présentes en périphéries des paquets de bois. Les humidités mesurées par dessiccation après réalisation des essais varient entre 11,5% et 25% permettant de conclure à un problème de séchage sur cette essence.

3.2.5. Données d'essais complémentaires

En plus des grandeurs physiques mesurées expérimentalement (résistance et module d'élasticité), pour identifier les facteurs ayant un impact sur les propriétés mécaniques, pour chaque éprouvette, différentes propriétés ont été mesurées ou estimées.

Les dimensions de toutes les éprouvettes ont été contrôlées à partir de 3 mesures de largeur et de hauteur, réparties sur la longueur des échantillons, en utilisant un pied à coulisse numérique. Pour la longueur, seulement deux mesures ont été réalisées.

La masse volumique a été calculée à partir de la masse et du volume complet des éprouvettes. Pour les essais de cisaillement, cette grandeur a été calculée avant collage et usinage des éprouvettes.

Pour chaque éprouvette, la position de celle-ci dans la grume a été repérée à partir du marquage colorimétrique (cf Figure 2-1). Ce repérage avait pour but de quantifier l'impact du bois juvénile sur les propriétés mécaniques.

Les éprouvettes ont toutes été classées visuellement selon la norme NF B52-001-1 dont les critères sont rappelés en Annexe A : les résistances prédites par le classement visuel pouvant alors être comparées aux résistances expérimentales.

L'humidité des bois a été mesurée par la méthode décrite dans la norme EN 13183-1 [71]. Pour les essais de flexion, traction et cisaillement, des prélèvements de 20mm de long et de même section que l'éprouvette, pris à proximité de la zone de rupture, ont été réalisés. Pour les essais de compression, les éprouvettes ont été séchées dans leur intégralité. Le séchage se fait dans une ambiance de 103 ± 2 °C. La stabilisation a été considérée comme atteinte lorsque la différence de masse entre deux pesées successives, effectuées à 2h d'intervalle, était inférieure à 0,1% avec une précision de 0,01 g consécutivement à une durée minimale de séchage de 7 jours.

Les pentes de fil sur l'intégralité de l'éprouvette ont été mesurées dans le cadre des essais de compression axiale et transversale. Les mesures ont été réalisées avec un rapporteur d'angle en arrondissant par palier de 2,5°.

La bibliographie ayant montré une influence de l'orientation des cernes sur les résistances, le type de débit a été caractérisé selon une des 3 formes présentées sur la Figure 3-22, pour les essais de compression transversale et de cisaillement.

Figure 3-22 : Orientations des cernes pour les essais de compression transversale et de cisaillement.

3.2.6. Cycle de chargement

La vitesse de chargement ainsi que le cycle de chargement ont été déterminés, pour chaque configuration d'essais, en suivant les recommandations de la norme EN 408 + A1. L'ensemble des valeurs retenues est synthétisé dans le Tableau 3-XII.

Le chargement a été appliqué à vitesse constante mais sans excéder une vitesse de déplacement supérieure à 0,003 fois h/s pour la flexion et 0,0135 mm/s pour la compression axiale.

L'effort maximal à rupture devant être atteint en 300 ± 120 s. Cet effort a dans un premier temps été estimé à partir de la bibliographie puis corrigé à la suite des essais préliminaires.

Tableau 3-XII : Synthèse des contraintes estimées et des vitesses de chargement par type d'essais.

Type d'essais	Essence	Contrainte estimée [MPa]	Vitesse de chargement [kN/s]
Flexion f_m 35x90 ou 35x87,5	Peuplier	70	0,0416
	Hêtre C/D	70	0,0416
	Hêtre A/B	90	0,0525
	Chêne	90	0,0509
Flexion f_m 45x140 ou 40x135	Peuplier	60	0,07
	Hêtre C/D	70	0,0817
	Hêtre A/B	80	0,093
	Chêne	67,5	0,0675
Flexion f_m 60x190 ou 55x180	Peuplier	45	0,095
	Hêtre C/D	55	0,116
	Hêtre A/B	65	0,1372
	Chêne	52,5	0,0925
Compression axiale $f_{c,0}$	Peuplier	35	0,483
	Hêtre	60	0,817
	Chêne	50	0,667
Compression Transversale $f_{c,90}$	Peuplier	5	0,05
	Hêtre	14	0,15
	Chêne	9,5	0,1
Traction axiale $f_{t,0}$	Peuplier	25	0,4
	Hêtre	60	0,75
	Chêne	35	0,55
Cisaillement f_v	Peuplier	7	0,23
	Hêtre	12,1	0,4
	Chêne	9,1	0,3

3.2.7. Méthode d'analyse des essais expérimentaux

La correction des données force et déplacement a été réalisée selon la méthode décrite dans l'Annexe C de ce document.

Comme sur l'intégralité des essais réalisés sur la machine ZWICK, aucune dérive de la mesure de la force en fonction du temps n'a été observée, ces données n'ont donc pas fait l'objet de corrections.

Selon le type d'essai, les caractéristiques mécaniques suivantes ont été calculées :

1. Résistance en flexion

La résistance a été estimée à partir de la relation :

$$f_m = \frac{3\,F\,a}{b\,h^2} \tag{3.24}$$

f_m La contrainte de rupture en flexion [MPa].

F L'effort total dans le vérin à rupture [N].

a La distance entre l'appui et le point de chargement [mm] (cf : Figure 3-15)

$b\,h^2$ Les dimensions de l'éprouvette [mm^3]

Les résistances de l'EN 338 étant données pour une hauteur de référence de 150mm, l'EN 384 impose de corriger les résultats pour les éprouvettes ayant une hauteur inférieure à 150 mm et une masse volumique ≤ 700 kg/m^3 en divisant la résistance par le facteur k_h défini tel que :

$$k_h = Min\left[\left(\frac{150}{h}\right)^{0,2}\ ; 1{,}3\right] \tag{3.25}$$

2. Résistance en compression ou traction axiale

La résistance a été estimée à partir de la relation :

$$f_{c,0}\ ou\ f_{t,0} = \frac{F}{b\,h} \tag{3.26}$$

$f_{c,0}$ La contrainte de rupture en compression axiale [MPa].

$f_{t,0}$ La contrainte de rupture en compression axiale [MPa].

F L'effort dans le vérin à rupture [N].

$b\,h$ La section l'éprouvette [mm²].

3. Résistance en compression transversale

La résistance a été estimée à partir de la relation :

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{b\ l} \tag{3.27}$$

$f_{c,90}$	La résistance en compression transversale [MPa].
$F_{c,90,max}$	L'effort de compression déterminé selon la méthode décrite dans l'EN 408 [kN].
$b\ l$	Les dimensions de l'éprouvette [mm], soit 45x70 mm².

Pour déterminer l'effort maximum de compression, il a été convenu de tracer le diagramme force/flèche pour chaque essai (cf Figure 3-23) et de procéder de manière itérative comme indiqué ci-après :

En premier il a été nécessaire de tracer la droite (1) passant par 0,1 et 0,4 $F_{max,est}$ et tracer la ligne (2) avec le même coefficient directeur mais décalée sur l'axe des déplacements d'une valeur de 0,01 h. L'intersection entre la droite (2) et la courbe d'essai a permis d'obtenir la valeur $F_{c,90,max}$ utilisée dans le calcul de la résistance en compression transversale. Si la valeur $F_{c,90,max}$ se trouvait dans un intervalle de 5% de la valeur $F_{max,est}$ utilisée pour tracer la droite (1) alors cette valeur était utilisée pour déterminer la résistance en compression, sinon, il convenait de répéter la procédure en prenant $F_{max,est}$ égal à $F_{c,90,max}$ obtenu par le calcul précédent.

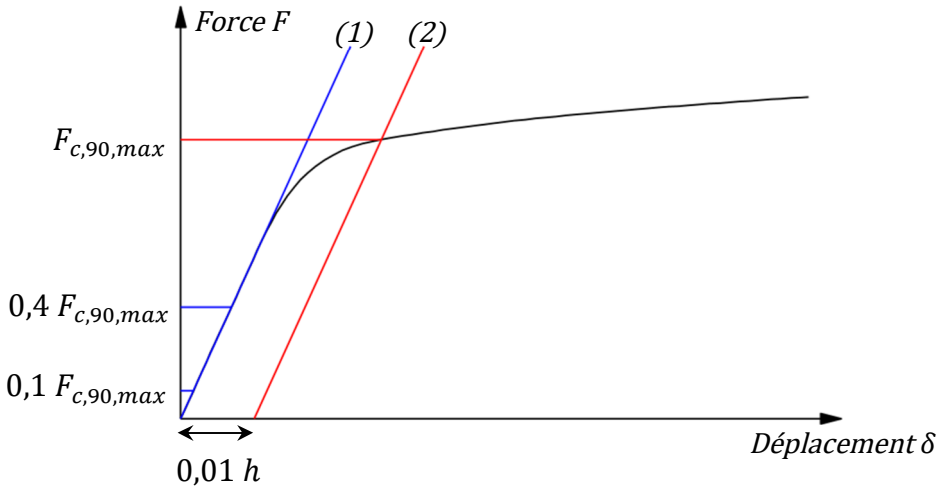


Figure 3-23 : Courbe de principe pour la détermination de la résistance en compression transversale $f_{c,90}$.

4. Résistance en cisaillement

La résistance a été estimée à partir de la relation :

$$f_v = \frac{F_{max}\ \cos 14°}{l\ b} \tag{3.28}$$

f_v La contrainte de rupture en cisaillement [MPa].

F_{max} L'effort mesuré à rupture [N].

$b\ h$ La section cisaillée [mm²], soit 32x300 mm².

5. Module d'élasticité global (flexion)

La détermination du module s'est effectuée à partir d'une régression définie sur une plage comprise entre 0,1 et 0,4 F_{max} avec un coefficient de corrélation de 0,99 ou mieux. Le module global a été estimé à partir de la relation :

$$E_{m,g} = \frac{3\ a\ l^2 - 4\ a^3}{2\ b\ h^3\ \left(\ 2\ \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6\ a}{5\ G\ bh}\right)} \tag{3.29}$$

$E_{m,g}$ Le module de flexion global [MPa].

a La distance entre l'appui et le point de chargement [mm] (cf : Figure 3-15).

l La longueur entre les appuis de la poutre [mm].

$b\ h$ Les dimensions de l'éprouvette [mm].

$W_2 - W_1$ L'accroissement de flèche correspondant à $F_2 - F_1$ [mm].

$F_2 - F_1$ L'accroissement de force sur l'intervalle défini entre 0,1 et 0,4 F_{max} [N].

G Le module de cisaillement calculé selon le paragraphe h (page 66).

Deux valeurs du module d'élasticité global ont été définies. Une première prend en compte la correction liée à la déformation d'effort tranchant et une deuxième, sans cette correction (G = ∞). Une différence de 5% entre ces deux valeurs a couramment été observée dans le cadre d'essais de flexion. Compte tenu de la forte variabilité du module de cisaillement observée au cours des essais, seule la valeur non corrigée a été conservée pour les analyses statistiques. La norme EN 384 impose de déterminer le module d'élasticité en flexion de l'éprouvette à partir du résultat de l'analyse du module d'élasticité local. La mesure du module global a eu pour but de vérifier la relation entre module local et module global définie dans l'EN 384 par l'équation (3.2) : $E_{m,l} = 1{,}3 \times E_{m,g} - 2690$.

6. Module d'élasticité local (flexion)

De la même manière que pour le module d'élasticité global, le module local été défini à partir d'une régression linéaire sur une plage comprise entre 0,1 et 0,4 F_{max} avec un coefficient de corrélation de 0,99 ou mieux. Le module local a été estimé à partir de la relation :

$$E_{m,l} = \frac{a\,(5\,h)^2\,(F_2 - F_1)}{16\,\frac{b\,h^3}{12}\,(W_2 - W_1)} \tag{3.30}$$

$E_{m,l}$ Le module de flexion local [MPa].

a La distance entre l'appui et le point de chargement [mm] (cf : Figure 3-15).

$b\,h$ Les dimensions de l'éprouvette [mm].

$W_2 - W_1$ L'accroissement de flèche correspondant à $F_2 - F_1$ [mm].

$F_2 - F_1$ L'accroissement de force sur l'intervalle défini entre 0,1 et 0,4 F_{max} [N].

7. Module de cisaillement (flexion)

Les cibles 4 de la Figure 3-15 ont permis de déterminer le module de cisaillement de la poutre sollicitée en flexion. Comme sur la Figure 3-24, l'allongement et le raccourcissement des diagonales a été mesuré sous l'effet du cisaillement via une interpolation linéaire sur un intervalle compris entre 10% et 40% de F_{max}. Le module de cisaillement a été calculé à partir des relations :

$$G_{tor,S} = \alpha\,\frac{h_0}{b\,h}\,\frac{(V_{s,2} - V_{s,1})}{(w_2 - w_1)} \tag{3.31}$$

$\alpha = \frac{3}{2} - \frac{{h_0}^2}{4\,h^2}$ et $W_i = \frac{(|w_{i,1}| + |w_{i,2}|)}{2}$ $avec\ i = 1{,}2$

$G_{tor,s}$ Le module de cisaillement [MPa].

$b\,h\,h_0$ Les dimensions de l'éprouvette [mm].

W_i La déformation moyenne des deux diagonales pour un effort V donné [mm].

$V_{s,2} - V_{s,1}$ L'accroissement de force de cisaillement sur l'intervalle entre 0,1 et 0,4 F_{max} [N].

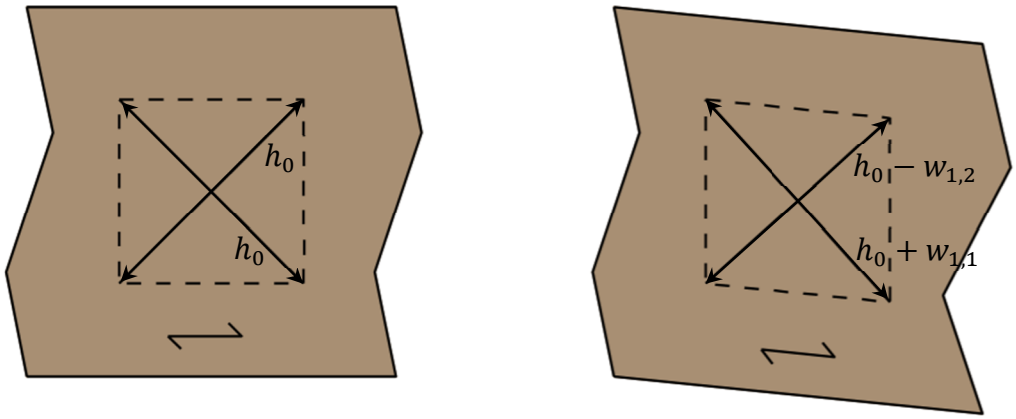


Figure 3-24 : Déformation des diagonales pour le calcul du module de cisaillement.

Remarque :

Les essais préliminaires ont montré une très grande variabilité des résultats sur la mesure du module de cisaillement via cette méthode. Les résultats sont dépendants de la pente locale du fil (qui augmente le module de cisaillement dès lors que cette dernière est différente de 0°) et des conditions expérimentales (vibration de la dalle d'essais). A partir de ces observations, il a été décidé d'estimer également le module de cisaillement en posant comme hypothèse que le module local était égal au module global et que la différence entre les deux était purement liée à la déformée d'effort tranchant. Il vient ainsi :

$$G_{RDM} = \frac{6\,a}{5\left(2\,\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{3\,a\,l^2 - 4\,a^3}{E_{m,g}\,2\,b\,h^3}\right)bh} \tag{3.32}$$

8. Module d'élasticité en compression axiale

La détermination du module s'est effectuée à partir d'une régression définie sur une plage comprise entre 0,1 et 0,4 F_{max} avec un coefficient de corrélation de 0,99 ou mieux. Le module d'élasticité en compression a été estimé à partir de la relation :

$$E_{c,0} = \frac{l\,(F_2 - F_1)}{b\,h\,(w_2 - w_1)} \tag{3.33}$$

$E_{c,0}$ Le module d'élasticité en compression axiale [MPa].

l La longueur entre les points de mesure des cibles [180 mm]

ou la longueur de l'éprouvette [270 mm].

$F_2 - F_1$ L'accroissement de force sur l'intervalle défini entre 0,1 et 0,4 F_{max} [N].

$b\,h$ Les dimensions de l'éprouvette [mm], soit 45x90 mm².

$W_2 - W_1$ L'accroissement de flèche correspondant à $F_2 - F_1$ [mm].

9. Module d'élasticité en compression transversale

La détermination du module s'est effectuée à partir d'une régression linéaire définie sur une plage comprise entre 10 et 40% de la force maximale F_{max}. Le module d'élasticité en compression a été estimé à partir de la relation :

$$E_{c,90} = \frac{(F_{40} - F_{10})\,h_0}{(w_{40} - w_{10})b\,l} \tag{3.34}$$

$E_{c,90}$ Le module d'élasticité en compression transversale [MPa].

h_0 La hauteur de l'éprouvette [70 mm], ou la distance entre les cibles [60 mm]

$F_2 - F_1$ L'accroissement de force sur l'intervalle défini entre 0,1 et 0,4 F_{max} [N].

$b\,l$ Les dimensions de l'éprouvette [mm], soit 45x70 mm².

$W_2 - W_1$ L'accroissement de flèche correspondant à $F_2 - F_1$ [mm].

10. Module d'élasticité en traction axiale

La détermination du module s'est effectuée à partir d'une régression définie sur une plage comprise entre 0,1 et 0,4 F_{max} avec un coefficient de corrélation de 0,99 ou mieux. Le module d'élasticité en traction a été estimé à partir de la relation :

$$E_{t,0} = \frac{l\,(F_2 - F_1)}{b\,h\,(w_2 - w_1)} \tag{3.35}$$

$E_{t,0}$ Le module d'élasticité en traction axiale [MPa].

l La longueur entre les points de mesure des LVDT [1155 mm]

ou la longueur de référence de l'extensomètre [50 mm].

$F_2 - F_1$ L'accroissement de force sur l'intervalle défini entre 0,1 et 0,4 F_{max} [N].

$b\,h$ Les dimensions de l'éprouvette [mm].

$W_2 - W_1$ L'accroissement de flèche correspondant à $F_2 - F_1$ [mm].

11. Module de cisaillement (essais de cisaillement)

La norme EN 408 ne proposant pas de mesurer le module d'élasticité lors des essais de détermination de la résistance au cisaillement, une méthode basée sur les principes généraux de cette norme a donc été proposée. Cette méthode consiste à déterminer le module à partir d'une régression définie sur une plage comprise entre 0,1 et 0,4 F_{max}. Le module de cisaillement a été estimé à partir des grandeurs présentées sur la *Figure 3-25* et de la relation :

$$G = \frac{h\,(F_2 - F_1)}{b\,l\,(\delta_2 - \delta_1)} \tag{3.36}$$

G Le module de cisaillement [MPa].

l La longueur entre les cibles [mm], soit 25mm.

$F_2 - F_1$ L'accroissement de force sur l'intervalle défini entre 0,1 et 0,4 F_{max} [N].

$b\,l$ La section cisaillée de l'éprouvette [mm], 32x300 mm².

$\delta_2 - \delta_1$ L'accroissement de déformation horizontale correspondant à $F_2 - F_1$ [mm].

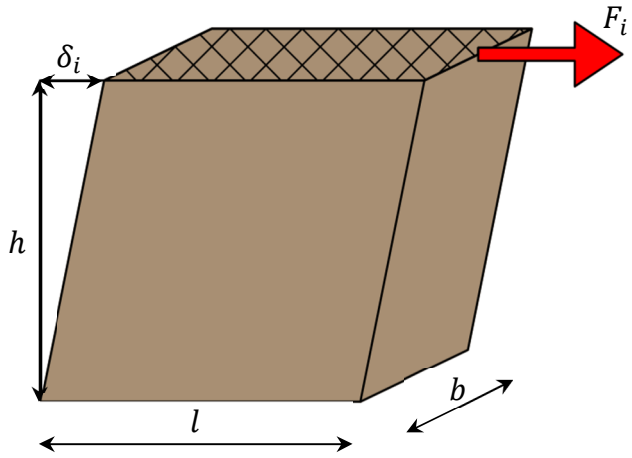


Figure 3-25 : Détermination du module de cisaillement à partir des essais de cisaillement.

12. Correction des résultats en fonction de l'humidité

L'humidité de référence pour la définition des propriétés mécaniques a été fixée par l'EN 384 à 12%. Pour les bois avec une humidité différente de cette humidité de référence, et comprise entre 8 et 18% d'humidité, il convient de corriger le module d'élasticité en flexion, la masse volumique et la résistance en compression selon les 3 équations suivantes :

$$\rho = \rho(u)\left[1 - 0{,}005\left(u - u_{ref}\right)\right] \quad pour\ 8\% < u < 18\% \quad avec\ u_{ref} = 12\% \tag{3.37}$$

$$F_{c,0} = F_{c,0}(u)\left[1 + 0{,}03\left(u - u_{ref}\right)\right] \quad pour\ 8\% < u < 18\% \quad avec\ u_{ref} = 12\% \tag{3.38}$$

$$E_0 = E_0(u)\left[1 + 0{,}01\left(u - u_{ref}\right)\right] \quad pour\ 8\% < u < 18\% \quad avec\ u_{ref} = 12\% \tag{3.39}$$

ρ	La masse volumique [kg/m^3].
$F_{c,0}$	La résistance en compression axiale [MPa].
E_0	Le module d'élasticité en flexion axiale [MPa].
u	La teneur en humidité au moment de l'essai [%].

Contrairement à ce qui a été montré dans la bibliographie, en ce qui concerne l'influence de l'humidité sur l'ensemble des propriétés mécanique du bois, la norme propose de ne corriger seulement que 3 d'entre elles. Si le facteur correctif de la masse volumique et du module semble cohérent entre la norme et la bibliographie, il est étonnant d'observer un facteur correctif divisé par 2 pour la compression axiale. AICHER & STAPF ont montré en 2016 [73] que sur l'épicéa et le frêne, la réduction de résistance entre 12 et 18% d'humidité était linéaire et de l'ordre 24,5%, soit au minimum, 4% par % d'humidité.

Compte tenu de ces résultats une étude de l'incidence de l'humidité a été entreprise dans le cadre de cette thèse. Elle est présentée dans le chapitre 3.6.5 en page 99.

Pour la correction de la masse volumique, il est possible d'introduire un correctif basé sur la masse d'eau et le coefficient de retrait volumique du bois. La masse volumique peut s'exprimer par la relation (3.40) et la définition de l'humidité dans le bois à H% permet d'écrire la relation (3.41).

$$\rho_{12\%} = \frac{m_{bois} + m_{eau,12\%}}{V_{12\%}} \ \ et\ \ \rho_{H\%} = \frac{m_{bois} + m_{eau,H\%}}{V_{H\%}} \tag{3.40}$$

$$m_{eau,H\%} = H\% \times m_{bois} \tag{3.41}$$

En considérant que la masse de bois reste constante entre 12 et 18% d'humidité, il vient :

$$\frac{\rho_{12\%} \times V_{12\%}}{1 + 12\%} = \frac{\rho_{H\%} \times V_{H\%}}{1 + H\%} \tag{3.42}$$

En introduisant le coefficient de retrait/gonflement volumique β_{vol}, la masse volumique à 12% peut alors s'exprimer par :

$$\rho_{12\%} = \frac{\rho_{H\%} \times (1 + 12\%)}{1 + H\%} \times \frac{V_{H\%}}{V_{12\%}} \rightarrow \rho_{12\%} = \frac{\rho_{H\%} \times (1 + 12\%)}{1 + H\%} \times \frac{1}{\beta_{vol}\,(H\% - 12\%)} \tag{3.43}$$

Le coefficient de correction de 0,005 proposé dans l'EN 384 correspond ainsi à un coefficient de retrait gonflement global, qui varie entre 0,366 pour une humidité de 18% et 0,41 pour une humidité de 8%.

13. Démarche d'analyse statistique

L'expression des valeurs caractéristiques au fractile de 5% et des valeurs moyennes est réalisée en suivant les prescriptions données par l'EN 14358 [70]. Elles sont rappelées en Annexe D de ce document.

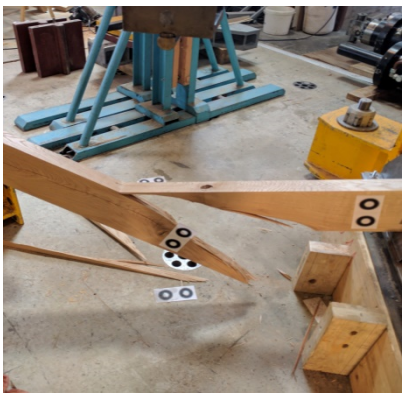
L'ensemble des données exprimées dans le Tableau 3-XIII sont des valeurs caractéristiques et moyennes pouvant être directement opposées aux tableaux de l'EN 338.

3.3. COMPORTEMENT TYPE DES DIFFERENTS ESSAIS

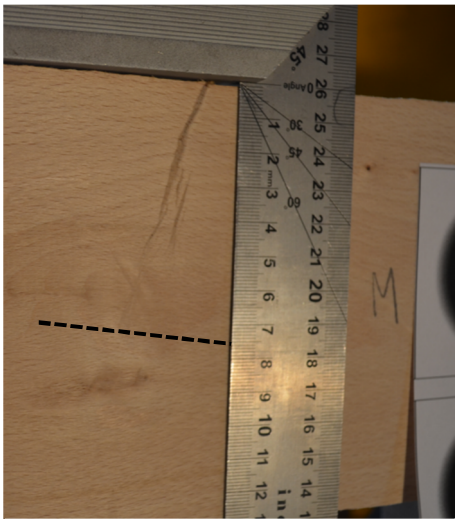
Pour chaque essai, une courbe type ainsi que des photos d'essais permettent d'imager le comportement mécanique des bois testés ainsi que les résultats significatifs.

En ce qui concerne la flexion, le graphique de la Figure 3-26 met en avant deux comportements. Le premier qui serait qualifiable de ductile, dans lequel la zone comprimée de la poutre plastifie et la rupture en traction reste quant à elle fragile. La zone de plastification en compression peut facilement atteindre les 75mm de hauteur pour une poutre de 190mm. Le deuxième comportement correspond à une rupture fragile pouvant être causée par une faiblesse en traction ou par une rupture en cisaillement. Dans le cas d'une rupture en cisaillement ou en dehors de la zone de moment constant, les échantillons ne sont pas conservés pour l'analyse statistique.

Rupture en traction après plastification en compression



Rupture fragile



Plastification en compression

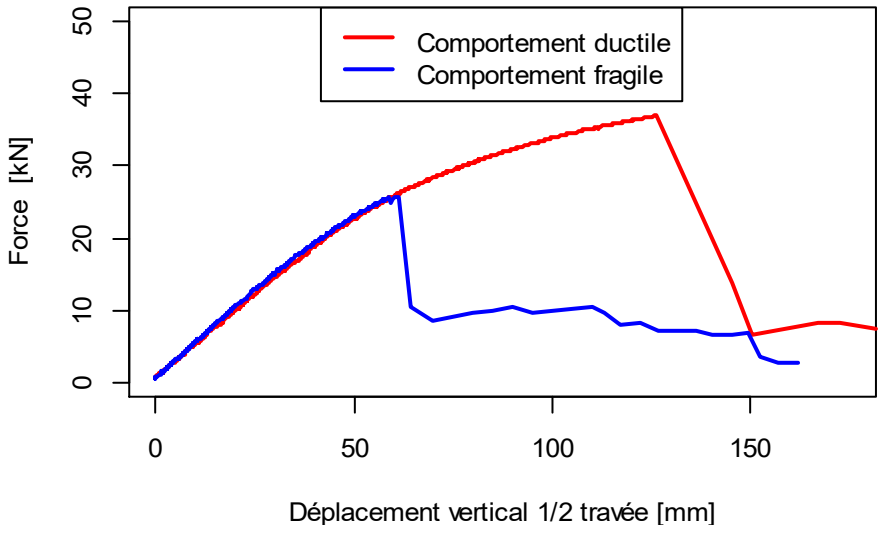
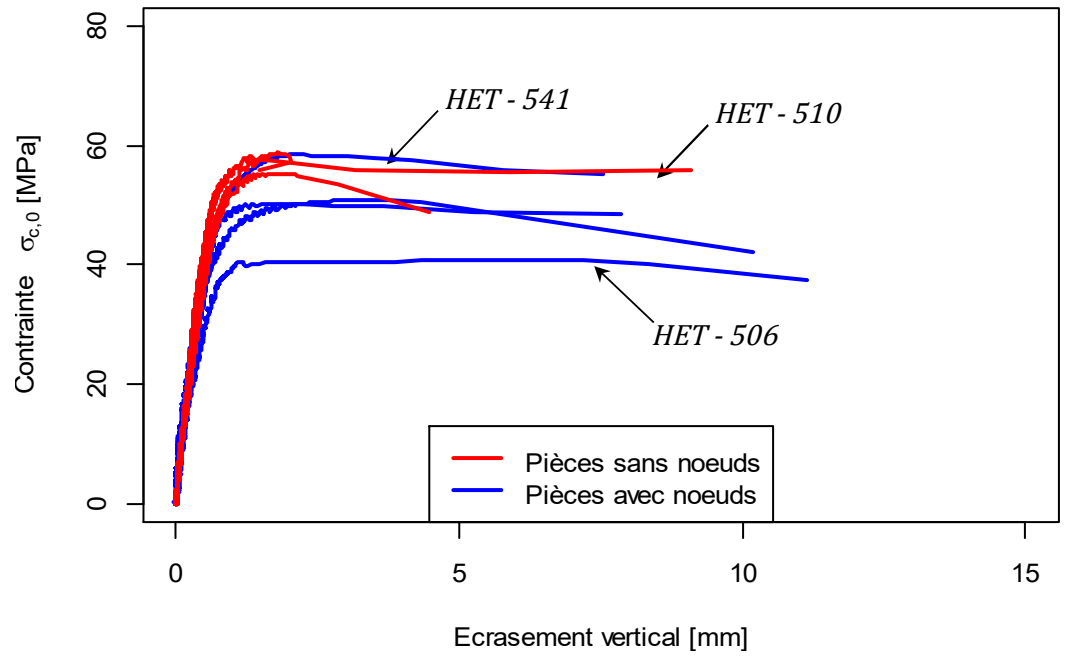


Figure 3-26 : Comportement expérimental en flexion.

Dans le cadre des essais de compression axiale, comme le montre la Figure 3-27, le comportement est ductile. Comme l'attestent les photos de la même figure, il se produit systématiquement un micro flambement au niveau de la zone rupture. Si la présence de gros défauts (fentes, nœuds et pente de fil) conduit à une diminution de la résistance en compression, dans certains cas, la présence de nœuds n'influe pas sur cette dernière…



HET - 510 HET - 541 HET - 506

Figure 3-27 : Comportement expérimental en compression axiale.

Le comportement en compression transversale est un comportement ductile largement influencé par l'essence du bois. La Figure 3-28 met en parallèle le comportement des 3 essences testées selon cette sollicitation. La différence de comportement mécanique (module et résistance) entre les éprouvettes PEU–019 et PEU–001 d'une part et CHE-002 et CHE-035 d'autre part, démontre bien l'influence de l'orientation des cernes sur le comportement en compression transversale. Sur les orientations radiales (PEU-001, HET-403, CHE 035) un glissement entre les cernes est observé pour les 3 essences. Dans le cas des orientations transversales des cernes, si l'éprouvette de peuplier (PEU-019) une fois déchargée ne présente pas de déformations résiduelles importantes, pour le chêne, l'éprouvette (CHE-035) se disloque complétement.

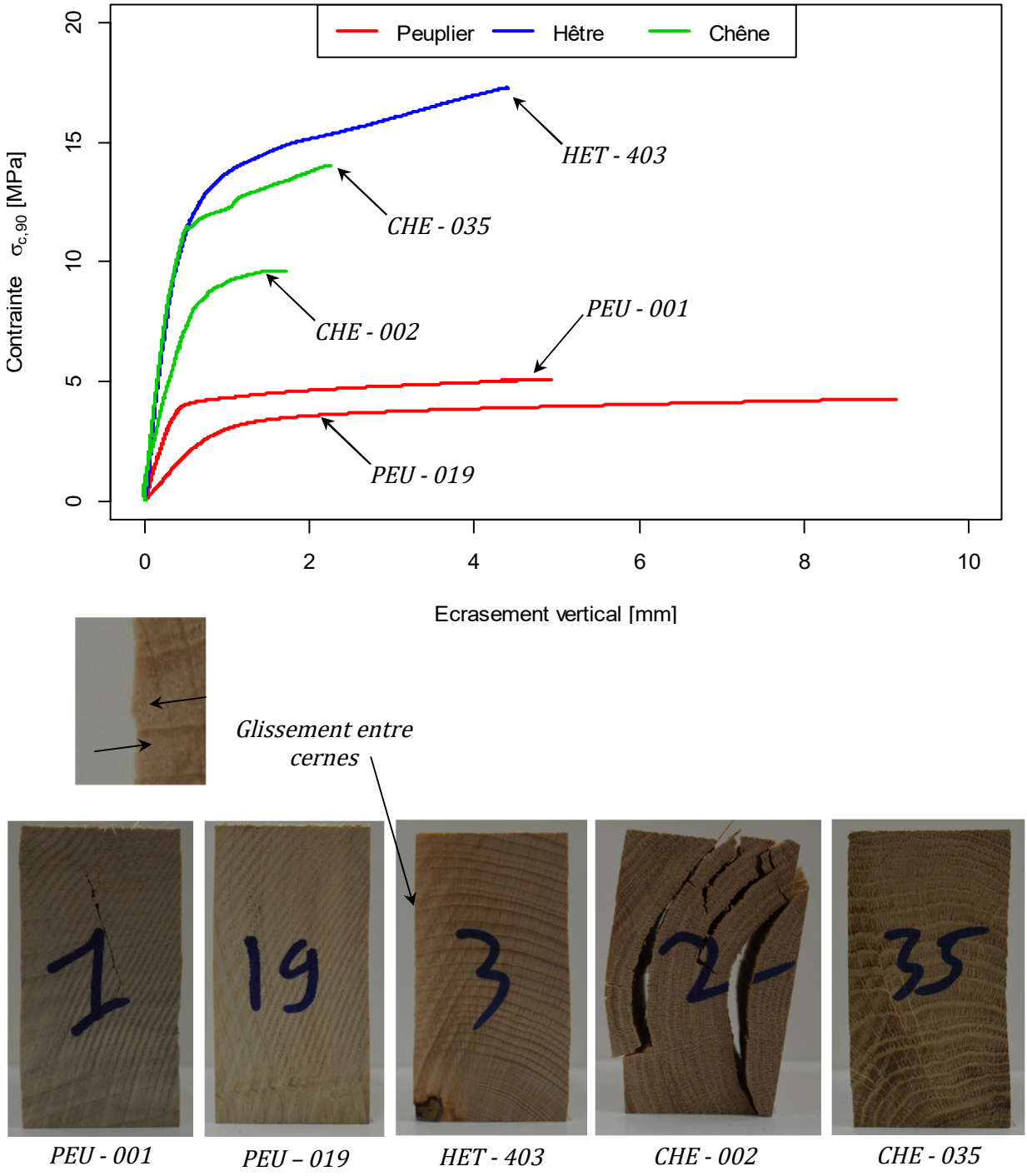
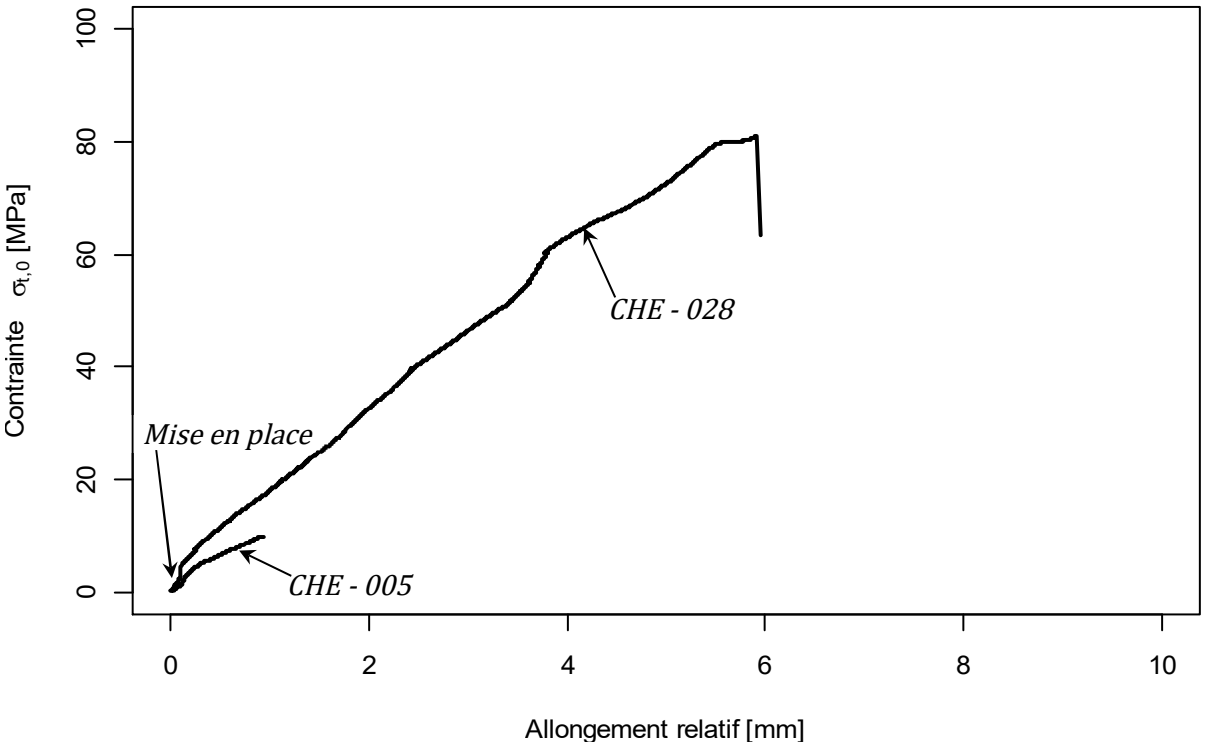


Figure 3-28 : Comportement expérimental en compression transversale.

Selon la Figure 3-29, le comportement expérimental observé pour les essais de traction axiale correspond à un comportement fragile. La même figure image bien les conclusions faites par CAMU & AICHER [67] sur l'impact significatif des nœuds sur la résistance. Une mise en place de l'éprouvette dans les mors est observée systématiquement entre 0 et 5 MPa. L'estimation du module d'élasticité est donc réalisée systématiquement en excluant ces données.

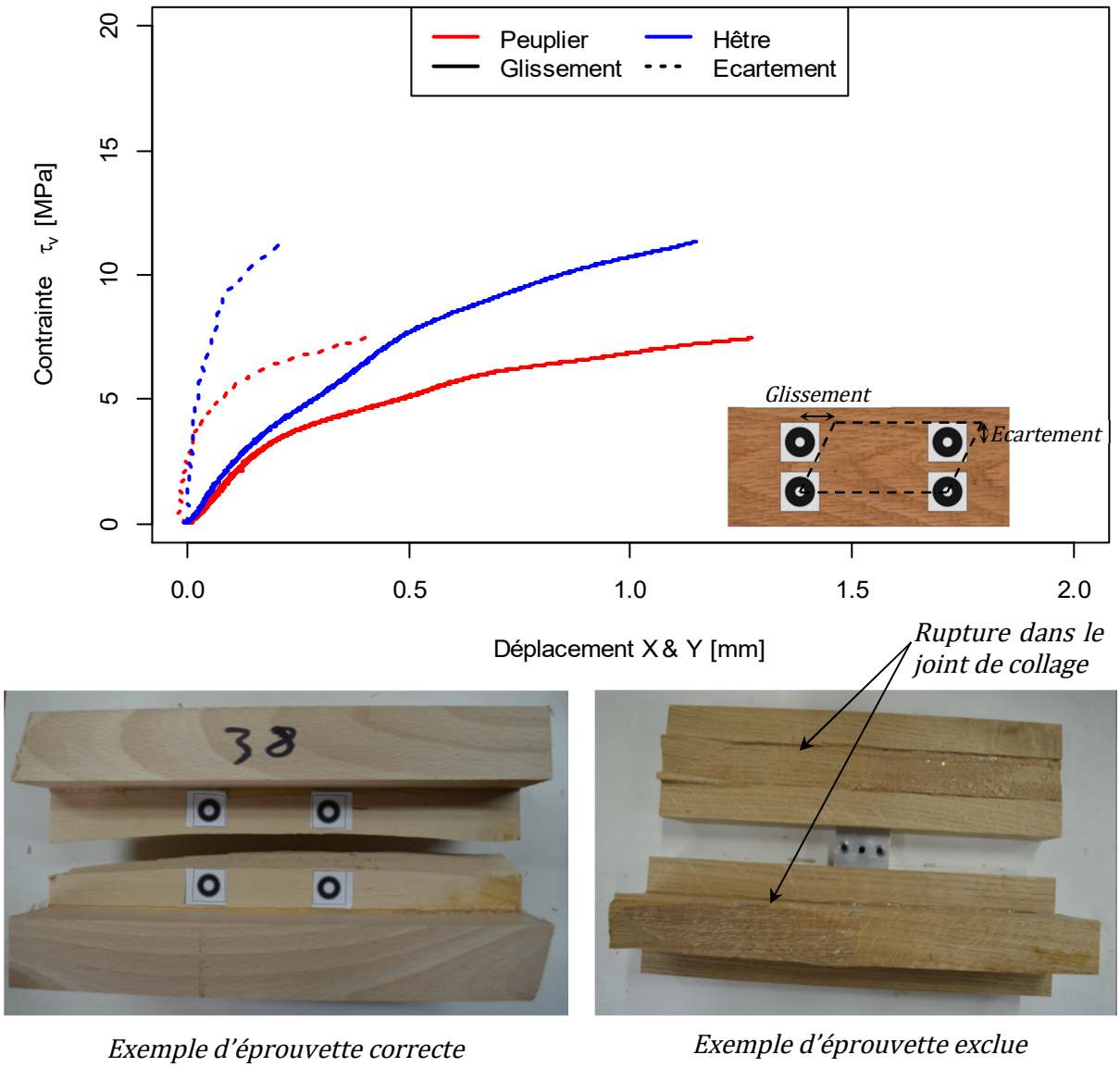


CHE – 028 :
$f_{t,0} = 80{,}9\ MPa$

CHE – 005 :
$f_{t,0} = 9{,}8\ MPa$

Figure 3-29 : Comportement expérimental en traction axiale.

Le comportement en cisaillement des éprouvettes testées peut également être qualifié de comportement fragile. L'adoucissement des courbes, présenté en Figure 3-30, s'explique par un rapprochement des cibles en fin d'essais. Ce déplacement, qui atteint 0,25mm pour le hêtre ainsi que pour le chêne et 0,45mm pour le peuplier, est lié à la composante de compression transversale amenée par l'orientation de l'éprouvette selon un angle de 14°. En cas de rupture au niveau du plan de collage, si la surface dépasse les 20% de la zone de collage, alors l'éprouvette n'est pas retenue pour l'étude statistique.



Exemple d'éprouvette correcte

Exemple d'éprouvette exclue

Figure 3-30 : Comportement expérimental en cisaillement.

L'analyse visuelle des échantillons montre que pour le hêtre et le chêne, les ruptures en cisaillement se produisent au niveau des rayons ligneux. Ces particularités anatomiques étant plus nombreuses et de plus grande dimension dans le chêne que dans le hêtre, il est logique que la résistance en cisaillement soit inférieure pour cette essence.

3.4. SYNTHESE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le Tableau 3-XII synthétise les 1770 essais réalisés sur les éprouvettes à l'échelle bois d'œuvre, pour les 3 essences et toutes les sollicitations. Dans ce tableau, seules les 3 propriétés mécaniques principales de chaque essai sont étudiées : la masse volumique (MV), la résistance (MOR) et le module d'élasticité (ou le module de glissement dans le cas des essais de cisaillement (MOE)). Les coefficients de corrélation entre chacune de ces propriétés sont également compilés dans ce tableau.

Les masses volumiques mesurées sont assez proches des valeurs trouvées en bibliographie avec une moyenne de 447 kg/m^3 pour le peuplier, 716 kg/m^3 pour le hêtre et 719 kg/m^3 pour le chêne. Les coefficients de variation oscillent entre 2,5 et 9,4% avec une moyenne à 6%. Les valeurs caractéristiques de la masse volumique correspondent à celles du C35 pour le peuplier et à celles d'un D40 ou D50 pour le chêne. Sachant que le classement visuel limite en ce qui concerne la masse volumique le classement à un C24 pour le peuplier, un D40 pour le hêtre et un D30 pour le chêne , le classement visuel sous-estime donc largement les propriétés des bois feuillus ce qui est largement connu (ROBLOT & al [37])

Les modules d'élasticité en flexion sont cohérents avec les données issues de la bibliographie, avec des coefficients de variation fluctuant entre 8 et 23%. Pour le hêtre, le module d'élasticité en traction est largement supérieur au module en flexion, lui-même légèrement supérieur au module en compression (17 000 > 14 500 > 14 000 MPa). Pour le chêne, les modules en traction et en flexion sont du même ordre de grandeur (13 500 Mpa) et sont supérieurs au module en compression (11 500 MPa). Pour le peuplier, le module de flexion est, cette fois-ci, légèrement supérieur aux modules en compression et en traction.

Les ordres de grandeur de résistance en flexion, tant au niveau des valeurs que des coefficients de variation, sont cohérents avec ce qui est trouvé dans la bibliographie. Il est à noter que la résistance caractéristique diminue avec l'augmentation de la hauteur de la section. Néanmoins, la référence de 150mm donnée par l'EN 384 ne constitue pas une limite à partir de laquelle la résistance ne diminue plus. Une analyse plus précise de ce phénomène est présentée dans le paragraphe 3.6.3 en page 95.

Pour le hêtre et le peuplier, les résistances moyennes en compression et en traction sont du même ordre de grandeur mais restent inférieures aux résistances en flexion ($f_{t,0,k} \approx f_{c,0,k} < f_{m,k}$). Pour le chêne, la résistance en traction est inférieure à la résistance en compression elle-même inférieure à la résistance en flexion ($f_{t,0,k} < f_{c,0,k} < f_{m,k}$). Les coefficients de variation en compression varient entre 10 et 17%. Ils augmentent pour les essais flexion (entre 15 et 33%) et s'accroissent encore pour la traction (40 à 46%). Cette forte variabilité est largement impactée par les pentes de fil locales qui constituent une faiblesse importante dans la résistance en traction. En se basant sur la formule de HANKINSON et les résistances données par l'EN 338 pour un D35 ($f_{t,0,k} = 21$ MPa et $f_{t,90,k} = 0{,}5$ MPa) avec une pente de fil de 5°, la résistance diminue de 23%.

Les modules d'élasticité en compression transversale sont cohérents avec les valeurs de l'EN 338 et feraient correspondre le peuplier à du C24, le chêne à du D30 et le hêtre a du D40. Les modules mesurés se situent dans la limite basse des résultats observés par KOVRYGA & All [47] (de 810 à 1130 MPa). Les ordres de grandeur des coefficients de variation sont plus importants que ceux observés habituellement pour ce type d'essais (entre 30 et 50% contre 15 à 20% habituellement). Cette variabilité peut s'expliquer par la présence de pièces avec de forts modules d'élasticité en compression transversale ainsi qu'une légère pente de fil (entre 5 et 10°). La résistance en compression transversale permettrait de classer le peuplier en C40, le hêtre en D50 et le chêne en D30.

Tableau 3-XIII : Synthèse des propriétés mécaniques principales des essais.

				MV : Masse Vol [kg/m^3]			MOR : Résistance [MPa]			MOE : Module d'élasticité [Mpa]			Corrélations R^2		
Essence	Sollicitation	Nb	H%	mean	COV	k	mean	COV	k	mean	COV	k	MOR-MV	MOE-MV	MOR-MOE
PEU	f_m35x90	40	11,84%	456,9	5,1%	416,9	55,76	12,9%	42,22	11487	9,7%	9538	0,17	0,08	0,21
	f_m45x140	40	10,73%	443,1	7,8%	382,7	54,27	17,8%	38,08	10406	14,4%	7779	0,34	0,50	0,27
	f_m60x190	40	14,82%	451,1	4,3%	412,0	43,40	19,2%	31,09	11299	9,5%	9424	0,25	0,00	0,21
	f_m	120	12,46%	451,6	6,0%	406,1	51,43	19,5%	35,37	11116	11,9%	8874	0,18	0,24	0,11
	$f_{c,0}$	40	11,62%	443,3	4,8%	404,8	35,02	10,7%	28,47	10510	21,1%	6615	0,08	0,07	0,07
	$f_{c,90}$	40	11,62%	436,5	4,6%	398,7	4,02	16,0%	3,07	375	56,4%	-	0,11	0,00	0,60
	$f_{t,0}$	42	8,95%	438,9	7,8%	379,5	30,32	44,2%	11,63	10858	30,4%	4985	0,32	0,01	0,01
	f_v	31	8,93%	458,3	5,6%	413,5	6,74	18,8%	4,68	458	34,4%	171	0,07	0,14	0,15
HET A/B	f_m35x90	41	15,50%	713,4	4,7%	651,6	79,67	16,1%	57,66	14778	11,7%	11747	0,11	0,05	0,29
	f_m45x140	40	11,68%	714,8	2,5%	652,8	90,02	19,5%	58,79	15148	8,4%	12925	0,06	0,13	0,28
	f_m60x190	42	12,83%	717,2	4,5%	655,1	68,59	21,7%	43,58	14267	12,3%	11197	0,00	0,15	0,15
	f_m	123	13,34%	716,8	4,0%	656,3	79,80	22,0%	51,21	14795	11,1%	12012	0,00	0,04	0,24
	$f_{c,0}$	44	11,60%	730,3	5,0%	667,1	56,46	12,1%	44,59	13988	19,6%	9196	0,00	0,07	0,42
	$f_{c,90}$	44	11,60%	724,4	5,0%	661,1	10,27	15,2%	8,04	903	24,3%	516	0,65	0,07	0,31
	$f_{t,0}$	36	9,06%	717,5	6,0%	642,0	55,25	28,6%	29,33	18935	32,3%	7938	0,04	0,05	0,18
	f_v	30	9,62%	722,0	5,3%	654,7	12,49	10,7%	10,27	608	23,7%	349	0,17	0,14	0,04
HET C/D	f_m35x90	40	12,97%	695,0	5,2%	632,1	74,27	23,0%	45,24	13725	18,0%	9369	0,03	0,23	0,46
	f_m45x140	40	11,68%	716,5	3,4%	654,3	81,60	28,0%	44,03	14638	13,3%	11218	0,00	0,04	0,31
	f_m60x190	41	13,77%	707,1	5,9%	634,7	60,71	30,1%	32,91	13861	18,5%	9359	0,23	0,28	0,63
	f_m	121	12,81%	708,1	5,1%	647,4	72,89	29,4%	39,68	14180	16,7%	10136	0,06	0,21	0,41
	$f_{c,0}$	42	12,08%	712,8	6,3%	634,3	54,49	14,1%	41,08	13998	24,5%	7954	0,09	0,27	0,59
	$f_{c,90}$	42	12,08%	711,7	6,5%	631,7	9,78	20,5%	6,80	850	44,9%	159	0,55	0,10	0,43
	$f_{t,0}$	45	9,02%	722,8	4,4%	660,4	51,70	44,1%	19,86	15353	32,8%	6383	0,08	0,20	0,00
	f_v	29	9,72%	695,8	6,0%	621,8	12,16	10,8%	9,94	560	19,0%	370	0,58	0,04	0,20
HET	f_m35x90	81	14,25%	705,5	5,1%	644,2	77,47	19,7%	51,26	14320	15,3%	10571	0,07	0,17	0,41
	f_m45x140	80	11,68%	716,8	3,0%	655,8	86,44	24,0%	51,04	14942	11,1%	12100	0,01	0,00	0,31
	f_m60x190	83	13,29%	713,6	5,2%	650,1	65,20	26,2%	37,99	14133	15,5%	10366	0,09	0,23	0,41
	f_m	244	13,08%	713,1	4,6%	653,4	76,72	26,0%	44,96	14524	14,2%	11060	0,03	0,14	0,35
	$f_{c,0}$	86	11,83%	723,0	5,8%	652,2	55,72	13,1%	43,26	14090	22,0%	8768	0,04	0,17	0,50
	$f_{c,90}$	86	11,83%	719,4	5,8%	648,4	10,08	17,9%	7,43	886	35,3%	341	0,59	0,09	0,38
	$f_{t,0}$	81	9,04%	721,9	5,1%	658,7	53,91	37,5%	23,85	17107	34,2%	6907	0,00	0,08	0,01
	f_v	59	9,67%	710,5	5,9%	638,5	12,38	10,7%	10,19	589	22,0%	363	0,35	0,11	0,10
CHE	f_m35x87,5	60	11,63%	701,0	8,9%	593,1	84,73	23,4%	53,17	14725	18,8%	9927	0,23	0,61	0,35
	f_m40x135	61	13,26%	731,2	7,7%	634,5	64,36	27,5%	38,52	13660	22,7%	8260	0,36	0,43	0,47
	f_m55x180	61	18,97%	730,6	5,1%	666,3	47,71	25,0%	29,94	12159	16,6%	8665	0,04	0,10	0,40
	f_m	182	14,64%	722,9	7,6%	630,7	65,81	34,4%	34,37	13595	21,2%	8718	0,04	0,26	0,47
	$f_{c,0}$	57	14,51%	723,6	6,0%	648,7	44,67	17,4%	31,18	11286	24,3%	6409	0,09	0,10	0,31
	$f_{c,90}$	57	14,51%	712,4	6,1%	637,8	8,34	21,1%	5,56	760	57,1%	-	0,29	0,04	0,07
	$f_{t,0}$	60	10,52%	721,2	5,5%	652,5	28,95	46,9%	11,93	13604	22,7%	8224	0,03	0,08	0,04
	f_v	41	9,63%	702,6	9,4%	587,4	9,40	18,3%	6,62	727	17,9%	498	0,10	0,03	0,13

Les modules de cisaillement mesurés sur les essais de cisaillement semblent faibles par rapports à ceux proposés par l'EN 338. Le peuplier avec 450 MPa correspondrait à du C14 alors que sa résistance caractéristique supérieure à 4 MPa correspondrait à minima à un C24. Il en est de même avec les deux autres essences, avec des résistances supérieures à 5 MPa et des modules qui classeraient les bois en D18 pour le hêtre et D30 pour le chêne.

Contrairement à ce qui est observé habituellement dans les bois résineux, les essais ne montrent pas de corrélations fortes entre la masse volumique et les résistances en flexion, traction et compression. Pour le hêtre et le chêne, il semble que la résistance en compression transversale soit corrélée avec la masse volumique.

Pour le hêtre et le chêne, une corrélation entre les résistances et les module d'élasticité apparait pour les essais de flexion et de compression axiale. Sous condition de purger les plus gros défauts, le module d'élasticité pourrait comme observé par KOVRYGA & all [47] permettre de prédire la résistance des bois feuillus.

3.5. NOUVELLES RELATIONS ENTRE LES PROPRIETES MECANIQUES

3.5.1. Masse volumique moyenne ρ_{mean}

Selon l'EN 384, la masse volumique moyenne est donnée comme étant égale à 1,2 fois la masse volumique caractéristique, ce qui correspond au fractile de 5% d'une loi normale uniformément distribuée avec une variabilité de 10%. La variabilité expérimentale étant comprise entre 2,5 et 9,5%, il n'est pas nécessaire de modifier cette corrélation.

Par rapport aux classes attribuables par le classement visuel, la masse volumique moyenne expérimentale est supérieure à la masse volumique des tableaux de l'EN 338. Par exemple, le hêtre serait en grande partie classé D24 ($\rho_{\mathrm{mean}} = 580\ \mathrm{kg/m^3}$) là où la masse volumique moyenne expérimentale est de $715\ \mathrm{kg/m^3}$. Étant donné que les valeurs moyennes des masses volumiques issues de la base de données du CIRAD (cf Tableau 3-VII) sont comparables avec les observations expérimentales, il est préférable de les utiliser pour estimer au mieux le poids propre des structures (même si une sous-estimation de cette propriété mécanique n'entraine généralement pas un sous-dimensionnement trop important).

3.5.2. Module d'élasticité caractéristique $E_{m,0,k}$

Selon l'EN 384, le module d'élasticité locale caractéristique est défini comme étant égal à 0,84 fois le module d'élasticité moyen. Cette corrélation est basée sur le fractile à 5% d'une loi normale uniformément distribuée avec un coefficient de variation de 10%. Or, comme le montre les essais de flexion, le coefficient de variation du module d'élasticité varie entre 8 et 23% avec une moyenne des variabilités de 15,8%. Pour permettre une justification conservative des instabilités des structures (flambement et/ou déversement) il conviendrait de considérer comme pour les résineux une variabilité de 20% :

$$E_{0,05} = E_{mean} - k_s\, S_y = \mathrm{E_{mean}}\left(1 - \mathrm{k_s} \times \mathrm{COV_{E,mean}}\right)$$
$$E_{mean}\,(1 - 1{,}64 \times 20\%) = 0{,}672\ E_{mean} \qquad (3.44)$$

$\mathrm{k_s} = 1{,}64$ pour un nombre infini d'essais.

3.5.3. Module d'élasticité transversale $E_{90,mean}$

Selon la norme, la relation entre le module d'élasticité en flexion et le module d'élasticité transversale est définie par la relation (3.45), avec $X = 30$ pour les bois résineux et $X = 15$ pour les feuillus. Le Tableau 3-XIV exprime ce ratio entre le module moyen d'élasticité des essais de compression transversale et le module moyen d'élasticité local pour l'ensemble des essais de flexion. Les coefficients X ainsi obtenus, qui sont proches de ceux définis par l'EN 384 et de celui estimé expérimentalement par KOVRYGA & All [47], valident le comportement analogue aux résineux pour le peuplier et l'équation proposée dans la norme pour les bois feuillus.

$$E_{90,mean} = E_{m,mean}/X \tag{3.45}$$

Tableau 3-XIV : Relation entre module d'élasticité longitudinal et transversal.

	$E_{90,mean}$ [MPa]	$E_{m,mean}$ [MPa]	X
Peuplier	375	11 116	29,66
Hêtre AB	903	14 795	16,38
Hêtre CD	850	14 180	16,68
Hêtre	886	14 524	16,39
Chêne	760	13 595	17,88

3.5.4. Module de cisaillement G_{mean}

Pour établir la relation entre le module de cisaillement et le module d'élasticité local, il ne sera utilisé que les mesures réalisées dans le cadre des essais de flexion. En comparant directement les modules mesurés sur la même éprouvette (cf Figure 3-31), il n'est pas mis en avant de corrélation forte entre ces deux propriétés mécaniques (R^2= 0,05). Une relation basée sur celle établie par l'EN 384 (3.46) sera tout de même étudiée en comparant les valeurs moyennes d'essais.

$$G_{mean} = E_{m,mean}/X \tag{3.46}$$

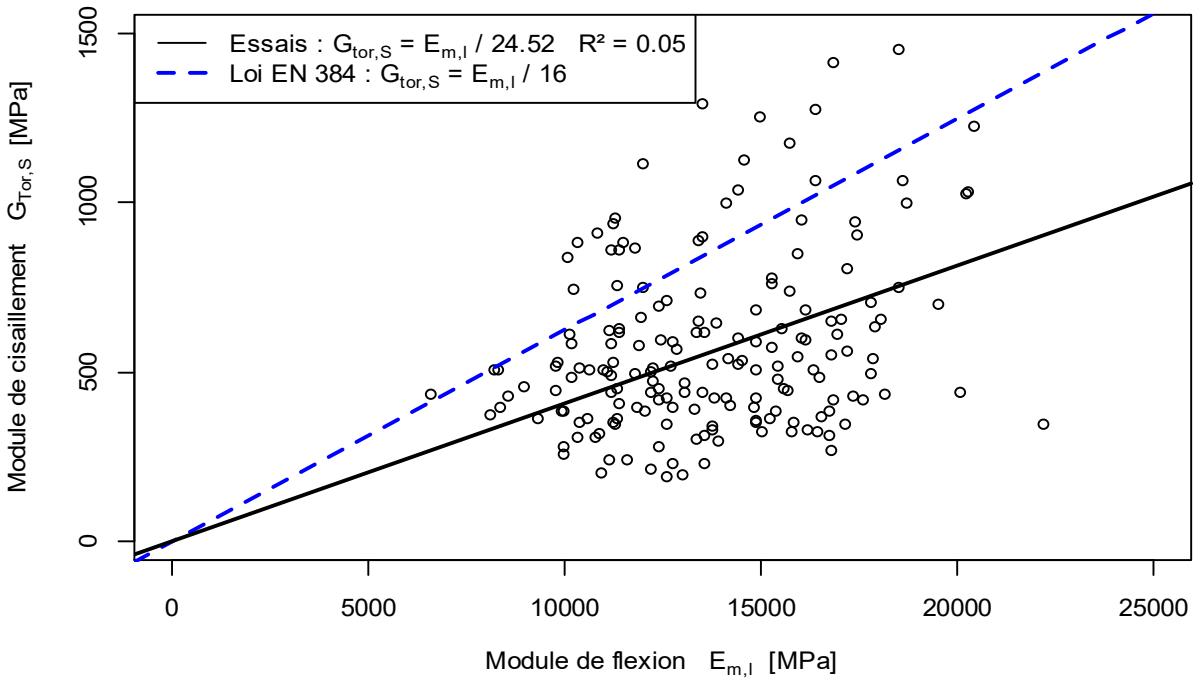


Figure 3-31 : Exemple de corrélation entre module de cisaillement et module d'élasticité local.

Le Tableau 3-XV, présente les mesures expérimentales du module de cisaillement des cibles disposées en carré ($G_{tor,S}$) et le module estimé par la RDM (3.32). Les coefficients de variation des modules de cisaillement sont assez élevés car les mesures sont très dépendantes de la pente de fil locale, une faible variation de cette dernière entrainant une variation importante du module de cisaillement (selon la loi de HANKINSON). Avec une différence maximale de 18%, le module moyen estimé à partir de la RDM est du même ordre de grandeur que celui mesuré avec les cibles. En utilisant la mesure réalisée via les cibles pour déterminer la relation entre le module d'élasticité et le module de cisaillement, le ratio moyen entre les deux modules est de 28,85 pour les 3 essences : soit quasiment deux fois plus que la relation proposée par l'EN 384. Néanmoins ce ratio reste cohérent avec les valeurs bibliographiques avec une variation comprise entre 7 et 28,2 pour le hêtre et le chêne (GUITARD [11]). Pour pouvoir proposer une relation plus propre entre ces deux modules, il conviendrait de réaliser pour chaque planche une mesure du module d'élasticité par un essai de flexion et une mesure du module de cisaillement par l'essai de torsion proposé dans l'EN 408.

Tableau 3-XV : Relation entre module d'élasticité longitudinal et module de cisaillement.

	$E_{m,mean}$ [MPa]	COV $E_{m,mean}$	$G_{tor,S}$ [MPa]	COV $G_{tor,S}$	G_{RDM} [MPa]	COV G_{RDM}	X
Peuplier	11116	11,9%	387	65,6%	451	78,7%	28,75
Hêtre AB	14795	11,1%	425	57,3%	449	49,9%	34,82
Hêtre CD	14180	16,7%	400	50,8%	485	82,9%	35,48
Hêtre	14524	14,2%	416	54,4%	472	69,7%	34,89
Chêne	13595	21,2%	593	59,8%	602	67,3%	22,92

3.5.5. Résistance en compression axiale $f_{c,0,k}$

La relation entre la résistance en compression axiale et la résistance en flexion s'exprime dans l'EN 384 pour les bois feuillus et résineux sous la forme de l'équation (3.47) avec $X = 4{,}3$ et $c = 0{,}5$. En supposant que la puissance c reste égale à 0,5, le ratio X est estimé à travers le Tableau 3-XVI. Les éprouvettes de compression axiale provenant du même lot de bois que celui utilisé pour les essais de flexion en grandes dimensions, le ratio sera aussi exprimé avec ces essais. Le tableau met en avant que la relation entre les résistances de flexion et de compression est largement impactée par l'essence du bois. Le plus faible ratio obtenu, qui est supérieur à celui de la norme, est celui qui fait correspondre la résistance en compression avec la résistance de tous les essais de flexion.

$$f_{c,0,k} = X\left(f_{m,k}\right)^{c} \tag{3.47}$$

Tableau 3-XVI : Ratio entre résistances en compression axiale et en flexion.

	$f_{c,0,k}$ [MPa]	$f_{m,k}$ Complet [MPa]	X	$f_{m,k}$ 65×200 [MPa]	X
Peuplier	28,47	35,37	4,79	31,09	5,11
Hêtre AB	44,59	51,21	6,23	43,58	6,76
Hêtre CD	41,08	39,68	6,52	32,91	7,16
Hêtre	43,26	44,96	6,45	37,99	7,02
Chêne	31,18	34,37	5,32	29,94	5,70

Il est possible de réaliser un sous-échantillonnage en se basant sur les classes mécaniques attribuées par le classement visuel. Pour chaque groupe ainsi constitué, les résistances caractéristiques en compression et en flexion sont calculées. A partir de ces valeurs, représentées sur la Figure 3-32, deux variations de l'équation (3.47) sont étudiées pour estimer la résistance en compression : une première en fixant le coefficient $c = 0{,}5$ et une deuxième en le faisant varier en fonction de l'essence. Les différents coefficients obtenus sont synthétisés dans le Tableau 3-XVII.

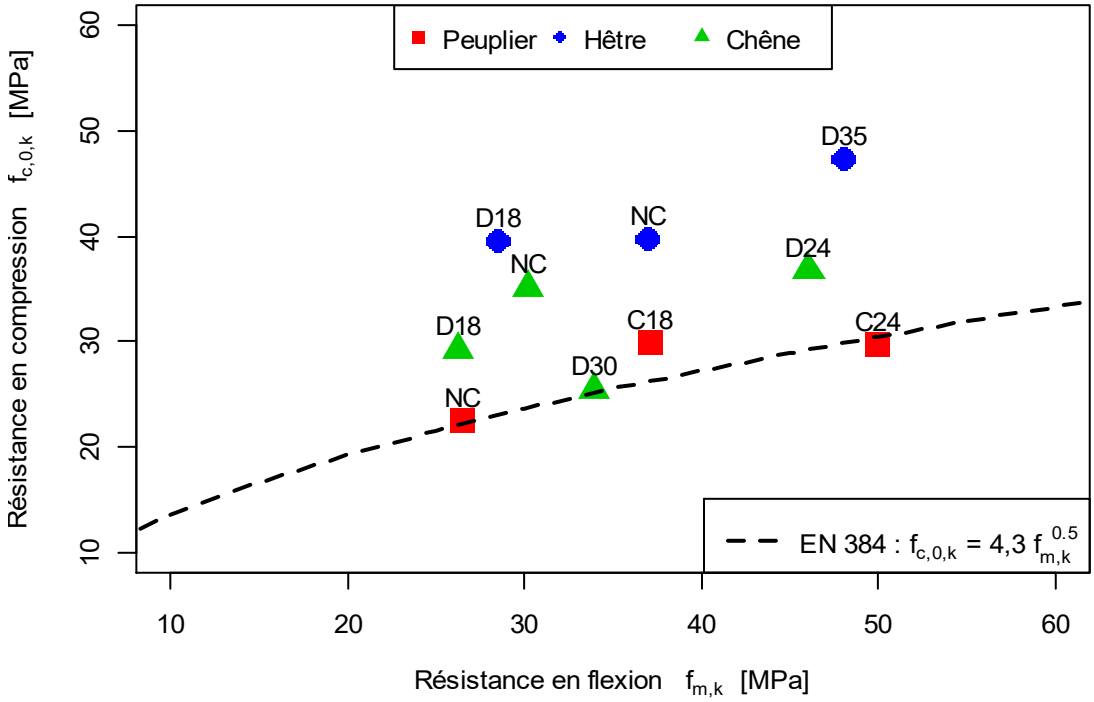


Figure 3-32 : Points créés par le sous échantillonnage des classes de résistance.

En procédant de cette manière, le ratio X augmente légèrement par rapport à la comparaison directe des valeurs caractéristiques (analyse du Tableau 3-XVI). La comparaison du coefficient de corrélation R^2 entre les deux lois envisagées démontre que l'utilisation d'une puissance fixée à 0,5 est suffisante pour décrire la corrélation entre les résistances en flexion et en compression.

Au vu du ratio X déterminé pour le peuplier, il semble cohérent de conserver pour cette essence l'équation spécifique aux bois résineux telle que définie dans l'EN 384 et de proposer, pour le hêtre ainsi que pour le chêne, une nouvelle corrélation favorisant la valorisation de ces essences pour des éléments comprimés. Compte tenu des différences entre les relations définies pour le hêtre d'une part et pour le chêne de l'autre, de manière conservative, il est préférable de ne garder que la loi du chêne pour établir une nouvelle équation spécifique pour les bois feuillus.

Tableau 3-XVII : Ratio entre résistances en compression axiale et en flexion en se basant sur le classement visuel.

	X $c = 0{,}5$	R^2	X	c	R^2
Peuplier	4,47	0,69	6,24	0,41	0,73
Hêtre	6,87	0,70	11,26	0,36	0,80
Chêne	5,44	0,17	9,91	0,33	0,23
Hêtre & chêne	6,09	0,33	6,35	0,49	0,33
Global	5,58	0,17	8,35	0,39	0,18

En posant comme hypothèse que la résistance en compression de l'éprouvette testée est représentative de la résistance en compression de l'éprouvette de flexion de laquelle elle provient, au travers de la Figure 3-41, il est possible d'étudier la relation moyenne entre les résistances.

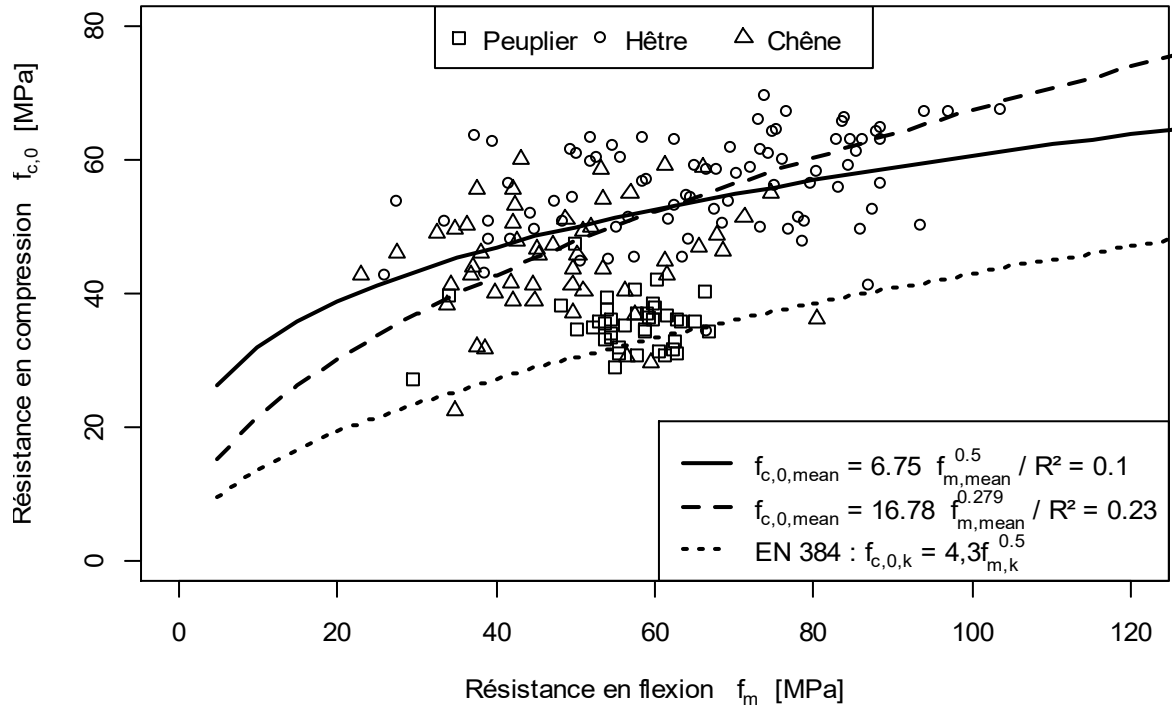


Figure 3-33 : Corrélation directe entre les résistances en compression axiale et en flexion.

Contrairement à l'analyse précédente, cette fois, l'utilisation d'une puissance c différente de 0,5 permet un réel gain vis-à-vis de la prédiction de la résistance en compression. En fixant ce coefficient à 0,2, la relation moyenne s'exprime par la relation (3.48). En introduisant les équations de transformation entre loi moyenne et loi caractéristique dans cette relation, il est possible d'en déduire l'équation (3.49) définissant la relation entre les résistances caractéristiques.

$$f_{c,0,mean} = 24{,}1\ {f_{m,mean}}^{0,2} \tag{3.48}$$

$$\frac{f_{c,0,k}}{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\ (\mu; COV_{f_{c,0}})\right)} = 24{,}1 \left(\frac{f_{m,k}}{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\ (\mu; COV_{f_m})\right)}\right)^{0,2}$$

$$f_{c,0,k} = 24{,}1\ \frac{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\ (\mu; COV_{f_{c,0}})\right)}{\left(X\left(P = 0{,}05 \middle| N\ (\mu; COV_{f_m})\right)\right)^{0,2}}\ {f_{m,k}}^{0,2} = 0{,}837 \times 24{,}1\ {f_{m,k}}^{0,2}$$

$$f_{c,0,k} = 20{,}2\ {f_{m,k}}^{0,2} \tag{3.49}$$

Par rapport aux valeurs caractéristiques des essais de flexion en grandes dimensions, l'utilisation de cette loi donne une bonne estimation de la résistance caractéristique en compression axiale pour le hêtre, avec moins de 4% de différence, mais la surestime de 28% pour le chêne. Ce résultat n'est pas acceptable dans le cadre d'un code de calcul. Pour proposer une loi conservative, la même étude a été réalisée uniquement sur le chêne et permet d'aboutir aux équations suivantes :

$$f_{c,0,mean} = 38{,}0\ {f_{m,mean}}^{0,066} \tag{3.50}$$

$$f_{c,0,k} = 24{,}5\ {f_{m,k}}^{0,1} \tag{3.51}$$

Pour comparer ces deux propositions, le Tableau 3-XVIII montre les différentes équations de prédiction de la résistance caractéristique confrontées à l'estimation actuelle de l'EN384 et aux résultats d'essais. Parmi les deux propositions, la solution obtenue à partir des sous échantillons basés sur les classes de résistance donne le moins de différence par rapport aux essais. C'est donc cette équation qui semble le mieux décrire la relation entre résistance en compression et résistance en flexion.

Tableau 3-XVIII : Comparaison des différentes lois $f_{c,0,k} = f(f_{m,k})$ définies à partir des essais.

	$f_{m,k}$ *Complet [MPa]*	$f_{c,0,k}$ *[MPa]*	$EN\ 384$ *[MPa]*	Δ_{EN384}	$Prop\ 1$	Δ_{prop1}	$Prop\ 2$	Δ_{prop2}
Peuplier	35,37	28,47	25,57	1,11	-	-	-	-
Hêtre AB	51,21	44,59	30,77	1,45	38,64	1,15	36,32	1,23
Hêtre CD	39,68	41,08	27,09	1,52	34,02	1,21	35,40	1,16
Hêtre	44,96	43,26	28,83	1,50	36,21	1,19	35,85	1,21
Chêne	34,37	31,18	25,21	1,24	31,66	0,98	34,90	0,89
Avec : $EN\ 384 : f_{c,0,k} = 4{,}3\ {f_{m,k}}^{0,5}$ - $Prop\ 1: f_{c,0,k} = 5{,}4\ {f_{m,k}}^{0,5}$ - $Prop\ 2: f_{c,0,k} = 24{,}5\ {f_{m,k}}^{0,1}$								

Pour réintégrer l'équation retenue dans le système de classes de résistance, il est possible d'opposer la prédiction de la résistance en compression axiale aux résultats obtenus pour chaque sous-échantillon. Comme le montre le Tableau 3-XIX, mis à part pour le chêne D30, l'équation de prédiction de la résistance en compression axiale donne une bonne estimation de la résistance observée expérimentalement sans pour autant la dépasser. Sachant que les résistances moyennes des bois classés D30 sont inférieures aux résistances moyennes des bois classés D24, cette anomalie peut être écartée. Il est à noter que les pièces rejetées par le classement visuel ont tout de même des propriétés mécaniques suffisantes pour être utilisées dans la plupart des constructions standards ($f_{m,k} > 24\ MPa$ & $f_{c,0,k} > 21\ MPa$).

Tableau 3-XIX : Comparaison de la loi $f_{c,0,k} = 5{,}4\ {f_{m,k}}^{0,5}$ par rapport aux résistances mesurées pour les différentes classes visuelles.

	Classement visuel	*Nombre*	$f_{m,k}$ *EN338*	$f_{m,k}$ *réel*	$f_{c,0,k}$ *Estimation* $f_{m,k}$ *EN 338*	$f_{c,0,k}$ *Estimation* $f_{m,k}$ *réel*	$f_{c,0,k}$ *essais*
Peuplier	NUL	6		26,51		22,14	22,46
	C18	10	18,00	37,12	18,24	26,20	29,86
	C24	24	24,00	49,92	21,07	30,38	29,66
Hêtre	NUL	5		37,03		32,86	39,79
	D18	29	18,00	28,53	22,49	28,84	39,46
	D35	48	35,00	48,05	31,36	37,43	47,25
Chêne	NUL	13		30,16		29,66	35,20
	D18	25	18,00	26,23	22,49	27,65	29,28
	D24	7	24,00	46,07	25,96	36,65	36,75
	D30	8	30,00	33,88	29,03	31,43	25,50
Avec $f_{c,0,k} = 4{,}3\ {f_{m,k}}^{0,5}$ pour le peuplier et $f_{c,0,k} = 5{,}4\ {f_{m,k}}^{0,5}$ pour le hêtre et le chêne.							

3.5.6. Résistance en traction axiale $f_{t,0,k}$

La norme et les études bibliographiques ont mis en avant une relation linéaire entre la résistance en flexion et la résistance en traction axiale, avec l'équation (3.19) pour les résineux et l'équation (3.52) pour les feuillus (avec $X = 0{,}6$). A travers le Tableau 3-XX, l'ensemble des résultats d'essais est comparé aux deux lois de prédiction de la résistance en traction : un nouveau ratio X est alors estimé.

$$f_{t,0,k} = -3{,}07 + 0{,}73 \times f_{m,k} \quad (3.19)$$

$$f_{t,0,k} = X \times f_{m,k} \quad (3.52)$$

Les forts taux de variation observés sur l'ensemble des essais cumulés à des valeurs moyennes de résistances faibles (deux fois plus petites que celles trouvées en bibliographie) laissent à penser qu'il n'est pas possible de comparer directement les valeurs caractéristiques entres elles pour ces essences. Les résultats sur le hêtre sont cohérents avec l'étude de GLOS & DENZLER [43] ($43 < f_{t,0,mean} < 80$ MPa & $35\% < \mathrm{COV} < 45\%$ & $22{,}4 < f_{t,0,k} < 34{,}6$ MPa). Pour cette essence, le coefficient X varie entre 0,49 et 0,56, ce qui est cohérent avec la norme et le principe selon lequel la qualité du bois a une influence importante sur la résistance en traction. La suppression des planches qui ne correspondent pas aux exigences du classement visuel ne modifie quasiment pas les résistances en flexion mais apporte un gain de résistance significatif pour le peuplier en traction (gain de 32%), ce gain étant compris entre 8 et 12% pour les autres essences.

Tableau 3-XX : Comparaison des lois de prédiction de la résistance en traction axiale avec les résultats d'essais.

		$f_{m,k}$ *[MPa]*	*Loi résineux [MPa]*	*Loi feuillus [MPa]*	$f_{t,0,k}$ *[MPa]*	X
Global	Peuplier	35,37	22,75	21,22	11,63	0,33
	Hêtre AB	51,21	34,31	30,72	29,33	0,57
	Hêtre CD	39,68	25,90	23,81	19,86	0,50
	Hêtre	44,96	29,75	26,97	23,85	0,53
	Chêne	34,37	22,02	20,62	11,93	0,35
Sans les pièces rejetées par classement visuel	Peuplier	35,36	22,74	21,21	15,45	0,44
	Hêtre AB	51,37	34,43	30,82	32,86	0,64
	Hêtre CD	39,67	25,89	23,80	21,83	0,55
	Hêtre	45,21	29,93	27,13	25,81	0,57
	Chêne	35,94	23,17	21,56	12,88	0,36

Pour proposer des lois de corrélation avec un plus grand nombre de points caractéristiques, il est décidé, comme pour la compression, de constituer des sous échantillons en fonction des classes de résistance attribuées par le classement visuel. A partir de là, deux alternatives sont envisageables :

- Alternative 1 : Considérer, pour la flexion, les résistances prédites par le classement visuel des pièces testées en traction.
- Alternative 2 : Considérer les résistances caractéristiques observées au cours des essais de flexion et utiliser ces valeurs pour définir les nouvelles corrélations.

Dans le cadre de l'alternative 1, les résistances en flexion sont prises égales à celles estimées par le classement visuel et les résistances en traction sont calculées pour chaque classe. Les résistances sont compilées dans le Tableau 3-XXI. La Figure 3-34 présente la relation entre les résistances caractéristiques, qui peut être exprimée telle que :

$$f_{t,0,k} = 1{,}15 \times f_{m,k} - 9{,}11 \quad (3.53)$$

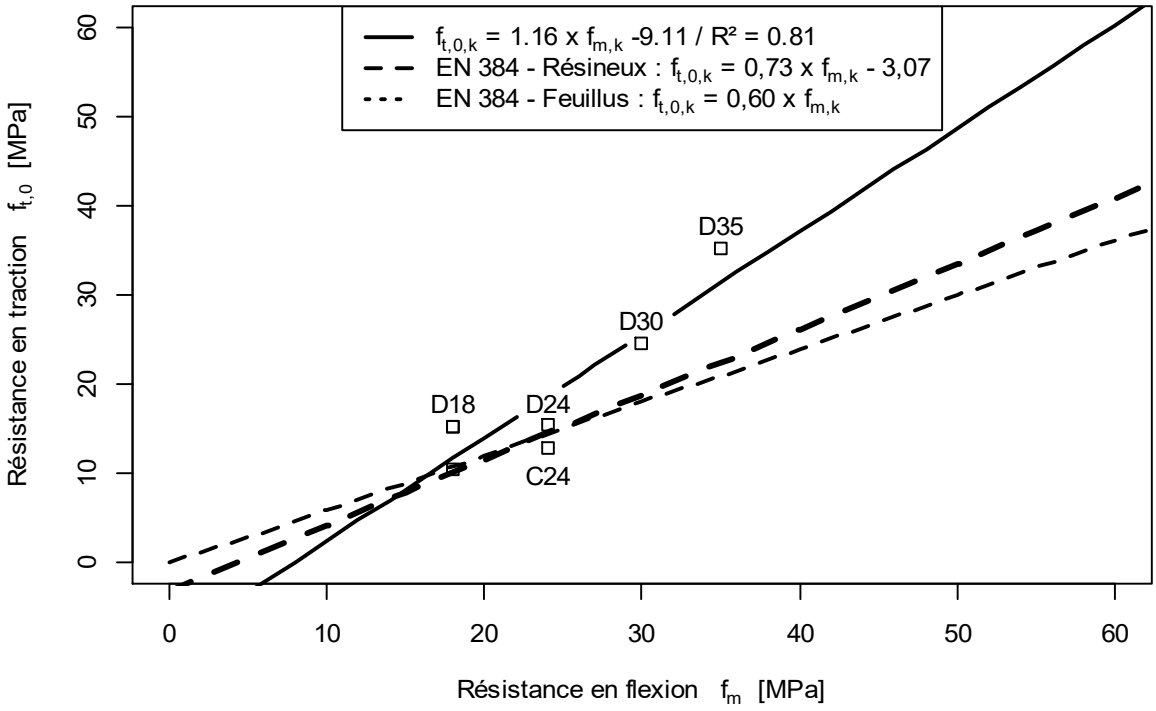


Figure 3-34 : Résistance en traction en fonction de la résistance en flexion estimée par classement visuel.

Dans le cadre de l'alternative 2, les résistances réelles en flexion de chaque classe de résistance attribuée visuellement sont calculées à partir des essais réalisés sur les éprouvettes de taille intermédiaire (45x140 ou 45x135) qui ont des dimensions comparables aux éprouvettes utilisées pour la traction. Les valeurs moyennes et caractéristiques, pour chaque sous échantillon, sont données dans le Tableau 3-XXI. Conformément à la bibliographie, plus la qualité visuelle du bois augmente et plus la résistance en traction augmente. Cependant, la forte variabilité des résultats (COV supérieurs à 40%) montre que pour le peuplier C24 et le chêne D18, les valeurs caractéristiques mesurées sont inférieures à celles prédites par l'EN 384 et tabulées dans l'EN 338.

Tableau 3-XXI : Résistances moyennes et caractéristiques en flexion et en traction en fonction du classement visuel.

	Classement visuel	*Nb*	$f_{m,mean}$ *essais*	*COV* f_m	$f_{m,k}$ *essais*	*Nb*	$f_{t,0,mean}$ *essais*	*COV* $f_{t,0,k}$	$f_{t,0,k}$ *essais*	$f_{t,0,k}$ *EN338*
Peuplier	NUL	3	62,23	13,1%	40,29	3	11,56	30,2%	3,81	-
	C18	10	56,95	15,6%	39,48	16	29,54	27,6%	15,29	10
	C24	27	53,96	18,9%	35,94	23	36,00	43,3%	12,87	14,5
Hêtre	NUL	2	79,46	37,3%	10,86	1	30,71	-	-	-
	D18	26	76,72	29,1%	38,68	24	38,07	48,5%	15,22	11
	D35	52	94,03	19,2%	61,11	31	60,94	23,2%	35,15	21
Chêne	NUL	10	58,37	18,8%	40,82	1	23,41	-	-	-
	D18	13	54,60	29,2%	27,66	39	24,52	41,3%	10,56	11
	D24	10	65,57	25,8%	37,14	13	30,38	31,3%	15,58	14
	D30	28	74,02	24,5%	45,33	10	49,30	32,5%	24,56	18

L'étude de l'évolution des résistances caractéristiques en traction axiale en fonction des résistances caractéristiques en flexion, présentée par la *Figure 3-35*, aboutit à la loi linéaire (3.54) de même forme que celle exprimée pour les bois résineux dans la révision de l'EN 384 de 2016.

$$f_{t,0,k} = 0{,}8 \times f_{m,k} - 14{,}15 \qquad (3.54)$$

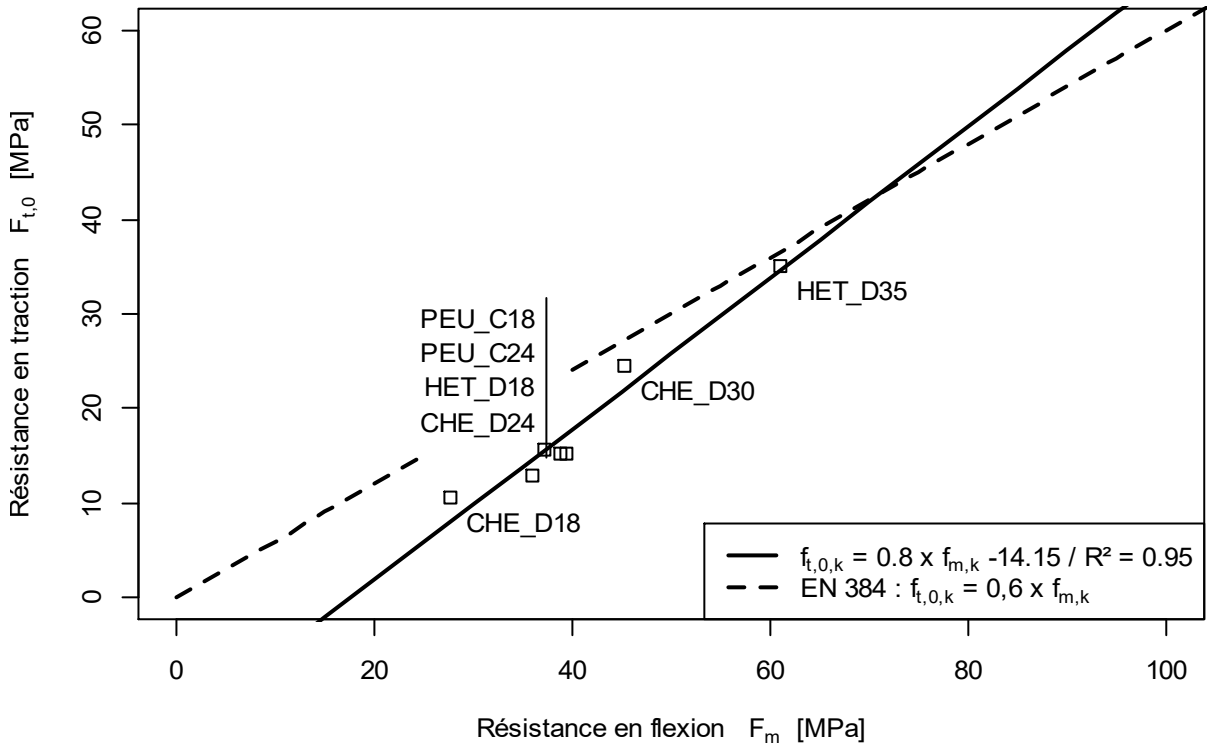


Figure 3-35 : $f_{t,0} = f(f_m)$ avec le sous-échantillonnage selon le classement visuel.

Pour proposer une corrélation directe entre ces deux propriétés mécaniques, des essais ont été réalisés sur du bois sans défauts. Dans la même planche, une éprouvette pour un essai de traction et une éprouvette pour un essai de flexion ont été prélevées l'une à côté de l'autre. En posant comme hypothèse que la variabilité naturelle est négligeable entre ces éprouvettes (ce qui n'est jamais le cas en réalité), il est possible de comparer directement les résistances entres elles. Sans appliquer de correctif de la résistance en fonction de la hauteur de référence de 150mm, les relations moyennes entre les résistances en flexion et traction sont étudiées au travers de la Figure 3-36, en proposant une loi linéaire similaire à celle proposée par l'EN 338 pour les résineux.

En introduisant les équations de transformation entre loi moyenne et loi caractéristique dans la relation établie pour le chêne, la relation entre les résistances caractéristiques s'exprime par l'équation (3.55).

$$f_{t,0,mean} = 0{,}35\, f_{m,mean} + 30 \leftrightarrow \frac{f_{t,0,k}}{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\left(\mu; COV_{f_{t,0}}\right)\right)} = 0{,}35\, \frac{f_{m,k}}{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\left(\mu; COV_{f_m}\right)\right)} + 30$$

$$f_{t,0,k} = \left(0{,}35\, \frac{f_{m,k}}{X(P = 0{,}05 | N\,(\mu; 25{,}2\%))} + 30\right) X(P = 0{,}05 | N\,(\mu; 31{,}3\%))$$

$$f_{t,0,k} = 0{,}30 \times f_{m,k} + 14{,}53 \qquad (3.55)$$

Il est à noter qu'en obligeant la régression linéaire à passer par le point 0, il est possible d'exprimer la relation entre les résistances en flexion et en traction par l'équation (3.56), ce qui est cohérent avec les observations de BURGER & GLOS [66] et de STEIGER & ARNOLD [51] avec des coefficients proches de 0,7 pour les bois de très haute qualité.

$$f_{t,0,mean} = 0{,}717 \times f_{m,mean} \qquad (3.56)$$

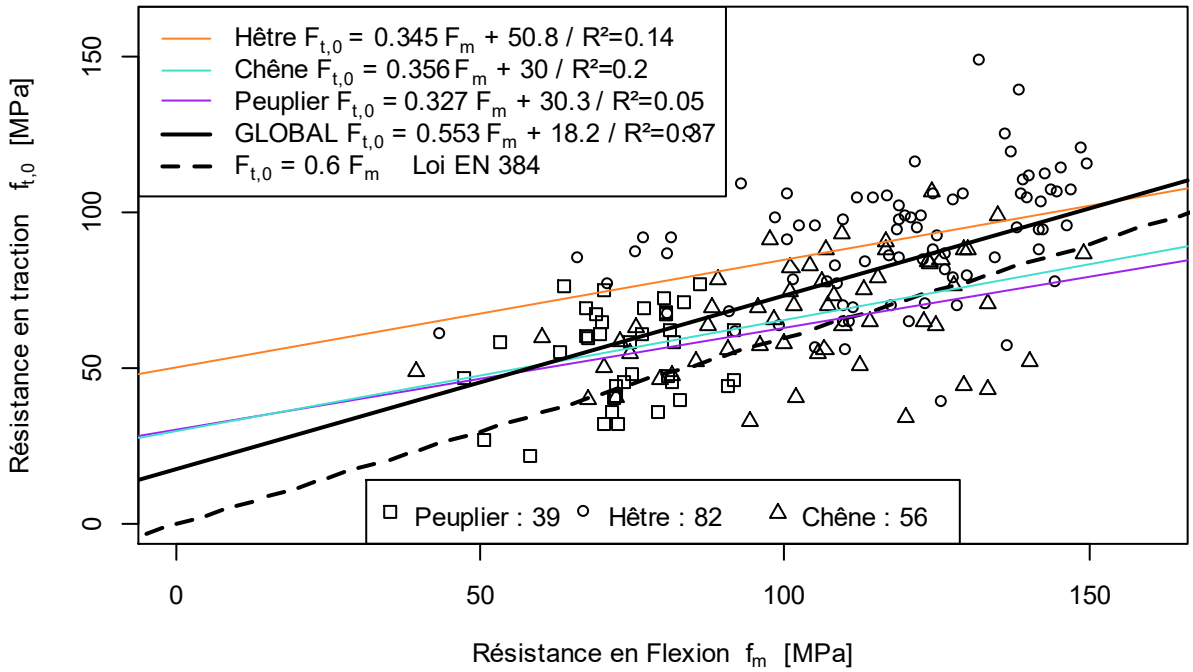


Figure 3-36 : $f_{t,0} = f(f_m)$ pour des bois sans défaut et de droit fil.

En réalisant l'estimation de la résistance en traction à partir des résistances réelles en flexion, pour chaque sous échantillons définis dans le Tableau 3-XXI, la résistance estimée à partir de l'équation (3.55) donne des résultats trop éloignés des résistances expérimentales (avec des variations pouvant atteindre 100%). Sur le hêtre classé visuellement D35, comportant très peu de singularité et pouvant donc être assimilé à du bois sans défaut, cette formule donne des résultats plus acceptable (moins de 7% de différence). En utilisant les résistances en flexion prédites par le classement visuel, les résistances en traction prédites via l'équation (3.55) restent 40% supérieures aux résistances mesurées (chêne D24). Dans les bois feuillus, et plus particulièrement dans le chêne, nœuds et pentes de fil ont une trop grande incidence sur les résistances pour pouvoir utiliser le modèle de prédiction de la résistance basé sur les bois sans défauts.

Cela conduit à soit n'utiliser ces essences qu'en compression (poteaux, charpente traditionnelle, pans de bois…), soit remplacer la technique de classement visuel par un classement machine qui permet de mesurer les pentes de fil sur les bois feuillus à des cadences industrielles et donc d'estimer au mieux les propriétés mécaniques sur ces essences (cf KOVRYGA [46]).

A partir de ces 4 analyses, il est possible de retenir deux équations pour l'estimation de la résistance caractéristique en traction à partir de la résistance caractéristique en flexion.

L'équation (3.53), basée sur les résistances estimées par le classement visuel des bois et qui a tendance à améliorer les performances en traction des bois feuillus. Cette équation ne serrait valide que sur la plage d'emploi du classement visuel (limitée au D40).

La relation (3.54), basée sur les résistances réelles observées en traction et en flexion et qui aurait tendance à diminuer les propriétés en traction par rapport aux prédictions actuelles. Cette équation a le désavantage de ne pas permettre l'utilisation de bois feuillus en traction dès lors que leur résistance caractéristique en flexion est inférieure à 18 MPa.

3.5.7. Résistance en compression transversale $f_{c,90,k}$

L'EN 384 propose une corrélation entre la résistance en compression transversale et la masse volumique du bois sous la forme de l'équation (3.57) avec $X = 0{,}07$ pour les résineux et $X = 0{,}10$ pour les feuillus (pour une masse volumique caractéristique inférieure à $700\ kg/m^3$). Dans le Tableau 3-XXII, les valeurs caractéristiques de la masse volumique et de la résistance en compression transversale sont directement comparées. Par l'expérimentation, le ratio X pour le hêtre ainsi que le comportement du peuplier assimilable à celui d'un bois résineux ($X = 0{,}07$) sont validés. Pour le chêne, les essais montrent que l'équation de l'EN 384 aurait tendance à surestimer l'estimation de la résistance en compression transversale de quasiment 15%.

$$f_{c,90,k} = X\ \rho_k \tag{3.57}$$

Tableau 3-XXII : Relation entre masse volumique et résistance en compression transversale pour les essais initiaux.

	$f_{c,90,k}$ [MPa]	ρ_k [kg/m^3]	X
Peuplier	3,07	399	0,0077
Hêtre AB	8,04	661	0,0122
Hêtre CD	6,80	632	0,0108
Hêtre	7,43	648	0,0115
Chêne	5,56	638	0,0087

Pour comprendre mieux cette dernière observation, une trentaine d'essais complémentaires ont été réalisés pour le hêtre et le chêne donnant les résultats synthétisés dans le Tableau 3-XXIII. Pour ces essais, les ordres de grandeur sont analogues à la première campagne expérimentale et les résistances légèrement supérieures, validant le ratio $X = 0{,}010$ pour le chêne.

Tableau 3-XXIII : Relation entre masse volumique et résistance en compression transversale pour les essais complémentaires.

	n	COV $f_{c,90,k}$	$f_{c,90,k}$ [MPa]	COV ρ_k	ρ_k [kg/m^3]	X
Hêtre	39	15,0%	8,02	6,9%	623,2	0,0129
Chêne	36	24,5%	6,65	6,0%	656,3	0,0101

Le coefficient X étant dépendant du lot testé, il a été décidé d'étudier la variation moyenne de la résistance en compression transversale en fonction de la masse volumique (cf *Figure 3-37*). Pour obtenir la loi caractéristique à partir de la loi moyenne, il est possible d'introduire dans l'équation de la régression linéaire, l'estimation de la valeur caractéristique à partir d'une loi normale uniformément distribuée.

$$f_{c,90,mean} = X\ \rho_{mean} \leftrightarrow \frac{f_{c,90,k}}{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\ (\mu; COV_{f_{c,90,k}})\right)} = X\ \frac{\rho_k}{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\ (\mu; COV_{\rho})\right)}$$

$$f_{c,90,k} = X \frac{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\ (\mu; COV_{f_{c,90,k}})\right)}{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\ (\mu; COV_{\rho})\right)}\ \rho_k \tag{3.58}$$

A partir des données expérimentales, l'estimation de la résistance en compression transversale en fonction de la densité peut s'exprimer par l'équation (3.59). En fixant un coefficient de variation à 20% pour la résistance et 10% pour la masse volumique, le rapport entre les deux propriétés s'exprime au travers de la relation (3.60).

$$f_{c,90,k} = 0{,}0137 \times \frac{X(P = 0{,}05|N\ (\mu; 21{,}0\%))}{X(P = 0{,}05|N\ (\mu; 6{,}2\%))}\ \rho_k = 0{,}00999\ \rho_k \quad (3.59)$$

$$f_{c,90,k} = 0{,}0137 \times \frac{X(P = 0{,}05|N\ (\mu; 20{,}0\%))}{X(P = 0{,}05|N\ (\mu; 10\%))}\ \rho_k = 0{,}0110\ \rho_k \quad (3.60)$$

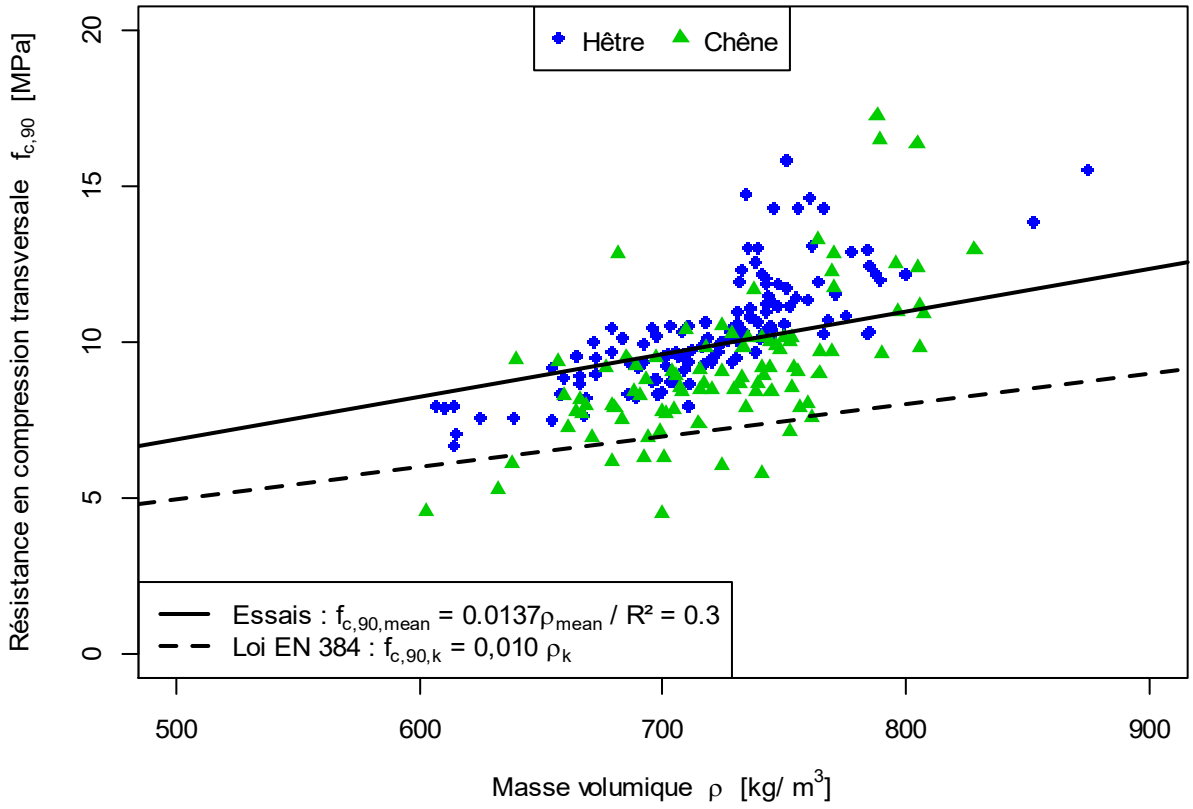


Figure 3-37 : Résistance en compression transversale en fonction de la masse volumique pour le hêtre et le chêne.

Au vu des résultats expérimentaux et de cette analyse, pour un lot combiné de chêne et de hêtre, l'équation de l'EN 384 pour estimer la résistance en compression transversale est vérifiée. Néanmoins, la Figure 3-37 met en évidence que les propriétés en compression transversale du chêne sont, à masses volumiques similaires, inférieures à celles du hêtre. En étudiant indépendamment les deux essences ainsi qu'en fixant les coefficients de variation de la masse volumique à 10% de la résistance à 25% pour le chêne et 20% pour le hêtre, il vient les deux équations suivantes :

$$Chêne : f_{c,90,k} = 0{,}008897\ \rho_k \quad (3.61)$$

$$Hêtre : f_{c,90,k} = 0{,}0116\ \rho_k \quad (3.62)$$

Le système de classe de résistance étant indépendant de l'essence de bois employée, pour être sécuritaire, il conviendrait de considérer la loi la plus défavorable, donc celle établie pour le chêne. Néanmoins, le système de classement ayant pour le moment tendance à sous évaluer la masse volumique, l'utilisation de la formule actuelle de l'EN384 peut continuer de s'appliquer sans risquer de voir apparaitre de sinistre en compression transversale. Comme l'EUROCODE 5 ne propose pas de tenir compte du coefficient $k_{c,90}$ pour les bois feuillus (coefficient permettant de transformer un calcul de résistance en une justification de la déformation admissible en compression transverse), l'utilisation de la formule actuelle de la norme est d'autant plus justifiable.

La Figure 3-38 présente la variation de la résistance en compression transversale en fonction de l'orientation des cernes par rapport au chargement. Malgré un nombre faible d'éprouvettes dans le sens radial, il semble que, comme pour les résineux, les propriétés en compression transversale selon ce débit soient supérieures à celles des autres orientations. S'il n'est pas possible d'en tenir compte dans le cadre des calculs des éléments en bois massif, il est possible que, comme pour les bois résineux, les résistances en compression transversale de potentielles poutres en bois lamellé-collé ou de plaques en CLT feuillus soient inférieures aux résistances obtenues dans le cadre du projet EFEUR 5.

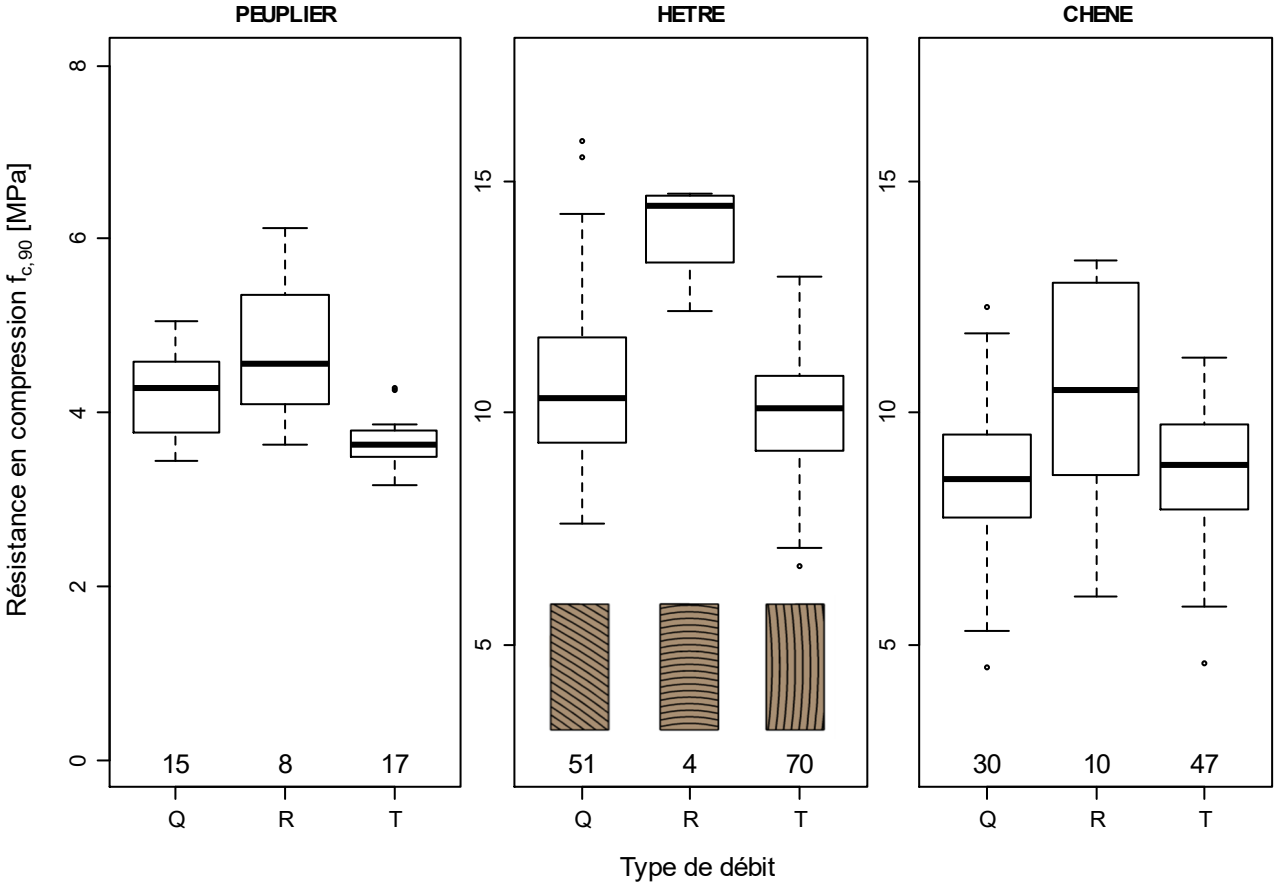


Figure 3-38 : Résistance en compression transversale en fonction de l'orientation des cernes.

L'analyse des modules de compression transversale donne les mêmes conclusions, avec des propriétés supérieures pour un débit de type radial et des propriétés équivalentes entre les deux autres orientations de cernes.

3.5.8. Résistance en cisaillement $f_{v,k}$

L'EN 384 propose une corrélation directe entre la résistance en cisaillement et la résistance en flexion. Même si la bibliographie n'a pas montré de relation directe entre ces deux propriétés mécaniques, les estimations sont réalisées, dans un premier temps, par rapport aux résistances expérimentales des essais de flexion et ensuite, en utilisant les résistances en flexion estimées par le classement visuel. En ce qui concerne ce dernier point, les éprouvettes de cisaillement ayant été prélevées sur les bois testés en flexion le classement visuel des essais de flexion est utilisé. En ce qui concerne la relation entre les résistances en flexion et en cisaillement, l'équation (3.63) est considérée pour les bois résineux et le peuplier alors que la relation (3.64) s'applique aux bois feuillus.

$$f_{v,k} = min(4{,}0\ ;\ 1{,}6 + 0{,}1\ f_{m,k}) \quad (3.63)$$

$$f_{v,k} = min(5{,}0\ ;\ 3{,}0 + 0{,}03\ f_{m,k}) \quad (3.64)$$

Comme le montre le Tableau 3-XXIV, les résistances caractéristiques en cisaillement des essais sont supérieures aux résistances tabulées dans l'EN 338 ainsi qu'aux résistances estimées à partir de l'équation de l'EN 384. En ce qui concerne le peuplier, l'utilisation des lois génériques aux bois résineux semble être justifiée car elle n'engendre pas une trop grande sous-évaluation des propriétés de résistance des bois classés visuellement (maximum 13%).

Tableau 3-XXIV : Comparaison des résistances en cisaillement et en flexion en fonction du classement visuel.

	Classement visuel	*Nb*	$f_{m,mean}$ *essai*	f_k *essai*	$f_{v,mean}$ *essai*	$f_{v,k}$ *essai*	*Estim* $f_{v,k}$ *EN 384*	$f_{v,k}$ *EN 338*
Peuplier	NUL	4	49,41	19,52	6,93	5,51	4,00	-
	C18	8	55,32	35,20	7,00	4,04	4,00	3,40
	C24	19	58,56	49,54	6,84	4,52	4,00	4,00
Hêtre	NUL	1	94,51	-	13,49	-	-	-
	D18	17	66,46	39,09	12,39	9,92	4,17	3,50
	D35	40	82,42	62,94	12,53	10,12	4,89	4,10
Chêne	NUL	-	-	-	-	-	-	-
	D18	3	64,00	46,33	7,59	5,70	4,39	3,50
	D24	4	59,22	38,68	10,43	6,69	4,16	3,70
	D30	33	90,01	53,48	9,65	6,62	4,60	3,90

En posant l'hypothèse que la résistance en cisaillement mesurée est représentative de la résistance en cisaillement de l'ensemble de l'éprouvette de flexion de laquelle elle est issue, il est possible de comparer directement les deux propriétés mécaniques pour établir une équation similaire à celle proposée par l'EN 384. Cette analyse, développée au travers de la Figure 3-39, met en avant que les coefficients de corrélation R^2 pour la relation entre flexion et cisaillement sont extrêmement faibles ($R^2 < 0{,}05$) et ne permettent pas de conclure à une réelle relation entre ces deux propriétés.

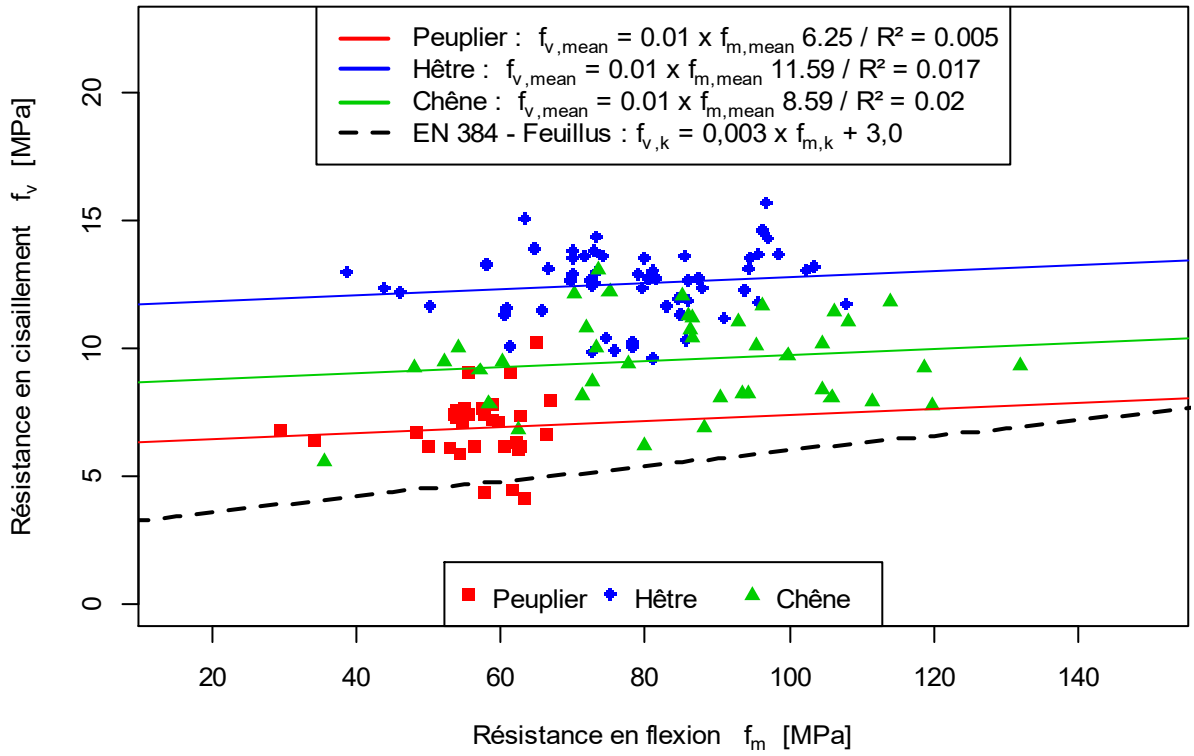


Figure 3-39 : Résistance en cisaillement en fonction de la résistance en flexion.

Au vu de la corrélation faible entre masse volumique et résistance en cisaillement pour le chêne et le peuplier (mise en avant dans le tableau de synthèse des essais : $R^2 = 0{,}07$ pour le peuplier et $R^2 = 0{,}10$ pour le chêne selon le Tableau 3-XIII), une analyse basée sur la masse volumique, analogue à celle proposée par DENZLER & GLOS [60] pour les résineux, ne serait pas judicieuse pour ces deux essences. La Figure 3-40 représente bien visuellement ce manque de corrélation avec, pour le peuplier, une forte variation de la résistance pour une faible variation de la masse volumique et pour le chêne une faible variation de la résistance au regard de la variation de masse volumique. Le coefficient de corrélation obtenu expérimentalement entre la masse volumique et la résistance est cohérent avec celui observé par KOVRYGA & All [47] pour le hêtre ($R^2 = 0{,}35$ & $R^2 = 0{,}382$).

En basant l'analyse des données sur le hêtre, il est possible de définir la loi linéaire (3.65) entre la résistance moyenne en cisaillement et la masse volumique moyenne. Relation qui peut être convertie en loi caractéristique (3.66) selon le principe de l'équation (3.58).

$$f_{v,mean} = 0{,}019\ \rho_{mean} - 0{,}92 \ / \ R^2 = 0{,}35 \qquad (3.65)$$

$$f_{v,k} = 0{,}017\ \rho_k - 0{,}76 \qquad (3.66)$$

Les résistances en cisaillement du hêtre étant, à masse volumique équivalente, largement supérieure aux résistances du chêne, l'équation ainsi définie ne peut en aucun cas être représentative pour cette essence. Malgré un coefficient de corrélation faible ($R^2 = 0{,}1$), il est possible d'estimer une loi moyenne et une loi caractéristique de la résistance en cisaillement du chêne en fonction de sa masse volumique par :

$$f_{v,mean} = 0{,}0085\ \rho_{mean} + 3{,}53 \qquad (3.67)$$

$$f_{v,k} = 0{,}0070\ \rho_k + 2{,}5 \qquad (3.68)$$

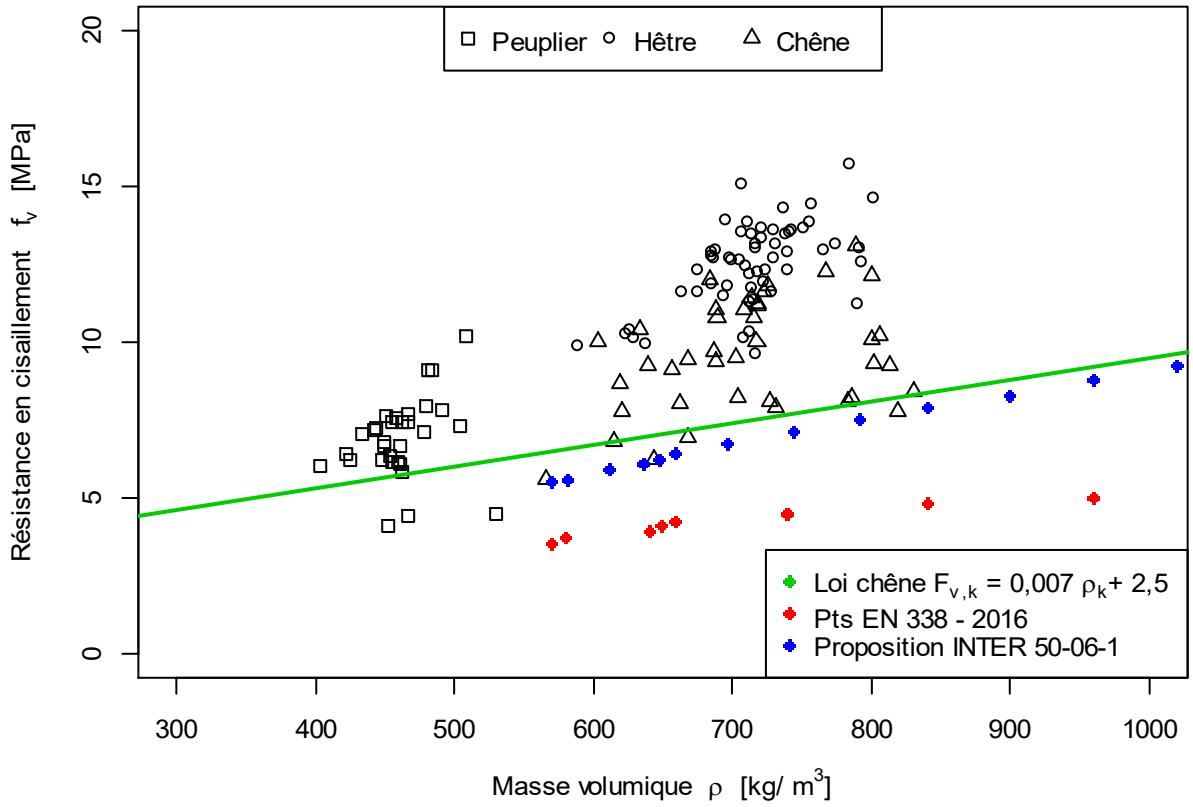


Figure 3-40 : Résistance en cisaillement en fonction de la masse volumique moyenne pour les essais, les valeurs de l'EN 338 de 2016 et la proposition de VAN DE KUILEN & All [64].

Les résultats de l'étude expérimentale étant cohérents avec les résultats de l'étude bibliographique, l'utilisation d'une valeur unique de la résistance en cisaillement indépendante de la classe de résistance pourrait être fixée à 5,5 MPa pour l'ensemble des feuillus (hêtre et chêne). La relation entre les valeurs caractéristiques de résistance et de masse volumique établie pour le chêne étant cohérente avec les nouvelles résistances en cisaillement proposées par VAN DE KUILEN & All [64] pour le tableau de l'EN 338, elles peuvent, sans problème, être utilisées pour estimer les résistances du hêtre et le chêne français (cf Figure 3-40).

Néanmoins, étant donné que la masse volumique est actuellement sous-évaluée par la méthode de classement visuel et le système de classe de résistance, la résistance en cisaillement prédite sera inévitablement plus faible que celle exprimée expérimentalement. Une réévaluation de la masse volumique dans le système de classe de résistance, telle que proposée par DENZLER & GLOS [43] permettrait de mieux estimer les résistances en cisaillement dans le système de classes de résistance.

3.6. RESULTATS EXPERIMENTAUX SECONDAIRES

3.6.1. Relation entre module local $E_{0,l}$ et module local $E_{0,g}$

L'équation (3.2) de l'EN 384 sur la relation entre le module d'élasticité local et le module global pour les essais de flexion n'est définie que pour les résineux. Les modules d'élasticité mesurés selon ces deux méthodes lors des essais de flexion et représentés sur la Figure 3-41 permettent de valider cette relation. Pour être plus représentatif du phénomène observé lors de la campagne d'essais, il serait envisageable de proposer l'équation (3.69) pour corriger la norme.

$$E_{m,0,l} = 1{,}3 \times E_{m,0,g} - 2690 \quad (3.2)$$

$$E_{m,0,l,feuillus} = 1{,}108 \times E_{m,0,g,feuillus} - 270\ MPa \quad (3.69)$$

Néanmoins, le coefficient de corrélation R^2 de la loi actuelle étant très proche de la nouvelle loi, cette équation ne constitue pas un frein à la valorisation des feuillus et peut être conservée. L'équation de l'EN 384 sous-estime le module d'élasticité local lorsque le module global est inférieur à 12 600 MPa, l'erreur relative pouvant atteindre 14% pour un module à 7000 MPa. Lorsque le module global est supérieur à cette limite de 12 600 MPa, il est observé une majoration du module local qui atteint 6% pour un module de 20 000 MPa.

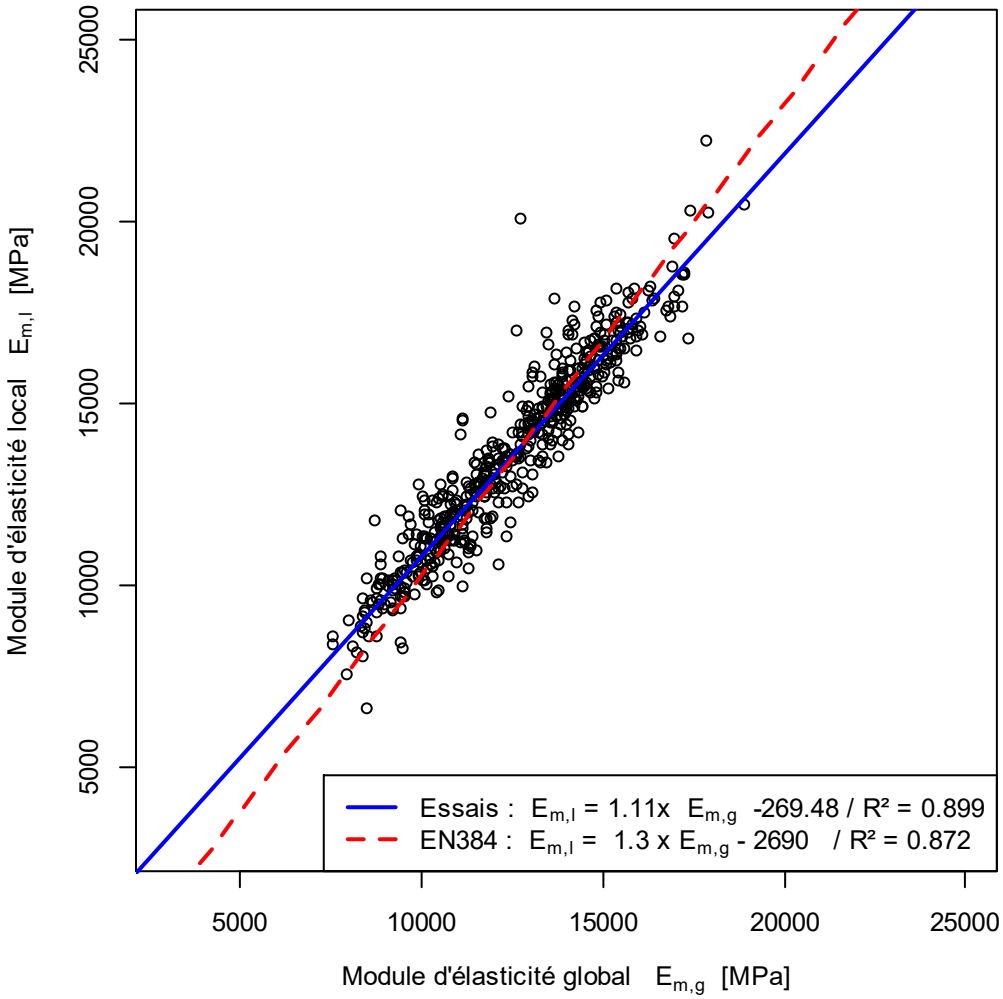


Figure 3-41 : Relation entre module d'élasticité local et global en flexion.

3.6.2. Influence de la qualité des billons sur les propriétés mécaniques

Pour pouvoir juger de l'influence de la qualité du billon sur les propriétés mécaniques, il a été décidé de comparer les résistances des éprouvettes issues des billons de classes A&B avec les éprouvettes issues des billons de classe C&D. La comparaison se fait au moyen d'un test statistique de WILCOXON-MANN-WHITNEY puisque la distribution des données ne suit pas une distribution normale. Une valeur de p-value inférieure à 0,05 permet d'arriver à la conclusion que les propriétés sont statistiquement différentes.

Comme le montre le Tableau 3-XXV, statistiquement, il n'y a pas lieu de différencier les échantillons pour la plupart des essais mécaniques. Sous condition de purger les plus gros défauts, ceux qui ne sont pas admis par le classement visuel (nœuds et pente de fil), le classement des billons n'a pas d'incidence sur les propriétés mécaniques. Il a en revanche une incidence sur la quantité de planches de qualité suffisante pouvant être extraites des billons. Cela s'explique par un rendement légèrement inférieur lié au débit en scierie (45% pour les classes AB et 40% pour les CD) et une quantité plus importante de planches déclassées à cause de leurs défauts (31% pour les classe CD et 26% pour les classes AB).

Pour les essais de flexion 65x200, la différence est simplement liée à une diminution de la qualité des bois lorsque que la section augmente. En effet, pour cette section, il est dénombré plus de bois avec un classement visuel D30 pour les éprouvettes issues des billons de classe AB que pour celles issues des billons de classe CD (28 contre 20). Comme les propriétés mécaniques augmentant en fonction de la qualité visuelle, il est normal qu'elles ne soient pas statistiquement semblables pour cette dimension d'essai.

Tableau 3-XXV : Comparaison des résistances et des modules en fonction du classement des billons.

		Résistance			Module d'élasticité ou de cisaillement		
Essais	Classe billon	Moyenne	Ecart-type	Test stat	Moyenne	Ecart-type	Test stat
Flexion 40x100	A&B	81,06	13,05	0,173	14964,9	1757,3	0,099
	C&D	76,15	17,52		13996,3	2523,8	
Flexion 50x150	A&B	91,95	17,88	0,107	15286,8	1288,3	0,340
	C&D	84,13	23,52		14851,4	1981,5	
Flexion 65x200	A&B	70,18	15,23	0,041	14454,5	1781,8	0,789
	C&D	62,72	18,90		14138,8	2610,7	
Flexion globale	A&B	80,88	17,76	0,011	14895,3	1651,9	0,146
	C&D	74,24	21,86		14327,2	2399,6	
Compression axiale	A&B	57,16	6,89	0,272	14274,0	2804,3	0,921
	C&D	55,30	7,78		14366,3	3523,3	
Compression transversale	A&B	10,43	1,58	0,219	926,4	224,8	0,139
	C&D	9,99	2,05		892,2	400,9	
Cisaillement	A&B	12,66	1,36	0,679	627,1	148,9	0,162
	C&D	12,33	1,33		573,6	108,9	
Traction	A&B	58,79	16,81	0,371	19656,4	6348,9	0,000
	C&D	55,66	24,55		15881,8	5215,8	

3.6.3. Influence de la section sur la résistance en flexion

Un phénomène important transparait à travers la campagne d'essais : plus la section augmente et plus les propriétés mécaniques diminuent. Les facteurs pouvant expliquer cette diminution sont :

- Pour le peuplier et le chêne, une humidité plus importante dans les pièces de fortes sections résultant d'un problème de séchage. Si l'influence de l'humidité sur le module d'élasticité est prise en compte par un facteur correctif proposé par l'EN 384, la norme n'impose pas de corriger les résistances en fonction de l'humidité des bois. Etant donné que l'EUROCODE 5 introduit une prise en compte de l'humidité sur les résistances au moyen du coefficient k_{mod}, il est étonnant que la norme EN 384 ne propose pas de correction de la résistance en flexion telle que cela a été retrouvée dans la bibliographie (cf PARTIE 1)
- Un phénomène lié à la hauteur de la section. En effet, plus la section est importante et plus la probabilité de voir apparaitre 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 fixée à 150mm pour la définition des propriétés mécaniques en traction et en flexion.

Pour juger de la pertinence du facteur correctif de l'EN384, un test statistique de WILCOXON est réalisé entre les résistances selon les différentes sections. Comme le montre le Tableau 3-XXVI, le facteur correctif k_h permet de corriger convenablement les résultats pour le peuplier. En effet, la résistance en flexion des éprouvettes avec une hauteur de 100mm est statistiquement égale aux résistances des éprouvettes de la hauteur de référence (150mm). Néanmoins, ce n'est pas le cas pour le hêtre et le chêne. Pour l'ensemble des essences, les résistances avec les plus grosses sections sont inférieures aux résistances avec la hauteur de référence.

Tableau 3-XXVI : Analyse statistique (Test de WILCOXON) des propriétés en fonction de la hauteur.

	Résistance en flexion f_m		
PEUPLIER		50x150	65x200
	40x100	0,52	6,82E-09
	50x150		5,95E-07
HETRE		50x150	65x200
	40x100	9,75E-05	1,50E-05
	50x150		1,44E-10
CHENE		50x150	65x200
	40x100	1,45E-07	4,24E-17
	50x150		7,60E-08

Une P-value inférieure à 0.05 signifie que les données sont statistiquement différentes.

Sur la Figure 3-42, le coefficient k_h actuel (trait plein) est largement différent des phénomènes observés expérimentalement. Pour représenter au mieux l'évolution de la résistance en fonction de l'augmentation de la section, il est indispensable de définir une hauteur standard de 200mm, transformant par conséquent l'équation de l'EN 384 pour revenir à la première définition du facteur k_h (cf Eq (1.3)) :

$$f_{m,h=200} = \frac{f_{m,h<200}}{k_h} \quad \text{Avec} \quad k_h = \left(\frac{200}{h}\right)^c \tag{3.70}$$

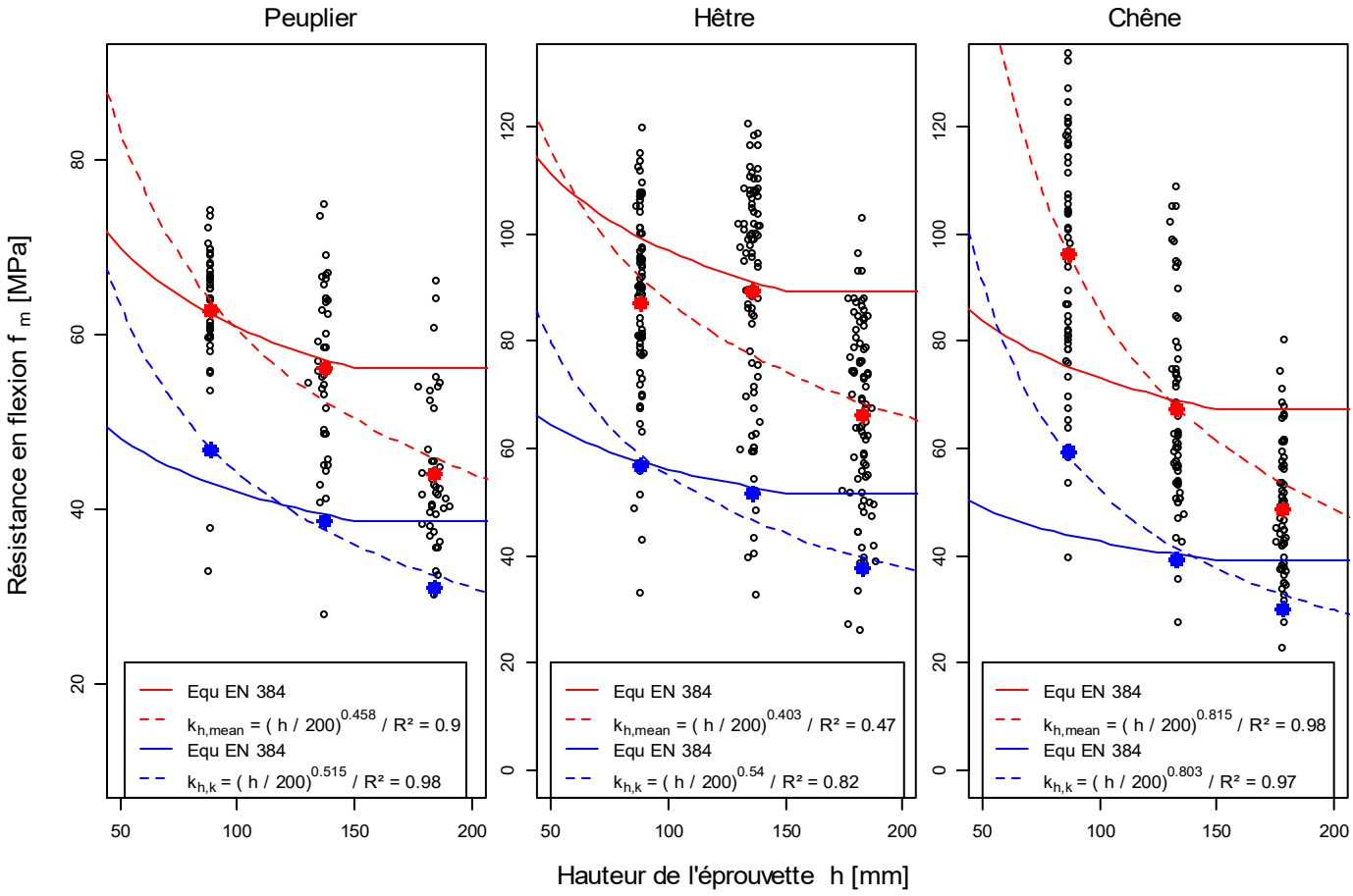


Figure 3-42 : Résistances en flexion (sans le correctif k_h) en fonction de la hauteur pour chaque essence.

Pour proposer un critère suffisamment conservatif pour une utilisation normative, il convient que l'augmentation de résistance liée à la réduction de section ne soit pas trop importante. Pour proposer un critère avec ce niveau de sécurité, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Utiliser les résistances en flexion non corrigées en fonction de la hauteur provenant du chêne et du hêtre.
- Prendre en compte une correction de la résistance en flexion en fonction de l'humidité. Conformément à la bibliographie, jusqu'à 18% d'humidité, les résistances mesurées sont corrigées de 2,66% par % d'humidité selon l'équation :

$$F_m = F_m(u)\left[1 + 0{,}0266\left(u - u_{ref}\right)\right] \; pour \; 12\% < u < 18\% \; avec \; u_{ref} = 12\% \tag{3.71}$$

- N'utiliser que les bois classés visuellement D30 car il s'agit des éléments qui possèdent le moins de variabilité entre les différentes sections.

Avec ces hypothèses, seule la relation qui décrit l'évolution de la résistance caractéristique en fonction de l'évolution de la section est étudiée. La *Figure 3-43* met en avant, par les points coloriés en rouge, uniquement les points retenus dans le cadre de l'étude (classe de résistance D30) une fois leur résistance corrigée en fonction de l'humidité. Le nouveau critère correctif de la résistance en fonction de l'évolution de la hauteur peut s'exprimer par :

$$f_{m,h=200} = \frac{f_{m,h<200}}{k_h} \quad Avec \quad k_h = min\begin{cases}\left(\frac{200}{h}\right)^{0.50} \\ 1{,}4\end{cases} \tag{3.72}$$

La limite de 1,4 est fixée comme étant la différence maximale des résistances caractéristiques observée expérimentalement. Il est à noter que les essais sur bois « sans défauts » ont montré une résistance caractéristique de 71,2 MPa pour une hauteur d'éprouvette de 30mm, soit 1,6 fois plus que la résistance observée pour la nouvelle hauteur de référence de 200mm.

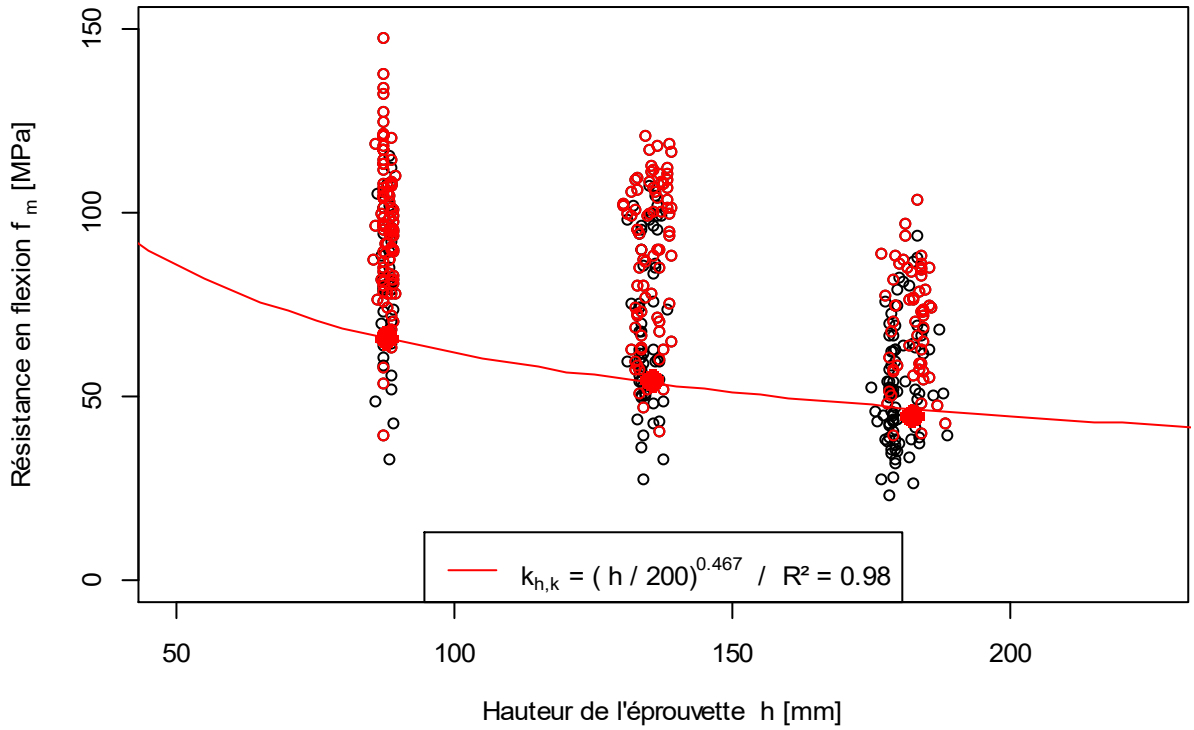


Figure 3-43 : Résistances en flexion du Hêtre et du Chêne en fonction de la hauteur.

3.6.4. Influence du bois juvénile sur les propriétés mécaniques

L'analyse de la variation de la résistance en fonction de la position de l'éprouvette dans la grume (à partir du marquage colorimétrique) permet de juger de l'influence du bois juvénile sur la diminution des propriétés mécaniques. Pour chaque sollicitation, l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la position de l'éprouvette dans la grume a été étudiée. La courbe type de la Figure 3-44 met en avant une tendance à l'augmentation de la résistance en fonction de l'éloignement par rapport à la moelle de l'arbre. Néanmoins, avec un coefficient de corrélation aussi faible, il est difficile de proposer une équation pour prendre cela en compte dans les calculs.

Au niveau global, la résistance et les modules d'élasticité augmentent avec l'éloignement du cœur de l'arbre et la présence de bois « mature ». A contrario, la masse volumique est plus élevée dans le bois juvénile que dans le bois mature.

Cette analyse est importante car une grande quantité des bois feuillus « économiquement » valorisables en construction est composée des bois d'éclaircie de qualités secondaires donc de petits diamètres. Dans ces arbres, le bois est majoritairement juvénile ou dans sa phase de transition vers le bois mature. Les bois sciés dans le cadre du projet ont des diamètres qui varient entre 26 et 94 cm pour le hêtre et le chêne (avec un diamètre moyen de 45cm). Il serait intéressant de réaliser une campagne d'essais similaire au projet EFEUR5 avec uniquement des bois de petits diamètres (diamètre inférieur à 30cm) et de comparer ces nouveaux résultats aux données collectées dans le cadre du projet EFEUR 5. Cela permettrait de juger du réel impact du bois juvénile sur les propriétés mécaniques.

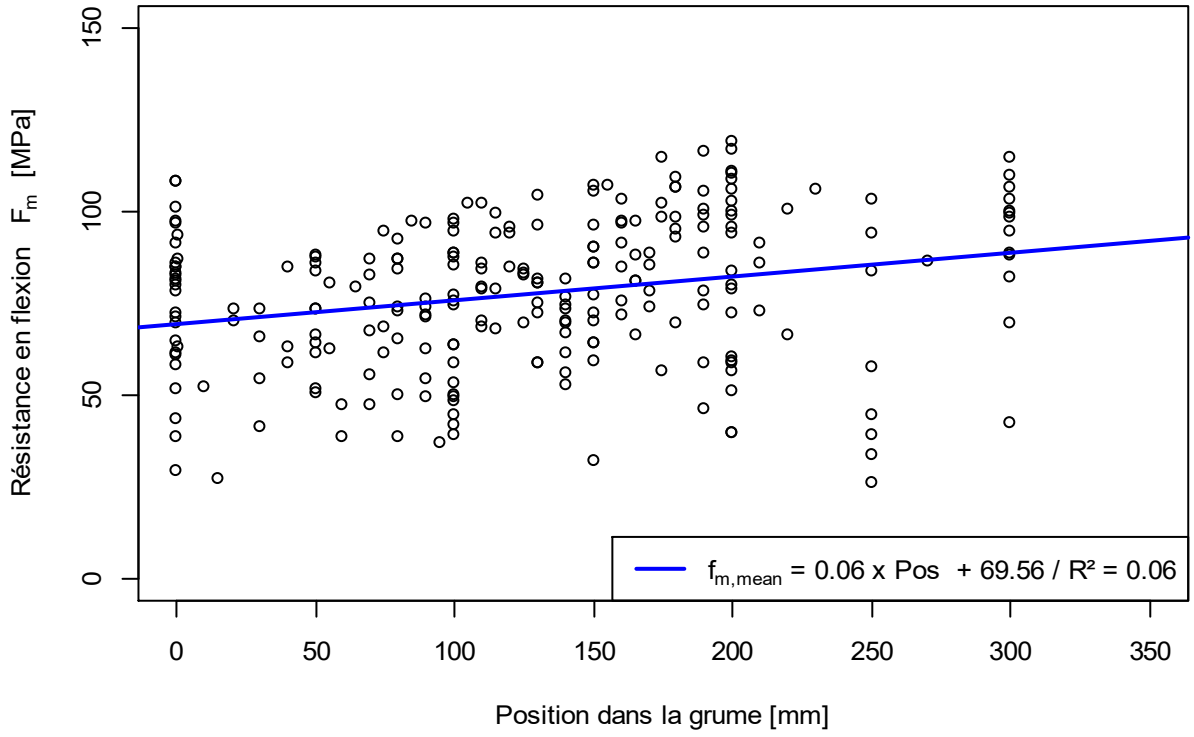


Figure 3-44 : Résistance en flexion en fonction de la distance au cœur de la grume pour le hêtre.

3.6.5. Influence de l'humidité sur la résistance en compression axiale

Le critère de correction de la résistance en fonction de l'humidité proposé par l'EN 384 semble faible en comparaison de l'influence réelle démontrée par AICHER & STAPF [73] en 2016. Si la norme propose une diminution de résistance de 3% pour une variation de 1% d'humidité, leur étude montre un impact plus important avec près de 4,5% par % d'humidité pour les bois résineux. Dans le Tableau 1-II de la partie 1, la résistance diminue de 6% par % d'humidité du bois.

Pour étudier l'influence de l'humidité sur la résistance en compression, il a été décidé de travailler sur des essais de compression sur du bois droit de fil et sans défaut. Pour limiter la variabilité naturelle du bois, des barreaux de chêne et de hêtre de section 30x30 ont été usinés puis découpés selon le principe de la Figure 3-45.

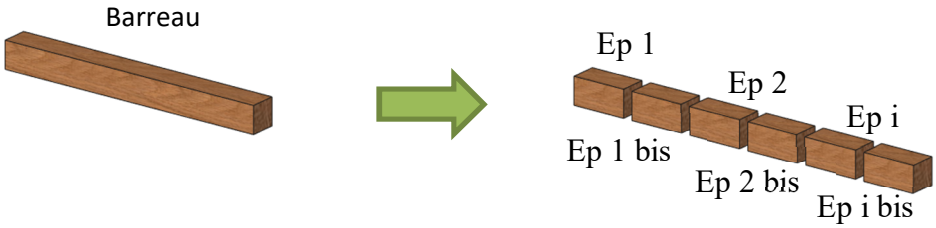


Figure 3-45 : Débit des éprouvettes de compression.

Les éprouvettes (i) ont été conditionnées pour une humidité d'équilibre de 12% et les éprouvettes (i_{bis}) ont quant à elle été conditionnées pour des humidités de 16, 18 et 7%. Si pour le hêtre la variabilité d'humidité après conditionnement ne dépasse pas 3%, pour le chêne elle varie entre 1,8 et 5%. Les humidités sont mesurées après essais pour chaque échantillon par dessiccation selon les principes de la norme NF EN 13183-1 [71].

En considérant que les propriétés mécaniques de l'éprouvette(i) doivent être les mêmes que les propriétés de l'éprouvette (i_{bis}) il est possible d'étudier l'impact de la variation d'humidité :

- Pour la masse volumique, la norme propose de corriger de 0,5% celle-ci pour 1% de variation de l'humidité. L'étude de la variation de la masse volumique montre un facteur correctif de 0,17% pour le hêtre et 0,36% pour le chêne avec de fortes variabilités (COV supérieurs à 100%). Au regard de ces résultats, une modification de ce critère correctif ne semble pas obligatoire.
- Compte tenu des difficultés à mesurer des déplacements sur des éprouvettes de si petites dimensions, l'impact de l'humidité sur la variation du module d'élasticité en compression n'a pu être étudié qu'avec les déplacements de la traverse de la machine d'essais universelle. La variation moyenne mesurée de cette manière est de 2,5% par % d'humidité pour le hêtre. Pour le chêne, la diminution est plus importante (14,7% par % d'humidité) mais ne peut pas être retenue du fait d'une modification du montage entre les essais (i) et les essais (i_{bis}) (les montages n'avaient pas la même raideur ce qui a impacté la mesure du déplacement)
- Pour la résistance en compression, l'évolution du facteur correctif X a été étudiée en fonction de la variation d'humidité. Le facteur correctif se calcule à partir de la relation :

$$f_{c,0,i} = f_{c,0,i_bis}\left[1 + X\left(u_{i_{bis}} - u_i\right)\right] \quad Soit \quad X = \frac{\frac{f_{c,0,i}}{f_{c,0,i_{bis}}} - 1}{\left(u_{i_{bis}} - u_i\right)} \tag{3.73}$$

La diminution de résistance en compression pour les 174 couples d'éprouvettes est donnée dans la Figure 3-46. Le facteur moyen pour le hêtre est de 6,92 % par % d'humidité avec un coefficient de variation de ce facteur de 20,3%. Pour le chêne ce facteur est de 7,08% par % d'humidité avec un coefficient de variation de 54%. A l'heure actuelle, la norme EN 384 propose une correction de 3% par % d'humidité, les essais mettent ainsi en avant une correction insuffisante de la résistance en compression en fonction de l'humidité.

Cette étude met donc en avant une variation de près de 30% de la résistance en compression entre une pièce de bois à 12% et une pièce de bois à 18%. Etant donné que le coefficient k_{mod} de l'EUROCODE 5 n'implique pas de variation de résistance pour les bois en classes d'emploi 1 et 2 (stabilité des bois entre 7 et 18%), il faudrait soit modifier l'estimation du paramètre k_{mod}, soit déterminer les résistances de manière conservative donc pour 18% d'humidité.

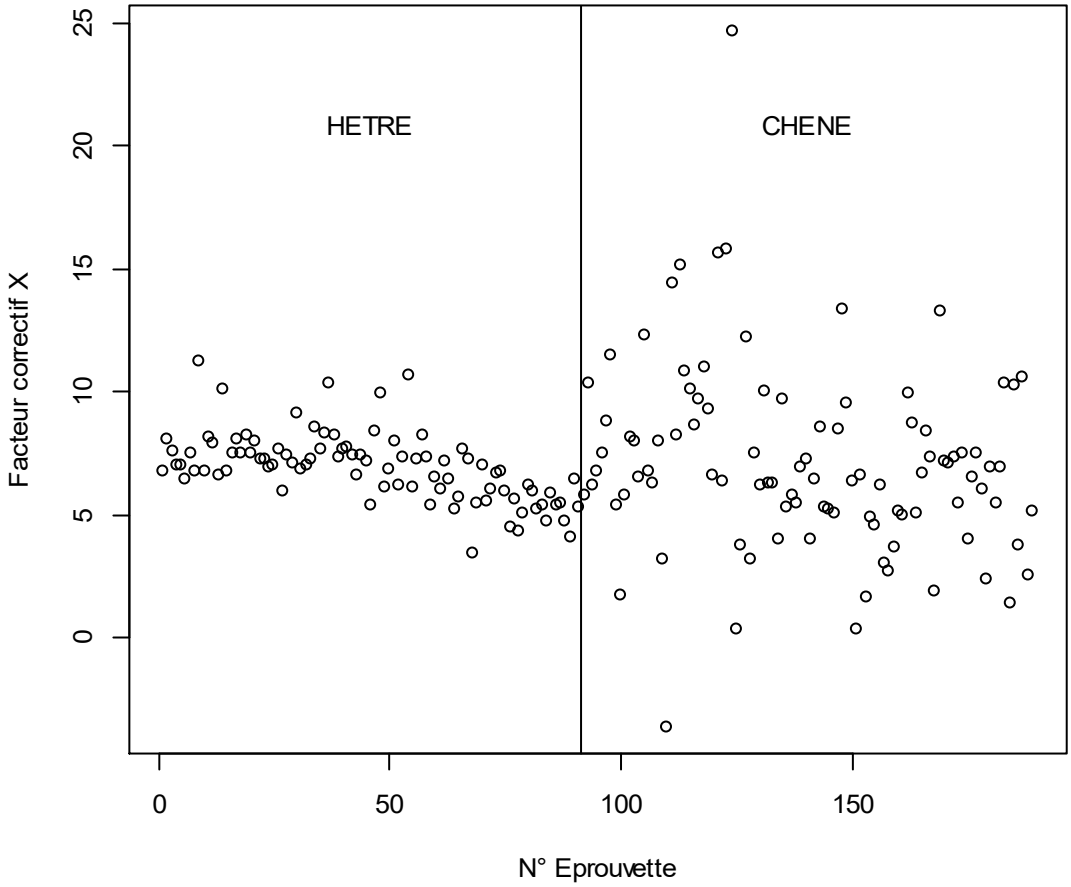


Figure 3-46 : Facteur correctif de la résistance en compression axiale pour chaque couple d'éprouvette.

En utilisant un facteur correctif de 7% par % d'humidité pour la résistance en compression axiale, les conclusions de l'étude de la corrélation entre flexion et compression évoluent. La loi basée sur le sous échantillonnage par le classement visuel s'exprime alors par l'équation (3.74) et permet une estimation de la résistance caractéristique inférieure à la résistance mesurée (en se basant sur la résistance en flexion caractéristique mesurée par les essais). La loi basée sur la relation moyenne entre les essais donne la relation (3.75) pour le chêne mais donne toujours de trop grand écart entre la prédiction et les mesures. L'équation (3.74) pourra être retenue pour une modification normative.

$$f_{c,0,k} = 5{,}6\ {f_{m,k}}^{0{,}5} \quad (3.74)$$

$$f_{c,0,k} = 26{,}4\ {f_{m,k}}^{0{,}07} \quad (3.75)$$

3.7. CONCLUSION CHAPITRE 3

Dans le cadre de la demande initiale de l'ANR sur la caractérisation mécanique des bois feuillus français, un certain nombre de relations entre les propriétés mécaniques ont pu être vérifiées expérimentalement. C'est notamment le cas des relations entre les modules d'élasticité local et global des essais de flexion ainsi que sur la relation entre le module d'élasticité longitudinal et le module transversal en compression. L'étude de la masse volumique de toutes les campagnes d'essais montre une masse volumique avec un coefficient de variation inférieur à 10%, ce qui valide la relation entre la valeur moyenne et la valeur caractéristique proposée dans l'EN 384. La relation entre la résistance en compression transversale et la masse volumique a également été confirmée dans le contexte actuel de l'EN 384 et de l'EN 338. En cas d'une réévaluation de la masse volumique dans l'EN 338, pour rester conservatif en ce qui concerne la résistance en compression transversale, l'EN 384 pourrait proposer l'équation (3.61) (pour rappel : $f_{c,90,k} = 0{,}009\ \rho_k$).

Les essais et leur analyse ont montré qu'un certain nombre de relations pouvaient être modifiées pour permettre un gain de résistance. Dans un premier temps, les essais de flexion ont mis en avant un manque d'adéquation entre les propriétés mécaniques principales. Comme proposé par GLOS & DENZLER [43], les masses volumiques et modules d'élasticité pourraient être augmentés pour mieux correspondre aux résistances caractéristiques en flexion. Les relations entre résistance en traction et compression axiale d'une part et résistance en flexion de l'autre pourraient être modifiées pour augmenter les performances de structures réalisées en bois feuillus. Il en est de même pour la résistance en cisaillement qui pourrait se voir augmenter conformément à la proposition de VAN DE KUILEN & All [64].

La campagne expérimentale a également mis en avant que pour limiter les risques de sinistres liés aux instabilités (flambement et déversement) la relation entre le module d'élasticité moyen et le module caractéristique doit être modifiée pour correspondre à un coefficient de variation de 20%.

Néanmoins, la relation entre le module d'élasticité et le module de cisaillement demande à être validée au travers d'une campagne d'essais complémentaire avec des essais de torsion des poutres.

L'étude de la variation de la résistance en flexion en fonction de la section de l'éprouvette met en avant que la hauteur de référence de 150mm n'est pas adéquate pour les feuillus. Faute de sections plus importantes à tester, une hauteur de référence de 200mm a été définie pour ces essences et conduit ainsi à une modification du facteur k_h. Le dimensionnement des éléments de structure en bois étant principalement conditionné par leur déformation plutôt que par leur résistance, la conservation de l'équation actuelle dans le l'EUROCODE ne constitue pas un frein au développement de l'utilisation du bois feuillu en structure.

L'étude de l'influence de l'humidité sur la résistance en compression a mis en avant que le facteur correctif proposé par l'EN 384 ne permettait pas de tenir compte de la diminution de résistance réelle observée expérimentalement. La résistance étant considérée dans l'EUROCODE 5 comme constante entre une humidité de 7 et 18% (coefficientk_{mod} constant), ce dernier ne prend ainsi pas en compte la diminution de résistance de plus de 30% observée expérimentalement. Pour être conservatif, le facteur k_{mod} devrait être modifié ou les résistances exprimées à une humidité de référence de 18%.

Dans tous les cas, les essais réalisés demandent à être complétés avec d'autres essences de feuillus et avec des bois d'autres provenances pour pouvoir proposer une réelle modification des normes EN 384 et EUROCODE.

CHAPITRE 4 : PROPRIETES POUR LE CALCUL DES JONCTIONS

4.1. BIBLIOGRAPHIE

4.1.1. Typologies d'assemblages

Les assemblages des constructions bois sont, dans la majorité des cas, les points clés du fonctionnement des structures. Si, traditionnellement, les assemblages faisaient transiter les efforts par contacts bois sur bois entre les éléments, de nos jours, les contacts s'effectuent via des organes d'assemblages intermédiaires qui sont généralement de type tiges. C'est pour cela que les types d'assemblages peuvent se diviser en deux grandes familles : les assemblages traditionnels d'une part et les assemblages mécaniques d'autre part.

1. Assemblages traditionnels

Le fonctionnement de ces assemblages repose sur le contact entre les pièces. Il ne peut donc transiter par ces assemblages que des efforts axiaux de compression (embrèvement) ou de traction (trait de Jupiter) et/ou des efforts de cisaillement (tenon mortaises). Ces 3 types d'assemblages sont représentés sur la Figure 4-1. L'intensité des efforts pouvant transiter entre les pièces est fonction de la géométrie des liaisons et des propriétés mécaniques du bois. Pour leur bon fonctionnement, ces assemblages doivent être usinés précisément pour garantir le parfait contact entre les pièces, un mauvais usinage de ces assemblages impacte significativement leur raideur et leur résistance. Ils sont également sensibles aux phénomènes de retrait/gonflement, qui peuvent engendrer des jeux et des fissurations au niveau des liaisons entre les différentes pièces de charpente.

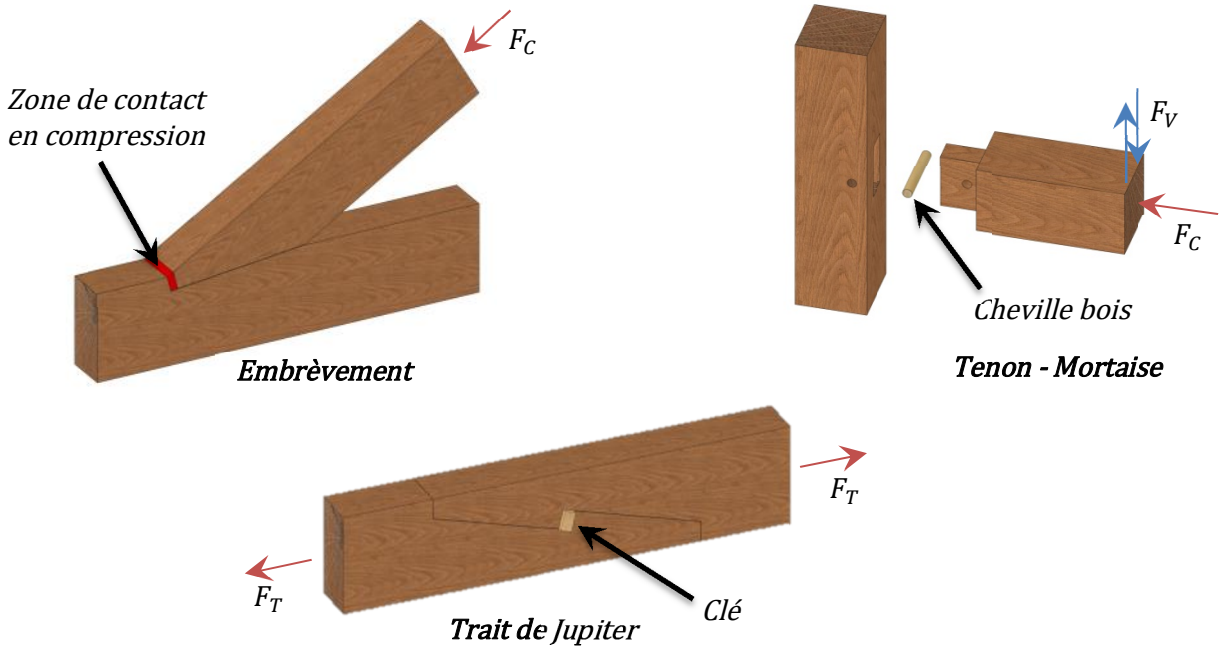


Figure 4-1 : Typologies d'assemblages traditionnels.

2. Assemblages mécaniques

Il existe une vaste quantité de connecteurs mécaniques différents. Les principaux types utilisés en construction bois sont exposés dans la Figure 4-2 suivante :

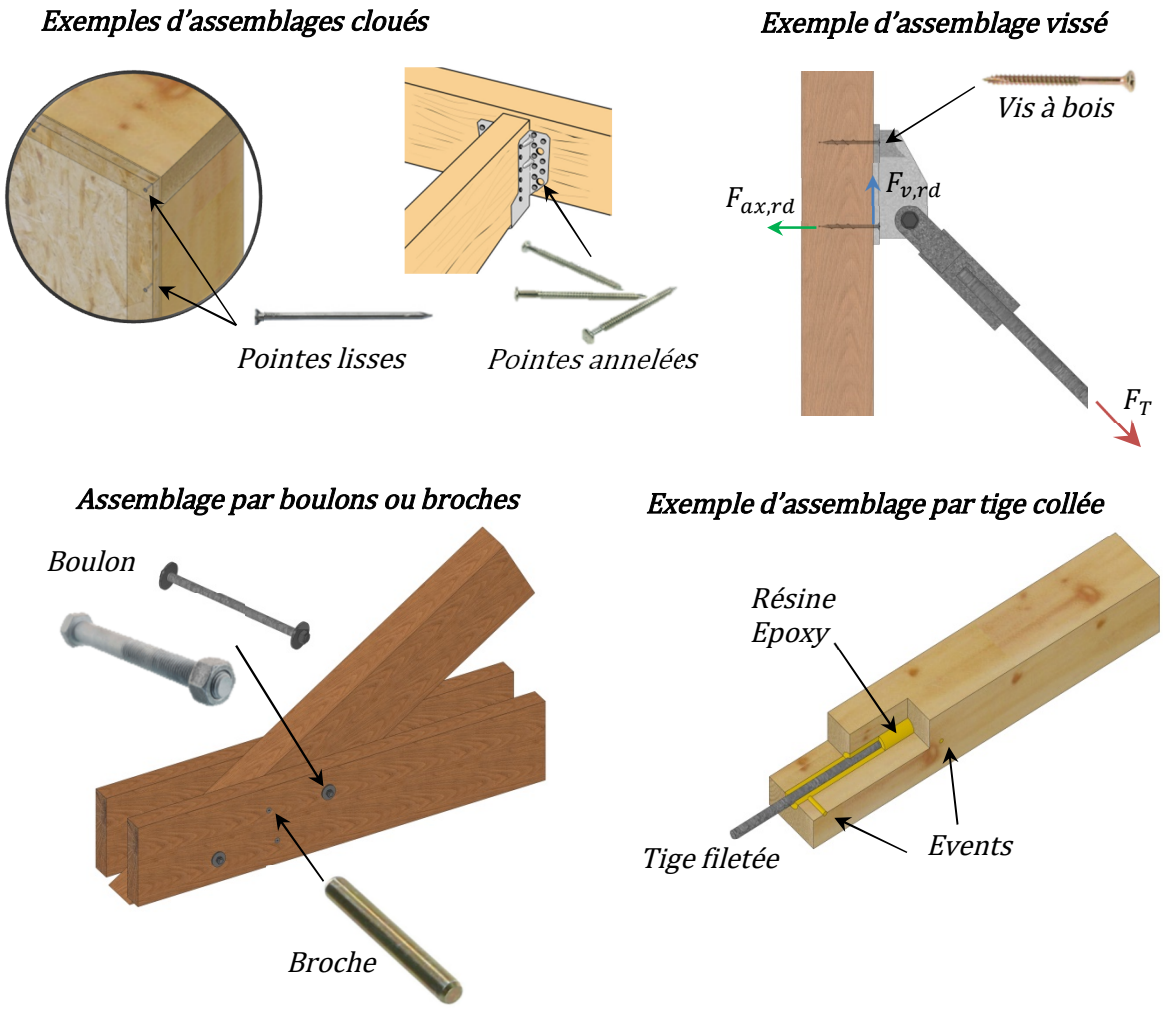


Figure 4-2 : Typologies d'assemblages mécaniques.

- **Les pointes**

Ces organes sont les plus anciens (utilisation depuis l'antiquité « clous ») et sont constitués généralement d'un corps cylindrique avec, à une extrémité, une pointe et à l'autre, une zone plate appelée « tête ». Les diamètres utilisés en construction varient entre 2,5mm et 8mm pour des longueurs comprises entre 40 et 200mm. Le rôle principal de ces tiges est de faire transiter du cisaillement entre les éléments même si, avec l'apparition des pointes annelées, il est possible de reprendre de faibles efforts d'arrachement. De nos jours, les pointes sont majoritairement utilisées pour assembler les petits éléments de charpentes (chevrons, liteaux…) et réaliser le couturage des panneaux de contreventement des murs et planchers des bâtiments à ossature bois.

- **Les vis**

La vis a été utilisée comme moyen de fixation pendant la renaissance. Principalement utilisées pour l'horlogerie et les constructions mécaniques, elles étaient fabriquées à la main. Il faudra attendre le XXème siècle pour avoir une fabrication industrielle et une augmentation de leur utilisation.

Pour les structures bois, elles sont devenues indispensables depuis les 20 dernières années avec des diamètres et des longueurs de plus en plus importants. Ces éléments sont constitués d'une tête permettant le vissage et d'une partie filetée facilitant l'insertion dans le bois. Si les vis peuvent travailler en cisaillement, leur plus grande résistance se trouve selon leur sens axial. Ces éléments de fixation sont donc beaucoup plus polyvalents que les pointes, ce qui explique la transition entre ces deux techniques de fixation.

- **Connecteurs métalliques emboutis**

Ces connecteurs sont principalement utilisés comme éléments d'assemblages des charpentes industrielles. Ces plaques métalliques sont embouties afin de former des dents avec une profondeur comprise entre 0,9 et 2,5mm. Ces connecteurs sont pressés sur les éléments bois pour réaliser la connexion entre les éléments. Cette technique est réservée à des bois résineux relativement tendres comme le sapin ou l'épicéa. A la vue des propriétés mécaniques mises en avant pour les feuillus dans la partie 2, des charpentes industrielles en peuplier pourraient être envisagées.

- Boulons

Ce sont des connecteurs cylindriques en acier constitués, d'un côté, d'une tête (carrée ou hexagonale) et de l'autre côté, d'un filetage permettant la mise en place d'un écrou. Les diamètres utilisés en construction varient entre 10 et 30mm avec une utilisation principale des organes de 12, 16 et 20 mm. Les rondelles et les têtes des boulons permettent de reprendre des efforts axiaux, cependant ils sont principalement utilisés pour transmettre des efforts de cisaillement entre pièces juxtaposées. Pour faciliter certain montage, il est possible de percer les trous avec un diamètre supérieur à celui de l'organe, mais généralement, sur chantier, ce jeu est bien au-delà du millimètre autorisé dans la partie 10 de l'EUROCODE 5. Ces jeux ont un impact non négligeable sur la raideur des assemblages et donc la distribution des efforts.

- **Broches**

Tout comme les boulons, les broches sont des tiges en acier de diamètres variant entre 7 et 30mm. Néanmoins, ces organes sont dépourvus de tête et d'écrous et nécessitent donc la mise en place d'autres organes permettant de maintenir les éléments assemblés en contact. Ces organes ne font transiter que des efforts de cisaillement dans les plans d'assemblage et sont de nos jours majoritairement utilisés du fait de leur « discrétion ». Les perçages des broches doivent être inférieurs ou égaux aux diamètres des broches utilisées (§10.4.3 EUROCODE 5) ; ces organes n'ont donc a priori pas de jeux fonctionnels.

- **Tiges collées**

Ces assemblages sont réalisés au moyen d'un goujon métallique collé dans le bois avec une résine époxy bi-composant. Les tiges métalliques ont un diamètre compris entre 12 et 24mm pour des longueurs variant entre 200mm et 1m. Les tiges sont centrées dans des perçages ayant des diamètres supérieurs de 6mm à ceux des tiges puis la résine est injectée et contrôlée au moyen des trous d'évents. Ces assemblages permettent donc de reprendre d'importants efforts de cisaillement et de traction. L'absence de jeu et leur raideur importante en font une technologie performante pour la réalisation d'assemblages devant reprendre de fortes charges ou pour assurer la continuité de moment de flexion (dans le cas de joints de continuité). Pour l'instant, la méthode de calcul de ces assemblages n'étant pas développée dans l'EUROCODE 5, elle se base sur la réglementation Allemande et les avis techniques des entreprises proposant cette technologie (SIMONIN, Atex (ARBONIS)…)

Si la justification des assemblages traditionnels se base principalement sur les résistances en compression et en cisaillement données dans l'EN 338, les assemblages de type tiges font appel à des équations particulières de l'EUROCODE 5. Etant donné que les pointes nécessitent un pré-perçage pour être mises en place dans les bois feuillus, il a été décidé de limiter l'étude aux assemblages réalisés avec des boulons et des broches. L'ingénieur devant garantir la résistance mécanique et la raideur des assemblages par le calcul, il a été choisi de se focaliser sur ces deux points particuliers.

4.1.2. Raideur des assemblages

La raideur des assemblages correspond à l'effort qu'il faut appliquer pour engendrer un glissement de 1 mm entre les 2 pièces connectées au sein d'un l'assemblage. La raideur des assemblages a une grande importance sur le comportement des structures en bois. En effet, elle impacte significativement les résultats du calcul de structure :

- Une poutre treillis modélisée avec ses raideurs d'assemblages montrera une déformée 3 fois plus importante qu'une poutre treillis avec des raideurs infinies. La non prise en compte des raideurs minimise donc les déformations de la structure et peut donc engendrer des pathologies liés à l'Etat Limite de Service (ELS).
- Dans le cadre des structures hyperstatiques, l'absence de modélisation des raideurs d'assemblages peut conduire à une minimisation des efforts qui transitent dans certaines barres de la structure.

La raideur des assemblages bois se montre généralement non-linéaire, ce qui nécessite de définir différentes valeurs de raideurs et de jeux d'assemblages lorsque des calculs linéaires doivent être conduits (voir Figure 4-3). Pour caractériser le comportement des assemblages, les essais sont conduits en réalisant une première montée en charge jusqu'à 40% de l'effort maximal F_{max} estimé. Cette étape est suivie d'un déchargement jusqu'à 10% de F_{max}. Finalement, une augmentation de la charge conduit celui-ci à la rupture. La raideur K_{ser} correspond à la pente mesurée lors de la première montée en charge entre 10 et 40% de l'effort maximal F_{max} tracé en fonction du glissement υ. Cette raideur s'utilise principalement pour le calcul de déformation à l'Etat Limite de Service ainsi que pour étudier la redistribution des efforts à l'ELU. Entre la zone de décharge de 40 et 10%, se trouve la raideur K_{dech} qui peut avoir une utilité dans le calcul vibratoire des éléments.

Finalement, il est également possible d'introduire une raideur ELU, correspondant à la raideur sécante entre le point 0 et le point de fonctionnement correspondant à l'effort ultime. Cette raideur notée K_u sera utile à l'ingénieur pour gérer les problèmes d'instabilité et lui permettre d'approximer une modélisation non linéaire via un calcul élastique pseudo-équivalent.

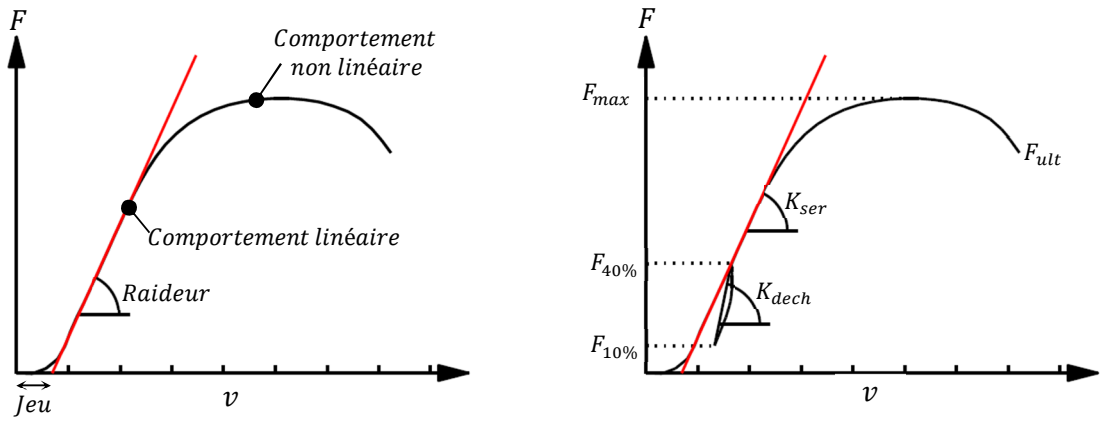


Figure 4-3 : Paramètres pour le calcul des raideurs.

Pour estimer la raideur l'EUROCODE 5 a introduit pour les organes de type tiges la formule suivante (Tableau 7.1 de l'EN 1995-1-1 [30]) :

$$K_{ser} = k_{type}\ {\rho_m}^{1,5}\ \frac{d}{23} \tag{4.1}$$

Avec K_{ser} la raideur en N/mm, ρ_m la masse volumique moyenne en kg/m^3, d le diamètre de l'organe d'assemblage en mm et un coefficient k_{type} qui est introduit dans l'équation pour tenir compte de l'augmentation de raideur dans certain cas. Pour les assemblages bois/métal et bois/béton k_{type} sera pris égale à 2 alors que pour les assemblages bois/bois une valeur de k_{type} de 1 devra être retenue.

Comme évoqué par JORISSEN & JOCKWER [74], les origines de cette formule sont assez vagues. Selon les auteurs, une formule approchante a été définie par EHLBECK & Al dans différentes publications à partir d'essais principalement réalisés sur des pointes :

$$K_{ser} = \frac{0,4\ R}{v_{inst}} = \frac{0,55}{100}\ \sqrt{100 - d}\ \rho_k^{1.5}\ d \ \approx \frac{\rho_k^{1.5}\ d}{20} = \frac{{\rho_m}^{1.5}\ d}{1,2^{1.5}\ 20} = \frac{{\rho_m}^{1.5}\ d}{26} \tag{4.2}$$

D'après l'EN 384 : $\rho_k = \frac{\rho_m}{1,2}$ (4.3)

Dans une publication de EHLBECK & WERNER [75] basée sur 108 essais de boulons entre 8 et 30mm de diamètre dans des bois feuillus et résineux, une définition générale de la raideur telle que $K_{ser} = (1,2\ d - 1,6)\ \rho_m$ est présentée. Les auteurs ont mis en avant le fait que la raideur des feuillus était 25% supérieure à la raideur des résineux, proposant donc la formule suivante pour la raideur : $K_{ser,inst} = d.\rho_m$. En exprimant cette équation sous la même forme que celle donnée pour la définition de la raideur des pointes, il vient :

$$K_{ser} = d.\rho_m \approx \frac{\rho_m^{1.5}\ d}{18,7} \tag{4.4}$$

Dans le code de calcul, la raideur K_u peut être directement déduite de la raideur K_{ser} à partir de la relation :

$$K_u = \frac{2}{3}\ K_{ser} \tag{4.5}$$

Cette formule est directement issue d'une étude de EHLBECK [76] sur des pointes dans laquelle il fixe le glissement à 1,0 mm comme le seuil pour définir la raideur ELU et le glissement à 0,5 mm comme étant le seuil pour définir la raideur à ELS. La Figure 4-4 donne les raideurs ELU et ELS sécantes par rapport à la raideur ultime obtenue pour un enfoncement de 2,5mm.

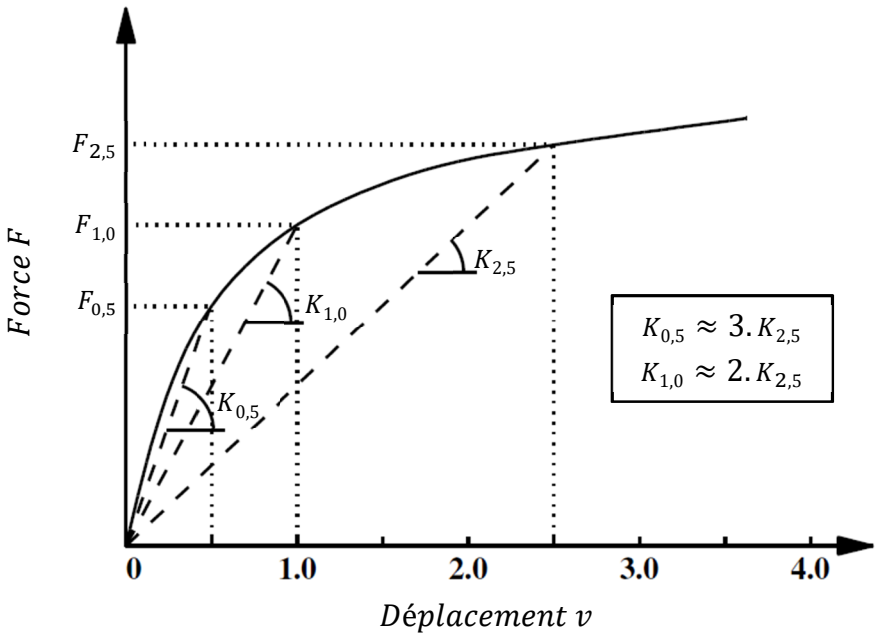


Figure 4-4 : Paramètres pour le calcul de la relation K_{ser}/K_u – fig 4 de EHLBECK [76].

JOCKWER & JORISSEN [74] ont montré que la relation (4.5) ne fonctionne pas pour les assemblages composés de broches et/ou boulons car cela reviendrait à considérer un effort ELS compris entre 80 et 100% de l'effort ELU, alors qu'en général l'effort ELS correspond à 70% de l'effort ELU. Leurs travaux mettent également en avant que les assemblages avec plusieurs boulons alignés ont tendance à fendre avant le développement de leur pleine capacité de résistance, et que, par conséquent, la nouvelle relation entre les raideurs K_u et K_{ser} ne pourrait être écrite que pour les assemblages avec une forte ductilité.

Au vu des améliorations constantes des puissances de calcul, il sera possible demain de calculer l'ensemble des structures avec des comportements non linéaire. La relation entre les raideurs K_u et K_{ser} est donc vouée, a termes, à disparaitre du code de calcul.

JORISSEN [77] a observé dans ses essais une importante différence entre la raideur donnée par l'EUROCODE 5 et celle mesurée par essais. Il explique cela par le fait que dans des assemblages comportant plusieurs organes, certains d'entre eux, du fait des jeux initiaux de fabrication, ne contribuent pas à la raideur globale de l'assemblage. Il propose l'équation suivante pour tenir compte de cet effet :

$$K_{ser,assemblage} = k_{bolt}\, K_{ser,organe} = 0{,}3\, K_{ser,organe} \qquad (4.6)$$

JORISSEN & JOCKWER [74] ont poursuivi leur étude sur des assemblages bois/bois résineux de type tige. La variation de la raideur en fonction du diamètre d, de l'espacement et du nombre d'organes par file n, du nombre de files m et de l'élancement de l'organe dans le bois extérieur t_s conduit à une formule générale de la raideur :

$$K_{ser} = 0{,}0035\,.\,n^{1,26}\,.\,m^{0,61}\,.\,d^{2,17}\,.\left(\frac{t_s}{d}\right)^{0,25} \qquad (4.7)$$

L'absence d'un terme fonction de la densité dans la formulation est liée à une variabilité faible de la densité dans la base de données utilisée empêchant ainsi une analyse correcte de l'incidence de ce facteur sur la raideur. Les auteurs suggèrent de réaliser plus d'essais avec d'autres essences de feuillus et de résineux pour évaluer cette influence.

La forte variabilité des raideurs (COV de 40%) a incité les auteurs à donner une équation de la variabilité de la raideur K_{ser} pour permettre à l'ingénieur de calculer les raideurs aux fractiles de 95% et de 5% et ainsi de pouvoir juger de l'incidence de la variation de raideur sur les déformations de sa structure et la redistribution des efforts.

En plus des origines floues de l'équation de la raideur de l'EC5, il existe peu d'études actuellement sur les raideurs des assemblages réalisés avec des bois feuillus. Les essais réalisés dans le cadre du projet EFEUR 5 devront permettent de valider l'équation actuelle du code de calcul et, si ce n'est pas le cas, de proposer une estimation de ce paramètre pour les assemblages utilisant du bois feuillu.

4.1.3. Résistance des assemblages de type tige

Cette partie s'intéresse à la justification des assemblages en partant des phénomènes globaux qui se produisent dans ces derniers jusqu'à la définition des lois de comportement propres aux matériaux qui permettent d'estimer leur résistance.

4.1.3.1. Mode de rupture

Pour calculer la résistance d'un organe de type tige, l'EUROCODE 5 se base sur la théorie de l'analyse limite développée par JOHANSEN (1949) ainsi que sur les améliorations produites ensuite par MEYER (1957). Ces formules dépendent du type d'assemblage, bois/bois ou bois/métal, du nombre de plans de cisaillement, de critères géométriques et des propriétés mécaniques du bois et de l'acier utilisés. L'estimation de la capacité résistante des assemblages par ces équations a été largement vérifiée par différentes campagnes d'essais : WHALE & Al (1987) [78], EHLBECK & WERNER (1988) [75]…

Les assemblages en double cisaillement étant majoritairement répandus dans les constructions, il ne sera retenu que ces derniers dans le cadre du projet EFEUR 5. En fonction des configurations, les équations de l'EC5 sont les suivantes :

Pour des assemblages en double cisaillement bois/métal avec tôle en âme :

$$F_{V,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k}\, t_1 d & (f) \\ f_{h,1,k}\, t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4\, M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}\, t_1^2\, d}} - 1\right] + effet\ de\ corde & (g) \\ 1{,}15 \times 2\sqrt{2\, M_{y,Rk}\, f_{h,1,k}\, d} + effet\ de\ corde & (h) \end{cases} \quad (4.8)$$

Pour des assemblages en double cisaillement bois/bois :

$$F_{V,Rk} = min \begin{cases} f_{h,1,k}\, t_1 d & (g) \\ 0{,}5\, f_{h,2,k}\, t_2 d & (h) \\ 1{,}05\, \frac{f_{h,1,k}\, t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\,\beta\,(2+\beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}\, t_1^2\, d}} - \beta\right] + effet\ de\ corde & (j) \\ 1{,}15\, \sqrt{\frac{2\,\beta}{1+\beta}}\, \sqrt{2\, M_{y,Rk}\, f_{h,1,k}\, d} + effet\ de\ corde & (k) \end{cases} \quad (4.9)$$

Avec les paramètres suivants :

- t_1, t_2 les épaisseurs des pièces de bois en mm.
- $f_{h,1,k}, f_{h,2,k}$ les portances locales respectives des parties 1 et 2 de l'assemblage en MPa. La partie 2, étant la partie centrale de l'assemblage, et les parties 1, les pièces moisantes.
- d, diamètre de l'organe d'assemblage en mm.
- $M_{y,Rk}$ moment d'écoulement plastique de l'organe en N.mm.

Les modes g et h du bois/bois et le mode f du bois métal correspondent à des modes en portance locale pure où le bois s'écrase intégralement sous l'organe. Dans la suite de ce document, ces modes de déformation seront appelés mode de rupture 1.

Le mode j du bois/bois et le mode g du bois métal correspondent à l'apparition d'une rotule plastique dans l'assemblage. Pour la suite ces modes seront dénommés mode de rupture 2.

Les deux modes restants (h du bois métal et k du bois/bois) correspondent à l'apparition de deux rotules plastiques dans les organes d'assemblages. Ils seront nommés mode de rupture 3.

Dans les équations des modes de rupture 2 et 3, se trouve les termes 1.15 et 1.05 qui correspondent à l'intégration dans les formules de JOHANSEN du coefficient de sécurité $\gamma_m$de l'acier. Pour l'estimation de la résistance moyenne de l'assemblage, il convient de ne pas en tenir compte.

Du fait de la déformation en cisaillement des organes dans les modes 2 et 3, une contrainte de compression axiale apparait au niveau de l'organe (Figure 4-5). Cette contrainte se combine au coefficient de frottement entre les éléments pour augmenter la capacité résistante en cisaillement. Ce phénomène est appelé « effet de corde ». Au niveau du code de calcul, ce phénomène physique se traduit par la relation suivante :

$$effet\ de\ corde = \min \begin{cases} \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ X \times F_{V,Rk,johansen} \end{cases} \quad (4.10)$$

Le coefficient X correspond à une limitation de l'effet de corde par rapport aux modes de rupture de JOHANSEN. Cette valeur est égale à 25% pour les boulons et à 0% pour les broches. Il est ainsi considéré que les broches, qui ne reprennent pas d'efforts axiaux, ne permettent pas de développer de l'effet de corde.

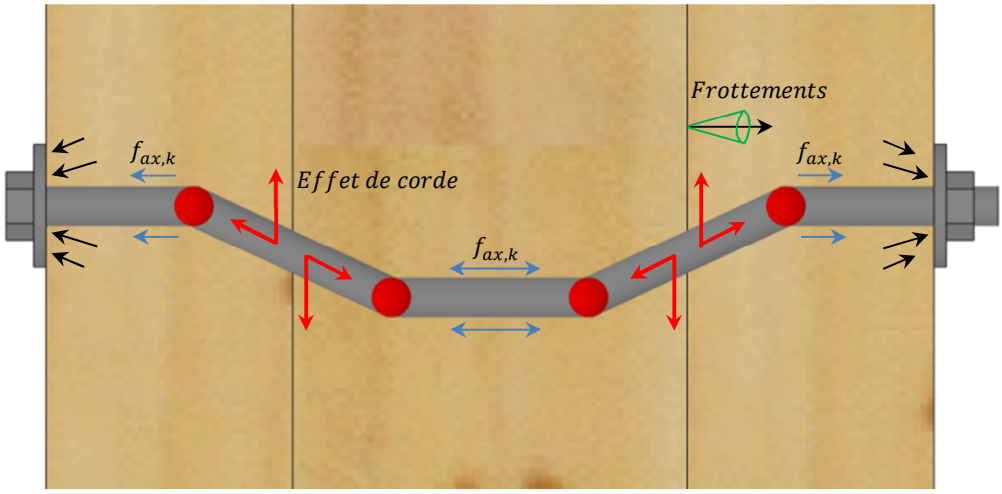


Figure 4-5 : Schéma de principe de l'effet de corde.

4.1.3.2. Comportement global des assemblages

La résistance globale d'un assemblage correspond à la somme des résistances de chacun des organes qui le constituent. Néanmoins, quand plusieurs organes sont alignés sur la même file par rapport au sens du fil du bois, il en résulte une diminution de la capacité portante telle que :

$$F_{v,ef,Rk} = n_{ef}\ F_{v,Rk} \tag{4.11}$$

Cet effet est largement connu sur les structures en bois et est couramment appelé « fendage ». Une des premières définitions de ce paramètre dans le code de calcul a été faite par EHLBECK & WERNER en 1988 [75] en proposant d'introduire une diminution de la capacité de résistance du bois par le facteur k_a. Ce facteur décroit en fonction du rapprochement entre les organes, il dépend également de la proximité des organes avec le bout du bois. Ce paramètre permet de rendre compte de l'interaction des concentrations de contraintes générées à proximité de l'organe d'assemblage.

JORISSEN [79] a travaillé sur des assemblages réalisés en épicéa et a fait varier le nombre d'organes en ligne ainsi que les espacements entre ces organes. Les résultats expérimentaux sont comparés aux prédictions de résistances calculées à partir de la théorie de JOHANSEN en se basant soit sur la masse volumique réelle des échantillons, soit sur la masse volumique moyenne d'un C24. Il en résulte deux équations, une complète et une simplifiée, ayant pour paramètres : le nombre d'organes par files n, le diamètre des organes d en mm, l'espacement entre les organes a_1 en mm et l'épaisseur des moises t_m en mm.

$$Eq\ Complète :\ n_{ef} = 0{,}37\ n^{0.90}\ \left(\frac{a_1}{d}\right)^{0{,}30}\left(\frac{t_m}{d}\right)^{0{,}20} \tag{4.12}$$

$$Eq\ Simplifiée :\ n_{ef} = 0{,}90\,.\,0{,}56\ n^{0.90}\ \left(\frac{a_1}{d}\right)^{0{,}25} \tag{4.13}$$

C'est à partir de cette équation simplifiée que le critère n_{ef} de l'EC5 a été écrit :

$$n_{ef} = 0{,}90\,.\,0{,}56\ n^{0.90}\left(\frac{a_1}{d}\right)^{0{,}25} = \left(\frac{1}{15{,}5}\right)^{0{,}25} n^{0{,}90}\left(\frac{a_1}{d}\right)^{0{,}25} = n^{0{,}90}\sqrt[4]{\frac{a_1}{15{,}5\,d}} \overset{EC5}{\Longrightarrow} n_{ef} = n^{0{,}90}\sqrt[4]{\frac{a_1}{13\,d}} \tag{4.14}$$

A la suite de la thèse de JORISSEN, MISCHLER & GEHRI [80] ont remis en cause ces travaux à cause d'une potentielle sous-évaluation des modes de rupture unitaires de l'ordre de 30%. Ceci aurait tendance à minimiser l'impact de l'élancement de l'organe dans le bois sur le critère n_{ef}. Comme le montre la Figure 4-6, les essais mettent en avant le fait que le facteur de réduction n_{ef} ne s'applique pas pour les organes avec un fort élancement.

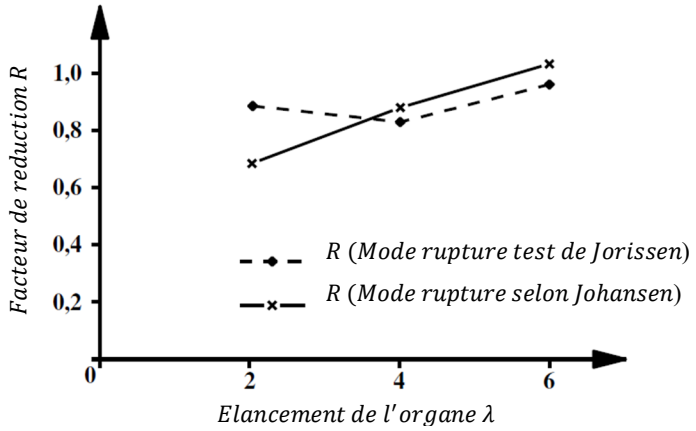


Figure 4-6 : Influence de l'élancement sur le critère n_{ef} - Fig 10 de MISCHLER & GEHRI [80].

BLASS & SCHMID [81], pour ne pas avoir à reproduire une campagne expérimentale aussi importante que JORISSEN, ont développé un modèle basé sur la mécanique de la rupture pour proposer une nouvelle approche du critère n_{ef} pour les résineux. Le modèle développé a permis de confirmer que les assemblages ayant un fort élancement (Mode 3 des équations de JOHANSEN) n'étaient pas sujet aux ruptures par fendage.

KOBEL & FRANGI [82] ont réalisés des essais d'assemblages sur des éléments en LVL de hêtre. Ils ont mis en avant le fait que dans les panneaux sans plis transverses, une rupture prématurée arrivait en fendage alors que la mise en place de 14% de plis transversaux permettait de se prémunir de cette rupture fragile et d'arriver systématiquement à la plastification prédite par l'analyse limite de JOHANSEN.

FRANKE & FRANKE [83] ont réalisé des essais d'assemblages bois/métal avec deux files de 3 broches de diamètre 8mm. Ils ont fait varier l'espacement entre les organes parallèlement et perpendiculairement au fil du bois ainsi que l'épaisseur des bois. Les essais ont mis en évidence une différence de 46% entre les résultats et la prédiction de l'EUROCODE 5 en tenant compte du critère n_{ef}. Les auteurs expliquent que même en augmentant la prédiction de la portance à 0°, il persiste un écart entre les essais et l'effet du n_{ef} prédit par le code de calcul pour les modes de ruptures 2 et 3. Une nouvelle définition du critère doit donc être définie pour ces modes de rupture.

Dans la bibliographie, il n'existe pas d'études sur le phénomène de fendage dans les assemblages réalisés à partir de bois feuillus massifs avec des organes couramment utilisés en construction bois (diamètre de 12 et 16mm). La pertinence du critère n_{ef} développé sur les résineux est-elle aussi la même pour les assemblages en bois feuillus ? De plus, dans leurs conclusions, BLASS & SCHMID [81] ont motivé l'étude de l'influence de l'élancement des organes dans le bois sur le critère n_{ef} afin d'envisager, comme ils l'ont obtenu pour les résineux, de ne pas prendre en compte ce phénomène avec de fortes épaisseurs de bois. Ce point devra donc être investigué.

4.1.3.3. Moment d'écoulement plastique

Le moment d'écoulement plastique de l'organe d'assemblage se trouve parmi les propriétés des matériaux utilisées pour le calcul des modes de ruptures de JOHANSEN. Il correspond au moment qui induit des contraintes supérieures à la limite d'élasticité f_y dans l'organe et donc l'apparition d'une rotule plastique dans la tige.

L'analyse RDM donne l'équation suivante avec f_y la limite d'élasticité de l'acier et d le diamètre de l'organe d'assemblage :

$$M_{y,d} = \int_0^{\pi} \int_0^{R} f_y \times r \sin(\theta)\ dr\ d\theta \quad soit \quad M_{y,d} = \frac{4}{3} f_y\ R^3 = \frac{f_y}{6}\ d^3 \tag{4.15}$$

Néanmoins l'EUROCODE 5 propose une formule différente, basée sur la limite de résistance en traction de l'acier $f_{u,k}$:

$$M_{y,rk} = 0{,}3\ f_{u,k} d^{2.6} \tag{4.16}$$

Cette équation trouve ses origines dans deux articles de JORISSEN & BLASS [84] et BLASS & all [85] dans lesquels ils démontrent que dans le cadre du fonctionnement des assemblages bois, la section de la tige n'atteint pas une plastification totale au moment de la rupture de l'assemblage. Ils proposent ainsi de réduire le moment d'écoulement plastique pour être cohérent avec un glissement entre les plans de l'assemblage de 15mm.

BLASS & COLLING [86] ont réalisé 159 essais de traction et 122 essais de flexion sur des broches de différents fournisseurs avec différentes qualités d'acier et des diamètres variant entre 7 et 20mm. Ils ont ainsi proposé une nouvelle équation :

$$M_{y,rk} = \frac{f_{y,ef}.d^3}{6} \quad avec \quad f_{yef} = \begin{cases} \frac{0{,}9\ (f_y + f_u)}{2} & Pour\ f_u < 450\ MPa \\ 0{,}9\ f_u & Pour\ f_u > 450\ MPa \end{cases} \tag{4.17}$$

Des essais déjà réalisés au LERMAB sur des organes d'assemblage ont mis en avant les deux phénomènes suivants :

La variabilité des propriétés intrinsèques au métal dans un même lot est faible (moins de 5%).

Il est courant d'avoir des organes d'assemblage avec une limite plastique plus haute que celle commandée. Par exemple des organes en classe 6.8 avec un f_u garantie à 600 MPa a souvent un f_u proche de 800 MPa.

Dans le cadre d'un dimensionnement de structure, cela ne pose pas de réel problème, permettant même d'avoir une certaine sécurité supplémentaire sur la résistance des boulons et broches en cisaillement.

Pour le projet EFEUR 5, des essais de traction sur les organes utilisés pour les assemblages seront obligatoires pour maîtriser le paramètre $M_{y,rk}$ et donc l'estimation des résistances desdits assemblages.

4.1.3.4. Portance locale

4.1.3.4.1. Mesure de la portance locale

La portance locale est définie comme étant la contrainte moyenne de résistance à l'enfoncement d'un organe d'assemblage dans une pièce de bois ou un panneau à base de bois. La Figure 4-7 représente la définition de la portance locale $f_{h,5mm}$, à savoir la force maximale obtenue avant 5mm d'enfoncement de l'organe dans le bois, divisée par la surface projetée de la tige dans ce dernier. En d'autres termes, la portance locale représente une pseudo pression uniforme sous la surface projetée de la broche dans le bois.

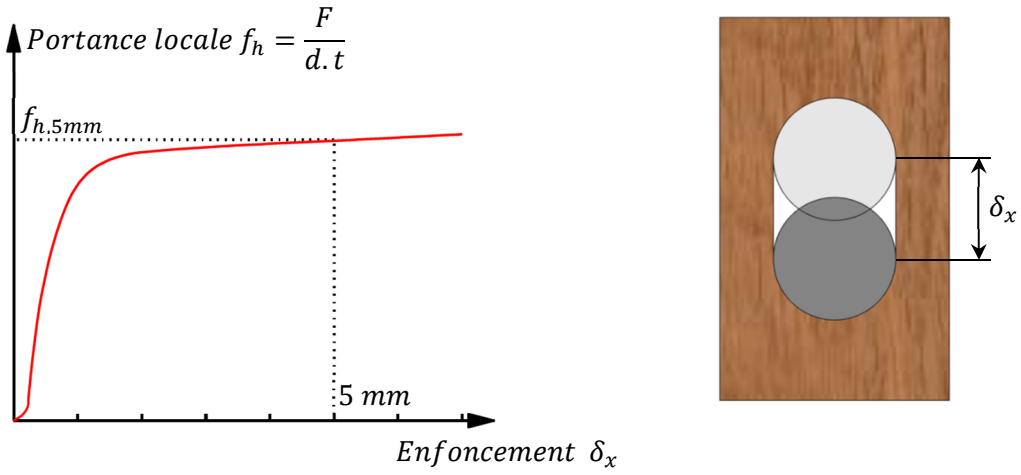


Figure 4-7 : Définition de la portance locale par essais.
Avec d le diamètre de l'organe [mm] et t l'épaisseur de l'éprouvette [mm]

Les trois normes qui encadrent la définition de la portance locale par essais sont : la norme européenne (NF-EN 383 [87]), la norme américaine (ASTM D 5764-97a) et la norme internationale (ISO 10984-2). Les normes européenne et américaine sont les deux règlementations les plus utilisées. La première différence notable se fait sur la géométrie comme le montre la Figure 4-8. Dans le cadre des essais ASTM la broche appuie directement sur le bois alors que pour la norme européenne l'effort est appliqué sur les extrémités de la broche, ce qui induit une légère flexion de la broche et donc une répartition moins uniforme de la pression exercée sur le bois.

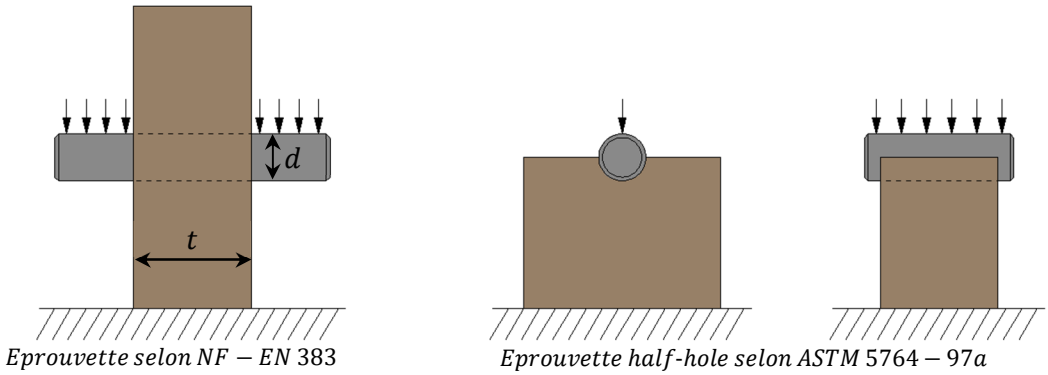


Figure 4-8 : Géométrie des éprouvettes selon les différentes normes.

La deuxième différence entre les deux normes vient de la méthode de dépouillement. Pour la norme européenne, la portance est considérée comme étant la valeur maximale obtenue pour 5mm d'enfoncement (Figure 4-7) alors que pour la norme américaine, une droite tangente d'offset à 5% permet de déterminer le seuil de portance plastique (Figure 4-9). Cette méthode de dépouillement néglige donc le caractère « écrouissable » de la portance locale.

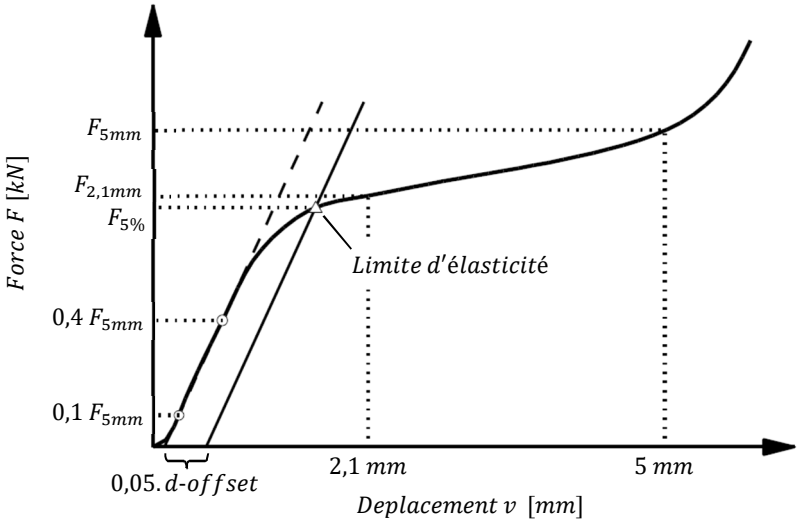


Figure 4-9 : Détermination de la portance selon ASTM.

FRANKE & MAGNIERE [88] ont proposé de comparer les résultats obtenus entre les deux normes d'essais en réalisant des test à 0 et 90° par rapport au fil du bois. Leurs essais montrent les conclusions suivantes :

- Pour des essais à 0°, les essais ASTM donnent une portance $f_{h,5\%}$ supérieure de 30% à la portance $f_{h,5mm}$ des essais EN-383.
- Pour les essais à 90°, les essais ASTM donnent une portance $f_{h,5\%}$ inférieure de 70% à la portance $f_{h,5mm}$ des essais EN-383.

4.1.3.4.2. *Portance locale selon les directions principales du bois*

Le bois étant un matériau orthotrope, il est normal que les propriétés de portance locale changent en fonction de l'angle entre la sollicitation et le fil du bois.

La loi de prédiction de la portance locale dans le sens du fil du bois définie dans l'EUROCODE 5 est directement issue des études de WHALE & all (1986) [89] [90]. Les essais réalisés sur des bois résineux et des bois tropicaux ont montré l'incidence de la masse volumique et du diamètre de l'organe sur les résultats conduisant à l'équation de la portance locale dans le sens du fil du bois :

$$f_{h,0,k} = 0{,}082\ (1 - 0{,}01\ d)\ \rho_k \qquad (4.18)$$

Les premiers essais, selon le standard européen EN 383 [87], ont été réalisés par EHLBECK & WERNER (1992) [91] avec 154 essais de portance locale sur 6 essences (dont du hêtre et du chêne). Les essais sur les résineux ont confirmé l'équation de l'EUROCODE 5 et les essais sur les feuillus ont mis en évidence une nouvelle relation :

$$f_{h,0,k} = 0{,}09\ (1 - 0{,}01\ d)\ \rho_k \qquad (4.19)$$

Malgré cela, il a été décidé de ne retenir que l'équation trouvée pour les résineux dans le code de calcul européen. De base, l'EUROCODE 5 a donc tendance à sous-estimer la portance locale des bois feuillus de 10%.

A la remarque précédente s'ajoute généralement la sous-évaluation de la masse volumique par le système de classement de l'EN338 (les bois étant généralement classés D24 par classement visuel, définissant de ce fait une masse volumique caractéristique ρ_k de 485 kg/m^3 pour des valeurs trouvées dans la bibliographie de 620 kg/m^3) il en résulte alors une sous-estimation globale de 40% de la résistance des assemblages réalisés dans le bois feuillu.

HUBNER & all [92] ont proposé en 2008, en se basant sur des travaux de BLASS & UIBEL (2007), une nouvelle définition de la portance locale indépendante de l'essence utilisée. En réalisant une majorité de leurs essais sur du frêne, ils ont proposé une loi en puissance sur la densité telle que :

$$f_{h,0,k} = 0{,}015\ \rho^{1{,}30}\ d^{-0{,}20} \tag{4.20}$$

SANDHAAS & All [93] ont réalisé une campagne de 139 essais sur des bois résineux, des bois feuillus et des bois tropicaux. « L'influence du diamètre sur les résultats de la portance locale est si faible que pour des raisons pratiques une équation basée uniquement sur la masse volumique est suffisante et permet de la rendre plus pratique pour les ingénieurs en calcul de structure ». Cette nouvelle équation moyenne simplifiée pourrait donc s'écrire :

$$f_{h,0,mean} = 0{,}082\ \rho_k \tag{4.21}$$

La portance locale perpendiculaire aux fibres du bois, notée $f_{h,90}$, peut être exprimée comme étant une fraction de la portance à 0°. Dans l'EUROCODE 5, cette notion se retrouve au travers du coefficient k_{90} défini tel que :

$$k_{90} = \frac{f_{h,0}}{f_{h,90}} \tag{4.22}$$

La première définition de la portance à 90° dans des feuillus selon l'EN 383 [87] provient de l'étude d'EHLBECK & WERNER sur du hêtre conduisant à la relation $f_{h,90,k} = 0.09\ (1 - 0.016\ d)\ \rho_k$ Eq. (1). Pour écrire dans le code de calcul le coefficient k_{90} propre aux bois feuillus, il a été retenu cette équation combinée à la relation (4.18) retenue pour la portance à 0° dans l'EUROCODE 5 indépendamment de l'essence :

$$k_{90} = 0{,}90 + 0{,}015\ d \tag{4.23}$$

Dans leur étude sur le frêne, en complément de la nouvelle définition de la portance à 0°, HUBNER & All ont proposé un nouveau k_{90} basé sur leur loi puissance à 0° tel que :

$$k_{90} = 0{,}62 + 0{,}035\ d \tag{4.24}$$

Les différentes valeurs de portance trouvées dans toutes ces publications sont résumées dans le Tableau 4-I et ont servi pour l'estimation des efforts pour les protocoles d'essais qui vont suivre. Les valeurs obtenues par FRANKE & MAGNIERE [94] seront négligées car les essais ont été réalisés selon la méthode ASTM. La Figure 4-10 met en avant les fortes différences entre les lois de prédiction de la portance trouvées en bibliographie.

Tableau 4-I : Synthèse des essais de portance locale selon la bibliographie.

Angle	Essence	Diamètre [mm]	ρ_m [kg/m^3]	COV ρ_m	f_h [MPa]	COV f_h	Réf.
0°	Hêtre	12	697	5,22%	59,6	8,08%	[91]
		12	712		60*		[92]
		12	664	1,50%	45,8	14,20%	[93]
		12	636	3,00%	52,3	6,70%	[93]
		12	734	1,80%	62,5	3,00%	[94]
		16	741	0,31%	67	8,07%	[91]
		16	724	1,89%	62,6	8,23%	[91]
	LVL Hêtre	12	765		72	3,50%	[82]
		16	765		62	7,08%	[82]
	Chêne	12,7			53,8	5,70%	[95]
		16	732	4,50%	55,8	5,12%	[91]
90°	Hêtre	12	734	1,80%	55,3	5,00%	[94]
		12	710		50*		[92]
		16	719	2,77	47,5	4,27	[91]
*Les données * ont été obtenues par lecture graphique.*							

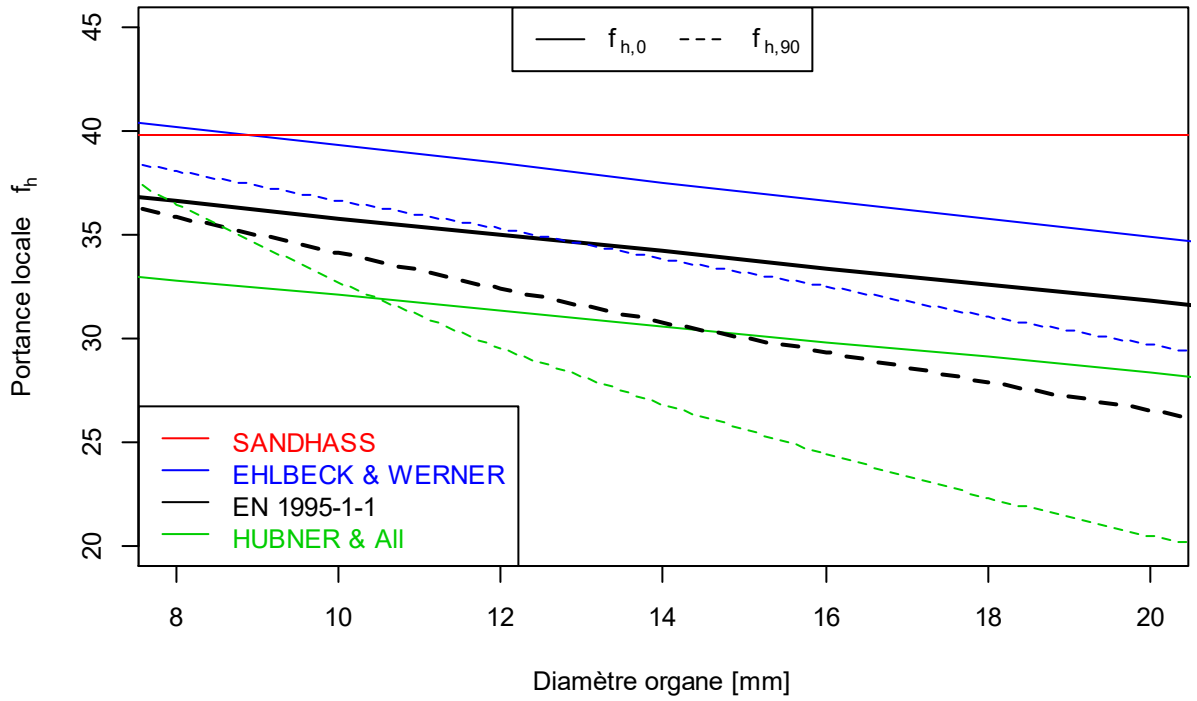


Figure 4-10 : Comparaison des différentes lois de portance. ($\rho_{k,D24} = 485\ kg/m^3$)

4.1.3.4.3. *Portance en dehors des axes d'orthotropie du bois*

Similairement au comportement du bois en compression, la portance locale diminue avec l'augmentation de l'angle entre l'effort et le fil du bois. LARSEN [96] a montré par la Figure 4-11 que le diamètre de l'organe a également un impact sur la diminution de la portance : plus le diamètre diminue et plus la différence entre portance locale à 0° et 90° diminue jusqu'à être égale pour des diamètres de 6mm ou moins.

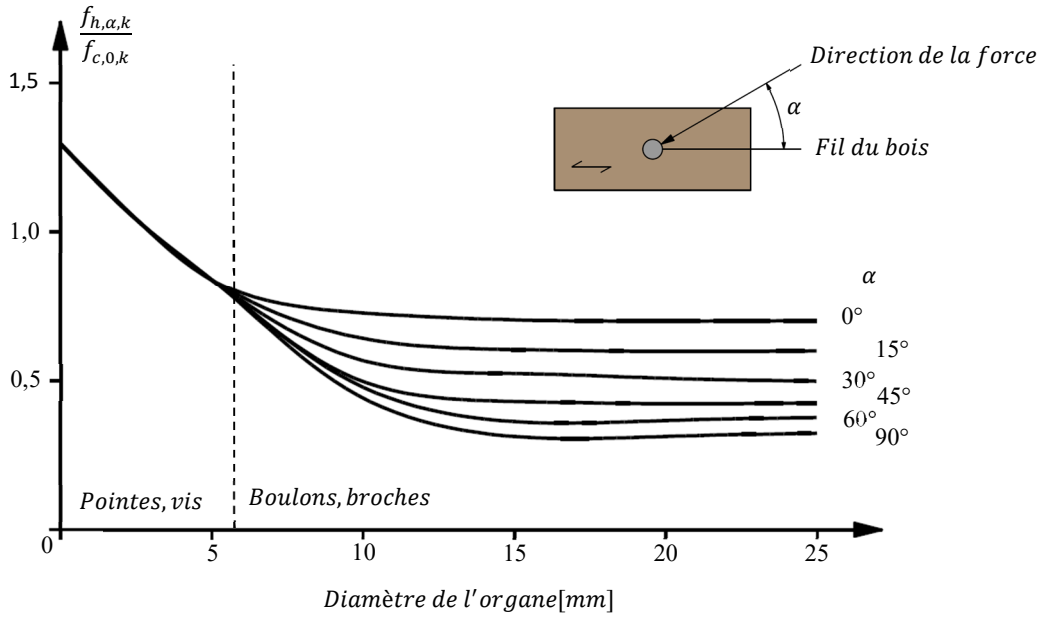


Figure 4-11 : Influence du diamètre sur la portance locale à l'angle – Fig 3 de LARSEN [96].

Dans l'EUROCODE 5, ce phénomène est introduit par la formule basée sur la théorie de HANKINSON (1921) pour les organes avec un diamètre de 6mm ou plus :

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \text{ avec } k_{90} = \frac{f_{h,0}}{f_{h,90}} \quad (4.25)$$

Le coefficient k_{90} utilisé dans L'EUROCODE 5 est issu des essais d'EHLBECK & WERNER [91] :

$$k_{90} = 1{,}35 + 0{,}015 \cdot d \text{ (Résineux)} \quad (4.26)$$

$$k_{90} = 0{,}90 + 0{,}015 \cdot d \text{ (Feuillus)} \quad (4.23)$$

FRANKE et MAGNIERE [94] ont travaillé sur la caractérisation de la portance locale du hêtre et de l'épicéa pour comparer les lois de comportement avec celles définies dans les normes actuelles. Ce sont 10 essais ASTM pour chaque configuration d'angle (0, 25, 55 et 90°) et de diamètre (6, 12, 20 et 30mm) qui ont été réalisés sur chaque essence. La Figure 4-12 montre que la formule de l'EUROCODE 5 estime des valeurs satisfaisantes pour les résineux mais qu'elle doit être adaptée pour prendre en compte quelques singularités observées sur les feuillus. La portance à 55° pour les diamètres 12 et 20mm est inférieure à la portance à 90° pour les mêmes diamètres. Pour prendre en compte cette singularité, FRANKE et MAGNIERE proposent une loi moyenne telle que :

$$f_{h,\alpha,mean} = \frac{f_{h,0}}{k_{90} \cdot \sin^{1.2} \alpha + \cos^{1.5} \alpha} \quad (4.27)$$

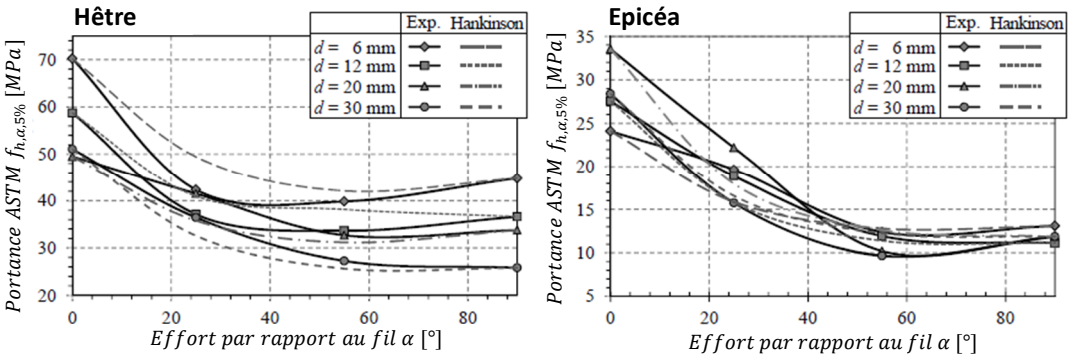


Figure 4-12 : Comparaison des essais feuillus et résineux – fig 7 de FRANKE & MAGNIERE [94].

SCHWEIGLER et all [97] ont résumé dans leur étude les différentes lois mathématiques pouvant d'écrire les comportements généralement observés lors des essais de portance locale. Ils ont généralisé les évolutions (portance-enfoncement) en fonction de l'angle de l'effort par rapport au fil pour les bois résineux.

4.1.3.4.4. *Autres paramètres ayant une incidence sur la portance*

1. Qualité de surface des organes

Un certain nombre de chercheurs ont montré l'incidence de la qualité de surface des organes sur la portance locale à 0°. Les travaux de RODD [98] ,BLERON [99] et BOCQUET & TAVAKOLI [100] sur des résineux montrent une différence de plus de 40% entre la portance à 0° obtenue sur des tiges moletées et celle obtenue sur des tiges lisses.

Dans leurs travaux, HUBNER & All [92] ont présenté les essais de portance locale à 0° réalisés sur de l'épicéa par SPORK en 2007. L'utilisation d'organes de 20mm avec différents états de surface montre que plus l'état de surface est rugueux et plus la portance longitudinale augmente. A ce titre, ils observent une augmentation de 16% entre des organes rugueux et un état de surface de référence que serait l'acier galvanisé et une diminution de 6% entre cette même référence et des tiges lisses.

SERRANO & SJODIN [101] ont réalisés des essais en faisant varier le coefficient de frottement des broches entre 0,1 et 0,4. La figure 7 de leur publication montre un effort de 18kN pour les tiges rugueuses et un effort de 12,8 kN pour les tiges lisses. Ceci se résume à une augmentation de la portance de 41% en fonction de l'état de surface des organes.

Plus récemment, SANDHASS & All [93] ont étudié l'influence de la qualité de l'acier sur la portance dans des bois résineux, feuillus et tropicaux. Malgré des rugosités de surface jugées similaires, les essais ont montré des différences de portance entre des organes d'acier HSS et VHSS. L'argument avancé pour expliquer ces écarts est que la dureté de l'acier joue également un rôle non négligeable sur le coefficient de frottement entre la tige et le bois. Néanmoins, selon les auteurs, le nombre d'essais réalisés n'était pas suffisant pour comprendre ce phénomène surprenant et proposer de le prendre en compte dans le calcul de structure.

L'influence de l'état de surface sur la portance locale à 0° est telle que pour les essais de portance il est impératif d'utiliser des organes similaires à ceux utilisés en construction bois.

2. Humidité des bois

Comme pour les autres propriétés mécaniques du bois, la portance locale diminue si la teneur en eau des bois est supérieure à 12%. RAMMER & WINISTORFER [102] ont montré une diminution de 3,3% de la portance locale parallèle au fil du bois par % d'humidité supérieur à 12% pour des résineux.

HUBNER & all [92] ont présenté l'influence de l'humidité sur la portance locale dans du frêne. Après avoir conditionné 4 lots de 40 éprouvettes dans différentes ambiances, les humidités moyennes de chaque lot étaient de : 4,4% 10,7%, 16,3% et 18%. Les essais de portance locale réalisés à 0° et 90°, en utilisant des organes de diamètre 12mm, montrent que la diminution de la portance entre 4% et 21% d'humidité est constante et que la portance à 0° diminue de 4% par % d'humidité et de 3% par % d'humidité pour la portance perpendiculaire aux fibres. Cette étude introduit ainsi un facteur correctif de la portance en fonction de la teneur en eau pour n'importe quel angle α entre l'effort et le fil du bois :

$$f_{h,\alpha,12\%} = f_{h,\alpha,u}\,(1-(12\%-u)\,\Delta_u) \text{ avec } \Delta_u = \Delta_{u,0°} + \frac{\Delta_{u,90°}-\Delta_{u,0°}}{90°}\,.\,\alpha \quad (4.28)$$

$f_{h,\alpha,12\%}$ étant la portance locale à 12% d'humidité [MPa], $f_{h,\alpha,u}$ la portance locale à l'humidité u [MPa], u la teneur en eau des éprouvettes [%] et Δ_u le facteur de diminution de la portance locale en fonction de l'augmentation de l'humidité [% / %] pour différents angles par rapport au fil α, $\Delta_u = 4\%$ pour α = 0° et $\Delta_u = 3\%$ pour α = 90°.

SANDHAAS & All [93] proposent de corriger les résultats de la portance à 0° en se basant sur la loi de correction de la résistance en compression donnée par l'EN 384, à savoir :

$$f_{h,12\%} = f_{h,\alpha,u}\,(1-0{,}03\,(12\%-u)\,) \quad (4.29)$$

3. Epaisseur et orientation des cernes d'accroissement

Dans le cadre d'essais avec des angles proche de 90°, il est certain que l'orientation des cernes a une incidence importante sur la portance locale. La portance locale perpendiculaire aux fibres résulte d'une combinaison complexe entre les résistances en cisaillement et en compression transversale. D'une manière logique, une incidence sur l'une ou l'autre des propriétés aura une incidence sur la portance locale. HOFFMEYER & All [23] ont démontré que la résistance moyenne en compression sur les résineux pouvait varier de 10% en fonction de l'orientation des cernes. Cette propriété a donc potentiellement une incidence sur la portance.

ZINK-SHARP & All [95] ont réalisé des essais de compression sur des portions de bois de printemps et de bois d'été de chêne. L'un étant composé de 30% de bois et 70% de vaisseaux et l'autre de 60% de bois et 40% de vaisseaux, les résultats en compression sont largement différents avec 53 MPa pour le bois d'été et 23 MPa pour le bois de printemps.

L'épaisseur des cernes et la composition de ces derniers pouvant être encore plus hétérogènes entre les feuillus (bois à zone initiale poreuse comme le chêne ou à pores diffus comme le hêtre et le peuplier), ce phénomène a donc forcément lui aussi une incidence sur la portance locale. Il pourra vraisemblablement expliquer une partie de la variabilité des résultats expérimentaux.

4.1.4. Conclusions de l'étude bibliographique

Au travers des différentes publications analysées, les problématiques suivantes sont retrouvées :

- Une forte variabilité des lois de portance à 0° et 90° avec un impact important de l'humidité et de l'état de surface des organes utilisés. Les essais portent principalement sur du hêtre et du frêne. Des essais doivent donc être réalisés sur du hêtre pour valider les lois trouvées en bibliographie et proposer des lois pour d'autres essences de bois feuillus.
- Une étude a mis en avant, à partir d'essais ASTM, une différence entre les feuillus et les résineux en ce qui concerne l'estimation de la portance en fonction de l'angle entre l'effort et le fil du bois. Des essais selon les standards européens doivent être réalisés pour valider cette observation et proposer une loi caractéristique.
- Les origines de la formule sur la raideur des assemblages est assez vague. Elle a principalement été définie à partir d'essais sur des bois résineux. Il est nécessaire de compléter la connaissance dans ce domaine.
- Le critère de nombre efficace proposé par JOHANSEN a été défini sur des bois résineux, il faut donc vérifier s'il est correct pour les feuillus. La remise en cause du critère par BLASS pour les modes de ruptures 3 semble être une piste économique intéressante à investiguer. C'est pour cette dernière raison que pour le projet EFEUR 5, il sera réalisé des assemblages avec une variation de l'épaisseur des bois plutôt que le nombre d'organes et leur espacement.

4.2. ESSAIS DE PORTANCE LOCALE

4.2.1. Protocole d'essais de la portance locale

Le protocole suivant décrit l'ensemble des principes mis en place pour réaliser les essais de portance selon les différents angles (0, 30 ,60 & 90°) et pour différents diamètres.

4.2.1.1. Normes

Les essais de portance locale, ainsi que la détermination des propriétés physiques associées, sont encadrés par le corpus réglementaire suivant :

- EN 383 [87] : Définition des protocoles d'essais et des précisions de mesures requises.
- NF EN 384 [28] : Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de masse volumique.
- NF EN 13183-1 [71] : Détermination par la méthode de dessiccation de la teneur en humidité des pièces de bois sciées.
- NF EN 14358 [30] : Détermination des valeurs caractéristiques.

4.2.1.2. Montage

La Figure 4-13 expose le principe du montage utilisé pour la réalisation des essais de portance selon les deux directions principales : 0 et 90°. Le montage utilisé pour la portance comporte deux flasques en acier qui viennent encastrer la tige d'assemblage, limitant ainsi sa déformation par flexion. Les cibles utilisées pour l'acquisition vidéo sont disposées sur deux tôles métalliques : une est fixée sur le bâti avec un adhésif double face, la deuxième est vissée dans l'éprouvette de part et d'autre de l'organe d'assemblage afin qu'elles soient situées dans un même plan.

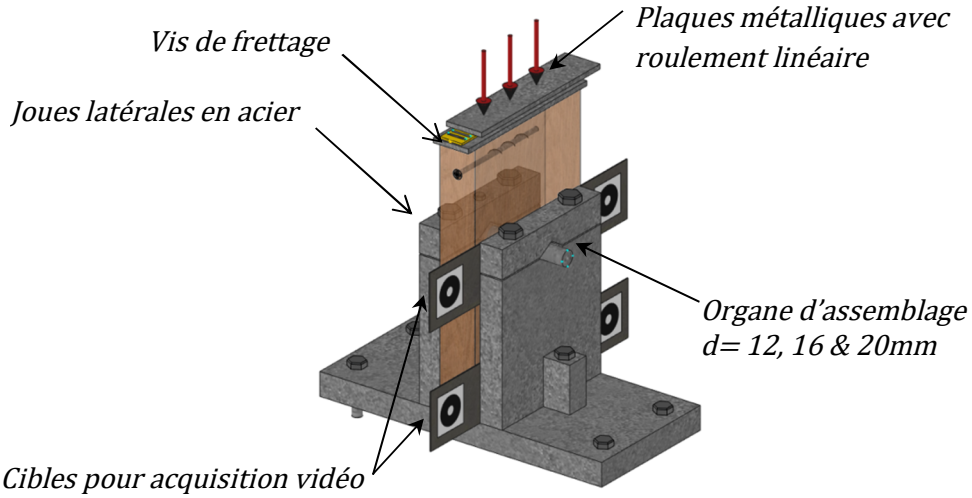


Figure 4-13 : Vue du montage des essais de portance locale à 0 & 90°.

Un système de plaques métalliques et de roulements linéaires permet de laisser libre le déplacement de l'éprouvette dans la direction du roulement. Cela permet notamment pour les essais à l'angle de laisser la tige se déplacer librement dans le bois.

Dans l'optique d'utiliser les essais d'enfoncement dans un modèle par éléments finis, le pallier plastique doit être le plus long possible. Pour limiter l'ouverture de fissures en traction transversale dans les essais à 0° et à 30°, les éprouvettes ont été frétées par une vis. Des essais préliminaires ont démontré que la vis permettait une phase de plastification plus importante (pouvant atteindre 10mm d'enfoncement dans le bois) contrairement aux éprouvettes non frettées (qui cassent à un enfoncement proche de 5mm) sans avoir d'impact sur la valeur de la portance à 5mm ou de la raideur en phase élastique.

Pour les essais, en dehors des deux directions principales, une légère adaptation a été réalisée. L'organe est toujours placé dans le montage métallique, mais la forme de l'éprouvette et le montage de chargement ont été modifiés, conformément à la Figure 4-14. Pour les essais à 30°, la forme finale est obtenue en recollant deux morceaux de bois de part et d'autre de l'éprouvette avec une colle Polyuréthane KLEIBERIT 510 et en appliquant un effort et un temps de serrage conforme aux préconisations du fabricant. Pour ces éprouvettes, la masse volumique est mesurée avant collage et usinage. Pour les essais à 60°, un montage d'adaptation en acier permet l'application d'une charge verticale sur l'éprouvette. Un talon en acier ainsi que deux vis complètent le montage pour supprimer les glissements parasites entre le montage et le bois. Dans les deux cas, les montages sont équipés de roulements linéaires pour permettre le libre déplacement de l'organe dans le bois.

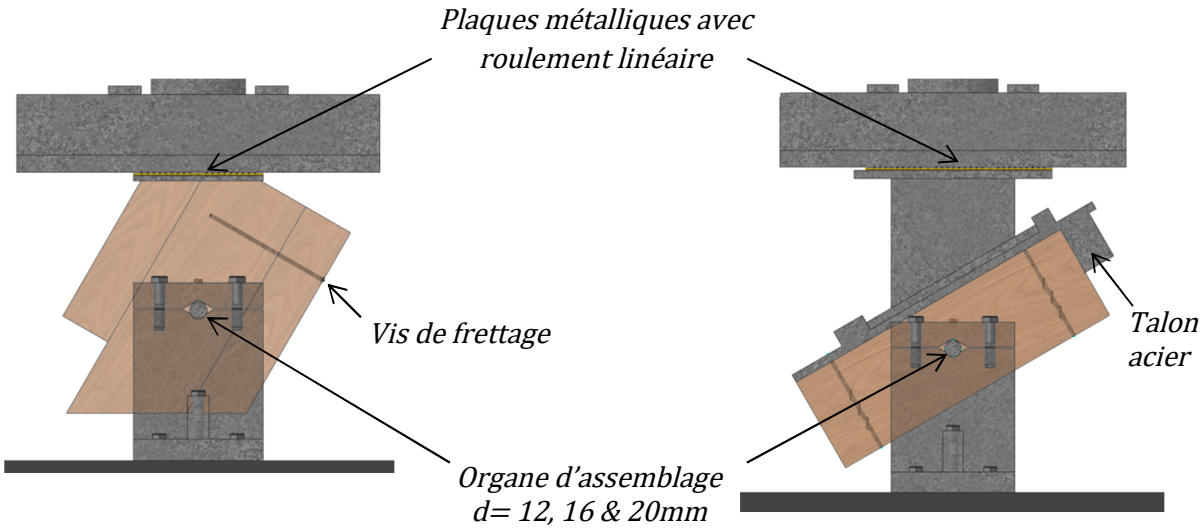


Figure 4-14 : Vues du montage des essais de portance locale à 30° (Gauche) & 60° (Droite).

4.2.1.3. Sections, matériaux et dimensions

Les schémas de principe des dimensions des éprouvettes sont donnés par l'EN 383 [87] et rappelés dans la Figure 4-15. Les dimensions minimales l_1 et a_1 sont rappelées dans Tableau 4-II, pour les angles de 30 et 60°, les distances aux bords l_1 et $a_1$ont été déterminées par interpolation linéaire. Les épaisseurs des éprouvettes doivent être comprises entre $1{,}5.d$ et $4.d$. Pour valider ce critère et limiter la quantité d'usinages pour un diamètre de 12mm, il a été retenu une épaisseur de 30mm et 35 mm pour les diamètres 16 et 20mm.

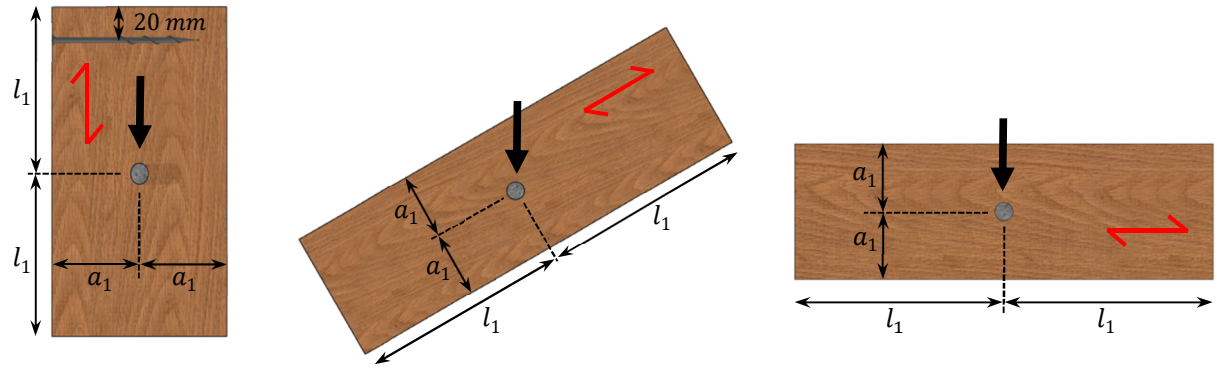


Figure 4-15 : Dimensions des éprouvettes selon EN 383.
(Remarque : Le schéma à l'angle n'existe pas dans l'EN 383)

Tableau 4-II : Synthèse des dimensions d'éprouvettes.

Angles [°]	*0*	*30*	*60*	*90*
l_1	*7.d*	*11,3.d*	*15,7.d*	*20.d*
a_1	*3.d*	*3,7.d*	*4,33.d*	*5.d*

Avant usinage, les bois ont été conditionnés durant une période suffisamment longue à une température de 20°C et une humidité relative de 65% pour tendre vers une humidité des bois aux alentours de 12%.

Pour permettre une analyse statistique correcte, un minimum de 30 à 40 essais par configuration a été réalisé, hormis pour le chêne à l'angle de 30° où, par manque de temps liés au collage des éprouvettes, le nombre d'essais a été réduit à 20. Pour laisser suffisamment de matière première pour la suite du projet (essais d'assemblages), les essais à l'angle dans le peuplier n'ont pas pu être réalisés.

L'étude bibliographique a mis en avant l'impact de la rugosité des organes d'assemblages sur les résultats des essais de portance. Il est donc obligatoire d'utiliser des organes dont la rugosité serait équivalente à celle de ceux qui pourraient être mis en œuvre sur un chantier de construction bois. Au regard des valeurs d'intensité de portance locale conséquente relevées dans l'étude bibliographique, il a été choisi d'utiliser des organes avec une limite plastique importante afin de maximiser les capacités résistantes des assemblages testés. Les broches utilisées sont donc en acier galvanisé de classe 8.8 et ont été obtenues chez un fournisseur d'entreprise de la construction bois.

4.2.1.4. Dispositifs de mesure

Les essais ont été réalisés sur une machine d'essais universelle (ZWICK Z250).

La mesure des efforts au niveau du point de chargement se fait au moyen d'une cellule de force de 250 kN avec une précision de (± 0.01 kN) en adéquation avec les conditions fixées par la norme.

La mesure des déplacements est réalisée par une acquisition vidéo avec une caméra de marque VDM ACQUISITION au format A3 à 1,0m de distance. Les essais préliminaires montrent une précision de l'ordre de 0,01 mm, en adéquation avec la précision de 0,02mm pour des déplacements inférieurs à 2mm.

L'organisation du dispositif de mesure est explicitée par la Figure 4-16. En réglant des pas de temps similaires pour l'enregistrement des données et en utilisant un trigger les données fournies par les acquisitions vidéo sont enregistrées de manière synchronisée à l'effort appliqué.

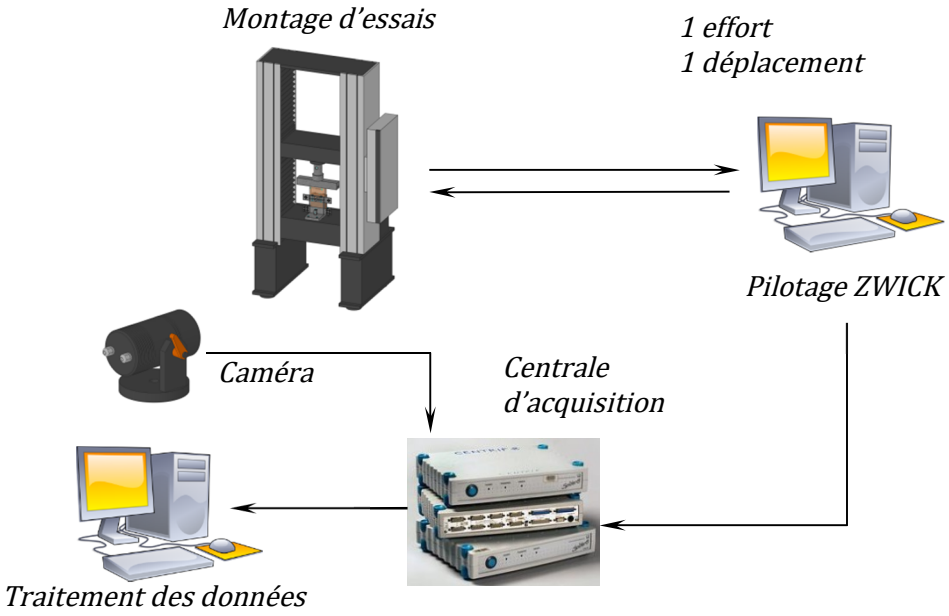


Figure 4-16 : Schéma directeur de l'instrumentation mise en place.

4.2.1.5. Données d'essais complémentaires

Avant les essais, les dimensions de l'éprouvette sont vérifiées à partir d'une moyenne de 2 mesures de toutes les dimensions prises au pied à coulisse numérique GARANT DC2 à chaque extrémité.

La masse volumique est calculée à partir de la masse et des dimensions de l'éprouvette dans son intégralité, hormis pour les essais à 30°, où seule la zone centrale avant collage est retenue.

L'humidité des bois est mesurée par méthode dessicative selon la norme NF EN 13183-1 [71]. Pour les essais à 0 & 30°, l'éprouvette est séchée dans son intégralité. Pour les autres angles, une zone centrale de 20cm est extraite de l'éprouvette. Le séchage est réalisé sous une ambiance de 103 ± 2 °C. La stabilisation est atteinte lorsque la différence de masse entre deux pesées est inférieure à 0,1% (précision de 0,01 g), avec une durée minimale de séchage de 7 jours.

Afin de quantifier l'impact du bois juvénile sur la portance locale, la position de l'échantillon par rapport au centre du billon est estimée grâce au marquage colorimétrique (cf Figure 2-1). Suite à la perte de l'information au cours des différents usinages, cette variable n'a pas été exploitée.

La pente de fil est mesurée avec un rapporteur d'angle en arrondissant par pallier de 2.5°. La Figure 4-17 montre l'incidence de cette mesure sur l'angle réel entre l'effort et le sens du fil du bois.

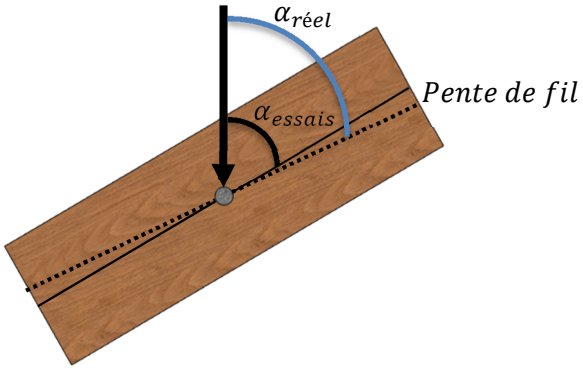


Figure 4-17 : Mesure de la pente de fil.

Pour les éprouvettes à 30 et 60° : définition du type de débit selon Figure 4-18. L'information n'a pas été sauvegardée pour les essais à 90°.

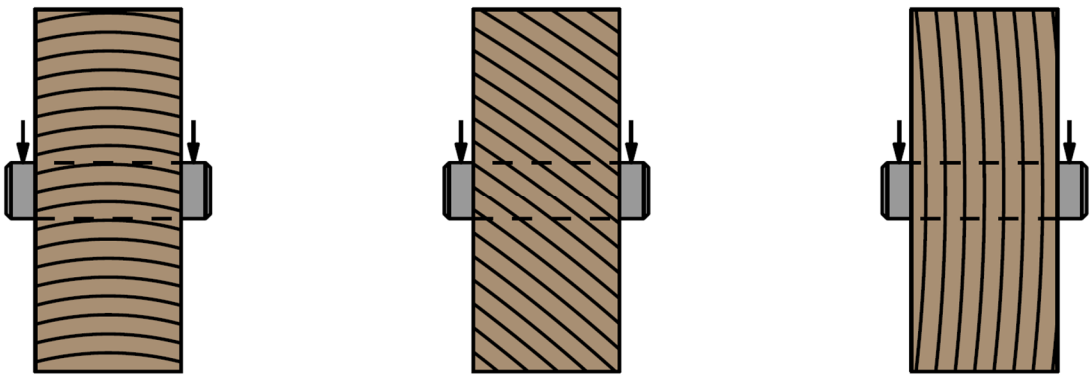


Figure 4-18 : Type de débit pour les éprouvettes à 30 et 60°.

4.2.1.6. Cycle de chargement

Pour l'ensemble des essais, la vitesse de chargement ainsi que le cycle de chargement ont été déterminés suivant les recommandations de la norme EN 383 [87], rappelées via la Figure 4-19. Les éléments suivants peuvent être relevés :

- La force $F_{max,est}$ correspond à l'effort théorique maximal obtenu pour 5 mm de déformation dans le bois. Il est, dans un premier temps, calculé à partir de la bibliographie puis corrigé au bout de 5 essais s'il diffère trop de la mesure du F_{max},
- Application d'une première rampe de chargement jusqu'à $0{,}4\ F_{max,est}$, seuil de chargement qui est maintenu pendant 30 secondes après l'avoir atteint,
- Décharge jusqu'à $0{,}1\ F_{max,est}$, seuil de chargement qui est maintenu pendant 30 secondes après l'avoir atteint,
- Deuxième rampe de chargement jusqu'à atteindre un enfoncement de 5mm pour obtenir F_{max}. Cette dernière rampe doit s'effectuer à une vitesse de chargement suffisante pour permettre d'arriver à la charge F_{max} en 300 ∓ 120 secondes.

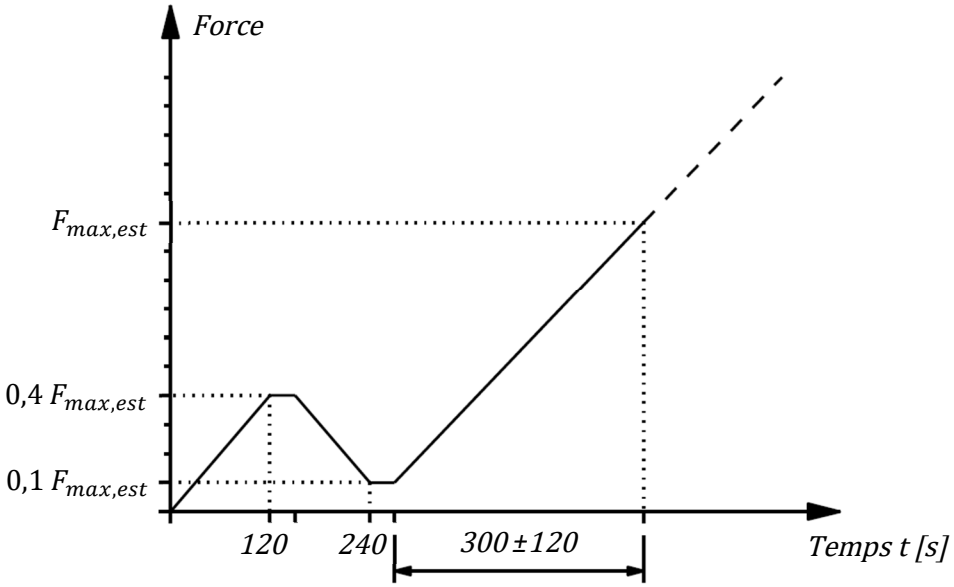


Figure 4-19 : Cycle de charge selon EN 383 [87].

Par rapport à la norme, les essais ne sont pas stoppés à 5mm d'enfoncement car, en parallèle du projet EFEUR 5, d'autres travaux de recherche s'intéressent à la modélisation par éléments finis des assemblages [104] nécessitant des lois de comportement d'enfoncement avec une plage d'enfoncement plus importante (10, 15mm).

4.2.1.7. Méthode d'analyse des essais expérimentaux

4.2.1.7.1. *Traitement des données*

La correction des données force et déplacement est réalisée selon la méthode décrite dans l'Annexe C de ce document.

Comme sur l'intégralité des essais réalisés sur la ZWICK, aucune dérive de la mesure de la force en fonction du temps n'est observée, ce paramètre n'est donc pas à corriger.

4.2.1.7.2. *Exploitation des courbes d'essais*

La Figure 4-20 représente une courbe type d'essai ainsi que l'ensemble des paramètres déterminés à partir des mesures de force et déplacement. Les forces mesurées F [N] sont converties en portance f_h[MPa] en fonction du diamètre d [mm] de l'organe et de l'épaisseur t [mm].

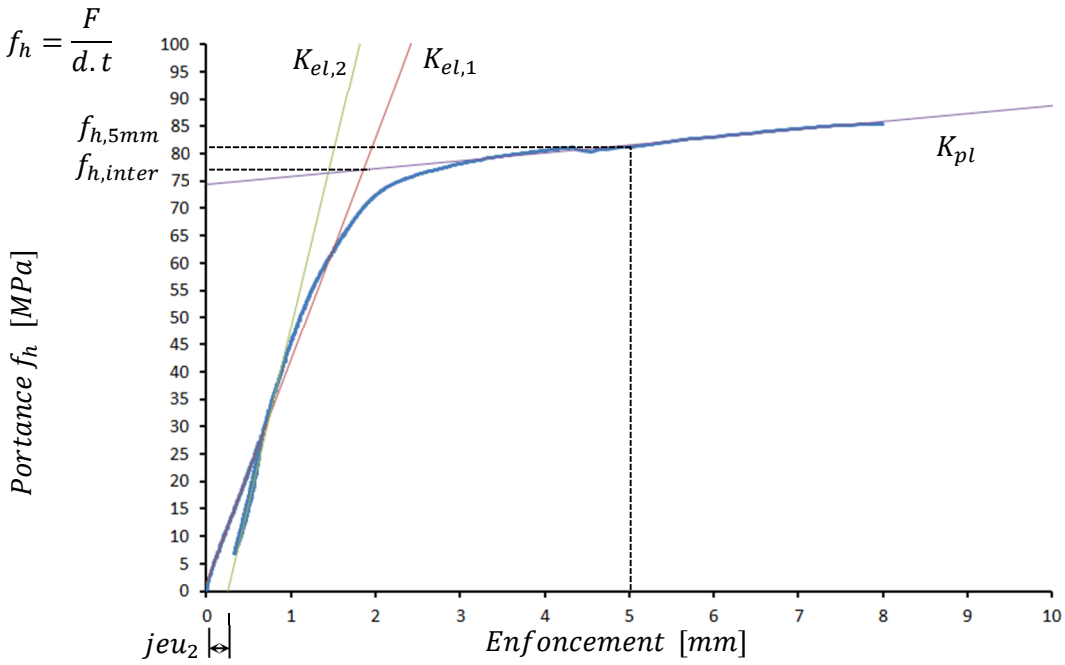


Figure 4-20 : Courbe type des essais d'enfoncement.

Les différentes grandeurs mesurées expérimentalement et présentées sur la courbe de la Figure 4-20 sont obtenues de la manière suivante :

$K_{el,1}$: Raideur de fondation élastique entre 10 et 40% de la charge $F_{max,est}$ obtenue par régression linéaire entre ces deux bornes, exprimée en MPa/mm.

$K_{el,2}$: Raideur de fondation de décharge entre 40 et 10% de la charge $F_{max,est}$ obtenue par régression linéaire entre ces deux bornes, exprimée en MPa/mm.

K_{pl} : Raideur de fondation plastique entre 2,5mm d'enfoncement et la fin de l'essai obtenue par régression linéaire entre ses deux bornes, exprimée en MPa/mm.

$f_{h,5mm}$: Portance locale pour 5mm d'enfoncement. Elle s'obtient soit à partir de l'effort maximal lors de l'essai, si l'enfoncement n'atteint pas les 5mm, soit à partir de la fonction K_{pl} définie précédemment en fixant $x = 5mm$.

Les éléments suivants ont également été déterminés mais ne sont pas étudiés dans la suite du mémoire car ils ne servent qu'à la définition des lois de portance pour le modèle éléments finis :

$f_{h,inter}$: Portance locale à l'intersection de $K_{el,1}$ et K_{pl} obtenue à partir des équations des deux courbes.

$f_{h,Xmm}$: Portance locale pour X mm d'enfoncement, X pouvant prendre comme valeur 1 ou 2 mm.

jeu_1 et jeu_2 : Jeux initiaux pour les courbes $K_{el,1}$ et $K_{el,2}$. Ils sont obtenus en fixant $f_h = 0{,}1\ MPa$ dans les équations respectives des courbes de charge et décharge entre 10 et 40% de F_{max}. La différence $jeu_2 - jeu_1$ exprime la déformation plastique acquise par le bois entre 10 et 40% de la charge.

4.2.1.7.3. *Correction des résultats en fonction de l'humidité*

Conformément à l'EN 384, il convient de corriger la masse volumique pour la ramener à une humidité de référence de 12% :

$$\rho = \rho(u)\left[1 - 0{,}005\left(u - u_{ref}\right)\right] \qquad pour\ 8\% < u < 18\% \qquad avec\ u_{ref} = 12\% \tag{4.30}$$

Malgré une incidence indéniable de l'humidité sur la portance locale, à ce jour, la réglementation n'impose pas de corriger la portance en fonction de l'humidité. Néanmoins, tout comme l'a fait SANDHAAS [93], il est proposé de calquer le facteur correctif de la portance sur celui de la compression axiale présentée dans l'EN 384, à savoir :

$$F_{c,0} = F_{c,0}(u)\left[1 + 0{,}03\left(u - u_{ref}\right)\right] \qquad pour\ 8\% < u < 18\% \qquad avec\ u_{ref} = 12\% \tag{4.31}$$

Les essais de HUBNER & All [92] ont montré que la portance à 90° diminue de 3% par % d'humidité. Ce faisant, il est pris en compte un critère global de correction de la portance selon n'importe quel angle entre l'effort et le fil du bois :

$$F_{h,\alpha}(12\%) = F_{h,\alpha}(u)\left[1 + 0{,}03\left(u - u_{ref}\right)\right] \quad pour\ 8\% < u < 18\% \quad avec\ u_{ref} = 12\% \tag{4.32}$$

L'analyse des résultats et l'expression des lois de portance a été faite avec et sans cette correction. La mise en place du facteur correctif allant dans le sens de la sécurité (car il minimise les nouvelles lois de portance exprimées), il sera conservé pour la suite de l'analyse des données.

4.2.1.7.4. *Démarche d'analyse statistique*

L'expression des valeurs caractéristiques au fractile de 5% et des valeurs moyennes caractéristiques est réalisée en suivant les prescriptions données par l'EN 14358 [70] et rappelées en Annexe D de ce document.

Les masses volumiques moyennes et les portances locales moyennes sont exprimées dans le Tableau 4-III comme des moyennes caractéristiques. Les autres valeurs moyennes du tableau restent des moyennes arithmétiques.

4.2.2. Résultats expérimentaux

4.2.2.1. Comparaisons des essais de portance

Les courbes et photos de la Figure 4-21 permettent de se rendre compte des différences de comportement de la portance en fonction des angles entre l'effort et le fil du bois. Contrairement aux essais dans les directions principales du bois, pour les essais de portance à l'angle, un enfoncement des trous déformés est observée en forme de « haricot ». Cette forme est liée au déplacement latéral laissé libre grâce aux roulements linéaires. Sous l'effet de la densification, la broche continue son déplacement dans la direction où la rigidité est la plus faible (perpendiculairement au fil du bois). Ces observations sont cohérentes avec les résultats obtenus dans des bois résineux par BLERON [99].

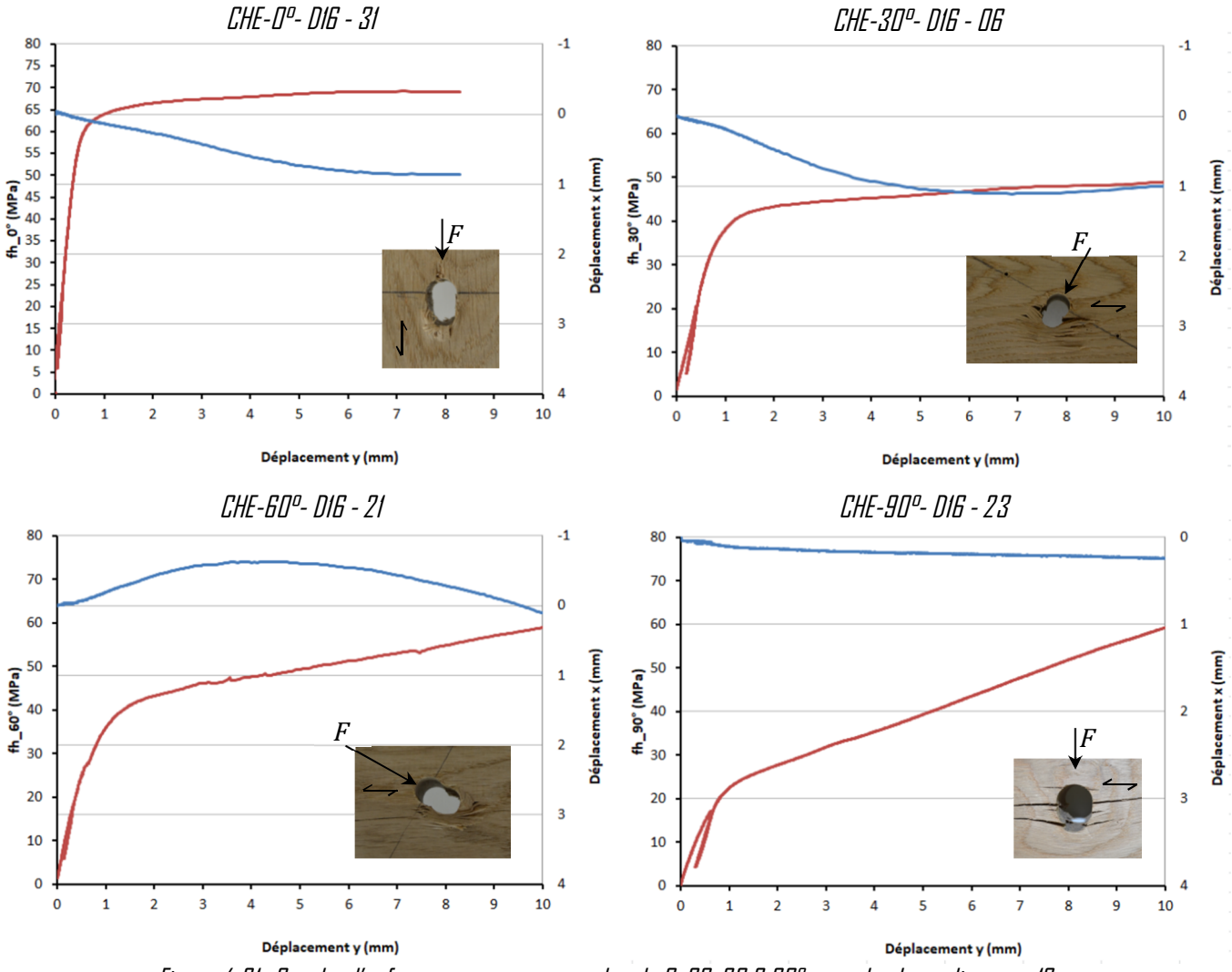


Figure 4-21 : Courbe d'enfoncement type aux angles de 0, 30, 60 & 90° pour du chêne diamètre 16.

4.2.2.2. Tableau de synthèse

Les résultats expérimentaux, présentés dans le Tableau 4-III, présentent des ordres de grandeur des coefficients de variation cohérents avec les valeurs issues de la bibliographie. Malgré des masses volumiques quasiment similaires entre le hêtre et le chêne (différence de 3%), en moyenne, la portance du hêtre est 16% plus élevée que la portance du chêne.

Tableau 4-III : Synthèse des résultats expérimentaux de la portance locale.

Essence	α [°]	d [mm]	N	H [%]	ρ_m [kg/m^3]	ρ_k [kg/m^3]	COV ρ	$f_{h,5mm,mean}$ [MPa]	$f_{h,5mm,k}$ [MPa]	COV $f_{h,5mm}$
Peuplier	0	12	40	9,7%	501	436	7%	43,03	37,04	8%
		16	38	10,4%	456	389	8%	39,70	31,76	12%
		20	35	9,9%	459	404	7%	35,90	30,05	10%
	90	12	39	9,80%	483	412	8%	28,42	21,04	17%
		16	39	11,21%	450	401	6%	22,15	15,53	16%
		20	40	11,10%	466	397	9%	19,49	14,92	14%
Hêtre	0	12	35	11,6%	745	697	4%	79,69	68,1	8%
		16	40	11,3%	721	647	6%	73,04	59,57	11%
		20	40	11,5%	723	643	6%	67,99	53,61	13%
	30	12	29	11,53%	720	668	4%	63,61	50,39	13%
		16	32	11,43%	674	567	9%	55,8	39,52	17%
		20	30	11,94%	702	648	4%	55,07	44,96	11%
	60	12	42	11,45%	737	670	5%	60,44	45,96	15%
		16	43	10,93%	700	599	8%	46,85	31,34	20%
		20	39	13,17%	701	646	5%	45,7	36,46	12%
	90	12	40	11,95%	721	636	7%	60,12	41,92	20%
		16	40	12,00%	704	624	7%	52,01	38,7	17%
		20	40	12,04%	710	631	6%	47,23	34,8	16%
Chêne	0	12	30	12,5%	702	619	7%	68,45	53,67	14%
		16	30	12,9%	715	625	7%	68,75	58,28	9%
		20	30	11,7%	682	603	7%	58,14	45,16	13%
	30	12	20	12,50%	684	612	6%	54,48	46,89	8%
		16	19	12,90%	672	555	10%	50,47	41,89	10%
		20	17	11,70%	682	604	6%	47,39	35,70	15%
	60	12	40	11,35%	688	578	9%	45,43	32,41	18%
		16	46	11,22%	641	563	7%	36,58	29,29	13%
		20	39	11,73%	707	647	5%	42,70	32,82	15%
	90	12	30	11,76%	696	610	7%	52,59	33,53	23%
		16	29	11,73%	700	608	7%	42,50	32,32	15%
		20	29	13,49%	702	632	6%	35,95	27,11	16%

N : Nombre d'échantillons
d : Diamètre de l'organe
H : Humidité moyenne des bois
ρ_m : Masse volumique moyenne
ρ_k : Masse volumique caractéristique
$f_{h,5mm,mean}$: Portance locale moyenne
$f_{h,5mm,k}$: Portance locale caractéristique

4.2.2.3. Influence de l'humidité sur les résultats expérimentaux

Les humidités moyennes varient entre 9,7 et 13,5% selon les configurations. Au niveau global, les humidités par essence sont les suivantes :

- Peuplier : 10,35 %
- Hêtre : 11,81 %
- Chêne : 12,18 %

Par configuration et sans appliquer de correctif sur la portance locale, la droite de régression linéaire entre la portance normée par la masse volumique $\frac{f_h}{\rho_{12\%}}$ et l'humidité a été déterminée. A partir de cette équation de droite, il est possible d'exprimer le facteur correctif X dans la relation suivante :

$$F_{h,\alpha}(12\%) = F_{h,\alpha}(u)\left[1 - \mathrm{X}\left(u - u_{ref}\right)\right] \quad (4.33)$$

Un coefficient X positif signifie que la portance diminue avec l'augmentation de l'humidité.

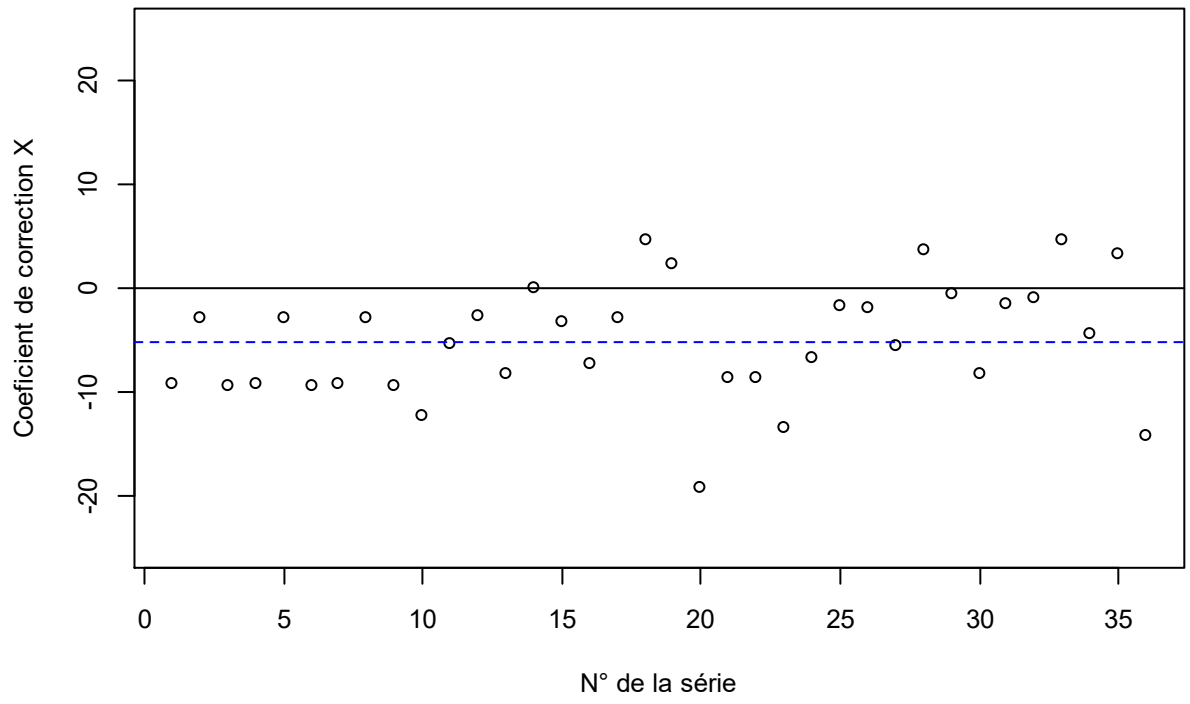


Figure 4-22 : Coefficient correctif de la portance en fonction de l'humidité par configuration d'essais.

Contrairement aux conclusions mises en avant dans la bibliographie, la Figure 4-22 montre que, dans notre cas, l'augmentation d'humidité conduit bien souvent à une augmentation de la portance locale. Néanmoins, comme les variations d'humidité restent faibles, il est possible que la variabilité naturelle de la portance locale vienne biaiser ces conclusions. Il serait donc possible de ne pas prendre en compte de rectification des valeurs, néanmoins, le facteur correctif de 3% par % d'humidité sera conservé, étant donné qu'il conduit à l'établissement de lois de portances conservatives.

4.2.2.4. Influence de l'orientation des cernes sur les résultats expérimentaux

La Figure 4-23 met en évidence des différences au niveau de la portance locale en fonction de l'orientation des cernes. Une orientation transversale des cernes conduit à une plus faible portance qu'une orientation radiale (avec une différence entre les valeurs moyenne de 26% pour le Hêtre et 13% pour le chêne).

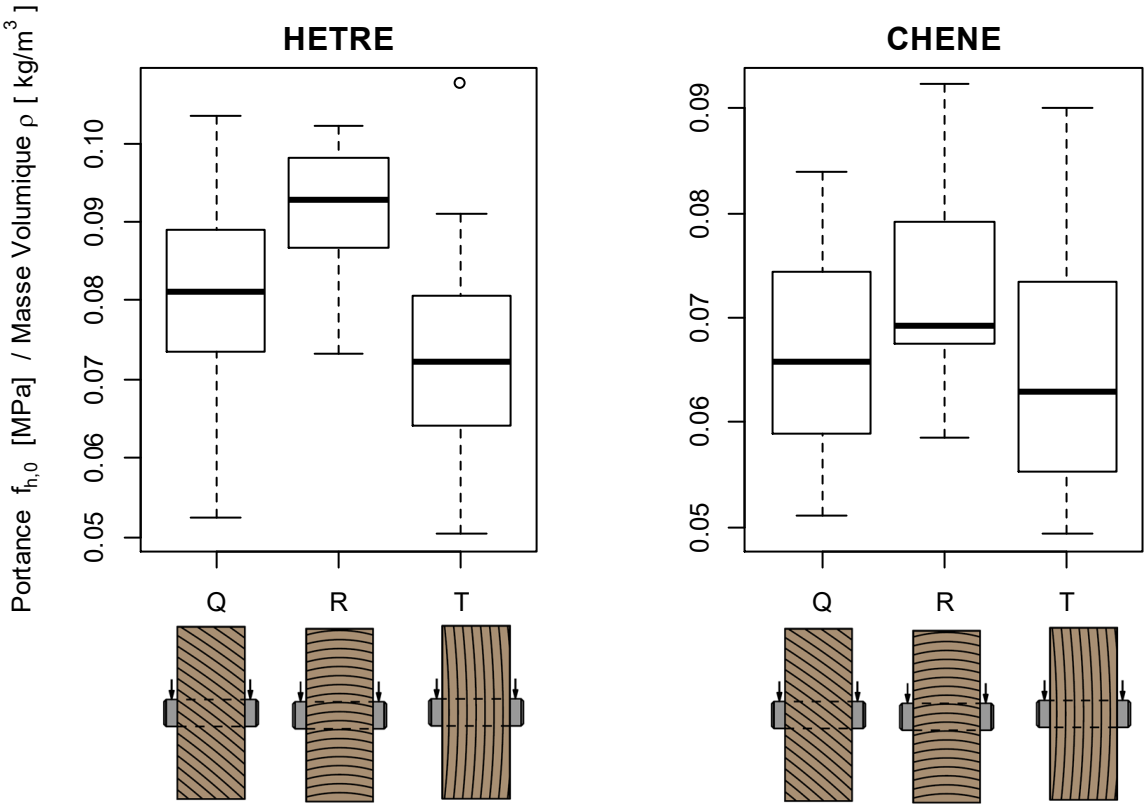


Figure 4-23 : influence de l'orientation des cernes sur la portance locale pour les angles de 30 et 60°.

Malgré ces observations, les échantillons pour chaque configuration ne faisant pas la même dimension (avec en général 10 fois moins d'éprouvette de type R par rapport au type T), il n'est pas possible de proposer de prendre en compte ce phénomène dans l'équation permettant d'estimer la portance. Une analyse avec des populations similaires pourrait avoir un intérêt scientifique important pour permettre d'établir une loi plus précise d'estimation de la portance selon un angle entre l'effort et le sens du fil. Cependant, d'un point de vue réglementaire, cette donnée ne pouvant être maîtrisée dans le cadre d'un chantier de construction, elle ne peut donc pas être incluse dans l'établissement réaliste de loi de calcul. C'est pour cette raison que pour la suite de l'étude, cette variable ne sera pas prise en considération.

4.2.3. Loi de portance à 0°

La régression linéaire de la portance locale en fonction de la masse volumique donne des coefficients R^2 compris entre 0,13 et 0,73. La Figure 4-24 montre également que la variation de la portance en fonction de la masse volumique est différente entre les diamètres. Il est donc possible de définir une relation du type : $\frac{f_h}{\rho} = f(d)$.

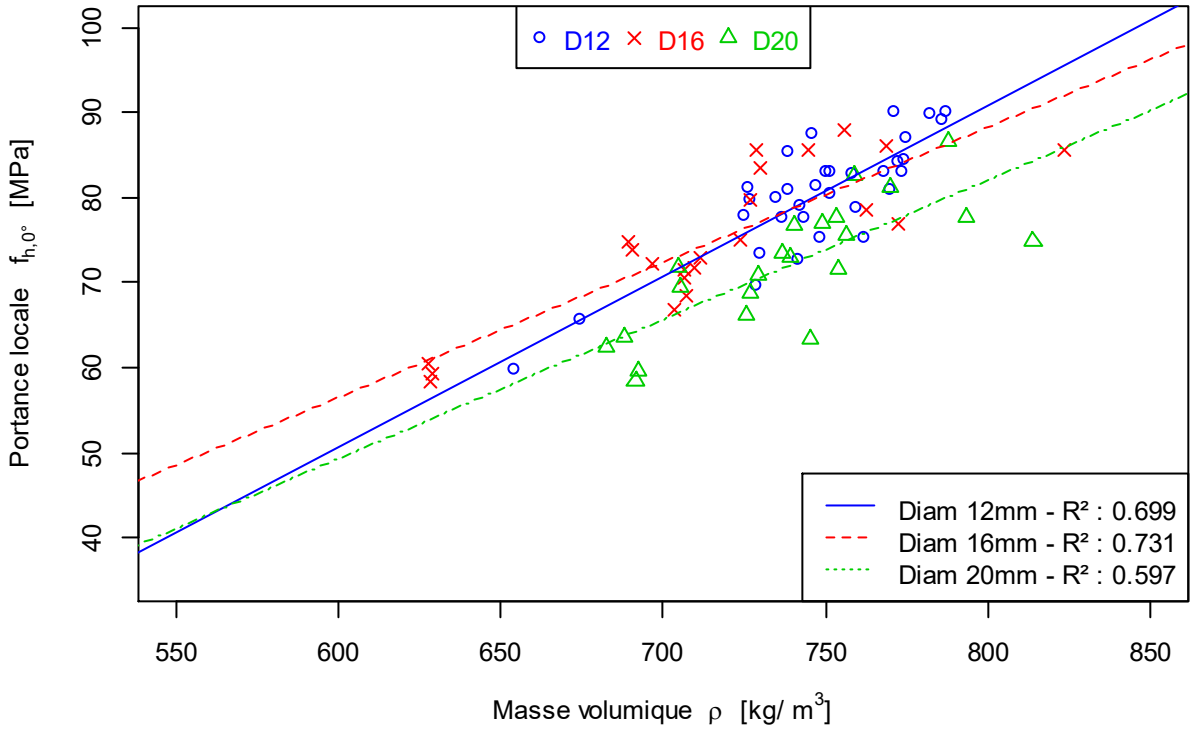


Figure 4-24 : Portance locale à 0° en fonction de la masse volumique pour le hêtre.

L'intégration d'une puissance sur le terme de la masse volumique comme l'a proposée HUBNER & all [92] à la place d'une fonction linéaire, oblige une des deux approches suivantes :

- Faire varier la puissance en fonction du diamètre complexifie un peu l'équation et son utilisation pour les ingénieurs de calcul de structure. Sur le hêtre, les fonctions puissances variables permettent d'obtenir des R^2 de 0,697 / 0,694 / 0,676 ce qui n'implique pas une amélioration significative de la prédiction.
- Fixer la puissance indépendamment du diamètre. La comparaison graphique des courbes des régressions linéaires et des courbes de fonctions type puissance ne met pas en évidence des écarts importants entre les deux équations.

Pour éviter de trop complexifier la loi de portance dans le code de calcul, les deux formes de lois de portances suivantes seront étudiées dans la suite du document :

- $f_{h,mean} = a\,(1 - b\,.\,d)\,\rho_{mean}$
- $f_{h,mean} = f\,.\,\rho_{mean}^{g}.d^{h}$

Pour simplifier les notations, dans la suite de ce document, la première sera appelée loi linéaire et la deuxième loi puissance.

La Figure 4-25 permet de comparer les lois moyennes de portance locale par essence par rapport à la loi feuillu présentée par EHLBECK & WERNER [91] dans le CIB 25-7-2 (loi n'ayant pas été retenue pour la rédaction du code de calcul). Hormis pour le peuplier, les lois moyennes obtenues par essais sont supérieures à la loi présentée dans cette publication. Par rapport aux essais, l'EUROCODE 5 a donc naturellement tendance à sous-estimer la portance locale des bois feuillus français.

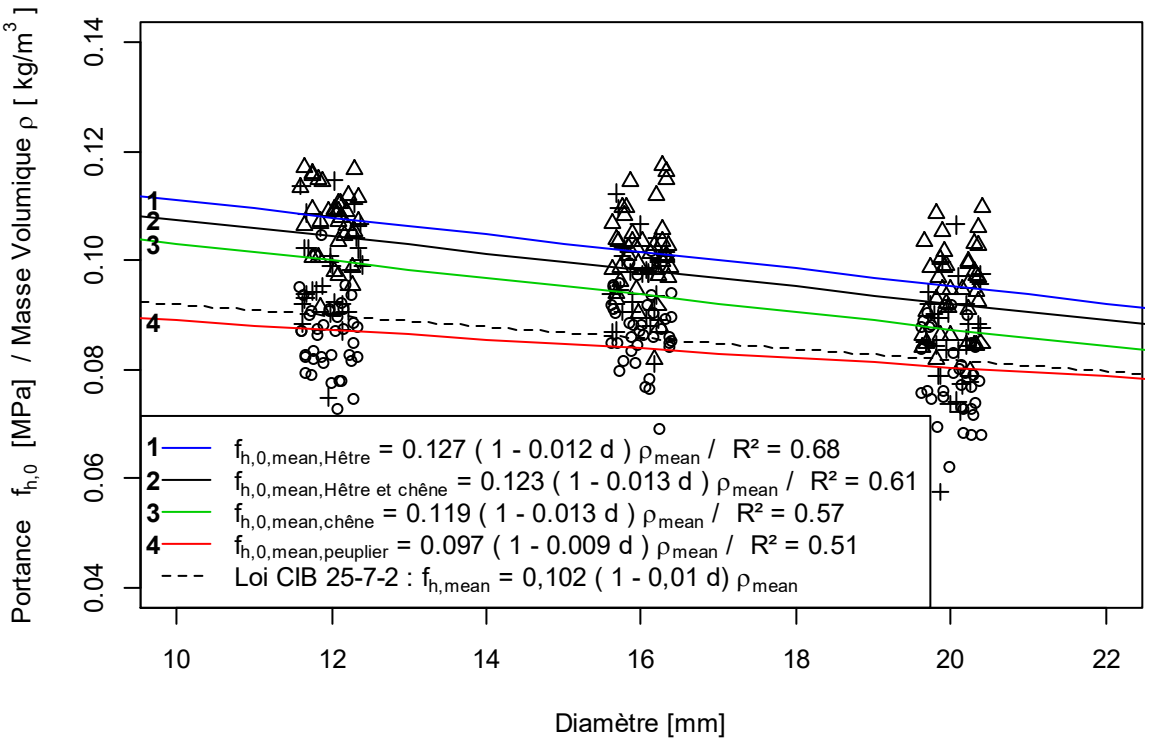


Figure 4-25 : Loi linéaire de la portance locale à 0° en fonction du diamètre de l'organe.

La différence par rapport à la loi CIB 25-7-2 pour le hêtre peut être expliquée, d'une part, par la variabilité naturelle liée à la croissance de l'arbre et d'autre part, par la différence de rugosité entre les tiges lisses utilisées dans leurs essais et les tiges en acier galvanisé utilisées dans la campagne expérimentale.

Les différentes lois caractéristiques peuvent être déterminées (cf Tableau 4-IV), selon la méthode utilisée par EHLBECK & WERNER [91], à partir des régressions linéaires moyennes de la Figure 4-25 et des COV de masses volumiques et de portances locales, en introduisant le facteur de réduction γ tel que :

$$\gamma = \frac{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\ (\mu; COV_{fh})\right)}{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\ (\mu; COV_{\rho})\right)} \tag{4.34}$$

Tableau 4-IV : Lois caractéristiques de la portance à 0° par essence.

Essence	$f_{h,0,mean} =$	γ	$f_{h,0,k} =$
Peuplier	$0{,}097(1 - 0{,}009\ d)\ \rho_{mean}$	0,930	$0{,}091\ (1 - 0{,}009\ d)\ \rho_k$
Hêtre	$0{,}127(1 - 0{,}012\ d)\ \rho_{mean}$	0,875	$0{,}111\ (1 - 0{,}012\ d)\ \rho_k$
Chêne	$0{,}119(1 - 0{,}013\ d)\ \rho_{mean}$	0,869	$0{,}103\ (1 - 0{,}013\ d)\ \rho_k$

Il serait trop défavorable pour la valorisation du hêtre et du chêne de généraliser cette méthode de détermination de la loi caractéristique à partir de la loi moyenne en regroupant les 3 essences (peuplier, hêtre et chêne). En effet, les écarts sont bien trop importants entre le peuplier d'une part et le hêtre et le chêne d'autre part, ce qui conduit à un coefficient de variation de 26% pour la portance locale et de 20% pour la masse volumique.

La loi globale moyenne donne une équation linéaire (4.35) et un coefficient de réduction $\gamma = 0{,}7903$ ce qui conduit à l'équation caractéristique (4.36). Ainsi l'utilisation de cette relation conduit à une loi inférieure à la loi caractéristique du peuplier impliquant inévitablement une sous-évaluation importante des propriétés mécaniques du hêtre et du chêne. Cette approche n'est donc pas concluante pour permettre une compétitivité des bois feuillus par rapport aux bois résineux.

$$f_{h,0,mean,global} = 0{,}116\ (\ 1 - 0{,}011\ d)\ \rho_{mean} \tag{4.35}$$

$$f_{h,0,k,global} = 0{,}091\ (\ 1 - 0{,}011\ d)\ \rho_{k} \tag{4.36}$$

La loi générale spécifique aux bois feuillus proposée (4.38), se limite aux résultats combinés du hêtre et du chêne qui ont des valeurs de portance locale et de masse volumique comparables, tout en maximisant les COV et en les fixant pour la portance locale à 15% et pour la masse volumique à 7,5% :

$$f_{h,0,mean} = 0{,}123\ (\ 1 - 0{,}013\ d)\ \rho_{mean} \quad et \quad \gamma = \frac{X(P = 0{,}05|N\ (\mu; 0{,}15))}{X(P = 0{,}05|N\ (\mu; 0{,}075))} = 0{,}859 \tag{4.37}$$

$$f_{h,0,k} = 0{,}106\ (\ 1 - 0{,}013\ d)\ \rho_{k} \tag{4.38}$$

Cette nouvelle relation permet, par rapport à la loi actuelle de l'EUROCODE 5, un gain moyen de 24% de portance locale pour des organes compris entre 12 et 20mm de diamètre. L'erreur relative entre cette nouvelle équation et les essais est de 6,2 % pour le chêne et pour le hêtre, le modèle à tendance à sous-estimer la portance de 8,2%. Pour la suite du document, il sera retenu l'expression (4.38) pour la loi linéaire.

Pour être plus conservatif, il est possible de fixer des COV plus élevés, avec par exemple 20% pour la portance locale et 10% pour la masse volumique. Cette nouvelle hypothèse donne la loi caractéristique (4.39) qui permet tout de même un gain de 15% de portance sur la même plage de diamètre d'organes. Une augmentation significative de la portance locale conduit obligatoirement à une diminution du nombre d'organes dans l'assemblage et donc à une diminution du coût de celui-ci.

$$f_{h,0,k} = 0{,}099\ (\ 1 - 0{,}013\ d)\ \rho_{k} \tag{4.39}$$

Cette nouvelle loi propose ainsi une amélioration substantielle de la portance pour le hêtre et le chêne, mais elle introduit deux lois différentes dans l'EUROCODE 5. Une réservée aux résineux (et certains feuillus comme le peuplier) et une autre destinée aux bois feuillus. L'utilisation d'une loi puissance générale feuillus/résineux, telle que proposée par HUBNER & ALL, peut également être envisagée.

L'étude de la portance locale avec les lois puissances donnent les résultats présentés par la Figure 4-26. Il est observé une forte variabilité des coefficients entres les essences, notamment la puissance sur la masse volumique qui varie de 0,71 à 1,64 entre le peuplier et le hêtre. La loi puissance globale pour les 3 essences donne l'équation (4.40) qui est assez proche, tout en étant supérieure aux valeurs de la loi proposée par HUBNER & All (4.41).

$$f_{h,mean} = 0{,}01237 . \rho_{mean}^{1{,}396} . d^{-0{,}196} \quad (4.40)$$

$$f_{h,0,mean} = 0{,}0177 . \rho^{1{,}29} . d^{-0{,}179} \quad (4.41)$$

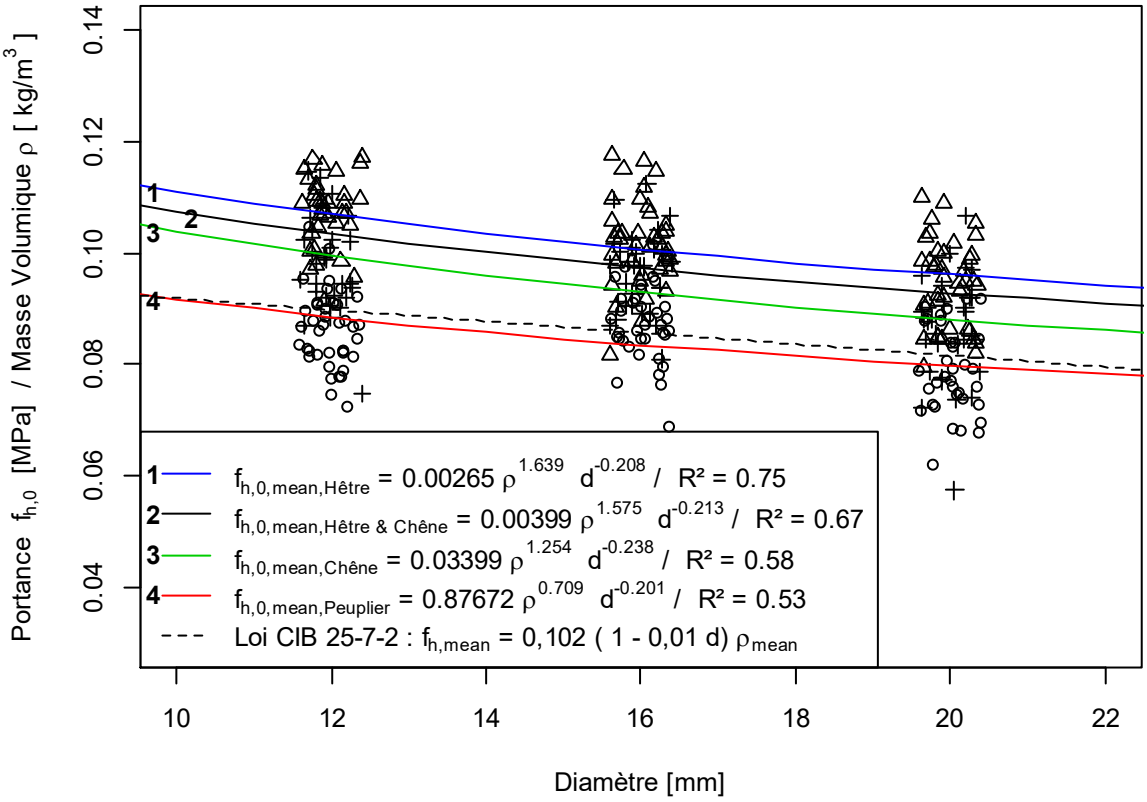


Figure 4-26 : Loi puissance de la portance locale à 0° en fonction du diamètre de l'organe.

Pour la transformation en loi puissance, le coefficient de conversion γ intègre la puissance g liée au terme de la masse volumique :

$$\gamma = \frac{X\left(P = 0{,}05 \middle| N\left(\mu; COV_{fh}\right)\right)}{\left(X\left(P = 0{,}05 \middle| N\left(\mu; COV_{\rho}\right)\right)\right)^{g}} \quad (4.42)$$

La loi globale caractéristique, avec les COV de 26% pour la portance et 20% pour la masse volumique, donne un facteur correctif de $\gamma = 0{,}924$ et donc la loi :

$$f_{h,k} = 0{,}0114 . \rho_{k}^{1{,}396} . d^{-0{,}196} \quad (4.43)$$

La Figure 4-27 synthétise la prédiction de la portance à 0° selon les lois linéaires (4.37) & (4.38) spécifique aux bois feuillus et les lois puissances générales (4.40) & (4.43) par rapport aux données d'essais. Une augmentation des valeurs de portance entre les lois actuelles (celles de l'EUROCODE 5 et de la loi de HUBNER & All) et les nouvelles lois formulées est observée.

La loi puissance (4.43) permet de grouper l'ensemble des essences feuillues sous une loi générale. Une étude avec des feuillus de plus haute densité (bois tropicaux) et avec des résineux moins denses devrait permettre de compléter cette loi pour proposer une révision profonde de l'EUROCODE 5. Cette loi a tendance à légèrement sur évaluer les valeurs caractéristiques pour le peuplier, cela est dû à la différence de taille des populations, avec deux fois plus d'éprouvettes avec une densité comprise entre 600 et 850 kg/m^3 que d'essais réalisés dans le peuplier. Pour améliorer cette loi de prédiction et proposer un réel critère EUROCODE 5, il faudrait que la plage de masse volumique des bois utilisables en construction soit uniformément représentée en nombre d'échantillons.

La loi linéaire (4.38) a l'avantage d'être similaire à la loi actuelle du code de calcul tout en offrant une précision de prédiction suffisante des valeurs caractéristiques. C'est également, au regard des courbes, la loi la plus conservative pour les fortes masses volumiques. C'est donc cette loi qu'il conviendrait de retenir dans le cadre d'une modification du code de calcul.

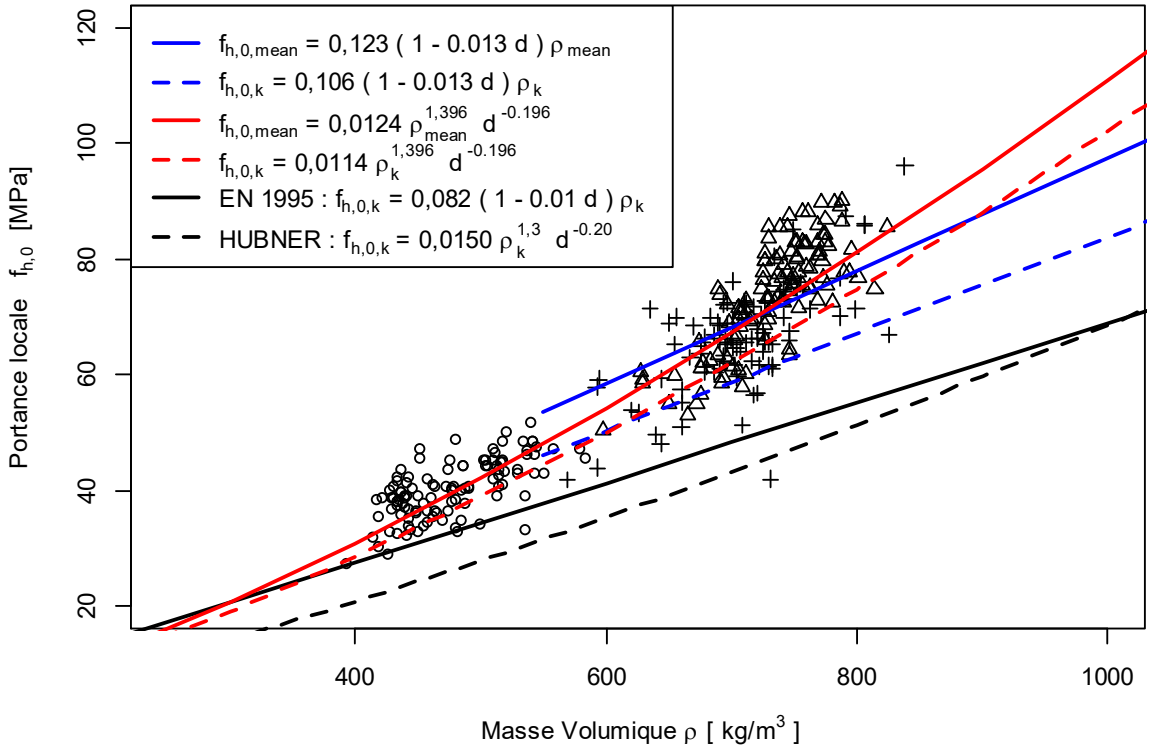


Figure 4-27 : Comparaison des lois de prédiction linéaires feuillus et puissance globale.

4.2.4. Loi de portance à 90°

De la même manière que pour la portance à 0°, la relation forte entre portance locale perpendiculaire au fil du bois et masse volumique a été démontrée, ce qui permet d'aboutir à une loi du type $\frac{f_h}{\rho} = f(d)$:

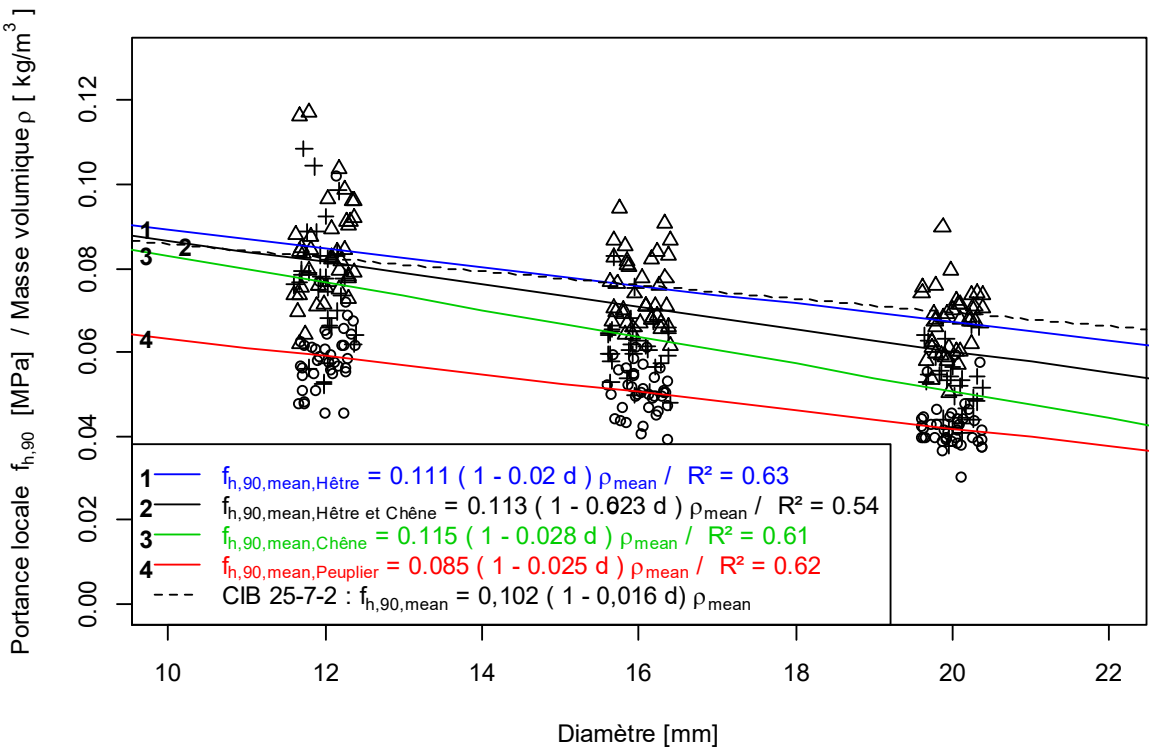


Figure 4-28 : Loi linéaire de la portance locale à 90° en fonction du diamètre de l'organe.

La Figure 4-28 montre que la portance locale perpendiculaire au fil du bois est largement dépendante de l'essence de l'éprouvette. Les essais permettant la rédaction des EUROCODES (CIB 25-7-2) ont été réalisés sur du hêtre et les résultats obtenus en 1992 sont comparables à ceux obtenus dans le cadre de notre campagne d'essais. Comme indiqué dans la bibliographie, la rugosité de tiges n'a pas d'incidence sur la portance à 90°. Les légères différences observées sont donc explicables par la variabilité naturelle liée à la croissance du bois.

De la même manière que pour la portance à 0°, les lois de portance caractéristiques sont établies à partir des COV et synthétisées dans le Tableau 4-V. Dans L'EUROCODE 5, la détermination de la portance à 90° est basée sur la formule de HANKINSON en introduisant un coefficient k_{90} tel que :

$$k_{90} = \frac{f_{h,0,k}}{f_{h,90,k}} \qquad (4.22)$$

Tableau 4-V : Lois caractéristiques de la portance à 90° et facteur k_{90} par essence.

Essences	$f_{h,90,mean} =$	γ	$f_{h,90,k} =$	$k_{90} =$
Peuplier	$0{,}085\ (1 - 0{,}025\ d)\ \rho_{mean}$	0,724	$0{,}061\ (1 - 0{,}025\ d)\ \rho_k$	$1{,}009 + 0.075\ d$
Hêtre	$0{,}111(1 - 0{,}020\ d)\ \rho_{mean}$	0,740	$0{,}083(1 - 0{,}020\ d)\ \rho_k$	$1{,}239 + 0.022\ d$
Chêne	$0{,}115(1 - 0{,}028\ d)\ \rho_{mean}$	0,657	$0{,}076\ (1 - 0{,}028\ d)\ \rho_k$	$0{,}839 + 0.075\ d$
Hêtre et Chêne	$0{,}113(1 - 0{,}023\ d)\ \rho_{mean}$	0,677	$0{,}077\ (1 - 0{,}023\ d)\ \rho_k$	$1{,}146 + 0.040\ d$

Les équations k_{90} sont obtenues en calculant pour différents diamètres, le produit $f_{h,0,k}$ par $f_{h,90,k}$ et en établissant, comme sur la Figure 4-29, la régression linéaire entre ce produit et le diamètre. Il peut être remarqué que pour toutes les configurations, ce facteur est supérieur aux facteurs proposés par l'EUROCODE 5 et que ce dernier a donc tendance à surestimer la portance à 90°. Néanmoins, la sinistralité faible peut s'expliquer. En effet, le nombre de constructions en feuillus calculées selon L'EUROCODE 5 est faible et qui plus est, les masses volumiques sont systématiquement sous-estimées. Par exemple, les bois utilisés sont classés visuellement D24 ce qui conduit à une masse volumique de 485 kg/m^3, là où la masse volumique caractéristique observée dans le cadre de la campagne d'essais est de 640 kg/m^3. Cette dernière correspond à la masse volumique du D50 qui n'est pas atteignable avec les méthodes actuelles de classement. En appliquant ce principe, les 30% de différence de masse volumique entre la prédiction par méthode de classement visuel et la masse volumique réelle observée est suffisante pour combler l'écart entre la prédiction actuelle de l'EC5 et la loi trouvée par essai. Une valorisation des bois feuillus en Europe, avec une augmentation des propriétés de masse volumique plus en adéquation avec les grandeurs réelles, passe donc obligatoirement par une correction de cette équation de l'EUROCODE 5 pour que le code de calcul reste sécuritaire.

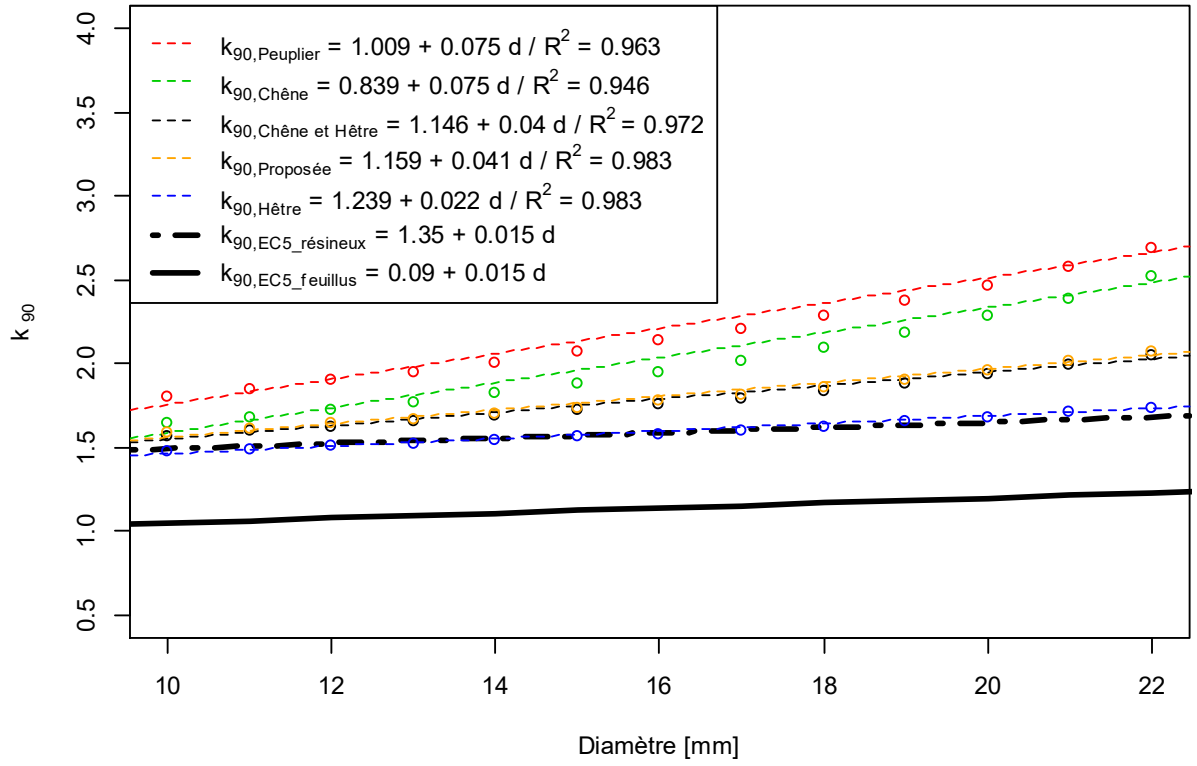


Figure 4-29 : Facteur k_{90} par essence comparé aux facteurs actuels de l'EUROCODE 5.

La loi (4.44) est obtenue en utilisant pour la portance à 0°, la loi (4.38) : $f_{h,0,k} = 0{,}106\ (1 - 0{,}013\ d)\ \rho_k$ et en prenant un COV de 25% pour la portance à 90° (cohérente avec le 23% expérimental) et 7,5% pour la masse volumique. L'erreur relative entre cette nouvelle équation et les essais est de 5,2 % pour le chêne, alors que pour le hêtre, cette nouvelle loi à tendance à sous-estimer la portance de 26,8%. Cette nouvelle formule de prédiction de la portance permet donc de limiter la surestimation de la portance à 90° de 20,8% faite actuellement par L'EUROCODE 5 pour le chêne.

$$k_{90,Proposée} = 1{,}159 + 0{,}041.\ d \qquad (4.44)$$

Le rapport des portances à 0 et 90° est largement impacté par les essences de bois. Pour proposer un critère normatif, trois alternatives sont ouvertes :

- Multiplier le nombre d'essais et introduire différentes essences pour définir une loi moyenne plus générale.
- Utiliser la loi la plus sécuritaire, celle qui maximise le facteur de réduction, donc la loi k_{90} du peuplier.
- Proposer la mise en place d'un critère propre à chaque essence dans la définition de la portance à 0° et du facteur k_{90}.

L'analyse du facteur k_{90} peut également être regardée de manière globale en utilisant une loi puissance indépendamment de l'essence de bois utilisée. La loi moyenne (4.45) établie donne quasiment la même estimation que la loi moyenne trouvée par HUBNER & All (Cf Figure 4-30). Les différences de portances observées pour un angle de 0° proviennent donc surement d'une différence de rugosité de l'organe d'assemblage.

$$f_{h,90,mean} = 9{,}92.10^{-4}.\rho_{mean}^{1{,}899}.d^{-0{,}572} \quad (4.45)$$

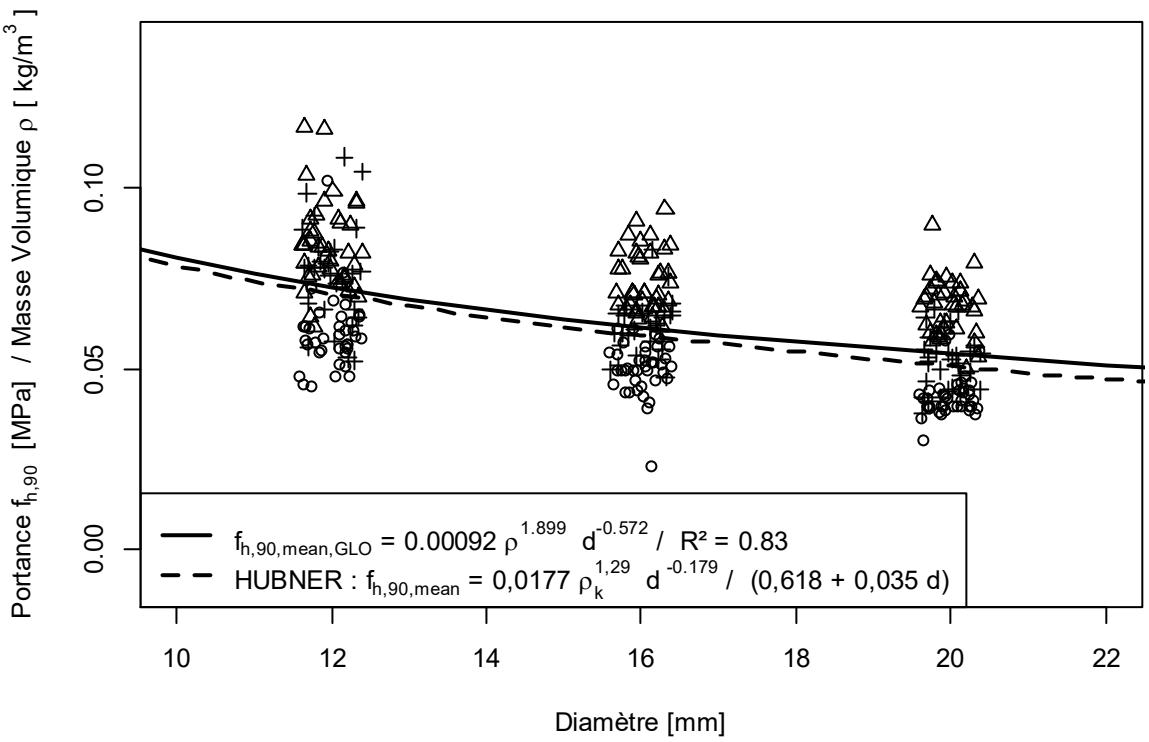


Figure 4-30 : Loi puissance moyenne de la portance à 90° indépendamment de l'essence de bois.

En suivant la même démarche sur l'estimation de la loi caractéristique, il est possible de définir l'équation du coefficient k_{90} spécifique à la loi puissance (4.43) :

$$f_{h,90,k} = 9{,}21.10^{-}4\,.\ \rho_{mean}^{1{,}899}.d^{-0{,}572} \quad (4.46)$$

$$k_{90} = 1{,}23 + 0{,}05.d \quad (4.47)$$

La Figure 4-31 présente la synthèse de toutes les lois de portance perpendiculaire au fil exprimées dans le cadre du projet de recherche en comparaison des essais et des lois EUROCODE 5. Le trait noir plein représente les deux estimations de la portance à 90° faites actuellement par le code de calcul. La prédiction semble correcte pour le peuplier en considérant qu'il se comporte comme un résineux (hypothèse actuelle de L'EUROCODE 5) et pour le chêne, une surestimation de la portance est observée par la loi actuelle de la portance à 0° et le ratio (4.23) : $k_{90} = 0{,}9 + 1{,}35\ d$.

Sur la plage de masse volumique 600 à 800 kg/m^3, les lois linéaire et puissance donnent sensiblement les mêmes estimations des portances caractéristiques qui permettent de corriger la sur évaluation de l'EUROCODE 5.

Il est à noter que pour les bois feuillus (masse volumique supérieure à 550 kg/m^3) la nouvelle loi puissance conduit à des résultats inférieures à la loi générale (4.20) proposée par HUBNER & All alors que pour les résineux toutes les lois conduisent à des résultats assez similaires.

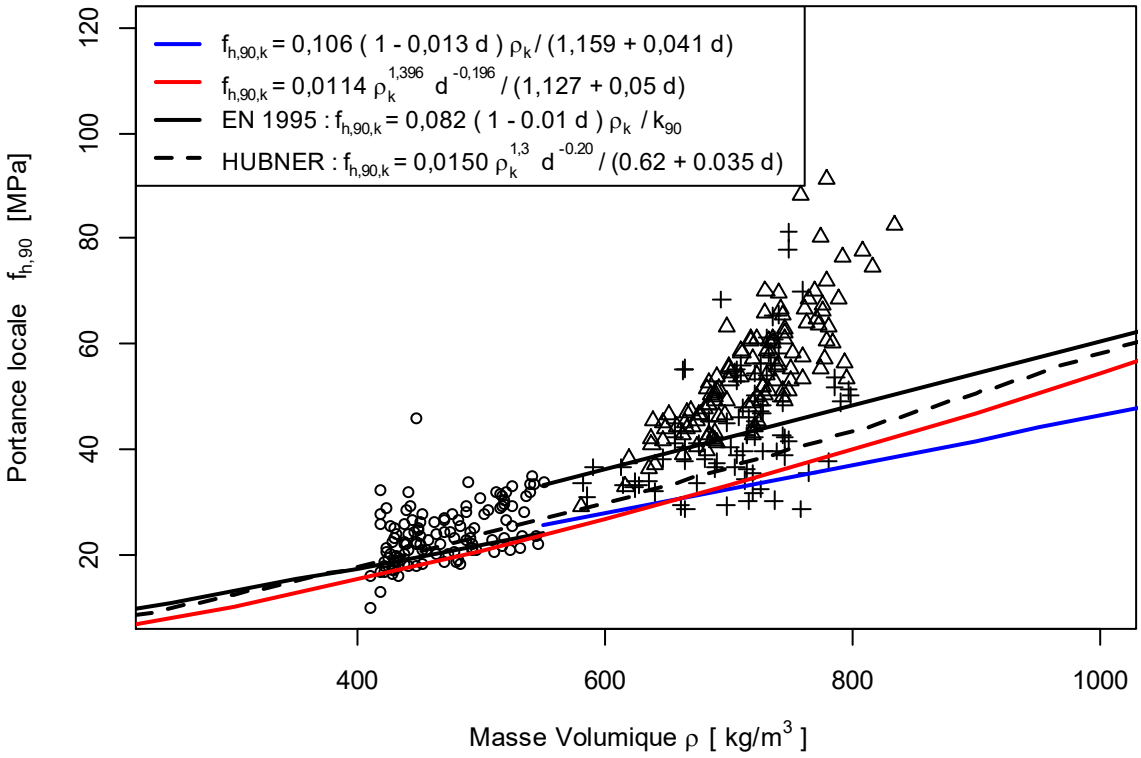


Figure 4-31 : Synthèses des lois de portance à 90°.

Sur une plage de diamètre comprise entre 12 et 20mm avec une masse volumique caractéristique de 650 kg/m^3, la loi de l'EUROCODE 5 surestime la portance perpendiculaire au fil entre 23 et 37% par rapport aux lois proposées. La différence entre la loi (4.20) de HUBNER & All et la loi proposée varie entre 10 et 13% avec les mêmes hypothèses.

4.2.5. Variation de la portance en fonction de l'angle

Après s'être intéressé au comportement selon les directions principales d'orthotropie du bois, il est intéressant de porter l'attention à la variation de la portance en fonction de l'angle en exprimant $\frac{f_h}{\rho} = f(d)$ pour les angles de 30 et 60°.

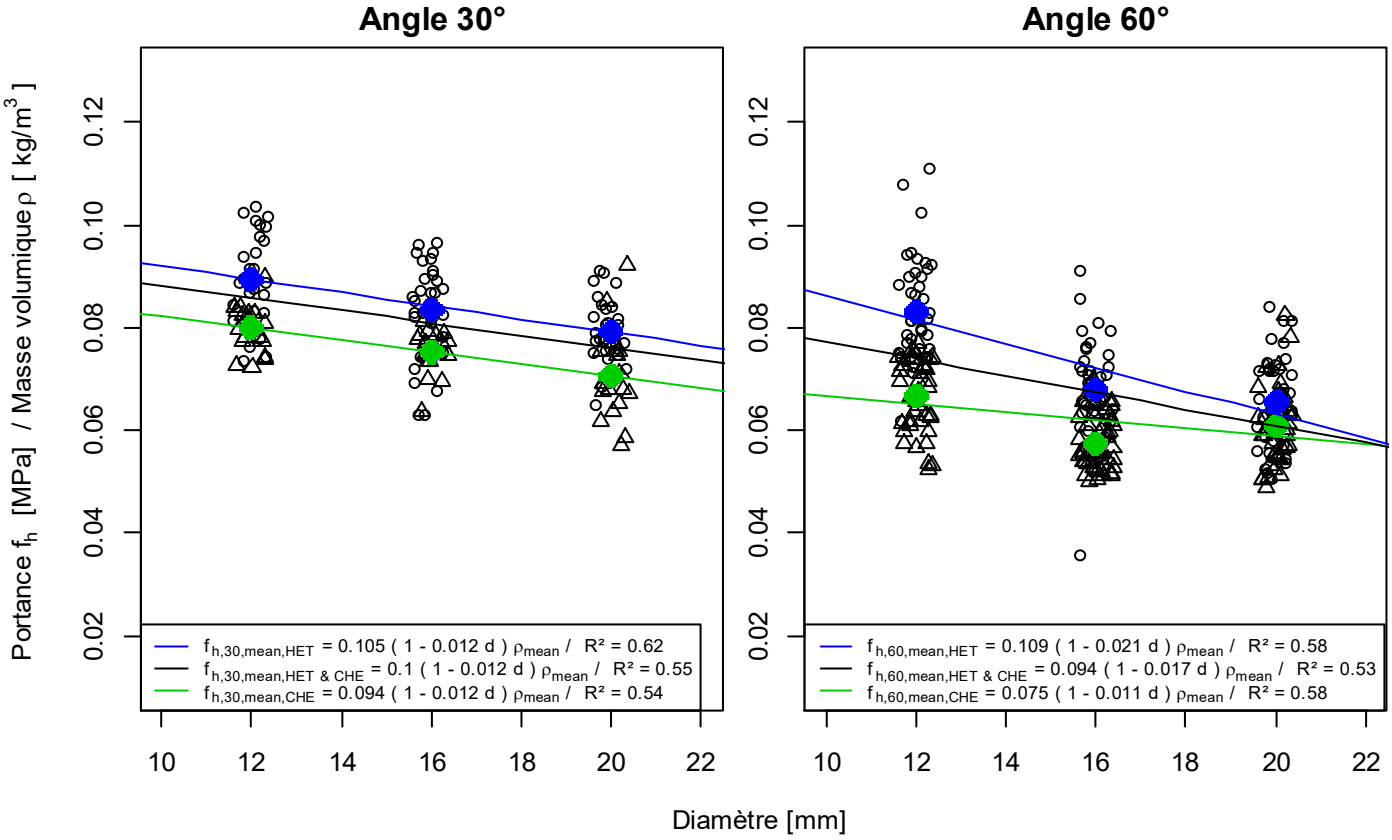


Figure 4-32 : Portance à 30° et 60° en fonction du diamètre.

Dans le premier graphique de la Figure 4-32 la variation de la portance en fonction du diamètre est quasiment la même pour le hêtre et le chêne pour un angle de 30°. A contrario, pour l'enfoncement à 60°, les essais se distinguent par trois phénomènes :

- Le chêne est moins sensible que le hêtre sur la diminution de la portance lorsque le diamètre de l'organe augmente.
- Comme FRANKE & MAGNIERE [94] le montrent, la portance à 60° est inférieure à la portance à 90° pour le hêtre et le chêne.
- Comme FRANKE & MAGNIERE [94] le montrent, la portance du diamètre 20 est supérieure à la portance du diamètre 16.

Compte tenu de ces observations, parmi toutes les équations proposées par SCHWEIGLER & All [97], seule l'équation de HANKINSON avec les coefficients trigonométriques inférieurs à 2 permet de tenir compte d'une portance à 60° inférieure à la portance à 90°. A partir de là, la formule générale de HANKINSON sera retenue pour établir une équation de la portance en fonction de l'angle :

$$f_{h,\alpha} = \frac{f_{h,0} \cdot f_{h,90}}{f_{h,0} \cdot sin^{b_1}\alpha + f_{h,90}\, cos^{b_2}\alpha} \qquad (4.48)$$

Il est alors possible d'étudier cette configuration en proposant des coefficients b_1 et b_2 égaux ou différents, pouvant varier ou non en fonction du diamètre de l'organe. Les 4 scénarios envisageables sont alors les suivants :

- Configuration 1 : $b_1 = b_2$
- Configuration 2 : $b_1 = b_2 = f(d)$
- Configuration 3 : b_1 et b_2 différents
- Configuration 4 : $b_1 = f(d)$ et $b_2 = f(d)$ différents

Un algorithme de résolution a été créé dans le logiciel $\mathbb{R}$ pour déterminer les différents coefficients selon chaque scénario. Pour trouver les coefficients du modèle, il est utilisé les 2/3 des données extraites de manière aléatoire et le tiers restant pour tester la validité du modèle. Les différents coefficients trouvés à partir de cet algorithme sont donnés dans le Tableau 4-VI.

Pour les portances aux angles de 30 et 60°, la configuration 1 donne une différence moyenne comprise entre 9,6% et 11,5%.

Le modèle selon la configuration 2 ne change pas significativement la prédiction, celle-ci est améliorée de seulement 1%. Il n'est donc pas pertinent d'en tenir compte car la complexification de l'équation trop importante par rapport au gain économique qu'elle pourrait procurer.

L'introduction des deux coefficients b_1 et b_2 différents donne une différence moyenne maximale de 11.3% entre la prédiction et la mesure pour la configuration 3 et 10,5 % pour la configuration 4.

Tableau 4-VI : Coefficients b_1 et b_2 de (4.48) par essence et pour chaque scénario.

Essence	$b_1 = b_2$	$b_1 = b_2 = f(d)$	b_1	b_2	$b_1 = f(d)$	$b_2 = f(d)$
Hêtre	*1,650*	*0,015 d² - 0,47 d + 5,2*	*1,76*	*1,51*	*-0,01 d² + 0,35 d – 1,22*	*0,035 d² - 1,17 d + 10,8*
Chêne	*1,698*	*0,008 d² - 0,164 d + 2,252*	*1,782*	*1,416*	*-0,032 d² + 0,977 d – 5,543*	*0,106 d² - 3,001 d + 21,811*
Hêtre + chêne	*1,624*	*0,011 d² - 0,310 d + 3,716*	*1,80*	*1,43*	*-0,018 d² + 0,044 – 2,88*	*0,044 d² - 1,33 d + 11,1*

Compte tenu de cette analyse, la loi utilisée pour décrire l'évolution de la portance en fonction de l'angle entre l'effort et le fil du bois sera celle de la configuration 1, à savoir :

$$f_{h,\alpha} = \frac{f_{h,0} \cdot f_{h,90}}{f_{h,0} \cdot \sin^{b_1} \alpha + f_{h,90} \cos^{b_1} \alpha} \quad (4.49)$$

Le calcul réglementaire nécessite obligatoirement l'utilisation de valeurs caractéristiques. Les essais montrent des coefficients de variation différents selon les angles testés. Par conséquent, la nouvelle loi ne peut consister en un simple décalage de la loi moyenne en une loi caractéristique en fonction des coefficients de variation de chacune des mesures. La loi doit plutôt passer par les points caractéristiques de chaque série d'essais.

Pour trouver cette loi, les hypothèses suivantes ont été utilisées :

- Les données hêtre et chêne sont utilisées ensemble car l'étude précédente ne montre pas de forte variation du coefficient b_1 en fonction de l'essence.
- Pour la portance à 0°, la valeur caractéristique est déduite à partir de l'équation linéaire trouvée pour $f_{h,0,k}$ (4.38).
- Pour la portance à 90°, la valeur caractéristique est déduite à partir des équations linéaires $f_{h,0,k}$ et k_{90} développées précédemment (4.44).
- Les points de couleur représentent les valeurs caractéristiques réelles des séries d'essais.

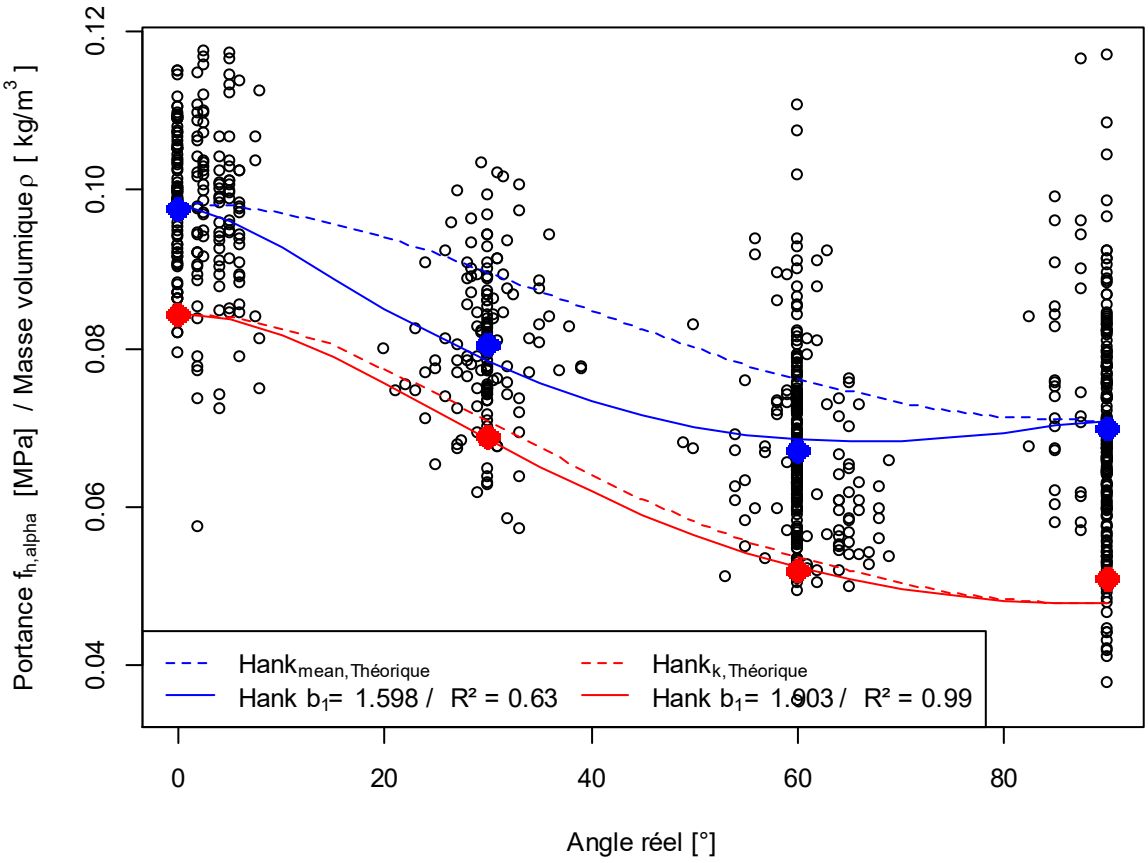


Figure 4-33 : Lois de portance locale moyenne et caractéristique en fonction de l'angle α entre l'effort et le fil du bois.

La Figure 4-33 met en évidence que les comportements moyen et caractéristique de la portance à l'angle sont sensiblement différents. Au vu du modèle statistique, la formule de HANKINSON de l'EUROCODE 5 est suffisante pour estimer la variation de la portance en fonction de l'angle. Néanmoins, l'utilisation de la formule de HANKINSON avec les lois de portance à 0 et 90°, de l'EC5 sous-estime la portance de 7.6% pour les angles de 30° et la surestime de 12.4% pour les angles de 60°. La même formule de HANKINSON avec les nouvelles lois de portance linéaire à 0 et 90° donne une différence de 4.3% pour un angle de 30° et 8.4 % pour un angle de 60°, ce qui améliore la prédiction de la portance en fonction de l'angle.

La même analyse menée avec les lois de portance puissance donnent des précisions similaires pour les estimations de portance caractéristiques à 30 et 60° avec un coefficient $b_1 = 2{,}033$.

4.2.6. Conclusions

Les essais de portance selon les différents angles ont permis de constater les éléments suivants avec les équations de l'EUROCODE 5 :

- Pour le peuplier, la loi de portance à 0° permet une bonne estimation des propriétés mécaniques. L'équation k_{90} combinée à la loi de portance à 0° permet une estimation correcte de la portance à 90°.
- L'équation de portance à 0° sous-estime la portance caractéristique du chêne et du hêtre.
- Le coefficient k_{90} combiné à la loi de portance à 0° de l'EUROCODE 5 donne une très bonne estimation de la portance à 90° pour le hêtre (entre 0 et 2%) mais sur estime la portance dans le chêne de plus de 20%.
- Pour la portance à l'angle, l'utilisation de la formule de HANKINSON avec les lois de portance de l'EUROCODE 5 permet une erreur sur l'estimation de la portance comprise entre 8 et 12%.

Pour proposer une meilleure compétitivité des bois feuillus par rapport au bois résineux il convient d'améliorer la prédiction de la portance à 0° et ainsi envisager de réduire le nombre d'organes dans les assemblages. Toute modification de la loi de portance à 0° nécessite de modifier le coefficient k_{90} de transformation entre la loi à 0° et la loi à 90° mais également les coefficients de la loi de HANKINSON.

Les résultats d'essais ont permis deux approches différentes :

- Proposer des lois linéaires sur le même format que l'EUROCODE 5 valable uniquement pour le hêtre et le chêne :
  $f_{h,0,k} = 0{,}106\ (\ 1 - 0{,}013\ d)\ \rho_k\ \ (\mathbf{4.38})\ \ et\ \ \ k_{90} =\ 1{,}159 + 0{,}041.d\ \ (\mathbf{4.44})$
- Proposer une loi globale sous la forme d'une fonction avec des termes en puissance valable pour les 3 essences testées :
  $f_{h,0,k} = 0{,}0114\ .\ \rho_k^{1{,}396}.\ d^{-0{,}196}\ \ (\mathbf{4.43})\ \ et\ \ \ k_{90} = 1{,}23 + 0{,}05.d\ \ \ (\mathbf{4.47})$

Cependant, pour les deux dernières équations, la différence du nombre d'échantillons entre, d'une part, le peuplier et d'autre part, le hêtre et le chêne, conduit à légèrement surévaluer la portance du peuplier. Pour proposer cette loi générale dans la révision du code de calcul, un plus grand nombre d'essais avec une répartition homogène de leur masse volumique sur la plage complète des bois utilisables en construction (bois résineux et bois tropicaux) semble indispensable.

Au vu des écarts observés entre les essais présentés et ceux observés dans la bibliographie pour la portance à 0°, il devrait être pris en compte un paramètre lié à la rugosité entre la tige et le bois pour normaliser l'estimation de la portance. Si ce n'est pas le cas, les essais de portance devraient être toujours réalisés avec des broches lisses pour être conservatif.

Peu importe la loi utilisée (linéaire ou puissance), les essais ont confirmé que le comportement moyen de la portance en fonction de l'angle entre l'effort et le fil du bois était différent de la loi de HANKINSON de l'EUROCODE 5 avec un coefficient $b_1 = 1{,}598$ dans la relation (4.49). Néanmoins, pour les valeurs caractéristiques, la formule de HANKINSON, telle qu'elle est écrite dans le code de calcul, avec un coefficient $b_1 = 2$ permet d'estimer convenablement les portances quelle que soit l'utilisation d'une loi linéaire ou puissance définie précédemment.

4.3. ESSAIS D'ASSEMBLAGE

4.3.1. Protocole d'essai

Le protocole suivant décrit l'ensemble des éléments mis en place pour réaliser les essais d'assemblage.

La campagne expérimentale a pour but de vérifier les équations de JOHANSEN, le critère n_{ef} ainsi que l'équation de la raideur exprimée dans l'EUROCODE 5. Au regard des manques exposés dans la bibliographie, l'approche choisie pour l'analyse du critère n_{ef} et de la raideur consiste à étudier leur évolution en fonction de l'élancement de l'organe dans le bois.

4.3.1.1. Normes

Les essais d'assemblages ainsi que la détermination des propriétés physiques associées sont encadrées par le corpus réglementaire suivant :

- NF EN 26891 [105] : Définition des protocoles d'essais et détermination des précisions de mesures requises.
- NF EN 384 [25]: Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et des masses volumiques.
- NF EN 14358 [70] : Détermination des valeurs caractéristiques.

4.3.1.2. Montage

Pour réaliser les essais, les éprouvettes sont placées entre les deux plateaux de compression de la machine d'essais universelle Zwick (cf Figure 4-34). Afin d'assurer une parfaite application des charges sur les éprouvettes d'assemblage, les extrémités des éléments assemblés sont recoupées une fois ces derniers montés, pour obtenir deux faces parfaitement parallèles.

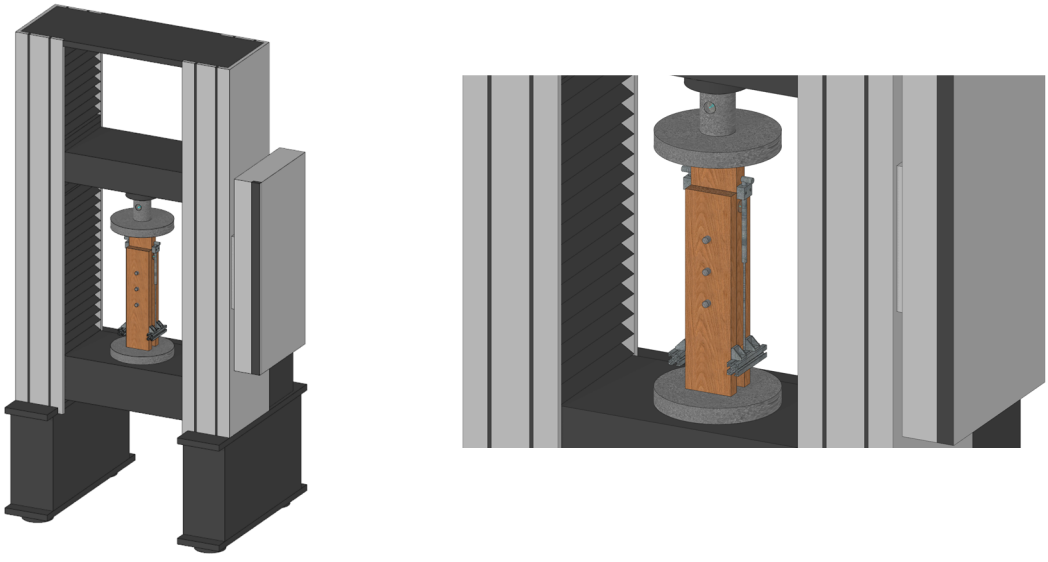


Figure 4-34 : Disposition des assemblages sur la machine d'essais universel Zwick Z250.

4.3.1.3. Sections, matériaux et dimensions

Une première série de 18 essais initiaux sur une configuration bois/métal a été réalisée en faisant varier les épaisseurs des bois. La principale conclusion de ces essais est que les différentes imprécisions d'usinage dans le bois et/ou dans le métal ont faussé le comportement des assemblages et donc les mesures de raideurs. Ceci n'a pas permis de travailler sur l'équation de la raideur telle que proposée dans l'EUROCODE 5. Se faisant, une deuxième campagne d'essais avec des assemblages bois/bois a été initiée pour s'affranchir des précisions d'usinage. Les deux principes d'assemblage testés sont présentés dans la Figure 4-35, les compositions et les géométries des assemblages ont été choisies pour ne pas atteindre une charge à rupture supérieure à 250 kN afin d'être éprouvés simplement sur la machine d'essais universelle ZWICK Z250.

La Figure 4-35 précise les principales dimensions retenues pour chaque configuration testée. Les épaisseurs ont été calculées pour que les 3 modes de rupture décris en bibliographie (portance « pure » ou apparition d'une ou de deux rotules plastiques) puissent apparaître. Pour atteindre le mode de rupture 3, un recollage de bois a été réalisé pour atteindre une épaisseur suffisante en utilisant une colle Polyuréthane KLEIBERIT 510. Un effort et un temps de serrage conforme aux préconisations du fabricant ont été respectés. Les bois constituant chaque partie de l'assemblage ont été regroupés pour que les masses volumiques globales soient semblables et ainsi limiter le déséquilibre d'efforts entre les plans de cisaillement.

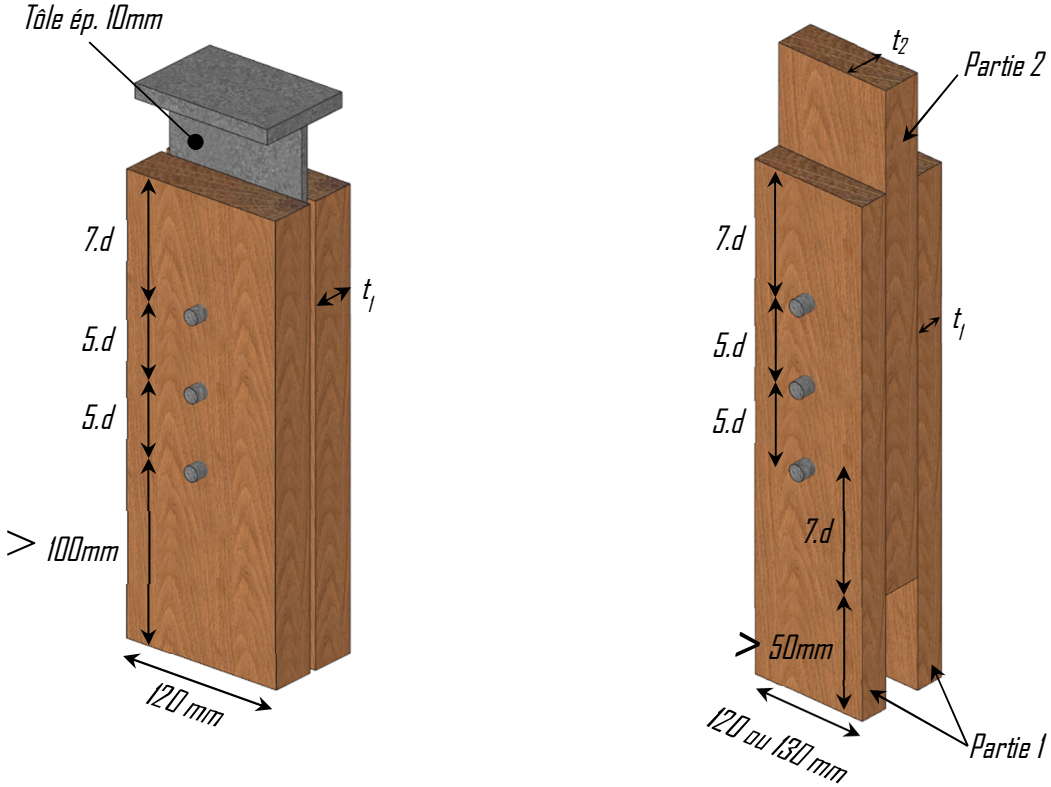


Figure 4-35 : Dimensions des éprouvettes d'essais d'assemblage Bois/Métal (Gauche) & Bois/Bois (Droite).

Avant usinage, les bois ont été conditionnés durant une période de 2 mois à une température de 20°C et une humidité relative de 65% pour tenter d'obtenir une humidité aux alentours de 12%. Par manque de temps et de place dans les étuves, il a été décidé de ne pas réaliser les essais d'humidité par méthode de dessiccation.

Pour les configurations bois/bois, 5 essais par configuration de mode de rupture et de diamètre ont été réalisés et 3 par configurations d'assemblage bois/métal.

Pour maitriser la qualité d'acier des broches, il a été commandé des ronds lisses de diamètre 12 et 16mm en acier S235 en longueur de 18m. Dans chaque barre une éprouvette a été prélevée et testée en traction. Les barres ont ensuite été coupées en tronçons de 1,5m et galvanisées pour obtenir un état de surface similaire à celui mis en jeu lors des essais de portance locale. Les broches ont été réalisées en découpant ces barres métalliques et en chanfreinant une des deux extrémités pour éviter l'éclatement du bois lors de leur insertion.

Pour les assemblages bois/bois mode 1, les perçages ont été réalisés avec des mèches de diamètre 12,5 et 16,5mm. En effet, avec l'utilisation de mèches de diamètre 12 et 16mm les bois avaient tendance à fendre lors de l'enfoncement des broches. Cela est lié au diamètre réel des broches qui est en réalité de 12,3 et 16,4mm.

Les essais de traction sur les tiges métalliques ont permis de trouver les propriétés mécaniques synthétisées dans le Tableau 4-VII. Les ordres de grandeurs en matière de résistance, coefficient de variation et module d'élasticité sont proches de ce qu'il peut être trouvé dans la littérature. Il est à noter que les barres commandées en S235 sont en réalité constituée d'un acier S355.

Tableau 4-VII : Propriétés mécaniques des organes d'assemblages.

	Ø 12 mm	Ø 16 mm
f_y [MPa]	372	356
COV	6,83%	4,29%
f_u [MPa]	457	464
COV	4,0%	0,72%
E [MPa]	212117	224696
COV	5,92%	1,47%

Au niveau des plans de cisaillement, il est mis en place une feuille de papier sulfurisée et de la graisse universelle pour limiter les frottements parasites pouvant modifier les résultats (apparition d'effet de corde par exemple).

4.3.1.4. Dispositifs de mesure

La mesure des efforts au niveau du point de chargement s'est effectuée au moyen d'une cellule de force de 250 kN avec une précision de (± 0,01 kN) en adéquation avec les conditions fixées par la norme.

Pour les essais bois/métal, la mesure du glissement entre les éléments est réalisée avec une acquisition vidéo avec une caméra de marque VDM ACQUISITION au format A3 à 1,0m de distance. Les essais préliminaires montrent une précision de l'ordre de 0,01 mm, en adéquation avec la précision de 0,02mm pour des déplacements inférieurs à 2mm.

Pour les essais bois/bois la mesure du glissement entre les éléments est réalisée en faisant la moyenne de deux capteurs de déplacement de type LVDT de marque HBM ayant une course totale de 200mm placé de part et d'autre de l'éprouvette.

L'organisation du dispositif de mesure est la même que pour la portance locale (cf Figure 4-16). En réglant des pas de temps similaires pour l'enregistrement des données et en utilisant un trigger, les données fournies par les acquisitions vidéo sont enregistrées de manière synchronisée à l'effort appliqué.

4.3.1.5. Données d'essais complémentaires

Afin de permettre un traitement statistique et l'estimation de la résistance selon les EUROCODES, pour chaque éprouvette, les dimensions ont été vérifiées à partir d'une moyenne de 2 mesures de toutes les dimensions prises au pied à coulisse numérique GARANT DC2 ($\mp 0{,}03mm$) à chaque extrémité de l'éprouvette.

A partir de la masse des éprouvettes et de leur volume, la masse volumique des échantillons est calculée.

La pente de fil locale ayant été corrigée lors de l'usinage pour avoir des broches sollicitées selon le sens du fil du bois, la mesure de l'angle n'a pas été réalisée.

Les données de la masse volumique des essais préliminaires bois/métal ont été perdues, mais étant donné que les essais d'assemblages ont été réalisés avec le même lot de bois que les essais de portance, les valeurs mesurées pour les différentes masses volumiques sur les essais de portance à 0° ont été conservées pour l'analyse.

4.3.1.6. Cycle de chargement

Pour l'ensemble des essais, la vitesse de chargement ainsi que le cycle de chargement ont été déterminés suivant les recommandations de la norme EN 26891 [105]. Le cycle de charge est similaire à celui de la portance locale et renvoi à la Figure 4-19. Pour rappel, il se compose des éléments suivants :

- La force $F_{max,est}$ correspond à l'effort théorique maximal calculé à partir des formules de JOHANSEN, de l'équation du $M_{y,rk}$ issue de la RDM et des lois de portance moyennes trouvées par essais.
- Un cycle de charge/décharge entre 10 et 40% de $f_{max,est}$ avec des paliers de 30 secondes de maintien de la charge conformément aux spécifications de la norme.
- La dernière phase de chargement à la même vitesse que les rampes de charge/décharge jusqu'à la rupture de l'assemblage. La rupture systématique par fendage s'obtient en fonction du mode de rupture de la configuration pour des déplacements variant entre 3mm pour le mode 1 jusqu'à 30 mm en mode 3.

4.3.1.7. Méthode d'analyse des essais expérimentaux

4.3.1.7.1. *Traitement des données*

Pour les essais bois/métal, la correction des données force et déplacement est réalisée selon la méthode décrite dans l'Annexe C de ce document.

Pour les essais bois/bois, l'acquisition des LVDT étant réalisée via le poste de pilotage de la machine, aucune dérive n'est observable.

4.3.1.7.2. *Exploitation des courbes d'essais*

La Figure 4-36 représente une courbe type d'essai ainsi que l'ensemble des paramètres déterminés à partir des mesures de force et de déplacement des essais.

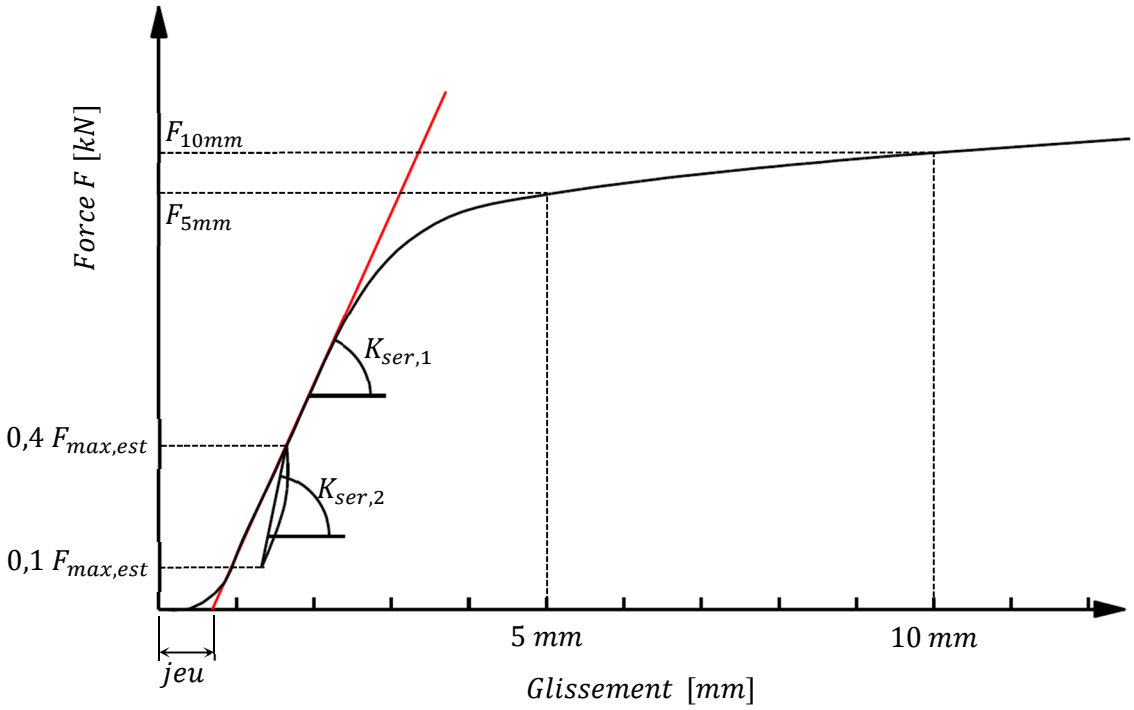


Figure 4-36 : Courbe type des essais d'assemblage.

A partir des mesures, il est possible d'extraire les propriétés mécaniques suivantes :

$K_{ser,1}$: Raideur initiale entre 10 et 40% de la charge $F_{max,est}$, obtenue par régression linéaire entre ces deux bornes, exprimée en kN/mm.

$K_{ser,2}$: Raideur de décharge entre 40 et 10% de la charge $F_{max,est}$, obtenue par régression linéaire entre ces deux bornes, exprimée en kN/mm.

F_{15mm} : Effort pour 15mm d'enfoncement, il correspond à l'effort maximal obtenu entre 0 et 15mm de glissement entre les plans. Selon la norme, la résistance de l'assemblage correspond donc à ce glissement entre les plans. De la même manière, il est possible de trouver F_{5mm} et F_{10mm}.

4.3.1.7.3. *Démarche d'analyse statistique*

L'expression des valeurs caractéristiques au fractile de 5% et des valeurs moyennes caractéristiques se fera en suivant les prescriptions données par l'EN 14358 et rappelées en Annexe D.

Dans le Tableau 4-VIII & le Tableau 4-IX la raideur et la masse volumique moyenne correspondent à des valeurs moyennes caractéristiques alors que toutes les autres valeurs moyennes restent des moyennes arithmétiques.

4.3.2. Résultats expérimentaux significatifs

Les données d'essais sont présentées en Annexe E. Comme imagé sur la Figure 4-37, il est à noter que pour les modes de rupture 1 et 2, le fendage des assemblages apparait quasi systématiquement : avant 5mm de glissement pour le mode 1 et est compris entre 5 et 10mm de glissement pour le mode 2. Les ruptures en mode 1 peuvent être qualifiées de fragiles. Pour le mode 2, dans la majorité des cas, les ruptures se produisent pour des valeurs d'efforts inférieurs aux estimations. A contrario, en mode 3, la majeure partie des essais rompent en ayant atteint les 15mm de glissement et en égalant ou dépassant les estimations de résistance.

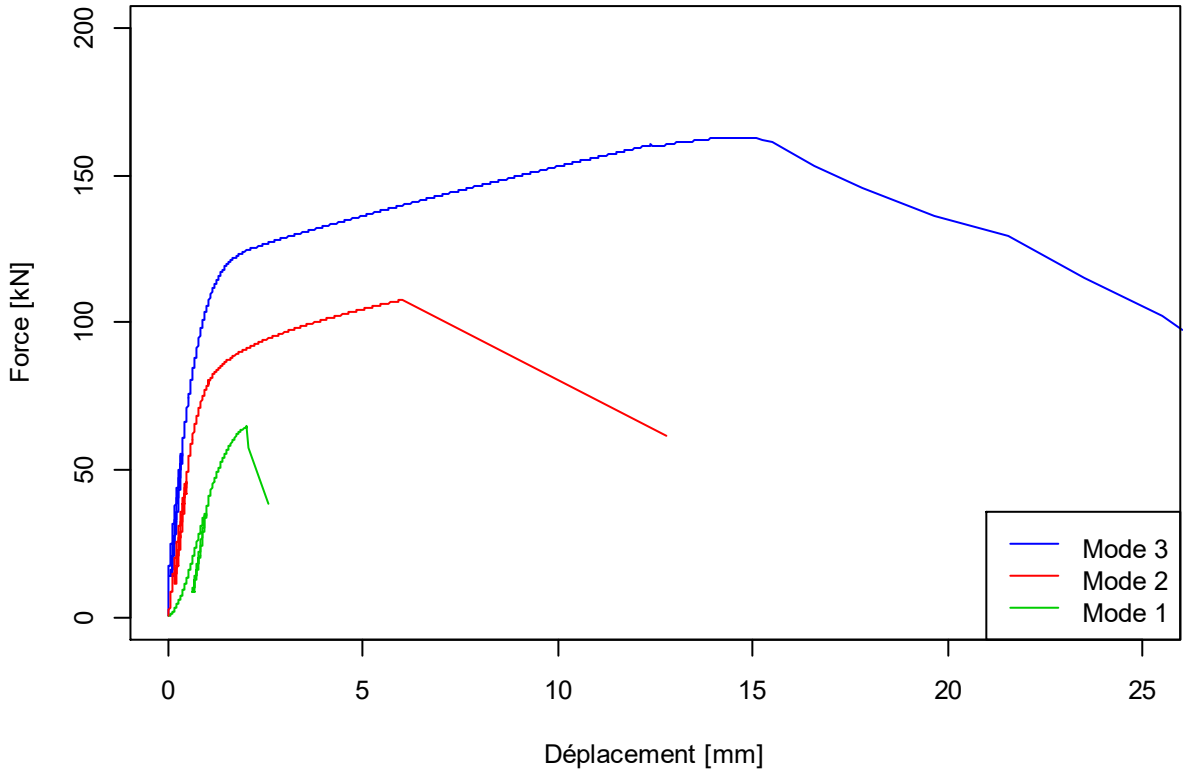


Figure 4-37 : Courbe pour des modes 1, 2 & 3 pour le diamètre 16 dans du Hêtre.

Ces résultats sont cohérents avec les différentes recherches bibliographiques ainsi que le modèle de BLASS & SCHMID [81] basé sur la mécanique de la rupture. La rupture prématurée liée au phénomène de fendage se produit pour les assemblages dimensionnés selon les modes de rupture 1 et 2. Pour les modes 3, les assemblages arrivent tous jusqu'à la plastification, mais la rupture se manifeste toujours sous forme d'un fendage (cf Figure 4-38).

La même figure met en avant que pour les modes de rupture 1, les assemblages cassent systématiquement dans les parties latérales (partie 1) alors que pour les autres, la rupture se produit aléatoirement dans les parties centrales ou latérales.

Essais Bois/Bois
Mode 1 - Hêtre

Essais Bois/Bois
Mode 3 - Hêtre

Essais Bois/Métal
Mode 1 - Chêne

Essais Bois/Bois – D12
Mode 2 (gauche)
Mode 3 (droite)

Essais Bois/Bois – D12
Partie centrale d'un mode 3

Essais Bois/Métal
Mode 3 – D12mm

Figure 4-38 : Photos de ruptures d'assemblages et de plastifications de broches.

Pour les assemblages bois/métal, la Figure 4-39 met en évidence deux mesures de raideurs possibles entre la rampe de charge de 10 et 40%. Une première raideur $K_{ser,init}$ correspond à un fonctionnement avec seulement une partie des organes sollicités en cisaillement, puis, une fois l'ensemble des jeux comblés, une nouvelle raideur K_{ser} correspondant à la raideur pour laquelle tous les organes fonctionnent. Ces différentes mesures s'expliquent par les différences de précisions d'usinage entre le bois et le métal cumulées au fait que les ferrures métalliques qui avaient subies de très légères déformations au cours des essais ont été réemployées. Pour la suite de l'analyse et dans le tableau de l'Annexe E, il ne sera retenu que la raideur K_{ser} correspondant à la raideur de tous les organes en fonctionnement.

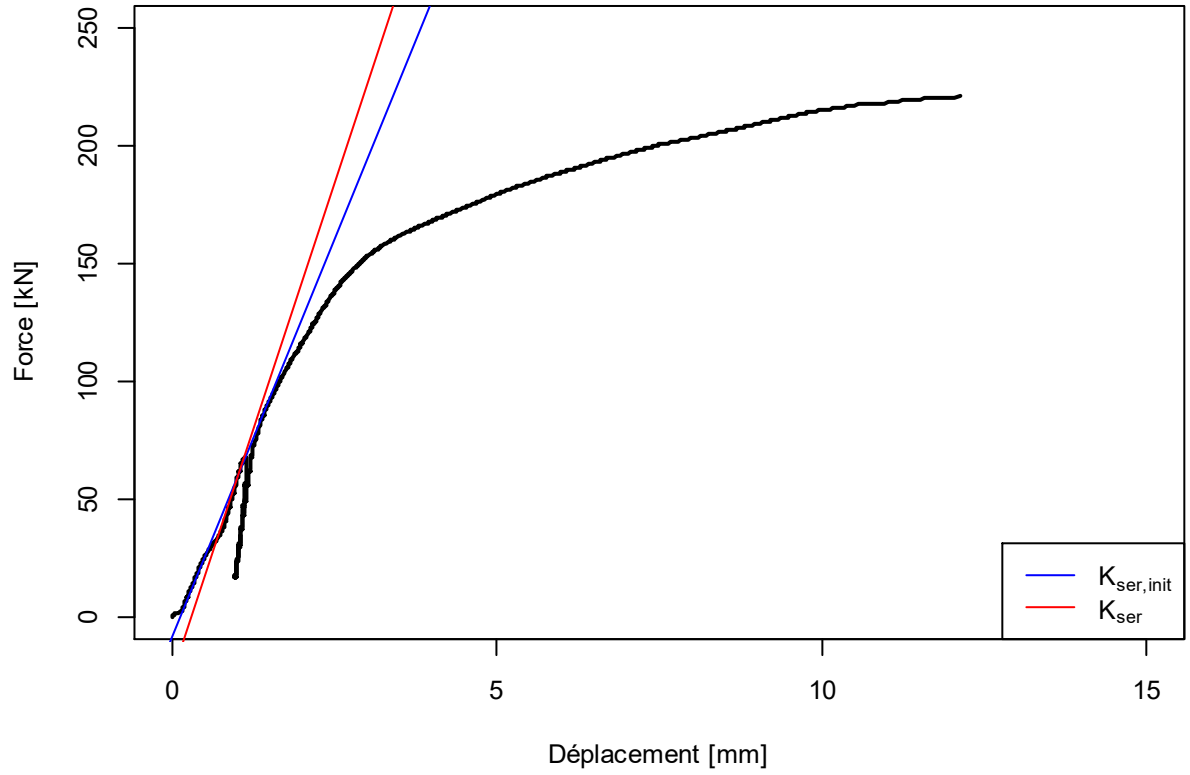


Figure 4-39 : Exemple de mise en place de la raideur pour les essais bois/métal.

A partir de toutes les données, il est possible de déterminer les valeurs moyennes et caractéristiques des masses volumiques des parties latérales et centrales (t_1 ou t_2) de l'assemblage ainsi que les valeurs moyennes de la raideur K_{ser}. Pour comparer les valeurs de résistance d'essais, aux valeurs obtenues avec les formules de prédictions de la résistance de l'EUROCODE 5, les résistances caractéristiques sont calculées pour tous les modes de ruptures avec l'effort mesuré expérimentalement (Effort maximal pour un glissement de 15mm), conformément à la définition de la résistance des assemblages donnée par l'EN 26891 [105]. Ces différents résultats sont résumés dans le Tableau 4-VIII pour les essais bois/bois et dans le Tableau 4-IX pour les essais bois/métal.

Tableau 4-VIII : Synthèse des résultats d'assemblages Bois/Bois.

	Diam [mm]	Mode	nb	t_1 [mm]	t_2 [mm]	$\rho_{mean,1}$ [kg/m^3]	$\rho_{k,1}$ [kg/m^3]	COV [%]	$\rho_{mean,2}$ [kg/m^3]	$\rho_{k,2}$ [kg/m^3]	COV [%]	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	COV	$F_{max,mean}$ [kN]	$F_{max,k}$ [kN]	COV [%]
Peuplier	12	1	5	17,50	40,00	421	375	4,80	427	381	3,36	20,44	13,31	39,33	33,88	6,02
		2	5	29,95	40,09	417	372	10,18	434	346	9,17	16,98	32,03	49,33	40,13	8,24
		3	5	55,00	55,00	446	399	9,29	452	370	8,31	17,97	18,91	61,36	54,03	5,18
	16	1	6	17,50	40,00	454	408	3,65	386	346	4,07	26,96	11,36	55,21	49,08	4,73
		2	5	29,90	40,02	444	395	8,02	419	374	4,16	27,57	31,62	65,72	53,78	8,13
		3	5	77,00	96,00	459	409	8,68	457	382	7,56	51,57	22,53	118,83	104,96	4,96
Hêtre	12	1	5	12,41	40,12	668	595	7,29	661	558	7,14	40,75	11,89	48,98	40,68	7,24
		2	5	29,96	40,00	702	626	4,57	713	636	4,14	86,57	4,44	74,55	50,95	15,21
		3	5	54,00	57,30	683	610	5,24	665	593	4,82	57,03	22,32	91,69	65,58	13,96
	16	1	5	12,45	40,11	681	607	3,94	681	607	4,18	46,10	5,17	65,66	58,02	3,40
		2	5	29,90	39,99	698	622	1,47	706	630	3,13	95,72	15,76	101,66	77,90	10,23
		3	5	75,00	102,00	722	646	5,87	700	608	6,02	118,67	11,20	171,71	138,39	8,89
Chêne	12	1	5	14,85	39,92	733	651	7,25	729	612	7,34	34,70	9,54	49,03	26,98	21,89
		2	5	29,79	39,97	714	637	5,68	733	614	7,47	76,66	10,57	62,44	48,67	10,16
		3	5	52,00	52,00	692	617	5,88	690	605	5,67	70,75	12,93	80,87	68,08	6,86
	16	1	4	14,82	40,06	692	611	2,70	691	610	3,58	46,99	10,85	72,98	53,92	11,25
		2	5	29,88	39,99	722	644	4,07	716	638	3,83	110,98	6,18	99,66	82,28	7,93
		3	5	72,00	98,70	703	628	3,81	699	623	4,18	110,79	7,77	147,63	118,93	8,57

Tableau 4-IX : Synthèse des résultats d'assemblages Bois/Métal.

	Diam [mm]	Mode	nb	t_1 [mm]	$\rho_{mean,1}$ [kg/m^3]	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	COV [%]	$F_{max,mean}$ [kN]	$F_{max,k}$ [kN]	COV [%]
Chêne	12	1	3	15	685,45	39,06	14,88	41,70	12,42	37,26
		2	3	30	685,45	87,43	34,20	80,61	38,23	22,55
		3	3	85	685,45	96,27	21,45	127,90	96,72	8,78
	16	1	5	15	703,16	66,90	44,26	68,40	42,25	19,67
		2	3	30	698,15	148,00	5,65	146,34	125,00	1,16
		3	3	85	698,15	130,25	44,85	220,24	188,02	4,20

4.3.3. Raideur

4.3.3.1. Différence avec la prédiction du code de calcul

Les prédictions de raideurs de l'EUROCODE 5 sont comparées aux résultats expérimentaux présentés en Annexe E et dans les Tableau 4-VIII & Tableau 4-IX. Pour mémoire, la raideur s'estime dans le code de calcul avec la relation (3.1) :

$$K_{ser} = k_{type}\ \rho_m{}^{1,5}\ \frac{d}{23}$$

Avec $k_{type} = 1$ pour les assemblages bois/bois et $k_{type} = 2$ pour les assemblages bois métal.

Pour les essais bois/bois, contrairement à l'équation du code de calcul, l'épaisseur des bois a une incidence sur les raideurs. Plus l'épaisseur des bois augmente et plus la raideur augmente. Comme imagé par la Figure 4-40, pour le mode 1, l'équation de L'EUROCODE 5 a tendance à maximiser la raideur mesurée par essais de 34%. Pour les modes 2 et 3 du hêtre et du chêne, l'équation du code de calcul a tendance à minimiser la raideur obtenue par essais de 32%. Pour le peuplier, les résultats obtenus pour les modes 2 & 3 du diamètre 12 semblent trop faibles au regard des raideurs mesurées pour le mode 1. Pour le diamètre 16mm, les raideurs semblent trop faibles en comparaison aux raideurs mesurées pour les modes 1 et 3.

Pour les essais bois/métal les conclusions sur l'évolution de la raideur en fonction de l'épaisseur des bois sont les mêmes que pour les essais bois/bois. En considérant un coefficient k_{type} égale à 2, l'EUROCODE 5 surestime systématiquement la raideur des assemblages (cf Figure 4-40). Il n'y a que pour le mode 2 du diamètre 16 que la différence entre la prédiction et les valeurs expérimentales est inférieure à 10% en considérant k_{type} égale à 2. Pour le mode 1, même en considérant un coefficient k_{type} de 1, la prédiction de l'EUROCODE 5 reste en moyenne supérieure de 43% aux raideurs mesurées expérimentalement.

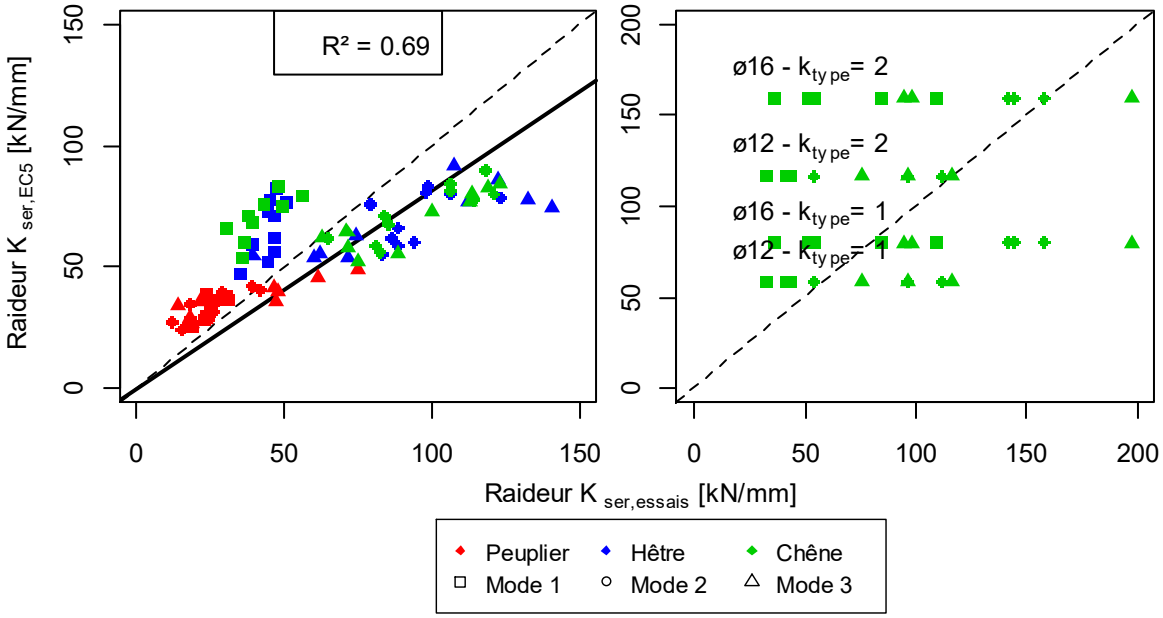


Figure 4-40 : Comparaisons entre les raideurs expérimentales et les raideurs estimées par l'EUROCODE 5. Essais bois/bois (gauche) & Essais bois/métal (droite).

Il est possible de penser que le calcul de la raideur ne fonctionne pas avec les masses volumiques moyennes mais qu'il est pertinent dans le cadre de bois classés mécaniquement. Selon la méthode de classement visuel, le chêne et le hêtre auraient tendance à être classés D24, et aurait donc une masse volumique moyenne de 580 kg/m^3 et le peuplier pourrait être assimilé à un C24, avec une masse volumique moyenne de 420 kg/m^3.

Selon ces hypothèses et en considérant le coefficient k_{type} égal à 2, l'EUROCODE 5 surestime toujours la raideur des assemblages bois/métal en mode 1 (110% à la place de 187%). Pour les modes 2 & 3, avec la nouvelle hypothèse de masse volumique, l'EUROCODE 5 sous-estime la raideur de 5%.

Pour les assemblages bois/bois, la nouvelle hypothèse de masse volumique conduit à une différence de 19,5% entre la prédiction et les résultats expérimentaux pour le mode 1, mais la différence pour les modes 2 & 3 augmente jusqu'à 77%.

L'hypothèse selon laquelle l'équation de la raideur de l'EUROCODE 5 fonctionnerait mieux avec les masses volumiques du système de classement qu'avec les masses volumiques réelles des éprouvettes n'est donc pas vérifiée.

Compte tenu des observations faites sur les essais bois/bois et bois/métal, une modification du code de calcul pour intégrer la variation de la raideur en fonction de l'épaisseur des bois semble nécessaire.

Si la prédiction de l'EUROCODE 5 fonctionne mieux avec les masses volumiques du classement mécaniques qu'avec les masses volumiques réelles pour les assemblages bois/métal, pour les essais bois/bois le phénomène inverse a été observé. Pour la suite de l'étude, la loi de raideur sera directement exprimée en fonction de la masse volumique réelle des éprouvettes.

L'utilisation du coefficient $k_{type} = 2$ semble permettre d'estimer au mieux la raideur des assemblages bois/métal pour les modes 2 & 3. L'introduction d'un critère basé sur l'élancement de la tige dans le bois pourrait permettre d'utiliser le coefficient k_{type} égal à 2 pour les assemblages bois/métal tout en réglant le problème de surestimation de la raideur en mode 1.

La forte variabilité des mesures de raideurs observées pour les assemblages bois/métal cumulé à la nécessité de corriger les résultats liés à la mise en place des organes (cf Figure 4-39) conduisent à ne considérer pour la suite de l'étude que les assemblages bois/bois pour proposer une loi de raideur spécifique aux bois feuillus.

4.3.3.2. Proposition d'une loi de raideur

L'analyse des données expérimentales et leur comparaison avec l'EUROCODE 5 met en lumière 3 approches différentes pour estimer la raideur :

- Proposer une loi globale similaire à l'EUROCODE 5, tout en sachant que cette dernière aura tendance à maximiser la raideur pour le mode 1 et à la minimiser pour les autres modes.
- Intégrer un facteur lié à l'élancement de la broche dans les parties latérales t_1 de l'assemblage.
- Intégrer un facteur considérant l'élancement de la broche de chaque élément constituant l'assemblage bois/bois.

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel ℝ en utilisant un algorithme de résolution de régression à variables multiples qui permet d'estimer chaque coefficient en minimisant les résidus entre la fonction de prédiction et la mesure. Les résultats de cette analyse sont imagés au travers de la Figure 4-41.

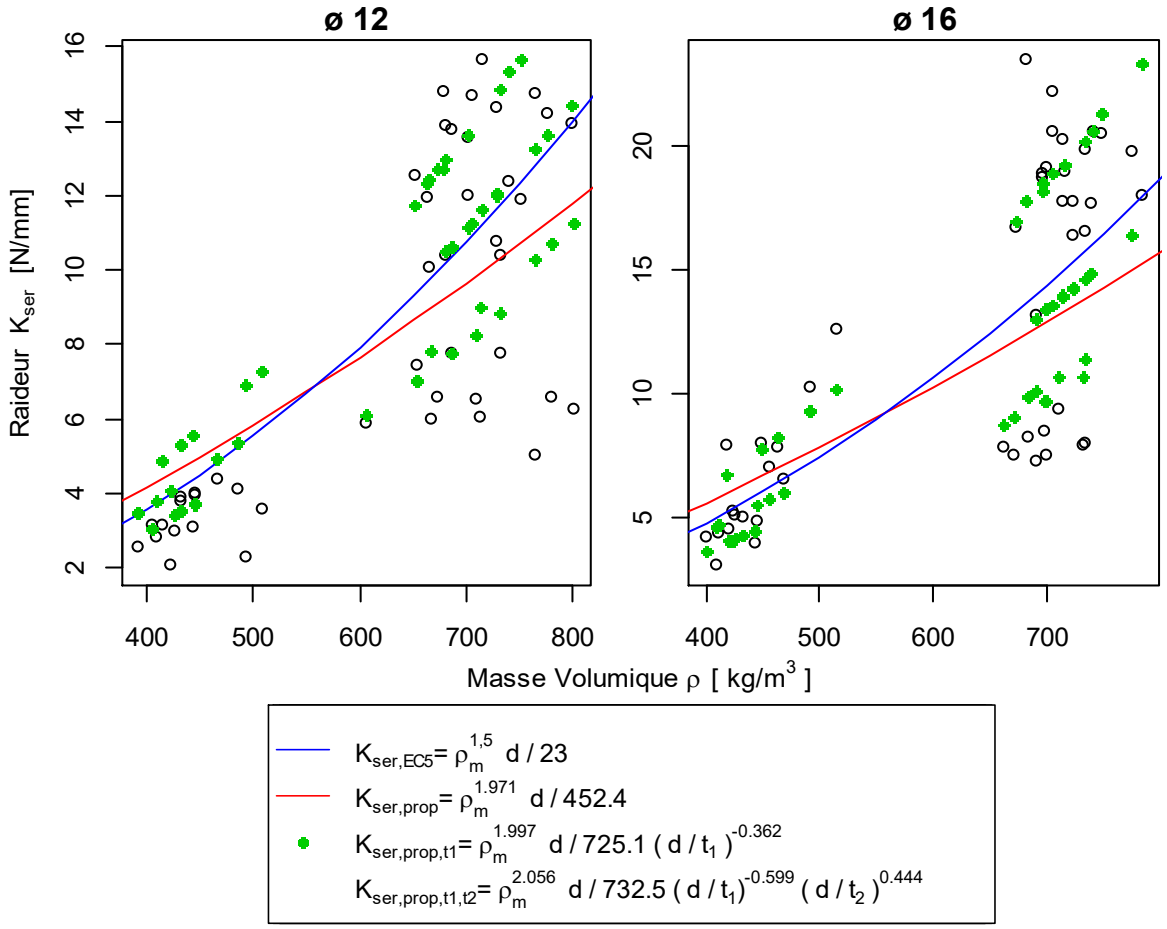


Figure 4-41 : Loi de prédiction pour la raideur unitaire des assemblages Bois/Bois.

Les prédictions des 3 nouvelles lois de raideurs sont comparées aux résultats expérimentaux par la Figure 4-42. Si la différence absolue moyenne entre la loi de l'EUROCODE 5 et les essais est de 33%, en fonction des lois proposées, l'estimation de la raideur s'affine avec notamment 27% d'erreur entre l'équation (4.50) et les essais. Les deux autres lois, donnent respectivement 20% de différence pour (4.51) et 19,5% pour (4.52).

A première vue, il n'y a pas une grande différence entre la loi de prédiction qui intègre l'élancement des parties latérales (4.51) et la loi qui prend en compte en plus l'élancement de la partie centrale de l'assemblage (4.52). Il faut remarquer sur la Figure 4-41 que pour une faible variation de masse volumique, il y a une forte variation de la raideur. Il semblerait que comme pour les propriétés mécaniques en compression et flexion, la masse volumique ne soit pas le meilleur indicateur pour prédire la raideur des assemblages.

De plus, cette analyse part de l'hypothèse que chaque organe contribue uniformément à la raideur globale de l'assemblage. Or, l'analyse bibliographique a mis en avant l'existence d'un critère similaire à celui du nombre efficace sur les raideurs. En effet, plus il y a d'organes alignés dans les assemblages et moins la raideur globale de ce dernier tend vers la somme directe de chaque raideur unitaire. Pour compléter cette analyse, il faudrait effectuer un ensemble d'essais faisant varier le nombre d'organes en ligne ce qui constitue une tâche importante et coûteuse : peut-être qu'une approche par modélisation serait plus judicieuse.

En considérant les deux dernières conclusions, il est proposé d'estimer par un modèle la raideur des assemblages au moyen des raideurs de fondations mesurés au cours des essais de portance pour ensuite les comparer aux résultats expérimentaux. La différence entre les deux données permettant de proposer un critère $n_{ef,K}$ sur les raideurs d'assemblages.

$$K_{ser} = {\rho_m}^{1,97}\ \frac{d}{452} \quad (4.50)$$

$$K_{ser} = {\rho_m}^{2,0}\ \frac{d}{725}\left(\frac{d}{t_1}\right)^{-0,4} \quad (4.51)$$

$$K_{ser} = {\rho_m}^{2,06}\ \frac{d}{733}\left(\frac{d}{t_1}\right)^{-0,6}\left(\frac{d}{t_2}\right)^{0,4} \quad (4.52)$$

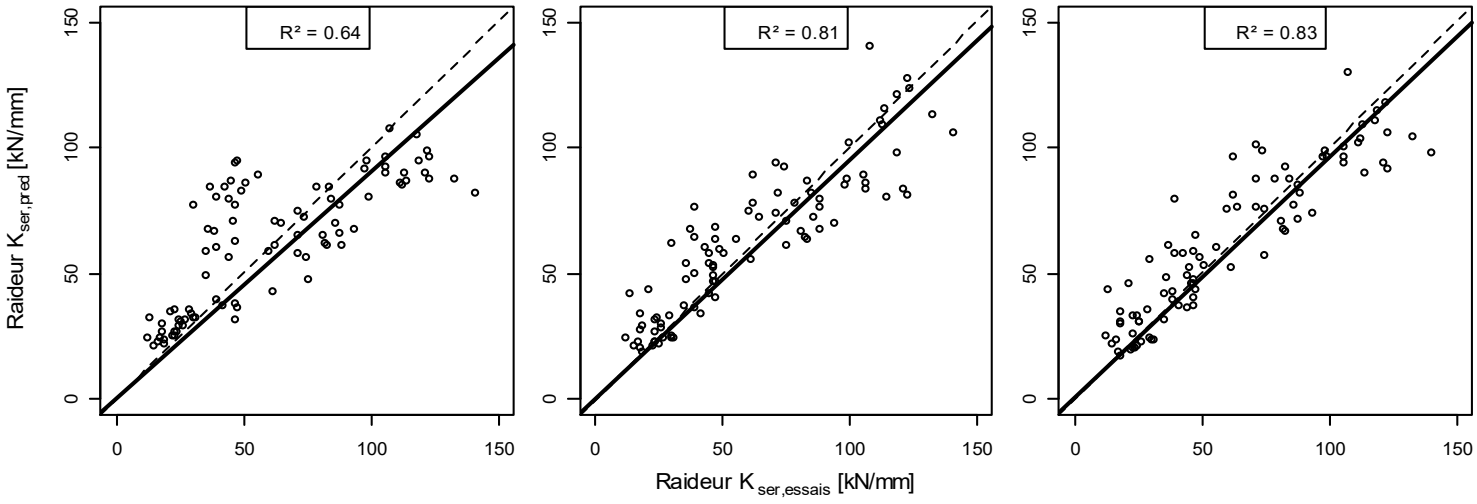


Figure 4-42 : Loi de prédictions comparées aux mesures expérimentales.

4.3.3.3. Modélisation de la raideur des assemblages en vue de la validation des mesures expérimentales

Dans les assemblages, le fonctionnement entre organe et bois peut être idéalisé comme étant une poutre posée sur des fondations avec une certaine rigidité. Cette théorie a déjà été développée par différents projets de recherche en France et en Europe et fait également l'objet d'une thèse au sein du laboratoire LERMAB [104]. Ce type de modèle a pour but de décrire le comportement non linéaire des assemblages à partir des lois de comportement de l'acier et de la portance locale.

Pour étudier plus précisément la raideur mesurée expérimentalement, étant donné que les organes métalliques et le bois ne se trouvent théoriquement pas dans leur zone plastique, un modèle simplifiée élastique est envisageable via les outils de l'ingénieur (RDM6, ROBOT BAT, ACORD BAT…).

La Figure 4-43 présente ce type de modélisation simplifiée réalisée sur le logiciel ACORD BAT à partir d'éléments de type poutres. L'organe d'assemblage est modélisé en calculant les propriétés mécaniques (inertie, section réduite d'effort tranchant, section) à partir de son diamètre et en utilisant un module d'élasticité de 210 000 MPa, proche de celui trouvé expérimentalement.

Le logiciel ne permettant pas de cumuler une raideur d'appuis avec un déplacement de ce dernier, il a été décidé d'introduire des éléments fictifs (barres rigides) entre les appuis et la tige en les répartissant de manière uniforme sous l'organe d'assemblage. L'impact de la rigidité des éléments fictifs sur les résultats a été étudié afin d'affiner leur rigidité.

A la jonction entre les éléments fictifs et l'organe de diamètre 12 ou 16mm, il est mis en place une relaxation ayant une rigidité correspondant à la raideur de fondation. Celle-ci est déterminée en multipliant la surface projetée d'un tronçon de tige par le module de fondation du bois, correspondant au paramètre$k_{el,1}$ (cf §4.2.1.7.2). En partie centrale, un déplacement vertical des appuis de 1mm est appliqué. En faisant la somme des réactions d'appuis sur la zone centrale ou sur les zones latérales, la raideur théorique d'un organe d'assemblage peut être alors déduite.

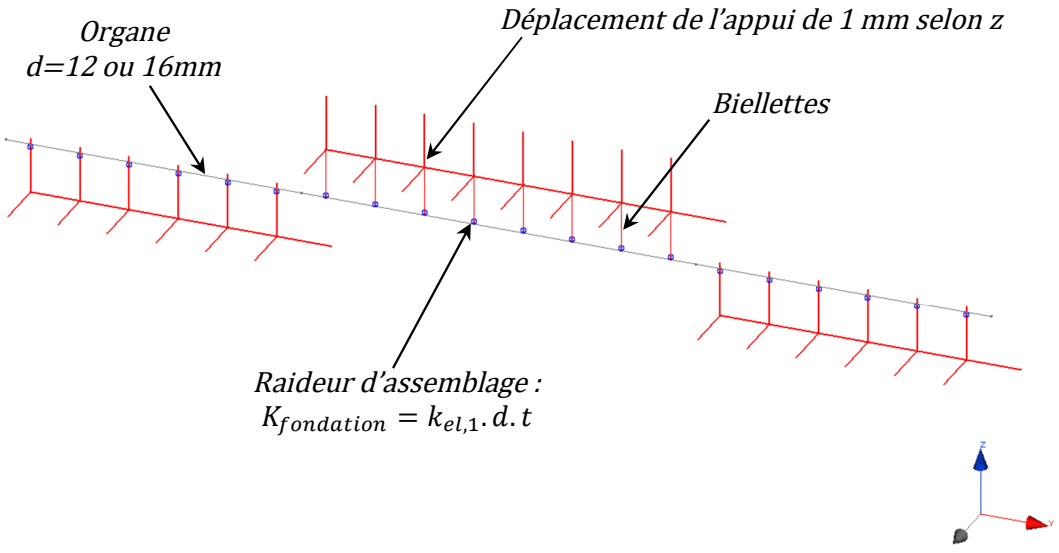


Figure 4-43 : Principe du modèle sur fondation élastique.

Les résultats obtenus par le modèle sont présentés dans le Tableau 4-X. Le calcul manuel de la raideur du mode 1 (qui est possible car la broche ne fléchit pas) a permis de valider le modèle numérique. La comparaison entre le modèle et les essais est donnée par la Figure 4-44.

La comparaison entre les moyennes arithmétiques des raideurs expérimentales et les résultats du modèle montrent que pour le peuplier, le modèle maximise toujours les raideurs (pour les modes 2 et 3, les essais sont, en moyenne, 40% inférieurs aux modèles). Cette différence pourrait s'expliquer par l'effet de longueur de l'assemblage.

Pour le hêtre et le chêne, si le modèle est en adéquation avec les essais pour les modes de ruptures 1, pour les modes 2 et 3, le modèle renvoie des raideurs bien inférieures à la réalité expérimentale. Cette observation laisse à penser qu'il y a soit un problème sur les mesures de cette propriété mécanique soit un problème sur la raideur de fondation prise en compte.

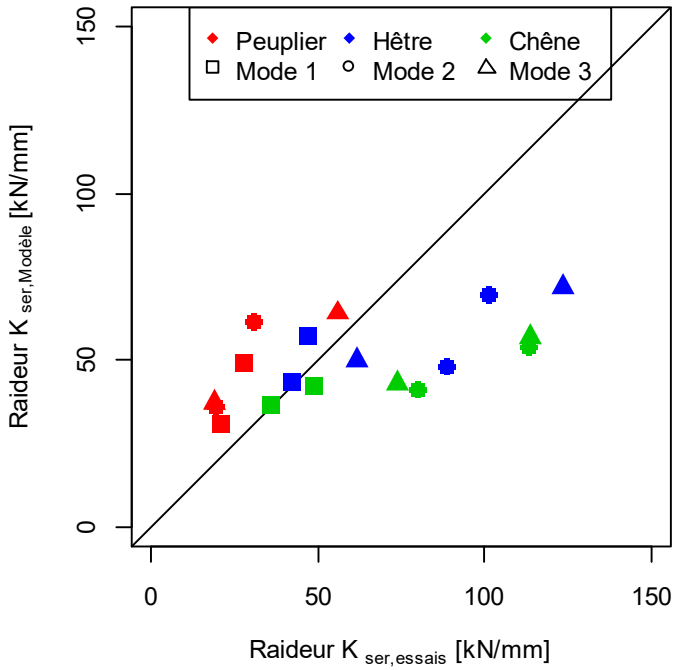


Figure 4-44 : Comparaison de la raideur du modèle avec les essais.

Parmi toutes les explications pouvant justifier la différence entre le modèle et les essais, il y a la forte variabilité de la raideur de fondation mesurée pendant les essais d'enfoncement. Il est possible que la raideur de fondation des bois soit supérieure à la raideur prise en compte dans le modèle. Mais même en utilisant la raideur de fondation au fractile de 95% des essais de portances, la raideur du modèle reste, dans certains cas, inférieure de 30% aux raideurs expérimentales.

Il est également possible que, malgré la mise en place d'une feuille de papier sulfurisé et de graisse, un frottement entre les plans de cisaillement persiste, ce qui explique une raideur expérimentale plus importante que celle renvoyée par le modèle mais cela est peu probable.

L'utilisation de broches plus grosses que le diamètre de perçage peut créer une sorte de précontrainte autour de la broche qui peut avoir augmenté les propriétés mécaniques du bois au voisinage de l'organe d'assemblage et donc la raideur de fondation élastique.

Pour étudier ce phénomène, une vingtaine d'essais de portance à 0° pour un diamètre 16mm ont été réalisés selon les mêmes conditions que les essais d'assemblage (même lot de bois, mêmes diamètres de perçages, mêmes diamètres d'organes), ce qui conduit à un enfoncement en force des broches dans le bois. Les essais ont ainsi montré une portance locale similaire aux premiers essais de portance et une raideur de fondation moyenne supérieure de 10% à celles implémentées dans le modèle. La nouvelle raideur de fondation ne permet toujours pas d'expliquer les écarts entre le modèle et les essais.

Tableau 4-X : Résultats du modèle pour les raideurs.

Essence	Diamètre [mm]	Mode	$K_{fondation}$ [MPa/mm]	$K_{ser,modèle}$ [kN/mm]	$K_{ser,essais}$ [kN/mm]	Δ
PEUPLIER	ø12	1	56,6	31,14	21,38	31%
		2		36,27	19,00	48%
		3		37,5	19,17	49%
	ø16	1	85,3	49,53	27,90	44%
		2		61,83	30,80	50%
		3		64,05	55,73	13%
HETRE	ø12	1	83,21	43,65	42,42	3%
		2		48,66	88,03	-81%
		3		50,07	61,58	-23%
	ø16	1	99,86	57,42	46,90	18%
		2		69,75	100,99	-45%
		3		71,85	123,24	-72%
CHENE	ø12	1	67,98	36,63	35,84	2%
		2		41,79	79,44	-90%
		3		43,05	73,91	-72%
	ø16	1	72,81	42,66	49,02	-15%
		2		53,97	113,30	-110%
		3		57,06	113,72	-99%

Un des objectifs principaux de la campagne d'essais d'assemblage était de mettre en lumière un effet nombre efficace sur les raideurs. Dès lors que plusieurs organes sont alignés selon la même file, ils ne peuvent pas tous participer à 100% à la raideur globale de l'assemblage. Les raideurs mesurées lors des essais étant supérieures aux raideurs estimées par les modèles, cela remet en cause les lois de raideur définies dans le précédent paragraphe. La différence entre le modèle et les essais provient donc d'une combinaison complexe de plusieurs facteurs difficilement qualifiables et quantifiables par l'expérimentation.

Les essais montrent néanmoins la même tendance que les modèles avec des raideurs qui évoluent en fonction de l'épaisseur des bois jusqu'à tendre vers une limite où l'augmentation de l'épaisseur n'entraine plus d'accroissement de la raideur. Ce comportement est analogue à celui des résistances où, pour le mode 3, elles ne sont pas estimées en fonction de l'épaisseur des bois.

Proposer une loi de raideur basée uniquement sur l'expérimentation n'est plus possible pour l'avenir des structures bois. En effet, les projets de plus en plus complexes et hyperstatiques comme les immeubles de grandes hauteurs nécessitent de maîtriser parfaitement cette propriété mécanique pour limiter les risques de sinistres ELU (liés à une redistribution des efforts non maîtrisée) ou ELS (confort vibratoire, déformation, fluage…). Par l'expérimentation, les lois de raideur mesurées et les lois qui en découlent intègrent systématiquement des effets de frottement et de mise en place de l'organe dans son logement, ce qui augmente la raideur par un effet de précontrainte ou la diminue par l'apparition d'un jeu entre le bois et l'organe. C'est pour cela que la modélisation de la raideur à partir des mesures faites par essais de portance semble offrir les meilleures perspectives pour améliorer la prédiction du comportement mécanique des assemblages.

Des essais complémentaires en mode 2 dans du hêtre et du chêne ont donc été réalisés en perçant les trous avec un diamètre supérieur de 0,5mm au diamètre des broches utilisées (12 et 16mm). La Figure 4-45 présente les résultats des essais complémentaires sur le chêne avec un diamètre de 16mm. Pour ces essais, la raideur moyenne est de 53,2 kN tandis que le modèle l'estime à 53,97 kN/mm. Les résultats des autres essais sont tabulés dans le Tableau 4-XI. Pour ces 6 essais, des raideurs proches du modèle ont été mesurées. Les résistances à rupture des nouveaux essais sont similaires à celles observées dans la première campagne expérimentale. Ces derniers essais valident donc l'utilisation des résultats des essais de portance associés à la théorie des poutres sur fondations élastiques dans le but d'estimer les propriétés de résistance et de raideur des assemblages.

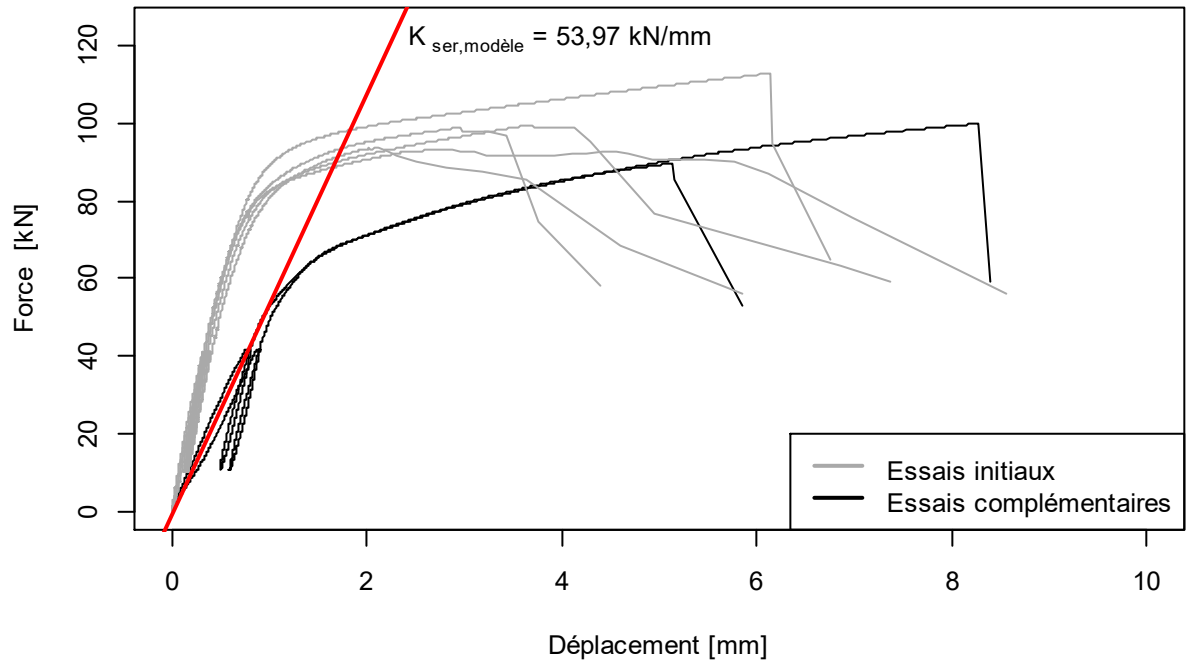


Figure 4-45 : Essais complémentaires comparés au modèle.

Tableau 4-XI : Raideurs des essais complémentaires.

Configuration	Nombre	$K_{ser,essais}$ [kN/mm]	$K_{ser,modèle}$ [kN/mm]	Δ
Hêtre – ø12	1	50,91	48,66	1,05
Hêtre – ø16	1	59,8	69,75	0,86
Chêne – ø12	2	42,4	41,79	1,01
Chêne – ø16	2	53,2	53,97	0,99

Au vu des résultats expérimentaux, il semble que l'insertion des broches en force dans leur logement augmente la raideur de fondation élastique par rapport à un montage dans un trou ajusté (cas des essais de portance locale). Compte tenu de l'incidence de la qualité d'usinage sur les mesures, vouloir proposer une solution empirique au problème de l'estimation de la raideur des assemblages semble irréaliste. Une démarche basée sur le modèle de poutre sur fondation à des lois de comportement en portance locale définie selon différentes qualités d'usinage semble offrir de meilleures perspectives pour répondre à la problématique des assemblages bois.

4.3.4. Résistance

4.3.4.1. Validation des équations de JOHANSEN et des nouvelles lois de portance

Pour valider les lois de portance proposées et la méthodologie de l'EUROCODE 5, il est possible d'estimer la résistance caractéristique pour chaque mode de rupture à partir de la masse volumique caractéristique et de comparer les résultats à la résistance caractéristique obtenue pour chaque mode et essences testées. L'effort estimé par les équations de JOHANSEN est comparé, conformément à la norme EN 26891 [105], à l'effort obtenu pour un glissement de 15 mm entre les plans.

Les paramètres utilisés pour estimer les résistances dans le Tableau 4-XII sont les suivants :

- Equations de JOHANSEN sans les paramètres statistiques liés à l'intégration du coefficient γ_m (cf §4.1.3.1)
- Calcul du moment d'écoulement plastique par l'équation $M_{y,Rk}$ de l'EUROCODE 5.
- Estimation de la portance par les lois caractéristiques trouvées par essais pour le hêtre et le chêne et utilisation de la loi EUROCODE 5 pour le peuplier.

Tableau 4-XII : Estimation de la résistance pour les assemblages bois/bois & bois/métal.

		Mode 1			Mode 2			Mode 3		
Essence	d [mm]	$F_{Estimé}$ [kN]	F_{Essais} [kN]	Δ	$F_{Estimé}$ [kN]	F_{Essais} [kN]	Δ	$F_{Estimé}$ [kN]	F_{Essais} [kN]	Δ
Peuplier	12	32,16	33,88	0,95	35,03	40,13	0,87	45,80	54,03	0,85
	16	43,05	49,08	0,88	45,76	53,78	0,85	76,76	104,96	0,73
Hêtre	12	41,77	40,68	**1,03**	52,50	50,95	**1,03**	61,57	65,58	0,94
	16	63,06	58,02	**1,09**	77,77	77,90	**1,00**	101,19	138,39	0,73
Chêne	12	44,45	26,98	**1,65**	53,05	48,67	**1,09**	62,27	68,08	0,91
	16	71,58	53,92	**1,33**	78,08	82,28	0,95	101,25	118,93	0,85
Bois/métal	12	59,81	12,42	**4,82**	72,42	38,23	**1,89**	90,90	96,72	0,94
	16	75,56	42,25	**1,79**	107,35	125,00	0,86	145,37	188,02	0,77

La différence entre la prédiction et les valeurs expérimentales est présentée sur la Figure 4-46. Pour les modes de rupture 1 & 2, la résistance prédite dépassant la résistance expérimentale s'explique par le critère de fendage. Pour les modes 3, la résistance estimée est systématiquement inférieure à la résistance caractéristique mesurée expérimentalement. Pour le peuplier, la loi de l'EUROCODE 5 a tendance à sous-estimer la résistance de l'assemblage de 17% en moyenne. Pour le hêtre et le chêne, la loi de portance de l'EUROCODE 5 sous-estime la résistance de 19% alors que la nouvelle loi de portance réduit cette différence à moins de 10%, sans pour autant donner une estimation supérieure aux résistances obtenues par essais. La loi générale sous la forme d'une loi puissance donne sensiblement les mêmes estimations de portance (différence de moins de 1%) et permet donc d'aboutir aux mêmes conclusions.

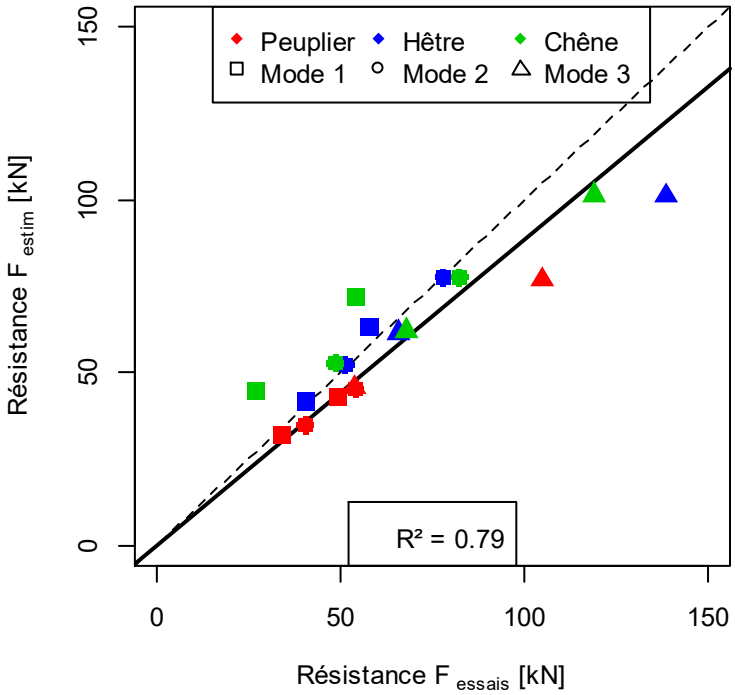


Figure 4-46 : Comparaison de la prédiction de résistance avec les essais bois/bois.

De façon défavorable, s'il est considéré que l'analyse limite prédit le comportement des assemblages pour un glissement de 5mm, alors la prédiction est supérieure de 5% à la valeur obtenue par essais pour une seule configuration en mode de rupture 3. Les estimations des résistances, selon la méthode proposée par l'EUROCODE 5, réalisées à partir des nouvelles lois de portance, sont donc cohérentes avec les valeurs caractéristiques obtenues par essais, validant ainsi la nouvelle loi de portance pour le hêtre et le chêne.

Comme le mode de rupture 3 est celui pour lequel l'influence du paramètre $f_{h,k}$ est le plus faible, il est logique que le gain de résistance lié à l'introduction de la nouvelle loi de portance ne soit pas si important. Un rapide calcul des modes de résistance de JOHANSEN pour les 3 modes de rupture montre qu'une augmentation de 22% du paramètre $f_{h,k}$ conduit à :

- 22% de résistance supplémentaire pour les modes 1. (t1 = 10mm / t2 = 40mm)
- 15% de résistance en plus pour les modes 2. (t_1 = 30mm / t_2 = 40mm)
- 11% de résistance additionnelle pour les modes 3. (t_1 = 70mm / t_2 = 100mm)

Au vu des faibles épaisseurs nécessaires au développement des modes de rupture 1, il est fort peu probable que les assemblages réalisés dans des structures en bois feuillus travaillent selon ces modes. Pour les modes de rupture 2 et 3, l'introduction de la nouvelle loi de portance conduit à une réévaluation de la résistance des assemblages comprise entre 10 et 15%. Une telle différence avec le code de calcul ne justifie pas un frein imminent au développement de la filière bois feuillus et à l'utilisation de ces essences en tant que bois de construction.

Néanmoins, il est à noter que l'ensemble des estimations ont été réalisées avec les masses volumiques caractéristiques réelles des échantillons. En replaçant toute cette démarche dans le contexte réglementaire de classes de résistance attribuées selon un classement visuel, il conviendrait de considérer ces bois comme étant au mieux des bois de classe D40 (classe la plus haute attribuable pour du hêtre). Cela implique une estimation de la masse volumique caractéristique à 550 kg/m^3.

Avec cette masse volumique et la loi de portance de l'EUROCODE 5, la différence entre les essais et l'estimation est de 23% contre 15% avec la nouvelle loi de portance. Avec une classe D24 (majoritairement attribuée aux bois feuillus par le classement visuel) la différence entre l'estimation liée à la nouvelle loi de portance et les essais s'élève à 20%. La revalorisation de la masse volumique des bois feuillus au travers du tableau des classes de l'EN 338 a donc une plus forte incidence sur la compétitivité des assemblages réalisés en bois feuillus que la définition de nouvelles lois de portance propres à ces essences dans les règles de calcul.

4.3.4.2. Critère de nombre effectif n_{ef} en fonction de l'épaisseur des bois

Les essais Bois/Bois ont mis en avant que les assemblages dimensionnés selon un mode de rupture 3 avaient une très forte tendance à rompre pour un glissement supérieur à 10mm. La rupture de ces assemblages survient donc une fois le développement des rotules plastiques. Pour les assemblages en mode 1, la rupture apparait systématiquement avant 5mm de glissement. Pour les modes 2, la rupture se produit entre 5 et 10mm. Pour les modes 1 et 2, la plastification du bois et/ou de l'organe n'est donc pas complétement atteinte. L'analyse limite de l'EUROCODE 5 prédit ainsi une résistance supérieure à l'effort obtenu par essais. La rupture prématurée est principalement liée à l'alignement des organes sur la même file. Ceci conduit à l'accentuation de concentrations de contraintes de traction transversale et de cisaillement ainsi que la mise en jeu d'interaction entre ces contraintes. Des seuils trop élevés de ces contraintes conduisent à la rupture. Pour prendre en compte ce phénomène, le code de calcul utilise un critère empirique à travers le coefficient n_{ef} pour réduire le nombre réel d'organes participant à la résistance et ainsi réduire l'effort plastique prédit par la théorie de l'analyse limite.

Le coefficient actuel ne tient compte que de l'espacement des organes et du nombre d'organes composant chaque file. Les essais ont clairement mis en évidence des comportements différents selon les modes de ruptures. Comme proposée par JORISSEN [79], il est alors possible de proposer un critère incluant l'élancement de la broche dans le bois pour tenir compte de cette phénoménologie. Il sera considéré que l'équation actuelle du n_{ef} de l'EUROCODE 5 est valable pour les feuillus et qu'il ne sera étudié que l'ajout d'un terme dépendant de l'élancement de l'organe sous une des trois formes suivantes :

- Configuration 1 : $n_{ef} = n^{0,90} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13\,d}} \left(\frac{t_1}{d}\right)^a$ (4.53)
- Configuration 2 : $n_{ef} = n^{0,90} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13\,d}} \left(\frac{t_m}{d}\right)^b$ avec $t_m = \min\left(t_1 ;\ \frac{t_2}{2}\right)$ (4.54)
- Configuration 3 : $n_{ef} = n^{0,90} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13\,d}} \left(\frac{t_1}{d}\right)^e \left(\frac{t_2}{d}\right)^f$ (4.55)

Pour proposer une loi qui reflète l'effet du nombre efficace, les valeurs de résistance obtenues pour chaque essai sont comparées à une prédiction faite avec les hypothèses suivantes :

- Utilisation des équations de l'analyse limite sans tenir compte du paramètre statistique lié à l'intégration du coefficient γ_m (cf §4.1.3.1)
- Utilisation de la formule RDM pour estimer le moment d'écoulement plastique de l'organe :

$M_{y,12mm} = \frac{372}{6} \times 12^3 = 107\,136\ N.mm$ et $M_{y,16mm} = \frac{356}{6} \times 16^3 = 243\,029\ N.mm$

L'utilisation de cette formule à la place de celle proposée par l'EUROCODE 5 donne une estimation plus haute de la résistance plastique et maximise donc l'impact du facteur n_{ef}.

- La prédiction de la portance est réalisée à partir des lois moyennes propres à chaque essence développée dans les parties précédentes.
- Utilisation des épaisseurs $t_1$et t_2 mesurées pour chaque essai.

Les différents coefficients de la fonction n_{ef} sont calculés pour égaler la relation :

$$n_{ef} = \frac{F_{essais}}{F_{estimé}} \tag{4.56}$$

Les différents coefficients des équations (4.53) à (4.55), calculés pour les efforts obtenus à 5mm, 10mm et 15mm de glissement, sont résumés dans Tableau 4-XIII . Pour les essais bois/métal, seule la première équation sera traitée (les deux autres n'ayant aucun sens) pour un effort correspondant à un glissement de 5mm et de 15mm.

Tableau 4-XIII : Tableau des coefficients pour les différentes lois n_{ef}.

Coefficients des configurations 1, 2 & 3	F_{5mm}	F_{10mm}	F_{15mm}
a	0,207	0,274	0,304
b	0,317	0,418	0,467
e	0,052	0,081	0,111
f	0,135	0,168	0,168
Bois/Métal : a	0,225	-	0,271

En premier lieu, il faut remarquer que le coefficient « a » obtenu pour l'équation du n_{ef} pour un glissement de 5mm rejoint la proposition initiale de JORISEN [79] pour tenir compte de l'élancement de l'organe sur la résistance des assemblages. Les ordres de grandeurs des différents termes exprimant la puissance sont donc cohérents avec les données bibliographiques. D'après la norme EN 26891 [105], la résistance de l'assemblage correspond à l'effort maximal obtenu par essais entre 0 et 15mm de glissement entre les éléments. La loi proposée sera donc basée uniquement sur ces valeurs d'effort.

Pour valider et comparer ces lois, la prédiction des résistances caractéristiques en utilisant les équations de l'EUROCODE 5 est utilisée sans les coefficients statistiques. Pour ces équations, les lois de portance caractéristiques établies par ce travail pour le Hêtre et le Chêne sont utilisés. Les différents coefficients ont été arrondis en retenant individuellement a=0,3 / b=0,45 / e = 0,1 & f = 0,15. La Figure 4-47 présente la comparaison entre les essais et les prédictions réalisées en intégrant la nouvelle loi n_{ef}.

Sur le peuplier, les nouvelles équations du nombre efficace prédisent une résistance 27% inférieure à la résistance obtenue par essais contre 42% avec la loi actuelle de l'EUROCODE 5. L'écart entre la prédiction et les mesures expérimentale reste principalement lié à l'utilisation de la loi du code de calcul pour estimer la portance. Pour le hêtre et le chêne, la loi de l'EUROCODE 5 sous-estime en moyenne la résistance de 26% pour tous les modes alors que, avec les nouvelles lois, l'erreur moyenne absolue est proche de 14%.

Pour toutes les configurations, sauf une, la nouvelle estimation du critère n_{ef} donne une résistance inférieure à la résistance caractéristique des essais. En effet, pour le mode 1 du chêne en diamètre 12, le faible nombre d'essais, cumulé à un fort coefficient de variation, fait chuter la valeur caractéristique à 26,97 kN pour une prédiction de résistance comprise entre 38,5 et 35,2 kN. Pour cet essai, même la loi EUROCODE surestime la résistance de 23%. Il est donc possible de juger que ce résultat est admissible.

$$n_{ef} = n^{0,90} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13\,d}} \left(\frac{t_1}{d}\right)^{0,3} \quad (4.53)$$

$$n_{ef} = n^{0,90} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13\,d}} \left(\frac{t_m}{d}\right)^{0,45} \quad (4.54)$$

$$n_{ef} = n^{0,90} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13\,d}} \left(\frac{t_1}{d}\right)^{0,1} \left(\frac{t_2}{d}\right)^{0,15} \quad (4.55)$$

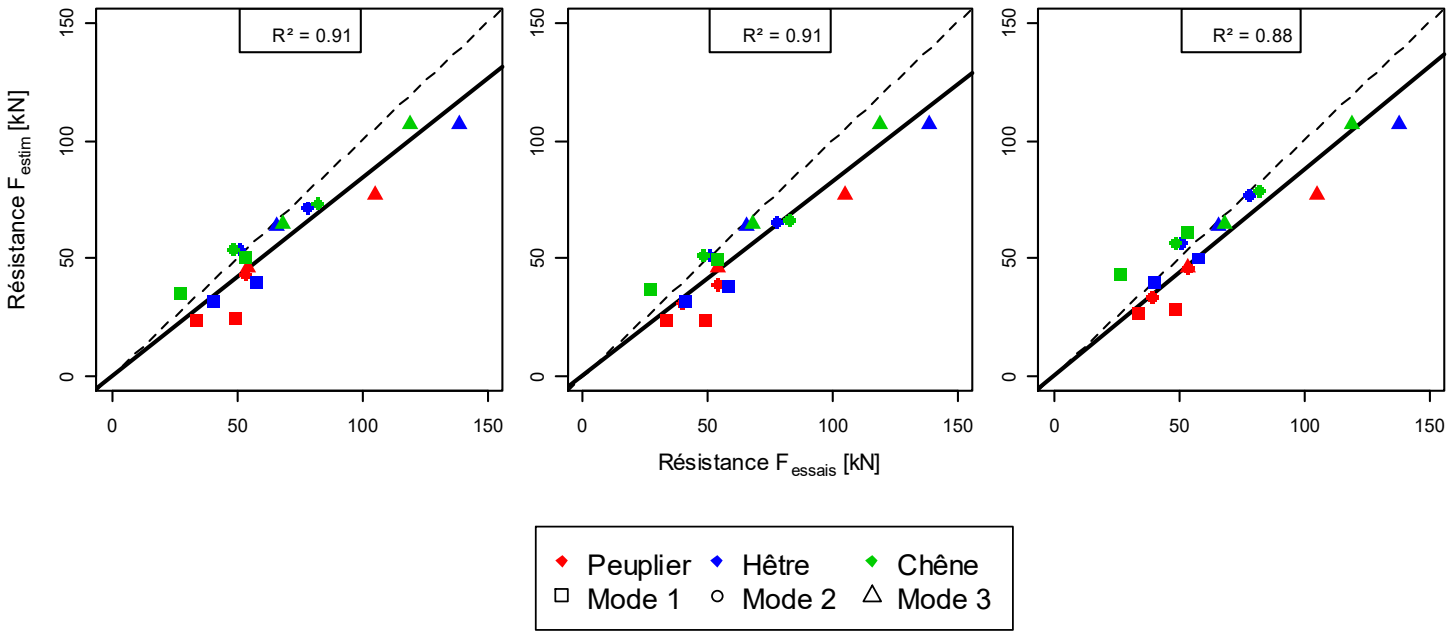


Figure 4-47 : Loi de prédictions de la résistance avec n_{ef} comparées aux mesures expérimentales.

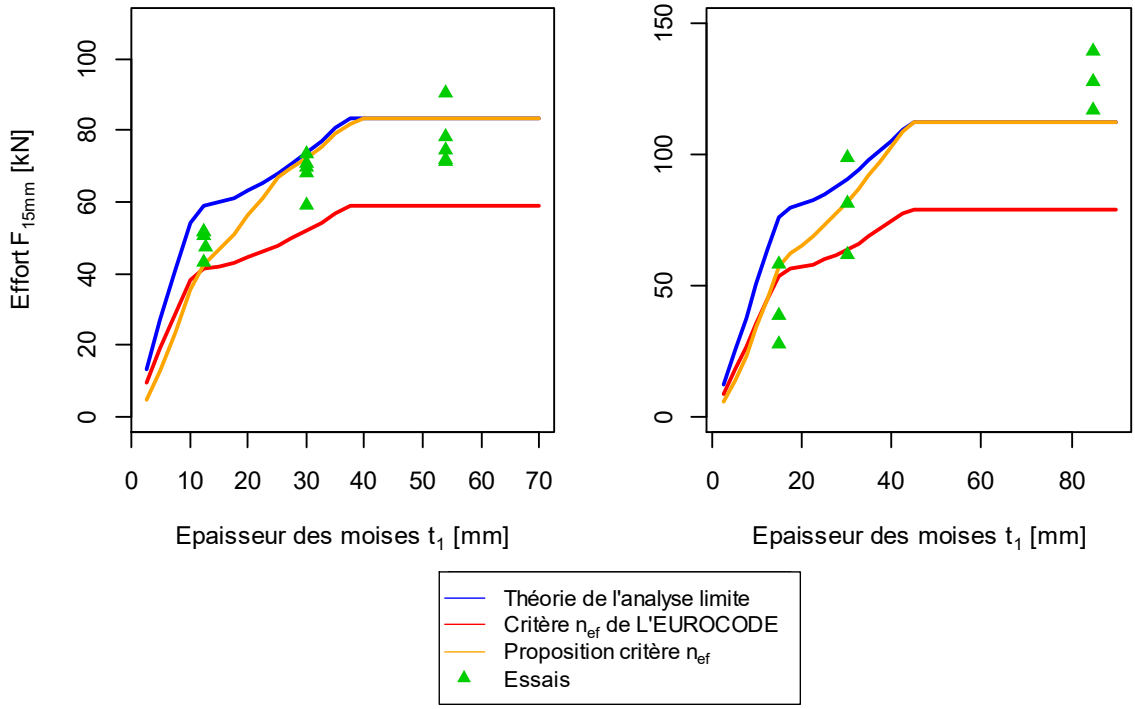
Parmi les 3 lois proposées, il n'y a que la loi avec le ratio t_m qui permet un gain dans la prédiction de l'effet du nombre efficace sans pour autant donner une prédiction supérieure aux valeurs d'essais. La nouvelle loi du nombre efficace pourrait être exprimée par la relation :

$$n_{ef} = \min\left(n\ ;\ n^{0,90} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13\,d}} \left(\frac{t_m}{d}\right)^{0,45}\right) \text{ avec } t_m = \min\left(t_1\ ;\ \frac{t_2}{2}\right) \quad (4.54)$$

Pour les essais bois/métal, le faible nombre d'essais, cumulé à des coefficients de variation élevés liés aux ruptures fragiles des assemblages, ne permet pas de valider l'équation trouvée à partir des valeurs caractéristiques. Il ne sera donc présenté que l'équation moyenne proposant d'évaluer le critère n_{ef} en fonction de l'épaisseur des moises :

$$\mathrm{n_{ef}} = \min\left(\mathrm{n}\ ;\ \mathrm{n}^{0,90}\sqrt[4]{\frac{\mathrm{a_1}}{13\,\mathrm{d}}}\ \left(\frac{\mathrm{t_1}}{\mathrm{d}}\right)^{0,27}\right) \qquad (4.57)$$

La Figure 4-48 permet d'imager le gain apporté par les nouvelles lois de l'effet du fendage sur la résistance des assemblages (Critère $\mathrm{n_{ef}}$). Les paramètres de la loi ayant été obtenus à partir de l'intégralité des données, il est normal qu'il existe un décalage entre les points des essais et la proposition. Comme dans l'EUROCODE 5, le critère $\mathrm{n_{ef}}$ est borné par le nombre d'organes composant l'assemblage.



NOTA : *Pour tracer la courbe de gauche, les épaisseurs* t_2 *ont été définies en fonction de* t_1 *telles que :*
$t_2 = 40\ mm\ pour\ \ t_1 < 20mm$
$t_2 = 50\ mm\ pour\ \ 20 < t_1 < 37{,}5\ mm$
$t_2 = 55\ mm\ pour\ \ t_1 > 40mm$

Figure 4-48 : Evolution de la résistance en fonction de l'épaisseur des bois pour des assemblages Bois/Bois dans du hêtre (gauche) et Bois/Métal dans du chêne (droite) pour des organes de diamètre 12.

4.3.4.3. Critère pour la raideur des assemblages à l'ELU

Pour traiter les problèmes d'instabilité dans les structures bois, l'ingénieur a besoin de la raideur $K_u$correspondant à la raideur de l'assemblage sous une sollicitation ELU. Du fait du pallier de plastification observable sur les courbes types des essais d'assemblages, cette raideur est systématiquement plus faible que la raideur instantanée K_{ser} des assemblages. Il est alors possible, comme évoqué dans la bibliographie, d'exprimer la raideur à l'ELU comme étant une proportion de la raideur ELS. Néanmoins, comme évoqué dans le paragraphe 4.3.4.2, les assemblages, en fonction de leur épaisseur, n'ont pas tous la même limite de plastification. Pour les assemblages en mode 1, la raideur K_u est très proche de la raideur K_{ser}. A contrario, plus l'assemblage peut plastifier (mode 2 et 3) et plus la raideur K_u diminue.

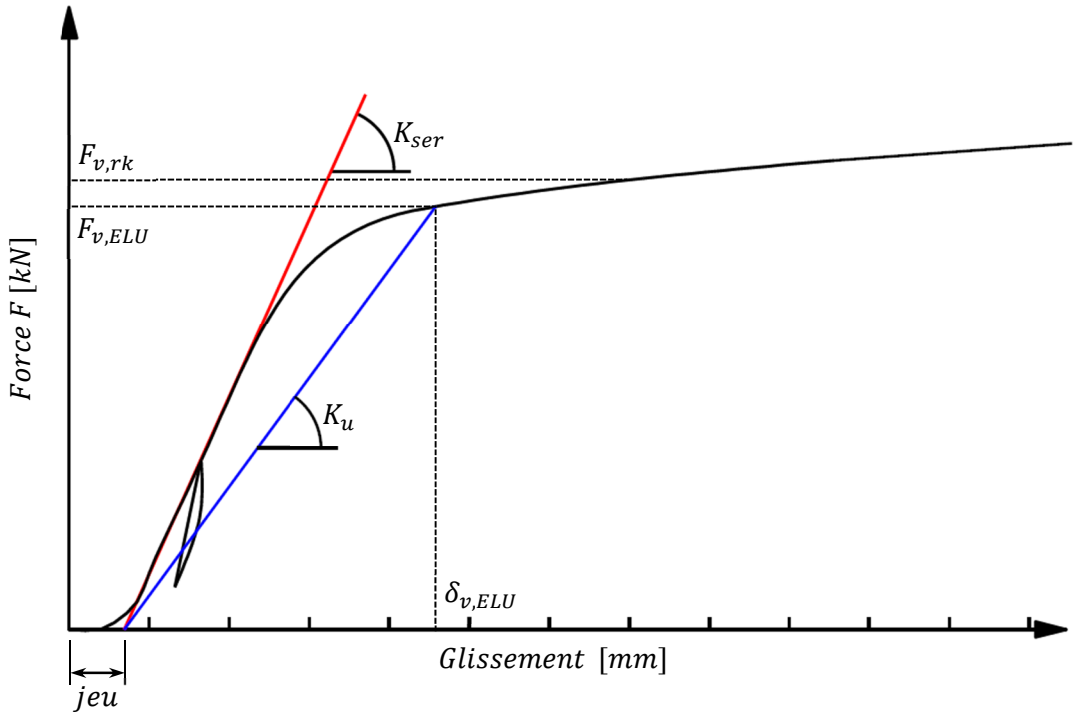


Figure 4-49 : Principe d'estimation de la raideur K_u.

La Figure 4-49 image la manière dont la raideur à l'ELU K_u est extraite de chaque essai d'assemblage. A partir des nouvelles équations de la portance, de la théorie de l'analyse limite de l'EUROCODE 5 et du critère n_{ef} défini précédemment, il est possible d'estimer la résistance caractéristique EUROCODE des assemblages (noté $F_{v,Rk}$) pour chaque configuration. L'effort ELU associé à l'assemblage est défini directement à partir de la relation (4.58). L'hypothèse la plus défavorable pour avoir une définition la plus faible possible de la raideur K_u est d'avoir un effort ELU le plus important possible. C'est pour cela que les valeurs de k_{mod} et de γ_m seront respectivement fixées à 1,1 et 1,3.

$$F_{v,ELU} = F_{v,Rk}\,\frac{k_{mod}}{\gamma_m} \tag{4.58}$$

Pour chacun des essais, la raideur K_u est déterminée en divisant l'effort $F_{v,ELU}$ par son glissement associé $\delta_{v,ELU}$. Le déplacement retenu est corrigé du potentiel jeu de mise en place, calculé à partir de la régression linéaire sur la raideur K_{ser}. Les différents résultats par modes de rupture sont reportés dans le Tableau 4-XIV.

Tableau 4-XIV : Raideurs moyennes K_u et K_{ser} pour chaque configuration

Essence	Diamètre [mm]	Mode	t1 [mm]	t2 [mm]	$K_{U,mean}$ [kN/mm]	COV K_U	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	COV K_{ser}	ratio
Peuplier	12	1	17,5	40	18,67	17,82	20,37	13,51	0,93
		2	29,95	40,09	12,87	35,62	17,85	32,94	0,72
		3	55,00	55,00	12,84	18,01	18,98	18,45	0,68
	16	1	17,5	40	23,56	11,42	26,96	11,36	0,87
		2	29,90	40,02	25,21	30,27	29,06	32,40	0,87
		3	77,00	96,00	41,18	25,55	53,14	22,83	0,78
Hêtre	12	1	12,41	40,12	40,64	15,07	42,65	11,71	0,96
		2	29,96	40,00	53,93	33,48	92,29	6,12	0,64
		3	54,00	57,30	35,74	30,11	60,40	22,11	0,60
	16	1	12,45	40,11	43,24	3,57	46,40	4,45	0,93
		2	29,90	39,99	86,81	18,99	100,10	16,59	0,87
		3	75,00	102,00	100,35	8,33	123,75	12,01	0,81
Chêne	12	1	14,85	39,92	32,45	19,91	35,17	11,42	0,94
		2	29,79	39,97	50,89	21,56	80,34	10,72	0,66
		3	52,00	52,00	40,51	3,77	75,30	13,54	0,53
	16	1	14,82	40,06	48,02	11,69	48,12	9,84	0,99
		2	29,88	39,99	103,44	6,79	115,14	5,96	0,90
		3	72,00	98,70	85,97	9,23	115,18	8,47	0,75

Pour les modes 1, les essais montrent que les raideurs $K_u$et K_{ser} sont similaires avec un ratio proche de 1. En effet, la rupture fragile prise en compte via le coefficient n_{ef} donne une estimation de résistance caractéristique qui se trouve sur la partie élastique des différentes courbes d'essais.

Pour les autres modes, il est observé que le ratio du mode 2 est supérieur au ratio du mode 3, ce qui est cohérent avec la définition du nouveau paramètre n_{ef} du mode 3 qui permet une plus grande plasticité. En moyenne, pour le mode 2, le ratio est de 0,77 et de 0,69 pour le mode 3. Il est a noté que pour le diamètre 12, les ratios sont plus faibles que pour les diamètres 16.

Le critère proposé dans l'EUROCODE 5 selon l'équation (4.5) s'applique dans notre cas uniquement pour les modes 2 et 3 avec un diamètre 12. Pour les autres configurations, la différence entre les deux raideurs est moins importante.

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \tag{4.5}$$

Au vu des résultats obtenus sur le critère n_{ef} et sur la loi de la raideur K_{ser}, la relation entre les raideurs K_U et K_{ser} est forcément liée à l'élancement de l'organe d'assemblage dans le bois. En utilisant uniquement l'épaisseur t_1 des parties externes de l'assemblage l'équation de prédiction K_u devient :

$$K_u = 0{,}939\, K_{ser} \left(\frac{t_1}{d}\right)^{-0.187} \text{ simplifiable par : } K_u = 0{,}9\, K_{ser} \left(\frac{t_1}{d}\right)^{-0.20} \quad (4.59)$$

Compte tenu des doutes déjà émis sur la mesure de la raideur dans le cadre de la campagne expérimentale, toute l'approche proposée est soumise à discussion. De plus, cette définition sous-entend que les assemblages soient dimensionnés à 100% de leur capacité ELU vis-à-vis du risque de fendage, ce qui n'est pas forcément le cas dans le cadre d'un dimensionnement de structure. Pour l'estimation de la raideur K_u, s'il est envisagé par l'ingénieur de réaliser un calcul plastique de la structure, il est possible d'utiliser un modèle MEF permettant d'estimer la loi de comportement non-linéaire des différents assemblages de la construction. Ces lois de comportement non linéaires pouvant ensuite être implémentées dans les logiciels de calcul permettant d'estimer la raideur ELU propre à chaque combinaison de charge au prorata du taux de travail de l'assemblage.

Au vu de la quantité d'heures d'études que cela représente, une telle analyse ne peut être rentable que sur des structures complexes, avec de forts degrés d'hyperstatisité, dans lesquelles une analyse simplificatrice pourrait avoir une incidence sur la distribution des efforts (efforts minimisés dans certaines barres et assemblages). Dans un autre cas de figure, il serait possible que la prise en compte de ce phénomène par l'utilisation d'hypothèses simplificatrices entraine un surdimensionnement important de la structure et donc un surcoût pour l'entreprise de construction. Dans ce cas une augmentation du temps d'étude serait envisageable pour réduire le coût global du projet.

4.3.5. Conclusions sur les lois proposées

Les essais d'assemblages ont permis de constater que l'approche EUROCODE 5 pour la justification des assemblages réalisés en bois feuillus ne constitue pas un frein à l'utilisation de ces essences. En effet, la mise en place de nouvelles lois de portances spécifiques aux feuillus ne permet qu'un gain de résistance compris entre 10 et 20% par rapport aux lois EUROCODES actuelles. Le réel frein provient plus du système de classement visuel actuel et des classes données par l'EN338 qui sous-estime les masses volumiques de plus de 20% et donc la portance locale d'autant. Une meilleure valorisation des feuillus dans la construction passe donc obligatoirement par une redéfinition de ce tableau de propriétés.

L'analyse des résistances a mis en évidence que pour les modes de rupture 3, les assemblages développaient leur plastification contrairement aux modes de ruptures 1 et 2 avec des ruptures précoces entre 2 et 10mm de glissement. A partir des essais en mode 3, il a été possible de valider les équations de l'analyse limite développées dans l'EUROCODE 5. A partir de l'intégralité des essais, il est proposé de modifier le critère n_{ef} pour rendre compte de la plastification observée pour les modes de rupture 3. Pour ce faire, le nouveau critère est basé sur l'élancement de la tige dans le bois :

$$n_{ef} = \min\left(n \; ; \; n^{0,90} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13\,d}} \left(\frac{t_m}{d}\right)^{0,45}\right) \text{ avec } t_m = \min\left(t_1 \; ; \; \frac{t_2}{2}\right) \tag{4.54}$$

Pour les assemblages bois/métal, le nombre d'essais n'est pas suffisant pour proposer un réel critère de calcul, mais les essais montrent également la même tendance avec une évolution du critère n_{ef} en fonction de l'épaisseur des bois et donc un critère assez proche de celui proposé par JORISSEN :

$$n_{ef} = \min\left(n \; ; \; n^{0,90} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13\,d}} \left(\frac{t_1}{d}\right)^{0,27}\right) \tag{4.57}$$

Conformément à la bibliographie, une augmentation de la raideur en fonction de l'épaisseur des bois a bien été observée. Il est possible de proposer une équation d'estimation de la raideur telle que :

$$\mathrm{K_{ser}} = \rho_{\mathrm{m}}{}^{2} \, \frac{\mathrm{d}}{725} \left(\frac{d}{\mathrm{t_1}}\right)^{-0,4} \tag{4.51}$$

Mais contrairement à ce qui est indiqué dans l'EUROCODE 5, la relation entre la raideur $\mathrm{K_u}$ et la raideur $\mathrm{K_{ser}}$ n'est pas linéaire. La raideur $\mathrm{K_u}$ est largement dépendante du mode de rupture de l'assemblage et donc de l'élancement de l'organe par rapport au bois. Il vient ainsi une équation de prédiction de la raideur $\mathrm{K_u}$ telle que :

$$K_u = 0{,}9 K_{ser} \left(\frac{t_1}{d}\right)^{-0.20} \tag{4.59}$$

Néanmoins, hormis pour les modes de rupture 1, les raideurs mesurées sur la campagne expérimentale n'ont pas pu être validées par le modèle de poutre sur fondation élastique, remettant obligatoirement en cause les deux équations proposées. Proposer une solution empirique au problème de la raideur des assemblages bois, n'est « économiquement » pas concevable car cela implique la réalisation d'une vaste campagne expérimentale pour « tenter » de couvrir le champ d'utilisation de l'EUROCODE 5. Le développement de modèles de calcul basés sur la mesure expérimentale de la portance locale semble offrir une solution plus rationnelle à ce problème qui reste cruciale pour le développement des structures bois de grandes dimensions.

4.4. CONCLUSION CHAPITRE 4

Les essais de caractérisation de la portance locale ont confirmé l'assimilation du peuplier à un bois résineux en ce qui concerne ce paramètre physique et permis de proposer une loi plus représentative des performances observées sur le hêtre et le chêne. De la même manière, l'influence de l'angle entre l'effort et le fil du bois ainsi que l'utilisation de la formule de HANKINSON pour décrire son évolution ont été validées expérimentalement.

Pour aller plus loin, des essais sur d'autres essences de feuillus et/ou de résineux pourraient permettre de proposer une loi générale de la portance locale indépendante de l'essence (principe de la loi puissance). Un critère tenant compte de l'impact de la rugosité de l'organe sur la portance pourrait également être intégré à l'équation proposée dans l'EUROCODE 5 dans le sens du fil pour permettre d'utiliser des organes avec différents types de finitions (lisse, acier galvanisé…).

La nouvelle équation de la portance locale parallèle au fil du bois a été validée grâce aux essais d'assemblages compte tenu de la bonne estimation des résistances à rupture. Ces essais ont surtout mis en avant que pour mieux valoriser les structures en bois feuillus, une réévaluation de la masse volumique présente dans le tableau de l'EN 338 pour être plus en adéquation avec les observations expérimentales aurait, dans un premier temps, une plus grande influence que la modification de l'équation de la portance locale dans l'EUROCODE 5. Le contrôle systématique de la masse volumique des bois utilisés dans le cadre de bâtiments exceptionnels prend ainsi tout son sens

L'étude des essais d'assemblages a mis en lumière, conformément à ce qui a déjà été observé pour les bois résineux, que les assemblages travaillant selon les modes de rupture 3 n'étaient pas sensibles aux ruptures par fendage. Pour réduire le coût des assemblages, une modification du critère de nombre efficace n_{ef} en fonction de l'épaisseur des bois doit être envisagée afin de diminuer le nombre d'organes et rendre les structures bois plus compétitives par rapport aux solutions béton et métal. De même, cela pourrait permettre de se passer d'une solution de renforcement (présente dans le projet de révision de l'EUROCODE 5), solution généralement couteuse en termes de matière et de main d'œuvre et difficile à mettre en œuvre dans les assemblages de bois feuillus.

L'analyse des raideurs des assemblages montre que vouloir proposer une équation empirique pour l'estimation de ce paramètre ne constitue pas la meilleure solution. L'utilisation du modèle basé sur la théorie des poutres sur fondations élastiques permet de produire, à partir de courbes types de portance locale, des lois de comportements non linéaires des assemblages qu'il serait alors possible d'implémenter dans les codes de calculs. Cette évolution n'est possible que grâce à l'augmentation constante des capacités de calculs qui permettent de résoudre maintenant « rapidement » des problèmes de structures non linéaires. A partir de ces lois de comportements et d'estimation de la résistance plastique des assemblages, toute une réflexion sur la prise en compte des ruptures fragiles devra être imaginée.

CHAPITRE 5 : VALORISATION DES BOIS FEUILLUS

A partir des données collectées tout au long du processus expérimental et des conclusions tirées, la valorisation actuelle des bois feuillus ainsi qu'une alternative à ces méthodes de mise en œuvre traditionnelles est étudiée. Cette nouvelle méthode de valorisation a notamment été expérimentée dans le cadre d'un projet démonstrateur au cours de l'année 2018-2019.

5.1. TECHNIQUES DE CONSTRUCTION TRADITIONELLES

Le rendement matière entre la grume et les produits sciés constitue une des premières différences entre les bois feuillus et les bois résineux avec, en général, des rendements plus importants pour les résineux (entre 62 et 71% pour les résineux contre 55% pour les feuillus selon le memento bois du FCBA pour des billons de 2m). Les rendements des bois sciés dans le cadre du projet EFEUR 5 sont calculés en comparant les volumes des grumes (à partir de leur longueur et du diamètre des deux extrémités) avec le volume total des sciages livrés secs, soit :

- Peuplier : 39%
- Hêtre AB : 45,04%
- Hêtre CD : 39,6%
- Chêne : 29,6%

En premier lieu, il peut être noter que ces rendements sont inférieurs à ceux indiqués par le mémento bois 2018 du FCBA [5] avec des variations allant de 41 à 45% pour le chêne et de 50 à 56% pour le hêtre. Le plus faible taux obtenu pour le chêne, au regard des deux autres essences, s'explique par la volonté d'avoir des bois purgés d'aubier et d'un premier tri directement réalisé à la sortie de la scie pour écarter les pièces avec des défauts trop importants (principalement nœuds et flaches).

Après séchage et livraison à l'ENSTIB, les pièces de hêtre et de peuplier ont été triées dans le but d'exclure les principaux défauts (nœuds, flaches et fentes dépassant les critères fixés par le classement visuel de la norme NF B 52-001 [36]). Les pièces avec des déformations trop importantes, liées au séchage, ont également été exclues des pièces conservées pour les essais de traction et de flexion. Les pièces exclues présentent tout de même des tronçons qui ont servi aux essais de caractérisation de la portance locale ou à l'effet de l'humidité sur la résistance en compression. La synthèse des rendements des différents tris est donnée dans le Tableau 5-I. Pour le hêtre et le peuplier, le nombre de pièces exclues augmente proportionnellement à la section du bois. Pour le chêne, la quantité plus importante de pièces retenues lors du tri visuel, en comparaison des autres essences, s'explique par une première purge réalisée en scierie. La principale raison de l'écartement des pièces durant le tri réalisé au laboratoire étant la présence de fentes et de déformations de séchage excessives. Les pièces de petites sections, provenant en majorité des dosses, ont été approvisionnées en longueur de 4,5m pour une longueur théorique d'éprouvette de 2,0m. Le sciage étant considéré comme utilisable lors du premier tri si au moins une éprouvette peut en être extraite, le taux de rejet pour ces pièces est faible. En revanche, ce n'est pas le cas pour le chêne, car ces sections n'ayant pas fait l'objet d'un tri visuel en scierie une bonne partie d'entre elles fut exclue du fait de la présence d'aubier en trop grande quantité.

Après avoir subi le tri initial présenté précédemment, toutes les pièces ont été rabotées. Une fois calibrées, les pièces ont été classées visuellement, en tenant compte de l'ensemble des critères de la norme NF B52-001 [36] (rappelés en Annexe A). Les différents rendements de ce classement, présentés dans le Tableau 5-I, montrent que, hormis pour le peuplier, plus la section augmente et plus la quantité de pièces se voyant attribuées une classe de résistance haute (D35 ou D30) diminue. Pour le peuplier en petite section, le rabotage a mis en évidence les pentes de fil locales, ce qui a conduit à une exclusion de 15% des pièces usinées. Sur l'ensemble des pièces livrées au laboratoire, ce sont entre 27 et 36% qui ne sont pas retenues pour un usage en tant que bois d'œuvre. Cela représente au final un rendement moyen de 30% entre la grume et les produits finis de construction.

Tableau 5-I : Synthèse du tri visuel et des classes de résistance attribuées pour les essais de flexion.

Essence	Section	Tri initial : Exclusion	Classement visuel			
			C24	C18	Rejet	
Peuplier	40x100	0,00%	60,00%	25,00%	15,00%	
	50x150	35,71%	67,50%	25,00%	7,50%	
	65x200	35,94%	100,00%	0,00%	0,00%	
	total	25,66%	75,83%	16,67%	7,50%	
			D35	D18	Rejet	
Hêtre AB	40x100	5,56%	78,57%	21,43%	0,00%	
	50x150	33,04%	73,17%	24,39%	2,44%	
	65x200	33,65%	66,67%	33,33%	0,00%	
	total	26,46%	72,80%	26,40%	0,80%	
			D35	D18	Rejet	
Hêtre CD	40x100	8,93%	56,41%	38,46%	5,13%	
	50x150	31,78%	56,41%	41,03%	2,56%	
	65x200	43,56%	48,78%	39,02%	12,20%	
	total	31,44%	53,78%	39,50%	6,72%	
			D30	D24	D18	Rejet
Chêne	40x100	21,05%	81,67%	11,67%	5,00%	1,67%
	50x150	24,24%	45,90%	16,39%	21,31%	16,39%
	65x200	25,93%	14,75%	16,39%	47,54%	21,31%
	total	24,31%	47,25%	14,84%	24,73%	13,19%

A la suite des essais de flexion, il est possible de comparer les propriétés prédites par le classement visuel avec les résistances et les modules d'élasticité mesurés expérimentalement. Le Tableau 5-II synthétise ces résultats pour toutes les sections des 3 essences. La masse volumique étant systématiquement supérieure aux valeurs de l'EN 338, elle n'est pas intégrée dans le tableau comparatif.

Tableau 5-II : Comparaisons des résistances et modules estimés par classement visuel avec les essais de flexion.

Essence	Classe	n	$f_{m,k}$ Essais	$f_{m,k}$ EN 338	$\Delta f_{m,k}$	E_{mean} Essais	E_{mean} EN 338	ΔE_{mean}
PEUPLIER	C24	91	34,42	24	143%	11131	11000	101%
	C18	20	39,68	18	220%	10779	9000	120%
HETRE A&B	D35	89	59,86	35	171%	15045	12000	125%
	D18	33	40,20	18	223%	14028	9500	148%
HETRE C&D	D35	66	51,44	35	147%	14816	12000	123%
	D18	47	31,90	18	177%	13102	9500	138%
CHENE COMPLET	D30	86	48,33	30	161%	14320	11000	130%
	D24	27	42,06	24	175%	13939	10000	139%
	D18	45	29,09	18	162%	12424	9500	131%

Hormis pour le peuplier en C24, les propriétés mesurées en flexion sont systématiquement largement supérieures à celles prédites par le classement visuel. La Figure 5-1 s'intéresse à la différence entre le classement visuel attribué et le classement optimal basé sur les résultats d'essais.

Pour chaque essence, la partie hachurée représente la part des pièces écartée par le tri initial et n'ayant donc pas été testées. En première approche, il a été défini que pour que la classe optimale soit attribuée à une éprouvette, ses résistances et modules d'élasticité doivent être supérieurs à 80% des valeurs caractéristiques de ladite classe. Une fois cette première sélection effectuée, la valeur moyenne du module d'élasticité ainsi que la valeur caractéristique de résistance en flexion sont calculées et comparées aux valeurs de l'EN 338. Si ces valeurs sont inférieures à celles de la norme, une nouvelle itération est réalisée en augmentant de 5% les valeurs caractéristiques de la classe optimale définie en première approche.

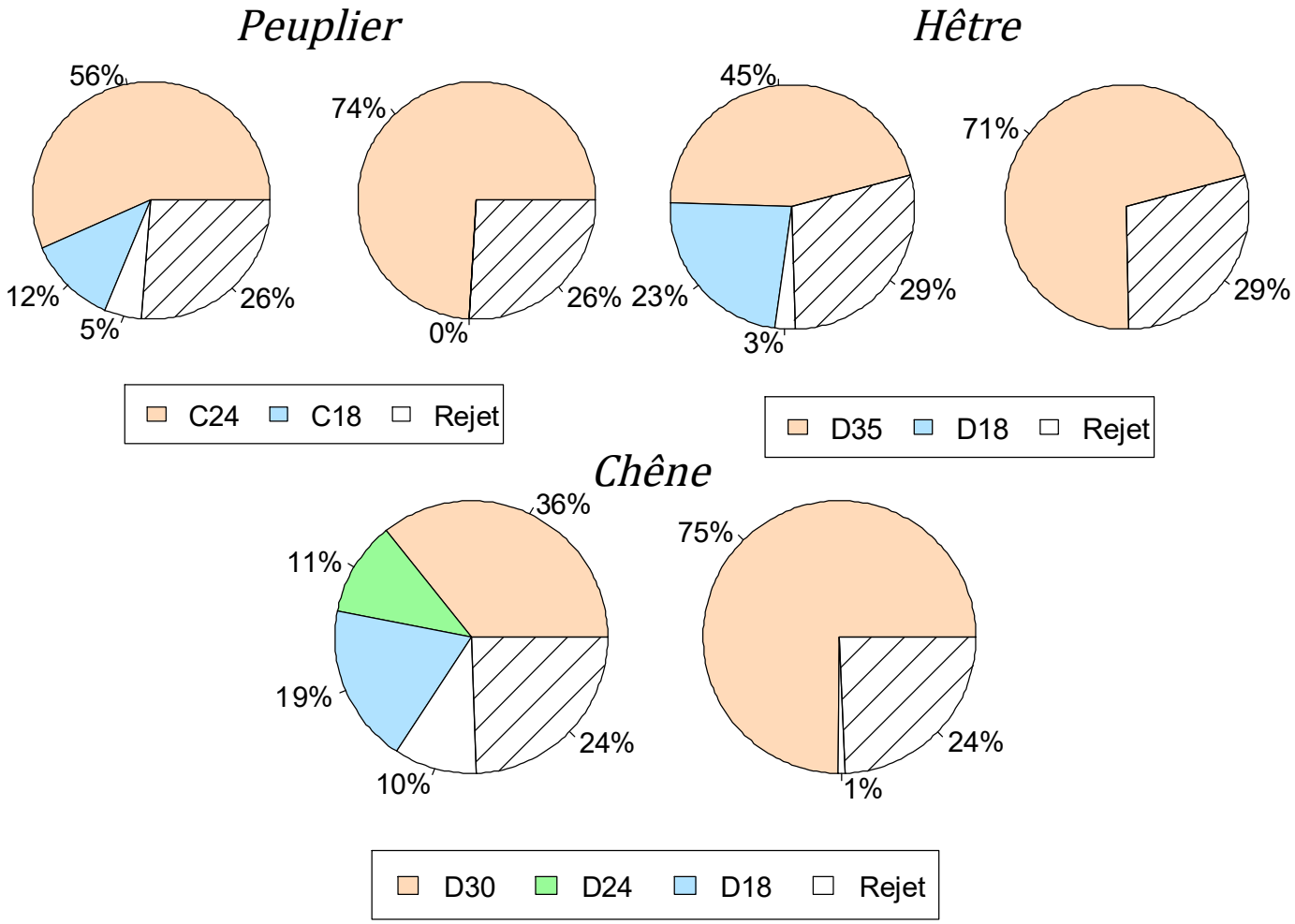


Figure 5-1 : Classement visuel (gauche) et classement optimal (droite) des essais de flexion.

Le classement optimal attribue à quasiment l'ensemble des pièces retenues par le classement visuel la classe de résistance maximale attribuable par le classement visuel pour chaque essence. En utilisant les critères de la classe D50 ($f_{m,k} > 50$ MPa & $E_{0,05} > 11\,800$ MPa) pour le classement optimal, il y aurait 67% du hêtre avec ces propriétés et toujours 29% de pièces non testés. Pour le chêne, le classement optimal selon la classe D50 conduit à 44% des éprouvettes avec cette classe, 32% des échantillons selon une classe D30 et toujours 24% de pièces exclues par le tri initial.

Comme évoqué dans la partie 2, les performances mécaniques (modules d'élasticité et résistances) sont plus élevées pour les éprouvettes de petites dimensions. Le classement optimal a donc été réalisé uniquement sur les pièces de plus grosses sections (60x190 ou 55x180). Ce classement indique que quasiment 100% des éprouvettes testées pour les trois essences peuvent être classées selon la plus haute classe de résistance attribuable (C24 / D30 / D35). Sur ces bois, la part de pièces exclues par le tri initial augmente (peuplier : 36% - hêtre : 38,5% - chêne : 26%) ce qui conduit au global à moins de valorisation selon les hautes classes de résistances. En ce qui concerne la valorisation selon une classe D50, les rendements chutent avec respectivement 82% et 29% des pièces de hêtre et de chêne testées pouvant être classées D50 (contre 93% et 57% sur l'ensemble des essais de flexion).

Au vu de ces résultats, il est facilement imaginable qu'une partie des bois écartés lors du classement visuel initial ait tout de même les propriétés mécaniques suffisantes pour être utilisées en tant que bois d'œuvre (classe D18 au minimum). Par l'ensemble de ces analyses, il est donc prouvé que le système de classement visuel sous-évalue largement les propriétés mécaniques des bois avec, par exemple pour le hêtre, le classement de 45% d'un lot selon la classe D30 là où les essais montrent que plus de 67% du même lot aurait les propriétés mécaniques d'un bois D50.

Pour étudier l'influence d'une valorisation des bois feuillus via une amélioration de la prédiction de la résistance mécanique, un calcul type d'un plancher d'habitation est réalisé, afin de comparer les performances des sciages feuillus par rapport à ceux des bois résineux. Les hypothèses retenues pour cet exemple sont les suivantes :

- Plancher d'habitation de 4m de portée avec des solives espacées de 60cm.
- Charge permanente de 0,9 kN/m² et charge d'exploitation de 1,5 kN/m².
- Pour la vérification ELU : calcul en flexion « pure » sans prise en compte du déversement (bloqué par le panneau de plancher) et utilisation des coefficients $k_{mod} = 0{,}8$ et $\gamma_m = 1{,}3$ issus de l'EUROCODE 5.
- Pour la vérification ELS : vérification selon la flèche nette finale définie par l'EUROCODE 5 $w_{net,fin} < L/200$. Dans la réalité d'un calcul de structure, il conviendrait de vérifier la flèche liée à la présence d'éléments fragiles, ce qui est bien plus défavorable sur ce type d'ouvrage. La flèche est déterminée sans prendre en compte la déformée d'effort tranchant (qui influe de 2 à 3mm sur la hauteur de la poutre) et en utilisant le coefficient de fluage $k_{def} = 0{,}6$.
- Pour faire un dimensionnement complet de cette solive, il conviendrait de vérifier le taux de travail en cisaillement, la compression transversale au niveau des appuis ainsi que le comportement vibratoire du plancher.

Les résultats de cet exemple, présentés dans le Tableau 5-III, montrent que le dimensionnement est piloté par les déformations admissibles, ce qui est cohérent avec les exemples d'application de l'EUROCODE 5 [106]. Les deux dernières colonnes du tableau correspondent aux résultats expérimentaux obtenus sur les éprouvettes de plus grandes dimensions (sections quasi équivalentes aux sections des solives dimensionnées).

Au maximum, avec des bois classés D50, il y a un gain de volume de bois de 10% par rapport à une solive en résineux C24. Cela signifie que pour rester compétitif, les bois feuillus ne pourraient être vendus que 10% plus cher que les bois résineux. Au vu de la réalité économique du marché du sciage, avec des écarts de prix entre feuillus et résineux oscillant entre 0 et 100% en fonction des essences (VOSGES PROMOBOIS (88) 07/2019 - Epicéa : 250€/m^3 - Hêtre : 250€/m^3 - chêne : 600€/m^3). Utiliser des avivés de bois feuillus pour se substituer aux résineux n'est pas envisageable économiquement. Vouloir transposer les techniques de construction actuelles utilisant uniquement du bois résineux avec les bois feuillus n'a donc « économiquement » aucun sens.

Tableau 5-III : Comparaison des résistances et modules estimés par classement visuel avec les essais de flexion.

Classe	C24	D24	D30	D50	Hêtre Essais	Chêne Essais
$f_{m,k}$ [MPa]	24	24	30	50	39,55	31,01
$E_{0,mean}$ [MPa]	11000	10000	11000	14000	14133	12159
b [mm]	60	60	60	60	60	60
h_{ELU} [mm]	168	168	151	117	131	148
h_{ELS} [mm]	199	205	199	183	183	192

$$\frac{6\,q_{ELU}\,l^2}{8\,b\,{h_{ELU}}^2} < \frac{f_{m,k}\,\times k_{mod}}{\gamma_m} \;\rightarrow\; {h_{ELU}}^2 > \frac{3\,q\,l^2}{4\,b\,f_{m,k}\,\times k_{mod}} \times \gamma_m \tag{5.1}$$

$$\left[\frac{5\,q_{ELS,k}\,l^4}{384\,E\,\frac{b.{h_{ELS}}^3}{12}} + \left(\frac{q_{ELS}\,l^2}{8\,G\,\frac{5\,b.h_{ELS}}{6}}\right)_{négligéable}\right] < \frac{l}{200} \;\rightarrow\; {h_{ELS}}^3 > \frac{125\,q_{ELS}\,l^3}{4\,E\,b} \tag{5.2}$$

$$q_{ELU} = 1{,}35\,G + 1{,}5\,Q \tag{5.3}$$

$$q_{ELS} = (1 + k_{def})\,G + (1 + \psi_2\,k_{def})\,Q \tag{5.4}$$

Pour envisager d'autres pistes de valorisation des bois feuillus, il faut, dans un premier temps, dresser la liste des spécificités observées expérimentalement sur les bois feuillus :

- Plus la section est petite et meilleures sont les propriétés mécaniques. Des sections de faibles dimensions augmentent également le rendement du sciage en permettant d'extraire plus de pièces de la même grume. Les bois de petites dimensions permettent un séchage plus rapide et leur faible massivité les rend moins sensibles aux effets de déformation liés au séchage (tuilages, gauchissement…).

- Les grumes de qualités secondaires sont dans la majorité des cas mal conformés, un billonnage « court » permet ainsi d'optimiser le rendement. Le nombre de défauts (pente de fil, déformations initiales...) augmente linéairement avec l'allongement des sciages. Il est donc nécessaire de billonner « court » et de procéder, par la suite, à un aboutage afin d'obtenir des planches en dimensions d'emploi ou optimale d'un point de vue transport par exemple.

- Les modules d'élasticité des bois feuillus restent dans la même plage que les modules d'élasticité des bois résineux. Faire travailler ces pièces en flexion ne permet qu'un gain matière de 10% (conclusions du Tableau 5-III).

- Cependant, les résistances des bois feuillus sont largement supérieures, favorisant ainsi les solutions constructives qui maximisent les efforts normaux.

- Contrairement aux méthodes de classement définies pour les résineux, pour les bois feuillus, il est compliqué de garantir les propriétés mécaniques. C'est d'autant plus vrai que les résistances en traction des bois feuillus de basse qualité sont faibles en comparaison de leur résistance en flexion.

- La portance locale est plus importante dans les bois feuillus par rapport aux bois résineux (conclusions de la partie 4) permettant potentiellement de réduire le nombre d'organes dans les assemblages. En contrepartie, la densité plus forte des bois feuillus empêche l'utilisation rationnelle des organes du type vis et pointes dans ces essences (nécessité d'un pré-perçage généralement peu économique…)

Toutes ces observations conduisent à penser qu'une des meilleures pistes de valorisation des bois feuillus serait une utilisation dans le cadre de poutres treillis constituées d'éléments de faibles dimensions. L'objectif principal restant de garantir au mieux les propriétés mécaniques des bois feuillus.

Selon la thèse de VIGUIER [14], même en disposant d'une machine de classement qui garantisse à 100% la densité et le module d'élasticité, l'efficience d'une telle machine resterait faible pour le chêne du fait de la faible corrélation entre ces propriétés mécaniques et la résistance en flexion. KOVRYGA [47] a montré qu'en basant son modèle de prédiction de la résistance en traction sur une mesure dynamique du module d'élasticité et sur la mesure de la nodosité, le coefficient de corrélation R^2 était au mieux égale à 0,6 (essais réalisés sur du hêtre, du frêne et de l'érable). Bien que les machines de classement permettent de mieux estimer les résistances mécaniques que le système de classement visuel, pour garantir la fiabilité des ouvrages, les machines de classement doivent obligatoirement minimiser la résistance prédite. Afin de proposer une meilleure valorisation des bois feuillus, une réflexion autour de l'amélioration de la prédiction des propriétés mécaniques semble incontournable.

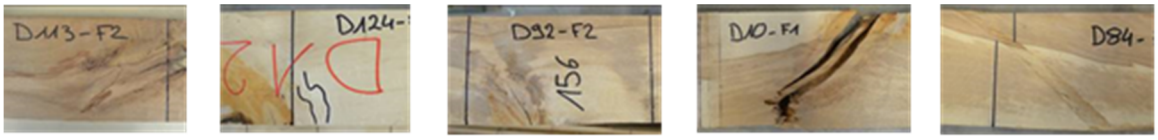
5.2. METHODE ALTERNATIVE DE CLASSEMENT MECANIQUE

1. Principe de la méthode de classement

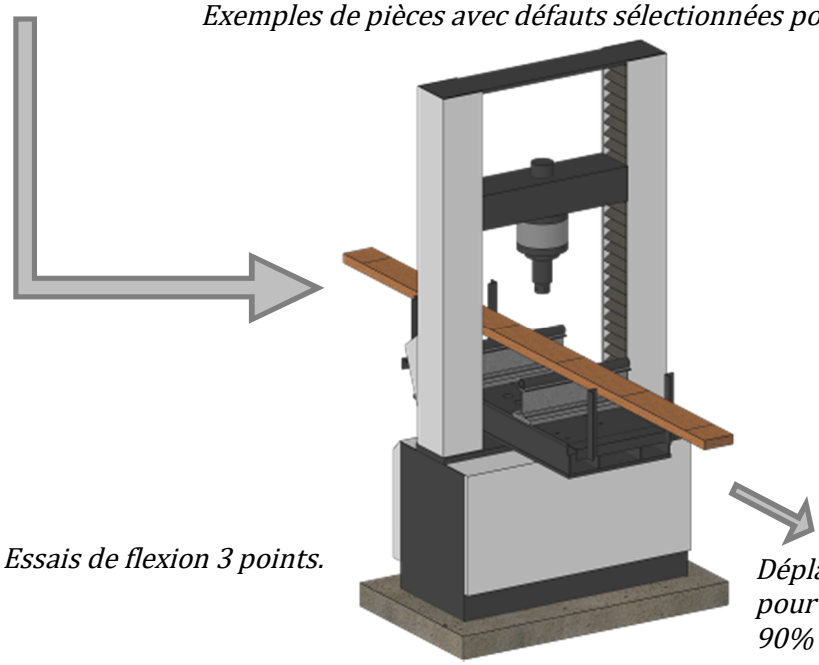
Au vu des conclusions établies sur la méthode de classement mécanique des bois feuillus, BOCQUET a eu une idée en apparence simple : « Et si toutes les pièces étaient éprouvées en test tout ou rien afin de garantir leurs propriétés mécaniques ?» [107]. En partant de ce principe, les résistances ne sont plus estimées mais certifiées par un essai mécanique. Il serait alors envisageable d'utiliser le même coefficient de sécurité sur le matériau que celui introduit pour les constructions métalliques ($\gamma_m = 1{,}0$ selon l'EUROCODE 3 à la place du coefficient $\gamma_m = 1{,}3$ utilisé pour les ouvrages en bois), ce qui représente potentiellement un gain matière de 30% largement supérieure au gain envisageable grâce à une machine de classement ultra performante. De plus, comme il a été montré que 100% des pièces pouvait être attribué dans la classe mécanique la plus haute, un test tout au rien à cette valeur permettrait de valoriser déjà bien plus de bois qu'avec simplement le classement mécanique sans risque de voir le rendement matière diminué.

Une première étude a été réalisée dans ce sens pour le collectif Terre de Hêtre (88) en 2015. Dans le cadre de ce projet, 6,5m^3 de bois de hêtre issus de billons C&D ont été sciés en section de 50x150mm² et séchés à une humidité de 12%. Après calibrage (43x150mm²), les sciages ont été aboutés par l'entreprise SIMONIN (25) pour produire 295 planches d'une longueur de 3,05m. Parmi ce lot, les 38 planches avec les plus gros défauts (pente de fil et nœuds selon la Figure 5-2) ont été sélectionnées puis éprouvées par un test de flexion 3 points. Les essais ont été réalisés sur les deux faces et en déplaçant la pièce selon sa longueur afin de l'éprouver celle-ci sur 90% de son linéaire.

Parmi les 38 planches, 2 d'entre elles ont rompu pour des résistances inférieures à 30 MPa (26 et 24,5 MPa) et 11 pour des résistances compisses entre 30 et 50 MPa. Ainsi, malgré les défauts importants, 70% des planches éprouvées ont des résistances en flexion supérieures à 50 MPa.



Exemples de pièces avec défauts sélectionnées pour les essais



Essais de flexion 3 points.

Déplacement de l'éprouvette pour réaliser les essais sur 90% de la longueur.

Figure 5-2 : Principe des essais réalisés dans le cadre de l'étude destinée à Terre de hêtre (88).

En partant des conclusions faites sur la résistance en traction dans la partie 3, l'idée de garantir les propriétés mécaniques par essai a évolué en remplaçant l'essai de flexion par un essai en traction. Ce nouveau test à l'avantage de permettre d'éprouver en une fois toute la barre contrairement aux essais de flexion qui nécessitent un déplacement du point de chargement sur la longueur de la pièce. Le nouveau processus de valorisation des bois feuillus par la garantie des propriétés mécaniques est introduit par la Figure 5-3. Dans le cadre d'une utilisation de la barre dans une poutre treillis, cela permet de s'affranchir des corrélations entre résistance en flexion et résistance en traction.

Ce processus introduit un essai vibratoire des sciages avant la réalisation des aboutages. Cela permet d'estimer les modules d'élasticité à partir de la fréquence propre longitudinale et de la masse volumique de la pièce testée (cf Annexe F). La méthode d'essai vibratoire longitudinale a été retenue contrairement à la méthode transversale car elle est plus simple à mettre en place dans le cadre d'un processus industriel avec des longueurs variables et c'est d'ailleurs ce qui est couramment utilisé dans le milieu industriel (ESCAN de WEINIG, VISCAN de MICROTEC...).

Du fait d'une corrélation entre module d'élasticité et résistance en flexion pour les pièces de petites sections, en ne conservant que celles avec le plus haut module d'élasticité, « théoriquement » les résistances les plus faibles sont écartées. Le test permet également de ne conserver que des barres avec les modules d'élasticité élevés pour mieux concurrencer les bois résineux lors d'une utilisation en flexion. Il est ainsi possible d'introduire une limite basse du module pour ne conserver que les bois permettant de produire les lames de la qualité souhaitée (D18, D24, D40…).

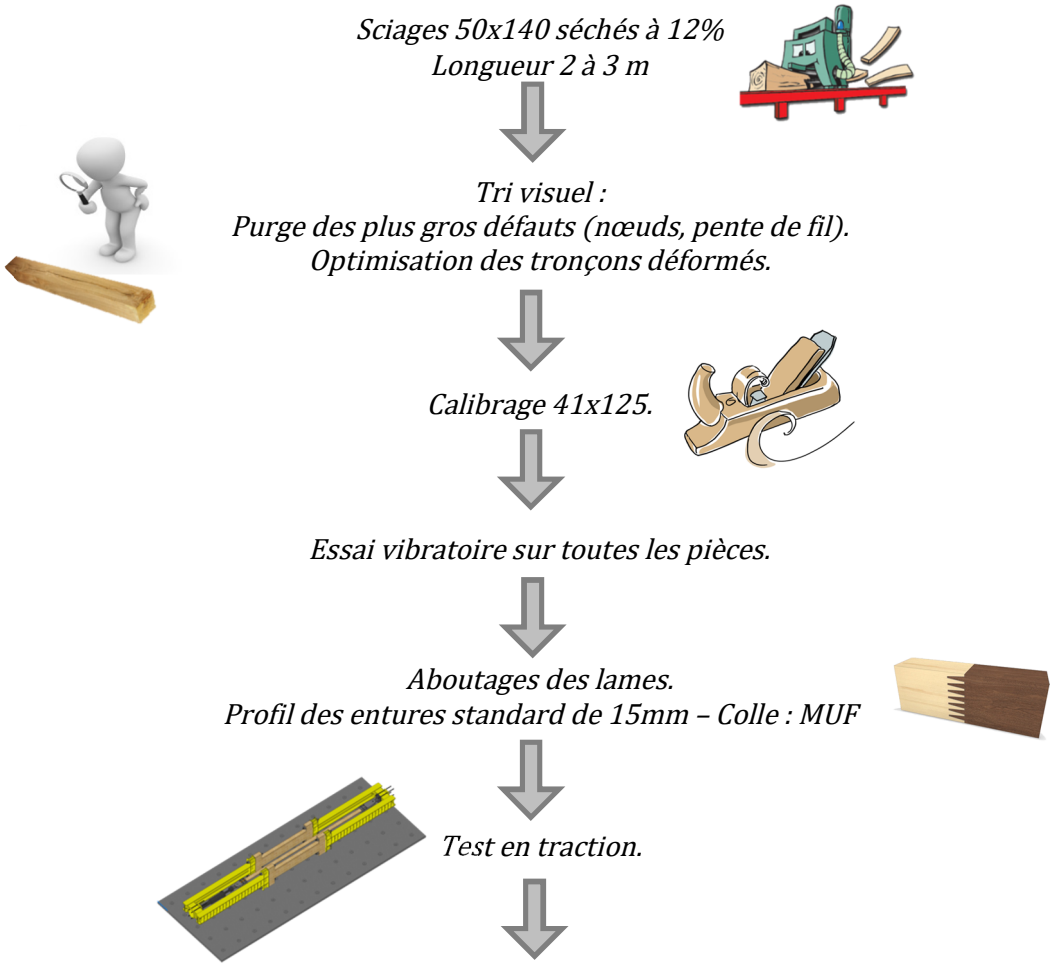


Figure 5-3 : Principe du processus de valorisation des bois feuillus par la « garantie » des propriétés mécaniques.

2. Modèle statistique

Pour définir les limites de module d'élasticité à fixer pour produire une qualité spécifique de lames, une étude statistique a été réalisée avec R-STUDIO. L'étude se base sur les résistances et modules d'élasticité observés sur les essais de flexion (les résultats en traction étant trop incertains en ce qui concerne les modules d'élasticité) et fonctionne selon le cheminement suivant :

Les résultats des essais réalisés sur les sections 40x100 et 50x150 pour le hêtre et le chêne sont utilisés pour représenter la ressource utilisée (bois de 50x140 de petite longueur).

Les lames de 13 mètres sont constituées d'un assemblage de plusieurs sciages différents. Leurs longueurs est tirée aléatoirement entre 1,5 et 2,5m. Leurs résistances sont déterminées à partir d'une estimation aléatoire suivant une loi de distribution normale asymétrique ayant la même répartition que celle observée expérimentalement (moyenne : 88,2 MPa / écart-type : 19,4 MPa / Skew : -1,4). Pour définir le module d'élasticité, la corrélation entre résistance et module d'élasticité s'est vue transformée en une succession de distribution normale avec, pour chaque plage de résistance, une moyenne et un écart-type du module d'élasticité. Par exemple, le module d'élasticité d'une pièce de résistance 67,5 MPa est estimé à partir d'une distribution normale selon une moyenne de 13800 MPa et un écart-type de 2140 MPa (cf Figure 5-4).

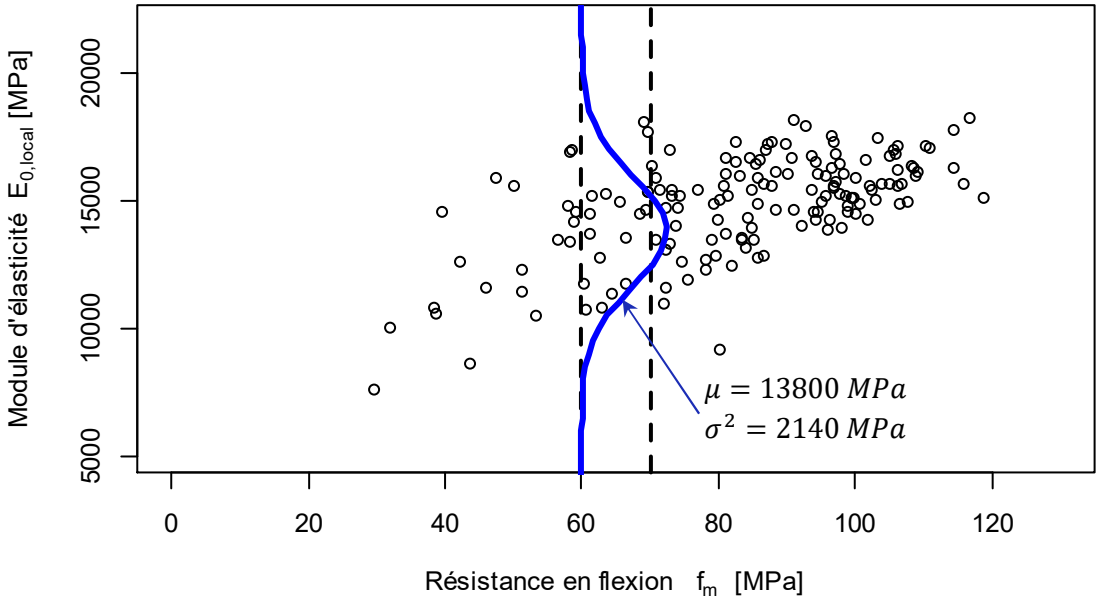


Figure 5-4 : Principe pour le tirage aléatoire des propriétés mécaniques des lamelles.

Avant d'assembler les pièces, le critère de tri sur le module d'élasticité est simulé en supprimant toutes les barres possédant un module inférieur à la limite définie. Il est connu que le module vibratoire surestime généralement le module d'élasticité en flexion de la pièce ($E_{m,local} = 0{,}92\ E_{dynamique}$ selon RAVENSHORST & VAN DE KUILLEN [50] pour des bois feuillus, résineux et tropicaux). Ce phénomène n'est pas pris en compte dans le modèle statistique mais pourrait être intégré, dans le cadre d'une chaîne de production, si les résultats des essais pour garantir les propriétés mécaniques s'écartent trop de ceux simulés.

Les pièces sont assemblées pour produire des lamelles de 13m de longueur. La résistance de cette lamelle est égale à la résistance minimale des éléments qui la compose et le module d'élasticité est recalculé au prorata des longueurs et des modules de chaque sciage qui la compose selon l'équation suivante :

$E_{lamelle} = \frac{\sum l_i}{\sum \frac{l_i}{E_i}}$ avec l_i la longueur du sciage et E_i son module d'élasticité.

L'effet des aboutages sur la perte de résistance est pris en compte lorsque deux barres sont assemblées. En utilisant les résultats des essais de deux campagnes expérimentales réalisées au LERMAB (cf Figure 5-5), une relation entre module d'élasticité et résistance des aboutages a été définie (en introduisant également une répartition aléatoire de la résistance). Lors de l'assemblage de deux barres dans le modèle, leur module moyen est calculé et une résistance de l'aboutage est estimée.

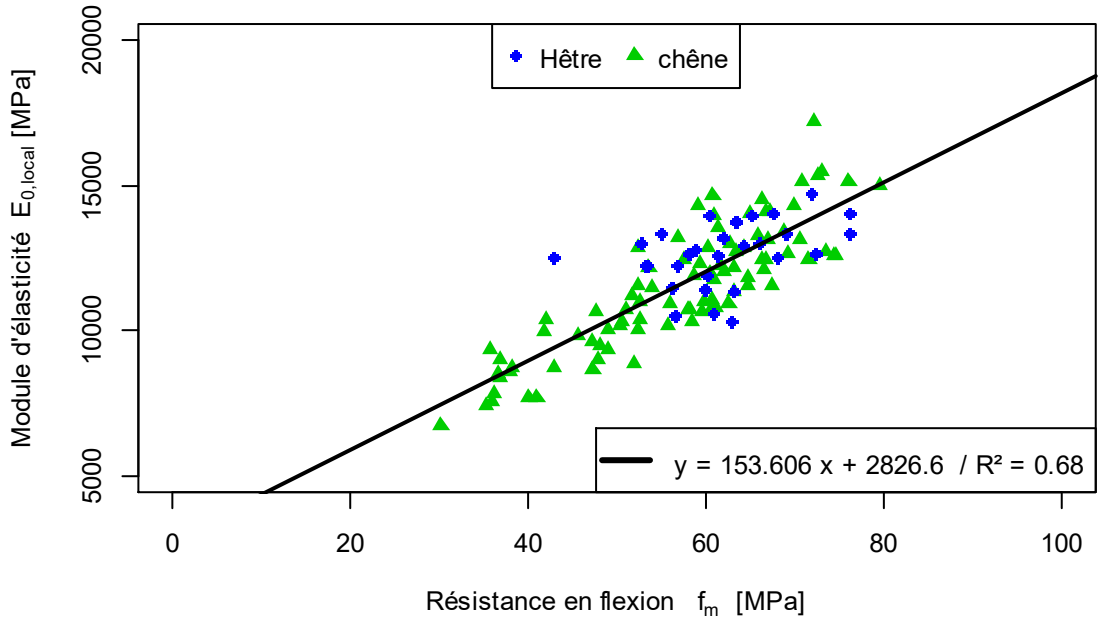


Figure 5-5 : Relation entre module d'élasticité et résistance en flexion des aboutages.

Le test « tout ou rien » est simulé en supprimant l'ensemble des pièces avec une résistance ou un module inférieur aux limites fixées pour la classe de résistance souhaitée. La transformation entre les sciages et les lamelles est imagée au travers de la Figure 5-6. Les aboutages ont pour effet de réduire significativement la variabilité de la résistance et celui du module d'élasticité.

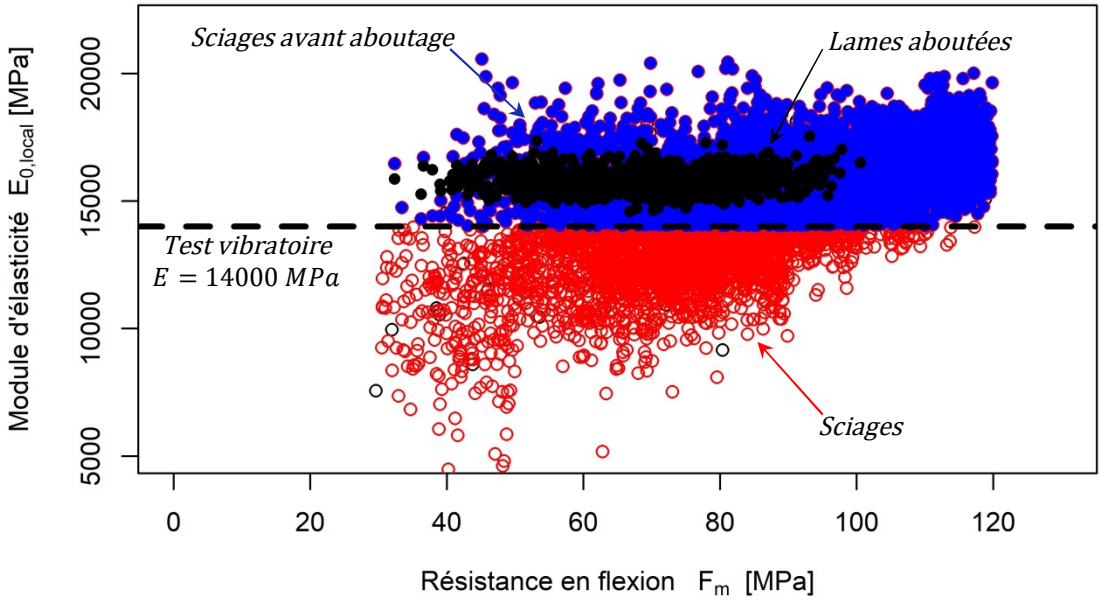


Figure 5-6 : Résultats du modèle statistique.

Les conclusions du modèle statistique sont présentées dans le Tableau 5-IV. La part de pièce rejetée par le tri augmente proportionnellement à la limite fixée pour le module d'élasticité vibratoire. D'une manière générale, le tri par un module inférieur à 8000 MPa permet de supprimer les barres avec les résistances les plus faibles et de garantir quasiment 100% de la production avec des propriétés équivalentes à celles d'un D24. Pour produire des pièces avec des propriétés mécaniques hautes (D40 ou D50) plusieurs options peuvent être choisie. Soit il est souhaité, de garantir 100% de sa production et dans ce cas un critère de tri de 12 000 ou de 14 000 MPa est appliqué, soit il est recherché le rendement maximal à partir des sciages d'entrée. En choisissant un critère à 10 000 MPa pour du D40 ($\eta = 0{,}895 \times (1 - 0{,}043) = 85{,}6\%$) et un critère de 12 000 MPa pour du D50 ($\eta = 75{,}7\%$).

Mais, selon le modèle, la diminution de la limite basse du module d'élasticité entraîne également une légère diminution du module moyen des barres constituées ($E_{moyen} = 15\,775\ MPa$ pour une limite à 14 000 MPa et $E_{moyen} = 15\,198\ MPa$ pour une limite à 12 000 MPa). La faible influence du critère de tri sur le module s'explique par le fait que les billons sont « courts » et que, sur l'ensemble des pièces avec un module supérieur à 12 000 MPa, la tranche comprise entre la limite basse et 14 000 MPa ne représentent que 20% des sciages.

Tableau 5-IV : Incidence du critère de tri sur les parts de classement mécanique des lamelles de hêtre et de chêne.

Critère de Tri [MPa]	8000	10000	12000	14000	16000
Rejet du Tri	1,3%	4,3%	12,6%	31,0%	64,0%
Classement D18	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Classement D24	98,7%	99,0%	99,7%	99,8%	100,0%
Classement D40	85,8%	89,5%	95,4%	97,9%	98,9%
Classement D50	66,9%	73,6%	86,6%	94,4%	98,1%

3. Exemple du projet démonstrateur

Le processus de valorisation des bois feuillus de qualité secondaire a été expérimenté au cours de l'été 2018 dans le cadre de la réalisation d'un projet servant de démonstrateur : la maison des arbres de Xertigny (88) [108]. Au total, 40m^3 de bois feuillus de qualité secondaire ont été livrés en longueur de 2 et 3m avec au total 4000 ml de hêtre et 860 ml de chêne. Dans le cadre de ce projet, l'objectif était de produire 1960 ml de hêtre et 515 ml de chêne en section 37x120mm². Pour produire ces éléments, la démarche suivante a été mise en place :

- Tri initial des bois visuellement (purge des plus gros défauts : nœuds, pente de fil, fentes…).
- Calibrage à la section de 42x125 mm².
- Tri des pièces n'ayant pas la section requise et réalisation du test vibratoire.
- Aboutage des pièces triées en lamelles de 11m de longueur.
- Test en traction des lamelles.
- Usinage des bois pour être utilisés dans le projet.

La purge visuelle des plus gros défauts a entraîné un rejet initial de 25,8% pour le hêtre et 48,9% pour le chêne. Ces forts taux de rejets peuvent s'expliquer par deux raisons majeures.

Premièrement, une partie de l'exclusion est liée au non-respect par le scieur de la section commandée. Pour produire la section finie de 37x120 une hauteur de 135mm avait été commandée. Etant donné qu'entre 20 et 30% des pièces avaient des hauteurs avant calibrage de 124mm ou moins, une partie des pièces exclues le furent à cause du manque de section et non à cause d'un défaut (pente de fil ou nœuds).

Dans un second temps, compte tenu qu'un faible nombre d'entreprises savent abouter correctement du hêtre, il a été choisi l'entreprise de lamellé-collé SIMONIN (29) pour la production des lamelles. Ce choix a impliqué une longueur minimale de 1m des sciages à abouter ce qui est à l'origine de l'exclusion d'une partie de la ressource triée. Par exemple, si un nœud se trouve à une distance de 60cm d'un bord d'une planche de 2m, il ne reste, une fois purgée, que 1,25m de bois valorisé (rendement de 62,5%). Malgré cela, sur le tronçon de 50 cm restant au moins 40 cm à 50 cm auraient une qualité suffisante pour être valorisés… Dans le cadre de l'industrialisation du procédé et pour améliorer le rendement matière du premier tri, un aboutage avec des longueurs minimales de 30 à 40cm serait préférable.

Pour le chêne, pour pouvoir produire le linéaire de barre nécessaire au projet, le manque de bois cumulé au non-respect des sections commandées a contraint de laisser passer une partie des défauts qui auraient normalement dû être purgés par le classement visuel. Cette remarque est importante car elle permet d'expliquer en partie les différences entre le modèle statistique et les résultats qui vont être présentés par la suite

Les essais vibratoires ont été réalisés grâce au montage expérimental présentés sur la Figure 5-7. Les ordres de grandeurs entre les modules vibratoire mesurés longitudinalement et transversalement ainsi que le module d'élasticité mesuré en flexion ont été validé expérimentalement par une série de 3 essais réalisés sur des éprouvettes de bois parfait.

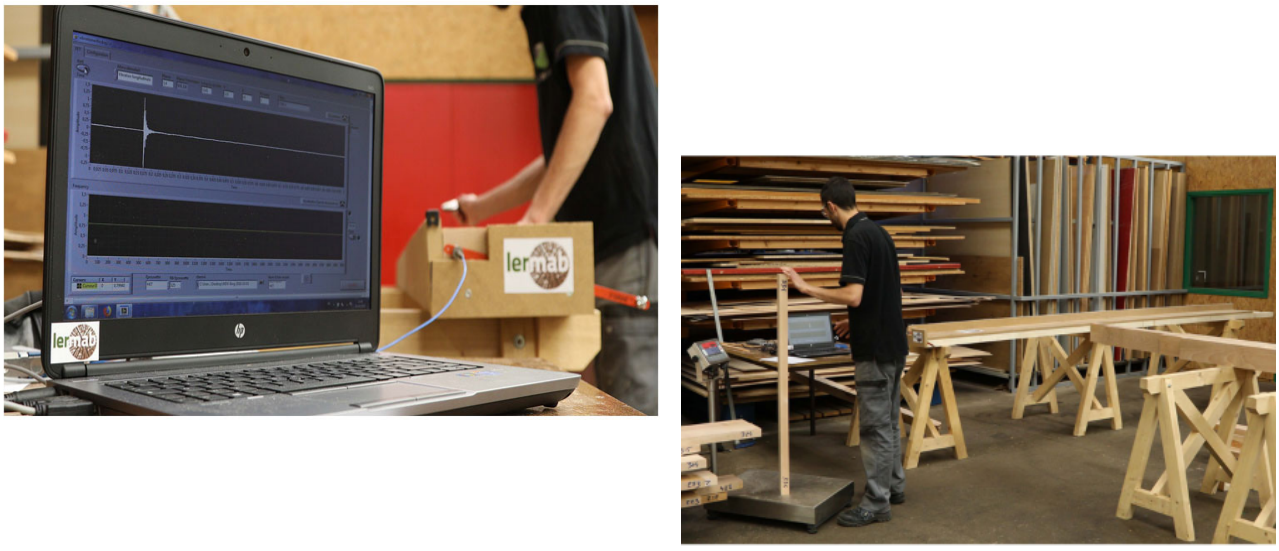


Figure 5-7 : Montage pour la mesure du module d'élasticité selon la méthode vibratoire.

Le tri des sciages selon leur module d'élasticité mesuré par méthode vibratoire, en fixant une limite à 14 000 MPa, entraîne un rejet de 28,7% des pièces de hêtre contre une estimation de 26% dans le modèle statistique. Sur les pièces ainsi retenues, le module moyen vibratoire mesuré est de 16 004 MPa, là où le modèle prédit un module local de 15 808 MPa. Néanmoins, en intégrant, la relation entre module en flexion et module vibratoire ($E_{m,local} = 0{,}92\ E_{dynamique}$), le module vibratoire mesuré en traction devrait plutôt se rapprocher des 17 200 MPa.

Selon la même figure, pour le chêne, le même critère de 14 000 MPa conduit à un rejet réel de 64,9% contre 33,9% prédits par la méthode statistique. Ces résultats sont principalement liés à la présence de défauts qui aurait dû normalement être écarté par le tri visuel (mais conservés pour avoir le linéaire nécessaire au projet). Le module moyen sur les pièces conservées est de 15 442 MPa contre 16 544 MPa normalement estimés par le modèle.

Ainsi, les écarts entre le modèle et les mesures sont bien plus importants pour le chêne que pour le hêtre. Le chêne est donc potentiellement de moins bonne qualité que celui testé dans le cadre du projet EFEUR 5, ce qui laisse penser que le nombre de pièces exclues lors des tests de traction devrait être, pour cette essence, plus important que celui estimé par le modèle statistique.

Pour fournir la quantité de bois nécessaire à la réalisation du projet, il a été décidé d'abaisser la limite du module à 12 000 MPa, réduisant ainsi l'exclusion des pièces à 30,7% (contrairement au modèle qui prédit 18,5%).

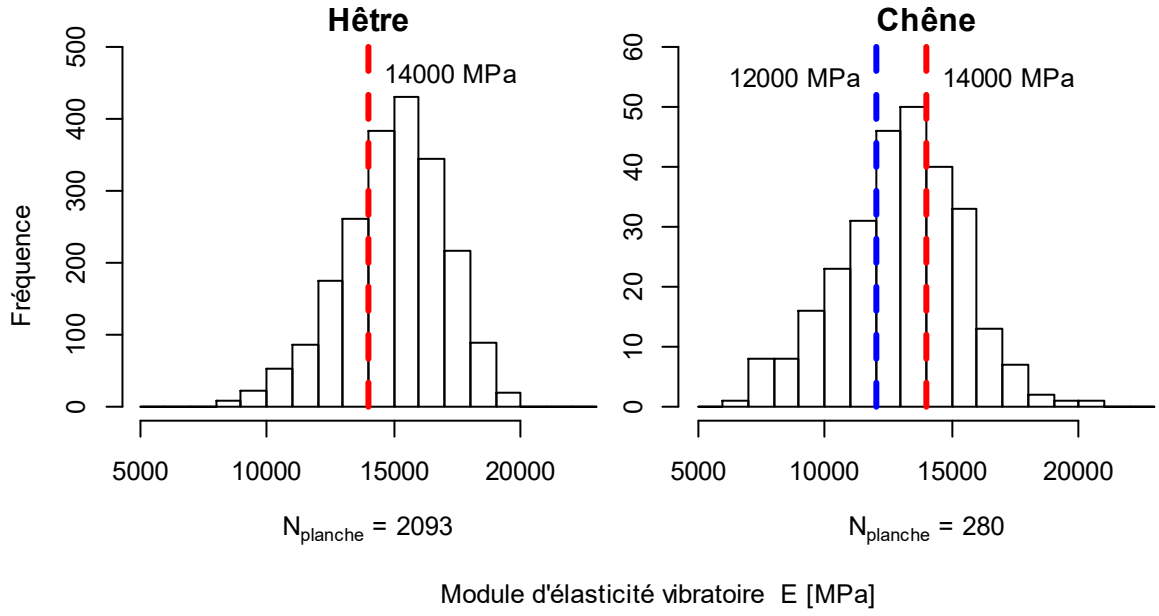


Figure 5-8 : Répartition des modules d'élasticité du tri vibratoire pour le hêtre et le chêne.

Une fois les barres aboutées pour réaliser des lames de 11m de longueur, les essais de traction ont été réalisés avec le montage de la Figure 3-17 (page 55). La limite de résistance garantie a été établie afin de valoriser le plus grand linéaire de lames aboutées. Ce choix fut motivé par le faible surplus de bois vis-à-vis de la quantité nécessaire à la réalisation de l'ouvrage servant de démonstrateur. Un choix arbitraire de bois classé D24 a été réalisé. En se basant sur la relation entre les résistances en traction et en flexion définie par l'EN 384, les lames doivent ainsi résister à une contrainte en traction supérieure à 14,4 MPa pour avoir une résistance en flexion caractéristique de 24 MPa.

Pour le hêtre, avec une limite de module vibratoire de 14 000 MPa, 2,05% des pièces ont cassé pour une contrainte de traction inférieure à 14,5 MPa. Sur ces pièces, le module moyen en traction mesuré est de 16 820 MPa (COV 7%).

Les pièces de hêtre ayant un module vibratoire compris entre 8 000 et 14 000 MPa ont tout de même été aboutées et testées en traction. Sur les 91 pièces ainsi réalisées, le module d'élasticité moyen en traction est de 14 199 MPa (COV 12%) et 28,6% d'entre elles ont cassé pour une résistance en traction inférieure à 14,5 MPa. La relation entre module d'élasticité global et résistance à rupture est donnée à travers la Figure 5-9.

Pour l'ensemble du chêne testé (64 barres), 43% des planches ont cassé pour une résistance inférieure à la résistance limite de 14,5 MPa. Le module moyen mesuré sur toutes les pièces est de 12 676 MPa (COV 14,5%) et la Figure 5-9 met en avant les mêmes conclusions que CAMU & AICHER [67] : une absence de corrélation entre le module global de la barre et la résistance en traction. Les résistances sont analogues à celles obtenues pour les essais de traction axiale (partie 3) avec 13% des 65 éprouvettes testées ayant des résistances comprises entre 6 et 8 MPa.

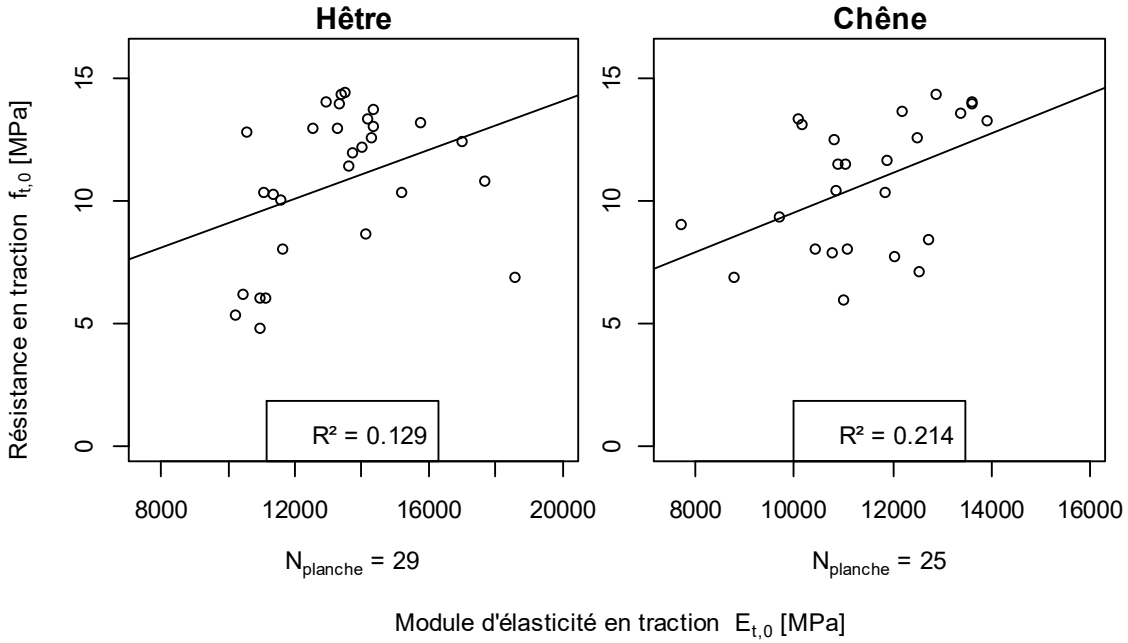


Figure 5-9 : Relation entre module d'élasticité et résistance pour les essais de garantie des propriétés mécaniques. (Essais ayant une contrainte inférieure à 14,5 MPa)

Dans la théorie, garantir les propriétés mécaniques permettrait de se passer du coefficient de sécurité sur le matériau bois (γ_m). Donc une pièce avec une résistance garantie de $14{,}5$ MPa a une résistance équivalente à une pièce classée visuellement : $14{,}5 \times 1{,}3 = 18{,}85$ MPa. Les bois certifiés utilisés dans le cadre du démonstrateur ont donc des résistances en traction équivalentes à des bois classés D30 et les modules moyens d'un D60 pour le hêtre et d'un D40 pour le chêne.

Etant donné que la relation entre flexion et traction observée expérimentalement est moins favorable aux pièces comportant des défauts que celle présentée dans l'EN 384 (cf conclusions du § 3.5.6), garantir une résistance en traction à 14,5 MPa permettrait d'assurer une résistance en flexion de : $(14{,}5 + 14{,}15)/0{,}8 = 35{,}8\ MPa$. En se passant du coefficient de sécurité γ_m les 14,5 MPa garanties en traction équivaudrait à un bois D40 classé visuellement ($35{,}8 \times 1{,}3 = 46{,}54$ MPa).

Néanmoins, pour affirmer définitivement ces suppositions sur l'estimation de la résistance en flexion, une campagne expérimentale spécifique devrait être conduite. Après avoir certifié un lot d'éprouvette par des essais de traction, il serait possible de réaliser des essais à rupture en flexion et en compression sur ce même lot de bois. Ces essais semblent indispensables pour valider l'estimation des résistances à partir d'une résistance certifiée en traction. Cela permettrait d'établir des corrélations entre les 3 résistances nécessaires aux calculs des structures de type treillis (flexion, traction et compression axiale) et ainsi valoriser la ressource au meilleur de ses performances.

4. Analyse économique du procédé

Outre le dimensionnement mécanique de l'ouvrage, sa rentabilité économique est tout aussi importante. C'est pour cela que l'étude du coût de la lame est indispensable afin de juger de la pertinence de cette nouvelle méthode de valorisation du bois.

A partir des prix de vente proposés par les scieurs (pour la fourniture ainsi que le séchage d'avivés de hêtre et de chêne) et des rendements matières, il est possible de calculer le coût final de la lame aboutée avec des propriétés garanties (cf Tableau 5-V).

Pour produire 1m^3 de produit fini, le processus, avec ses différents rendements, nécessite 1,58m^3 de produit avivé. Si le coût des aboutages est directement extrait des données du fabricant de lamellé-collé, les autres dépenses ont été estimées afin de tenir compte d'un prix acceptable pour la réalisation de chaque étape dans le cadre d'une industrialisation. Par exemple, 10% du prix du classement vibratoire (de 10€/m^3) représentent l'amortissement sur 7 ans d'une machine ($\approx$ 120 000€) avec une production de 15 000 m^3 par an (1,15 €/m^3). Les 90% restant correspondent aux frais de fonctionnement.

Dans le cadre du projet démonstrateur présenté précédemment, les taches ayant principalement été réalisées manuellement, les coûts des essais (environs 260€/m^3) ne sont pas comparables avec le coût théorique d'une machine d'essais (estimée entre 150 000 et 200 000€) développée dans l'optique de tester des barres de 13m de long.

Tableau 5-V : Tableaux des coûts de la méthode de certification des propriétés mécaniques pour le hêtre.

Prix d'achat du bois sec :	300	€/m^3	
Rendement du tri visuel :	85%		
Prix du tri visuel :	10	€/m^3	
			364,71 €/m^3
Rendement du classement vibratoire :	87%		
Prix du classement :	10	€/m^3	
			428,73 €/m^3
Rendement des aboutages :	99%		
Prix des aboutages :	80	€/m^3	
			516,47 €/m^3
Rendement du test en traction :	87%		
Prix du test traction :	15	€/m^3	
			613,71 €/m^3

En valorisant les bois exclus des différentes étapes sous la forme de bois énergie (50€/m^3), il est possible d'abaisser le coût final de la lame à 585 €/m^3.

Cependant, en intégrant le prix du calibrage entre les avivés (50x140mm²) et les tronçons avant aboutage (43x125 mm²) le rendement matière diminue largement avec 2,06m^3 nécessaire à la production de 1m^3 de produit fini. Par conséquent, le prix de la lame dépasse les 800€/m^3 soit un prix bien trop important vis-à-vis des prix de bois résineux. Ce tarif est extrêmement dépendant de la section des avivés commandés, avec une section sèche de 48x130mm², le coût final redescend à 725€/m^3.

Pour être économiquement viable, il faudrait que le prix de la lame certifiée ne dépasse pas les 520 à 580 €/m^3. Ce prix est défini à partir du prix d'achat du bois résineux sec (250 à 280 €/m^3) divisé par le rendement lié au classement visuel ($\approx 30\%$) et multiplié par l'amélioration des propriétés mécaniques (16 000 MPa / 11 000 MPa = 1,45), soit : $250 \times 1{,}45/0{,}7 = 517$ €. Par le calcul du prix de revient de la lame garantie en propriétés mécaniques et en intégrant le calibrage avant aboutage, cet optimum économique n'est possible qu'avec un prix d'achat des avivés sec à 200€/m^3.

Sur le marché des produits de construction bois, l'entreprise POLLMEIEIR propose des planches de LVL de hêtre (épaisseur de 42mm) à des prix compris entre 489 et 615 €/m^3. Ils proposent également des poutres en hêtre classées GL75h ($f_{m,k} = 75\text{MPa}$ et $E_{mean} = 16\,800\text{MPa}$) avec des épaisseurs comprises entre 50 et 300mm pour des prix variant de 615 à 850 €/m^3. Au vu des tarifs proposés, une solution économiquement viable pour la valorisation des bois feuillus de qualité secondaire est vraisemblablement le déroulage. Cependant cela nécessite des investissements généralement importants (40 Millions €) selon BLERON [109].

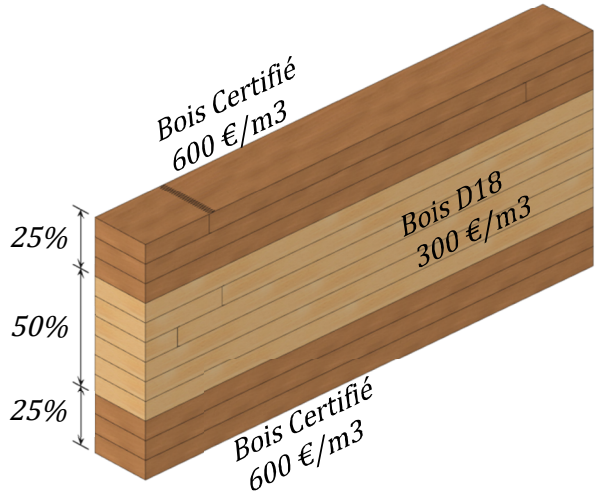
5.3. METHODE DE VALORISATION DE LA LAMES GARANTIES

Il est possible d'utiliser les lamelles garanties ou des éléments de LVL de bois feuillus déroulés pour produire des éléments de construction analogues à ceux proposés avec des bois résineux.

AICHER & All ont démontré en 2011 [61] & 2018 [62] que les joints de collage entre des lamelles de hêtre avaient des résistances suffisantes pour permettre la production de bois lamellé-collé au minimum classé GL42c. En reprenant leur raisonnement et en l'appliquant aux bois certifiés, l'optimum économique serait de réaliser des poutres dites « panachées », en utilisant des lamelles garanties pour les parties les plus sollicitées et des bois de qualité D18 pour les lamelles intermédiaires (cf Figure 5-10). Pour avoir un sens économique de tels produits doivent avoir un prix de vente permettant d'égaler le prix des solutions en bois résineux.

Dans le cadre de l'étude EU HARDWOOD, le FCBA [110] a produit 15 poutres lamellées-collées panachées composées de planches de chêne classées visuellement D40 et D24. Les essais de flexion ont montré une résistance caractéristique de 55,1 MPa et un module d'élasticité de 17 100 MPa soit des performances largement supérieures aux BLC de résineux gl32h pouvant être produits à partir de bois résineux ($f_{m,k} = 32\text{MPa}$ & $E_{0,mean} = 14\,200$ MPa). De la même manière, EHRAHART & All [111] ont proposé des poutres panachées avec du hêtre sur lesquelles les résistances caractéristiques varient entre 48,4 et 63,5 MPa (COV de 6 à 12%) en fonction de la qualité des lamelles utilisées. De même, les modules oscillent entre 13 700 et 15400 MPa (COV de 4%). Néanmoins, aucun prix de ces produits n'est clairement exposé et s'ils ne s'intègrent pas dans la réalité économique du marché des produits de construction, il y a fort à parier qu'ils ne resteront qu'au stade de produits « expérimentaux ».

Poutre bois lamellé-collé panaché :



Coût moyen matière :
450 €/m³
+ prix de fabrication du BLC

CLT mixte Epicéa-Hêtre :

Photo de EU HARDWOOD [7]

Poutre en I feuillus :

<u>Semelles :</u>
LVL de hêtre
Lame certifiée

<u>Ames :</u>
MDF
OSB

Figure 5-10 : Exemples de solutions « traditionnelles » de valorisation du LVL de hêtre ou de la lame garantie.

Une deuxième piste de valorisation traditionnelle serait de réaliser des planchers CLT utilisant un système de panachage du bois avec des lames de bois classées dans les parties supérieures et inférieures du panneau. Une autre solution envisagée par l'étude EU HARDWOOD [110] serait de réaliser du CLT avec les plis longitudinaux en bois résineux et les plis intermédiaires en bois feuillus (cf Figure 5-10). Du fait du meilleur comportement des bois feuillus vis-à-vis du cisaillement roulant, cela améliorerait les performances du CLT composé uniquement de bois résineux.

Une dernière solution envisageable serait, comme présenté sur la Figure 5-10, l'utilisation d'un système de poutre en I avec une âme en panneau de bois (OSB ou MDF). Sachant qu'il existe sur le marché une large gamme de produits utilisant du bois résineux (massif ou LVL), le remplacement du résineux par un LVL de hêtre ou une lame de bois garantie permettrait d'atteindre les mêmes portées pour une hauteur de poutre moindre, soit une consommation de bois plus faible.

En se basant sur les dimensions de référence de la marque de poutre en STEICO (cf Figure 5-10), il est possible d'estimer les nouvelles sections des membrures de la poutre en I réalisée avec du bois feuillu en remplacement du LVL de résineux. Le calcul synthétisé dans le Tableau 5-VI se base sur une équivalence des propriétés de flexion ($E.I$) des sections entre les 3 variantes imaginées. En considérant une hauteur de poutre de 240mm et un module du LVL de résineux à 14 000 MPa, les membrures en LVL de hêtre ($\mathrm{E_{mean}} = 16\,800\mathrm{MPa}$) permettent un gain matière de 19% et les membrures en lames « garanties » ($\mathrm{E_{mean}} = 16\,000\mathrm{MPa}$) un gain de 17%.

En considérant un prix du LVL de 550€/m^3 (Prix METSAWOOD pour un camion complet – Juillet 2019) le LVL de hêtre vendu entre 489 et 615 €/m^3 est largement rentable et la lame certifiée pourrait être vendue jusqu'à 643 €/m^3 pour égaler la solution en bois résineux. En réalisant la poutre avec des membrures en LVL de hêtre, il est également possible de réduire la hauteur de cette dernière de 20mm par rapport à la poutre standard réalisée avec du LVL de résineux.

Tableau 5-VI : Poutre en I réalisée avec du bois feuillu.

	Poutre STEICO	Variante POLLMEIER	Variante lame certifiée
$E_{semelle}$	14000	16800	15520
$b_{semelle}$	45	37	42
$h_{semelle}$	39	40	37
Gain volume	-	18,6%	15,7%

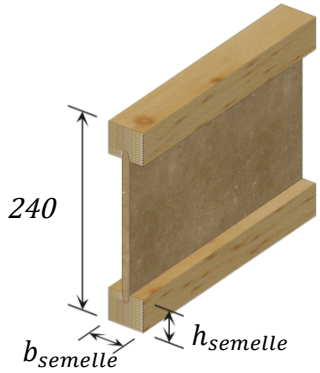
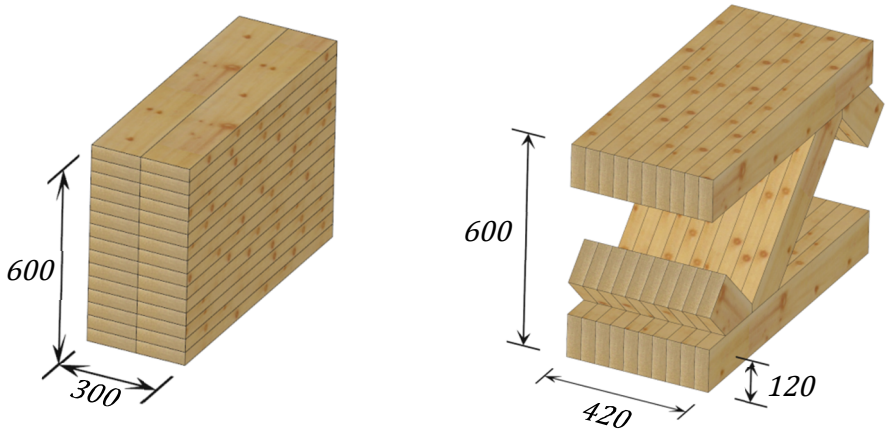


Figure 5-II : Dimensions de la poutre en I.

Pour valoriser du bois avec de hautes propriétés mécaniques et un coût élevé, en général, il est plus pertinent d'avoir recours à un système du type poutre treillis. Pour s'en convaincre, il est possible de calculer la section nécessaire en bois lamellé-collé pour franchir 11m de portée avec des charges d'habitation, le tout dans un plénum de 60cm, puis de chercher la section des membrures d'une poutre treillis qui aurait des propriétés de flexion équivalente ($E.I$). Le principe de ce calcul est donné dans la Figure 5-12. Pour correspondre à une poutre pleine de 300x600mm² en gl28h ($E = 12600\ MPa$), deux membrures en gl24h ($E = 11500\ MPa$) de 400x120mm² seraient suffisantes. En tenant compte d'un volume de bois de 50% supplémentaire pour les diagonales (quantifier grâce à la modélisation 3D de la poutre treillis), la solution treillis permet un gain matière de 25%.

Néanmoins, le coût important des assemblages (tôles, broches, boulons, main d'œuvre de fabrication et de mise en œuvre) ne permet généralement pas de faire pencher la balance économique du côté de la solution treillis. C'est pour cela que les solutions treillis, en bois résineux ou en bois feuillus (exemple en Figure 5-13) ont principalement un sens dans le cadre du franchissement de portées importantes où les poutres pleines entraîneraient une différence de volume et de contraintes de mise en œuvre trop importante.

$$E.I_{poutre,pleine} = 12600.\frac{300 \times 600^3}{12}$$
$$= 6{,}804.10^{13}\ MPa.mm^4$$



$$E.I_{treillis} = 11500 \times 2 \times \left(\frac{420 \times 120^3}{12} + 120 \times 420 \times \left(\frac{600-120}{2}\right)^2\right)$$
$$= 6{,}816.10^{13} MPa.mm^4$$

Figure 5-12 : Comparaison entre la poutre pleine et la poutre treillis en résineux.

Halle de production - Elobau sensor technology - Probstzella (Allemagne) – 2016 – Architecte : F64 Architekten

Figure 5-13 : Exemple de poutre treillis réalisée en LVL de hêtre (POLLMEIER).

Pour franchir de faibles portées, le développement d'un assemblage « Low cost » pour la réalisation de poutres treillis en bois feuillus pourrait permettre de mieux valoriser la lame certifiée.

Dans cette optique, S. GIRARDON [112] a mené une thèse au sein du laboratoire LERMAB en vue de justifier le transfert de cisaillement entre des bois superposés par le biais d'un usinage au niveau de l'interface. Les efforts de cisaillement entre les pièces sont transmis directement par le système de rainures et de petites dents (appelées « picots ») qui s'emboîtent tel que représenté sur la Figure 5-14. Le cisaillement est transféré par le contact direct entre les rainures et les picots, ce qui fait apparaître une composante normale à la zone d'assemblage. Pour garantir le non-écartement des pièces et le bon fonctionnement de l'assemblage, des vis sont mises en place pour reprendre cette composante de traction. Du fait de la reprise du cisaillement sur toute la surface de contact entre les bois, cela permet également de limiter la rotation entre les deux pièces assemblées. Si la technologie a initialement été développée sur des bois résineux, la transposition aux bois feuillus améliore les performances de l'assemblage, du fait d'une meilleure résistance de ces essences au cisaillement (longitudinal ou transversal). Pour la suite de ce document, cette technologie sera appelée système « picots ».

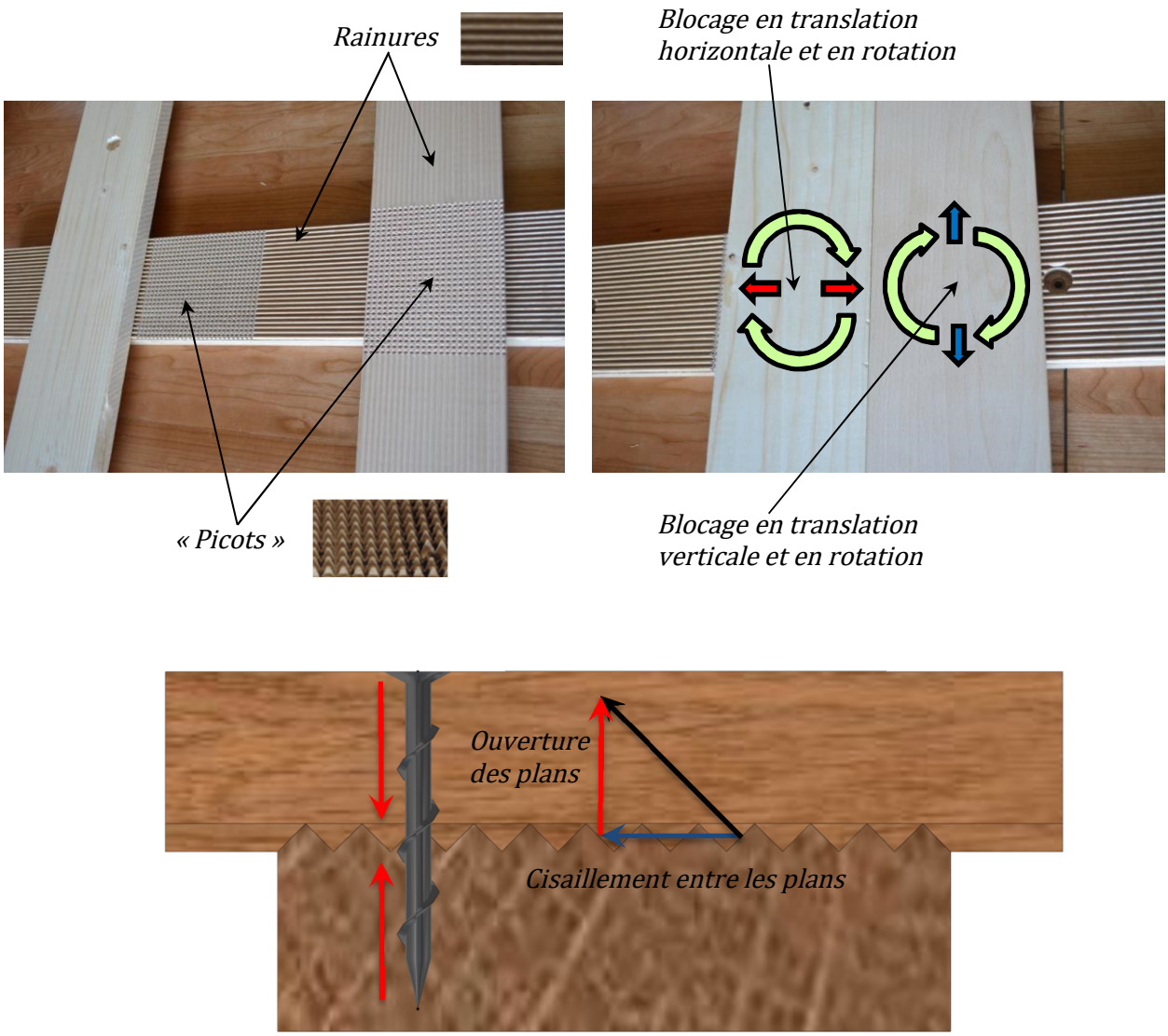
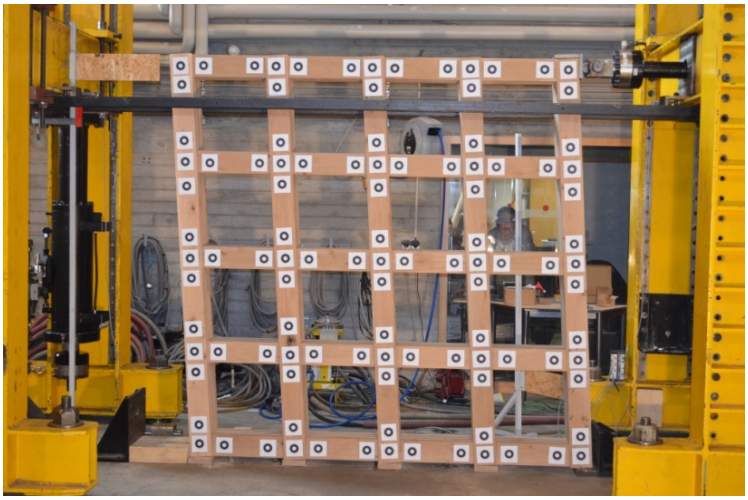


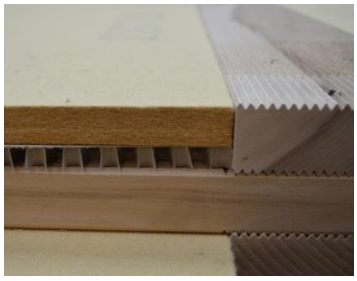
Figure 5-14 : Principe de l'assemblage par « picots ».

Avec le système « picots », un des premiers types d'ouvrages réalisables facilement est un mur. Comme le montre la Figure 5-15, il est constitué d'un empilement de planches orthogonales entre-callées de plaques d'isolant pour assurer l'isolation thermique. En fonction des performances recherchées sur ce point, la paroi peut être plus ou moins épaisse. Pour correspondre aux exigences de la RT 2012 (R > 4 ou 5), une paroi composé de 9 couches d'isolant laine de bois (λ=0,04 W/m.K) de 35mm d'épaisseur donne une résistance de 4,63 K m²/W en tenant compte d'une surface constituée à 20% de bois.

Pour produire une paroi de 2,5x2,5m², la technologie « picots » nécessite 0,5m^3 de bois soit 50% de bois en moins qu'un mur CLT de même surface et de 120mm d'épaisseur. Cette technologie permet ainsi de continuer de produire des bâtiments bois sans surconsommer de matière.



Murs « picots » de 9 couches testés
Efforts en tête : 10,5 kN – Raideur : 5kN/mm



Exemple d'isolation : panneau de fibre de bois + lame d'air

Figure 5-15 : Principe des murs assemblés par « picots ».

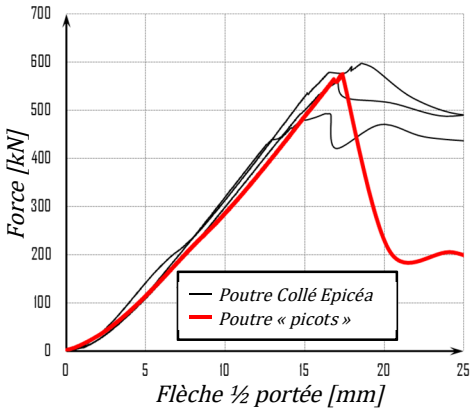
Concernant la résistance de cet élément, les essais montrent qu'une paroi composée de 9 couches est suffisante pour contreventer une construction du type pavillon d'habitation. Selon quoi, il serait possible de réduire le nombre de couche garantissant le rôle structurel de la paroi. Elle pourrait ainsi être composée d'une partie réalisée en bois certifié pour la reprise des efforts et tandis que le reste serait en bois de faible qualité, n'assurant qu'un rôle de remplissage.

L'introduction de ces produits dits de « remplissage » permet de modifier le processus de garantie des propriétés mécaniques. Les produits peuvent ainsi être constitués des bois ayant des défauts trop importants pour passer la phase de tri visuel initial ayant un module d'élasticité vibratoire trop faible ou encore, ayant cassé au cours des essais de garantie de la résistance. En prenant cela en compte, le rendement du processus permet de valoriser au moins 90% du linéaire acheté en scierie, soit sous la forme de produit structurel « garanti », soit sous la forme de produits de remplissage.

En conservant un prix d'achat des avivés secs à 300€/m^3, en tenant compte du calibrage avant aboutage et en considérant que la lame de « remplissage » est vendue au même prix que la lame « garantie », le prix du produit fini est de 556€/m^3. Avec un prix d'achat des avivés à 250 €/m^3, le prix de la lame certifiée passe en dessous des 500€/m^3. Avec ces prix, le système de garantie de la lame devient « économiquement » compétitif et ouvre à la possibilité d'arriver au même prix que celui des bois résineux.

Avec la technologie « picots », il est possible, comme présenté sur la Figure 5-16, de concevoir et de réaliser des poutres treillis. Dans le cadre d'un contrat d'étude avec la SNI [113], le LERMAB a travaillé sur une poutre en bois treillis de 11m de portée en vue de réaliser des planchers d'habitation ou de bureau avec un plenum de 610mm de hauteur. Ces poutres, constituées de lamelles de bois C30, furent assemblées par un collage entre les membrures et les diagonales. Pour tester le système « picots », une poutre avec les mêmes dimensions fut réalisée. Les essais ont ainsi montré que l'assemblage par « picots » conférait à la poutre la même raideur et la même résistance que les assemblages collés réalisés en bois résineux avec des sections inférieures 40 x 140 pour 37 x 120 mm.

Poutre treillis « picots » testées



Courbe d'essais des poutres treillis en flexion

Rupture de la poutre treillis au niveau d'un nœud.

Figure 5-16 : Poutres treillis assemblées par « picots ».

Pour juger si le nouveau prix de la lame certifiée fixé à 556 €/m^3 permet d'égaler économiquement les bois résineux sur le franchissement en flexion, le volume de bois nécessaire au franchissement de 11m de portée est calculé avec des charges de bureaux et une hauteur maximale de poutre de 610mm. Chaque solution constructive est calculée pour avoir une rigidité en flexion : $E.I = 7{,}83.10^{13}\ MPa.mm^4$, qui permet de répondre aux conditions de déformations liées à l'Etat Limite de Service (ELS).

Dans un premier temps, les poutres massives en lamellé-collé de résineux seront comparées à une poutre massive en LVL de hêtre de chez POLLMEIER (cf Figure 5-17). Dans un second temps, des poutres treillis seront calculées avec, d'un côté, la solution bois résineux C30 assemblée par collage et de l'autre, les solutions avec la technologie « picots ».

Pour les poutres massives, les prix des bois lamellés-collés et du LVL de hêtre proviennent de devis établis par les fabricants contactés (EUROLAMELLE pour le BLC et POLLMEIER pour le LVL de hêtre - 2019). Les prix des bois lamellés-collés intègrent une majoration de 90€/m^3 pour tenir compte du double encollage nécessaire à la production de poutres de largeur supérieure à 240mm. Les coûts des différentes solutions sont alors calculés dans le Tableau 5-VII, qui montre que les trois solutions sont économiquement équivalentes. En fixant le module d'élasticité des lames garanties à 16 000 MPa, une poutre lamellée collée réalisée en lamelles certifiées devrait être vendue 625€/m^3 pour correspondre économiquement à la solution utilisant du bois résineux. Même avec un prix de la lame certifiée à 500€/m^3, il n'est pas possible de produire une poutre en bois lamellé-collé à ce prix.

Tableau 5-VII : Comparaisons des solutions de poutres massives.

	BLC Gl24h	BLC Gl32h	LVL de hêtre
E_{mean} [MPa]	11500	14200	16800
b_{poutre} [mm]	360	280	240
h_{poutre} [mm]	610	610	610
Vol_{poutre} [m^3]	2,42	1,89	1,61
Prix unitaire [€/m^3]	540	585	649
Prix poutre [€]	1304	1099	1045

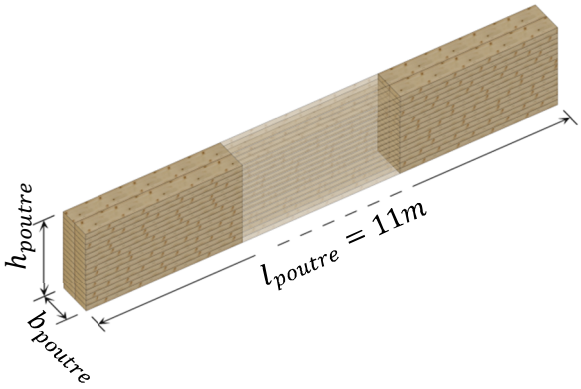


Figure 5-17 : Dimensions de la poutre massive.

La géométrie des poutres treillis est présentée dans la Figure 5-18. Les prix des matériaux ont été établis en fonction des devis proposés par les différents fabricants. Le prix des lames en résineux C30 correspond au prix de lames 50x150 (303 €/m^3) auquel a été ajouté la perte de section liée au rabotage pour obtenir une section finie de 40x140. Leur prix final est ainsi de 406€/m^3.

Pour les assemblages, seule la fourniture des vis pour les 3 solutions et de la colle pour la poutre en résineux ont été pris en compte. Afin de garantir la pression de collage sur la poutre en résineux ou d'assurer la fermeture des assemblages du système « picots », 6 vis par assemblage ont été comptées. Par exemple, pour la poutre treillis en feuillu, il y a 2 assemblages par diagonale, soit :

$$Prix = 2 \times n_{diagonnales} \times n_{plans} \times n_{vis} \times prix_{vis} = 2 \times 86 \times 2 \times 6 \times 0{,}03€ = 61{,}92€$$

Ainsi, les prix des poutres treillis présentés dans le Tableau 5-VIII n'intègrent pas le prix du montage de ces dernières (qui est sensiblement le même entre les différentes variantes) et ne permet donc que de comparer les solutions en fonction du matériau employé. C'est ainsi que la solution la plus économique apparait comme étant celle utilisant du LVL de hêtre. La solution avec les lames certifiées reste compétitive avec la solution réalisée en résineux pour un prix des lames certifiées allant jusqu'à 620€/m^3.

Tableau 5-VIII : Comparaisons des solutions treillis.

	Résineux C30	LVL de hêtre	Lames certifiées
E_{mean} [MPa]	12000	16800	16000
$n_{membures}$	10	8	8
$b_{membrures}$ [mm]	40	40	40
$h_{membrures}$ [mm]	140	120	120
Vol_{poutre} [m^3]	1,725	1,183	1,183
Prix unitaire [€/m^3]	405	489	550
Prix assemblages [€]	104,2	61,92	61,92
Prix poutre [€]	804,13	640,27	712,42

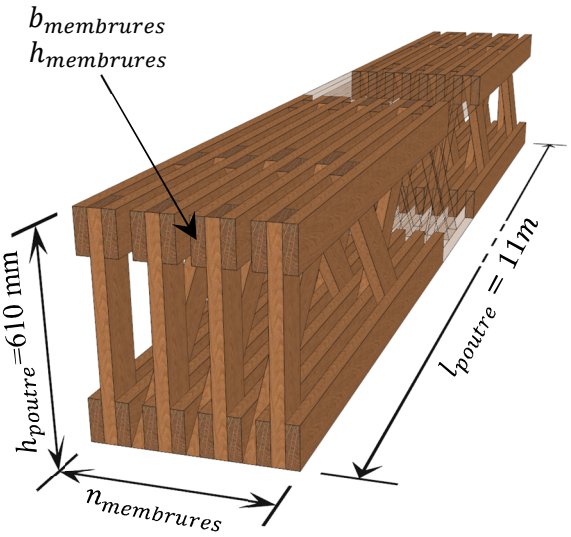


Figure 5-18 : Dimensions de la poutre treillis.

La solution poutre treillis feuillus permet de consommer 40% de matière en moins que la solution lamellé-collé GI32h (50% dans le cadre d'une poutre en GI24h). La solution treillis permet ainsi de diminuer la consommation de matière et donc de réduire l'impact des constructions sur l'environnement dans le cadre d'une démarche de développement durable. Du fait d'un rendement matière assez faible lors du sciage traditionnel (entre 40 et 60%), la solution LVL prend tout son sens afin de réduire la consommation de bois. Par exemple, le déroulage d'une grume de 200mm de diamètre donne un rendement matière de 75% en considérant un rondin résiduel de 100mm de diamètre. Ce rendement augmente d'autant plus que le diamètre de la grume est important.

Pour pouvoir comparer économiquement les deux solutions, le prix volumique de la solution lamellé-collé doit être augmenté de 130 €/m^3 pour tenir compte des usinages nécessaires au passage des gaines techniques dans le plancher (prix donné par EUROLAMELLE - 2019). La fabrication et la réalisation des assemblages doivent ainsi avoir un coût maximum de 630€ (1,89 m^3 x (585 + 130) €/m^3 – 715 €). Sachant que dans le cadre du projet démonstrateur, une poutre montée à la main nécessite l'intervention de deux personnes et que le coût de la main d'œuvre est estimé à 40€/h, le montage et l'usinage de la poutre devrait être réalisé en moins d'une journée (7h à 8h) pour avoir une solution treillis économiquement viable par rapport à la solution poutre en lamellé-collé, ce qui n'était pas le cas sur le projet démonstrateur.

Afin de proposer une solution « économiquement » viable, le procédé de production et de montage doit être optimisé avec des outils spécifiquement développés pour les usinages picots et pour le montage (cadreuse ou équivalent). Une solution basée sur un assemblage robotisé des barres entres elles, telle que proposée par BOCQUET [107], pourrait permettre d'arriver aux objectifs de coûts permettant de concurrencer le bois résineux avec la solution feuillue.

5.4. CONCLUSION CHAPITRE 5

L'étude de la valorisation des bois feuillus a montré que le système de classement visuel sous-estime largement les propriétés mécaniques des bois feuillus et que même en valorisant les bois selon la classe D50, la différence de prix entre le chêne et les résineux (≈300€) ne permet « économiquement » pas de transposer les techniques de construction traditionnelles aux bois feuillus. Pour être concurrentiels, les bois feuillus doivent ainsi être utilisés dans des structures travaillant selon des sollicitations axiales (fermes latines, poutre treillis, poteaux, barres de contreventement…).

Compte tenu de la difficulté à estimer les propriétés mécaniques des bois feuillus (mise en avant par VIGUIER en 2015) une alternative a été imaginée au LERMAB : certifier les performances mécaniques des sciages par un test en traction qui garantit la résistance et le module d'élasticité. Cependant l'analyse économique du processus a montré que ce dernier ne pouvait avoir de sens que si les produits non retenus pour la réalisation de produits structurels étaient réintroduits sous la forme de produits dits « de remplissage ». La chaîne de production peut ainsi être imaginée selon la Figure 5-19.

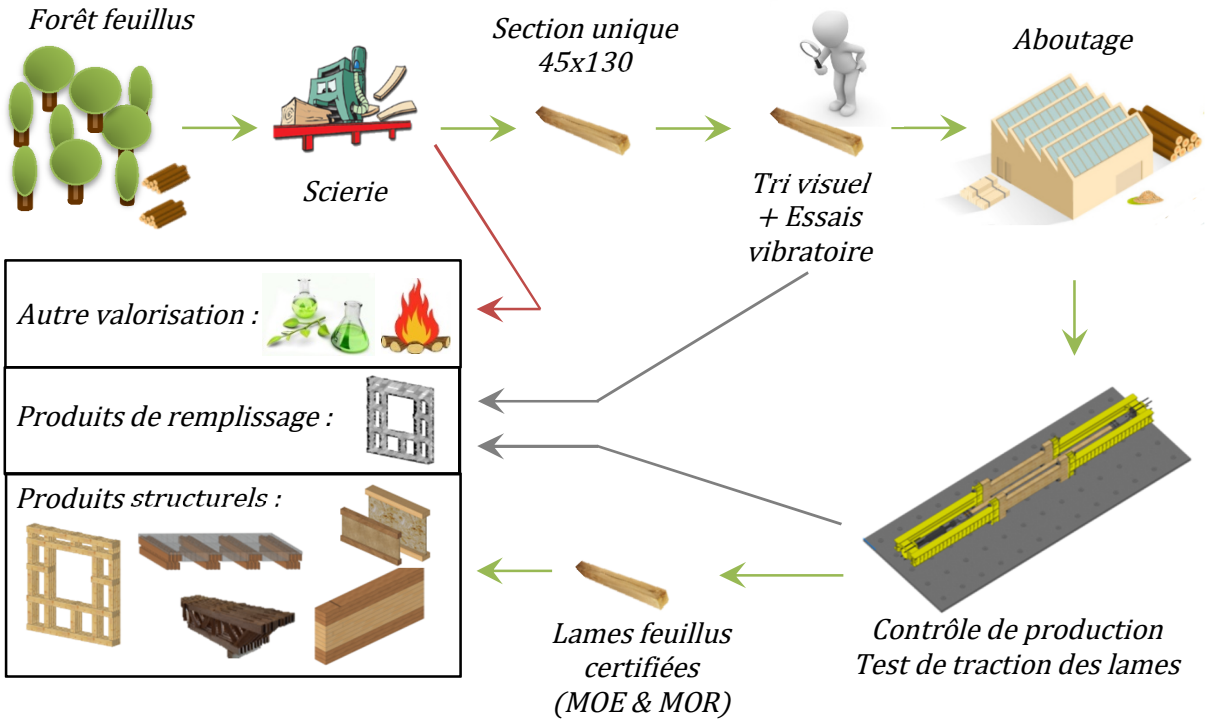


Figure 5-19 : Exemple de chaîne de production des lames de bois feuillus.

Comme évoqué par BLERON en 2012 [109], une autre alternative à la valorisation des bois de qualité secondaire est le déroulage et la production de poutre en LVL de bois feuillus.

A partir de ces produits feuillus (lamelles ou LVL), il est soit possible de concevoir des solutions techniques dites « traditionnelles » (poutres en I, CLT, BLC…), soit envisageable de proposer de nouvelles solutions constructives avec, par exemple, la technologie « picots ». Dans tous les cas, la valorisation du feuillu et plus particulièrement des bois de qualité secondaire, ne passera que par la réalisation de produits technologiques qui permettent d'optimiser la matière et donc de concurrencer les solutions en bois résineux (bois massif ou lamellé-collé).

CONCLUSION GENERALE

L'étude bibliographique a mis en avant deux points importants en ce qui concerne l'intégration des bois feuillus dans le système normatif des EUROCODES :

Dans un premier temps, faute de recherches sur le sujet, le comportement mécanique des bois feuillus a été assimilé à celui des bois résineux de manière conservative. C'est pour cela que certains paramètres de l'EUROCODE, comme par exemple le coefficient $k_{c,90}$, ne peuvent être utilisés que pour les bois résineux.

Du fait d'une tension de plus en plus accrue sur la ressource en bois résineux et du souhait de valoriser des bois locaux, depuis maintenant un peu plus de 10 ans, un regain d'intérêt pour les essences feuillues a été observé, avec une augmentation croissante de projets de recherches et des publications au niveau européen.

Pour améliorer la valorisation des bois feuillus, trois grandes thématiques de recherches scientifiques ont été étudiées au sein du de projet de recherches ANR EFEUR 5 :

- Mieux comprendre les effets du fluage sur les structures en bois et proposer un coefficient de fluage règlementaire k_{def} spécifique aux bois feuillus. C'est sur ce sujet qu'a travaillé Maximin VARNIER au sein des laboratoires GC2D et LMGC.
- Améliorer la prédiction des résistances mécaniques des bois feuillus et plus particulièrement valider les corrélations proposées dans l'EN 384 qui permettent d'estimer les propriétés mécaniques dites « secondaires » (résistance en traction, en compression et en cisaillement…).
- Valider les lois du code de calcul qui permettent de prédire la résistance et la raideur des assemblages réalisés avec des boulons et des broches.

Le travail expérimental entrepris dans le cadre de cette thèse permet ainsi de valider une partie des corrélations et équations proposées dans les normes, de mettre en avant un certain nombre de lois devant être modifiées pour garantir la fiabilité des structures et finalement, de proposer, pour certaines équations, une modification qui vise à améliorer les performances mécaniques des bois feuillus en structure.

L'étude de la portance locale selon différents angles amène de nouvelles équations pour mieux refléter le comportement expérimental des bois feuillus testés. L'idée d'une loi globale pouvant unifier bois feuillus, résineux et tropicaux comme cela a été proposé par HUBNER & All [92] a également été développée.

La comparaison entre la résistance mesurée et la résistance prédite avec les nouvelles équations de portance locale valide ainsi ces dernières. Les essais mettent largement en avant que plus l'épaisseur du bois augmente et plus le risque de rupture fragile par fendage diminue. Les conclusions sont ainsi les mêmes que celles établies par BLASS & SCHMID [81] pour les modes de rupture 3 : il n'y a pas de risque de fendage.

Les essais d'assemblages ont permis d'arriver à la conclusion qu'une définition purement empirique de la raideur des assemblages n'avait plus de sens de nos jours. Une solution basée sur les lois de comportement en portance locale « type » et un modèle éléments finis basé sur le principe de poutre sur fondations permettait de retranscrire largement le comportement non linéaire des assemblages bois.

L'étude des corrélations entre les propriétés mécaniques principales et secondaires a permis de valider la modification de la résistance en cisaillement proposée par VAN DE KUILEN & All [64] ainsi que la relation entre compression transversale et masse volumique décrite dans l'EN 384. Les essais ont mis en avant que la relation qui permet l'estimation de la résistance en compression axiale en fonction de la résistance en flexion pouvait être modifiée pour augmenter les valeurs de résistances. En cumulant cela aux modules d'élasticité mesurés expérimentalement plus importants que ceux observés habituellement dans les résineux, les bois feuillus sont de parfaits matériaux pour travailler en compression axiale.

Les essais de traction axiale ont mis en avant deux approches possibles pour proposer une corrélation avec la résistance en flexion. Dans un premier temps la corrélation est établie entre la résistance prédite en flexion via le classement visuel et la résistance mesurée en traction. Dans ce cas, la nouvelle corrélation permettrait d'augmenter les résistances en traction par rapport à celles prédites actuellement par l'EN 384. Dans un second cas, les résistances en traction sont comparées aux résistances en flexion mesurées expérimentalement sur des lots de pièces ayant la même qualité visuelle. Dans ce cas, la nouvelle corrélation diminuerait les résistances en traction proposées dans le tableau de l'EN 338.

A partir des hypothèses retenues pour la définition des relations entre les différentes propriétés mécaniques, il est possible de proposer une révision de l'EN 338 et de l'EN 384. Ces relations sont rappelées dans le tableau A. Au regard des conclusions établies sur la portance locale, il est nécessaire de réévaluer les masses volumiques dans le tableau de l'EN338 et de retenir une valeur indépendante de la classe de résistance en utilisant les résultats les plus faibles observés sur le chêne et le hêtre. Un facteur correctif pourrait également être mis en place pour l'utilisation de bois feuillus moins denses tels que le bouleau.

Tableau A : Proposition de révision de l'EN 338 en fonction des résultats expérimentaux.

	Equation proposée	**D18**	**D24**	**D30**	**D40**	**D50**
$f_{m,k}$	-	**18**	**24**	**30**	**40**	**50**
$f_{t,0,k}$	$f_{t,0,k} = 0{,}8 \times f_{m,k} - 14{,}15$	0,25	5,05	9,85	17,85	25,85
$f_{t,0,k}$	$f_{t,0,k} = 1{,}15 \times f_{m,k} - 9{,}11$	11,6	18,5	25,4	36,9	48,4
$f_{t,90,k}$	-			0,6		
$f_{c,0,k}$	$f_{c,0,k} = 5{,}4.\left(f_{m,k}\right)^{0,5}$	22,9	26,5	29,6	34,2	38,2
$f_{c,90,k}$	$f_{c,90,k} = 0{,}009 \times \rho_k$			5,4		
$f_{v,k}$	cf $Proposition\ INTER\ 50-06-1$	5,5	5,6	6,1	6,4	7,1
$E_{m,0,mean}$	-	**9 500**	**10 000**	**11 000**	**13 000**	**14 000**
$E_{m,0,k}$	$E_{m,0,k} = 0{,}67 \times E_{m,0,mean}$	6365	6700	7370	8710	9380
$E_{90,mean}$	$E_{90,mean} = E_{m,0,mean}/15$	633	667	733	867	933
G_{mean}	$G_{mean} = \frac{E_{0,mean}}{16}$	594	625	688	813	875
ρ_k	-			**600**		
ρ_{mean}	$\rho_{mean} = 1{,}2 \times \rho_k$			720		

Les essais ont également mis en avant que pour une résistance donnée, les modules d'élasticité proposés dans l'EN 338 n'étaient pas cohérents avec la réalité expérimentale. Par exemple, les bois classés visuellement D18 ont, en réalité, des résistances caractéristiques en flexion de 28 MPa pour le chêne et 34,5 MPa pour le hêtre pour des modules moyens locaux de 12420 MPa pour le chêne et 13 550 MPa pour le hêtre. Une telle réévaluation ne pourra être conduite qu'à partir de données expérimentales réalisées sur des bois d'essences et de provenances diverses.

Dans tous les cas, l'augmentation des résistances liées à une nouvelle définition des propriétés mécaniques ne permet pas, dans la réalité actuelle du marché de la construction bois, de réduire suffisamment les sections pour pouvoir utiliser les bois feuillus à la place des bois résineux. Valoriser davantage de feuillus dans le contexte actuel ne peut se faire qu'en faisant évoluer les techniques de construction ou les solutions de prédictions des propriétés mécaniques pour minimiser la quantité de bois feuillus en comparaison à une solution équivalente en bois résineux. Sans ces évolutions, les bois feuillus n'auront « économiquement » du sens que lorsque le prix de l'énergie et donc du transport aura tellement augmenté que la valorisation de la ressource locale sera plus intéressante que l'importation d'une ressource moins couteuse de base, ce qui pourrait bien arriver dans les décennies à venir.

Une solution alternative au problème de la prédiction de la résistance proposée par le classement machine ou le classement visuel peut être la garantie des propriétés mécaniques par essais. A la place d'estimer la résistance, un essai mécanique systématique permet de certifier que la pièce qui sera mise en place dans une structure aura au moins la résistance mécanique pour laquelle elle a été testée. Cette solution permet de garantir efficacement aux bois de qualité secondaire une qualité de bois D24 sur quasiment 100% des sciages, qualité largement suffisante pour construire la majorité des ouvrages. Néanmoins, l'analyse économique du procédé montre que cette méthode de valorisation n'a de sens qu'en introduisant la notion de produits dits de « remplissage ».

C'est pour cela que la technologie « picots » prend tout son sens. En plus de consommer moins de bois que les systèmes de construction du type CLT, elle permet d'intégrer de tels produits dans la confection des murs. Cette technologie répond aux enjeux de développement durable en limitant l'utilisation d'adhésifs (uniquement pour les aboutages) et de quincaillerie, en valorisant des bois locaux et en facilitant le recyclage du bois en fin de vie des ouvrages.

Il appartient maintenant aux acteurs de la filière de s'approprier ces résultats pour étudier et envisager des développements industriels régionaux cohérents et basés sur les forces de ces essences. Le vieux proverbe Vosgien n'est plus que jamais d'actualité en ce qui concerne l'utilisation de la bonne essence au bon endroit : « Chêne debout, sapin de travers, porteraient l'univers ».

PERPSPECTIVES

Afin de pouvoir être intégré à la normalisation, le travail expérimental entrepris doit être complété par un projet de recherche européen. Cela permettrait d'amener des séries d'essais complémentaires en faisant varier les origines géographiques des bois (France et Europe) et en introduisant de nouvelles essences (châtaignier, frêne, bouleau…) pour proposer des lois représentatives de la ressource à disposition.

Les relations proposées pour estimer la résistance en traction en fonction de la résistance en flexion doivent être complétées par d'avantage d'essais pour conclure sur leur pertinence. La mise en place d'un modèle de prédiction de la résistance en traction basé sur la mesure du module d'élasticité et de la nodosité, tel que proposé par KOVRYGA [47], semble être, en définitive, la meilleure approche pour établir une corrélation entre ces propriétés mécaniques.

Une campagne d'essais réalisée avec uniquement des bois de faibles diamètres (ø<25cm) devrait permettre de mieux caractériser la ressource de qualité secondaire « économiquement » valorisable. Ces essais permettraient également de juger réellement de l'impact du bois juvénile sur les propriétés mécaniques et potentiellement d'en tenir compte dans les systèmes de classement traditionnels.

En ce qui concerne les assemblages, l'utilisation d'une loi unique pour l'ensemble des essences pourrait être introduite (principe de la loi puissance) en réalisant un travail de synthèse des différentes campagnes expérimentales réalisées selon l'EN 383. Cette nouvelle équation pourrait également intégrer à terme pour rendre compte de l'impact de la rugosité de l'organe sur la portance locale.

Les critères de nombre efficace n_{ef} proposés pour les deux typologies d'assemblages (bois/bois & bois/métal) demandent à être validés par des essais avec un plus grand nombre d'organes par file et d'avantage de files. Ces essais ont également pour objectif d'étudier plus en détail la raideur des assemblages. L'objectif final étant de comparer expérimentalement les résultats modélisés au moyen du modèle de poutre sur fondations élastiques et d'introduire, au besoin, un critère de nombre efficace en ce qui concerne la raideur.

Les propriétés mécaniques en compression et en flexion des bois certifiés en traction doivent être étudiées plus précisément. En certifiant plusieurs lots de bois selon différentes résistances et en testant à rupture selon l'une des deux autres sollicitations, il sera possible d'en déduire une corrélation entre les résistances.

Une note de calcul complète des solutions de murs et de poutres treillis « picots » doit être établie pour pouvoir comparer efficacement ces solutions techniques en comparaison des systèmes plus traditionnels (poutre pleine en lamellé collé, mur CLT, mur à ossature bois…). Cette étude permettra d'arriver à un prix maximum de la lame certifiée pour pouvoir égaler la solution traditionnelle et potentiellement de proposer des tarifs différents entre la lame certifiée et la lame structurelle (ce qui n'est pas fait dans ce document).

Les propriétés mécaniques (résistance et module d'élasticité) de poutres panachées réalisées à partir de lames certifiées et de bois de faible qualité (D18) doivent être étudiées pour juger de la pertinence économique d'une telle solution et s'il n'est pas préférable de proposer systématiquement la solution poutre treillis réalisée avec les « picots ».

BIBLIOGRAPHIE

[1] J.-M. JANCOVICI, *Dormez tranquilles jusqu'en 2100: Et autres malentendus sur le climat et l'énergie*. Odile Jacob, 2015.

[2] Association NégaWatt, « Scénario négaWatt 2017-2050 ». janv-2017.

[3] A. COLIN (IGN) et A. THIVOLLE-CAZAT (FCBA), « Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035 », 2013.

[4] L. BLERON, L. LE MAGOUROU, P. MARTIN, et F. ROSSI, « Intégration des données manquantes concernant les bois feuillus pour l'utilisation de l'Eurocode 5 », juill. 2012.

[5] FCBA, « memento FCBA 2018 », 2018.

[6] FCBA, « Référentiel qualités du bois des cultivars de peuplier », 2009.

[7] FCBA, « Référentiel qualités du bois des nouveaux cultivars de peuplier », 2013.

[8] Collectif pour le développement du peuplier, « Techno guide du Peuplier », déc-2016. .

[9] J. D. LANVIN, « Caractérisation du Hêtre pour une utilisation structurelle », 2014.

[10] J. D. LANVIN, « Correspondance entre classes visuelle et classes de résistance mécanique EN338 pour le hêtre », 2015.

[11] D. GUITARD, *Mécanique du matériau bois et composites*, Cepadues edition. 1987.

[12] M. C. TROUY, « ANATOMIE DU BOIS - (MOOC) », 2018.

[13] A. BURGERS, « Caractérisations physico-mécaniques de bois "sans défauts" pour la conception mécanique : application aux pins de la région méditerranéenne française ».

[14] J. VIGUIER, « Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique », 2015.

[15] J. ALTEYRAC, A. CLOUTIER, et S. Y. ZHANG, « Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (Picea mariana (Mill.) B.S.P.) at different stand densities and sampling heights », *Wood Science and Technology*, vol. 40, n° 2, p. 124-138, 2006, doi: 10.1007/s00226-005-0047-4.

[16] B. LACHENBRUCH, J. R. MOORE, et R. EVANS, « Radial Variation in Wood Structure and Function in Woody Plants, and Hypotheses for Its Occurrence », in *Size- and Age-Related Changes in Tree Structure and Function*, vol. 4, Springer Netherlands, 2011, p. 121-164.

[17] K. de BORST, T. K. BADER, et C. WIKETE, « Microstructure–stiffness relationships of ten European and tropical hardwood species », *Journal of Structural Biology*, vol. 177, n° 2, p. 532-542, févr. 2012, doi: 10.1016/j.jsb.2011.10.010.

[18] A. P. SCHNIEWIND et D. E. LYON, « Tensile strength of redwood dimension lumber II. Prediction of strength values. », *Forest products journal*, p. 21 :45–55, 1971.

[19] C. J. JOHANSSON, J. BRUNDIN, et R. GRUBER, *Stress grading of Swedish and German timber: a comparison of machine stress grading and three visual grading systems*. Borås: Sveriges provnings- och forskningsinstitut, 1992.

[20] V. BANO, F. ARRIAGA, A. SOILAN, et M. GUAITA, « Prediction of bending load capacity of timber beams using a finite element method simulation of knots and grain deviation », *Biosystems Engineering*, vol. 109, n° 4, p. 241-249, août 2011, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.05.008.

[21] J. BODIG et B. A. JAYNE, *Mechanics of wood and wood composites*. 1982.

[22] FOREST PRODUCTS LABORATORY (U.S), *Wood Handbook : Wood as an Engineering Material*. 2010.

[23] P. HOFFMEYER, L. DAMKILDE, et T. N. PEDERSEN, « Structural timber and glulam in compression perpendicular to grain », *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 58, n° 1, p. 73–80, 2000.

[24] H. J. BLASS et C. SANDHAAS, « Timber Engineering - Principles for design », p. 658.

[25] *NF EN 384 : Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*. 2016.

[26] W. WEIBULL, *Strength of materials*. 1939.
[27] J. D. BARRETT et H. GRIFFIN, « Size effect and property relationships for canadian 2-inch dimension lumber », in *CIB-W18 / 22-06-01*, 1989.
[28] J. D. BARRETT, « Size factor for bending and tension strength of structural timber », présenté à CIB-W18 / 23-10-03, 1990.
[29] F. ROUGER et T. FEWELL, « Size effect in timber : Novelty never ends », in *CIB-W18 / 27-06-02*, 1994.
[30] *NF EN 1995-1-1 : Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments.* 2005.
[31] *NF EN 408+A1 : Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques.* 2012.
[32] P. SCHLOTZHAUER, P. A. NELIS, S. BOLLMUS, A. GELLERICH, H. MILITZ, et W. SEIM, « Effect of size and geometry on strength values and MOE of selected hardwood species », *Wood Material Science & Engineering*, vol. 12, n° 3, p. 149-157, mai 2017, doi: 10.1080/17480272.2015.1073175.
[33] *NF EN 1316-1 : Bois ronds feuillus - Classement qualificatif - Partie 1 : Chêne et hêtre.* 2012.
[34] *NF EN 14081-2 : Structures en bois — Bois de structure à section rectangulaire classé pour sa résistance — Partie 2 : Classement mécanique par machine ; exigences supplémentaires concernant les essais de type*. 2018.
[35] *NF EN 1309-3 : Bois ronds et bois sciés - Méthode de mesure des dimensions - Partie 3 : Singularités et altérations biologiques*. 2018.
[36] *NF B 52-001-1 : Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structure des bois sciés français résineux et feuillus*. 2018.
[37] G. ROBLOT, D. COUDEGNAT, L. BLERON, et R. COLLET, « Evaluation of the visual stress grading standard on French Spruce (Picea excelsa) and Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii) sawn timber », *Annals of Forest Science*, vol. 65, n° 8, p. 812-812, janv. 2008, doi: 10.1051/forest:2008071.
[38] *NF EN 338 : Bois de structure - Classes de résistance*. 2016.
[39] D. W. GREEN et D. E. KRETSCHMANN, « Discussion of lumber property reletionships in Eurocode 5 », in *CIB-W18 / 22-06-03*, 1989.
[40] *NF EN 384 : Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*. 1995.
[41] *NF EN 384 : Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*. 2004.
[42] *NF EN 384 : Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*. 2010.
[43] P. GLOS et J. K. DENZLER, « Allocation of central European Hardwoods into EN 1912 », in *CIB-W18 / 39-06-1*, 2006.
[44] *NF EN 338 : Bois de structure - Classes de résistance*. 2009.
[45] A. RANTA-MAUNUS, J. K. DENZLER, et P. STAPEL, « Strength of European Timber. Part 2. Properties of spruce and pine tested in Gradewood project », p. 115.
[46] A. KOVRYGA, P. STAPEL, et J. W. G. VAN DE KUILLEN, « Tensile strength classes for hardwoods », in *INTER / 49-10-01*, 2016.
[47] A. KOVRYGA, P. STAPEL, et J. W. G. VAN DE KUILLEN, « Mechanical properties and their interrelationships for medium-density European hardwoods, focusing on ash and beech », *Wood Material Science & Engineering*, p. 1-14, mars 2019, doi: 10.1080/17480272.2019.1596158.
[48] *NF EN 338 : Bois de structure - Classes de résistance*. 2003.
[49] J. K. DENZLER, P. STAPEL, et P. GLOS, « Relationship between global and local MOE », in *CIB-W18 / 41-10-03*, 2008.
[50] G. J. P. RAVENSHORST et J. W. G. VAN DE KUILLEN, « Relationships Between Local, Global and Dynamic Modulus of Elasticity for Soft- and Hardwoods », in *CIB-W18 / 42-10-1*, 2009.

[51] R. STEIGER, M. ARNOLD, et M. FONTANA, « Revisiting EN 338 and EN 384 Basics and procedures », in *CIB-W18 / 39-06-2*, 2006.
[52] G. R. MUNOZ et A. R. GETE, « Relationships between mechanical properties of oak timber (Quercus robur L.) », *Holzforschung*, vol. 65, n° 5, janv. 2011, doi: 10.1515/hf.2011.053.
[53] E. M. LANG, L. BEJO, J. SZALAI, Z. KOVACS, et R. B. ANDERSON, « Orthotropic strength and elasticity of hardwoods in relation to composite manufacture. Part II. Orthotropy of compression strength and elasticity », *Wood and fiber science*, vol. 34, n° 2, p. 350–365, 2007.
[54] U. KORIN, « Timber in compression perpendicular to grain », in *CIB-W18 / 23-06-1*, 1990.
[55] L. DAMKILDE, P. HOFFMEYER, et T. N. PEDERSEN, « Compression strength perpendicular to grain of structural timber and glulam », in *CIB-W18 / 31-06-4*, 1998.
[56] *NF EN 1193 : Structures en bois - Détermination de la résistance au cisaillement et des propriétés mécaniques perpendiculaires aux fibres*. 1998.
[57] U. HUBNER, *Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile*. Graz: Verl. der Techn. Univ, 2014.
[58] A. R. FEWELL et P. GLOS, « The determination of characteristic strength values for stress grades of structural timber. PART 1 », in *CIB-W18 / 21-06-2*, 1988.
[59] P. GLOS et J. K. DENZLER, « Characteristic shear strength values based on tests to en 1193 », in *CIB-W18 / 36-06-1*, 2003.
[60] J. K. DENZLER et P. GLOS, « Determination of shear strength values according to EN 408 », *Mater Struct*, vol. 40, n° 1, p. 79-86, janv. 2007, doi: 10.1617/s11527-006-9199-4.
[61] S. AICHER et D. OHNESORGE, « Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber », *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 69, n° 1, p. 143-154, févr. 2011, doi: 10.1007/s00107-009-0399-9.
[62] S. AICHER, Z. AHMAD, et M. HIRSCH, « Bondline shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulams », *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 76, n° 4, p. 1205-1222, juill. 2018, doi: 10.1007/s00107-018-1305-0.
[63] *NF EN 14080 - Structures en bois — Bois lamellé collé et bois massif reconstitué — Exigences*. 2013.
[64] J. W. G. VAN DE KUILLEN, w. GARD, G. RAVENSHORST, V. ANTONELLI, et A. KOVRYGA, « Shear strength values for soft- and hardwoods », in *INTER / 50-06-1*, 2017.
[65] A. R. FEWELL, « The determination of softwood strength properties for grades, strength classes and laminated timber for BS 5268 : Part 2 », in *CIB-W18 / 17-06-2*, 1984.
[66] N. BURGER et P. GLOS, « Strength relationships in structural timber subjected to bending and tension CIB 30-6-1 », in *CIB 30-6-1*, 1997.
[67] C. T. CAMU et S. AICHER, « Modelling the variation of mechanical properties along oak boards », in *INTER / 51-06-1*, 2018, p. 15.
[68] H. J. BLASS et M. SCHMID, « Tensile strength perpendicular to grain according EN 1193 », in *CIB-W18 / 31-06-2*, 1998.
[69] H. J. BLASS et M. SCHMID, « Tensile strength perpendicular to grain of glued laminated timber », in *CIB-W18 / 32-06-4*, 1999.
[70] « NF EN 14358 (Avril 2007) - Détermination des valeurs correspondant au fractile à 5 % d'exclusion inférieure et critères d'acceptation pour un échantillon.pdf ». .
[71] *NF EN 13183-1 : Teneur en humidité d'une pièce*. 2002.
[72] R. STEIGER, E. GEHRI, et A. HANSPETER, « Einspannvorrichtung für Zugversuche an Holzproben grösseren Querschnitts ». .
[73] S. AICHER et G. STAPF, « Compressive strength parallel to the fiber of spruce with high moisture content », *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 74, n° 4, p. 527-542, juill. 2016, doi: 10.1007/s00107-015-1004-z.
[74] R. JOCKWER et A. JORISEN, « Load-deformation behaviour and stiffness of lateral connections with multiple dowel type fasteners », in *INTER / 51-07-7*.

[75] J. EHLBECK et H. WERNER, « Design of joints with laterally loaded dowels. Proposal for improving the design rules in the CIB-code and the draft EUROCODE 5. », in *CIB-W18 / 21-7-4*, 1988.
[76] J. EHLBECK, « Load-carrying capacity and deformation characteristic of nailed joints. », in *CIB-W18 / 12-07-1*, 1979.
[77] A. JORISSEN, « The stiffness of multiple bolted connections », in *CIB-W18 / 32-07-6*, 1999.
[78] L. R. J. WHALE, I. SMITH, et H. J. LARSEN, « Design of nailed and bolted joints proposals for the revision of existing formulae in draft EUROCODE 5 and CIB code », in *CIB-W18 / 20-07-1*, 1987.
[79] A. JORISSEN, « Double shear timber connections with dowel type fasteners », 1998.
[80] A. MISCHLER et E. GEHRI, « Strength reduction rules for multiple fastener joints », in *CIB-W18 / 32-07-5*, 1999.
[81] H. J. BLASS et M. SCHMID, « Effect of distances, spacing and number of dowels in a row on the load carrying capacity of connections with dowels failing splitting », in *CIB-W18 / 35-07-5*, 2002.
[82] P. KOBEL et A. FRANGI, « Dowel-type connections in LVL made of beech wood », in *INTER / 47-07-2*.
[83] S. FRANKE et B. FRANKE, « Fundamentals and recent strength results of connections in modern hardwood timber structures », *Wood Material Science & Engineering*, p. 1-9, sept. 2018, doi: 10.1080/17480272.2018.1526822.
[84] A. JORISSEN et H. J. BLASS, « The fastener yield strength in bending », in *CIB-W18 / 31-07-6*, 1998.
[85] H. J. BLASS, A. BIENHAUS, et V. KRAMER, « Effective bending capacity of dowel-type fasteners », in *CIB-W18 / 33-07-5*, 2000.
[86] H. J. BLASS et F. COLLING, « Load-carrying capacity of dowelled connections », in *INTER / 48-07-3*, 2015.
[87] *NF EN 383 : Détermination de caractéristiques de fondation et de la portance locale d'éléments d'assemblage de type broche*. 2007.
[88] S. FRANKE et N. MAGNIERE, « Discussion of testing and evaluation methods for the embedment behaviour of connections », in *INTER / 47-07-1*, 2014, p. 10.
[89] L. R. J. WHALE, I. SMITH, et B. O. HILSON, « Behaviour of nailed and bolted joints under short-term lateral load », in *CIB-W18 / 19-07-1*, 1986.
[90] L. R. J. WHALE et I. SMITH, « The derivation of design clauses for nailed and bolted joints in EUROCODE 5 », in *CIB-W18 / 19-07-6*, 1986.
[91] J. EHLBECK et H. WERNER, « Softwood and Hardwood Embedding strength for dowel-type fasteners », in *CIB-W18 / 25-07-2*, 1992.
[92] U. HUBNER, T. BOGENSPERGER, et G. SCHICKHOFER, « Embedding Strength of European Hardwoods », in *CIB-W18 / 41-07-5*, 2008.
[93] C. SANDHAAS, G. J. P. RAVENSHORST, H. J. BLASS, et J. W. G. VAN DE KUILLEN, « Embedment tests parallel-to-grain and ductility aspects using various wood species », *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 71, n° 5, p. 599-608, sept. 2013, doi: 10.1007/s00107-013-0718-z.
[94] S. FRANKE et N. MAGNIERE, « The Embedment Failure of European Beech Compared to Spruce Wood and Standards », in *RILEM Bookseries*, 2014, vol. 9, p. 221-229, doi: 10.1007/978-94-007-7811-5_21.
[95] A. ZINK-SHARP, J. S. STELMOKAS, et H. M. GU, « Effects of wood anatomy on the mechanical behavior of single-bolted connections », p. 15, 1998.
[96] H. J. LARSEN, « The yield load of bolted and nailed joints », 1973.
[97] M. SCHWEIGLER, T. K. BADER, G. HOCHREINER, et R. LEMAITRE, « Parameterization equations for the nonlinear connection slip applied to the anisotropic embedment behavior of wood », *Composites Part B: Engineering*, vol. 142, p. 142-158, juin 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.01.003.
[98] P. D. RODD, « The analysis of timber joints made with circular dowel connectors », 1973.

[99] L. BLERON, « Contribution à l'optimisation des performances d'assemblages bois en structure. Analyse de la portance dans les assemblages de type tige », Université de Lorraine, 2000.
[100] I. TAVAKOLI, « Modélisation tridimensionnelle d'assemblages de structures bois en tôle pliée mince par la méthode des éléments finis », p. 308.
[101] E. SERRANO et J. SJODIN, « Dowel type joints - Influence of moisture changes and dowel surface smoothness », présenté à COST Action E55 WG2, 2007.
[102] D. RAMMER et S. WINISTORFER, « Effect of moisture content on dowel-bearing strength », p. 14, 2001.
[103] *NF EN 384 : Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*. 2016.
[104] R. LEMAITRE, J.-F. BOCQUET, et M. SCHWEIGLER, « Beam-on-foundation modelling as an alternative design method for timber joints with dowel-type fasteners – Part 1: Strength and stiffness per shear plane of single-fastener joints. », p. 14.
[105] *NF EN 26891 : Structures en bois - Assemblages réalisés avec des éléments mécaniques de fixation*. 1991.
[106] Y. BENOIT, *Construction bois : l'Eurocode 5 par l'exemple*. Eyrolles, AFNOR, 2014.
[107] J.-F. BOCQUET, « Assemblages par picots », présenté à Forum Bois Construction - France, Epinal, 2017.
[108] K.-L. GERARD, « Construction de la Maison des arbres à Xertigny », présenté à Forum Bois Construction - France, Epinal, 2019, p. 3.
[109] L. BLERON, « Valorisation des chênes de qualité secondaire en Bourgogne dans la construction », présenté à Forum Bois Construction - France, BEAUNE, 2012, p. 12.
[110] L. PETER, « European Hardwoods for the Building Sector », p. 272.
[111] T. EHRART, R. STEIGER, P. PALMA, et A. FRANGI, « Mechanical properties of European beech glued laminated timber », in *INTER / 51-12-4*, 2018, p. 16.
[112] S. GIRARDON, « Amélioration des performances mécaniques des assemblages bois sur bois vissés par préparation des interfaces : Application à la réalisation d'éléments de structure », p. 297, 2014.
[113] GROUPE SNI, « structure capable - guide conception ».
[114] S.-I. GUSTAFSSON, « The strength properties of swedish Oak and Beech », *Drewno*, p. 67-82, 2010.
[115] H. PLESCHBERGER, A. TEISCHINGER, U. MULLER, et C. HANSMANN, « Mechanical Characterization of Lumber of Small-Diameter Hardwood Species after Different Drying Schedules », *Drying Technology*, vol. 31, n° 9, p. 1056-1062, juill. 2013, doi: 10.1080/07373937.2013.772899.
[116] M. SKARVELIS et G. MANTANIS, « Physical and mechanical properties of beech wood harvested in the Greek public forests », *Wood Research*, vol. 58, n° 1, p. 123–130, 2013.
[117] K. FRUHWALD et G. SCHICKHOFER, « Strength Grading of Hardwoods », in *WCTE 2004*, HELSINKI, 2004, p. 675-679.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Principe des relations entre propriétés mécaniques principales et secondaires. 10
Figure 2 : Méthodologie suivie pour les assemblages de type tige 11
Figure 3 : Répartition géographique des essences utilisées pour le projet EFEUR 5. [https://inventaire-forestier.ign.fr/] 12
Figure I-1 : Schéma type de l'arbre 14
Figure I-2 : Schéma type du tronc (Gauche) – Directions principales de l'arbre (Droite). 15
Figure I-3 : Schéma type de la microstructure des bois feuillus [12]. 16
Figure I-4 : Coupe macroscopique des essences utilisées dans le cadre du projet EFEUR 5 [12] 17
Figure I-5 : Décomposition de la paroi cellulaire du bois - Fig I.2 de BURGERS [13]. 17
Figure I-6 : Relation entre module d'élasticité E corrigé de la porosité ϕ en fonction de l'angle des microfibrile MFA 19
Figure I-7 : Impact du bois juvénile sur la résistance en flexion - Fig II de LANVIN [10] 19
Figure I-8 : Déviation du fil du bois autour du nœud - Fig 7 de BANO & All [20]. 21
Figure I-9 : Orientation des cernes dans le cadre des essais de compression transversale - Fig 1 de [23] 22
Figure I-10 : Résistance et module en compression transversale en fonction de l'orientation des cernes - Fig 3 & 4 de [23]. .. 22
Figure 2-1 : Codes couleurs utilisés pour la graduation de la distance par rapport à la moelle et exemple de marquage 26
Figure 2-2 : Exemples de défauts purgés par le classement visuel initial. 29
Figure 2-3 : Exemples de réutilisation de la ressource 29
Figure 3-1 : Définition du module global et du module local selon la norme d'essais EN 408 [31]. 36
Figure 3-2 : Corrélation entre résistance en flexion et en compression pour les résineux - Fig 7 de STEIGER & All [51]. 38
Figure 3-3 : Corrélation entre résistance en flexion et en compression pour du chêne (bois sans défauts et de droit fil) Fig 2 de MUNOZ & GETE [52]. 39
Figure 3-4 : Définition des paramètre de l'équation de LANG & All [8] 40
Figure 3-5 : Corrélation entre masse volumique et résistance en compression transversale pour du bois massif et du lamellé-collé d'épicéa - Fig 6 de DAMKILDE & all [55] 41
Figure 3-6 : Corrélation entre masse volumique et résistance en compression transversale pour du hêtre et du frêne Fig 8 (b) de KOVRYGA & All [46]. 42
Figure 3-7 : Corrélation entre résistance en flexion et en traction pour du frêne - Fig 13 de KOVRYGA & All [47]. 44
Figure 3-8 : Corrélation entre résistance en flexion et en traction pour du frêne- Fig 6 de KOVRYGA & All [46]. 45
Figure 3-9 : Relation entre résistance et module d'élasticité en traction - Fig 5 de CAMU & AICHER [67] 46
Figure 3-10 : Impact de la densité de nœuds sur la résistance en traction du chêne - Fig 8 de CAMU & AICHER [67]. 46
Figure 3-11 : Résistance en traction transversale en fonction de la masse volumique - Fig 8 (a) de KOVRYGA & All [46] 47
Figure 3-12 : Principe de réalisation des éprouvettes pour les différents essais - Fig 1 de MUNOZ & GETE [52]. 49
Figure 3-13 : Principe des dispositifs de mesure. 52
Figure 3-14 : Montage de flexion sur la dalle d'essais. 53
Figure 3-15 : Géométrie des essais de flexion. 53
Figure 3-16 : Montage de compression axiale sur la dalle d'essais. 54
Figure 3-17 : Montage de traction axiale sur la dalle d'essais. 55
Figure 3-18 : Montage de compression transversale sur la machine d'essais universelle. 56
Figure 3-19 : Montage de cisaillement sur la machine d'essais universelle. 57
Figure 3-20 : Montages de flexion (gauche) et de traction (droite) pour les essais sur bois «sans défauts et de droit fil». 58
Figure 3-21 : Montage de compression pour les essais sur bois «sans défauts et de droit fil». 59
Figure 3-22 : Orientations des cernes pour les essais de compression transversale et de cisaillement. 61
Figure 3-23 : Courbe de principe pour la détermination de la résistance en compression transversale $fc,90$ 64
Figure 3-24 : Déformation des diagonales pour le calcul du module de cisaillement. 66
Figure 3-25 : Détermination du module de cisaillement à partir des essais de cisaillement. 68
Figure 3-26 : Comportement expérimental en flexion 70
Figure 3-27 : Comportement expérimental en compression axiale. 71
Figure 3-28 : Comportement expérimental en compression transversale. 72
Figure 3-29 : Comportement expérimental en traction axiale. 73

Figure 3-30 : Comportement expérimental en cisaillement. 74
Figure 3-31 : Exemple de corrélation entre module de cisaillement et module d'élasticité local. 78
Figure 3-32 : Points créés par le sous échantillonnage des classes de résistance. 80
Figure 3-33 : Corrélation directe entre les résistances en compression axiale et en flexion. 81
Figure 3-34 : Résistance en traction en fonction de la résistance en flexion estimée par classement visuel. 84
Figure 3-35 : $ft, 0 = f(fm)$ avec le sous-échantillonnage selon le classement visuel. 85
Figure 3-36 : $ft, 0 = f(fm)$ pour des bois sans défaut et de droit fil. 86
Figure 3-37 : Résistance en compression transversale en fonction de la masse volumique pour le hêtre et le chêne. 88
Figure 3-38 : Résistance en compression transversale en fonction de l'orientation des cernes. 89
Figure 3-39 : Résistance en cisaillement en fonction de la résistance en flexion. 91
Figure 3-40 : Résistance en cisaillement en fonction de la masse volumique moyenne pour les essais, les valeurs de l'EN 338 de 2016 et la proposition de VAN DE KUILEN & All [64]. 92
Figure 3-41 : Relation entre module d'élasticité local et global en flexion. 93
Figure 3-42 : Résistances en flexion (sans le correctif kh) en fonction de la hauteur pour chaque essence. 96
Figure 3-43 : Résistances en flexion du Hêtre et du Chêne en fonction de la hauteur. 97
Figure 3-44 : Résistance en flexion en fonction de la distance au cœur de la grume pour le hêtre. 98
Figure 3-45 : Débit des éprouvettes de compression. 99
Figure 3-46 : Facteur correctif de la résistance en compression axiale pour chaque couple d'éprouvette. 100
Figure 4-1 : Typologies d'assemblages traditionnels. 104
Figure 4-2 : Typologies d'assemblages mécaniques. 105
Figure 4-3 : Paramètres pour le calcul des raideurs. 108
Figure 4-4 : Paramètres pour le calcul de la relation $Kser/\ Ku$ – fig 4 de EHLBECK [76]. 109
Figure 4-5 : Schéma de principe de l'effet de corde. 111
Figure 4-6 : Influence de l'élancement sur le critère nef - Fig 10 de MISCHLER & GEHRI [80]. 112
Figure 4-7 : Définition de la portance locale par essais. 115
Figure 4-8 : Géométrie des éprouvettes selon les différentes normes. 115
Figure 4-9 : Détermination de la portance selon ASTM. 116
Figure 4-10 : Comparaison des différentes lois de portance. ($\rho k, D24 = 485\ kg/m3$) 118
Figure 4-11 : Influence du diamètre sur la portance locale à l'angle – Fig 3 de LARSEN [96]. 119
Figure 4-12 : Comparaison des essais feuillus et résineux – fig 7 de FRANKE & MAGNIERE [94]. 120
Figure 4-13 : Vue du montage des essais de portance locale à 0 & 90°. 123
Figure 4-14 : Vues du montage des essais de portance locale à 30° (Gauche) & 60° (Droite). 124
Figure 4-15 : Dimensions des éprouvettes selon EN 383. 125
Figure 4-16 : Schéma directeur de l'instrumentation mise en place. 126
Figure 4-17 : Mesure de la pente de fil. 127
Figure 4-18 : Type de débit pour les éprouvettes à 30 et 60°. 127
Figure 4-19 : Cycle de charge selon EN 383 [87]. 128
Figure 4-20 : Courbe type des essais d'enfoncement. 129
Figure 4-21 : Courbe d'enfoncement type aux angles de 0, 30, 60 & 90° pour du chêne diamètre 16. 131
Figure 4-22 : Coefficient correctif de la portance en fonction de l'humidité par configuration d'essais. 133
Figure 4-23 : influence de l'orientation des cernes sur la portance locale pour les angles de 30 et 60°. 134
Figure 4-24 : Portance locale à 0° en fonction de la masse volumique pour le hêtre. 135
Figure 4-25 : Loi linéaire de la portance locale à 0° en fonction du diamètre de l'organe. 136
Figure 4-26 : Loi puissance de la portance locale à 0° en fonction du diamètre de l'organe. 138
Figure 4-27 : Comparaison des lois de prédiction linéaires feuillus et puissance globale. 139
Figure 4-28 : Loi linéaire de la portance locale à 90° en fonction du diamètre de l'organe. 140
Figure 4-29 : Facteur $k90$par essence comparé aux facteurs actuels de l'EUROCODE 5. 141
Figure 4-30 : Loi puissance moyenne de la portance à 90° indépendamment de l'essence de bois. 142
Figure 4-31 : Synthèses des lois de portance à 90°. 143
Figure 4-32 : Portance à 30° et 60° en fonction du diamètre. 144
Figure 4-33 : Lois de portance locale moyenne et caractéristique en fonction de l'angle α entre l'effort et le fil du bois. 146
Figure 4-34 : Disposition des assemblages sur la machine d'essais universel Zwick Z250. 148

Figure 4-35 : Dimensions des éprouvettes d'essais d'assemblage Bois/Métal (Gauche) & Bois/Bois (Droite). 149
Figure 4-36 : Courbe type des essais d'assemblage. 152
Figure 4-37 : Courbe pour des modes 1, 2 & 3 pour le diamètre 16 dans du Hêtre. 153
Figure 4-38 : Photos de ruptures d'assemblages et de plastifications de broches. 154
Figure 4-39 : Exemple de mise en place de la raideur pour les essais bois/métal. 155
Figure 4-40 : Comparaisons entre les raideurs expérimentales et les raideurs estimées par l'EUROCODE 5. 157
Figure 4-41 : Loi de prédiction pour la raideur unitaire des assemblages Bois/Bois. 159
Figure 4-42 : Loi de prédictions comparées aux mesures expérimentales. 160
Figure 4-43 : Principe du modèle sur fondation élastique. 161
Figure 4-44 : Comparaison de la raideur du modèle avec les essais. 162
Figure 4-45 : Essais complémentaires comparés au modèle. 164
Figure 4-46 : Comparaison de la prédiction de résistance avec les essais bois/bois. 166
Figure 4-47 : Loi de prédictions de la résistance avec nef comparées aux mesures expérimentales. 169
Figure 4-48 : Evolution de la résistance en fonction de l'épaisseur des bois pour des assemblages Bois/Bois dans du hêtre (gauche) et Bois/Métal dans du chêne (droite) pour des organes de diamètre 12. 170
Figure 4-49 : Principe d'estimation de la raideur Ku. 171
Figure 5-1 : Classement visuel (gauche) et classement optimal (droite) des essais de flexion. 180
Figure 5-2 : Principe des essais réalisés dans le cadre de l'étude destinée à Terre de hêtre (88). 184
Figure 5-3 : Principe du processus de valorisation des bois feuillus par la « garantie » des propriétés mécaniques. 185
Figure 5-4 : Principe pour le tirage aléatoire des propriétés mécaniques des lamelles. 186
Figure 5-5 : Relation entre module d'élasticité et résistance en flexion des aboutages. 187
Figure 5-6 : Résultats du modèle statistique. 187
Figure 5-7 : Montage pour la mesure du module d'élasticité selon la méthode vibratoire. 189
Figure 5-8 : Répartition des modules d'élasticité du tri vibratoire pour le hêtre et le chêne. 190
Figure 5-9 : Relation entre module d'élasticité et résistance pour les essais de garantie des propriétés mécaniques. 191
Figure 5-10 : Exemples de solutions « traditionnelles » de valorisation du LVL de hêtre ou de la lame garantie. 194
Figure 5-11 : Dimensions de la poutre en I. 195
Figure 5-12 : Comparaison entre la poutre pleine et la poutre treillis en résineux. 196
Figure 5-13 : Exemple de poutre treillis réalisée en LVL de hêtre (POLLMEIER). 196
Figure 5-14 : Principe de l'assemblage par « picots ». 197
Figure 5-15 : Principe des murs assemblés par « picots ». 198
Figure 5-16 : Poutres treillis assemblées par « picots ». 199
Figure 5-17 : Dimensions de la poutre massive. 200
Figure 5-18 : Dimensions de la poutre treillis. 201
Figure 5-19 : Exemple de chaîne de production des lames de bois feuillus. 202

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Volume sur pied et accroissement annuel des essences utilisées pour le projet EFEUR 5 [5]. 12
Tableau I-I : Coefficients $n1$& $n2$de l'équation de HANKINSON pour différents types de sollicitations. [22] 21
Tableau I-II : Incidence de l'humidité sur les propriétés mécaniques - Tab B2-I de BLASS & SANDHAAS [24]. 23
Tableau 2-I : Classes de résistance et propriétés mécaniques des bois feuillus – Tableau 3 de EN 338 [38]. 28
Tableau 3-I : Evolution des corrélations pour les bois résineux dans la norme EN 384. 32
Tableau 3-II : Evolution des corrélations pour les bois feuillus dans la norme EN 384. 33
Tableau 3-III : Corrélations entres les propriétés mécaniques pour le système de classes mécaniques en traction pour les feuillus et les résineux. 34
Tableau 3-IV : Comparaisons entres les classes de résistance en flexion et les classes de résistance en traction. 34
Tableau 3-V : Module d'élasticité proposé par DENZLER & GLOS [43] en 2006 pour la révision de l'EN 338. 35
Tableau 3-VI : Masses volumiques proposées par DENZLER & GLOS [43] en 2006 pour la révision de l'EN 338. 37
Tableau 3-VII : Masses volumiques selon la base de données tropix du CIRAD pour les essences du projet EFEUR 5. 38
Tableau 3-VIII : Etude pour la modification des résistances en cisaillement des résineux - Tab 6 de DENZLER & GLOS [60]. 43
Tableau 3-IX : Proposition de modification des résistances en cisaillement de l'EN 338 - Tab 7 de VAN DE KUILEN & All [64]. 44
Tableau 3-X : Comparaison des résistance en flexion et en traction des essais de GLOS & DENZLER [43]. 45
Tableau 3-XI : Synthèse des dimensions d'essais. 60
Tableau 3-XII : Synthèse des contraintes estimées et des vitesses de chargement par type d'essais. 62
Tableau 3-XIII : Synthèse des propriétés mécaniques principales des essais. 76
Tableau 3-XIV : Relation entre module d'élasticité longitudinal et transversal. 78
Tableau 3-XV : Relation entre module d'élasticité longitudinal et module de cisaillement. 79
Tableau 3-XVI : Ratio entre résistances en compression axiale et en flexion. 79
Tableau 3-XVII : Ratio entre résistances en compression axiale et en flexion en se basant sur le classement visuel. 80
Tableau 3-XVIII : Comparaison des différentes lois $fc,0,k = f(fm,k)$ définies à partir des essais. 82
Tableau 3-XIX : Comparaison de la loi $fc,0,k = 5{,}4\ fm,k0{,}5$par rapport aux résistances mesurées pour les différentes classes visuelles. 82
Tableau 3-XX : Comparaison des lois de prédiction de la résistance en traction axiale avec les résultats d'essais. 83
Tableau 3-XXI : Résistances moyennes et caractéristiques en flexion et en traction en fonction du classement visuel. 84
Tableau 3-XXII : Relation entre masse volumique et résistance en compression transversale pour les essais initiaux. 87
Tableau 3-XXIII : Relation entre masse volumique et résistance en compression transversale pour les essais complémentaires. 87
Tableau 3-XXIV : Comparaison des résistances en cisaillement et en flexion en fonction du classement visuel. 90
Tableau 3-XXV : Comparaison des résistances et des modules en fonction du classement des billons. 94
Tableau 3-XXVI : Analyse statistique (Test de WILCOXON) des propriétés en fonction de la hauteur. 95
Tableau 4-I : Synthèse des essais de portance locale selon la bibliographie. 118
Tableau 4-II : Synthèse des dimensions d'éprouvettes. 125
Tableau 4-III : Synthèse des résultats expérimentaux de la portance locale. 132
Tableau 4-IV : Lois caractéristiques de la portance à 0° par essence. 136
Tableau 4-V : Lois caractéristiques de la portance à 90° et facteur $k90$ par essence. 140
Tableau 4-VI : Coefficients $b1$et $b2$ de (4.48) par essence et pour chaque scénario. 145
Tableau 4-VII : Propriétés mécaniques des organes d'assemblages. 150
Tableau 4-VIII : Synthèse des résultats d'assemblages Bois/Bois. 156
Tableau 4-IX : Synthèse des résultats d'assemblages Bois/Métal. 156
Tableau 4-X : Résultats du modèle pour les raideurs. 163
Tableau 4-XI : Raideurs des essais complémentaires. 164
Tableau 4-XII : Estimation de la résistance pour les assemblages bois/bois & bois/métal. 165
Tableau 4-XIII : Tableau des coefficients pour les différentes lois nef. 168
Tableau 4-XIV : Raideurs moyennes Kuet $Kser$pour chaque configuration 172
Tableau 5-I : Synthèse du tri visuel et des classes de résistance attribuées pour les essais de flexion. 179
Tableau 5-II : Comparaisons des résistances et modules estimés par classement visuel avec les essais de flexion. 179
Tableau 5-III : Comparaison des résistances et modules estimés par classement visuel avec les essais de flexion. 182

Tableau 5-IV : Incidence du critère de tri sur les parts de classement mécanique des lamelles de hêtre et de chêne.....188
Tableau 5-V : Tableaux des coûts de la méthode de certification des propriétés mécaniques pour le hêtre.....192
Tableau 5-VI : Poutre en I réalisée avec du bois feuillu.....195
Tableau 5-VII : Comparaisons des solutions de poutres massives. 200
Tableau 5-VIII : Comparaisons des solutions treillis. 201

ANNEXE A : CLASSEMENT VISUEL

Les différents tableaux de cette annexe présentent les critères de classement visuels utilisés dans la norme NF B 52-001-1 [36] pour l'attribution des classes de résistance des différentes essences utilisées dans le cadre du projet EFEUR 5. Pour le hêtre, la norme propose deux alternatives : Soit classer les sciages selon les classes D24 et D40, soit classer les sciages selon les classes D18 et D35. Ce sont ces deux dernières classes qui ont été retenues pour valoriser un maximum de bois.

Tableau A-I : Critères de classement visuel du peuplier

Critères \ Classes	C24	C18
Largeur des cernes d'accroissement	< 14mm	< 16mm
Diamètre des Nœuds :		
- Sur la face :	Ø < 1/3 de h et ø < 50 mm	Ø < 3/4 de h et ø < 50 mm
- Sur la rive :	Ø < 2/3 de b et ø < 40 mm	
Fentes :		
- Traversantes :	Longueur < 2 x h	Longueur < 600 mm
- Non traversantes :	Longueur < ½ l	Non limité
Entre-écorce :	Non admise	
Pente de fil :		
- Locale :	1 : 4 (25%)	
- Générale :	1 : 6 (17%)	
Altérations biologiques :		
- Bleu – traces de gui :	Admis	
- Piqûres noires :	Admises si elles apparaissent sur une seule face	
- Echauffure :	Non Admise	
Déformation maximale en mm pour une longueur de 2m :		
- Flache de face	< 10 mm	< 20 mm
- Flache de rive	< 8 mm	< 12mm
- Gauchissement	1mm / 25mm de large	2mm / 25mm de large
Tuilage :	Pas de restriction	
Avec l la longueur de la pièce, b sa largeur (plus petite des dimensions) et h sa hauteur.		

Tableau A-2 : Critères de classement visuel du hêtre

Critères \ Classes	D35	D18
Largeur des cernes d'accroissement	< 10 mm	
Diamètre des Nœuds :		
- Sur la face :	Ø < 1/2 de h	Ø < 3/4 de h
- Sur la rive :	Ø < 1/2 de b	Ø < 3/4 de b
Pente de fil :		
- Locale :	1 : 5 (20%)	1 : 2,5 (40%)
- Générale :	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 l	
Altérations biologiques :		
- Bleu – traces de gui :	Admis	
- Piqûres noires :	Admises si elles apparaissent sur une seule face	
- Echauffure :	Non Admise	
Déformation maximale en mm pour une longueur de 2m :		
- Flache de face :	< 10 mm	< 20 mm
- Flache de rive :	< 8 mm	< 12mm
- Gauchissement :	1mm / 25mm de large	2mm / 25mm de large
Tuilage :	Maximum 5 mm	
Fentes :		
- Gélivures :	Exclus	
- Gerces :	Admises	
- Roulure	Exclus	
- Fentes de cœur :	Exclus	
- Traversantes :	Longueur < h	
- Non traversantes :	Longueur < 1/3 l	Admises
Discoloration type cœur rouge	Admis	
Avec l la longueur de la pièce, b sa largeur (plus petite des dimensions) et h sa hauteur.		

Tableau A-3: Critères de classement visuel du chêne.

Critères \ Classes	D30	D24	D18
Largeur des cernes d'accroissement	< 10 mm		
Diamètres des nœuds :			
Sains et adhérent sur la face	Ø < 1/5 de h	Ø < 1/3 de h	Ø < 1/2 de h
Sains et adhérent sur la rive	Ø < 1/3 de e **et** ø < 30mm	Ø < 1/2 de e **et** ø < 30mm	Ø < 4/5 de e **et** ø < 45mm
Autres noeuds	Exclus	Ø < 1/3 de e ou de h **et** ø < 30mm	Ø < 1/3 de e ou de h **et** ø < 45mm
Pente de fil :			
- Locale :	1 : 3 (33%)		
- Générale :	1 : 5 (20%)		
- Aubier :	Aubier sain admis sur les arêtes si inférieur à la moitié de la largeur des faces et des rives		
Déformation maximale en mm pour une longueur de 2m :			
- Flache de face :	< 10 mm		< 20 mm
- Flache de rive :	< 8 mm		< 12 mm
- Gauchissement :	1mm / 25mm de large		2mm / 25mm de large
- Tuilage :	Pas de restrictions		
Fentes :			
- Gélivures :	Exclus		
- Gerces :	Admises		
- Roulure	Exclus		½ circonférence du cerne
- Traversantes :	Admises en bout avec une longueur < h		
- Non traversantes :	Exclues		< ½ longueur l
Flaches :	Moins de 10% de h ou de e sur moins de 25% de la longueur l		Moins de 10% de h ou de e sur moins de 35% de la longueur l
Colorations et altérations :			
- Cœur brun :	Admis		
- Pourritures :	Exclues		
- Queue de vache :	Tolérée		
Attaques d'insectes :			
- Piqûres noires	Exclue	Tolérés si ponctuelles	
- Piqures blanches d'aubier et autres attaques d'insectes	Excluess		
Avec l la longueur de la pièce, b sa largeur (plus petite des dimensions) et h sa hauteur.			

ANNEXE B : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

REF Essence	[43] HETRE	[43] HETRE	[43] HETRE	[43] HETRE	[43] HETRE	[43] HETRE	[43] CHENE	[53] PEUPLIER	[53] CHENE	[114] HETRE	[114] CHENE	[115] HETRE	[115] CHENE
$f_{m,mean}$ COV $f_{m,k}$	65,7 32% 30,4	75,5 26% 38	80 21% 44,2				46 25% 30,1					150,3 10%	122,2 18%
$f_{t,0,mean}$ COV $f_{t,0,k}$				43 36% 22,4	71,9 45% 29,3	79,7 39% 34,6					84,81 21%		
$f_{t,90,mean}$ COV $f_{t,90,k}$												13,6 12%	10,5 24%
$f_{c,0,mean}$ COV $f_{c,0,k}$								34,45 8%	49,72 6%	84,3 6%	76,02 12%	65,5 11%	54,2 14%
$f_{c,90,mean}$ COV $f_{c,90,k}$								3,47 13%	9,77 5%			17 12%	12,6 25%
$f_{v,mean}$ COV $f_{v,k}$													
$E_{m,mean}$ COV $E_{m,k}$	15600	15900	16100	11700	14000	14700	11500			13017 15%	12243 11%	16587,3 11%	12811 23%
ρ_{mean} COV ρ_k	747 686	741 683	738 682	714 660	720 656	721 655	715 634			768,4 3%	719 6%	719 5%	658,7 11%

REF Essence	[32] HETRE	[32] CHENE	[52] CHENE	[116] HETRE	[117] HETRE	[117] CHENE	[64] HETRE	[64] CHENE	[61] HETRE	[62] HETRE	[62] CHENE	[47] HETRE	[47] CHENE
$f_{m,mean}$ COV $f_{m,k}$	96,82 6%	72,74 14%	97,1 22%	105,49 16%	62,3 40% 21,8	36,9 49% 9							
$f_{t,0,mean}$ COV $f_{t,0,k}$ $f_{t,90,mean}$ COV $f_{t,90,k}$	93,68 13%	60,41 22%										3,48	
$f_{c,0,mean}$ COV $f_{c,0,k}$ $f_{c,90,mean}$ COV $f_{c,90,k}$	58,59 9%	45,16 7%	59,4 18,10%	55,43 8% 11,96 27%								6,77	
$f_{v,mean}$ COV $f_{v,k}$				14,84 13%			13,4 12%	8,7 7%	6,2675 22%	19,1 13% 14,6	14,7 14% 11,2	 10,7	 7% 7,5
$E_{m,mean}$ COV $E_{m,k}$	13708 9%	10096 12%	3948 25%		13930 14% 10665	11806 18% 8327							
ρ_{mean} COV ρ_k			786 9,70%		670 7% 596	703 8% 611	705 4%	701 4%	692 1%	742 7% 652	752 7% 670		

ANNEXE C : TRAITEMENT DES DONNEES CAMERA

Les fichiers des cellules de forces sont récupérés en fonction du dispositif d'essais :

- Sur la dalle d'essais, le logiciel de pilotage transmet un fichier au format .ezu que l'on peut importer ensuite dans un tableur EXCEL.
- La machine d'essais ZWICK exporte directement les données d'essais au format EXCEL ou CSV.

Les acquisitions vidéo nécessitent un traitement informatique afin de convertir les images en variation de position. Il convient de définir un facteur de conversion pixel-distance à partir d'un repère constitué de 4 cibles avec des dimensions connues entre ces dernières. Pour gagner du temps, la position et la numérotation des cibles entre toutes les éprouvettes reste identique et sera définie comme par exemple sur la Figure C-1.

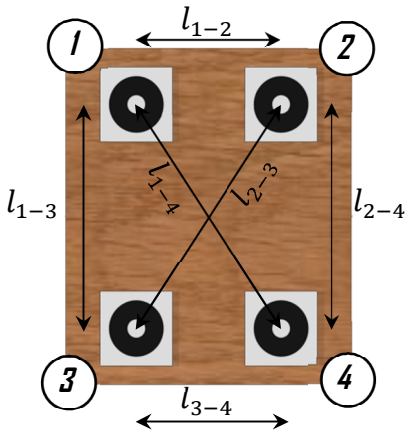


Figure C-1 : Exemple de numérotation et disposition des cibles.

Les fichiers d'essais montrent systématiquement une dérive du temps de la caméra et parfois des cellules de forces. Pour corriger cela, une interpolation linéaire sera menée entre les pas de temps successifs pour recaler les forces et déplacements selon un pas de temps fixe de 0.2s (cf Tableau C-I).

Tableau C-I : Méthode d'interpolation linéaire pour correction de la dérive du temps.

Temps Force	Force	Temps Dépl	Dépl	Tps	Force INT	Dépl INT
$\boldsymbol{TF_1}$	F_1	TD_1	D_1	T_1	$F_1 + \frac{(F_2 - F_1)}{(TF_2 - TF_1)}(T_2 - TF_2)$	$D_2 + \frac{(D_3 - D_2)}{(TD_3 - TD_2)}(T_2 - TD_2)$
$\boldsymbol{TF_2}$	F_2	TD_2	D_2	$T_2 = T_1 + 0.2$	$F_1 + \frac{(F_3 - F_2)}{(TF_3 - TF_2)}(T_2 - TF_2)$	$D_2 + \frac{(D_3 - D_2)}{(TD_3 - TD_2)}(T_2 - TD_2)$
...						
$\boldsymbol{TF_i}$	F_i	TD_i	D_i	$T_i = T_{i+1} + 0.2$	$F_i + \frac{(F_{i+1} - F_i)}{(TF_{i+1} - TF_i)}(T_i - TF_i)$	$D_i + \frac{(D_{i+1} - D_i)}{(TD_{i+1} - TD_i)}(T_i - TD_i)$

ANNEXE D : DEMARCHE D'ANALYSE STATISTIQUE SELON EN 14358 [70]

Pour un usage dans la construction, il est utilisé pour la justification des sections et des assemblages des résistances caractéristiques à 5% avec niveau de confiance de 75% (Valeur recommande dans l'EN 1990). C'est à dire que 95% des résistances observables sont supérieures à la résistance caractéristique. Pour le calcul des déformations, la norme demande de calculer à partir des essais une valeur moyenne caractéristique avec elle aussi un niveau de confiance de 75%.

La détermination de la valeur caractéristique des campagne d'essais se fait au moyen de la norme EN 14358 [27] conformément aux exigences fixées dans l'EN 384 (§5.5.1).

- En fonction du nombre d'essais et de la distribution des résultats, la norme offre deux possibilités pour le calcul des valeurs caractéristiques au fractile de 5% :

a. Valeur caractéristique - méthode non paramétrique

Les échantillonnages des essais de compression comportant au minimum 40 essais, il sera possible d'utiliser une détermination non paramétrique :

- Classement des essais selon un ordre croissant et extraction de la valeur correspondant à 5% de la fréquence d'apparition : $y_{0.5}$
- Détermination du facteur donnant la limite inférieure de tolérance à 5% avec un niveau de confiance de 75% : $k_{0.5,0.75} = \frac{0.49\,n+17}{0.28\,n+7.1}$
- Calcule de la valeur caractéristique à partir de l'équation : $m_k = y_{0.5}\,(1 - \frac{k_{0.5,0.75}\ V}{\sqrt{n}})$ avec V le coefficient de variation.

b. Valeur caractéristique - méthode paramétrique

Dans le cadre de campagnes d'essais comportant moins de 40 échantillons, ou dès lors que la distribution des propriétés mesurées suit un modèle de distribution statistique normale ou log normale, il convient de déterminer les valeurs caractéristiques à partir de modèles paramétrés. La norme indique qu'en général, les mesures de résistances suivent une distribution selon une loi Log-Normale alors que pour les masses volumiques et les modules d'élasticité, la distribution des données est définie comme étant normale. Néanmoins, le choix de la distribution sera réalisé à partir des résultats d'un test de la normalité des résultats (test de shapiro).

Dans le cas de la distribution Normale ou Log-normale, il faut déterminer le facteur donnant la limite inférieure de tolérance à p% avec un niveau de confiance de α% : $k_s(n) = \frac{k_\alpha(n)}{\sqrt{n}}$

Avec $k_\alpha(n)$ le fractile d'ordre α% selon une distribution t non centrée avec n-1 degrés de liberté et un paramètre de non centralité $\lambda = u_{1-p}\sqrt{n}$

Et u_{1-p} le fractile d'ordre (1-p) de la fonction de distribution normale.

Ces paramètres sont définis à partir du logiciel statistique R développé par CRAN.

Par exemple, le coefficient k_s d'une valeur caractéristique à 5% avec un niveau de confiance de 75% pour 10 essais est calculé tel que :

Loi normale $u_{1-5\%}$: $u_{95\%} = 1{,}644854$

$\lambda = 1{,}644854\sqrt{10} = 5{,}201484$

La loi t exentré de λ : $k_{75\%}(10) = 6{,}652381$

$k_s(10) = \dfrac{k_\alpha(10)}{\sqrt{10}} = \dfrac{6{,}652381}{\sqrt{10}} = 2{,}103668$

On retrouve bien le coefficient 2,10 donné dans le tableau 1 de l'EN 14358.

Dans le cas de la distribution Log-normale, la méthode de détermination de la valeur caractéristique est la suivante :

- Détermination de la valeur moyenne : $\overline{y} = \frac{1}{n}\sum \ln m_i$
- Détermination de l'écart-type : $s_y = \max\left[0{,}05\ ;\ \sqrt{\frac{1}{n-1}\ \sum(\ln m_i - \overline{y})^2}\right]$
- Calcule de la valeur caractéristique à 5% à partir de l'équation : $m_k = e^{(\overline{y} - k_s(n)\, s_y)}$

Dans le cas de la distribution normale, la méthode de de détermination de la valeur caractéristique est la suivante :

- Détermination de la valeur moyenne : $\overline{y} = \frac{1}{n}\sum m_i$
- Détermination de l'écart-type : $s_y = \max\left[0{,}05\ \bar{y}\ ;\ \sqrt{\frac{1}{n-1}\ \sum(m_i - \overline{y})^2}\right]$
- Calcule de la valeur caractéristique à 5% à partir de l'équation : $m_k = \overline{y} - k_s(n)\, s_y$

c. Valeur caractéristique moyenne

- Détermination de la valeur moyenne : $\overline{y} = \frac{1}{n}\sum m_i$
- Détermination de l'écart-type : $s_y = \max\left[0{,}05\ \bar{y}\ ;\ \sqrt{\frac{1}{n-1}\ \sum(m_i - \overline{y})^2}\right]$
- Définition du facteur permettant de trouver la valeur caractéristique moyenne avec un niveau de confiance de 75% : $k_s(n) = \frac{t_{\alpha,n-1}}{\sqrt{n}}$

Avec $t_{\alpha,n-1}$ fractile d'ordre α% selon une distribution centré avec n-1 degrés de libertés.

Cette à partir du logiciel statistique R développé par CRAN.

Par exemple pour un niveau de confiance α de 75% et 10 échantillons on trouve :

$t_{75\%,10-1} = 0{,}7027221$ soit $k_s(n) = \frac{0{,}7027221}{\sqrt{10}} = 0{,}2222203$

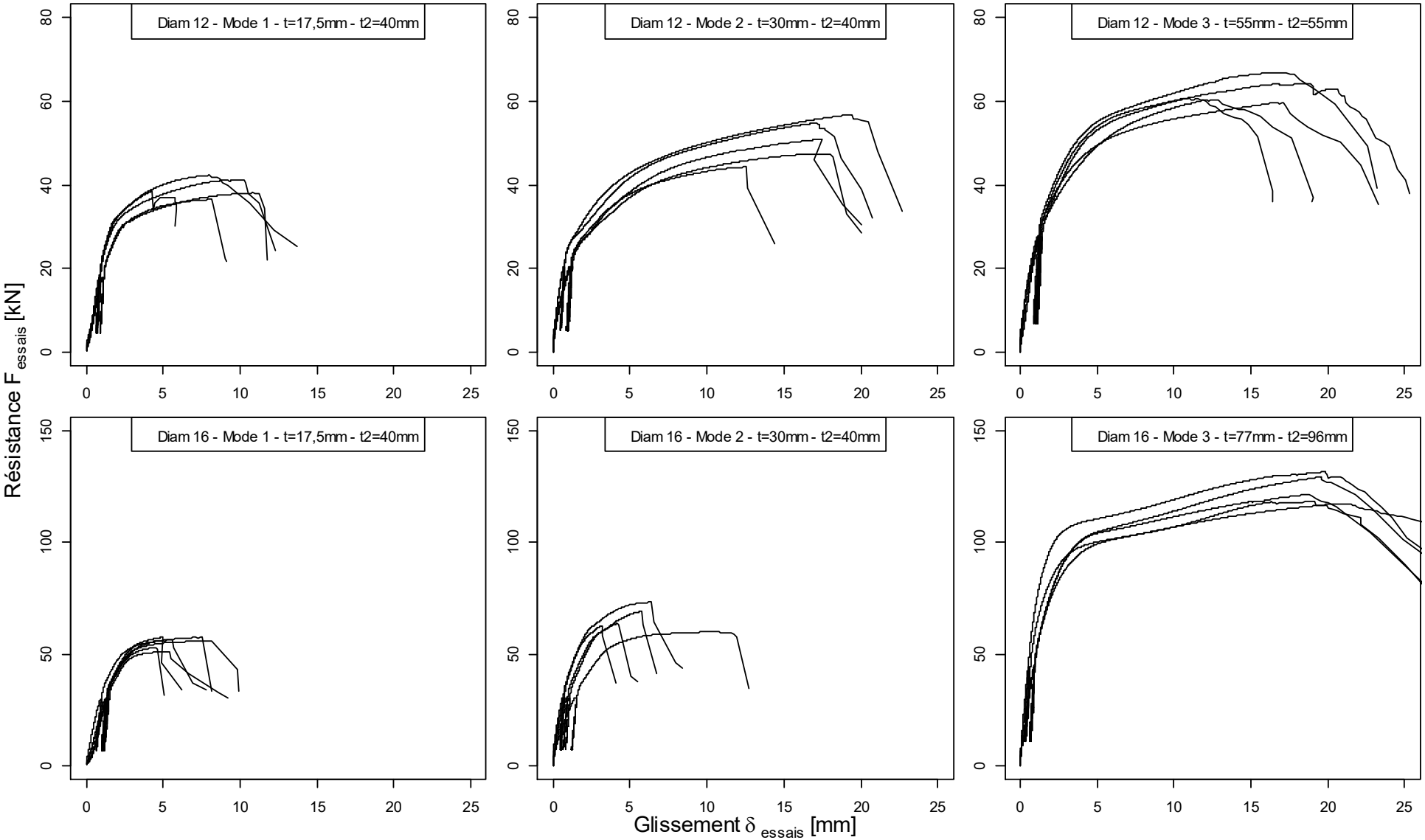
Soit le même résultat que dans le tableau 2 de l'EN 14358

- La valeur caractéristique moyenne est obtenue par l'équation : $m_{mean} = \overline{y} - k_s(n)\, s_y$

ANNEXE E : TABLEAUX DE DONNEES DES ESSAIS D'ASSEMBLAGES

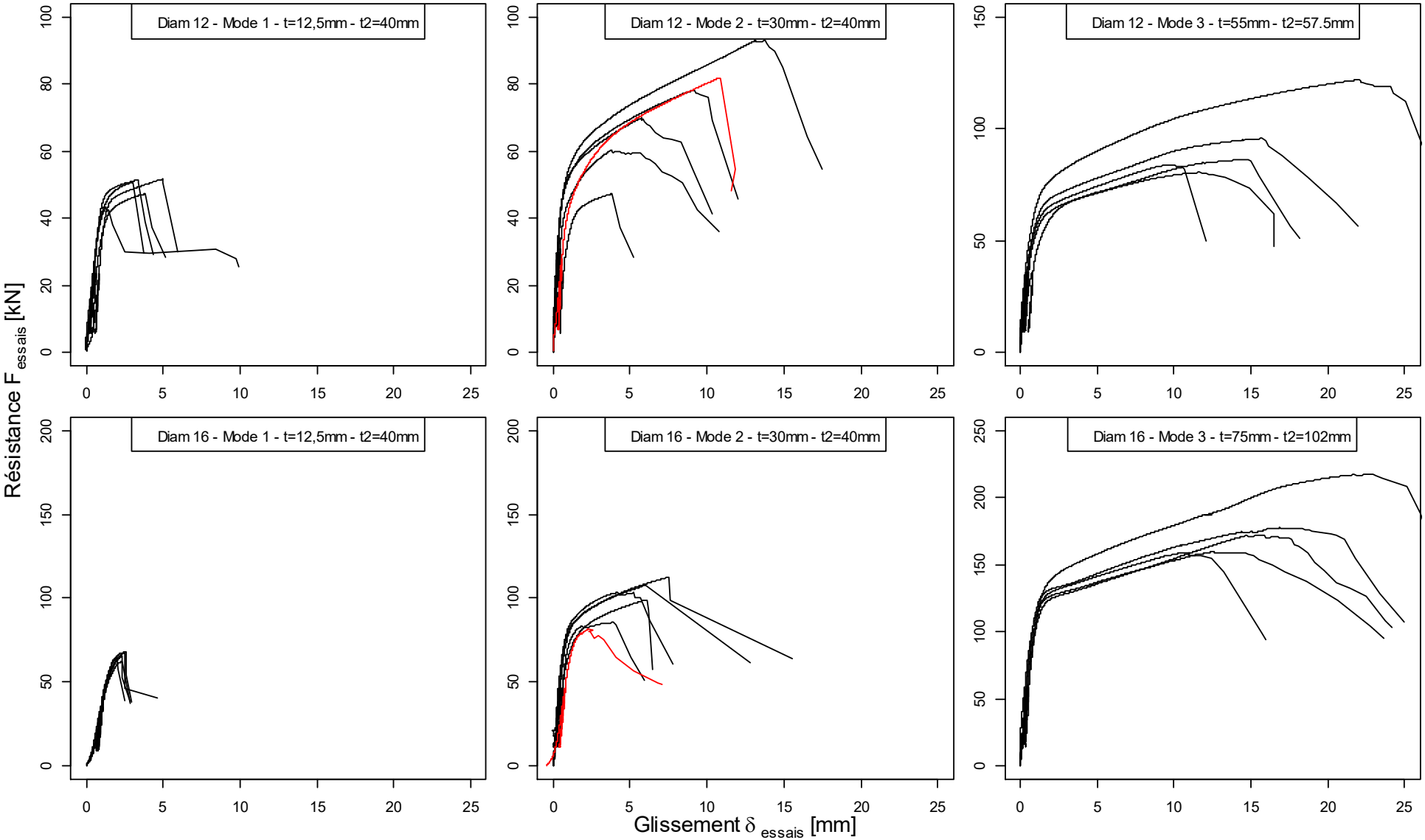
Essence	Diam	mode	t1	t2	MV 1	MV 2	KSER	Kser_EC5	F_5mm	F_10mm	F_15mm	F max	F_EC5
	[mm]		[mm]	[mm]	kg/m^3	kg/m^3	kN/mm	kN/mm	kN	kN	kN	kN	kN
PEUPLIER	12	1	17,5	40	394	416	18,81	25,50	35,26			36,53	40,28
			17,5	40	429	437	22,59	28,19	39,57			42,30	41,71
			17,5	40	430	423	17,87	27,54	34,65	37,92		38,11	41,40
			17,5	40	447	446	23,54	29,53	37,08			38,51	42,40
			17,5	40	441	450	24,08	29,42	36,98	41,20		41,22	42,33
		2	30	40	389	396	15,14	24,33	37,56	42,97		44,32	42,43
			30	40	374	449	16,76	25,97	36,45	43,76	46,62	47,45	42,81
			30	40	426	418	12,29	27,13	33,67	44,73	48,91	50,95	44,62
			30	40	453	482	26,18	31,58	40,73	48,86	53,03	54,76	47,20
			30	40	478	492	24,61	33,45	42,33	49,64	53,77	56,78	48,58
		3	55	55	504	512	21,46	35,84	54,37	61,49	66,00	66,84	63,78
			55	55	432	433	23,41	28,14	53,35	59,75	62,94	64,29	58,85
			55	55	442	446	18,37	29,31	51,96	59,38		60,81	59,65
			55	55	487	501	13,82	34,39	45,71	57,16	58,61	60,38	62,91
			55	55	401	432	18,80	26,56	48,91	55,45	58,45	59,72	57,57
	16	1	17,5	40	457	396	30,55	36,63	33,96			57,51	63,15
			17,5	40	445	398	27,01	36,06	31,42			52,87	62,06
			17,5	40	447	360	25,03	33,51	51,07			51,14	57,40
			17,5	40	489	404	23,59	39,09	54,71			56,07	64,41
			17,5	40	473	398	29,97	37,74	56,11			57,44	63,50
		2	17,5	40	456	395	31,26	36,45	55,95			56,25	62,94
			30	40	413	407	18,06	34,63	55,79	59,70		59,98	65,11
			30	40	416	408	25,93	34,94	66,91			69,18	65,41
			30	40	457	436	29,06	39,38				63,60	69,52
			30	40	480	433	41,71	40,67				62,66	69,15
		3	30	40	492	447	39,23	42,38	71,57			73,17	70,73
			77	96	407	430	47,20	35,72	98,25	106,06	112,11	116,73	98,60
			77	96	452	447	47,83	39,78	103,15	110,55	117,23	121,60	102,22
			77	96	466	460	46,81	41,58	104,37	113,38	122,85	129,32	103,74
			77	96	496	488	61,52	45,53	99,78	106,09	115,25	118,38	106,93

Peuplier - Bois/Bois



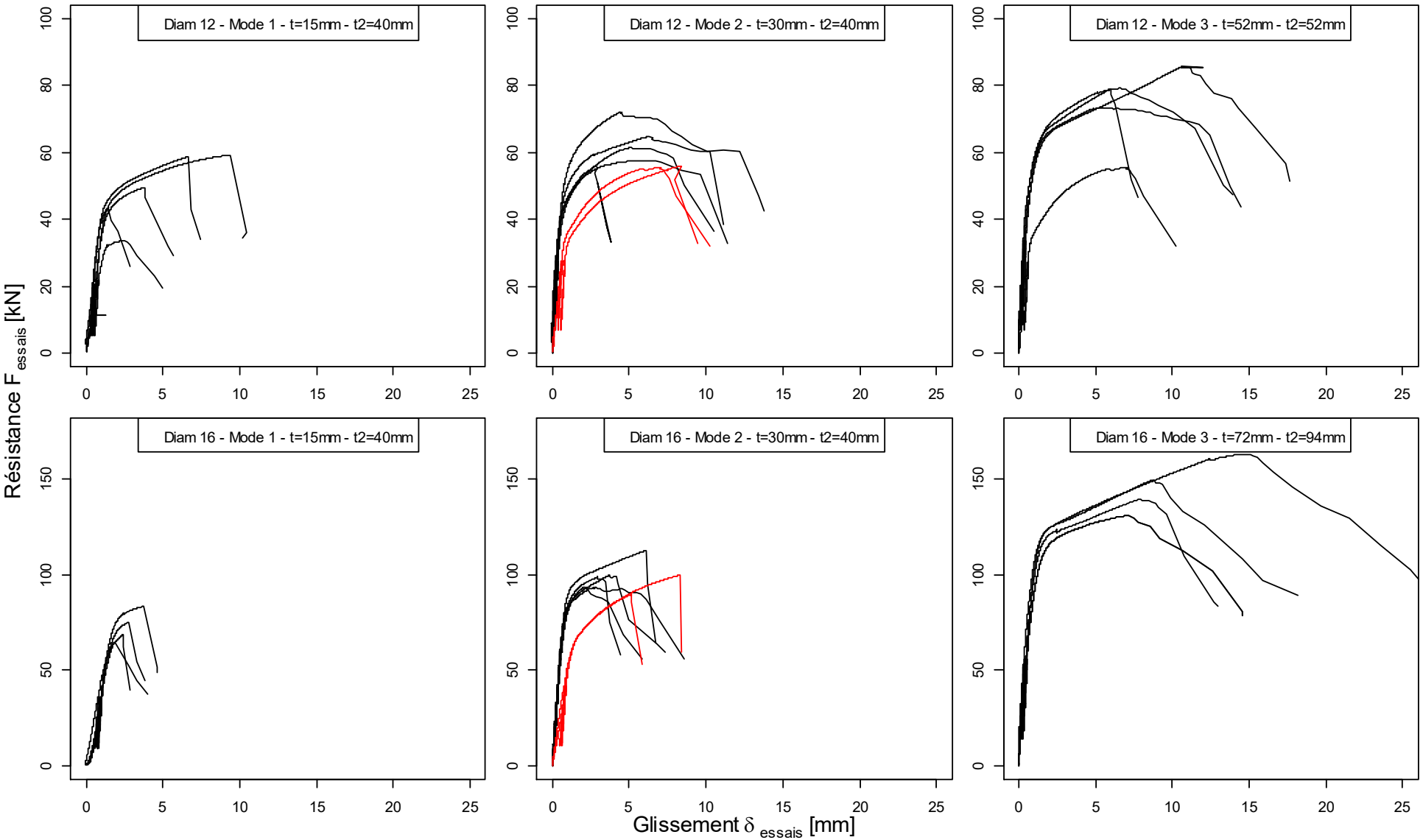
Essence	Diam	mode	t1	t2	MV 1	MV 2	KSER	Kser_EC5	F_5mm	F_10mm	F_15mm	F max	F_EC5
	[mm]		[mm]	[mm]	kg/m^3	kg/m^3	kN/mm	kN/mm	kN	kN	kN	kN	kN
HETRE	**12**	**1**	12,6	40,3	605	610	35,29	46,86				47,35	55,14
			12,3	40,3	660	648	44,70	52,37	51,48			51,48	57,24
			12,5	40,0	688	687	46,69	56,40				51,64	58,74
			12,3	40,1	710	708	39,00	59,14				43,49	59,69
			12,4	39,9	733	731	46,40	62,00				50,76	60,70
		2	29,9	40,2	707	705	88,23	58,70	70,43			70,43	74,63
			30,0	39,9	668	694	83,33	55,64	59,35			59,35	72,20
			30,0	39,9	711	722	94,01	60,03	69,03	77,05		69,03	75,28
			30,1	40,1	724	734	86,27	61,61	67,49			67,49	76,45
			29,9	39,9	759	771	88,30	66,26	72,83	84,29	91,25	72,83	79,06
		3	54,0	60,0	668	663	60,29	53,76	71,41	81,48	86,28	71,41	81,55
			54,0	57,5	694	634	71,54	53,51	77,63	89,40	95,09	77,63	81,37
			54,0	57,5	682	680	62,35	55,63	73,81	83,84		73,81	82,49
			54,0	57,5	671	677	39,40	54,78	70,81	78,86		70,81	82,06
			54,0	54,0	757	724	74,32	63,07	89,41	103,53	112,49	89,41	85,99
	16	**1**	12,4	40,3	664	659	46,72	71,03				62,20	81,13
			12,7	40,3	667	677	44,79	72,73				65,66	83,57
			12,2	40,1	711	690	45,07	77,38				67,47	85,17
			12,5	40,0	696	701	50,86	77,05				67,78	85,35
			12,5	39,9	727	736	47,08	82,60				65,16	89,56
		2	29,8	40,1	696	687	78,94	75,91	95,33			95,33	109,76
			29,9	40,0	703	710	123,01	78,34	105,00			105,00	111,03
			30,0	39,9	710	718	106,26	79,66	102,55			102,55	111,99
			29,9	40,0	721	725	97,88	81,14				85,41	112,83
			29,9	39,9	718	749	98,85	82,93	103,97			103,97	113,40
		3	75,0	102,0	702	665	140,84	74,50	136,27	152,07	158,77	136,27	139,33
			75,0	102,0	697	698	112,12	76,82	135,02	153,06	170,91	135,02	140,81
			75,0	102,0	709	701	132,78	78,15	141,60	160,44	173,41	141,60	141,61
			75,0	102,0	771	728	122,63	85,58	140,04	156,11		140,04	145,92
			75,0	102,0	788	780	107,84	91,66	156,82	177,55	196,28	156,82	149,34

Hêtre - Bois/Bois

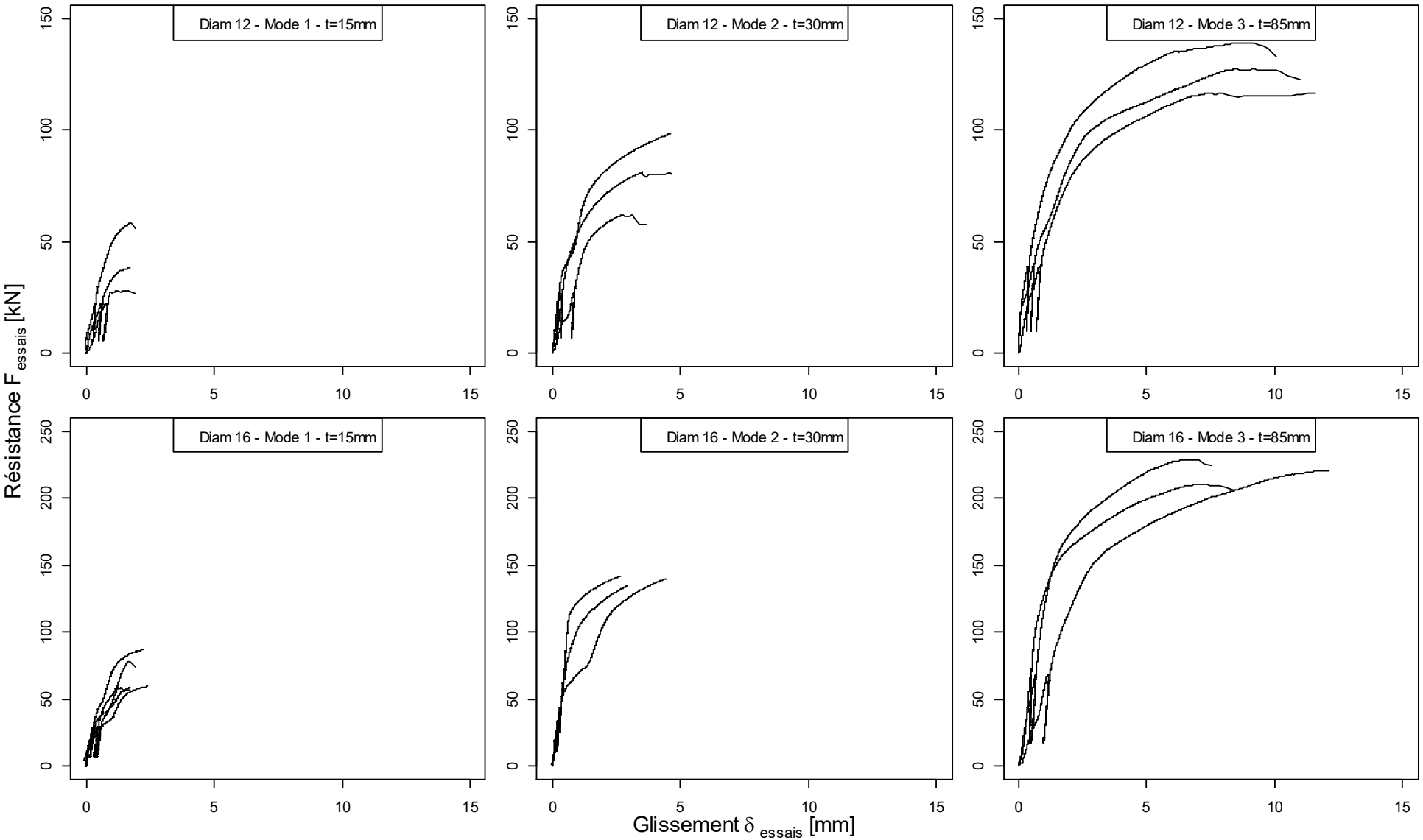


Essence	Diam	mode	t1	t2	MV 1	MV 2	KSER	Kser_EC5	F_5mm	F_10mm	F_15mm	F max	F_EC5
	[mm]		[mm]	[mm]	kg/m^3	kg/m^3	kN/mm	kN/mm	kN	kN	kN	kN	kN
CHENE	**12**	**1**	14,9	40,0	668	667	35,93	54,01				49,63	56,26
			14,9	40,1	713	716	36,28	59,79	53,50	59,13		59,25	58,38
			14,7	39,7	764	767	30,21	66,32				33,75	60,57
			14,9	40,1	780	783	39,36	68,40				58,77	61,34
			14,7	39,8	801	802	37,40	71,04				43,76	62,14
		2	29,8	39,9	675	697	82,56	56,26				56,10	68,47
			29,7	39,9	699	706	81,38	58,28	57,31			57,72	69,93
			29,9	40,1	720	737	64,62	61,57	61,04			61,46	71,88
			29,8	39,9	762	793	85,07	67,83				64,93	75,05
			29,8	40,0	773	827	83,55	70,73	70,76			71,99	76,23
		3	52,0	52,0	650	654	75,14	52,09	75,96			79,09	77,84
			52,0	52,0	679	677	88,81	55,31	72,99			73,36	79,41
			52,0	52,0	704	700	71,86	58,20	72,67	83,47		85,72	80,77
			52,0	52,0	734	732	62,49	62,16	77,34			79,19	82,57
			52,0	52,0	753	752	71,27	64,62	77,58	86,44		86,99	83,64
	16	**1**	14,8	40,1	687	681	49,22	74,68				64,69	91,80
			14,9	40,1	693	689	43,20	75,76				68,66	93,61
			14,8	40,1	711	710	56,03	79,02				75,09	94,96
			14,8	40,0	729	738	47,64	82,88				83,49	97,75
			29,8	40,0	701	701	114,48	77,46	92,60			93,36	104,98
		2	30,0	40,1	715	716	121,27	79,83	108,63			112,81	106,48
			29,9	40,1	727	720	106,36	81,25				99,60	107,41
			29,8	39,7	751	728	105,86	83,97				93,58	109,07
			29,9	40,0	776	774	118,54	90,09				98,96	112,31
			72,0	94,0	680	667	99,82	72,99	126,72			130,89	133,33
		3	72,0	94,0	702	692	112,92	76,77	129,31	131,45		139,74	135,59
			72,0	94,0	709	724	113,70	80,07	135,28	140,35		149,13	137,50
			72,0	94,0	736	733	118,87	83,06	135,62	151,69	162,95	163,06	139,20
			72,0	117,5	748	736	123,297	84,33	132,985	148,341		155,46	139,90
			14,9	40,0	668	667	35,93	54,01				49,63	56,26

Chêne - Bois/Bois



Chêne - Bois/Metal



ANNEXE F : ESSAIS VIBRATOIRES POUR LA VALORISATION DES LAMES

La méthode d'essais vibratoires longitudinal, non destructive, permet par une analyse et une interprétation du spectre des vibrations de déterminer le module d'élasticité. Lors des essais, la pièce est soumise à une impulsion à une de ses extrémités et un accéléromètre placé sur l'autre extrémité permet de mesurer la fréquence propre de l'échantillon (cf Figure F-1).

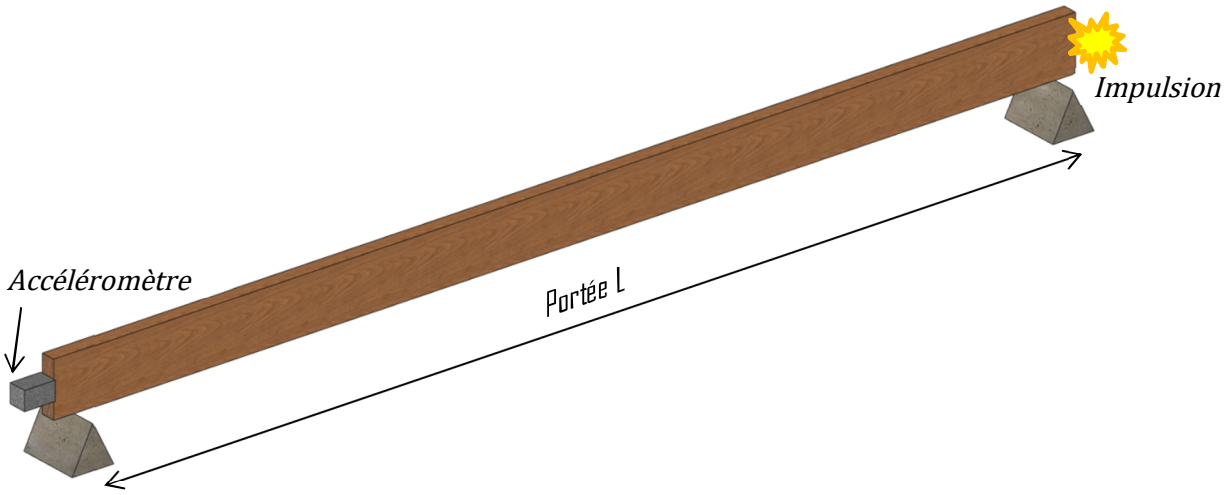


Figure F-1 : Principe de la mesure vibratoire.

Dans une barre qui vibre longitudinalement, les déplacements se limitent à des petites variations dans le sens de l'axe. Il est possible d'écrire l'équilibre dynamique d'un tronçon de la barre de longueur dz délimité par les sections a et b (cf Figure F-2).

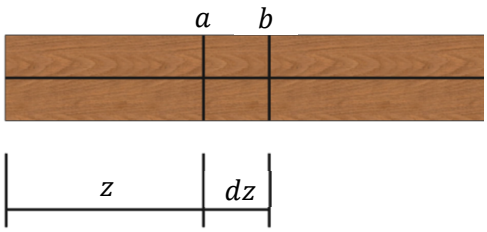


Figure F-2 : Schéma de principe de la vibration longitudinale.

La variable u exprime le déplacement de la section a et par $u + \frac{\partial u}{\partial z}\, dz$, il est alors possible d'obtenir les efforts $N_a$et $N_b$dans chacune des section (sans perdre de vue l'allongement relatif $\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial z}$).

$$N_a = -ES\frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{et} \quad N_b = ES\left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) dz\right]$$

La Force d'inertie d'un élément de la barre de longueur dz sera, pour une masse générale de la barre m et d'une longueur totale l.

$$P_i = \frac{m}{l}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\,dz$$

En se servant du principe de D'Alembert $\left(\sum \overrightarrow{R_i}.\partial\overrightarrow{r_i}\right)$ il est possible d'écrire la condition d'équilibre dynamique de l'élément de la barre sous la forme suivante :

$$N_b - N_a = P_i, \quad \text{Soit} \quad ES\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)dz = \frac{m}{l}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\,dz$$

En simplifiant par dz et en substituant $\frac{m}{l\,S}$ par ρ la masse volumique du matériau, l'équation différentielle des oscillations s'exprime par :

$$E\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \rho\,\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

En introduisant la variable a tel que : $a^2 = \frac{E}{\rho}$, il vient alors : $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$

D'après la méthode de Fourier la solution de l'équation est de la forme :

$u = ZT$, Avec $Z = f_1(x)$ et $T = f_2(t)$

En dérivant la solution deux fois par rapport à z et deux fois par rapport à t, il est possible d'écrire la solution tel que :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = Z\frac{d^2 T}{dt^2} \text{ et } \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = T\frac{d^2 Z}{dz^2}$$

En intégrant les solution dérivées dans l'équation comportant la variable a, il vient :

$$Z\frac{d^2 T}{dt^2} = a^2 T\frac{d^2 Z}{dz^2} \quad \leftrightarrow \quad \frac{1}{T}\frac{d^2 T}{dt^2} = \frac{a^2}{Z}\frac{d^2 Z}{dz^2}$$

Il est possible d'introduire la constante ω^2 tel que :

$$\frac{1}{T}\frac{d^2 T}{dt^2} = -\omega^2 = \frac{a^2}{Z}\frac{d^2 Z}{dz^2}$$

Ce qui donne deux équations ordinaire du second degré :

$$\frac{d^2 T}{dt^2} = -\omega^2 T$$

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} = \frac{-\omega^2}{a^2}Z$$

Les solutions particulières de ces équations sont :

$T = \cos\omega t \quad / \quad T = \sin\omega t$

$Z = \cos\frac{\omega}{a}z \quad / \quad Z = \sin\frac{\omega}{a}z$

Du fait que les barres soient libres en bout, les conditions aux limites peuvent être écrites :

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=0} = 0 \quad \text{et} \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=l} = 0$$

En introduisant la solution $Z = \sin\frac{\omega}{a}z$ dans l'équation $u = ZT$, la condition limite $\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=0} = 0$ ne peut être validé que si : $u = \sin\frac{\omega}{a}z \times \cos\omega t$

En combinant l'équation $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\omega}{a}\cos\frac{\omega}{a}z \times \cos\omega t$ avec la condition limite $\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=0} = 0$ la seule solution est que $\omega = 0$ ce qui est donc impossible.

Pour la deuxième condition limite : $\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=l} = -\frac{\omega}{a}\sin\frac{\omega}{a}z \times \sin\omega t = -\frac{\omega}{a}\sin\frac{\omega}{a}l \times \sin\omega t = 0$

Ce qui implique obligatoirement que $\sin\frac{\omega}{a}l = 0$

Ce qui ne peut être satisfait que dans le cas où : $\frac{\omega}{a}\, l = i\pi$

La pulsation fondamentale est donc : $\omega_i = i\frac{a\,\pi}{l} = i\frac{\pi}{l}\sqrt{\frac{E}{\rho}}$

Soit la période : $T_i = \frac{2\,\pi}{\omega_i} = \frac{2\,l}{i}\sqrt{\frac{\rho}{E}}$

Soit la fréquence : $f_i = \frac{1}{T_i} = \frac{i}{2\,l}\sqrt{\frac{E}{\rho}}$

Il vient ainsi :

$$f_i = \frac{i}{2\,l}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \leftrightarrow {f_i}^2 = \frac{i^2}{4\,l^2}\frac{E}{\rho} \leftrightarrow E = \frac{4\,l^2\,\rho\,{f_i}^2}{i^2}$$

RESUME

Bien que la forêt française soit composée au deux tiers de bois feuillus et d'un tiers de bois résineux la construction bois mobilise principalement les essences résineuses (sapin, pins, épicéa, douglas…) provenant de France et d'Europe. Le code de calcul des structures en bois : l'EUROCODE 5 est basé sur les recherches et publications réalisées principalement sur les bois résineux au cours des 70 dernières années.

Une meilleure valorisation des bois feuillus ne peut se faire qu'en conduisant des études similaires sur ces essences. Le projet ANR EFEUR 5 a ainsi pour objectifs d'améliorer la connaissance des propriétés mécaniques des bois feuillus avec le plus fort potentiel de valorisation (chêne, hêtre et peuplier) pour lever les freins à leur mise en œuvre.

Dans cette optique, cette thèse s'intéresse dans un premier temps aux corrélations qui encadrent la prédiction des propriétés mécaniques dites secondaires (résistance en traction, compression, cisaillement…) en fonction des propriétés mécaniques principales (résistance en flexion, masse volumique et module d'élasticité). Dans un second temps le comportement mécanique des assemblages a été étudié afin de réduire le nombre d'organe dans les assemblages réalisés en bois feuillus. Finalement à partir des résultats une analyse des pistes de valorisation des bois feuillus a été réalisée et éprouvée dans le cadre d'un projet démonstrateur.

ABSTRACT

Although the French forest is composed of two-thirds of hardwoods and one-third of softwoods, timber construction mainly uses softwood species (fir, pine, spruce, douglas fir ...) that come from France and Europe. Design standard for wood construction (EUROCODE 5) is based on researches and publications carried out mainly on softwood in the last 70 years.

A better valuation of hardwoods can only be done by conducting similar studies on these species. The aim of the ANR EFEUR 5 project is to improve the knowledge of mechanical properties of hardwoods with the highest potential (oak, beech and poplar) in order to remove the obstacles to their utilization in construction.

In this perspective, this thesis focuses on the relation bewteen so-called secondary mechanical properties (tensile, compression and shear strength, etc.) as a function of the principal mechanical properties (bending strength, density and modulus of elasticity). In a second time the mechanical behavior of joints has been studied in order to reduce the number of dowels in joints made with hardwood. Finally, from the results, an analysis of the recovery routes for hardwood has been carried out and tested as part of a demonstrator project.