

École polytechnique de Louvain

Bois lamellé-agrafé : détermination d'une formule du K_{ser} appliquée aux connecteurs métalliques

Auteur : **Colin DOSIMONT**

Promoteur : **Pierre LATTEUR**

Lecteurs : **Catherine DONEUX, Julien GENO, Michel MONHONVAL**

Année académique 2020–2021

Master [120] : ingénieur civil des constructions

**Bois lamellé-agrafé :
détermination d'une formule du
 K_{ser} appliquée aux connecteurs
métalliques**

Auteur
Colin DOSIMONT

Promoteur
Pierre LATTEUR

Lecteurs
**Catherine DONEUX
Julien GENO
Michel MONHONVAL**

2020-2021

 **UCLouvain**

 **epl**

REMERCIEMENTS

Mes tous premiers remerciements sont incontestablement adressés à Michel Monhonval. D'abord l'auteur de cette fabuleuse idée qu'est ce sujet de fin d'étude, il est aujourd'hui devenu bien plus à mes yeux, de par la confiance dont il m'a témoignée, sa présence infaillible et ses encouragements à mon égard. C'était un plaisir de travailler, mais surtout d'échanger avec vous, Michel, et je suis certain que j'aurai encore longtemps l'occasion d'apprendre de votre sagesse. Je ne vous en remercierai jamais assez !

Je voudrais ensuite exprimer toute ma reconnaissance à mon promoteur et professeur, Pierre Latteur. Il m'a permis d'avoir un modèle à suivre pendant ces trois dernières années d'études et en dehors de tout ce qu'il a pu m'apprendre en cours, je retiendrai cette énergie, cette rigueur et tous ses conseils qu'il a su me communiquer. Merci pour votre accessibilité et votre confiance. Je ne serais pas presque ingénieur sans vous aujourd'hui.

Je souhaiterais aussi mettre à l'honneur toute l'équipe du LEMSC. Je me suis retrouvé très bien entouré et j'ai pu compter sur chacun d'eux lorsque j'étais dans le besoin. Un remerciement spécial va à Quentin Mestrez. D'abord pour les kilomètres que je lui ai fait parcourir dans le laboratoire pour régler les machines d'essais, ensuite pour sa bonne humeur, ses conseils avisés et ses préparations minutieuses des protocoles d'essais. Je tiens également à remercier Christophe Bayart pour sa réactivité qui m'a permise d'intercaler mes essais sur les poutres dans son planning très serré. Pour finir, je remercie Mme Catherine Doneux qui m'a permis de réaliser mes essais au LEMSC. J'ai pu également profiter de chacun de ses conseils allant de la fabrication de mes éprouvettes jusqu'au post-traitement des images prises par la DIC.

Mes remerciements vont ensuite à Julien Geno pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et les conseils qu'il a pu me donner concernant mes campagnes expérimentales. Je lui suis aussi reconnaissant de m'avoir renseigné auprès de Mme Catherine Rasse, que je tiens également à remercier pour tous ses bons conseils statistiques.

Mon travail n'aurait pas aussi bien démarré sans la base solide déjà construite par Corto Lahaye. Je tiens à le remercier de m'avoir passé le relais tout en continuant de me soutenir et de s'intéresser à mon avancement.

Je souhaiterais poursuivre ces remerciements avec tous les intervenants extérieurs à l'Université, et sans qui, tout ce travail n'aurait pas été envisageable.

J'aimerais commencer par remercier le directeur de la société MITEK-FRANCE, M. Schwartz. Ce premier contact a permis d'apporter beaucoup à ce mémoire, notamment par la mise à disposition du logiciel PAMIR et le don de connecteurs. Une mention spéciale s'adresse à MM. De Zutter et Dournaux pour le temps qu'ils ont consacré à mes nombreuses questions concernant le calcul des plaques métalliques embouties.

Je souhaite encore remercier les différentes entreprises qui ont apporté leur pierre à l'édifice. Vincent Hancart pour le don de ses chutes de chêne et le prêt de ses machines professionnelles pour la réalisation des éprouvettes. Xavier Michaux de l'entreprise Chimsco pour sa coopération et le prêt des connecteurs afin d'éviter de longs délais. La scierie Scidus, pour le don de hêtre avec une mention particulière à Bertrand Dubois pour le temps passé à la visite de la scierie. Enfin, je tiens à remercier chaleureusement les entreprises Eddy Marlaire-Menuiserie Contemporaine et ABMenuiserie pour l'usinage de toutes mes pièces de bois, nécessaires à la bonne réalisation des essais en laboratoire.

Pour l'enthousiasme autour de ce travail et leurs soudures de qualité, je remercie les professeurs et les élèves de l'Institut Saint-Joseph et l'École des Forges de Ciney.

Avant de terminer, comment ne pas remercier mes chers camarades de cours qui ont rendu ces dernières années d'études on ne peut plus agréables. Merci de m'avoir soutenu, de m'avoir remis en question et de m'avoir fait rire. Je souhaite bien sûr transmettre mes plus sincères remerciements à Chloé De Ketele et Christopher Moens desquels j'ai beaucoup appris et avec lesquels j'ai pu réaliser mes plus beaux projets universitaires.

Pour terminer, je remercie du fond du coeur tous les membres de ma famille qui, de près ou de loin, ont contribué par leur intérêt, leur bienveillance et leurs encouragements, à l'atteinte de mes objectifs. Trois remerciements particuliers vont à ma marraine Coralie, à ma cousine Alix et à ma tante Véronique pour les relectures attentives de ce travail. Pour terminer, je remercie mes parents, Ingrid Fauchet et Christophe Dosimont, d'avoir cru en moi et de m'avoir donné la chance de faire ces cinq années universitaires.

ABSTRACT

Est-il possible de fabriquer facilement des éléments en bois de forte section ? Les réponses à cette question renvoient, de manière générale, au bois lamellé-collé dont les conditions de fabrication n'ont rien d'aisé.

Ce travail tente de répondre à cette question d'une autre manière en considérant un organe d'assemblage mécanique utilisé depuis plus d'un demi-siècle. Celui-ci n'est autre que la plaque métallique emboutie qui pourrait, à la manière de la colle présente dans le bois lamellé-collé, tenir assemblées plusieurs lames de bois superposées.

Bien qu'abondamment utilisés, ces assemblages par connecteurs métalliques sont pourtant encore complexes à caractériser, en particulier leur rigidité. Représentée par un module de glissement K_{ser} , aucun moyen ne permet de la calculer analytiquement comme c'est le cas pour les autres types d'assemblages. Une étude théorique sera menée de manière à bien cerner les tenants et aboutissants du connecteur surfacique, avant de lancer une série de campagnes d'essais. Ces dernières viseront la détermination du lien entre le module de glissement K_{ser} de l'assemblage et la densité des bois assemblés. Pour terminer, une dernière étude expérimentale sera réalisée sur les poutres assemblées grâce aux connecteurs métalliques, poutres en bois lamellé-agrafé. Une analyse, basée sur l'intégralité des acquis théoriques mis en lumière dans ce travail en découlera. Citons notamment les modèles numériques construits pour l'étude de ces poutres, comme la méthode Gamma, décrite dans l'annexe B de l'*Eurocode 5*. Mais également un modèle numérique réalisé à l'aide du logiciel SCIA, ou encore, le programme dédié aux calculs de portiques de toit, créé par le leader mondial de la plaque métallique emboutie.

Une première étude sur le sujet ayant déjà été réalisée par Corto Lahaye en 2020, le présent travail permet de donner une bonne partie de la relation liant le module de glissement à la densité du bois. Il reste, cependant encore, des paramètres identifiés, mais non étudiés, qui ont une influence sur la rigidité de ces assemblages. Ceux-ci concernent principalement la géométrie du connecteur lui-même et pourraient faire l'objet d'une série d'études supplémentaires.

Concernant l'étude du bois lamellé-agrafé, la solution proposée dans ce mémoire donne de meilleurs résultats que la solution précédente. Les déformations sont de l'ordre de deux fois celles qui seraient obtenues avec une poutre homologue en bois lamellé-collé. Cela n'est pas encore convainquant mais d'autres idées sont proposées.

ABSTRACT

Is it possible to manufacture large cross-section timber elements easily ? The answers to this question generally refer to glued laminated timber, whose manufacturing conditions are not so easy.

This document attempts to answer this question in another way by considering a mechanical assembly element used for more than half a century. This is none other than the punched metal plate that could, like the glue present in glued laminated timber, hold together several superimposed wood strips.

Although they are widely used, these metal fasteners are still complex to characterise, particularly their rigidity. Represented by a slip modulus K_{ser} , there is no way of calculating it analytically as is the case for other types of connections. A theoretical study will be carried out in order to understand the ins and outs of the surface fastener before launching a series of test campaigns. The latter will aim to determine the link between the slip modulus K_{ser} of the connection and the density of the connected wood. Finally, a last experimental study will be carried out on beams assembled with metal fasteners, laminated wood beams. An analysis will follow based on all the theoretical knowledge brought to light in this work. In particular, the numerical models constructed for the study of these beams such as the Gamma method, described in appendix B of the *Eurocode 5*. But also a numerical model made with the software *SCIA* or the programme dedicated to roof portal calculations, created by the world leader in punched metal plates.

A first study on the subject having already been carried out by Corto Lahaye in 2020, this second work made it possible to give a good part of the relationship linking the slip modulus to the density of the wood. However, there are still parameters identified, but not studied, that have an influence on the stiffness of these connections. These mainly concern the geometry of the fastener itself and could be the subject of a series of further studies.

In the study of laminated timber, the solution proposed in this thesis gave better results than the previous solution. The deformations are in the order of twice those that would be obtained with a glulam counterpart beam. This is not yet convincing but other ideas are proposed.

Table des matières

Table des matières	vii
Table des figures	x
Liste des tableaux	xiv
Introduction	1
1 État de l’art	5
1.1 Le matériau bois	5
1.1.1 Histoire	5
1.1.2 Le bois de nos jours	6
1.1.3 Propriétés mécaniques	9
1.2 Optimisation du matériau bois	12
1.2.1 Le bois lamellé-collé (BLC)	13
1.3 Assemblages mécaniques	14
1.3.1 Assemblages linéiques	16
1.4 Assemblages surfaciques	21
1.4.1 Anneaux et Crampons	21
1.4.2 Plaques métalliques embouties	21
2 Analyse théorique de l’assemblage	31
2.1 Calcul selon l’Eurocode 5	31
2.1.1 Capacité d’ancrage de la plaque	32
2.2 Rigidité des assemblages	36
2.2.1 Rigidité donnée par les fabricants	36

2.3	Méthode Gamma	45
2.3.1	Formulation générale	45
2.3.2	Analyse	47
2.4	Modèle numérique SCIA	50
2.4.1	Description du modèle	51
2.4.2	Vérification de la fidélité du modèle	53
2.5	Modèle PAMIR	54
2.5.1	Description du modèle	54
2.6	Modèle de calcul de Foschi	57
3	Analyse expérimentale	59
3.1	Essais préliminaires	60
3.1.1	Variables	60
3.1.2	Les limites	63
3.1.3	Choix d'étude	65
3.2	Essais de traction en laboratoire	66
3.2.1	Préparation de l'éprouvette	67
3.2.2	Protocole d'essai	69
3.2.3	Résultats des essais de traction	71
3.2.4	Expression analytique de k_{ser}	72
3.2.5	Modèle existant	73
3.2.6	Analyse statistique	75
3.2.7	Application du modèle de Foschi	76
3.2.8	Module de glissement ultime K_u	77
3.3	Essais de cisaillement en laboratoire	79
3.3.1	Préparation de l'éprouvette	80
3.3.2	Protocole d'essai	82
3.3.3	Résultats des essais de cisaillement	83
3.3.4	Expression analytique du k_{ser} en cisaillement	86
3.4	Essais de poutres en bois lamellé-agré (BLA)	87
3.4.1	Présentation de la poutre	87
3.4.2	Protocole d'essai	88
3.4.3	Résultats des essais sur les poutres en bois lamellé-agré	91
3.4.4	Méthodologie pour le dimensionnement de poutre en bois lamellé-agré	103
4	Pistes d'améliorations	105

4.1 Paramètres liés au connecteur	105
4.1.1 La densité des dents (d)	105
4.2 Modèle théorique	107
4.3 Amélioration de la méthode d'essai sur les poutres	107
4.4 Analyse statistique	107
Conclusions et perspectives	109
Annexe A Comparaison des connecteurs WOLF et MITEK	113
Annexe B Mécanique des ressorts	115
B.1 Ressorts en parallèle	115
B.2 Ressorts en série	116
Annexe C Simplification des expressions bois-béton	117
Annexe D Module de glissement des éprouvettes en traction	119
Annexe E Préparation et rupture des éprouvettes en traction	121
Annexe F Module de glissement ultime K_u	123
Annexe G Module de glissement des éprouvettes en cisaillement	125
Annexe H Calcul au déversement d'une poutre	127
Annexe I Effort sollicitant les connecteurs d'une poutre en bois lamellé-agrafé	129
Annexe J Synthèse graphique de l'analyse des 6 poutres	131
Annexe K Description des machines utilisées pour les essais	135
K.1 Essais de cisaillement	135
K.2 Essais de traction	136
K.3 DIC	136
Bibliographie	137

Table des figures

1.1	Cycle de vie du matériau bois [21]	8
1.2	Plan ligneux d'un résineux [37] [21]	9
1.3	Différentes sollicitations sur le bois [21]	10
1.4	Redistribution des contraintes de flexion	10
1.5	Hygroscopie du bois [21]	11
1.6	Variations dimensionnelles en fonction du type de débit	12
1.7	Aboutage par entures multiples	14
1.8	Différents types de modélisation d'un assemblage	15
1.9	Exemple de conception d'assemblages du plus rotulé (gauche) au plus encastré (droite) [40][57]	16
1.10	Schémas des différents modes de rupture considérés par la théorie de <i>Johansen</i>	17
1.11	Représentations et appellations des différentes formes de clous [53]	17
1.12	Représentation d'un boulon et d'une broche [6]	18
1.13	Schéma et description des vis et tire-fonds [28] [10]	19
1.14	Schéma de renforts par vis proposés par <i>Rothoblaas</i> [55]	19
1.15	Représentation d'un type d'agrafe [2]	20
1.16	Assemblages surfaciques	21
1.17	Plaques métalliques couramment utilisées dans les charpentes en bois [32]	22
1.18	Représentation du procédé de fabrication par emboutissage [51] [43]	23
1.19	Construction de fermettes préfabriquées [17]	24
1.20	Presse automatique pour la réalisation de fermettes préfabriquées [50]	25
1.21	Utilisation fréquente des connecteurs induisant du moment dans la plaque [49]	25
1.22	Dimensions nominales des connecteurs <i>BV15/O</i>	26
1.23	Dimensions nominales des connecteurs <i>W101</i>	26

1.24	Dimensions nominales des connecteurs M20 [42]	27
1.25	Comparaison visuelle entre les connecteurs W101 (gauche) et M20 (droite) . .	28
1.26	Utilisation et représentation du connecteur Sharp Metal [54]	28
1.27	Représentation du connecteur GripMetal [31]	29
1.28	Design classique d'une plaque métallique emboutie [45]	30
2.1	Géométrie d'un assemblage par plaque métallique emboutie	32
2.2	Représentation de l'aire efficace	33
2.3	Représentations graphiques des formules d'ancrage	35
2.4	Valeur de K_{ser} pour les assemblages bois (Tableau 7.1 Eurocode 5)	36
2.5	Modélisation d'un assemblage par plaques métalliques embouties à l'aide de ressorts	39
2.6	Présentation de la modélisation faite par le logiciel PAMIR	42
2.7	Définition des distances x et x_0	42
2.8	Évolution de la rigidité en fonction de l'aire efficace dans PAMIR	44
2.9	Comparaison entre la méthode des ressorts et PAMIR	45
2.10	Distribution des contraintes dans une section assemblée mécaniquement . .	46
2.11	Poutre assemblée mécaniquement considérée pour l'analyse	48
2.12	Synthèse graphique de l'annexe B de l'Eurocode 5 pour plusieurs entraxes entre les organes d'assemblage	48
2.13	Répartition des contraintes dans une poutre à lames non solidaires (gauche, $k_{ser} = 0$) et une poutre en bois massif (droite, $k_{ser} = \infty$)	49
2.14	Synthèse graphique de l'annexe B de l'Eurocode 5 pour plusieurs tailles de plaques métalliques embouties	50
2.15	Représentation globale du modèle numérique SCIA	51
2.16	Zoom sur le modèle SCIA	53
2.17	Analyse du modèle pour des lames non-collaborantes	53
2.18	Analyse du modèle pour des lames totalement collaborantes	54
2.19	Représentation globale du modèle PAMIR	55
2.20	Représentation au droit des appuis du modèle PAMIR	55
2.21	Représentation des déformations dans le modèle PAMIR	56
2.22	Représentation graphique du modèle de Foschi (1974) [36]	57
3.1	Tableau reprenant les valeurs de K_{ser} définies par l'Eurocode 5	61
3.2	Représentation des deux configurations d'assemblage possibles	62
3.3	Comportement des connecteurs de type BOVA dans du : hêtre (gauche) et de l'érable (droite)	63

3.4	Modification d'un connecteur de type BOVA pour créer un uni-face	64
3.5	Rupture des soudures par points	65
3.6	Illustration de l'essai de traction	66
3.7	Prescription de la norme EN 1075	67
3.8	Capteur LVDT pour mesurer le déplacement sur chaque face de l'assemblage	69
3.9	Synthèse du protocole tiré de l'ISO 6891	70
3.10	Corrélation liant le module de glissement à la densité du bois	73
3.11	Comparatif des différents modèles rencontrés	74
3.12	Comparaison de l'expression analytique avec le modèle statistique	76
3.13	Application du modèle de Foschi aux 30 courbes expérimentales	77
3.14	Représentation du module de glissement ultime K_u [48]	78
3.15	Sollicitation du connecteur due au glissement entre les lames	79
3.16	Application de l'annexe D de la norme EN 1075	80
3.17	Représentation de l'essai en cisaillement	81
3.18	Photo du montage en cisaillement	82
3.19	Représentation des deux possibilités de mesure	83
3.20	Exemple de comportement irrégulier entre les deux faces de l'éprouvette . . .	84
3.21	Représentation du mouvement des pièces de bois lors de l'essai	85
3.22	Comparaison des relation obtenues par essais de traction et de cisaillement .	86
3.23	Représentation de l'essai sur une poutre en bois lamellé-agrafé	88
3.24	Caméras utilisées pour la DIC	89
3.25	Calibration des caméras	90
3.26	Réalisation du mouchetage pour la mesure des déplacements	90
3.27	Synthèse graphique des estimations faites grâce aux modèles	94
3.28	Définition du repère mobile	95
3.29	Utilisation de 6 points de mesure pour étudier le déplacement des lames . . .	96
3.30	Utilisation d'une hauteur continue pour étudier le déplacement des lames . .	96
3.31	Utilisation d'une longueur continue pour étudier le déplacement des lames .	97
3.32	Comparaison des estimations faites à l'aide des modèles pour des valeurs de modules de glissement estimées et mesurées.	98
3.33	Comparaison entre le comportement réel de la poutre et les estimations faites grâce aux modèles	99
3.34	Comparaison entre le bois massif et le bois lamellé-agrafé	100
B.1	Système de ressorts en parallèle [60]	115
B.2	Système de ressorts en série [60]	116

E.1	Utilisation d'un laser pour s'assurer d'un bon alignement de tous les composants de l'éprouvette en traction	121
E.2	Rupture dans la plaque	122
E.3	Rupture à la surface d'ancrage	122
E.4	Rupture mixte	122

Liste des tableaux

2.1	Valeurs caractéristiques des connecteurs <i>MITEK</i> et <i>WOLF</i>	34
2.2	Résultats tirés du modèle <i>PAMIR</i> pour plusieurs positions du connecteur . . .	43
3.1	Tableau de synthèse des propriétés des éprouvettes	68
3.2	Tableau de synthèse des résultats d'essais en traction	72
3.3	Calcul du module de glissement ultime K_u grâce aux éprouvettes en épicea .	79
3.4	Synthèse des essais de cisaillement sur l'épicéa	84
3.5	Efforts utilisés par la méthode Gamma pour obtenir les 3 déformations considérées des poutres en bois lamellé-agré	93
3.6	Efforts utilisés par le modèle <i>SCIA</i> pour obtenir les 3 déformations considérées des poutres en bois lamellé-agré	93
3.7	Efforts utilisés par le modèle <i>PAMIR</i> pour obtenir les 3 déformations considérées des poutres en bois lamellé-agré	94
3.8	Résultats de la modélisation utilisant les modules de glissement mesurés avec la <i>DIC</i>	98
3.9	Comparatif des différentes méthodes utilisées pour prédire le comportement des poutres en bois lamellé-agré	100

Liste des symboles

Symboles majuscules latins

A	$[mm^2]$	Aire d'une section transversale
A_{ef}	$[mm^2]$	Aire efficace de la surface totale de contact entre une plaque métallique emboutie et le bois
C_v	$[-]$	Coefficient de variabilité
E_{mean}	$[MPa]$	Module de Young moyen
EI_{ef}	$[N \cdot mm^2]$	Rigidité flexionnelle efficace d'une poutre assemblée mécaniquement
$F_{A,Ed}$	$[N]$	Valeur de calcul d'une force agissant sur une plaque métallique emboutie au centre de gravité de l'aire efficace. C'est-à-dire la moitié de l'effort sollicitant l'assemblage
F_{est}	$[N]$	Charge maximale présumée avant l'essai
K_{ser}	$[N/mm]$	Module de glissement
K_u	$[N/mm]$	Valeur instantanée du module de glissement pour les états limites ultimes
$M_{anhydre}$	$[kg]$	Masse du bois sec
M_{humide}	$[kg]$	Masse du bois humide
S_y	$[mm^3]$	Moment statique par rapport à l'axe y

Symboles minuscules latins

a	$[mm]$	Distance entre le centre de gravité de la section globale et le centre de gravité d'une lame composant la poutre
$f_{c,0,k}$	$[N/mm^2]$	Valeur caractéristique de la résistance à la compression dans le sens du fil
$f_{c,90,k}$	$[N/mm^2]$	Valeur caractéristique de la résistance à la compression perpendiculairement au sens du fil
$f_{m,k}$	$[N/mm^2]$	Valeur caractéristique de la résistance à la flexion
$f_{t,0,k}$	$[N/mm^2]$	Valeur caractéristique de la résistance à la traction dans le sens du fil
$f_{t,90,k}$	$[N/mm^2]$	Valeur caractéristique de la résistance à la traction perpendiculairement au sens du fil
$f_{a,0,0,k}$	$[MPa]$	Valeur caractéristique de la capacité d'ancrage pour $\alpha = 0^\circ$ et $\beta = 0^\circ$
$f_{a,90,90,k}$	$[MPa]$	Valeur caractéristique de la capacité d'ancrage pour $\alpha = 90^\circ$ et $\beta = 90^\circ$
$f_{a,\alpha,\beta,k}$	$[MPa]$	Valeur caractéristique de la capacité d'ancrage
k_{crit}	$[-]$	Facteur utilisé pour le déversement latéral
k_{def}	$[-]$	Facteur de déformation
k_{mod}	$[-]$	Facteur de modification
k_{ser}	$[N/mm^3]$	Module de glissement par unité d'aire efficace
$k_{ser,ref}$	$[N/mm^3]$	Module de glissement de référence par unité d'aire efficace
s	$[mm]$	Entraxe entre deux connecteurs
t	$[mm]$	Épaisseur de la plaque métallique emboutie
w	$[\%]$	Hygroscopie du bois
x	$[-]$	Direction principale de la plaque métallique emboutie
y	$[-]$	Direction transversale de la plaque métallique emboutie

Symboles grecs minuscules

α	[°]	Angle aigu entre la direction x du connecteur et la direction de l'effort
β	[°]	Angle aigu entre la direction du fil du bois et la direction de l'effort
γ	[°]	Angle aigu entre la direction x du connecteur et la ligne d'assemblage
δ	[mm]	Déformation de la poutre
η	[—]	Rendement
$\lambda_{rel,m}$	[—]	Rapport relatif d'élancement
ρ_m	[kg/m ³]	Densité moyenne d'une éprouvette ($\rho_{eprouvette}$)
$\rho_{m,ref}$	[kg/m ³]	Densité moyenne de référence
σ_m	[MPa]	Contrainte de flexion due à l'organe d'assemblage dans la poutre mécaniquement assemblée
$\sigma_{m,crit}$	[MPa]	Contrainte de flexion critique
σ_n	[MPa]	Contrainte normale due à l'organe d'assemblage dans la poutre mécaniquement assemblée

" Innovation is seeing what everybody has seen ...

and thinking what nobody has thought. "

Dr. Albert Szent-Györgyi, *Nobel price, 1937*

Introduction

Longtemps oublié par les acteurs de la construction, le matériau bois est revenu au goût du jour. Avec son aspect naturel, ses couleurs chaleureuses, il n'a pas fini de séduire et de surprendre le grand public, de plus en plus friand de ces ouvrages en bois. De plus, avec l'évolution des mentalités actuelles tendant à atteindre un monde de plus en plus éco-responsable, le bois a de solides arguments en sa faveur. C'est notamment cet aspect durable qui lui permet de se situer dans les starting blocks, au même niveau que l'acier et le béton. Ces derniers, grands piliers des structures contemporaines, pourraient se voir chuter de leur piédestal le jour où l'aspect environnemental aura le dessus sur l'aspect économique. Utopiste ? La possibilité d'instaurer une taxe carbone sort déjà de quelques bouches et serait le premier pas vers cette idée...

Mais nous n'en sommes pas encore là. Avant toute chose, le bois doit pouvoir répondre aux exigences du monde de la construction. Un des plus gros challenge auquel il a du faire face est le franchissement de longues portées, limitées à la taille des troncs d'arbres disponibles dans nos forêts. En effet, le bois est un matériau d'origine 100% naturelle et cet aspect, qui en fait sa force, a été longtemps une de ses plus grandes faiblesses. C'est notamment grâce à l'invention du bois lamellé-collé qu'il a su passer outre de cette limite et offrir de plus larges possibilités. Ce type de poutres en bois est le résultat d'une superposition de lames aboutées, collées ensemble afin de construire les poutres de forte section que l'on voit aujourd'hui dans les projets de grandes envergures. D'une efficacité inégalée par d'autres éléments en bois, il résulte toutefois d'un processus long et complexe qui se traduit par de longs délais de fabrication et un coût d'achat élevé. De plus, l'investissement lié à la ligne de production, ou encore à la régulation des conditions ambiantes pour le séchage de la colle, rend le matériau difficilement accessible à tous.

Interpellé, M.Monhonval s'interroge : pourquoi ne pas remplacer la colle entre les lames de bois par des organes d'assemblages mécaniques comme ceux couramment utilisés dans la préfabrication de portiques de toits ?

Dès mon plus jeune âge, je me suis mis à construire. J'ai toujours eu une facilité à imaginer un objet jusque dans les moindres détails pour ensuite laisser mes mains le construire. Je me souviens des nichoirs pour les oiseaux que je confectionnais, je me souviens de toutes mes cabanes et, encore aujourd'hui, je retourne en enfance devant une boîte de *Kapla*. Sans que j'y prenne attention, ces petits projets avaient tous un point commun : ils étaient réalisés en bois. L'idée de pouvoir faire de la construction un métier m'a toujours tenu à cœur. Et si, en parallèle, je peux contribuer au développement de nouvelles idées utilisant des matériaux durables, c'est un bon point en plus. La thématique de M.Monhonval m'est donc tout de suite apparue comme une évidence.

Des études voulant mettre en avant les assemblages mécaniques pour la fabrication de poutres de hautes sections ont déjà été réalisées. Celles-ci mettaient principalement en scène les assemblages tiges et arrivaient toutes à la même conclusion : les performances de ces poutres ne permettent pas de rivaliser avec le bois lamellé-collé. Cependant, aucune étude n'a encore été menée concernant l'assemblage des lames de bois à l'aide de plaques métalliques embouties. Celles-ci sont un moyen de connexion existant depuis des années. Faciles à mettre en oeuvre, elles pourraient être l'alternative moins contraignante et plus abordable du bois lamellé-collé.

Le problème, c'est l'inconnu. Rares sont les exemples de calculs de ces assemblages par plaques. Bien que la norme cite déjà quelques notions fondamentales du calcul de résistance, les utilisateurs de plaques métalliques embouties s'appuient le plus souvent sur les logiciels mis à leur disposition par les fournisseurs de ces organes d'assemblages. De plus, toute la partie concernant la rigidité de ces assemblages est inexistante. Cette rigidité est un point clé de ce sujet d'étude puisque la capacité des poutres assemblées par ce moyen de fixation dépend directement de la rigidité de l'assemblage de leurs lames.

Il est donc nécessaire, dans un premier temps, de mieux comprendre ce connecteur métallique. Une première étude théorique sera alors menée pour définir les termes, comprendre la philosophie de calcul et définir les directions à explorer. Dans un second temps, deux campagnes d'essais viseront à caractériser la rigidité des assemblages par plaques métalliques, représentée par le module de glissement. Pour finir, une dernière

campagne d'essais sera entreprise pour mesurer les capacités des poutres assemblées par ces connecteurs, appelées poutres en bois lamellé-agrafé. Des modèles théoriques, ainsi que des mesures optiques (*DIC*), permettront également de construire un spectre de résultats rigoureux à analyser pour en tirer des conclusions.

L'objectif de cette étude est donc double. Premièrement, il est nécessaire de caractériser la rigidité des assemblages par plaques métalliques embouties. Une loi analytique, liant le module de glissement à la densité du bois de l'assemblage, doit être déterminée grâce aux campagnes d'essais. Deuxièmement, le bois lamellé-agrafé doit être étudié comme une solution alternative au produit phare actuellement proposé sur le marché : le bois lamellé-collé.

Ce travail commence par retracer l'histoire du matériau bois. Des recherches sont faites pour mieux le comprendre, de l'arbre à la poutre. Une partie est évidemment consacrée au bois lamellé-collé pour bien comprendre les enjeux liés à sa fabrication. Ensuite, les recherches se tournent vers les moyens d'assemblages connus et utilisés actuellement. Ceux-ci, encore difficiles à caractériser, constituent souvent les points faibles des structures bois et il est important de bien en cerner la raison. Pour finir, la dernière partie des recherches est dédiée à la plaque métallique emboutie pour centraliser l'information disponible au sujet de ces connecteurs.

Ce mémoire se poursuit avec la partie théorique. Toutes les notions liées au moyen d'assemblage étudié seront définies pour ensuite passer à la description des modèles théoriques. Parmi eux, on peut déjà citer la méthode Gamma qui est la méthode reprise dans l'annexe B de l'*Eurocode 5*. Un modèle constitué à l'aide du logiciel *SCIA*, ainsi qu'un modèle réalisé par un logiciel de calcul appartenant à un fabricant de connecteurs mondialement connus, seront également considérés pour estimer le comportement des poutres mécaniquement assemblées.

Il conviendra enfin de confirmer les analyses théoriques en les mettant en pratique. Une première campagne d'essais vise, d'abord, à formuler une expression analytique du module de glissement des plaques métalliques embouties en fonction de la densité des bois constituant l'assemblage. Ensuite, une deuxième campagne permet de tester le connecteur dans une situation similaire à sa fonction dans une poutre en bois lamellé-agrafé. Enfin, une troisième et dernière campagne d'essais permet d'analyser le comportement des poutres en bois lamellé-agrafé au regard de toutes les expressions et modèles théoriques présentés.

État de l'art

1.1 | Le matériau bois

Le bois est aujourd'hui un matériau très à la mode. Cette notoriété provient de ses qualités qui ont su séduire à la fois le grand public mais aussi beaucoup de concepteurs architecturaux et techniques. Les raisons de ce succès sont multiples en commençant par son aspect esthétique, chaleureux, naturel, jusqu'à son caractère éco-responsable et durable.

Pourtant, bien qu'il soit utilisé depuis des millénaires, il est longtemps resté dans l'ombre d'autres matériaux comme le béton et l'acier. Dès lors, que savons nous de ce matériau aux multiples facettes

1.1.1 | Histoire

Quatre-cent-sept millions : c'est le nombre d'années d'existence du bois sur terre selon l'analyse de plantes fossilisées. De la maîtrise du feu à la confection des premiers édifices, le bois semble être notre allié le plus ancien. Depuis la période paléolithique, l'homme s'est sédentarisé et la construction en bois a connu un essor remarquable.

Les premières traces du matériau remontent à 35 000 ans avant J-C. À cette époque, la disponibilité, la légèreté et la souplesse du bois ont permis à l'homme de s'abriter sous des huttes circulaires recouvertes par des roseaux [8]. Bien plus tard, vers l'an zéro, apparaît la pagode. Cette construction typiquement chinoise, témoignant déjà d'une grande finesse de confection, a su traverser les âges jusqu'à nos jours. Cette partie du globe, particulièrement sensibles aux typhons et séismes, apprécie déjà le bois pour sa

souplesse et ses assemblages sans clou qui permettent d'absorber l'énergie apportée par de tels phénomènes naturels [59].

Beaucoup d'autres constructions appartenant à d'autres époques, d'autres contrées, pourraient vanter les atouts des structures en bois. Malheureusement, certains événements comme le grand incendie de Londres au *XVII^e* siècle, peuvent faire changer l'avis de l'opinion publique et remettre en cause les bienfaits de la construction en bois. Deux siècles plus tard, l'utilisation de l'acier pour la construction d'ouvrages révolutionnaires, comme la *Tour Eiffel*, a progressivement contribué à placer le matériau bois au second plan.

Il faudra alors attendre le *XX^{ème}* siècle pour que l'ingénieur allemand Otto Hetzer (1846-1911) révèle, à l'Exposition universelle de Bruxelles, sa découverte : une méthode permettant de fabriquer des poutres en bois lamellé-collé de 43 mètres de portée, arquées et dont la section transversale atteignait les 3 mètres de haut [41]. Ces dimensions hors du commun, sortant largement des possibilités offertes par les troncs d'arbres, marquent le retour du bois dans la compétition des matériaux de construction.

De nos jours, l'évolution des techniques, ainsi que l'intérêt pour la réduction de l'empreinte écologique dans la construction, donnent lieu à de véritables prouesses comme la construction de la plus haute tour en bois du monde qui se trouve à Brumunddal, en Norvège, et qui culmine à 85 mètres de hauteur.

1.1.2 | Le bois de nos jours

Après s'être réconcilié avec ce noble matériau, observons maintenant ce qui le rend si populaire. Ci-dessous sont repris les points forts mais aussi les faiblesses du matériau bois dans le domaine concerné : la construction.

1.1.2.1 | L'utilisation du bois dans la construction

Le béton et l'acier sont deux matériaux bien maîtrisés dans le domaine de la construction. Connus pour leur fiabilité et leur rentabilité financière, ils constituent aujourd'hui la majorité des constructions de grande ampleur.

L'optimisation du bois sous forme de *bois lamellé-collé* (BLC) ou encore de panneaux en bois *lamellé-croisé* (Cross Laminated Timber, CLT) lui offre de nouvelles possibilités. En effet, mieux contrôlés lors de leur fabrication, ils offrent une bien meilleure capacité mécanique et permettent d'atteindre de plus grandes sections pour franchir de plus

grandes portées. Les formes de poutres possibles en BLC sont également d'un véritable attrait. Le bois a bien de quoi concurrencer ses deux rivaux.

Concernant le prix, le matériau bois reste généralement plus cher à l'achat que l'acier et le béton [19] [7]. Cependant, sa légèreté permet une manipulation plus facile, moins risquée et surtout plus rapide que celle de ses homologues. Ce qui peut influencer de manière considérable le temps d'exécution d'un chantier. De plus, naturellement attrayant, il peut être dépourvu de finition pour laisser apparent son aspect naturel. Le prix élevé de la construction en bois est donc une situation à considérer au cas par cas, plutôt qu'une généralité [33].

Le bois est également apprécié pour ses capacités thermiques et sa bonne tenue au feu. Il faut toutefois prendre les aspects vibratoire et acoustique au sérieux pour le confort des usagers.

1.1.2.2 | Le bois en faveur de l'environnement

L'environnement est aujourd'hui au centre des discussions. L'activité de l'homme provoque des émissions de CO_2 qui contribuent à l'effet de serre. Le secteur de la construction occupe à lui seul une belle part des responsabilités. En effet, le rapport exposé par le *WorldGBC* à la *COP24* présente ce secteur comme responsable de 36% des émissions, 40% de la consommation d'énergie, 50% de l'extraction des matériaux rares et de 30% de l'utilisation d'eau potable [47].

Ces chiffres sont le résultat d'un bilan carbone couvrant le cycle de vie des constructions. Celui-ci considère le chemin complet en partant de l'extraction de la matière puis la construction, l'utilisation, jusqu'à la gestion des déchets lors de la destruction. Alors que ce bilan ne met pas en valeur le système de construction actuel, le matériau bois semble tout à fait en accord avec le principe. Son cycle de vie est représenté à la figure 1.1.

Le premier point fort du bois est qu'il est le résultat d'un processus naturel. Le carbone, qui compose 50% de la masse sèche de l'arbre, est produit par la photosynthèse du dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans l'atmosphère. C'est également au cours de ce processus que l'arbre rejette l'oxygène (O_2) qui nous est si précieux. Ce carbone va rester piégé durant toute la durée de vie du bois et sera restitué dans l'atmosphère. Il est donc rendu à l'environnement et non ajouté. C'est l'une des grandes forces du matériau, ce

qui lui vaut un bilan carbone considéré comme positif. Par contraste, le béton et l'acier sont constitués respectivement de gravier et de minerais de métal qui sont des matières fossiles non renouvelables.

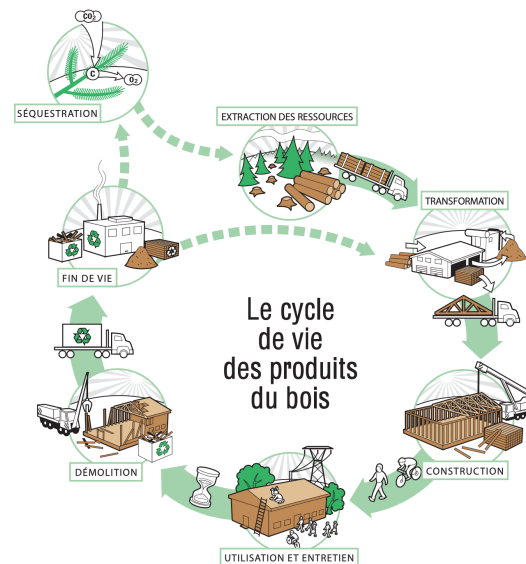


FIGURE 1.1 – Cycle de vie du matériau bois [21]

Ensuite, la transformation de la matière première en éléments d'ingénierie pouvant être utilisés pour construire nécessite aussi de l'énergie. Alors que la production de ses deux concurrents demande une grande quantité d'énergie, le bois est assez économe et peut, qui plus est, provenir d'une production locale.

Ce matériau naturel est aussi un matériau dit "sec". Sa consommation d'eau lors de cette phase de transformation est bien moins élevée que la consommation du béton et de l'acier galvanisé [27].

Enfin, pour préserver la qualité des forêts ainsi que la biodiversité, il est nécessaire d'établir des règles de bonne conduite concernant l'exploitation forestière. C'est le rôle des labels, comme le Pan European Forest Certification (PEFC), qui assurent à l'acheteur d'acquiescer du bois provenant d'une forêt gérée durablement.

Le bois reprend sa place dans la construction. Il a un grand rôle à jouer en faveur de la diminution de la consommation d'énergie, l'utilisation des ressources ainsi que la pollution de l'eau et air.

1.1.3 | Propriétés mécaniques

Comme cité plus haut, la matière constituant le bois n'est pas le résultat d'un processus industriel. En fait, le bois a une structure naturellement non homogène, comportant des défauts et est relativement sensible à l'humidité.

1.1.3.1 | L'anisotropie du bois

Pour résister aux sollicitations subies au cours de sa vie, l'arbre s'est formé de cellules orientées principalement dans son sens longitudinal [21]. Les propriétés du bois diffèrent donc selon l'axe d'observation. C'est l'anisotropie.

La figure 1.2 permet de se plonger dans la structure interne du bois et d'observer ses fibres. On remarque, dans la direction radiale, des différences de densité dans la structure tubulaire, influencées par les conditions de croissance. En effet, au cours d'une année, l'arbre va croître dans sa direction radiale et former des cellules. Elles seront plus aérées au printemps pour assurer la distribution de la sève et plus serrées en été pour former le support mécanique. Chacune de ces répétitions est appelée "cernes" et permet de connaître l'âge de l'arbre.

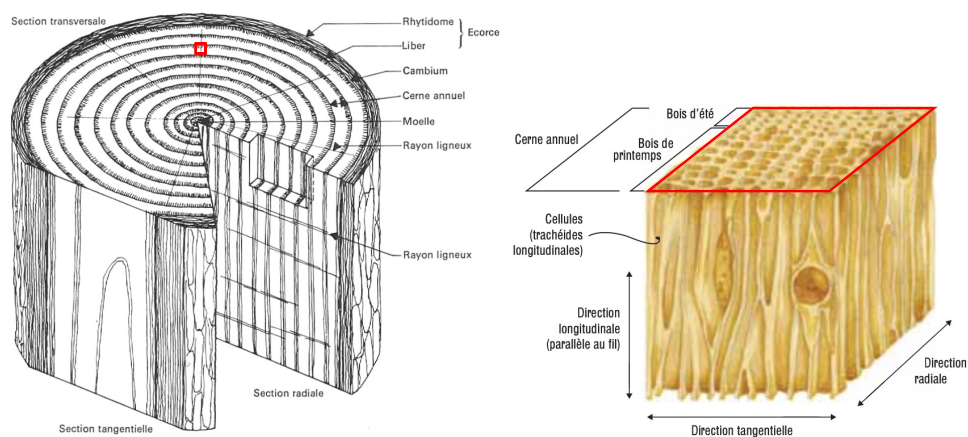


FIGURE 1.2 – Plan ligneux d'un résineux [37] [21]

En terme de résistance, la norme EN 338 [16] annonce pour la majorité des bois de structures [39] :

$$f_{m,k} > f_{c,0,k} > f_{t,0,k} > f_{c,90,k} > f_{t,90,k}$$

Ces notations représentent les contraintes maximales pour chaque sollicitation. Celles-ci sont représentées à la figure 1.3.

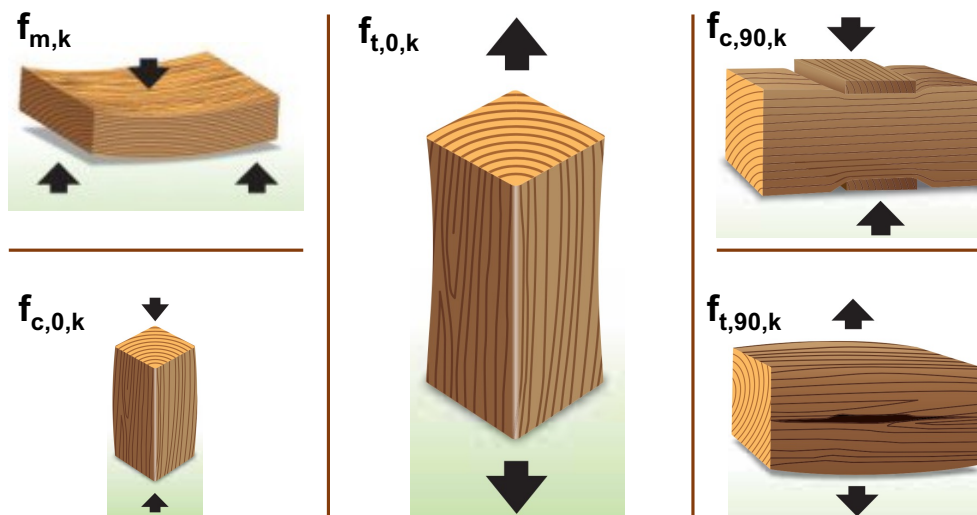


FIGURE 1.3 – Différentes sollicitations sur le bois [21]

Ce classement s'explique d'abord par le fait que la résistance du bois est plus grande lorsqu'il est sollicité dans le sens de ses fibres. Ensuite, bien que la résistance des fibres en traction est supérieure à celle en compression, les noeuds présents dans le bois empêchent la reprise des contraintes de traction, ce qui rend la résistance à la traction inférieure à la résistance en compression. Il faut également noter que la distribution triangulaire des contraintes en flexion permet de considérer cette résistance ($f_{m,k}$) comme plus grande par rapport au même élément tendu sur toute sa section ($f_{t,0,k}$). En effet, la contrainte de traction dans un élément fléchi n'est maximale que localement et donc une redistribution des contraintes est possible au cas où un noeud se retrouverait en traction. Cette propriété est illustrée à la figure 1.4.



FIGURE 1.4 – Redistribution des contraintes de flexion

1.1.3.2 | L'hygroscopie du bois

La structure interne du bois est une véritable éponge. Ainsi, un peuplier sur pied peut contenir jusqu'à 200% d'eau alors que le bois de structure doit se trouver sous les 20% d'humidité [34].

Ces pourcentages représentent l'hygroscopie du bois, soit son aptitude à absorber l'humidité. Elle est calculée en rapportant la masse d'eau contenue dans le bois avec sa masse sèche (anhydre) :

$$w = \frac{M_{humide} - M_{anhydre}}{M_{anhydre}} [\%]$$

Une fois mis en oeuvre, le bois garde cette aptitude à capter l'eau et s'équilibre avec l'humidité de l'air ambiant. Cette humidité d'équilibre présente dans le bois dépend de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant comme le montre la figure 1.5

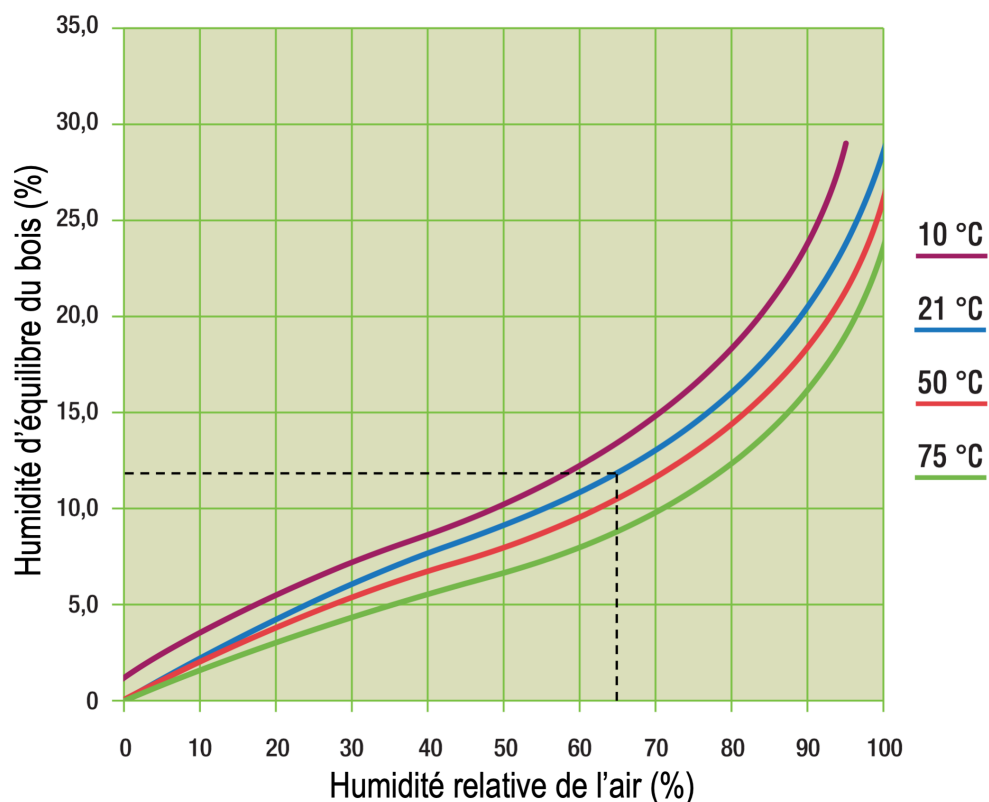


FIGURE 1.5 – Hygroscopie du bois [21]

L'ensemble des normes relatives aux essais recommande de laisser le bois s'équilibrer dans un environnement à 20°C et une humidité relative de l'air de 65%. La figure 1.5 permet de connaître l'humidité contenue dans le bois qui, dans ces conditions, se situe aux alentours des 12%.

Enfin, les dimensions physiques du bois varient avec cette teneur en eau. On parle alors de retrait ou de gonflement. Ces variations arrivent généralement dans les directions radiale et tangentielle, laissant insensible la direction longitudinale. Suivant le type de débit, la section subira différentes déformations comme l'illustre la figure 1.6

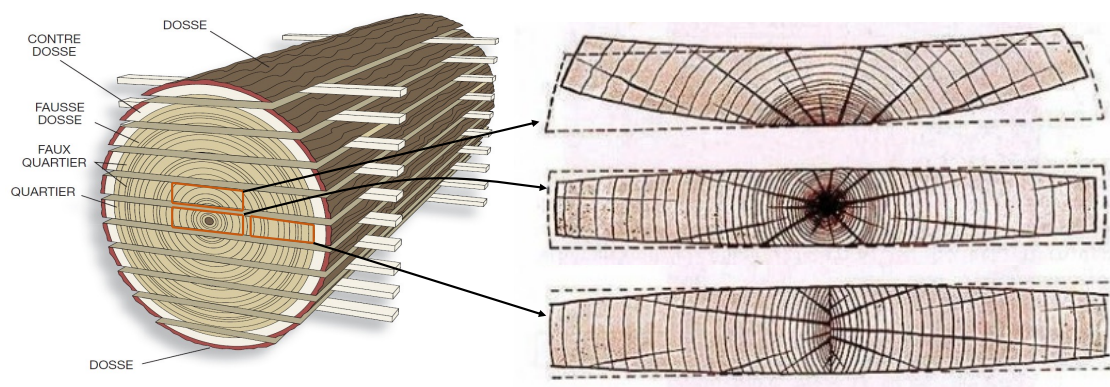


FIGURE 1.6 – Variations dimensionnelles en fonction du type de débit

Pour bien comprendre l'enjeu de ces variations dimensionnelles, prenons l'exemple d'un bardage en faux-quartiers. Le charpentier responsable de la pose dira : "Il faut mettre son coeur au soleil". Ce petit dicton rappelle de positionner le côté concave de la planche déformée contre la façade. Cela réduira les déformations et permettra de conserver un beau bardage.

1.2 | Optimisation du matériau bois

Les moyens technologiques actuels permettent de façonner les éléments de structure bois pour les rendre plus longs, plus forts mais surtout plus fiables. C'est notamment le cas des poutres en BLC ou des panneaux en CLT qui permettent de composer des éléments de grandes dimensions à base de petites sections de bois.

Une des finalités de ce travail de fin d'étude étant la fabrication de poutres en bois lamellé-agrafé, il est judicieux de s'informer sur ce qui permet aujourd'hui de créer

des éléments élancés. Corto Lahaye [38] ayant déjà couvert une grande partie des recherches, je me limiterai dans ce travail aux points clés qui caractérisent le BLC.

1.2.1 | Le bois lamellé-collé (BLC)

Le bois lamellé-collé est comme son nom l'indique, un collage de lames en bois dont les fibres sont alignées dans le sens longitudinal de la poutre. Les grandes étapes du processus de fabrication [30] sont résumées ci-dessous :

- Séchage : Les lames de bois sont entreposées dans des cellules de séchage artificiel pour descendre leur taux d'humidité au niveau requis pour la fabrication. Conformément à la norme *EN 386*, ce niveau varie de 8 à 15% pour du bois non traité et entre 11 et 18% pour du bois traité [29].
- Aboutage : Cette étape est précédée d'une purge où l'on sélectionne les lames comportant le moins de défauts. Elles sont ensuite mises bout à bout (aboutage) à l'aide d'un joint à entures multiples visible à la figure 1.7. La prise de l'assemblage nécessite une pression minimale qui avoisine les 20 bars.
- Rabotage : Cette étape s'effectue au maximum 24 heures avant l'encollage et permet d'obtenir une planéité constante.
- Encollage : Les lames sont assemblées à fils parallèles à l'aide d'une encolleuse garantissant une application uniforme de la colle.
- Serrage & Séchage : Les pièces encollées doivent être maintenues à la pression voulue et dans la forme désirée pendant le temps du séchage.
- Rabotage : Le surplus de colle et autres petits décalages entre les lames sont effacés pour ramener la poutre à ses dimensions finales.
- Finitions : Application d'un produit de traitement et/ou de finition pour avoir une poutre prête à être livrée.

Ce processus rigoureux permet de construire un matériau bien plus fiable que le bois massif et qui, à prix comparable, est le matériau le plus résistant de la construction en bois.

Toutefois, la fabrication de ce produit haut de gamme n'est pas à la portée de tout le monde. Les frais d'exploitation, l'énergie consommée et le contrôle des conditions d'exécution représentent une charge qui n'est pas négligeable [38].



FIGURE 1.7 – Aboutage par entures multiples

Afin de suppléer à ces contraintes financières et de fabrication, cette étude proposera une alternative consistant en la fabrication de poutres à l'aide de plaques métalliques embouties.

1.3 | Assemblages mécaniques

Selon Bohan Xu, l'assemblage est la partie d'une structure qui assure la jonction des différents éléments la composant et, par conséquent, le transfert des efforts entre ces éléments [63]. Dans le domaine de la construction en bois, le mode de fonctionnement de ces assemblages peut varier, souvent en fonction du type d'effort auquel il doit résister. Ainsi, les efforts transitent traditionnellement par contacts et frottements directs, par tiges et connecteurs métalliques ou encore par emboîtements adhésifs. Suivant le cas, un ou plusieurs degrés de liberté sont bloqués ce qui génère des efforts internes à l'assemblage qui sont ensuite transmis aux éléments adjacents.

Bien que peu conseillés¹, il est possible de trouver des assemblages résultant d'une combinaison de ces différents modes de transmission.

Si les assemblages sont tant étudiés au jour d'aujourd'hui, c'est à cause du rôle important qu'ils jouent au sein des structures en bois. Thierry Descamps, professeur à l'Université de Mons, affirme dans son document d'introduction à l'*Eurocode 5* [25] que les désordres observés dans les structures en bois proviennent, dans la majorité des cas, de défaillances au niveau des assemblages. Cette défaillance au sens large peut être le résultat d'une mauvaise conception, d'un sous-dimensionnement ou encore d'un défaut d'exécution. Seul un assemblage correctement réalisé permet un travail sain des éléments adjacents et donc une utilisation rentable de la matière.

1. Par exemple, pour un assemblage collé et vissé, la colle va reprendre la quasi totalité des sollicitations car sa rigidité appelle les efforts. À la rupture de la colle, tous les efforts seront transférés d'un coup aux vis.

Encore aujourd'hui, le comportement de certains assemblages composant les structures en bois reste difficile à prédire. Cela est majoritairement dû au fait qu'avant même de commencer les calculs, il existe des incertitudes sur la façon de modéliser un assemblage. Le modèle peut se comporter de trois façons :

- Continue : Cette modélisation assure le transfert intégral des degrés de liberté entre les éléments assemblés. C'est ce qui est appelé, en pratique, un encastrement.
- Simple : Cette modélisation permet une rotation relative entre les éléments assemblés et annule tout moment pouvant être transmis par l'assemblage. C'est ce qui est appelé, en pratique, une rotule.
- Semi-rigide : Cette modélisation hybride se trouve entre les deux précédentes. Elle est souvent réalisée à l'aide de ressorts dont la rigidité détermine si le modèle se rapproche plus d'un comportement continu ou simple. En pratique, tous les efforts sont donc transférés mais ils induisent un déplacement relatif au sein de l'assemblage. Ceci fait appel à une notion expliquée plus loin dans ce mémoire : le **module de glissement**. Ce dernier est propre à l'organe d'assemblage et possède les mêmes unités que la rigidité d'un ressort : $[N/mm]$.

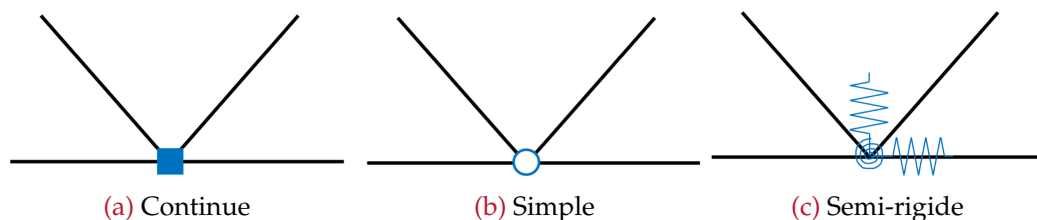


FIGURE 1.8 – Différents types de modélisation d'un assemblage

Hormis les assemblages collés qui offrent une grande rigidité, la majorité des assemblages présente un comportement semi-rigide. La figure 1.9 montre comment, en pratique, la conception des assemblages est pensée pour imposer respectivement un comportement rotulé, semi-rigide ou encastéré.

La suite de cette section est destinée à présenter les assemblages mécaniques que l'on retrouve couramment dans la construction en bois, à l'exception des connecteurs surfaciques, qui bénéficieront d'une étude plus approfondie et feront l'objet d'une section complète.

1.3.1 | Assemblages linéiques

Ces organes concernent les assemblages de type "tige" à savoir : les agrafes, les pointes, les vis, les boulons et les broches. Leur fonctionnement peut être résumé par la figure 1.10 où l'organe linéique traverse les éléments pour permettre à l'effort d'être transféré d'un bois à l'autre.



FIGURE 1.9 – Exemple de conception d'assemblages du plus rotulé (gauche) au plus encastré (droite) [40][57]

Basé sur la théorie de Johansen, l'*Eurocode 5* [13] décrit de manière assez complète le comportement de ces assemblages pour lesquels la résistance est régie à la fois par la portance locale du bois et le comportement en flexion de l'organe métallique.

Dans le but de représenter ce qui peut-être observé dans les structures en bois, une liste des organes linéiques ainsi qu'une brève description de ceux-ci se trouve ci-dessous :

Les assemblages par pointes

Cette méthode est sûrement la plus traditionnelle pour réaliser la jonction de deux éléments en bois. Apprécié pour sa bonne ductilité, l'assemblage peut être constitué de pointes ou de clous disponibles dans de nombreuses dimensions, formes et matériaux.

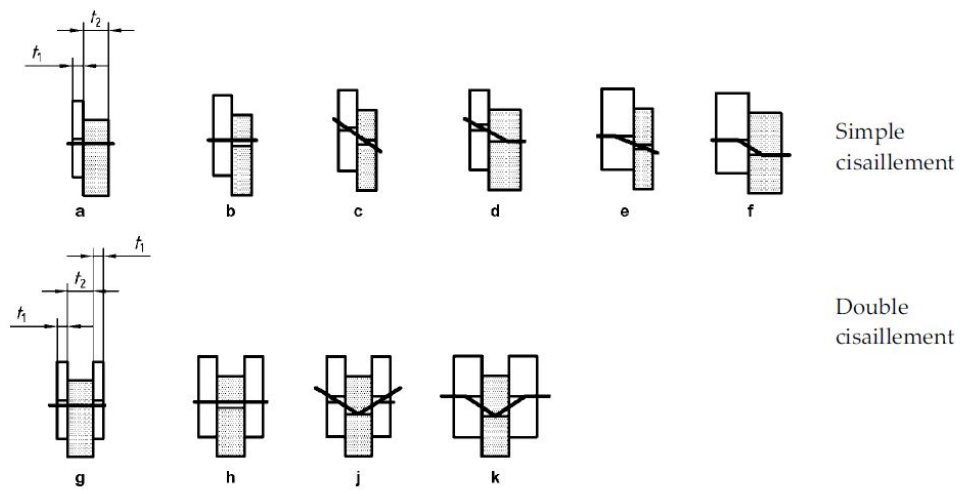


FIGURE 1.10 – Schémas des différents modes de rupture considérés par la théorie de Johansen

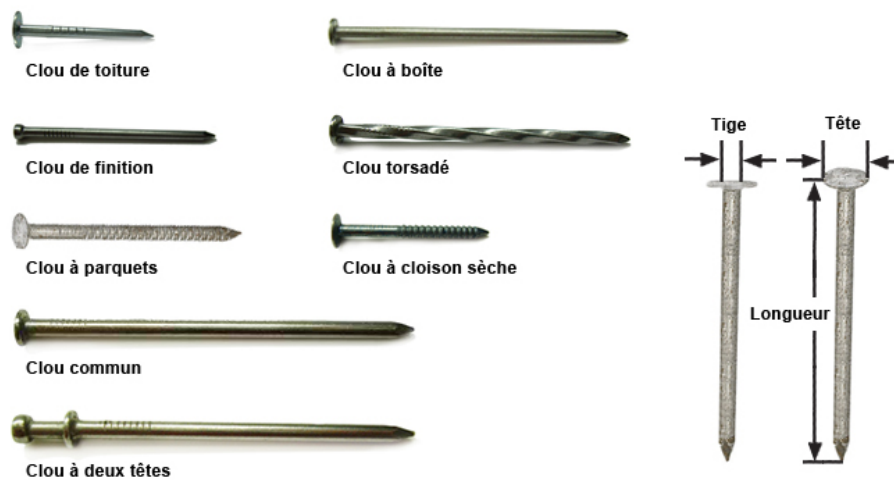


FIGURE 1.11 – Représentations et appellations des différentes formes de clous [53]

Le fonctionnement de ces organes intègre deux modes de sollicitation qui sont le cisaillement et l'arrachement. La forme donnée à l'organe permet d'améliorer la résistance à certaines sollicitations. Ainsi, le corps du clou peut être torsadé pour une meilleure résistance à l'arrachement.

Les assemblages par boulons et broches

Au premier regard, la différence entre le fonctionnement d'un assemblage réalisé par boulon ou par broche n'est pas évidente. En fait, elle se situe principalement au niveau de la mise en oeuvre. Alors que le boulon nécessite un pré forage avec jeu, la broche doit être mise en oeuvre avec un pré forage sans jeu. Le boulon doit donc être maintenu à l'aide d'un écrou alors que la broche tient en serrage dans le bois. On voit donc là l'importance de contrôler le taux de l'humidité présente dans le bois car le retrait au sein du dispositif entraînerait du jeu dans l'assemblage.

Il est également judicieux de noter que, étant donné le jeu prévu lors de la mise en oeuvre, les assemblages boulonnés amènent davantage de glissements entre les pièces et, par conséquent, un moins bon contact entre le bois et les boulons.

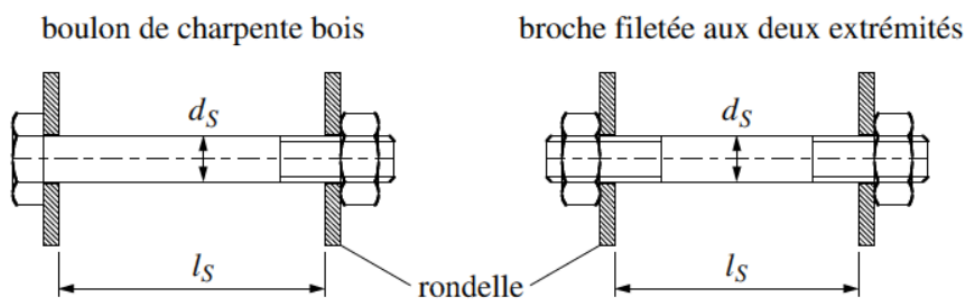


FIGURE 1.12 – Représentation d'un boulon et d'une broche [6]

Les assemblages par vis

La vis à bois, aussi appelée tire-fond lorsqu'elle dispose d'une tête carrée ou hexagonale, est bien connue de tous les bricoleurs. Sa mise en oeuvre est assez simple, même lorsqu'un seul côté de l'assemblage est accessible. Elle a également l'avantage de pouvoir fonctionner pour des efforts de cisaillement combinés à de la traction parallèle à la tige.

Dans le domaine de la construction en bois, elle joue souvent un rôle de renfort ou de maintien pour les assemblages. *Rothoblaas*, leader dans la fourniture de systèmes de fixation, montre l'utilisation de ces vis dans son catalogue dont un extrait est repris à la figure 1.14.

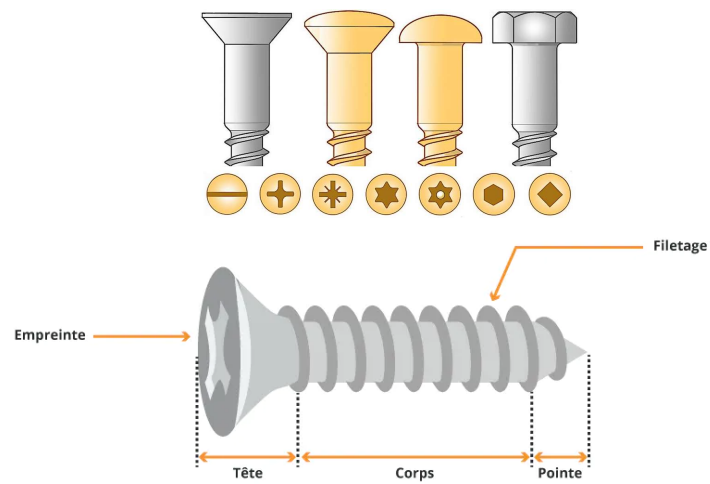


FIGURE 1.13 – Schéma et description des vis et tire-fonds [28] [10]

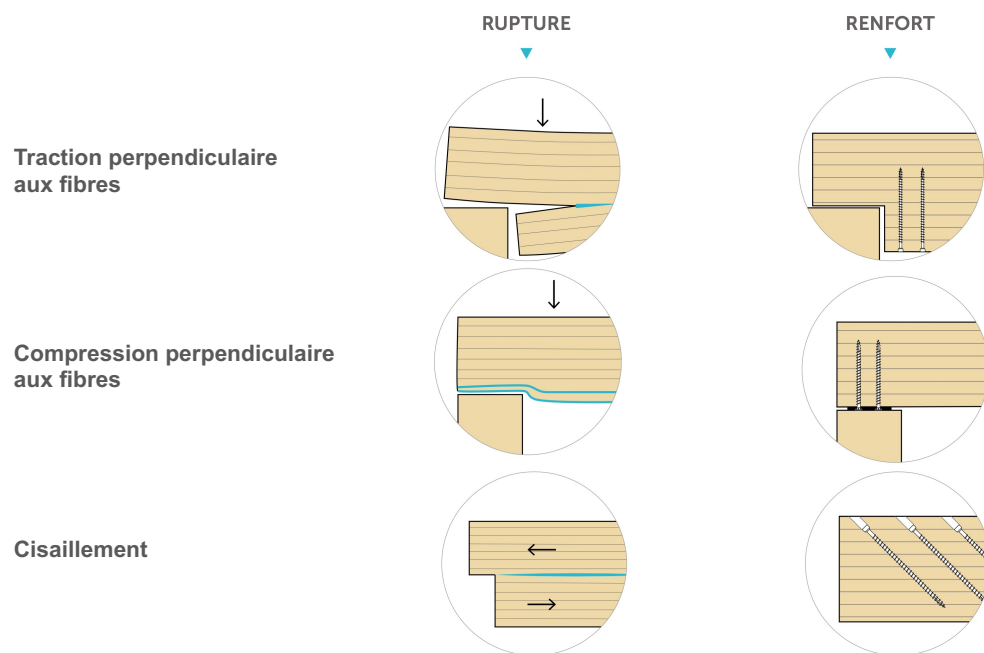


FIGURE 1.14 – Schéma de renforts par vis proposés par Rothoblaas [55]

Les assemblages par agrafes

Bien qu'une section y est dédiée dans l'*Eurocode 5*, cette méthode d'assemblage est très peu rencontrée en structure. Elle est plutôt utilisée pour la pose de panneaux de cloison, de moulures, de lames de parquet, et autres petits travaux de ce genre. Elles peuvent également servir à renforcer un assemblage traditionnel en bois.

L'assembleur est une pièce en métal en forme de U formé de tiges de sections circulaires, rectangulaires ou ovales, aux extrémités pointues. Au minimum deux de ces agrafes sont nécessaires pour pouvoir considérer un assemblage. Elles sont généralement enfoncées perpendiculairement au fil du bois et à une profondeur telle que les surfaces des têtes d'agrafes affleurent la surface du bois.

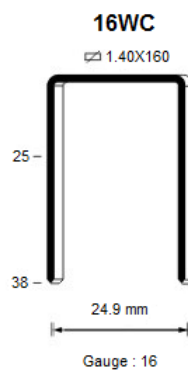


FIGURE 1.15 – Représentation d'un type d'agrafe [2]

Les assemblages jouent un rôle essentiel dans les structures en bois. Prenant des formes différentes, chacun d'eux nécessite beaucoup de soin et de réflexion.

"L'assemblage reste la signature de la connaissance technique du concepteur" [44]

1.4 | Assemblages surfaciques

Les techniques d'assemblages décrites à présent se caractérisent par une diffusion des contraintes en profondeur des pièces assemblées. En effet, de part la grande rigidité qu'ils offrent, ces assemblages permettent une diffusion du bulbe de pression de contact dans la section transversale de manière à solliciter plus de matière résistante. Les plus connues sont les anneaux, les crampons et les plaques métalliques embouties [63].

1.4.1 | Anneaux et Crampons

Ces deux technologies fonctionnent de façon analogue et permettent de transmettre des efforts de cisaillement. Pour limiter les effets dus aux moments transversaux dans les pièces assemblées, des organes de maintien sont nécessaires comme représentés à la figure 1.16. Il s'agit généralement de boulons ou de tire-fonds accompagnés d'une rondelle pour soigner le contact avec le bois. Ces organes linéiques sont peu sollicités à cause de la grande rigidité apportée par les organes volumiques n'autorisant qu'un très faible déplacement. Cette particularité est à l'origine du comportement fragile de ces assemblages.

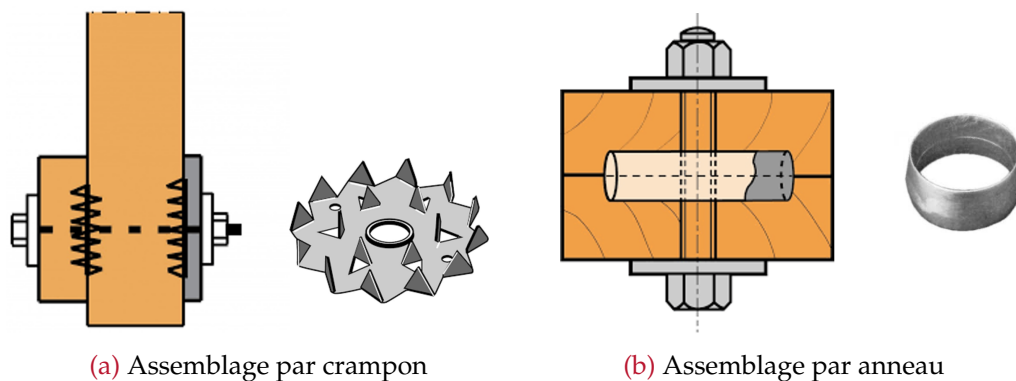


FIGURE 1.16 – Assemblages surfaciques

1.4.2 | Plaques métalliques embouties

Après avoir passé en revue la majorité des assemblages classiques que l'on retrouve dans le domaine de la construction en bois, il est temps de se concentrer sur le moyen d'assemblage concerné par ce mémoire.

Apparue pour la première fois en Floride (1952), la plaque métallique emboutie a participé au lancement de la mode des structures treillis en bois qui a traversé le monde après la seconde guerre mondiale. L'étude de ces treillis a révélé les assemblages par plaques métalliques embouties comme la solution la plus économique face aux boulons, clous, anneaux et plaques boulonnées [32]. Encore utilisées aujourd'hui, notamment pour la préfabrication de portiques de toit², ces plaques continuent de séduire de par leur efficacité, leur facilité et leur rapidité à assurer la liaison d'éléments appartenant à un même plan. Pour terminer, ce succès est, bien sûr, favorisé par le faible coût engendré par cette méthode d'assemblage [46].

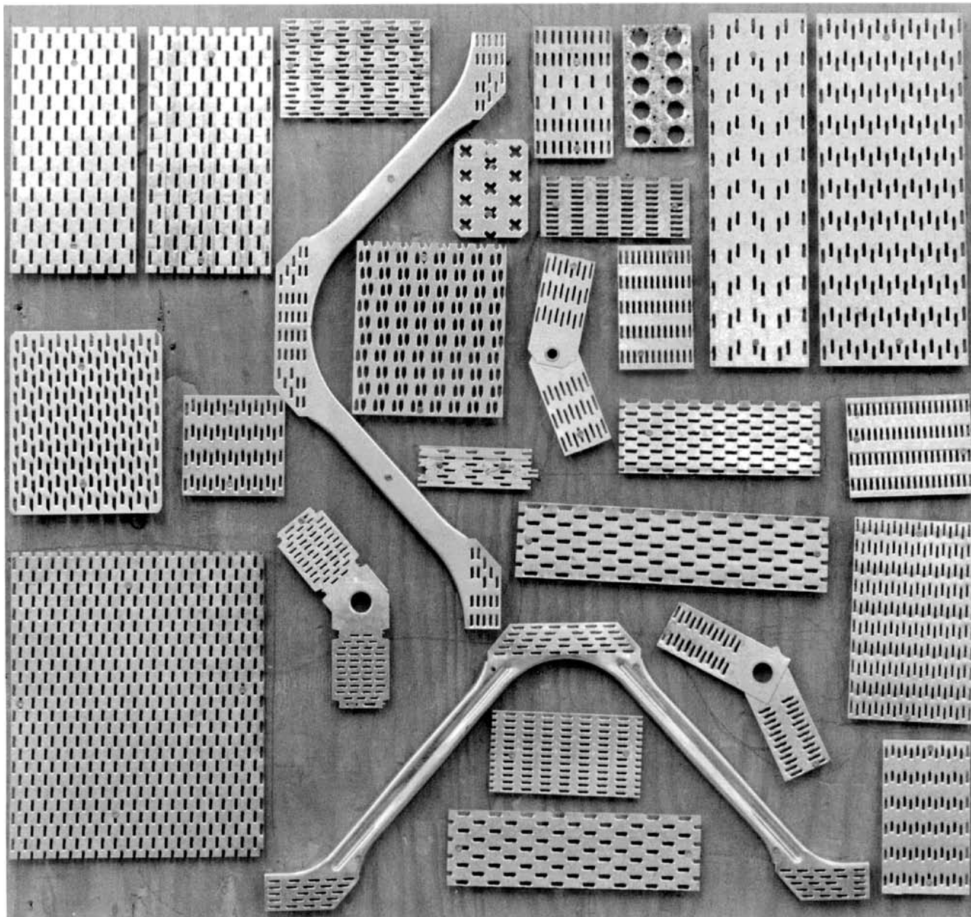


FIGURE 1.17 – Plaques métalliques couramment utilisées dans les charpentes en bois [32]

2. longtemps appelés *fermes américaines*, on les appelle aujourd'hui des *fermettes*

1.4.2.1 | Fabrication

Un connecteur est fabriqué par emboutissage à froid d'une plaque métallique. Ce procédé de fabrication, illustré à la figure 1.18, consiste à poinçonner la plaque en acier pour faire ressortir des dents. Celles-ci peuvent avoir différentes formes, différentes tailles et sont le résultat d'un cisaillement sur un contour presque fermé conduisant l'acier à se déformer plastiquement jusqu'à la rupture en traction des fibres d'acier. Ce procédé de fabrication est caractérisé par des déformations locales autour de la région cisailée ainsi que par de légères bavures sur la partie inférieure de la tôle manufacturée [52].

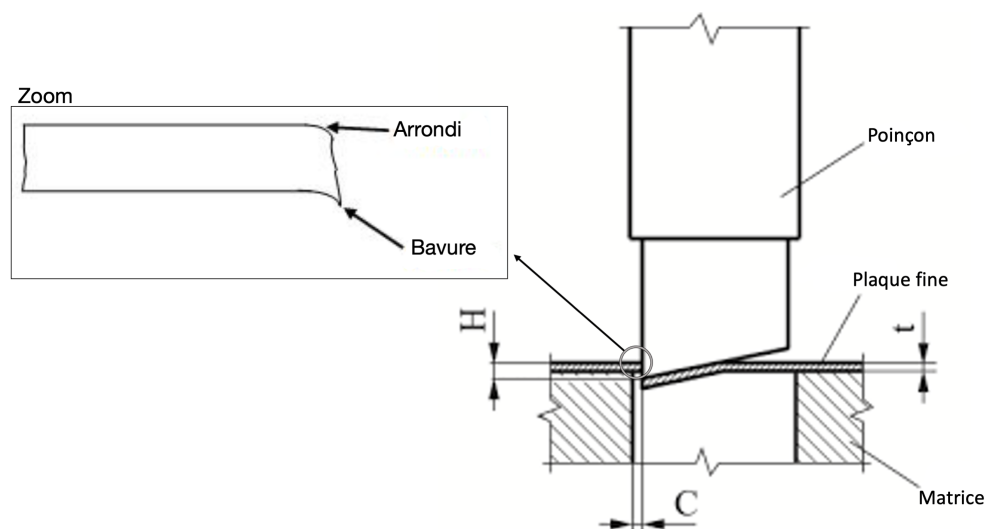


FIGURE 1.18 – Représentation du procédé de fabrication par emboutissage [51] [43]

Le traitement qui imprègne certains bois ainsi que les rudes conditions auxquelles les connecteurs peuvent être exposés, obligent les fabricants à utiliser de l'acier inoxydable ou de l'acier galvanisé. Le premier est un alliage dérivé de l'acier auquel est ajouté un certain pourcentage de chrome alors que le deuxième est un post-traitement réalisé à chaud et qui consiste à recouvrir le métal d'une couche de zinc. Ces deux substances additionnelles agissent différemment : le zinc joue le rôle d'anode sacrificielle³ qui va s'oxyder plus facilement que l'acier qu'il protège tandis que le chrome contenu dans l'acier inoxydable va plutôt créer une couche protectrice de passivité⁴ après avoir réagi avec l'oxygène présent dans l'air.

3. Une anode sacrificielle a un potentiel standard plus bas que le métal à protéger ce qui permet de dévier l'oxydation du métal à protéger vers cette anode.

4. Une couche de passivité correspond à une fine couche d'oxyde résultant d'une réaction entre le chrome, l'acier et l'oxygène contenu dans l'air. Une couche d'oxyde dense et inerte fait alors barrage à la progression de l'oxydation.

1.4.2.2 | Utilisation

Abondamment utilisés pour la fabrication de fermettes en bois, ces connecteurs permettent d'assembler dans un même plan plusieurs éléments de même épaisseur. L'*Eurocode 5* définit les conditions de réalisation et prescrit des connecteurs de même type et positionnés symétriquement de chaque côté des éléments de bois. La figure 1.19 montre le processus de fabrication des fermettes en bois à l'aide d'une presse à rouleau. Lors de la mise en place des connecteurs, le bois ne peut excéder les 22% d'humidité et la pression d'enfoncement du connecteur doit être correctement ajustée pour ne pas détériorer les propriétés du bois par écrasement excessif des fibres. La figure 1.20 montre la mise en place des connecteurs à l'aide d'une presse automatique.

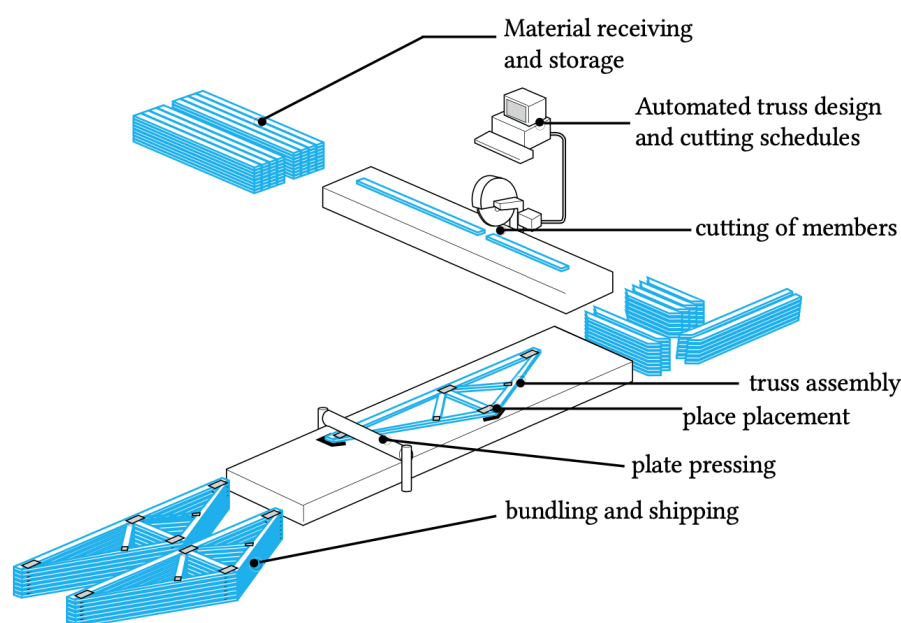


FIGURE 1.19 – Construction de fermettes préfabriquées [17]

La surface sollicitée par la grande emprise du connecteur dans le bois permet à ces organes surfaciques de résister à plusieurs types de sollicitations. Les seuls cas de figure qui ne sont pas envisagés par la normalisation sont les sollicitations hors plan du connecteur⁵. La tenue de ces plaques repose sur deux phénomènes :

- l'ancrage du connecteur sur le bois,
- la résistance mécanique de la plaque pouvant être sollicitée en traction, compression et cisaillement.

5. Cela peut arriver lorsque le vent souffle sur une fermette de pignon ou lors de leur manutention.

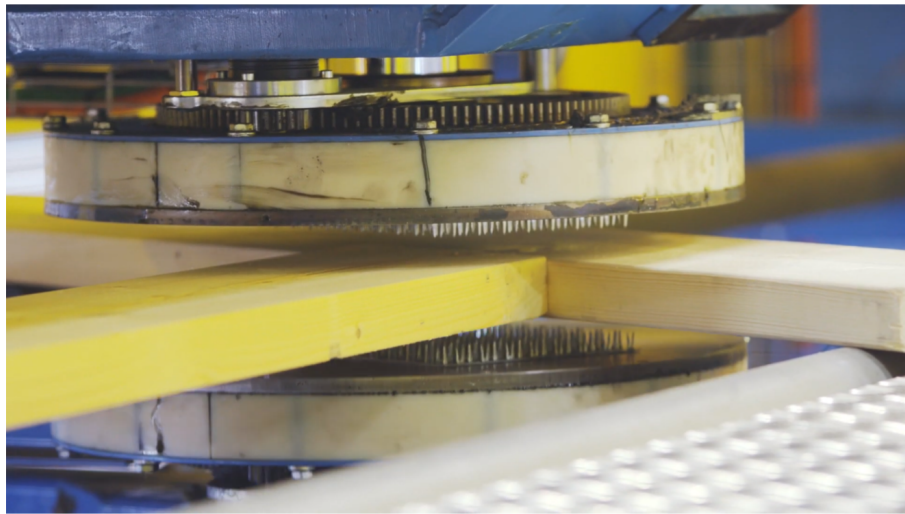


FIGURE 1.20 – Presse automatique pour la réalisation de fermettes préfabriquées [50]

Bien qu'il soit conseillé de les placer dans les zones à faible moment, il est vite arrivé d'avoir du moment causé par l'excentricité des centroïdes d'ancrage par rapport aux fibres neutres des éléments assemblés. Cette situation qui demande un dimensionnement au moment est visible à la figure 1.21.

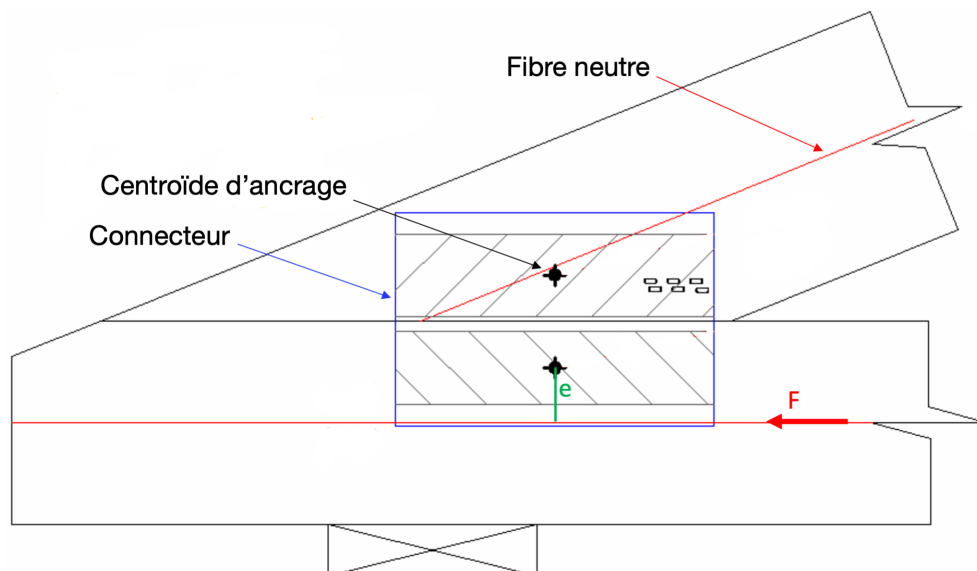


FIGURE 1.21 – Utilisation fréquente des connecteurs induisant du moment dans la plaque [49]

Selon l'orientation des efforts appliqués par rapport aux directions principales du matériau et celles du connecteur, différents modes de rupture peuvent être observés :

- Déchaussement des plaques en traction longitudinale
- Rupture de bloc par cisaillement du bois
- Rupture interne du connecteur en traction ou en cisaillement

1.4.2.3 | Que trouve-t-on sur le marché?

Le premier connecteur concerné par ce mémoire provient de l'entreprise *Bova-Nail* en Tchéquie. Celle-ci fonctionne à l'échelle nationale et fournit plusieurs types d'organes d'assemblage bois. Un de leur connecteur a été étudié dans le travail de Corto Lahaye [38]. Il s'agissait du bi-face nommé BV15/O [9] :

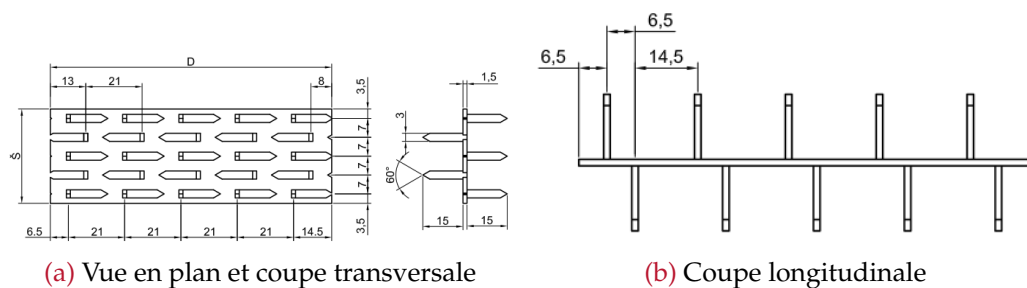


FIGURE 1.22 – Dimensions nominales des connecteurs BV15/O

La société *WOLF Connexion* occupe une place plus importante sur le marché du connecteur métallique. Originnaire d’Autriche, l’entreprise s’est bien développée en Europe, et notamment en France où nous avons pu nous approvisionner. Le type de connecteur utilisé dans ce mémoire est le *W101* [61] :

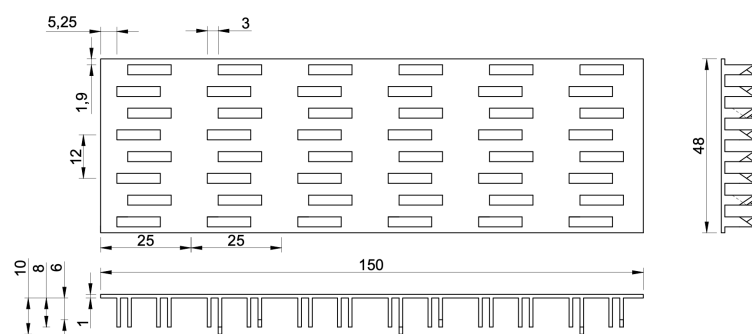


FIGURE 1.23 – Dimensions nominales des connecteurs W101

Pour finir, le leader mondial dans le domaine porte le nom de *MITEK*. À l'origine des toutes premières plaques métalliques embouties, lorsqu'elle s'appelait encore *Gang-Nail*, cette entreprise américaine s'est aujourd'hui étendue dans le monde entier. Tous les résultats présentés dans ce mémoire concerneront les connecteurs de type M20 fabriqués chez *MITEK*.

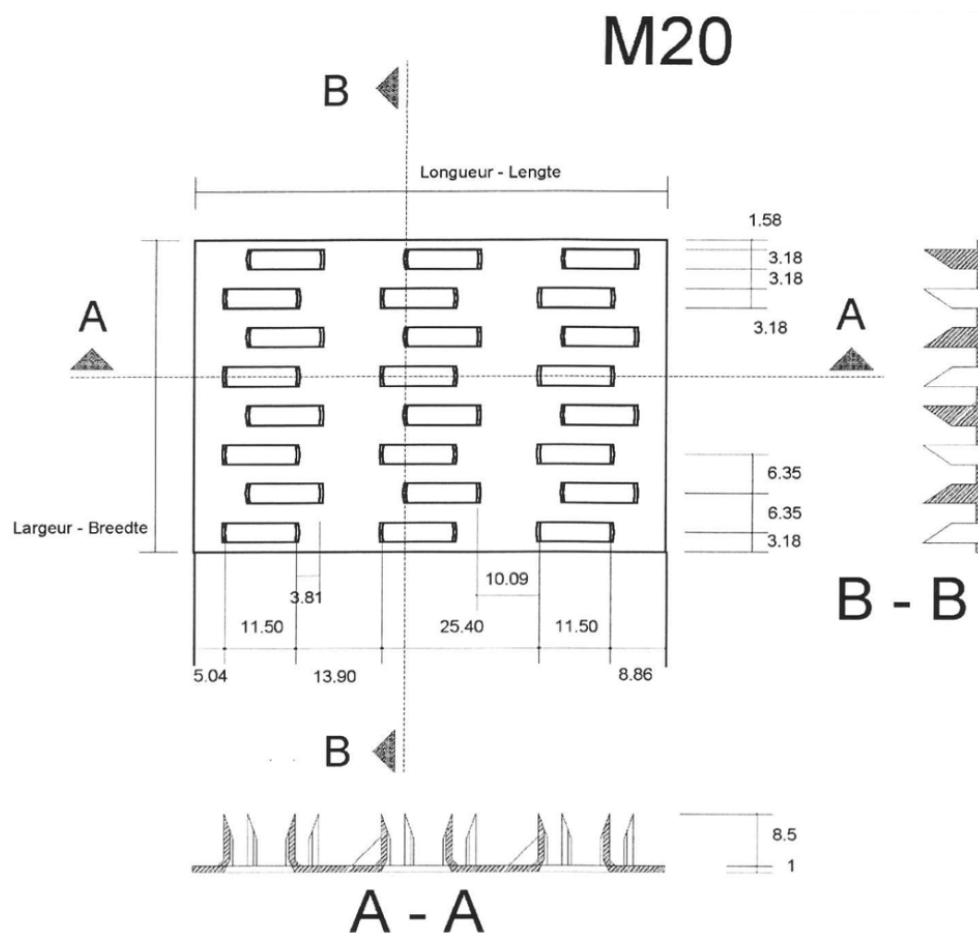


FIGURE 1.24 – Dimensions nominales des connecteurs M20 [42]

Note : La ressemblance des connecteurs *WOLF* avec ceux de la marque *MITEK* est assez flagrante. Certaines petites différences dans la forme des dents, dans l'écart entre celles-ci, ou dans le pattern en général, peuvent toutefois être observées lorsque l'on y regarde de plus près :

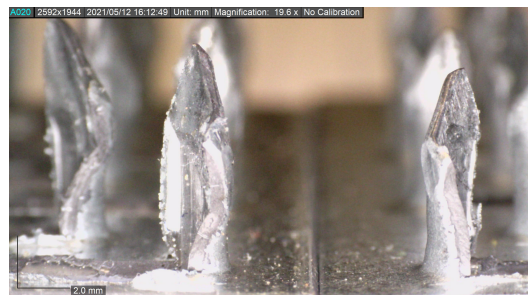


FIGURE 1.25 – Comparaison visuelle entre les connecteurs W101 (gauche) et M20 (droite)

D'autres produits dérivés qui pourraient également être utilisés de la même manière se trouvent sur le marché. Citons la firme *Rothoblaas* qui vient de sortir, en ce début d'année 2021, le "*Sharp Metal*". Sous forme de rouleau, il garantit un assemblage continu entre les éléments pour donner une résistance et une rigidité comparables aux performances d'un collage. Souvent utilisé pour la confection de planchers nervurés, il est généralement utilisé avec des vis de renfort pour assurer la compression nécessaire au bon ancrage du connecteur. Son utilisation est représentée à la figure 1.26.

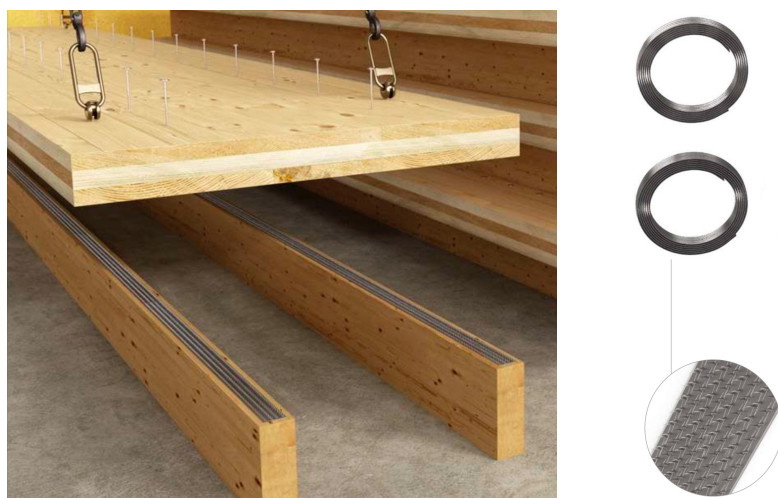


FIGURE 1.26 – Utilisation et représentation du connecteur *Sharp Metal* [54]

Ce produit, mis sur le marché par *Rothoblaas*, est le résultat d'un partenariat commercial avec l'entreprise canadienne *GripMetal* qui est à l'initiative de ce type de connecteurs surfaciques flexibles. Leur version du connecteur peut être utilisée dans le bois, sans nécessiter de vis, mais aussi dans le béton, ou encore dans certains polymères.

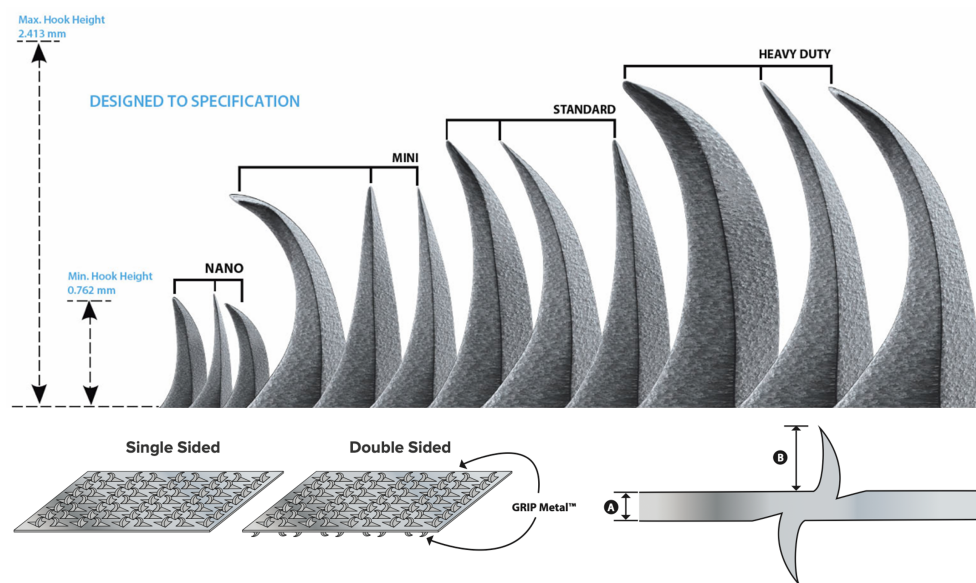


FIGURE 1.27 – Représentation du connecteur *GripMetal* [31]

1.4.2.4 | Les normes

Ces documents sont écrits, officialisés et publiés par un organisme de normalisation. Ils ont pour but de définir des directives qui doivent être suivies lors de la conception d'un bien pour que celui-ci soit conforme aux attentes du marché. De tels documents sont également d'application dans le génie civil. Ils portent le nom d'*Eurocode*. Selon le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC [22]), les Eurocodes constituent un ensemble de normes européennes pour la conception et le dimensionnement des bâtiments et des structures de génie civil. Ils sont au nombre de 10 et parmi eux, on trouve l'*Eurocode 5* qui concerne la conception et le détail des constructions en bois.

Comme mentionné précédemment, les assemblages par plaques métalliques embouties ont vu le jour de l'autre côté de l'Atlantique. Par conséquent, il est pertinent de se questionner sur les normes hors Europe.

Aux États-Unis, l'*American Society of Testing and Materials (ASTM)* est à l'origine d'une norme décrivant les méthodes pour déterminer la résistance à la tension de ces plaques (E489 [3]), et de deux autres concernant les critères de résistance à l'effort tranchant (E767 [4] et D1761 [5]). D'autres standards canadiens (CSA S347 [18]) ou même internationaux (ISO 8969 [35]) dédient également une partie réservée aux essais sur plaques métalliques embouties.

En Europe, la norme spécifique aux méthodes d'essais sur ce type de connexion est la EN 1075 [15]. On peut y trouver une description des méthodes utilisées pour déterminer la résistance et la rigidité des assemblages par plaques métalliques embouties pour les structures en bois. Cette norme donne également la définition de ces organes d'assemblages dont le design classique est présenté à la figure 1.28 :

"Une plaque métallique emboutie est un type de connexion en métal ayant une épaisseur nominale comprise entre 0,9 [mm] et 3,0 [mm] et possédant des saillies intégrales découpées dans une direction puis pliées perpendiculairement à la base de la plaque métallique."

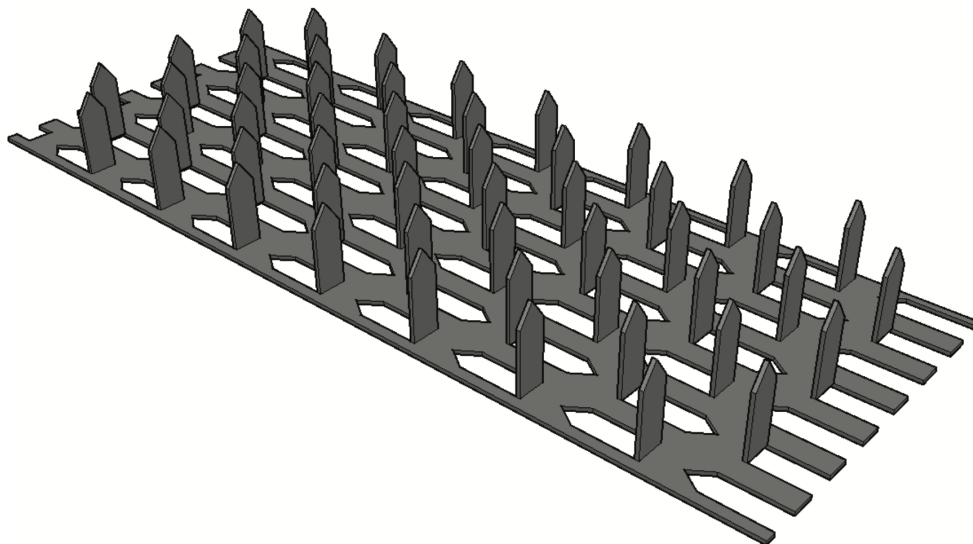


FIGURE 1.28 – Design classique d'une plaque métallique emboutie [45]

Les besoins contemporains en termes de matériaux durables et réutilisables mettent au premier plan l'industrie du bois. En constante évolution, le développement de la construction en bois dépend de l'avancée des techniques de connexion. En ce sens, il y a un véritable intérêt à bien comprendre le comportement mécanique de ces assemblages réalisés par plaques métalliques embouties.

Analyse théorique de l'assemblage

Les plaques métalliques embouties n'ont pas encore fait l'objet de recherches aussi approfondies que les autres moyens d'assemblage (broche, vis, etc...). Bien souvent, de tels assemblages sont calculés à l'aide de logiciels fournis par les fabricants de connecteurs. Véritable boîte noire, il est souvent difficile de comprendre les méthodes utilisées par ces programmes et peu de documents montrant l'application des directives de la norme sont disponibles.

Cette section est consacrée à l'étude théorique du comportement des plaques métalliques embouties. Ceci est un passage obligé avant la réalisation de la partie expérimentale. Le but étant d'une part, d'être en mesure de prévoir et comprendre le comportement des assemblages lors des essais et, d'autre part, de pouvoir analyser et comparer les résultats expérimentaux au regard de cette analyse théorique.

2.1 | Calcul selon l'Eurocode 5

On peut trouver au paragraphe §8.8 de l'*Eurocode 5* des expressions relatives aux calculs de résistance de ces assemblages. Parmi elles, l'expression de la **capacité d'ancrage** permet d'avoir un bon aperçu des paramètres pris en compte pour le calcul de ces assemblages. Abondamment utilisé dans la partie expérimentale de ce travail, il est nécessaire d'exposer brièvement le calcul de l'ancrage du connecteur. Celui-ci est explicité aux points suivants.

2.1.1 | Capacité d'ancrage de la plaque

La capacité d'ancrage du connecteur est le potentiel de ce dernier à rester en place dans le bois. Elle dépend de l'orientation de l'effort sollicitant le connecteur par rapport à celui-ci et par rapport au fil du bois.

Géométrie de l'assemblage

Un repère (x, y) propre au connecteur est fixé tel que la direction principale du connecteur soit la direction d'emboutissage des dents. Celle-ci est associée à l'axe x tandis que l'axe y est dédié à la direction transverse.

En prenant en considération la direction des fibres du bois, la direction de l'effort sollicitant le connecteur et la direction de la ligne d'assemblage, plusieurs angles sont définis :

- α : l'angle aigu entre la direction x du connecteur et la direction de l'effort.
- β : l'angle aigu entre la direction du fil du bois et la direction de l'effort.
- γ : l'angle aigu entre la direction x du connecteur et la ligne d'assemblage

La figure 2.1 représente ces différentes caractéristiques géométriques.

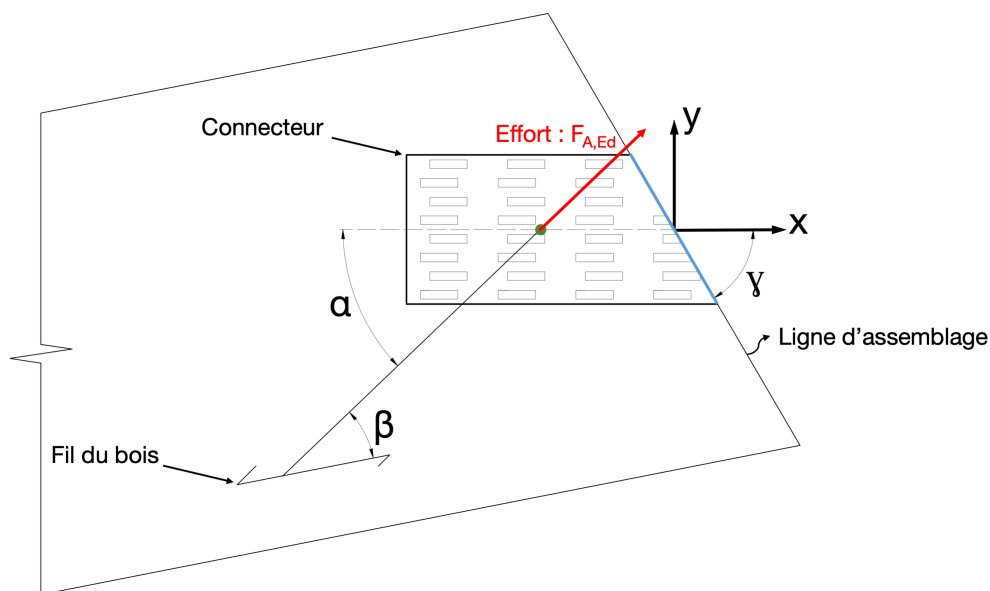


FIGURE 2.1 – Géométrie d'un assemblage par plaque métallique emboutie

L'aire efficace

L'aire efficace (A_{ef}) est une autre notion importante dans le calcul des connecteurs puisqu'elle est la surface réellement prise en compte dans les calculs de capacité d'ancrage du connecteur. Elle est en fait l'aire de contact entre la plaque et le bois, réduite de 5 [mm] vis-à-vis des rives du bois (mesuré perpendiculairement aux fibres) et réduite de 6 fois l'épaisseur nominale (t) de la plaque dans le sens du fil. On peut également trouver dans la littérature¹ la prise en considération d'une possibilité de mauvais positionnement du connecteur (tolérance de positionnement). Toutefois, rien de tel n'est spécifié actuellement dans l'Eurocode 5. La figure 2.2 illustre bien sa définition.

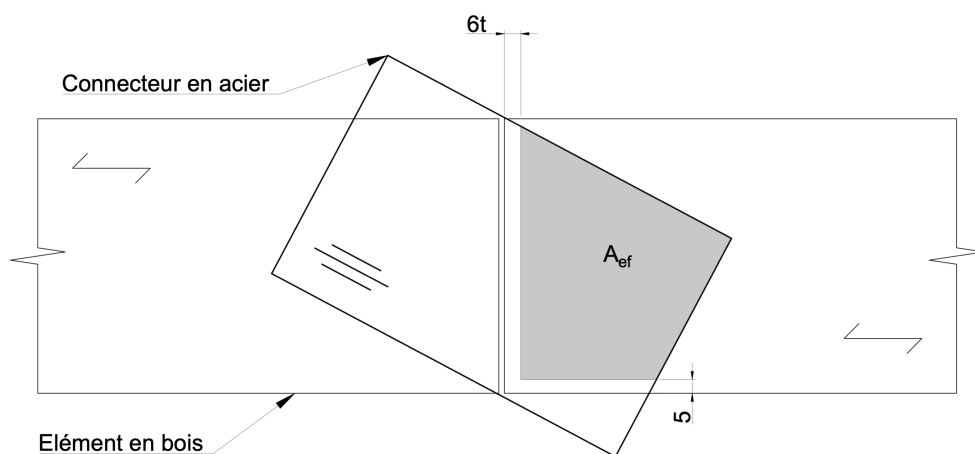


FIGURE 2.2 – Représentation de l'aire efficace

Expressions empiriques

La valeur caractéristique de la résistance d'ancrage lorsque le connecteur est soumis à une force parallèle à la direction des fibres du bois ($\beta = 0$) est :

$$f_{a,\alpha,0,k} = \begin{cases} f_{a,0,0,k} + k_1 \cdot \alpha & \text{quand } \alpha \leq \alpha_0 \\ f_{a,0,0,k} + k_1 \cdot \alpha_0 + k_2 \cdot (\alpha - \alpha_0) & \text{quand } \alpha_0 < \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.1)$$

Où $f_{a,0,0,k}$ est la capacité d'ancrage caractéristique d'un connecteur, subissant une force parallèle aux fibres du bois et à la direction x du connecteur ($\alpha = \beta = 0$). Elle est déterminée sur base d'essais normalisés² et donnée par les fabricants de connecteurs tout comme $f_{a,90,90,k}$ et les constantes k_1, k_2, α_0 .

1. Notamment dans le DTU31.3 [11] ou le document AQCEN [49].

2. Ces essais sont décrits dans les normes EN 1075 et EN 14545.

Lorsque l'effort n'est pas dans la direction du fil ($\beta \neq 0$), la valeur caractéristique est adaptée telle que :

$$f_{a,\alpha,\beta,k} = \max \begin{cases} f_{a,\alpha,0,k} - (f_{a,\alpha,0,k} - f_{a,90,90,k}) \cdot \frac{\beta}{45^\circ} & \text{quand } \beta \leq 45^\circ \\ f_{a,0,0,k} - (f_{a,0,0,k} - f_{a,90,90,k}) \cdot \sin(\max(\alpha, \beta)) & \end{cases} \quad (2.2)$$

$$f_{a,\alpha,\beta,k} = f_{a,0,0,k} - (f_{a,0,0,k} - f_{a,90,90,k}) \cdot \sin(\max(\alpha, \beta)) \quad \text{quand } 45^\circ < \beta \leq 90^\circ \quad (2.3)$$

Le tableau 2.1 est une compilation des documents de performance des connecteurs M20 [24] et W101 [62] produits respectivement par *MITEK* et *WOLF*.

		<i>MITEK</i> M20	<i>WOLF</i> W101	
Capacité d'ancrage	$f_{a,0,0}$	2,82	2,94	$[N/mm^2]$
	$f_{a,90,90}$	1,50	1,31	$[N/mm^2]$
	k_1	-0,0061	-0,0049	$[-]$
	k_2	0,017	0,00258	$[-]$
	α_0	59,4	60	$[^\circ]$
Capacité de la plaque*	$f_{t,0}$	148	170	$[N/mm]$
	$f_{t,90}$	136	139	$[N/mm]$
	$f_{c,0}$	76	85	$[N/mm]$
	$f_{c,90}$	88	93	$[N/mm]$
	$f_{v,0}$	69	78	$[N/mm]$
	$f_{v,90}$	43	41	$[N/mm]$
	γ_0	-2,10	-5	$[^\circ]$
	k_v	0,87	1,7	$[-]$
Rigidité	k_{ser}	14,7	10	$[N/mm^3]$

TABLE 2.1 – Valeurs caractéristiques des connecteurs *MITEK* et *WOLF*

* Cet aspect doit être considéré mais sort du cadre du mémoire.

Grâce à ces valeurs, il est possible d'utiliser les formules explicitées ci-dessus pour tracer l'évolution de l'ancrage en fonction des angles α et β .

Comme mis en évidence dans la partie 1.4.2.3 de l'état de l'art, une flagrante ressemblance entre ces deux connecteurs est observée. Pourtant, la figure 2.3 permet de constater que leurs comportements peuvent être bien différents. On notera, particulièrement au début de la courbe *MITEK*, qu'un effort appliqué dans la direction du fil ($\beta = 0$) donne une résistance à l'ancrage moins élevée pour un connecteur positionné dans le sens du fil ($\alpha = 0$) en comparaison avec un connecteur mis à 90° vis-à-vis du fil. Cette particularité n'est pas observée chez *WOLF* et est principalement due au paramètre k_2 , 6 fois plus élevé chez le fabricant *MITEK*.

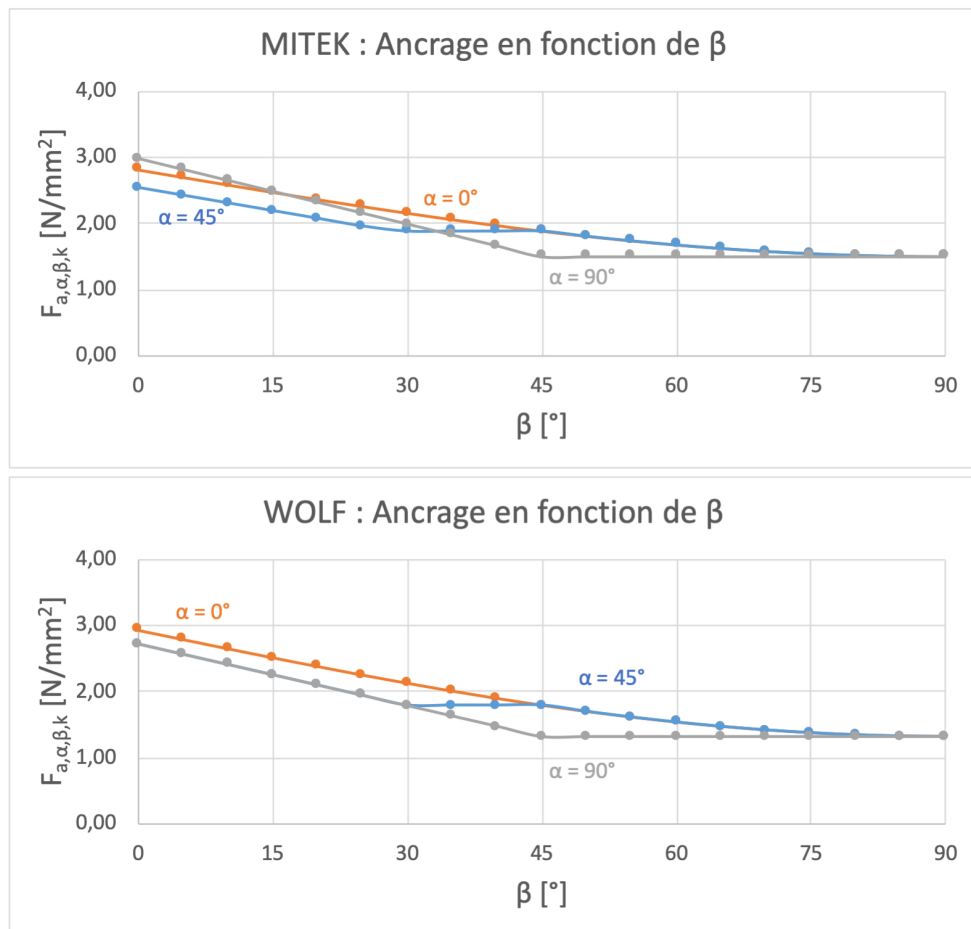


FIGURE 2.3 – Représentations graphiques des formules d'ancrage

Les manipulations faites sur les formules d'ancrage permettent de mettre en évidence la sensibilité des connecteurs vis-à-vis de la direction de l'effort et des fibres. Ceci laisse alors la porte ouverte aux réflexions concernant la sensibilité de la rigidité de l'assemblage vis-à-vis de ces deux angles α et β .

2.2 | Rigidité des assemblages

Le mot rigidité est souvent associé à un ressort. Au plus ce ressort est raide, au plus il est difficile de le déformer. Dans le cas des assemblages, il y a lieu de considérer cette rigidité pour éviter les déformations excessives de la structure en service.

Dans l'*Eurocode 5*, la rigidité d'un assemblage en bois est caractérisée par un **module de glissement** représenté par un coefficient K_{ser} en $[N/mm]$.

Alors que le tableau 7.1 de l'*Eurocode 5* (figure 2.4) donne des valeurs de ce coefficient pour plusieurs organes d'assemblage, les plaques métalliques embouties n'en font pas partie. Cette rigidité est l'objet principal de ce travail et sera caractérisée grâce aux essais en laboratoire.

Type d'organe d'assemblage	K_{ser}
Broches Boulons sans jeu ^{a)} Tire-fonds Pointes (avec avant-trous)	$\rho_m^{1,5} d^{2/3}$
Pointes (sans avant-trous)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$
Agrafes	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/80$
Anneaux type A conformément à EN 912 Anneaux type B conformément à EN 912	$\rho_m d_c/2$
Crampons Crampons types C1 à C9 conformément à EN 912 Crampons types C10 & C11 conformément à EN 912	$1,5 \rho_m d_c/4$ $\rho_m d_c/2$
<i>a) Le jeu doit être ajouté spécifiquement à la déformation.</i>	

FIGURE 2.4 – Valeur de K_{ser} pour les assemblages bois (Tableau 7.1 *Eurocode 5*)

2.2.1 | Rigidité donnée par les fabricants

Les fabricants sont tenus de fournir les propriétés de leurs produits suivant les règles imposées par les documents de *déclaration de performance (DOP)*. Ils utilisent alors une rigidité k_{ser} , exprimée en $[N/mm^3]$, plutôt que la rigidité K_{ser} décrite par l'*Eurocode 5* en $[N/mm]$.

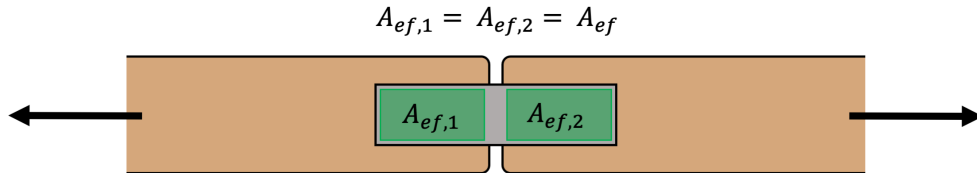
Il est facile de constater que le rapport de ces deux rigidités est une surface. Les quelques exemples trouvés sur la toile permettent de s'assurer que cette surface est, en fait, l'**aire efficace** (voir 2.1.1). En revanche, il est bien plus difficile de comprendre comment utiliser correctement cette aire efficace de manière à convertir la valeur K_{ser} , trouvée en laboratoire, pour la comparer à la valeur k_{ser} donnée par les fabricants. Cette comparaison est bien entendu cruciale pour pouvoir approuver la méthode d'essai en se rapportant aux valeurs données par les fabricants.

La suite de cette section présente les différentes utilisations de l'aire efficace pour passer du module de glissement K_{ser} [N/mm] obtenu en laboratoire, à la valeur de la rigidité k_{ser} [N/mm^3] donnée par les fabricants de connecteur.

2.2.1.1 | Méthode classique

Cette première méthode, fréquemment observée dans la littérature, est assez intuitive et permet une utilisation simple des valeurs données par les fabricants de connecteurs. L'objectif ici est de comprendre le fonctionnement et les cas d'application de cette méthode exprimant la rigidité de l'assemblage comme :

$$K_{ser} = 2 \cdot A_{ef} \cdot k_{ser} \quad (2.4)$$



Cette première méthode suggère de multiplier la valeur k_{ser} en [N/mm^3] donnée par les fabricants de connecteur, par les aires efficaces situées des deux côtés du connecteur ($A_{ef,1}$ et $A_{ef,2}$). Cette opération permet d'obtenir la rigidité totale de l'assemblage exprimée comme K_{ser} en [N/mm].

Attention : L'Eurocode 5 peut-être utilisé à condition de respecter ses exigences. L'une des premières conditions concernant la conception de tels assemblages est de toujours avoir sur chaque face de celui-ci, deux connecteurs de même type, de même taille et positionnés symétriquement.

Le deuxième connecteur, situé sur la face opposée de l'assemblage, apporte lui aussi une rigidité à l'assemblage. Pourtant, ses aires efficaces n'interviennent pas dans le calcul de

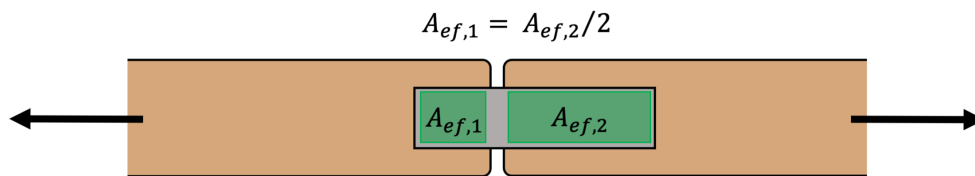
la rigidité. De nouveau, la question a été posée au fabricant *MITEK* dont l'agrément technique avec certification (ATG) spécifie :

*" Tous les chiffres (...) s'entendent pour deux plaques symétriques, les surfaces effectives de recouvrement (...) n'étant comptés que sur **une** face et sur **la** pièce de bois à assembler "*

Cela signifie que les fabricants doublent toutes leurs valeurs de manière à caractériser l'assemblage entier grâce aux mesures prises sur une seule des deux plaques. Au vu des exigences de l'*Eurocode 5* concernant la deuxième plaque, cette approche se justifie.

Analyse de la méthode classique

Maintenant, dans le but de rester critique envers cette méthode, prenons en considération un assemblage où le connecteur n'est pas centré sur la ligne d'assemblage :



Dans cette configuration, l'aire d'ancrage n'est pas la même de part et d'autre de l'assemblage. Peu importe à quel point le côté droit de l'assemblage est rigide, on peut penser que la rigidité globale de l'assemblage va être régie principalement par le côté le moins rigide. C'est-à-dire, dans ce cas, le côté gauche. Dans cette configuration, une diminution globale de la rigidité est attendue.

Repartons de l'équation 2.4 pour rendre l'expression plus générale :

$$K_{ser} = 2 \cdot A_{ef} \cdot k_{ser} \quad (2.5)$$

$$K_{ser} = (A_{ef,1} + A_{ef,2}) \cdot k_{ser} \quad (2.6)$$

Cela étant fait, deux choses peuvent être observées :

1. Aucune perte de rigidité n'est observée lorsque l'on décentre le connecteur. En effet, toute la surface perdue du côté $A_{ef,1}$ est reportée du côté $A_{ef,2}$ ce qui entraîne une somme $(A_{ef,1} + A_{ef,2})$ constante. Le K_{ser} reste donc invariable.
2. Le raisonnement peut être poussé à la limite en faisant tendre $A_{ef,1}$ vers 0. Dans ce cas, le connecteur perd le contact avec le bois et la rigidité globale de l'assemblage devrait être nulle. Or, le terme $A_{ef,2}$ permet à l'équation 2.6 de ne pas l'être.

Bien que fréquemment utilisée, cette méthode ne semble pas représenter, de manière physiquement correcte, le comportement rigide de l'assemblage. Une autre méthode a donc été imaginée...

2.2.1.2 | Méthode des ressorts

Cette seconde méthode se base sur le comportement des ressorts. Cet élément peut effectivement modéliser la rigidité au droit de chaque surface d'ancrage entre le bois et le connecteur. Un tel assemblage est constitué de 4 surfaces de contact entre les connecteurs et les bois. Ceci donne lieu à 4 points de glissement potentiel. La figure 2.5 représente la modélisation de l'assemblage grâce à deux blocs parallèles de ressorts en série.

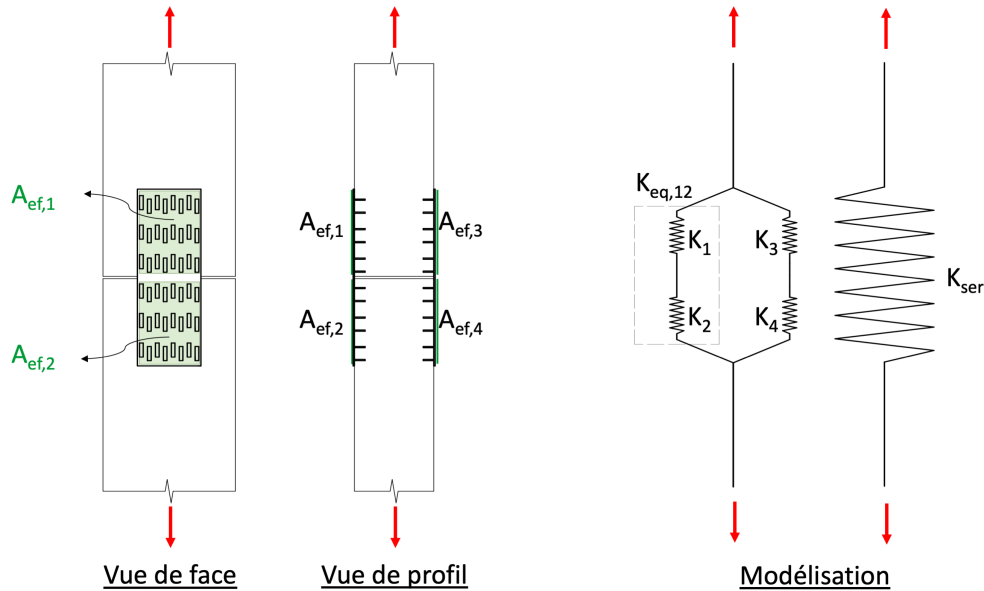


FIGURE 2.5 – Modélisation d'un assemblage par plaques métalliques embouties à l'aide de ressorts

Chronologiquement, la première étape sera de déterminer la rigidité globale de l'assemblage K_{ser} [N/mm] grâce au travail expérimental qui sera décrit plus loin dans ce document (Partie 3). À ce stade de la démarche, on peut se limiter à dire que ce module de glissement K_{ser} est le ratio entre la force et le déplacement global de l'assemblage.

Ensuite, pour lier cette rigidité globale K_{ser} [N/mm] à la valeur k_{ser} [N/mm^3] donnée par les fabricants, l'approche imaginée exprime la rigidité de chaque surface d'ancrage i comme :

$$K_i = k_{ser} \cdot A_{ef,i} \quad (2.7)$$

La figure 2.5 montre bien la substitution de chaque surface d'ancrage, entre un connecteur et une pièce de bois, par un ressort.

En partant de là, il faut utiliser la mécanique des ressorts, dont les formules sont rappelées à l'annexe B, pour établir le lien entre les deux modules de glissement K_{ser} et k_{ser} .

Ainsi, la décomposition de K_{ser} en deux systèmes en parallèle donne :

$$K_{ser} = K_{eq,12} + K_{eq,34} \quad (2.8)$$

Ensuite, le système de ressort en série s'écrit :

$$K_{eq,ij} = \left(\frac{1}{K_i} + \frac{1}{K_j} \right)^{-1} \quad (2.9)$$

La substitution de cette dernière expression dans l'équation 2.8 permet de lier la rigidité globale de l'assemblage à la rigidité locale de chaque surface ancrée :

$$K_{ser} = \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \right)^{-1} + \left(\frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} \right)^{-1} \quad (2.10)$$

Avant d'analyser cette nouvelle expression, il est possible de la simplifier en reprenant les spécifications de la norme. Pour rappel, l'*Eurocode 5* demande, pour la réalisation de ces assemblages, d'utiliser des connecteurs de même type, même taille et positionnés symétriquement sur chaque face des éléments assemblés. On peut donc en conclure que $K_{eq,12} = K_{eq,34}$. Ce qui conduit à la simplification suivante :

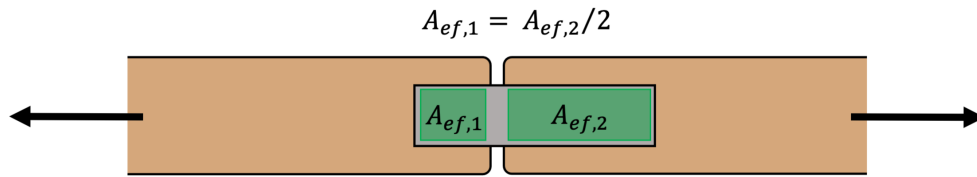
$$K_{ser} = 2 \cdot \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \right)^{-1} \quad (2.11)$$

Il est maintenant temps d'introduire le $k_{ser} [N/mm^3]$ utilisé par les fabricants en substituant l'équation 2.7 dans cette dernière relation :

$$K_{ser} = 2 \cdot \left(\frac{1}{k_{ser} \cdot A_{ef,1}} + \frac{1}{k_{ser} \cdot A_{ef,2}} \right)^{-1} \quad (2.12)$$

Analyse de la méthode des ressorts

Comme pour la précédente méthode, le cas où les connecteurs ne sont pas centrés sur la ligne d'assemblage est un bon moyen de tester la robustesse de l'expression ici trouvée. Le graphique 2.9 à la section suivante permet de constater qu'au plus le décentrement des connecteurs augmente, au plus la rigidité globale K_{ser} diminue.



Poussé à la limite, le décentrement conduit à une aire efficace nulle d'un côté du connecteur et la rigidité de l'assemblage devient nulle :

$$\begin{aligned}
 K_{ser} &= 2 \cdot \left(\frac{1}{k_{ser} \cdot 0} + \frac{1}{k_{ser} \cdot A_{ef,2}} \right)^{-1} \\
 &= 2 \cdot \left(\infty + \frac{1}{k_{ser} \cdot A_{ef,2}} \right)^{-1} \\
 &= 2 \cdot \left(\frac{1}{\infty} \right) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Pour conclure, cette méthode des ressorts répond mieux au comportement attendu concernant les assemblages par plaques métalliques embouties. Il est toutefois nécessaire de confronter ces résultats avec ce qui est fait au sein des entreprises fabricantes. Ce sujet est traité dans la prochaine partie.

2.2.1.3 | Méthode utilisée dans le logiciel PAMIR

PAMIR est un logiciel mis à la disposition des fabricants de charpentes qui utilisent les connecteurs produits par MITEK. Créé il y a 10 ans, il permet de concevoir, calculer et donner toutes les caractéristiques des éléments nécessaires à la production d'une toiture à base de fermes. Les connecteurs métalliques étant le moyen d'assemblage privilégié pour ces éléments de toiture, les développeurs de ce logiciel ont dû élaborer une façon de calculer la rigidité de ces assemblages.

En considérant le même assemblage en traction que précédemment, la réponse du logiciel va être étudiée en fonction du décentrement du connecteur. Cet exercice concret permettra de confronter les résultats avec les deux méthodes précédentes.

Description du modèle

Deux pièces de bois sont assemblées grâce à des connecteurs métalliques. Même si les déformations des pièces de bois sont négligeables, une section carrée de 300x300 [mm] a été choisie pour s'acquitter des déformations parasites liées au bois.

Les connecteurs choisis sont ceux qui seront utilisés pour les essais en laboratoire, à savoir les M20 150x50 [mm] du fabricant MITEK.

L'assemblage sera soumis à une force de traction de 30 [kN]. L'affichage des décimales étant limité, cette charge élevée permet d'engendrer des déplacements de l'ordre du dixième de millimètre, significatifs pour le logiciel PAMIR.

Comme le montre la figure 2.6, PAMIR modélise l'assemblage à l'aide de deux barres pour le matériau bois et une barre pour le matériau acier. Ces barres sont reliées entre elles par des ressorts. L'outil dans le fenêtre de droite permet d'afficher la rigidité du ressort sélectionné, en l'occurrence le *Ressort 1* sur la capture.

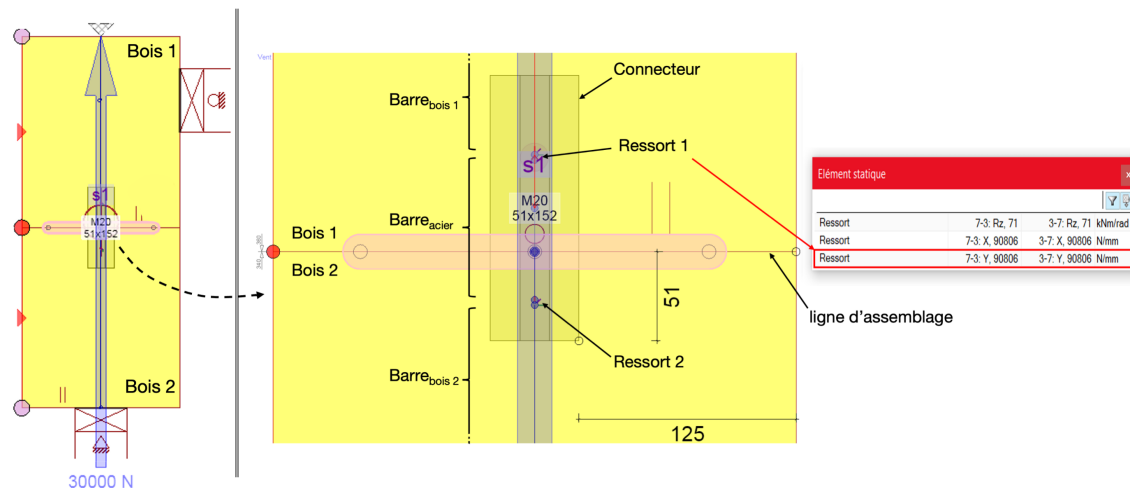


FIGURE 2.6 – Présentation de la modélisation faite par le logiciel PAMIR

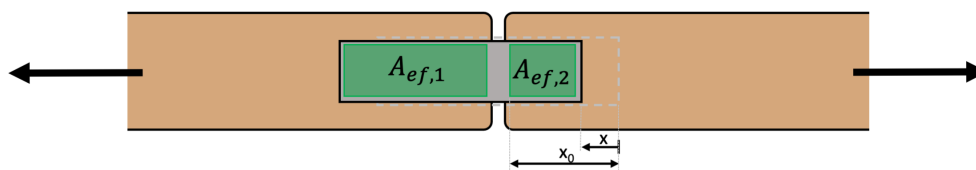


FIGURE 2.7 – Définition des distances x et x_0

La rigidité de ces deux ressorts va permettre de déterminer la rigidité globale de l'assemblage, grâce à la formule de deux ressorts en série disponible dans l'annexe B.

Ensuite, le connecteur va être décalé d'une distance x par rapport à sa position initiale (centré sur la ligne d'assemblage). Une relation pourra ainsi être faite entre la rigidité globale de l'assemblage et la position du connecteur.

En considérant que :

- x [mm] : est le décalage du connecteur.
- x_0 [mm] : est la distance initiale entre le bord inférieur du connecteur et la limite de l'aire efficace. Pour les connecteurs M20, cette distance vaut 56,2 [mm].³
- K_i [N/mm] : est la rigidité du ressort i .
- $K_{ser,x}$ [N/mm] : est la rigidité globale de l'assemblage lorsque le connecteur a subi un déplacement x .
- $K_{ser,0}$ [N/mm] : est la rigidité globale de l'assemblage lorsque le connecteur est centré sur la ligne d'assemblage. Le programme renvoie une valeur initiale de rigidité égale à 65914 [N/mm].

Les valeurs adimensionnelles choisies pour la rigidité et le déplacement sont respectivement :

$$\frac{K_{ser,x}}{K_{ser,0}} [-] \quad \text{et} \quad \frac{x}{x_0} [-] \quad (2.13)$$

Le tableau ci-dessous reprend les valeurs renvoyées par le logiciel *PAMIR* lorsque l'on décentre le connecteur de sa position initiale, au milieu de la ligne d'assemblage. Seule la dernière colonne vient d'un post-calcul liant les rigidités K_1 et K_2 grâce à la relation des ressorts en série (voir annexe B).

x [mm]	$A_{ef,1}$ [mm ²]	$A_{ef,2}$ [mm ²]	K_1 [N/mm]	K_2 [N/mm]	$K_{ser,x}$ [N/mm]
0	2855	2855	65914	65914	32957
11,24	3426	2284	77105	54723	32007
22,48	3997	1713	88297	43531	29157
33,72	4568	1142	99488	32340	24406
44,96	5139	571	110680	21148	17755
56,2	5710	0	121869	9957	9207

TABLE 2.2 – Résultats tirés du modèle *PAMIR* pour plusieurs positions du connecteur

On peut ensuite les utiliser pour mettre en évidence la relation entre la rigidité et l'aire efficace, d'un même côté du connecteur. Ainsi :

$$K_1 = A_{ef,1} * 19,6 + 9957 \quad (2.14)$$

3. Le coté long de l'aire efficace se calcule en prenant la moitié de la longueur du connecteur, à laquelle on retire 6 fois l'épaisseur nominale du connecteur pour les effets de bords et 10 [mm] de tolérance de positionnement. Le logiciel retire également 4 [mm] supplémentaires : $152,4/2 - 6 \cdot 1 - 10 - 4 = 56,2$ [mm]

Cette relation montre en premier lieu que la rigidité d'un côté du connecteur est bien proportionnelle à l'aire efficace de ce côté. Cependant, la constante représentant la pente de la droite, n'est pas la valeur de $k_{ser} = 14,7 [N/mm^3]$ annoncée par MITEK au tableau 2.1. De plus, une constante vient s'additionner laissant une rigidité non nulle lorsque l'aire efficace tend vers 0.

L'évolution de la rigidité de chaque côté du connecteur est représentée à la figure 2.8. On peut notamment y voir que les évolutions des rigidités de part et d'autre du connecteur s'alignent sur la même droite. Cela montre que la rigidité perdue d'un côté est récupérée de l'autre.

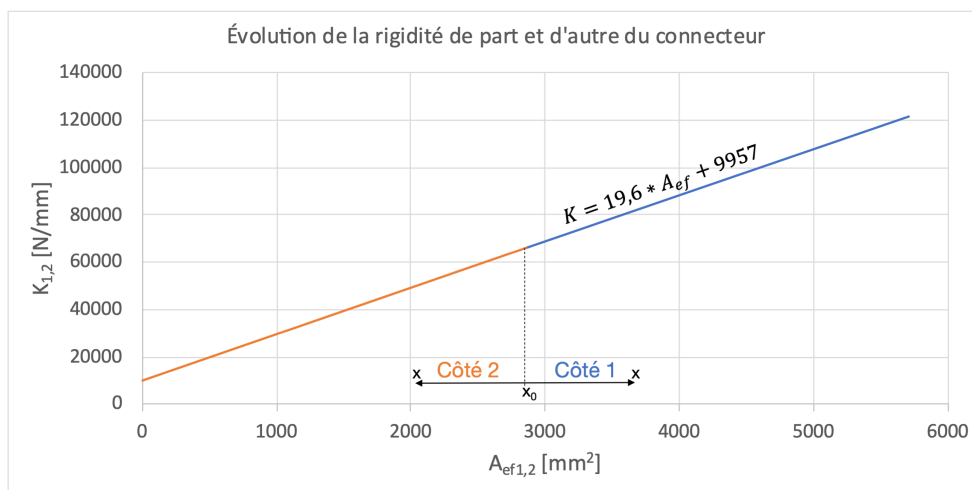


FIGURE 2.8 – Évolution de la rigidité en fonction de l'aire efficace dans PAMIR

Le but ici étant de vérifier la *méthode des ressorts* précédemment développée, la figure 2.9 confronte les deux méthodes de manière adimensionnelle.

Bien que les courbes ne soient pas totalement les mêmes, on peut en tout cas conclure que la rigidité de tels assemblages dépend de l'aire efficace d'une manière plus complexe que celle généralement trouvée dans la littérature et décrite comme la *méthode classique* à la section 2.2.1.1.

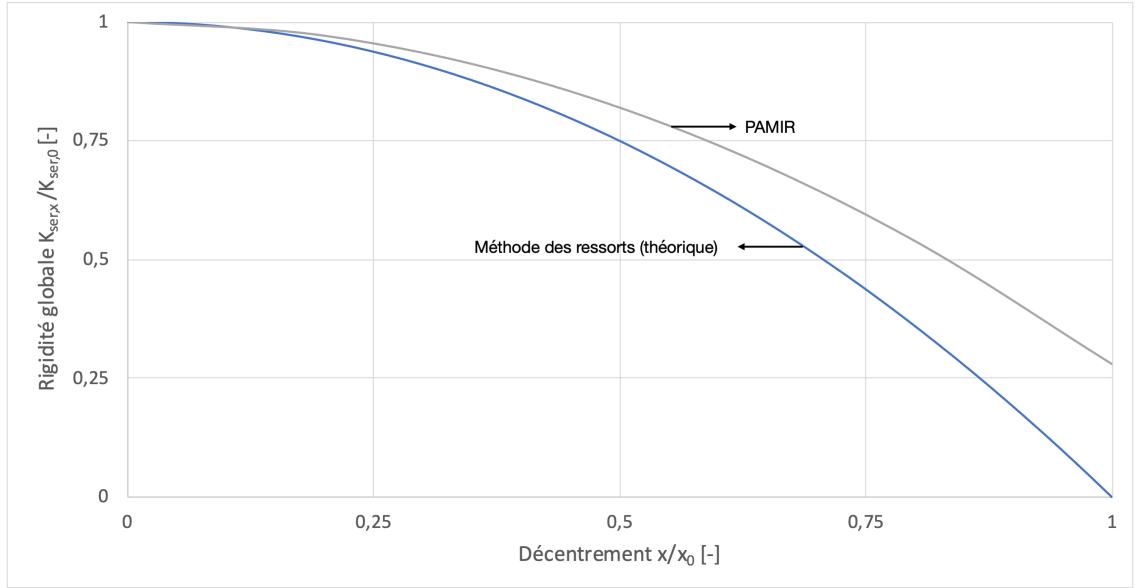


FIGURE 2.9 – Comparaison entre la *méthode des ressorts* et PAMIR

2.3 | Méthode Gamma

Sans plus se limiter au comportement strict des plaques métalliques, prenons maintenant du recul et analysons les connecteurs appliqués à une poutre.

L'*Eurocode 5* fournit dans son annexe B une méthode de calcul concernant les poutres assemblées mécaniquement. Grâce à cette méthode, il est possible de connaître la rigidité efficace en flexion $(EI)_{ef}$, d'une poutre composée de maximum 3 lames assemblées par organes mécaniques. Cette rigidité est le point de départ vers le calcul des déformations que ce soit à court ou à plus long terme.

2.3.1 | Formulation générale

Le calcul de la rigidité efficace considère chaque partie de la poutre individuellement, comme illustré à la figure 2.10. Ainsi, cette rigidité efficace se calcule comme :

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (2.15)$$

C'est à ce niveau qu'intervient le paramètre γ . Celui-ci a pour expression :

$$\gamma_i = \left(1 + \pi^2 E_i A_i \frac{s_i}{K_i L^2} \right)^{-1} \text{ pour } i = 1 \text{ et } i = 3, \gamma_2 = 1 \quad (2.16)$$

Les paramètres intervenant sont :

- a_i : la distance entre le centre de gravité de la section assemblée et la lame i .

$$\begin{cases} a_1 = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} - a_2 \\ a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i} \\ a_3 = \frac{h_3}{2} + \frac{h_2}{2} + a_2 \end{cases} \quad (2.17)$$

- E_i : le module de Young moyen de la lame i . Dans le cas d'un calcul à long terme, celui-ci se voit diviser par $(1+k_{def})$, tout comme le K_{ser} (Eurocode 5 : §2.3.2.2). Au regard de leurs expressions, on constate que les paramètres γ_i et a_i sont indépendants des phénomènes liés au calcul à long terme.
- I_i : l'inertie de la lame i
- A_i : l'aire de la section i
- s_i : l'entraxe entre les organes d'assemblage. Pour les organes métalliques continus comme le *Sharp Metal* (voir l'état de l'art 1.4.2.3), l'entraxe n'est pas explicite et c'est le rapport K/s qu'il faut spécifier et injecter directement dans l'expression du γ .
- L : la portée de la poutre
- K_i : le module de glissement. Il prend respectivement la valeur de $K_{ser,i}$ ou $K_{u,i}$ pour les états limites de service ou les états limites ultimes.

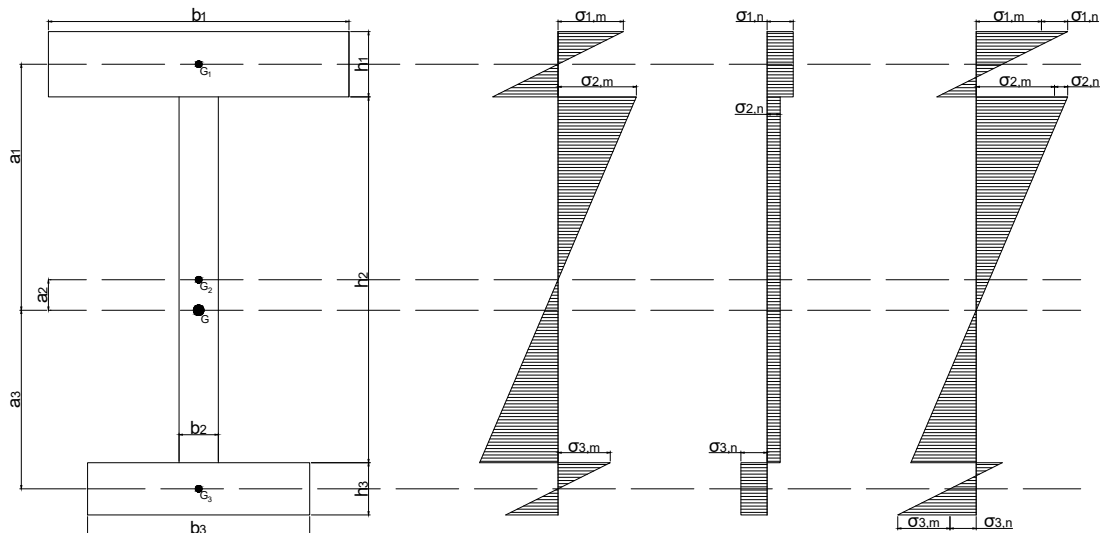


FIGURE 2.10 – Distribution des contraintes dans une section assemblée mécaniquement

La figure 2.10 représente bien l'influence des connecteurs sur les contraintes internes. En effet, une poutre composée de lames fonctionnant individuellement, sans organe d'assemblage, présenterait un diagramme des contraintes parfaitement symétrique. Or, dans le cas où les lames sont assemblées et travaillent ensemble, un effort purement axial est transféré de lame en lame par le connecteur.

La partie supérieure de la poutre subit alors la compression provenant des parties inférieures ce qui décale horizontalement le diagramme vers le côté en traction. Le phénomène inverse est observé dans la partie inférieure de la poutre.

La méthode donne les formules pour calculer les deux contraintes dues au moment (M) :

$$\sigma_{i,n} = \frac{\gamma_i E_i a_i \cdot M}{(EI)_{eff}} \quad (2.18)$$

$$\sigma_{i,m} = \frac{0,5 \cdot E_i h_i \cdot M}{(EI)_{eff}} \quad (2.19)$$

En revanche, le critère de dimensionnement n'est pas spécifié. Selon un document du CSTC concernant les planchers bois-béton [23], il est nécessaire de vérifier la contrainte normale totale et la flexion composée dans chaque lame (simplification à l'annexe C).

- Compression maximale : $\sigma_{i,c,d} = \sigma_{i,m} + \sigma_{i,n} \leq f_{c,0,d}$
- Traction maximale : $\sigma_{i,t,d} = \sigma_{i,m} - \sigma_{i,n} \leq f_{t,0,d}$
- Flexion composée :
 - Pour les lames en flexion et compression : $\frac{\sigma_{i,m}}{f_{md}} + \frac{\sigma_{i,n}}{f_{c,0,d}} < 1$
 - Pour les lames en flexion et traction : $\frac{\sigma_{i,m}}{f_{md}} - \frac{\sigma_{i,n}}{f_{t,0,d}} < 1$

2.3.2 | Analyse

Le cas qui va nous intéresser est celui où deux lames en bois de même classe de résistance et de même section sont assemblées à l'aide de plaques métalliques identiques, d'aire efficace A_{ef} et d'entraxe s . C'est dans cette configuration, représentée à la figure 2.11, que seront testées les poutres assemblées mécaniquement en laboratoire.

En considérant alors 2 lames avec :

$$E_i = E \quad A_i = A \quad I_i = I \quad K_i = K \quad L_i = L \quad h_i = h \quad s_i = s$$

l'expression générale 2.15 se simplifie comme ceci :

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^2 (EI + \gamma_i EA a_i^2) \quad (2.20)$$

$$\gamma_1 = \left(1 + \pi^2 EA \frac{s}{KL^2}\right)^{-1} \quad \text{et} \quad \gamma_2 = 1 \quad (2.21)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{h}{2} - a_2 \\ a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot h}{\gamma_1 + \gamma_2} \end{cases} \quad (2.22)$$

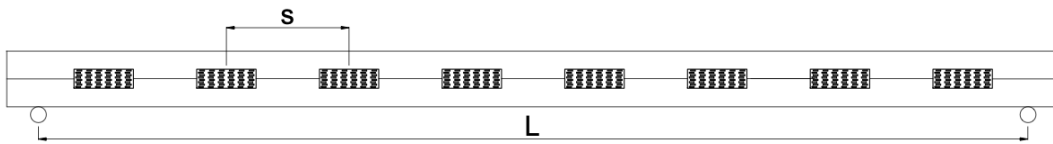


FIGURE 2.11 – Poutre assemblée mécaniquement considérée pour l'analyse

À partir de là, il est intéressant de faire varier l'entraxe s et l'aire A du connecteur pour mieux cerner l'influence de ces paramètres sur les capacités de la poutre.

Influence de l'entraxe

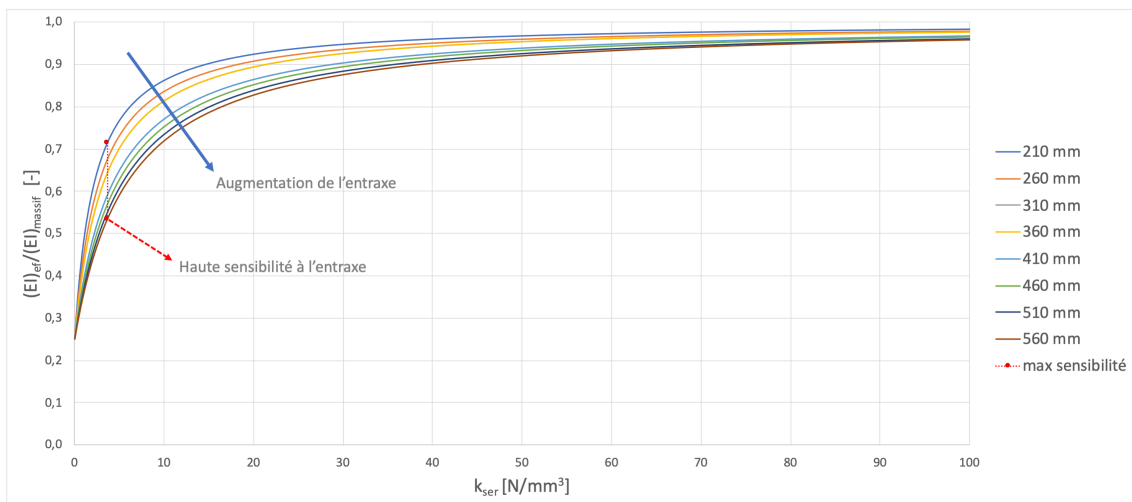


FIGURE 2.12 – Synthèse graphique de l'annexe B de l'Eurocode 5 pour plusieurs entraxes entre les organes d'assemblage

Grâce à un programme en *Visual Basic*, permettant d'obtenir la rigidité efficace en fonction du module de glissement K_{ser} , l'influence de la position des connecteurs le long de la poutre composite a pu être représentée à la figure 2.12.

La première chose à noter est que ces courbes convergent pour des valeurs limites du module de glissement, vers 0 et l'infini. Cette tendance générale peut être physiquement expliquée.

En effet, quand le K_{ser} prend des valeurs très grandes, cela signifie que le moyen d'assemblage offre une très grande rigidité. Dans ce cas, un seul organe mécanique pourrait assurer parfaitement la connexion et donc l'entraxe n'a plus d'influence.

Le phénomène inverse est observé pour les faibles valeurs du K_{ser} . Peu importe l'entraxe, l'apport de rigidité fournie par un seul connecteur supplémentaire devient négligeable. La valeur limite pour les petits modules de glissement tend vers 25%. Ce pourcentage représente le rapport entre la rigidités d'une poutre composée de lames non solidaires et la rigidité de son homologue en bois massif. Ces deux configurations sont représentées à la figure 2.13 et le rapport vaut bien :

$$\frac{(EI)_{ef}}{(EI)_{massif}} = \frac{2 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12}}{\frac{b \cdot (2h)^3}{12}} = \frac{1}{4} \quad (2.23)$$

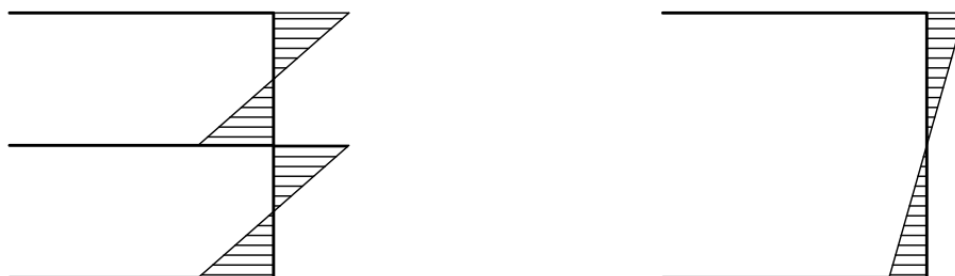


FIGURE 2.13 – Répartition des contraintes dans une poutre à lames non solidaires (gauche, $k_{ser} = 0$) et une poutre en bois massif (droite, $k_{ser} = \infty$)

Pour finir, il faut noter qu'il existe un état intermédiaire où la rigidité est bel et bien influencée par l'entraxe avec une sensibilité maximale pour des modules de glissement avoisinant les $3,65 [N/mm^3]$.

Influence de la surface du connecteur

Ce paramètre n'apparaît pas directement dans les formules mais est pourtant bien responsable de la rigidité de la connexion entre les lames. En effet, la surface efficace du connecteur A_{ef} [mm^2] multipliée au k_{ser} [N/mm^3] donné par les fabricants permet d'obtenir le module de glissement K_{ser} [N/mm] utilisé par la méthode Gamma.

La même analyse, réalisée en faisant varier cette fois la taille des plaques métalliques embouties, débouche aux mêmes observations concernant les cas limites, vers 0 et l'infini. Par contre, l'aire du connecteur semble avoir une nette influence sur la rigidité, en particulier pour des valeurs du module de glissement proche de $1,6$ [N/mm^3].

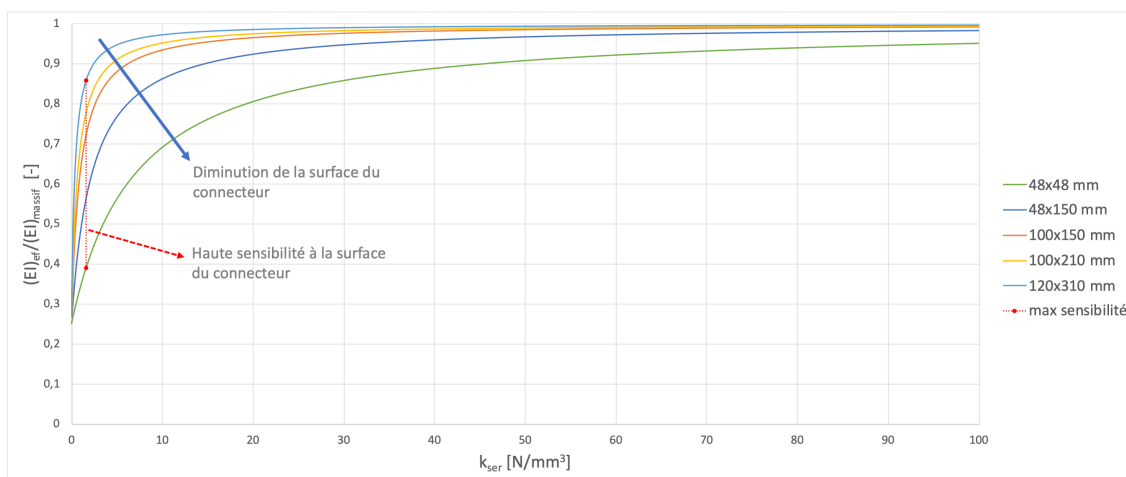


FIGURE 2.14 – Synthèse graphique de l'annexe B de l'Eurocode 5 pour plusieurs tailles de plaques métalliques embouties

2.4 | Modèle numérique SCIA

L'utilisation de modèles numériques est presque devenu une habitude dans le domaine de la construction. Il est dès lors intéressant de modéliser une poutre en bois lamellé-agrafé et voir la validité de ce modèle au regard de la réalité, ou encore d'autres modèles.

Le logiciel utilisé dans ce travail est *SCIA Engineer*. Par sa facilité d'utilisation et ses larges possibilités, il sera intéressant de faire varier les paramètres de ce modèle pour mieux comprendre le comportement des poutres mécaniquement connectées.

2.4.1 | Description du modèle

Dans le processus d'élaboration d'un modèle numérique, il faut être très rigoureux sur la connection entre les éléments. Un mauvais blocage des degrés de liberté conduit à un modèle qui ne représente pas la réalité. Il est donc important de bien préciser comment ce modèle a été pensé.

2.4.1.1 | Les lames de bois

Les poutres testées en laboratoire seront composées de 2 lames en bois superposées sur chant. Ces lames seront de section 60×70 [mm], de classe de résistance C24 et franchiront une portée de 2500 [mm] entre les appuis du banc d'essai. Ces 2 lames se retrouvent dans le modèle, représentées par deux longues barres horizontales. Pour simuler l'interaction entre les lames de bois, des éléments verticaux infiniment rigides en acier sont positionnés à intervalles réguliers pour qu'elles collaborent dans les déformations verticales. Des rotules sont bien sûr utilisées pour ne pas restreindre le glissement entre ces lames. Ce sera le rôle des connecteurs métalliques de restreindre ce mouvement horizontal entre les lames.

Concernant les appuis, celui de gauche est rotulé et celui de droite est un appui rotulé à rouleau pour permettre le glissement longitudinal de la poutre.

Une représentation globale du modèle se trouve à la figure 2.15.

2.4.1.2 | Les charges

Pour des raisons qui seront expliquées plus tard, la poutre sera soumise à un essai de flexion 4 points. Deux charges ponctuelles sont placées symétriquement vis-à-vis du centre de la poutre à 840 [mm] d'inter-distance.

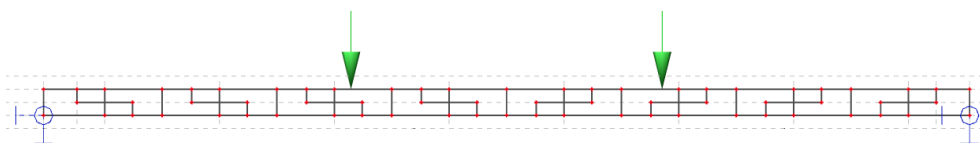


FIGURE 2.15 – Représentation globale du modèle numérique SCIA

2.4.1.3 | Les connecteurs

Le rôle du connecteur métallique est de limiter au maximum le glissement relatif entre les deux pièces de bois. Pour modéliser cette propriété de la poutre connectée, deux plus petits bras, en acier infiniment rigides, sont attachés localement aux barres supérieures

et inférieures représentant les lames de bois. Une troisième barre horizontale en acier vient ensuite les relier pour limiter le déplacement horizontal entre les lames. Des rotules sont utilisées pour limiter le rôle de cette barre à la restriction du glissement. Il sera plus ou moins restreint en fonction de la rigidité de cette troisième barre horizontale qui fera office de ressort dans le modèle.

Connaissant la direction des déplacements relatifs entre les lames, les connecteurs sont modélisés de manière à toujours avoir la troisième barre en traction et ainsi éviter l'instabilité d'éléments élancés en compression. Un aperçu local sur le centre de la poutre se trouve en figure 2.16

Pour utiliser le modèle, un lien doit être fait entre la rigidité K_{ser} réellement observée sur un connecteur et la rigidité de la barre "ressort" dans le modèle. Par la loi de Hooke :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.24)$$

$$\frac{N}{A} = E \cdot \frac{x}{L} \quad (2.25)$$

Avec :

- $\sigma [MPa]$: la contrainte dans la barre d'acier
- $E = 210000 [MPa]$: le module de Young de l'acier
- $\varepsilon [-]$: le déplacement relatif
- $N [N]$: l'effort transisant dans la barre d'acier
- $A = 50,27 [mm^2]$: L'aire de la barre d'acier. La plus petite section proposée par SCIA a un diamètre de 8 [mm].
- $L = 150 [mm]$: La longueur de la barre d'acier. Cette longueur a été choisie au regard de la taille du connecteur (150x50 [mm]).

On peut donc écrire :

$$N = \underbrace{\frac{E \cdot A}{L}}_{K_{ser}} \cdot x \quad (2.26)$$

On peut maintenant connaître la valeur du module de Young (E), à donner aux barres "ressort" du modèle, afin qu'elles modélisent, au mieux, le K_{ser} observé en réalité.

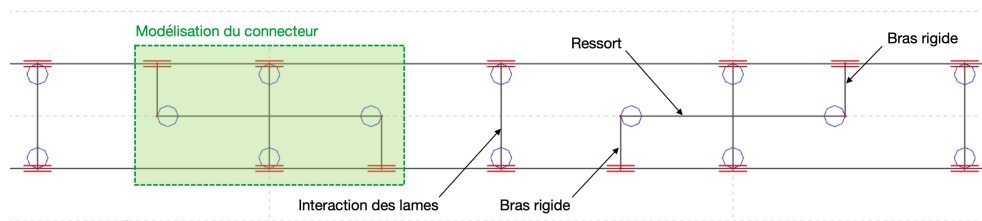


FIGURE 2.16 – Zoom sur le modèle SCIA

2.4.2 | Vérification de la fidélité du modèle

Il est important de s'assurer que le modèle donne des résultats cohérents avant de l'utiliser. Afin de s'en assurer, trois situations vont être analysées. Aussi, seule une analyse des déformations sera faite étant donné que d'autres analyses de ce modèle se trouvent dans le mémoire de Corto Lahaye [38] et que seule une comparaison au niveau des déformations sera faite avec la partie expérimentale.

2.4.2.1 | Lames non-collaborantes

Ce premier cas veut s'assurer que l'ajout du modèle du connecteur n'influence pas les résultats. Une simple poutre composée de deux lames non-collaborantes est comparée avec le modèle complet de la poutre où les barres "ressorts" ont une rigidité nulle. On peut voir à la figure 2.17 que le même déplacement est observé, au centième de millimètre près, lorsque les deux poutres sont soumises aux mêmes charges.

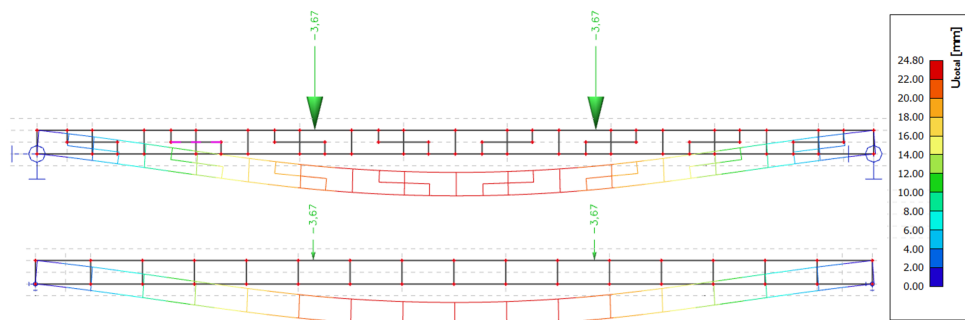


FIGURE 2.17 – Analyse du modèle pour des lames non-collaborantes

2.4.2.2 | Bois massif

Intuitivement, utiliser des ressorts ayant une rigidité infinie dans le modèle devrait conduire aux mêmes déformations qu'une poutre en bois massif de section 60×140 [mm]. Pourtant une différence de 5% est observée entre la déformation des deux poutres. Cette

observation rejoint celle faite par Corto Lahaye [38] qui note une différence de 10% lorsque les poutres sont soumises à une charge répartie.

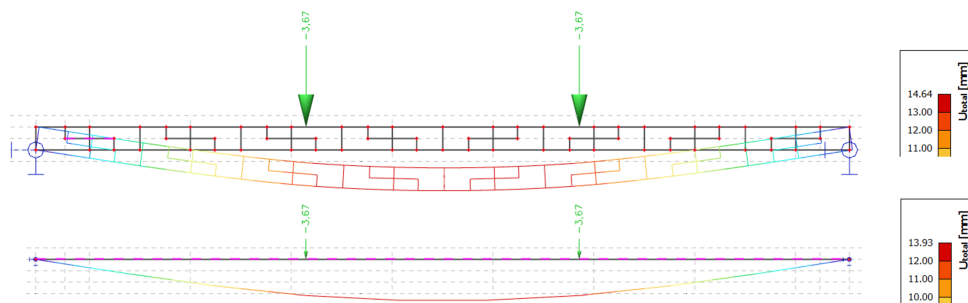


FIGURE 2.18 – Analyse du modèle pour des lames totalement collaborantes

2.4.2.3 | Méthode Gamma

Il est déjà intéressant à ce stade de confronter les modèles. La méthode Gamma donnée dans l'annexe B de l'*Eurocode 5* et décrite à la section précédente 2.3, prédit une déformation semblable au modèle *SCIA*. La méthode Gamma est un peu plus optimiste pour une poutre soumise aux mêmes conditions et en grande déformation ($\ell/150$). Ainsi, la flèche obtenue est inférieure de 2% à celle calculée avec ce modèle numérique *SCIA*.

Après ces 3 situations, le modèle *SCIA* est considéré comme valide.

2.5 | Modèle PAMIR

Le logiciel de calcul fourni par la société *MITEK* permet lui aussi de prédire le comportement de nos poutres en bois lamellé-agrafé. L'avantage d'utiliser ce logiciel est qu'il est tout à fait dédié à ce genre de calcul d'assemblages. Ce modèle sera donc un point de comparaison fort avec les essais expérimentaux.

2.5.1 | Description du modèle

Comme pour le modèle *SCIA* il est important de bien justifier chaque élément du modèle afin de bien cerner son comportement et pouvoir faire des rapprochements pertinents avec la réalité ou d'autres modèles.

2.5.1.1 | Les lames de bois

Les deux lames de bois sont très clairement visibles dans *PAMIR*. Les sections restent les mêmes à savoir 60×70 [mm] chacune. Elles sont mises sur chant et sont un peu plus longues que les 2500 [mm] de portée à cause des conditions d'appuis du modèle.

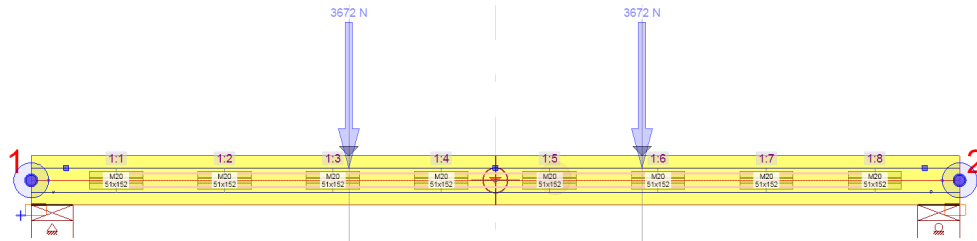


FIGURE 2.19 – Représentation globale du modèle *PAMIR*

2.5.1.2 | Les appuis

Pour éviter la modélisation des zones de contact, le logiciel applique la règle de la "zone 45°". Cette règle est tirée d'un document d'application en France : le DTU 31.3. En suivant cette règle, l'appui considéré se situe au niveau de l'intersection entre la fibre neutre de l'élément et la droite partant à 45° du point le plus intérieur de la zone de contact.

Pour imposer une portée de 2500 [mm], une pièce additionnelle doit être utilisée pour créer une entaille dans la lame de bois inférieure et forcer le logiciel à déplacer la zone de contact. Cette manipulation est visible à la figure 2.20.

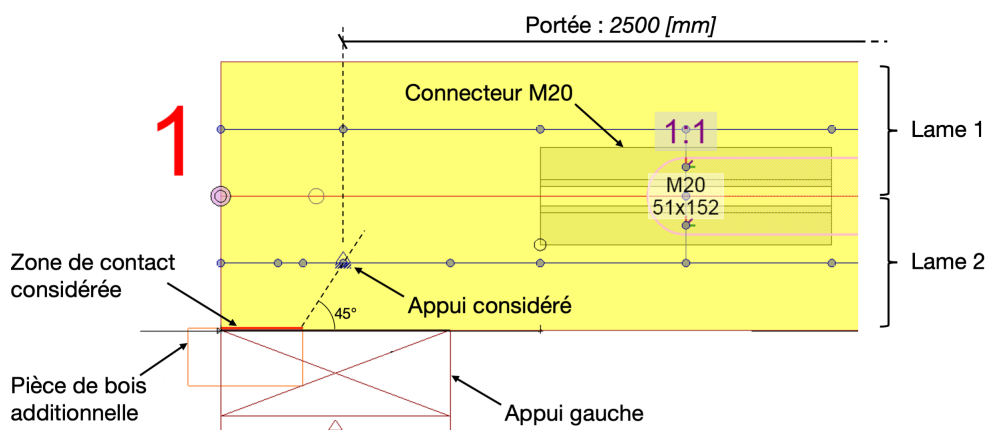


FIGURE 2.20 – Représentation au droit des appuis du modèle *PAMIR*

2.5.1.3 | Les charges

Le logiciel étant destiné au calcul des structures en bois, il prend en compte l'utilisation des coefficients qui lui sont spécifiques. C'est le cas du coefficient k_{def} qui permet de considérer les effets de fluage des éléments sous charges permanentes. Il intervient selon la paragraphe §2.3.2.2 de l'Eurocode 5 au niveau du K_{ser} de la manière suivante :

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1 + k_{def})} \quad (2.27)$$

La rigidité de la poutre se voit alors réduite considérablement. La solution envisagée est donc d'utiliser une charge de vent puisque son caractère instantané permet de ne pas prendre en compte les effets de fluage. C'est également dans ce sens qu'ont été conçus les autres modèles.

2.5.1.4 | Vérification de la fidélité du modèle

Les déformations estimées par ce modèle sont les plus défavorables. On note une flèche supérieure de 14% vis-à-vis du modèle *SCIA* et supérieure de 16% par rapport au prévision de la méthode Gamma.

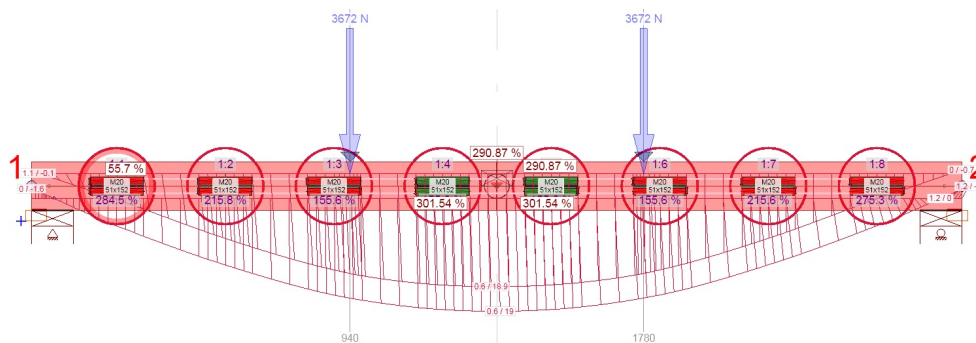


FIGURE 2.21 – Représentation des déformations dans le modèle *PAMIR*

Remarque : la figure 2.21 montre des taux de travail supérieurs à 100%. Cela vient du fait que le fabricant *MITEK* suit les règles relatives aux fermes assemblées par connecteurs (Eurocode 5 §9.2.2). Le recouvrement du connecteur sur une lame de bois aurait dû être d'au moins 40 [mm], ce qui n'était pas possible avec les connecteurs de type M20. Ceci n'influence cependant pas le calcul aux états limites de services dans *PAMIR*.

2.6 | Modèle de calcul de Foschi

Pour ne pas se limiter à un comportement linéaire, il est intéressant d'approcher le comportement non-linéaire de ces connexions bois. Parmi la multitude de modèles existant, c'est celui de *Foschi* qui sera retenu.

Ce modèle apparaît de manière récurrente dans les travaux concernant la rigidité des assemblages bois-béton par connecteurs métalliques [1] [36]. De plus, il est descriptif. Cela signifie que l'on peut, sur base d'un nombre fini de courbes expérimentales, déterminer les trois paramètres qui régissent le modèle :

$$P(\Delta) = (p_0 + k_1 \cdot \Delta) \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-k_0 \cdot \Delta}{p_0}\right)}\right) \quad (2.28)$$

Ces trois paramètres sont :

- p_0 : La charge de plastification, intersection des pentes k_0 et k_1 .
- k_0 : La rigidité initiale du connecteur
- k_1 : La rigidité résiduelle pour les grands déplacements

Ce modèle présenté en figure 2.22 sera ajusté grâce aux courbes d'essais et permettra ensuite d'avoir une estimation de la relation contrainte-déformation des éprouvettes. Il pourrait ensuite permettre d'estimer le comportement des assemblages par connecteurs surfaciques dans le cadre d'essais futurs.

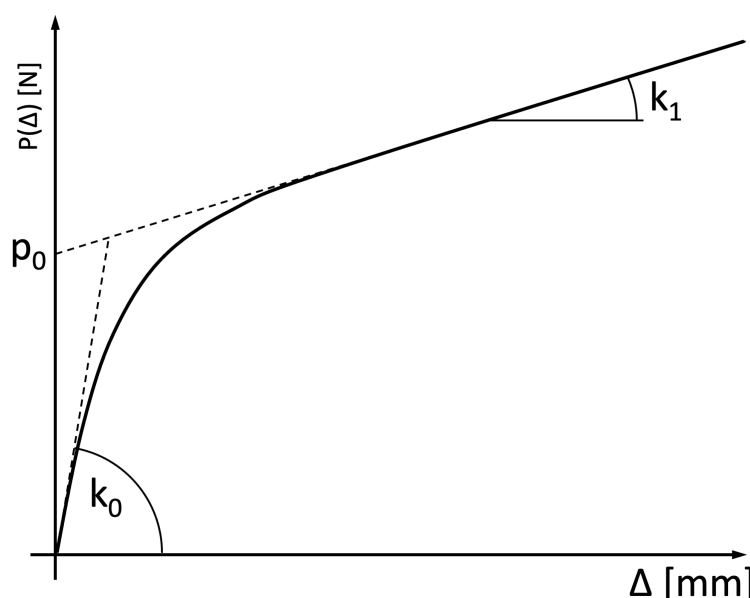


FIGURE 2.22 – Représentation graphique du modèle de *Foschi* (1974) [36]

Analyse expérimentale

L'objectif de cette partie est de générer des résultats expérimentaux qui permettront de comprendre le comportement réel des assemblages par plaques métalliques embouties. Les expressions théoriques, ainsi que les différents modèles numériques décrits jusqu'ici, permettront de porter un regard critique sur les résultats. Grâce aux essais, il sera possible d'estimer le potentiel des connecteurs et de déterminer les paramètres qui influencent le module de glissement K_{ser} .

Cette partie expérimentale décrira le déroulement de trois grandes campagnes de test. La première vise à déterminer le module de glissement des connecteurs surfaciques grâce à des essais de traction. La seconde, quant à elle, vise à déterminer un module de glissement en cisaillement, de manière à pouvoir réaliser la troisième campagne. Cette dernière a pour objectif de valider l'utilisation de ce type de connecteur pour la fabrication d'éléments en bois de forte section. Pour cela, des poutres assemblées avec des plaques métalliques embouties seront mises sur banc d'essai afin de mesurer leurs performances.

En premier lieu, le contexte et les différents paramètres d'essais seront présentés, pour ensuite, décrire en détail le déroulement des essais et finir avec une interprétation des résultats.

3.1 | Essais préliminaires

Avant de commencer la campagne expérimentale, il était important de bien cibler les essais pertinents à réaliser. Pour cela, j'ai pu compter sur M. Monhonval qui, en plus de ses précieux conseils, mettait à ma disposition son atelier, équipé d'une presse hydraulique 20T de la marque *TWIN BUSCH*. Bien que la précision des moyens de mesure n'était pas aussi pointue que les machines d'essais qui seront utilisées plus loin dans ce document, cette presse a permis de fabriquer les éprouvettes et de mettre en lumière les pistes à exploiter lors des essais en laboratoire. Cette façon de procéder a permis de ne pas mobiliser le matériel et les équipes du laboratoire dans cette première phase de recherche.

3.1.1 | Variables

La première question à se poser pour la détermination du module de glissement est : quels sont les paramètres qui l'influencent ?

Le premier paramètre qui semblait évident était la **densité** du bois. En effet, le tableau 7.1 de l'*Eurocode 5* fournit déjà des formules empiriques pour certains types d'organes d'assemblage, qui dépendent bien de la densité moyenne ρ_m . Ces formules sont reprises à la figure 3.1. De plus, on remarque lors de l'enfoncement des connecteurs dans le bois, que la force nécessaire dépend de la densité. Ce qui est également un bon indicateur du rôle que joue cette densité.

Étant donné que le bois est un matériau très hétérogène, l'influence de la densité aurait pu être visible en ne considérant qu'une seule essence de bois. Toutefois, pour couvrir une plus large plage de densité, le choix de varier l'essence de bois a été fait. En se basant sur les essences présentes principalement en Wallonie et en comparant leurs caractéristiques, 3 essences se démarquent :

- L'épicéa : Très utilisée dans la construction, cette essence a déjà été correctement caractérisée lors du précédent mémoire [38] et il est intéressant de pouvoir l'enrichir davantage.
- Le chêne : Il est utilisé dans la construction depuis un certain temps. Les charpentes de certains vieux châteaux peuvent, encore aujourd'hui, témoigner de sa bonne durabilité. Il est caractérisé par une densité élevée et est considéré comme un bois "dur" par rapport à l'épicéa.
- Le hêtre : Même s'il est moins fréquemment utilisé comme élément de construction, c'est également un bois dense qui pourra être comparé au chêne.

Tableau 7.1 — Valeurs de K_{ser} pour les organes d'assemblage et les assembleurs en N/mm dans le cas des assemblages bois-bois et bois-panneaux

Type d'organe d'assemblage	K_{ser}
Broches Boulons sans jeu ^{a)} Tire-fonds Pointes (avec avant-trous)	$\rho_m^{1,5} d/23$
Pointes (sans avant-trous)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$
Agrafes	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/80$
Anneaux type A conformément à EN 912 Anneaux type B conformément à EN 912	$\rho_m d_c/2$
Crampons Crampons types C1 à C9 conformément à EN 912 Crampons types C10 & C11 conformément à EN 912	$1,5 \rho_m d_c/4$ $\rho_m d_c/2$
<i>a) Le jeu doit être ajouté spécifiquement à la déformation.</i>	

FIGURE 3.1 – Tableau reprenant les valeurs de K_{ser} définies par l'Eurocode 5

Les modules de glissement, repris à la figure 3.1, sont également fonction de la taille de l'organe d'assemblage. Par exemple, le diamètre pour les tiges. On trouve également dans la littérature d'autres formules empiriques qui font intervenir le diamètre du connecteur tige, comme l'expression de Turrini et Piazza [58] :

$$K_{ser, Turrini\&Piazza} = 0,08 \cdot E_{bois} \cdot d$$

ou encore de Ceccotti [20] :

$$K_{ser, Ceccotti} = 0,125 \cdot E_{bois} \cdot d$$

qui concernent la collaboration des assemblages bois-béton.¹

Ceci est la raison qui nous a poussés, au départ, à considérer plusieurs types de connecteur lors des essais préliminaires. En effet, les caractéristiques géométriques ainsi que la **densité des dents**, varient avec le type du connecteur. Cet aspect devra donc, d'une façon ou d'une autre, être pris en compte dans la formule du module de glissement K_{ser} .

1. On remarque que ces deux expressions considèrent le module de Young plutôt que la densité du bois. Toutefois, un lien très fort lie ces deux caractéristiques. L'influence sur le module de glissement doit, dans ce cas, se faire ressentir de la même manière.

Pour finir, M. Monhonval a souhaité apporter une toute nouvelle dimension à ce mémoire en changeant la position des connecteurs. En effet, le mémoire précédent considérait un cas unique où les connecteurs se trouvaient entre les lames de bois. Comme décrit jusqu'ici dans la partie théorique, les connecteurs seront cette fois positionnés à l'extérieur de l'assemblage, sur les faces latérales.

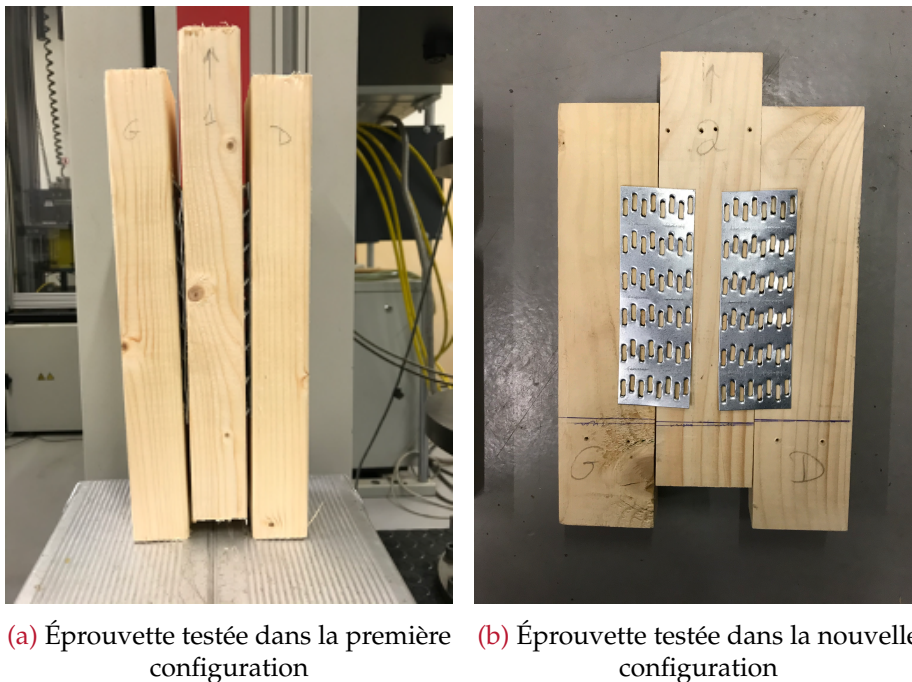


FIGURE 3.2 – Représentation des deux configurations d'assemblage possibles

Comme déjà amorcé dans la première partie, l'**inclinaison de la force** sollicitant le connecteur par rapport au fil du bois et par rapport à l'axe du connecteur, est également susceptible de modifier les performances de l'assemblage. Ceci nous a bien été confirmé par le fabricant de connecteur *MITEK*. De plus, selon lui, une attention particulière devrait être accordée à la **taille** du connecteur. Un connecteur long et étroit ne répond pas de la même façon qu'un connecteur court et large.

Pour résumer, le module de glissement dépendrait de 4 paramètres :

- ρ_m : la densité moyenne des pièces de bois constituant l'assemblage
- d : la densité des dents du connecteur
- α, β : les orientations de la force par rapport au connecteur et au bois.
- L/l : le rapport entre la longueur et la largeur du connecteur.

$$K_{ser} = f(\rho_m, d, \alpha, \beta, L/l) \quad (3.1)$$

3.1.2 | Les limites

De tous ces paramètres, certains ne seront pas considérés. La première raison évidente est le temps. Ensuite, nous avons pu observer pendant les pré-tests que certaines configurations n'étaient simplement pas réalisables.

La première limite concerne l'enfoncement des connecteurs de type *BOVA* dans les bois "durs" tels que le chêne et le hêtre. Les dents de ce type de connecteur étant plus élançées, il est difficile de les enfoncer sans les voir se plier. D'autres essences ont été envisagées, comme l'érable, qui est également un bois à haute densité. Malheureusement, le même phénomène s'est manifesté comme le montre la figure 3.3.



FIGURE 3.3 – Comportement des connecteurs de type *BOVA* dans du : hêtre (gauche) et de l'érable (droite)

Comme abordé plus haut, la nouvelle configuration (figure 3.2b) requiert des connecteurs avec des dents sur une seule face (uni-face). L'autre, où les connecteurs se situent entre les pièces de bois (figure 3.2a), nécessite des connecteurs équipés de dents sur chacune de ses faces (bi-face). Les connecteurs doivent, selon le cas, se trouver sous leur forme uni-face ou bi-face.

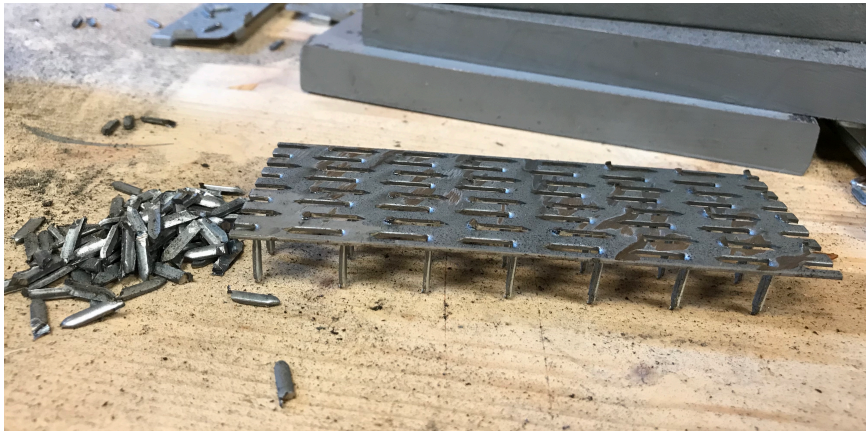


FIGURE 3.4 – Modification d'un connecteur de type *BOVA* pour créer un uni-face

Ceux de type *BOVA*, bi-faces à l'origine, peuvent être modifiés pour donner des connecteurs uni-faces comme montré à la figure 3.4. Les connecteurs uni-faces devront, quant à eux, être fixés dos à dos pour pouvoir obtenir un bi-face.

Pour les fixer, deux moyens ont été envisagés :

- La **soudure par point** [56] : Cette technique est assez courante et consiste à faire passer un courant haute tension entre deux électrodes en cuivre, situées de part et d'autre des plaques à souder dos à dos. Le métal, ayant une moins grande conductivité que les électrodes, va résister au courant tentant de le traverser et va, par conséquent, chauffer par effet Joule. La température peut atteindre les 1000°C et la pression exercée par les électrodes sur l'acier va entraîner la fusion des deux plaques d'acier pour ne former qu'un point de soudure.
- La **soudure par bouchon** : Ce type de soudure se met en oeuvre à l'aide de moyens plus classiques. La première étape est de percer une des deux plaques aux endroits nécessitant une soudure. Ensuite, les plaques sont superposées dos à dos et le trou réalisé au préalable est rempli d'un cordon de soudure, fixant les deux plaques ensemble.

Grâce à une soudeuse par point mise à notre disposition à l'*Institut Saint-Joseph* ainsi qu'à l'*École des Forges* de Ciney, des soudures par points ont pu être réalisées. Voyant également la possibilité d'automatiser ces soudures pour de la production à grande échelle, la soudure par point a été retenue.

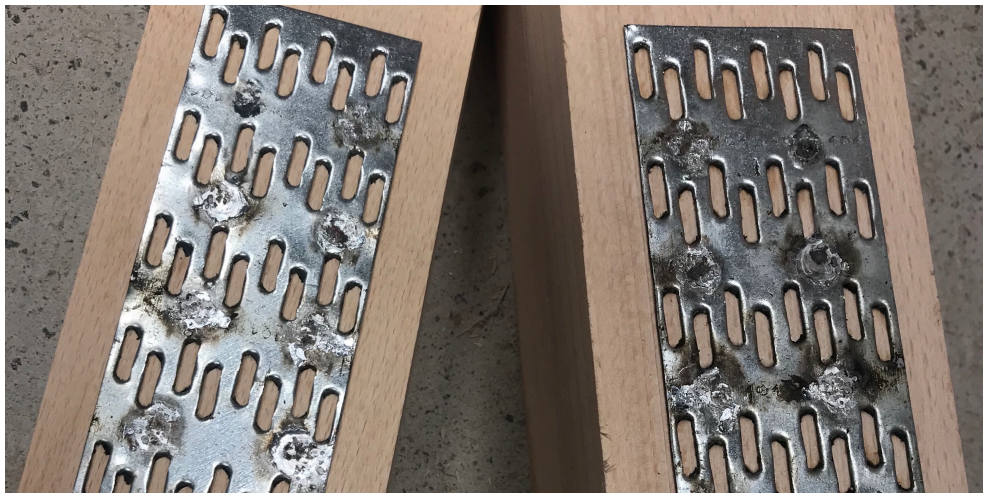


FIGURE 3.5 – Rupture des soudures par points

Attention : La machine permettant de souder par point nécessite un réglage fin, ainsi qu'un soudeur expérimenté. Dans le cas contraire, les ruptures se feront aux droits des soudures comme montré à la figure 3.5. Cela met alors totalement en péril la batterie de tests.

3.1.3 | Choix d'étude

Après avoir mis en évidence toutes ces pistes à explorer, il était nécessaire de choisir la direction qu'allait prendre ce travail. La réflexion était la suivante :

Premièrement, les connecteurs de type *BOVA* ne permettent que des essais sur des bois de faible densité. Voulant, dans un premier temps, mesurer les effets de la densité du bois sur la rigidité, ce connecteur a été écarté.

Deuxièmement, les connecteurs de type *MITEK* et *WOLF* étant très semblables au niveau de leur taille et de la densité de leurs dents, ils ne permettent pas d'étudier l'influence des caractéristiques propres au connecteur sur la rigidité.

Par conséquent, seule la corrélation entre le module de glissement K_{ser} et la densité du bois sera étudiée.

$$K_{ser} = f(\rho_m) \quad (3.2)$$

Pour finir, ayant pu compter sur leur logiciel *PAMIR* et sur leur précieux soutien dans la phase d'avant test, les connecteurs qui ont été retenus sont ceux de la marque *MITEK*.

3.2 | Essais de traction en laboratoire

Les premiers essais entrepris concernent un assemblage simple, pris entre deux mors, sur lequel on tire. Cette configuration d'éprouvette permet d'obtenir un effort de traction pure et uniforme le long des connecteurs et des pièces de bois.

Cette éprouvette assez minimaliste permet de mettre uniquement en évidence le glissement du connecteur dans la direction de son axe principal x . Cette situation est alors idéale pour la détermination du module de glissement k_{ser} .

Un système de fixation entre l'éprouvette et les mors a été réalisé sur mesure par les équipes du *LEMSC*, pour fixer l'éprouvette aux mors de la presse. D'un côté, elle se fixe à l'éprouvette grâce aux broches dimensionnées avec la théorie de *Johansen* concernant les assemblages à base de tiges. De l'autre côté, un cylindre métallique sort pour permettre au mors d'avoir une bonne prise sur l'éprouvette.

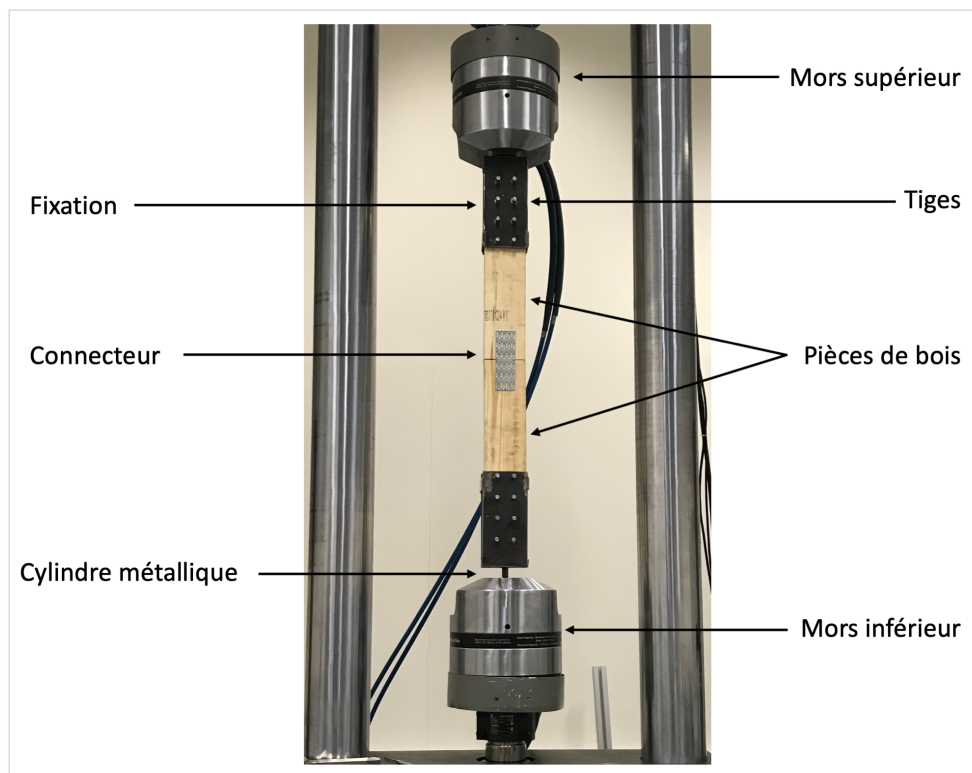


FIGURE 3.6 – Illustration de l'essai de traction

Chaque éprouvette a été fabriquée à l'aide d'un laser, permettant d'aligner précisément les deux pièces métalliques, les deux pièces de bois, ainsi que les deux connecteurs la composant. Des photos de la préparation sont reprises à l'annexe E.

Les essais se déroulent au *laboratoire des essais mécaniques, structure et génie civil*. Ce laboratoire, plus communément appelé le *LEMSC*, est sous la direction du Pr. Donneux. J'ai également pu compter sur l'aide de Quentin Mestrez pour me guider pendant mes essais.

3.2.1 | Préparation de l'éprouvette

Pour commencer, il faut se fournir en bois. Les 3 essences de bois ont été achetées dans la province de Namur :

- *Promaco*, à Ciney pour l'épicéa
- *Hontoir & Fils*, à Faulx-les-Tombes pour le chêne
- *Vica-Bois*, à Morville pour le hêtre

Ensuite, le bois a dû être usiné, pour que les pièces de bois qui composeront l'éprouvette soient en accord avec les prescriptions de la norme *EN 1075*. Cette norme, relative aux essais d'assemblages réalisés à l'aide de plaques métalliques embouties, exige :

- Une distance d'au moins 10 [mm] entre un connecteur et les rives du bois
- Un écart de 2 [mm] entre les pièces de bois
- Une distance de 200 [mm] entre le connecteur et le mors
- Des pièces assemblées d'au moins 35 [mm] d'épaisseur pour garantir un espace entre les dents des deux connecteurs opposés

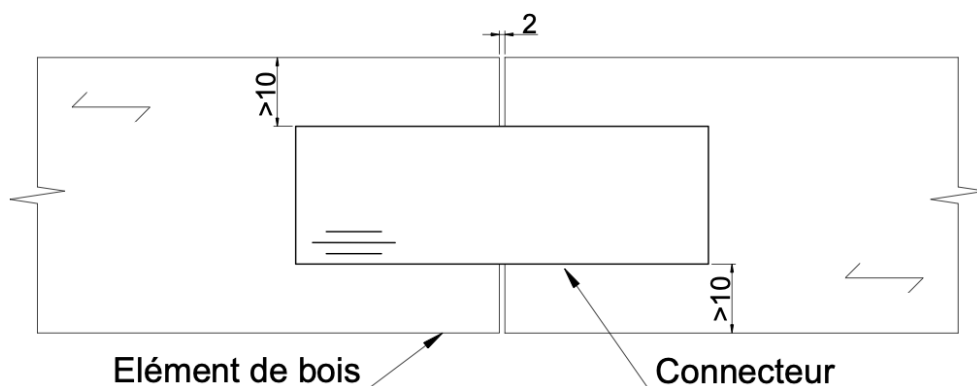


FIGURE 3.7 – Prescription de la norme *EN 1075*

Pour ne pas générer trop de déchets sur les sections généralement trouvées dans le commerce, les deux pièces de bois composant l'éprouvette auront les dimensions 60x100x300 [mm].

Une fois mis à dimension, les bois ont été entreposés dans un local à faible taux d'humidité. Cela a permis de faire progressivement descendre l'humidité des pièces de bois aux alentours de 12%, comme demandé par la normalisation.

Pour rappel, l'objectif est d'étudier la rigidité de l'assemblage en fonction de la densité du bois. Les pièces ont donc été cubées et pesées de manière à déterminer leur densité. Grâce à cela, le bois a pu être trié, de manière à grouper par deux les pièces d'une même essence et ayant une densité similaire. Finalement, la densité considérée comme représentative de l'éprouvette sera la moyenne géométrique des densités des deux pièces de bois qui composent l'éprouvette. Cette règle vient du paragraphe §7.1 de l'*Eurocode 5* :

$$\rho_{\text{épreuve}} = \sqrt{\rho_{\text{bois},1} \cdot \rho_{\text{bois},2}} \quad (3.3)$$

Par essence, 10 éprouvettes seront mises à l'essai. Le tableau 3.1 résume les caractéristiques moyennes des 3 essences. Un tableau plus complet se trouve également à l'annexe D.

Densité	Épicéa	Chêne	Hêtre
Moyenne [kg/m^3]	418,67	711,36	752,94
Cv [%]	8,8	5,6	2,1
Humidité moyenne [%]	10,43	11,46	12,18

TABLE 3.1 – Tableau de synthèse des propriétés des éprouvettes

Rappel : Le coefficient de variabilité (Cv) représente la dispersion relative des données. Il est calculé en divisant l'écart type (σ), mesure de la dispersion, par la moyenne (μ). Le fait de rapporter la dispersion des données à la valeur moyenne de ces données permet de pouvoir comparer des groupes n'ayant pas les mêmes unités ou d'ordres de grandeur différents. Le bois étant un matériau connu pour sa grande variabilité, il n'est pas rare de rencontrer des coefficients de variabilité de 30%, ce qui n'est pas le cas ici.

3.2.2 | Protocole d'essai

La normalisation définit également le mode opératoire pour l'exécution des essais. La détermination des caractéristiques de résistance et de déformation des assemblages en bois, réalisés avec des éléments de fixation, est décrite par la norme *ISO 6891* [12].

Lors des essais, deux choses seront mesurées. Premièrement, la force appliquée à l'éprouvette, traversant uniformément les deux pièces de bois et les deux connecteurs. Deuxièmement, le déplacement au droit des deux connecteurs métalliques, grâce à deux capteurs *LVDT* reliés à l'ordinateur de contrôle. Le déplacement global de l'assemblage sera représenté par la moyenne des deux déplacements mesurés aux capteurs.

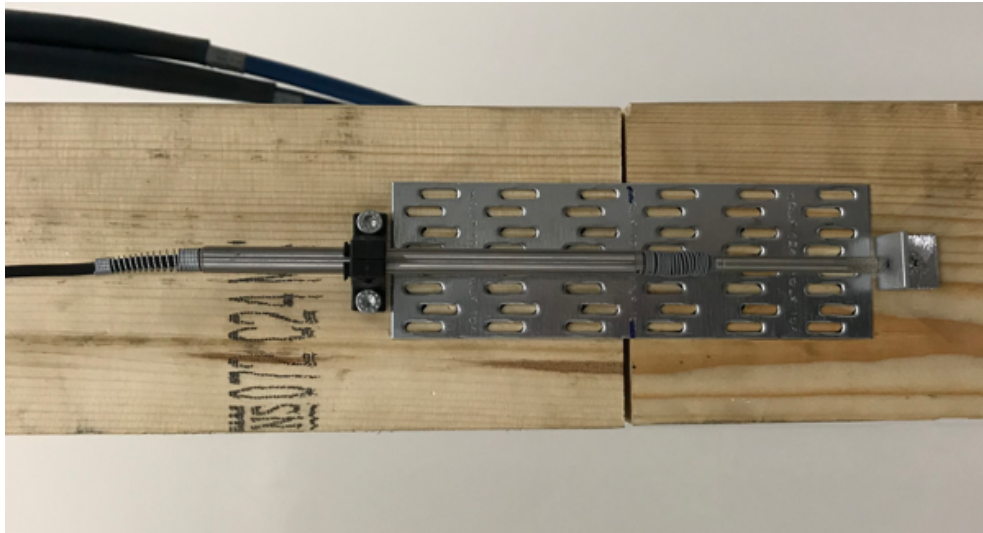


FIGURE 3.8 – Capteur *LVDT* pour mesurer le déplacement sur chaque face de l'assemblage

Comme le montre la figure 3.9, la première étape du protocole est d'estimer la charge de rupture de l'éprouvette (F_{est}). Les points faibles de l'éprouvette se situent au niveau de :

- la section nette du connecteur en acier, au droit de la ligne d'assemblage
- la capacité d'ancrage du connecteur, à la surface de contact entre le bois et le connecteur (voir la capacité d'ancrage à la section 2.1.1)

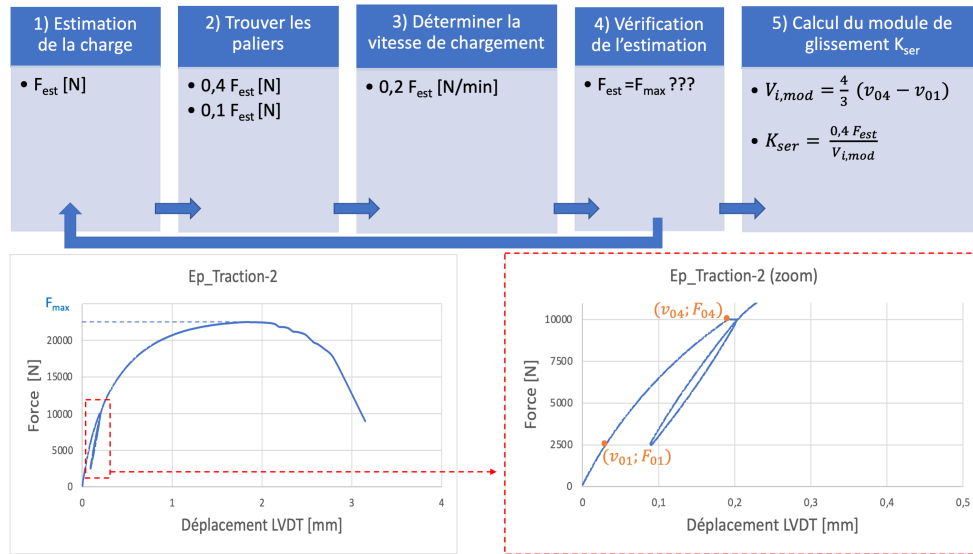


FIGURE 3.9 – Synthèse du protocole tiré de l'ISO 6891

Avec ce type de connecteur, l'assemblage rompt systématiquement à la ligne d'assemblage, au droit de la section nette du connecteur en acier. C'est en tout cas ce qui a été calculé et puis observé pour chaque éprouvette lors des essais.

Le protocole prévoit un palier de chargement, ainsi qu'un palier de déchargement, situés respectivement à 40% et 10% de la force estimée. De plus, la vitesse de chargement appliquée pour les essais est aussi fonction de la force estimée et vaut 20% de celle-ci. Ces valeurs permettent de boucler les étapes 2 et 3 de la figure 3.9 et de lancer l'essai.

À la rupture de l'éprouvette, l'acquisition des valeurs de force et de déplacement permet de tracer les courbes d'essais et de vérifier si la force de rupture a bien été estimée. Pour cela, la force de rupture réelle doit être contenue dans l'intervalle $F_{est} \pm 20\%$. Si ce critère n'est pas respecté, le norme demande alors d'estimer à nouveau cette force de rupture, afin de réadapter les paramètres des essais sur les éprouvettes restantes.

Vient alors la cinquième et dernière étape, celle du calcul de la rigidité :

$$K_{ser} = \frac{0,4 \cdot F_{est}}{\frac{4}{3} \cdot (v_{04} - v_{01})} [N/mm] \quad (3.4)$$

avec :

- $K_{ser} [N/mm]$: Le module de glissement
- $F_{est} [N]$: La force estimée avant l'essai
- $v_{04} [mm]$: Le déplacement qui correspond sur la courbe d'essai à 40% de la force estimée (F_{04})
- $v_{01} [mm]$: Le déplacement qui correspond sur la courbe d'essai à 10% de la force estimée (F_{01})

En manipulant un peu cette expression, on peut obtenir :

$$\begin{aligned}
 K_{ser} &= \left(0,4 \cdot \frac{3}{4}\right) \cdot \frac{F_{est}}{(v_{04} - v_{01})} \\
 &= \frac{0,3 \cdot F_{est}}{(v_{04} - v_{01})} \\
 &= \frac{0,4 \cdot F_{est} - 0,1 \cdot F_{est}}{(v_{04} - v_{01})} \\
 &= \frac{(F_{04} - F_{01})}{(v_{04} - v_{01})} \tag{3.5}
 \end{aligned}$$

Bien plus visuelle, elle permet de se rendre compte que le module de glissement K_{ser} est en fait calculé comme étant la pente de la courbe d'essai entre 10% et 40% de la force estimée.

La portion de la courbe en dessous de 40% de la force de rupture étant souvent considérée comme linéaire, faire une erreur dans la force estimée (F_{est}), à l'équation 3.4, est sans grande conséquence puisque le déplacement v_{04} va également s'adapter de manière proportionnelle. La pente et donc le K_{ser} resteront relativement les mêmes.

3.2.3 | Résultats des essais de traction

Cette première campagne d'essais se termine par l'acquisition de 10 valeurs de module de glissement K_{ser} par essence, soit un total de 30 valeurs. Elles sont reprises en détail dans l'annexe D et résumées dans le tableau de la page suivante.

Valeurs moyennes	$K_{ser} [N/mm]$	$k_{ser} [N/mm^3]^*$	$C_{v,kser}$	$\rho_{eprouvette} [kg/m^3]$
Épicéa	39882,16	11,35	12,5	418,67
Chêne	68257,09	19,42	12,7	711,36
Hêtre	75120,45	21,37	12,9	752,94

TABLE 3.2 – Tableau de synthèse des résultats d’essais en traction

* Le k_{ser} fabricant a été calculé sur base de l’équation 2.12 présentée dans la méthode des ressorts 2.2.1.2. Dans ce cas-ci : $k_{ser} = K_{ser} / A_{ef}$.²

Le module de glissement k_{ser} étant une valeur destinée au calcul des structures en service, celui-ci n’est pas représenté par une valeur caractéristique, mais bien par une valeur moyenne. Ainsi, la valeur moyenne du k_{ser} pour l’épicéa peut être comparée à celle donnée par le fabricant MITEK dans sa déclaration de performance [24].

Un module de glissement k_{ser} de **14,7** $[N/mm^3]$ est annoncé par le fabricant pour une densité moyenne du bois valant 420 $[kg/m^3]$. Les résultats d’essais donnent ici un k_{ser} moyen de 11,35 $[N/mm^3]$ pour du bois de densité moyenne équivalente (418,67 $[kg/m^3]$).

Note : Il faut savoir que le fabricant des connecteurs WOLF annonce une valeur de **10** $[N/mm^3]$ comme module de glissement [62]. Ce connecteur étant très ressemblant à celui de chez MITEK, la valeur trouvée dans ce travail confirme la bonne exécution des essais puisqu’elle se trouve dans l’intervalle [10 ; 14,7] définit par les deux fabricants.

3.2.4 | Expression analytique de k_{ser}

Nous touchons à un des grands objectifs de ce travail, qui est la détermination empirique d’une expression analytique du module de glissement k_{ser} , en fonction de la densité du bois.

Pour cela, les 30 résultats obtenus sont disposés sur un graphique ayant pour abscisse la densité des éprouvettes. Ensuite, une courbe de tendance est sélectionnée telle que le coefficient de corrélation (R^2) soit le plus proche de l’unité³.

2. Dans le cas des éprouvettes en traction, où les pièces de bois sont séparées de 2 $[mm]$ et assemblées grâce à des connecteurs M20, l’aire efficace vaut : $A_{ef} = 50,8 \cdot (152,4/2 - 1 - 6 \cdot 1) = 3515,36 [mm^2]$

3. Le coefficient de corrélation indique la proportion d’information expliquée par le modèle de régression. Ici, $R^2 = 0,88$. Le modèle explique donc 88% des résultats.

L'équation de cette courbe de tendance, représentée à la figure 3.10, est :

$$k_{ser} = 0,0201 \cdot \rho_m^{1,0484} \approx \frac{\rho_m^{1,05}}{50} \quad (3.6)$$

En plus de donner le meilleur coefficient de corrélation, cette expression est sous une forme très proche des expressions déjà établies dans l'*Eurocode 5* (voir figure 3.1).

Plus particulièrement, la puissance élevant la densité est très proche de l'unité. Cela est également le cas pour les expressions des anneaux et des crampons qui, comme les plaques métalliques embouties, sont des assembleurs surfaciques.

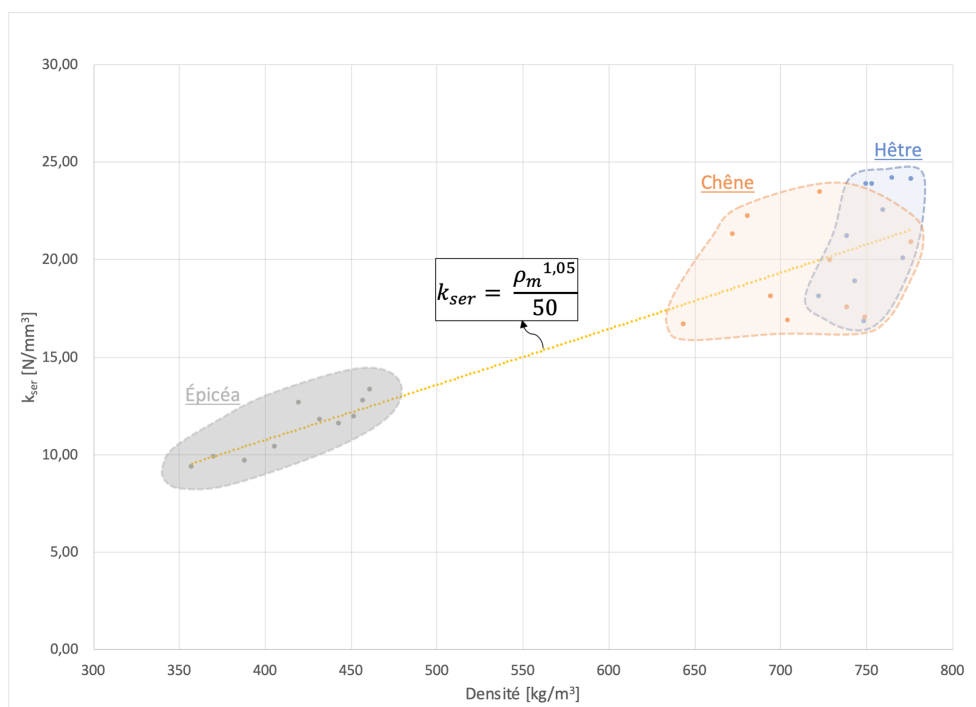


FIGURE 3.10 – Corrélation liant le module de glissement à la densité du bois

3.2.5 | Modèle existant

Une nouvelle version de l'*Eurocode 5* est en préparation. Certaines nouveautés concernant les plaques métalliques embouties sont en cours de discussions, notamment une relation liant le module de glissement à la densité selon la formule :

$$k_{ser} = k_{ser,ref} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_{m,ref}} \quad (3.7)$$

Cette relation voit le k_{ser} comme linéairement dépendant de la densité. Elle est tracée au graphique 3.11, pour les valeurs de MITEK ($k_{ser} = 14,7 [N/mm^3]$ pour $\rho_m = 420 [kg/m^3]$) et WOLF ($k_{ser} = 10 [N/mm^3]$ pour $\rho_m = 350 [kg/m^3]$)⁴.

Selon la société MITEK, une de leurs campagnes d'essais montre que le module glissement est proportionnel à la racine carrée du rapport de densité :

$$k_{ser} \propto k_{ser,ref} \cdot \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_{m,ref}}} \quad (3.8)$$

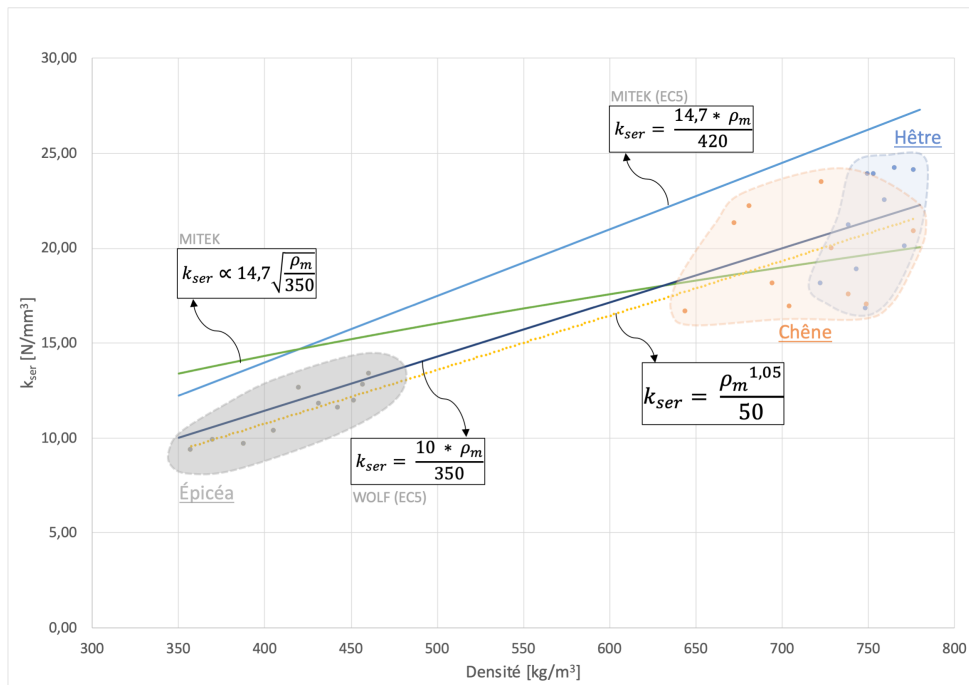


FIGURE 3.11 – Comparatif des différents modèles rencontrés

Puisque la formule analytique a été conçue de manière à représenter au mieux les résultats obtenus dans ce travail, il est évident que sa courbe soit la plus proche des points obtenus expérimentalement. Le bois étant très variable, et les méthodes ainsi que les conditions de réalisation des essais pouvant également varier selon la personne responsable des essais, il est normal de constater des différences entre les différentes expressions.

4. La déclaration de performance publiée par WOLF laisse penser qu'une erreur s'y est glissée et que la densité moyenne considérée pour établir leur valeur de k_{ser} n'est pas $350 [kg/m^3]$ (C14), mais bien $420 [kg/m^3]$ (C24). Dans ce cas, la courbe WOLF (EC5) représentée à la figure 3.11 passe sous la courbe en pointillé jaune.

Globalement, comparée aux autres relations, la formule analytique trouvée ici a l'avantage d'être la plus conservatrice et ce, sur une grande plage de densité. Sa pente est également très proche des deux autres courbes calculées avec l'*Eurocode 5*.

3.2.6 | Analyse statistique

Les réflexions faites jusqu'ici pour la recherche d'une formule analytique, ont été exposées à Mme Catherine Rasse, consultante en statistique au SMCS⁵. Grâce à son expérience, elle a pu apporter un regard critique, basé sur les statistiques, sur toute cette démarche. Ce qui en est ressorti est présenté ci-après.

Pour utiliser la formule trouvée afin de faire des estimations du module de glissement en fonction de la densité, plusieurs points doivent être satisfaits :

- l'indépendance des données
- la variabilité constante des données le long des abscisses
- la normalité de la distribution

Les points les moins évidents à déterminer sont les deux premiers. Pour commencer, les résultats sont tirés d'essais sur 3 essences de bois, avec d'un côté, un résineux (l'épicéa) et de l'autre, des feuillus (le chêne et le hêtre). La première démarche a donc été de rajouter à l'expression un terme dépendant de l'essence de bois. Soit :

$$k_{ser} = \frac{\rho_m^{1,05}}{50} + C \cdot \text{essence} \quad (3.9)$$

Un test d'hypothèse sur ce nouveau modèle a prouvé que l'influence de ce terme sur le modèle, n'était pas significatif. Il y a donc bien indépendance des données dans l'état actuel de l'expression analytique et la constante C peut être réduite à 0.

Ensuite, l'écart des données entre les points et la droite de régression n'est pas constant le long des abscisses. En effet, alors que l'épicéa et le hêtre sont assez bien rassemblés en groupes élanés décrivant une tendance, le chêne quant à lui, forme un groupe de points fortement dispersés⁶. Il n'y a donc pas de tendance flagrante et cela se ressent au niveau du second critère concernant la variabilité.

5. Support en Méthodologie et Calcul Statistique

6. Toutes les pièces de chêne destinées aux essais de traction viennent de la même bille de chêne. Il suffit alors que celle-ci vienne d'un arbre non-représentatif de l'essence pour avoir de mauvais résultats.

La solution proposée était alors d'utiliser un logarithme en base 10 sur le module de glissement, pour atténuer ces variabilités. Le modèle statistique devient alors :

$$k_{ser} = 10^{(0,711+0,00081*\rho_m)} \quad (3.10)$$

Cette démarche statistique donne alors naissance à une nouvelle expression analytique montrée en figure 3.12. Assez proche de la courbe précédente, elle prend aussi en compte les incertitudes qu'il y a sur les plages de moyennes densités. Cette portion est représentée de manière plus conservative dans ce nouveau modèle statistique, mais pourrait tendre vers le précédent modèle trouvé expérimentalement, lorsque de nouveaux essais seront réalisés sur des éprouvettes de moyennes densités.

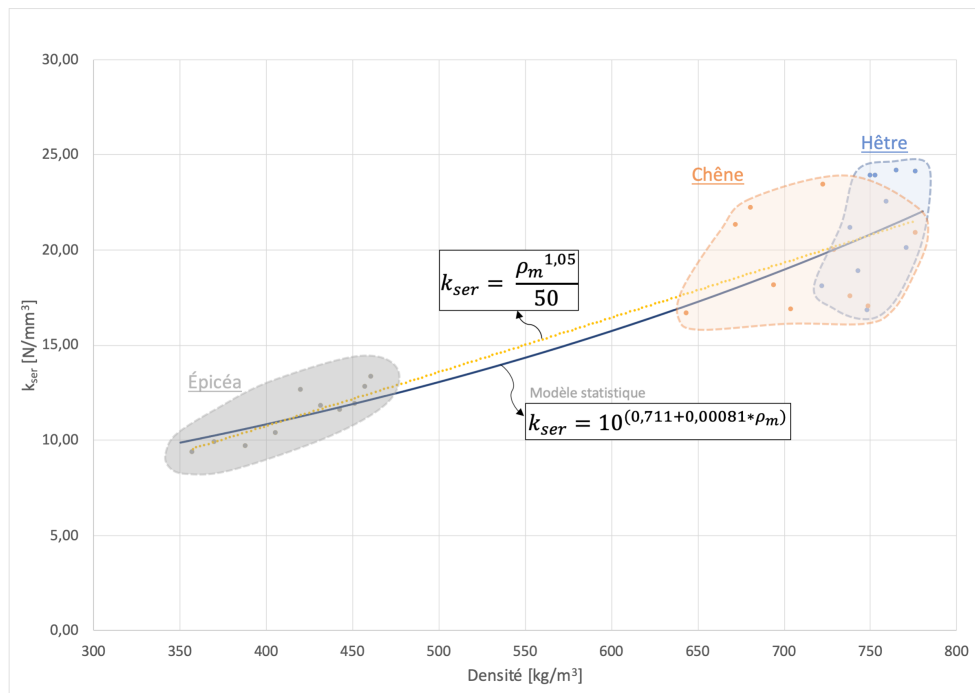


FIGURE 3.12 – Comparaison de l'expression analytique avec le modèle statistique

3.2.7 | Application du modèle de Foschi

Le modèle de *Foschi*, présenté à la section 2.6, peut maintenant être utilisé pour modéliser les courbes obtenues lors des essais en laboratoire. Grâce à une approximation aux moindres carrés, une courbe par essence peut être établie comme illustré à la figure 3.13.

Ce modèle étant bi-linéaire, il permet uniquement d'approximer les courbes jusque dans leur première partie de plastification. La fin du palier de plastification et la rupture n'est pas prise en compte dans le calcul de l'approximation. Toutefois, ces trois courbes permettent d'avoir tout de suite un ordre de grandeur, d'une part, du module de glissement représenté par la pente à l'origine, d'autre part, de la force de rupture et ce pour les trois essences.

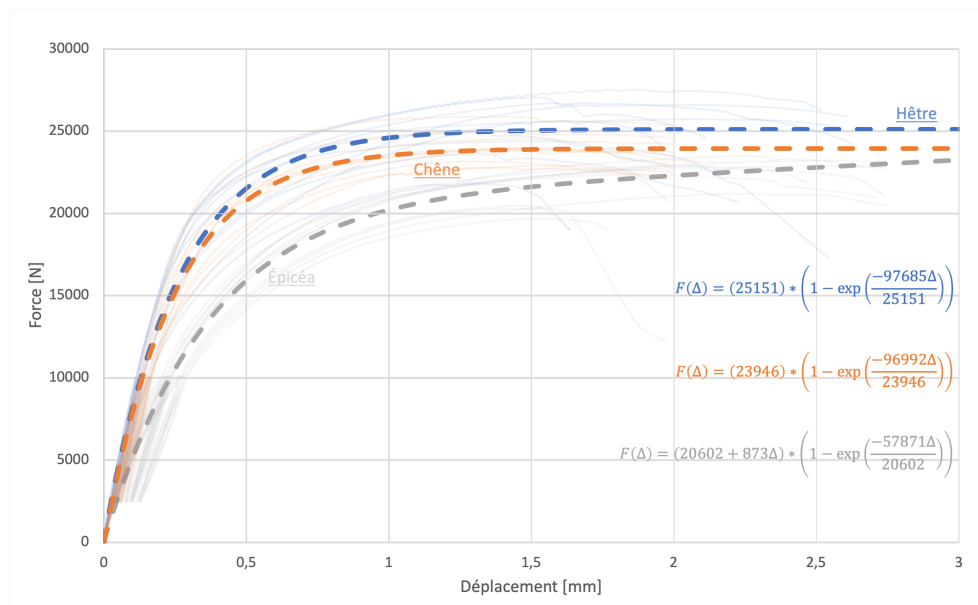


FIGURE 3.13 – Application du modèle de Foschi aux 30 courbes expérimentales

3.2.8 | Module de glissement ultime K_u

Cette dernière partie qui concerne les essais en traction, introduit une nouvelle notion : un module de glissement pour les calculs aux états limites ultimes (ELU), K_u [N/mm]. Cette notion vient du paragraphe §2.2.2 de l'Eurocode 5 et est destinée à introduire la rigidité dans la résistance ultime des assemblages.

Pour calculer aux états limites une poutre en bois lamellé-agrafé, il est nécessaire de prendre en compte son manque de rigidité par rapport à son homologue en bois massif. L'annexe B de l'Eurocode 5 (la méthode Gamma) prend alors en compte ce coefficient K_u pour le calcul des contraintes dans la poutre mécaniquement assemblée, soumise à des charges pondérées à l'ELU.

La norme annonce un module de glissement ultime égal à :

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (3.11)$$

Il est également possible de trouver dans la littérature [48] une façon de calculer ce module grâce aux courbes expérimentales. De la même manière que le module de glissement K_{ser} , le module K_u est la pente de la droite reliant deux points, qui sont cette fois : l'origine et 70% de la force de rupture :

$$K_u = \frac{(F_{07} - F_{00})}{(v_{07} - v_{00})} \quad (3.12)$$

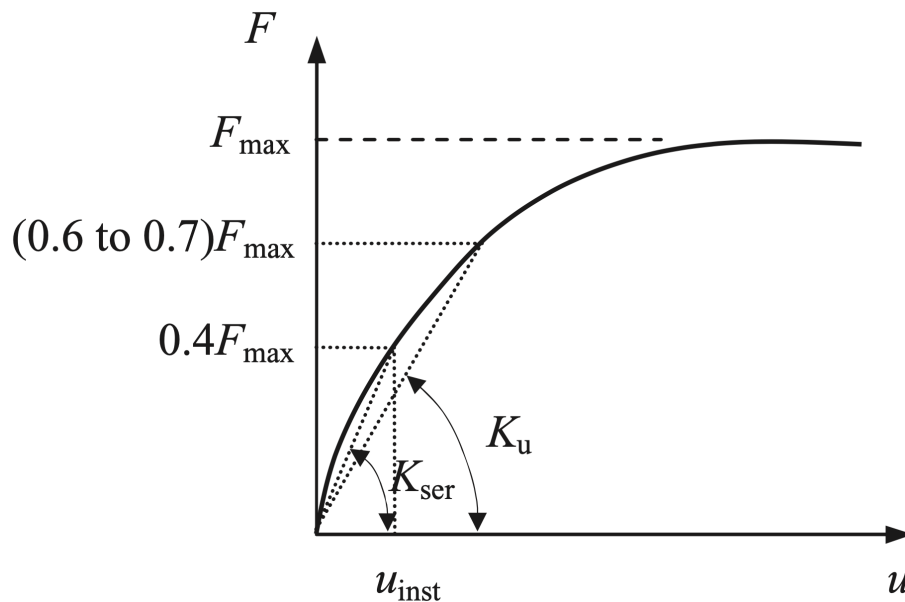


FIGURE 3.14 – Représentation du module de glissement ultime K_u [48]

Ayant à disposition 10 courbes d'essais pour 3 essences de bois, c'est l'occasion de comparer l'expression de l'Eurocode 5 avec celle de la figure 3.14. Le tableau à la page suivante reprend les valeurs du module de glissement ultime, calculées grâce aux 10 essais sur les éprouvettes en épicéa.

En moyenne, le rapport entre les deux modules de glissement a bien tendance à se rapprocher des 2/3. En revanche, comme montré en détail dans l'annexe F, le rapport entre les modules de glissement ultime et de service, tend plutôt vers 3/4 pour les deux autres essences. Puisque les poutres en bois lamellé-agrafé seront fabriquées seulement en épicéa, la relation de l'Eurocode 5 est suffisante dans le cadre de ce mémoire.

Épicéa	$K_{ser} [N/mm]$	$K_u [N/mm]$	$K_u / K_{ser} [-]$
1	46911,47	29405,31	0,63
2	44965,91	29313,89	0,65
3	41931,18	27459,01	0,65
4	40766,50	27355,51	0,67
5	41463,69	27096,33	0,65
6	44478,98	29006,33	0,65
7	34076,33	20678,34	0,61
8	34771,42	21659,41	0,62
10	32975,13	19329,93	0,59
11	36481,01	22256,06	0,61
Moyenne	39882,16	23356,01	0,63

TABLE 3.3 – Calcul du module de glissement ultime K_u grâce aux éprouvettes en épicéa

3.3 | Essais de cisaillement en laboratoire

Avant de fabriquer et tester les poutres en bois lamellé-agrafé, une deuxième campagne d'essais est nécessaire. Son but est de déterminer la rigidité d'une autre configuration d'assemblage. Cette seconde configuration se veut représentative du comportement d'un connecteur liant les lames d'une poutre mécaniquement assemblées.

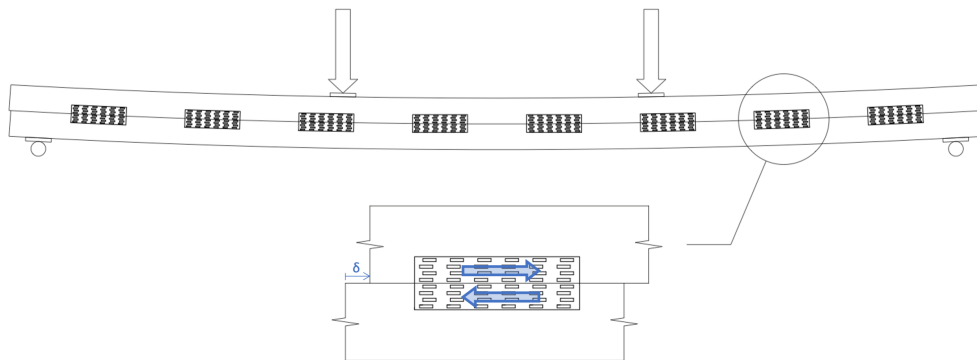


FIGURE 3.15 – Sollicitation du connecteur due au glissement entre les lames

En effet, en empêchant le glissement entre les lames de bois composant la poutre, le connecteur est cisailé. Ce type de sollicitation n'ayant pas encore été couvert par la première campagne d'essais, une autre configuration d'éprouvette a été imaginée pour mettre le connecteur dans cette situation de cisaillement.

3.3.1 | Préparation de l'éprouvette

L'annexe D de la norme EN 1075 donne une méthode d'essai pour tester le comportement du connecteur métallique en cisaillement. Un schéma de principe du test est repris à la figure 3.16a.

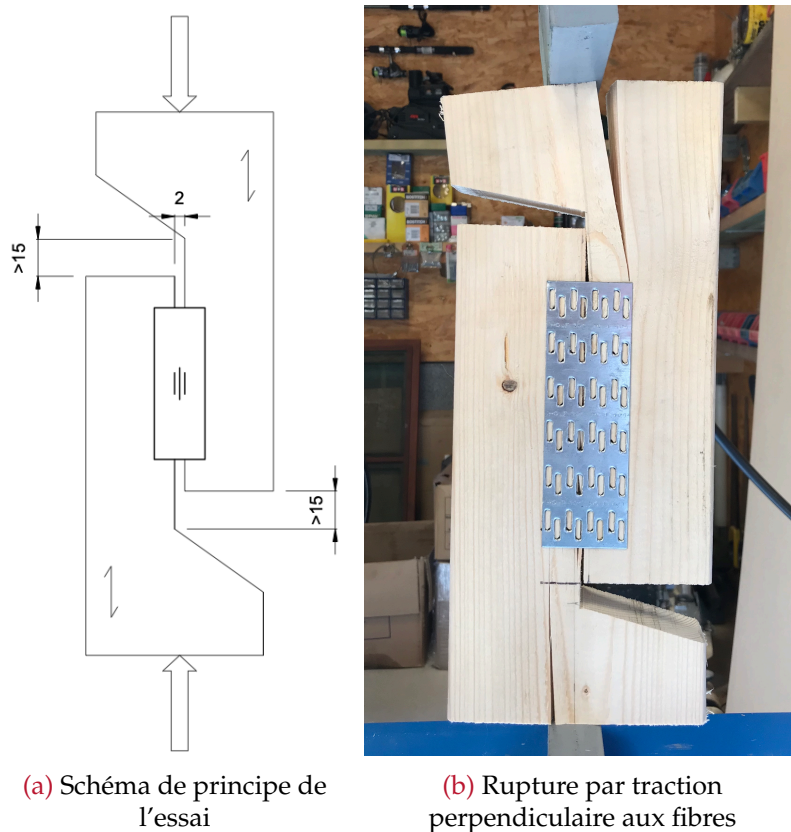


FIGURE 3.16 – Application de l'annexe D de la norme EN 1075

La fabrication de quelques-unes de ces éprouvettes et les essais préliminaires ont permis de mettre en évidence quelques inconvénients. Premièrement, le temps de fabrication et les machines requises pour réaliser les découpes sont assez conséquents. Ensuite, une mauvaise réalisation ou un mauvais positionnement de l'éprouvette peut entraîner facilement de la traction perpendiculaire dans le bois (voir figure 3.16b).

Une autre configuration a donc été envisagée. Celle-ci est tirée du travail de Corto Laye [38] et permet une exécution bien plus rapide et saine que la précédente, de part sa symétrie notamment. Comme montré à la figure 3.17, le principe est de solliciter les connecteurs en cisaillement grâce à l'application d'un effort sur une pièce de bois centrale.

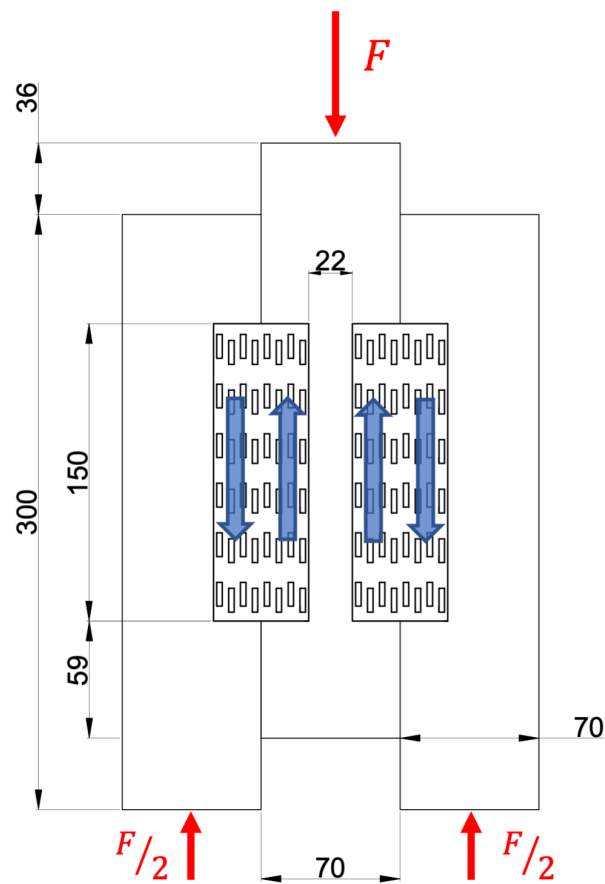


FIGURE 3.17 – Représentation de l'essai en cisaillement

Une éprouvette est composée, à elle seule, de quatre connecteurs et trois pièces de bois. La section de bois choisie est 36x70 [mm] et la hauteur de chaque pièce est de 300 [mm]. Chacune d'elles sera pesée pour pouvoir les classer par densité et ainsi fabriquer des éprouvettes les plus homogènes possibles.

Les trois parties en bois se trouvent dans un même plan. La pièce du milieu est décalée de manière à surpasser les deux autres pièces extérieures et le tout est assemblé à l'aide de quatre connecteurs métalliques.

3.3.2 | Protocole d'essai

Le protocole appliqué à cette deuxième campagne d'essais reste le même que celui utilisé pour les éprouvettes en traction dans la première campagne. Pour rappel, il est tiré de la norme *ISO 6891* qui vise à caractériser la déformation et la résistance d'assemblages, réalisés avec des éléments mécaniques de fixation. Une description complète de ce protocole a été faite lors de la première campagne (voir partie 3.2.2).

Quelques différences sont tout de même à noter.

D'abord, l'éprouvette est bien plus petite et requiert un effort, non plus de traction, mais de compression. Par conséquent, la presse utilisée peut-être de plus petite taille.

En revanche, la force à exercer est plus importante car l'éprouvette est cette fois constituée de 2 assemblages, reprenant chacun la moitié de l'effort sollicitant la pièce centrale. Enfin, quatre capteurs LVDT doivent cette fois être utilisés pour pouvoir mesurer le glissement entre chaque partie. Ainsi, l'assemblage à gauche de l'éprouvette sera monitoré par un capteur avant et un capteur arrière. La moyenne de ces deux déplacements relevés au cours de l'essai représentera le déplacement global de l'assemblage gauche. Le même montage et raisonnement sont faits du côté droit de l'éprouvette.

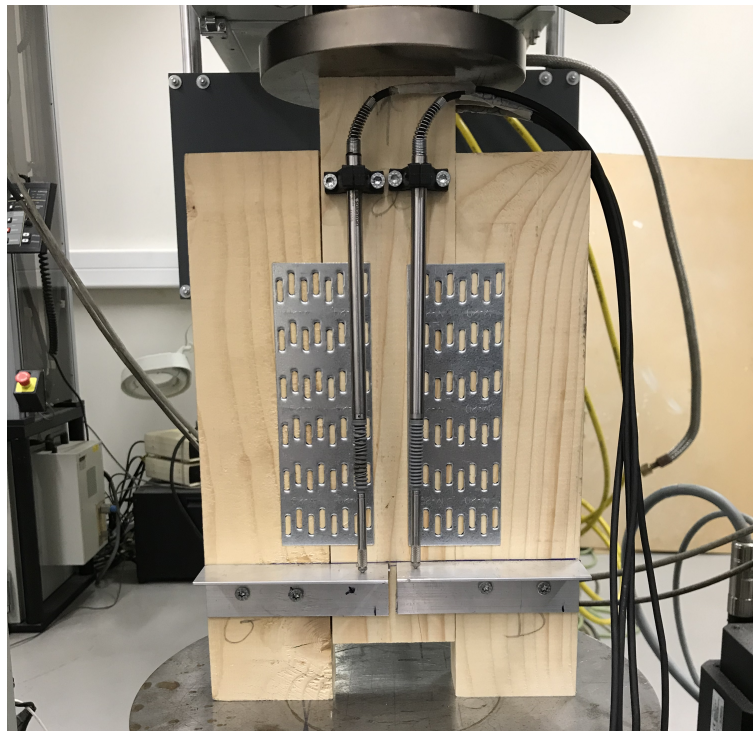


FIGURE 3.18 – Photo du montage en cisaillement

Note : Un certain nombre d'éprouvette a été testé en prenant le déplacement du vérin, sans utiliser de capteur LVDT mesurant le déplacement au droit de l'assemblage. Ces essais n'ont pas été validés car ce déplacement est de l'ordre de 2 fois plus grand que celui mesuré avec les capteurs. Il comprend en effet beaucoup de mesures parasites, venant d'une part, de la déformation de la traverse, et d'autre part, de l'écrasement des pièces de bois. Une mesure localisée au droit des connecteurs est donc vivement recommandée. Cette différence se remarque à la figure 3.19.

Toutefois, ces essais ne sont pas vains car ils ont permis d'avoir une bonne estimation de la force de rupture, nécessaire pour entamer le protocole des essais officiels.



FIGURE 3.19 – Représentation des deux possibilités de mesure

3.3.3 | Résultats des essais de cisaillement

Pour commencer, 10 éprouvettes en épicéa sont mises à l'essai. La première chose qui ressort de cette deuxième campagne est la très grande variabilité des résultats. En effet, le post-traitement de ceux-ci permet de mettre en évidence le comportement aléatoire de la pièce centrale, maintenue par les 4 connecteurs.

Comme montré à la figure 3.20, on peut aussi bien observer une différence de rigidité au droit des assemblages de l'éprouvette (à gauche et à droite), qu'une différence de rigidité entre les deux faces de l'éprouvette (avant et arrière). Tout comme on peut également observer dans d'autres cas, un comportement plus homogène avec une déformation synchronisée entre les quatre connecteurs soutenant la pièce centrale.

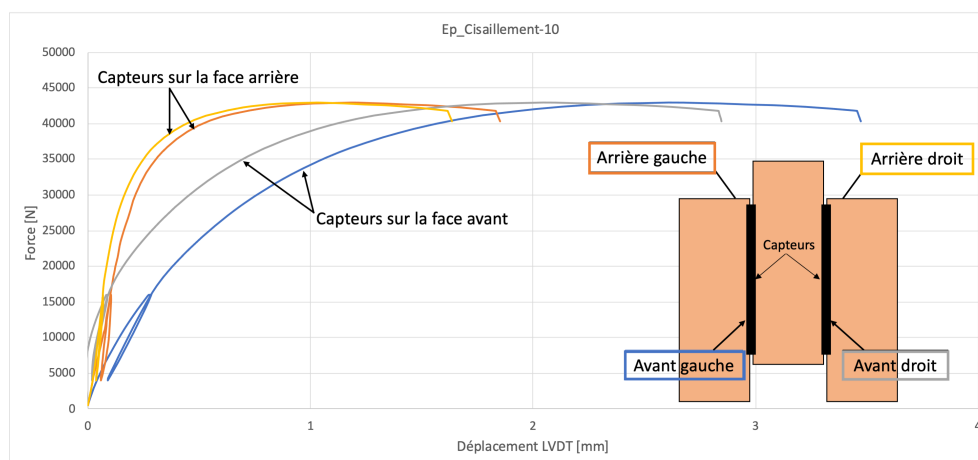


FIGURE 3.20 – Exemple de comportement irrégulier entre les deux faces de l'éprouvette

Ces différences sont atténuées lors du calcul du module de glissement au droit d'un assemblage, car c'est la moyenne des déplacements qui est prise en compte. Cela veut dire que la rigidité de l'assemblage de gauche se calcule en prenant la moitié de l'effort appliqué par le vérin, et la moyenne des déplacements mesurés par les deux capteurs (avant et arrière) du côté gauche de l'éprouvette.

Les vingt modules de glissement tirés des 10 éprouvettes en épicéa sont repris dans le tableau ci-dessous :

Épicéa	$k_{ser,gauche} [N/mm^3]$	$k_{ser,droit} [N/mm^3]$	$\rho_{eprouvette} [kg/m^3]$
1	7,15	7,94	361,58
2	8,92	7,41	380,56
3	14,32	8,93	405,83
4	10,03	8,37	422,80
5	12,58	14,78	445,36
6	7,68	4,00	454,76
7	17,80	11,44	477,53
8	14,05	12,02	488,45
9	10,76	18,30	499,65
10	12,29	27,89	515,14
Cv [%]	28,7	56,7	11,6
Moyenne	11,56	12,11	445,17

TABLE 3.4 – Synthèse des essais de cisaillement sur l'épicéa

En moyenne, les modules de glissement obtenus ont une valeur proche de celle trouvée par les essais de traction ($11,35 \text{ [N/mm}^2\text{]}$) dans la partie 3.2.3. Toutefois, cette constatation doit être faite avec prudence car le tableau témoigne d'une grande variabilité des résultats. Les modules de glissement peuvent, en effet, aller du simple au septuple (éprouvettes 5 et 10). Ceci se voit dans le coefficient de variabilité (Cv) qui dépasse les 30%, valeur courante pour le matériau bois.

Remarque : Les coefficients de variabilité montrent ici que le côté droit de l'éprouvette a été plus variable que le côté gauche. Ceci pourrait laisser croire à un mauvais réglage de la machine ou à un mauvais positionnement de l'éprouvette dans la presse.

Les tableaux repris en annexe G montrent d'autres séries de tests où cette tendance entre la gauche et la droite de l'éprouvette s'annule, ou encore même, s'inverse. Cela vient donc plutôt d'un comportement aléatoire de l'éprouvette et non pas d'un manque de rigueur lors de la réalisation des essais.

Une explication qui pourrait justifier une telle irrégularité est la présence de frottements. En effet, lors de la mise en charge et selon l'inclinaison des connecteurs, les pièces de bois peuvent, soit s'écarter, soit se rapprocher. Les connecteurs ayant été positionnés avec soin, il est possible que lors des premiers déplacements, les connecteurs prennent une inclinaison préférentielle, aléatoire, qui amène ou non du frottement. Cette direction peut, par exemple, être favorisée par un défaut ou une différence de densité dans le bois.

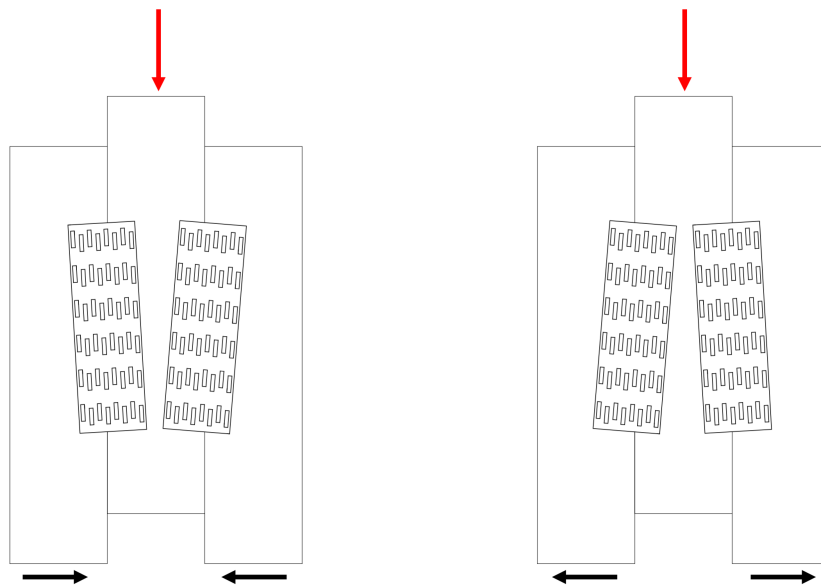


FIGURE 3.21 – Représentation du mouvement des pièces de bois lors de l'essai

3.3.4 | Expression analytique du k_{ser} en cisaillement

Une seconde relation est établie pour cette deuxième campagne d'essais. Pour cela, d'autres séries de tests sont menées sur des éprouvettes en chêne et en hêtre, de manière à couvrir une plus large plage de densité. Six éprouvettes en chêne et neuf éprouvettes en hêtre additionnelles ont pu être fabriquées pour donner les résultats repris à l'annexe G ainsi qu'une nouvelle expression analytique.

Une comparaison entre la tendance mise en évidence lors de la première campagne d'essais et celle trouvée ici, grâce aux essais de cisaillement, est illustrée à la figure 3.22.

La première chose à noter est que cette nouvelle expression analytique donne un module de glissement inférieur à celui trouvé précédemment avec les essais de traction. L'explication peut venir du déplacement additionnel dû à la combinaison d'efforts (cisaillement et moment) qui sollicite le connecteur. En effet, cette combinaison est bien plus complexe que le cas en traction pure et cela pourrait se traduire par plus de déplacements à l'assemblage.

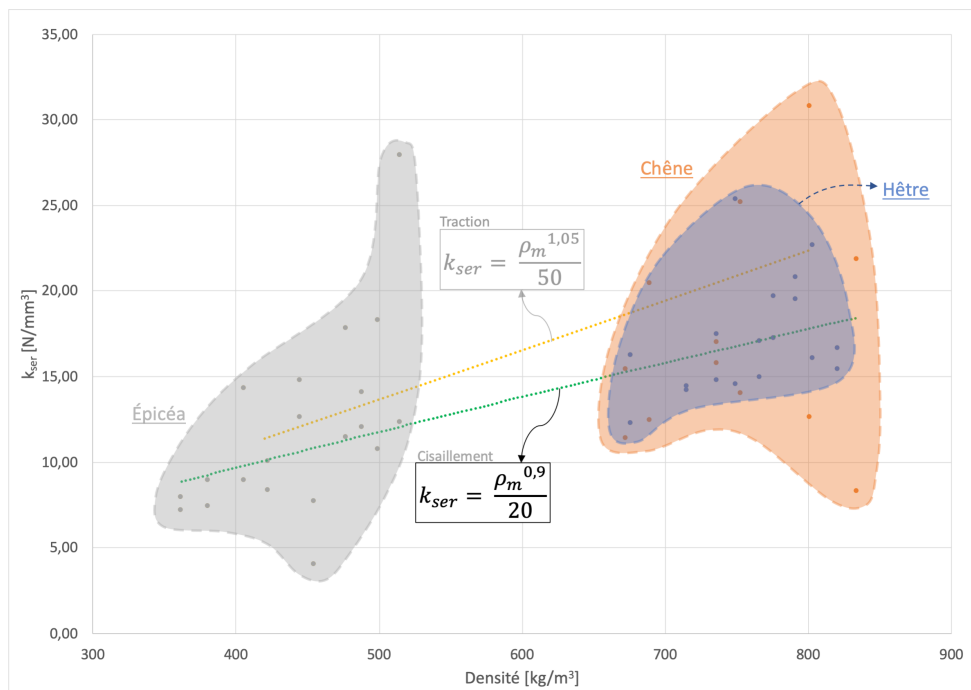


FIGURE 3.22 – Comparaison des relations obtenues par essais de traction et de cisaillement

Ensuite, en lien avec la grande variabilité des résultats, le coefficient de corrélation (R^2) est cette fois beaucoup plus petit par rapport à celui des éprouvettes en traction. En effet, alors que 88% des données étaient expliquées par l'expression analytique des éprouvettes en traction, le coefficient de corrélation ne s'élève ici qu'à 38%.

D'autre part, la pente et le niveau vertical de la nouvelle tendance sont plus faibles, et donnent lieu à l'expression suivante :

$$k_{ser} = 0,0505 \cdot \rho_m^{0,8772} \approx \frac{\rho_m^{0,9}}{20} \quad (3.13)$$

Finalement, nous avons maintenant en main de quoi calculer un module de glissement k_{ser} . Celui-ci sera un véritable atout dans la conception des poutres lamellé-agré.

3.4 | Essais de poutres en bois lamellé-agré (BLA)

Pour conclure ce travail, une troisième et dernière campagne est menée pour juger de l'utilisation des plaques métalliques embouties pour la fabrication d'éléments de forte section.

Lors de ces essais, six poutres en bois lamellé-agré seront mises sur le banc d'essai afin de mesurer leur performance. Ensuite, le même essai sera appliqué à deux poutres en bois massif de manière à pouvoir comparer les résultats avec ceux obtenus avec les poutres mécaniquement assemblées.

3.4.1 | Présentation de la poutre

La poutre concernée mesure 2660 [mm] et a une portée de 2500 [mm] entre les appuis. Les lames d'epicéa qui la composent sont issues de poutres en bois massif de section commerciale 60x145 [mm] qui ont été délinéées pour former des lames de 60x70 [mm]. Ces lames ont ensuite été triées par densité de manière à constituer des poutres à base de lames de densités relativement proches. De cette manière, la poutre sera caractérisée par la densité moyenne de ces deux lames, qui ne proviennent pas, au départ, de la même poutre commerciale. Cela permet de simuler qu'un constructeur de ce type de poutre ne fera pas la démarche de chercher deux lames appartenant au même arbre pour constituer sa poutre. Superposées deux par deux sur leur côté le plus long, ces lames permettent ainsi de donner des poutres assemblées de 60x140 [mm].

Huit connecteurs sont disposés sur chaque face de la poutre. Ces connecteurs correspondent au type M20 de la marque *MITEK*. Le bord du premier connecteur se trouve à 90 [mm] de l'appui et un entraxe de 310 [mm] est choisi entre les connecteurs. Ceux-ci sont centrés et alignés parallèlement à la ligne d'assemblage entre les deux lames de bois. Comme notifié à la figure 3.21 lors de la précédente campagne, les connecteurs auraient pu être inclinés par rapport à la ligne d'assemblage pour mobiliser le frottement et donc obtenir de meilleures performances. Toutefois, l'objectif étant de caractériser le comportement de ces poutres à l'aide des expressions analytiques précédemment trouvées, cette option n'a pas été retenue dans ce travail.

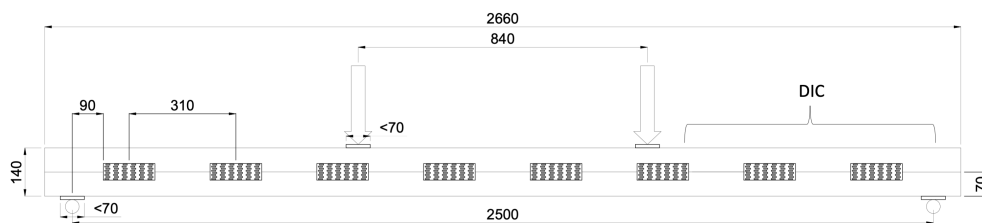


FIGURE 3.23 – Représentation de l'essai sur une poutre en bois lamellé-agré

3.4.2 | Protocole d'essai

La détermination des propriétés physiques des poutres en bois lamellé-agré s'est faite conformément à la norme *NBN EN 408* [14]. Celle-ci demande :

- Une longueur minimale de la poutre égale à 19 fois la hauteur de celle-ci :
 $19 \cdot 140 = 2660 \text{ [mm]}$.
- Une portée égale à 18 fois la hauteur de la poutre, pouvant être adaptée de 3 fois la hauteur de celle-ci : $18 \cdot 140 (\pm 3 \cdot 140) = 2520 (\pm 420) \approx 2500 \text{ [mm]}$.
- Des petites plaques d'acier entre la poutre et les points de charge pour empêcher le poinçonnement local. Leur longueur ne peut pas dépasser la moitié de la hauteur de la poutre, soit 70 [mm].
- Une contrainte latérale doit être appliquée, lorsque nécessaire, pour empêcher la poutre de déverser. Celle-ci n'est pas nécessaire selon le calcul au déversement de la poutre repris à l'annexe H.
- Une vitesse de chargement constante. Elle ne peut pas dépasser les $0,003 \cdot h = 0,42 \text{ [mm/s]}$ et doit être telle que la force maximale soit atteinte dans les $300 (\pm 120) \text{ [sec]}$.

- Une distance entre les têtes de chargement de six fois la hauteur : $6 \cdot 140 = 840 \text{ [mm]}$. Cette distance sera assurée par une poutre de répartition.

L'essai de flexion, décrit ici, a notamment ces avantages :

1. Le point central de la poutre où est mesuré la déformation est complètement libre. Ceci n'est, par exemple, pas le cas dans un essai de flexion 3 points où des déformations sont susceptibles d'apparaître par compression perpendiculaire aux fibres à l'endroit de mesure. Les mesures peuvent dès lors être faussées.
2. L'effort tranchant est nul entre les deux points de chargement pendant que le moment est constant. Cela permet notamment aux défauts d'être sollicités de manière identique, ce qui diminue le risque d'apparition d'un point central de rupture préférentiel.

Lors des essais, trois mesures seront prises.

D'abord, la force appliquée par le vérin sur la poutre de répartition. Ensuite, un capteur est positionné au sol et relié par un fil d'acier jusqu'à la membrure inférieure de la poutre. Ce capteur mesure la flèche, à mi-travée, de la poutre soumise à la charge du vérin. Pour finir, un troisième moyen de mesure dont le rôle est d'évaluer le déplacement relatif entre les lames de bois, est décrit au point suivant. Celui-ci sera positionné à un des appuis, là où l'effort tranchant, et donc le glissement, est maximal.

3.4.2.1 | Digital Image Correlation (DIC)

Cette technique de mesure récente est une méthode optique basée sur l'enregistrement d'images pour dresser des profils de déformations. De plus en plus utilisée dans le domaine des sciences et de l'ingénierie, cette technique concerne aussi bien les micros que les macros déformations.



FIGURE 3.24 – Caméras utilisées pour la DIC

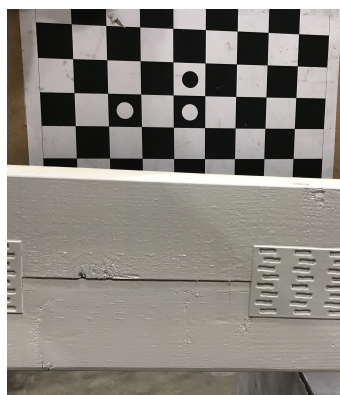
Les étapes de mise en place et d'utilisation de cette technologie sont les suivantes :

1. Positionnement des caméras.

Celles-ci se trouvent sur un trépied rigide qui assure une bonne stabilité d'ensemble. Ce trépied restera à la même place durant l'ensemble des essais et ne devra subir aucune perturbation, d'une quelconque provenance.

2. Calibration des caméras.

À l'aide d'une grille bien connue du programme, le logiciel se calibre spatialement pour pouvoir inclure des notions de distance dans l'analyse.



(a) Grille de calibration connue par le logiciel



(b) Calibration du logiciel grâce à la grille

FIGURE 3.25 – Calibration des caméras

3. Mouchetage de la zone de mesure.



(a) Application d'une couche de granite noir



(b) Mouchetage au travers de la plaque

FIGURE 3.26 – Réalisation du mouchetage pour la mesure des déplacements

Une couche primaire de blanc est appliquée sur la poutre pour uniformiser la zone de mesure. Ensuite, une couche de noir granite est projetée au travers d'une plaque micro-perforée pour créer des points dans la zone. Ce sont ces points qui seront traqués par le logiciel. Celui-ci sera ensuite capable de calculer les déplacements locaux.

4. Synchronisation de la *DIC* avec la presse.

Ce système de mesure doit être connecté avec le reste des équipements pour pouvoir lier l'effort sollicitant la poutre avec les mesures prises par les caméras.

3.4.3 | Résultats des essais sur les poutres en bois lamellé-agrafé

Les résultats des essais vont maintenant être présentés, puis discutés, au regard de tous les autres aspects présentés jusqu'ici dans ce mémoire, comme les expressions analytiques pour déterminer un module de glissement k_{ser} et les modèles numériques.

Dans l'analyse, seule les déformations seront prises en compte. En effet, dans beaucoup de cas dans la construction, les poutres se retrouvent sur deux appuis, soumises à des charges uniformément réparties (plancher, arbalétrier, etc...). Comme l'ont démontré T. Descamps, M. Monhonval et P. Latteur [26], le critère de dimensionnement en service se retrouve, dans une grande majorité des cas, prédominant par rapport aux critères d'états limites ultimes. Il est donc pertinent de commencer par l'analyse des déformations.

Selon le tableau 7.2 de l'*Eurocode 5*, les critères de flèches pour une poutre sur deux appuis varient entre $\ell/150$ et $\ell/500$. Les différents résultats seront alors comparés pour 3 déformations :

- $\ell/150 = 2500/150 = 16,67 [mm]$
- $\ell/300 = 2500/300 = 8,33 [mm]$
- $\ell/500 = 2500/500 = 5 [mm]$

Tableau 7.2 — Exemples de valeurs limites pour les flèches de poutres

	w_{inst}	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Poutre sur deux appuis	$\ell/300$ à $\ell/500$	$\ell/250$ à $\ell/350$	$\ell/150$ à $\ell/300$
Poutre en porte-à-faux	$\ell/150$ à $\ell/250$	$\ell/125$ à $\ell/175$	$\ell/75$ à $\ell/150$

L'ordre de présentation des résultats est le suivant :

D'abord, en faisant appel à toutes les notions décrites dans ce mémoire, je montrerai comment prédire le comportement de ces poutres. Ensuite, grâce aux mesures prises par la *DIC*, une modélisation plus fidèle au véritable comportement des poutres en bois lamellé-agrafé sera faite. La dernière étape sera de révéler le véritable comportement des poutres observé en laboratoire et de le confronter aux modèles.

3.4.3.1 | Estimation des résultats

Avant de connaître les résultats, essayons de les estimer grâce aux différents modèles à notre disposition, à savoir : la méthode Gamma, le modèle numérique *SCIA* et le modèle *PAMIR*. Un graphique récapitulatif se trouve à la fin des trois sections qui suivent.

Méthode Gamma

La méthode Gamma, reprise dans l'*annexe B* de l'*Eurocode 5* et présentée au point 2.3 de ce mémoire, décrit le calcul de poutres mécaniquement assemblées.

Cette méthode est implémentée dans un outil *Excel* qui permet de calculer la rigidité efficace $(EI)_{ef}$ de la poutre. Il est ensuite possible d'estimer la déformation de la poutre soumise à un essai de flexion 4 points :

$$\delta = \frac{23 \cdot (F_{verin}/2) \cdot L^3}{648 \cdot (EI)_{ef}} \quad (3.14)$$

Les pré-requis sont les caractéristiques géométriques et matérielles de la poutre, ainsi que le module de glissement de l'organe d'assemblage utilisé. Connaissant la densité des poutres, il est possible d'utiliser l'expression analytique du module de glissement en cisaillement pour trouver le k_{ser} de chaque poutre.

Rappel : la section 3.3.4 démontre que le module de glissement en cisaillement est :

$$k_{ser,analytique} = 0,0505 \cdot \rho_m^{0,8772} \approx \frac{\rho_m^{0,9}}{20} \quad (3.15)$$

Les déplacements (δ) étant fonction de la force au vérin (F_{verin}), la dernière étape de cette méthode Gamma est de trouver, par essais-erreurs, les forces qui correspondent aux trois déformations considérées. Les résultats pour les 6 poutres en bois lamellé-agrafé sont repris dans le tableau 3.5.

Poutre	Densité [kg/m^3]	$k_{ser,analytique}$ [N/mm^3]	$F_{\ell/150}$ [N]	$F_{\ell/300}$ [N]	$F_{\ell/500}$ [N]
1	338,72	8,37	7010	3510	2100
2	447,55	10,68	7340	3670	2200
3	452,00	10,77	7350	3680	2200
4	465,45	11,05	7380	3690	2210
5	501,17	11,80	7470	3750	2240
6	519,08	12,16	7500	3750	2250

TABLE 3.5 – Efforts utilisés par la méthode Gamma pour obtenir les 3 déformations considérées des poutres en bois lamellé-agrafé

Modèle numérique SCIA

Ce modèle, décrit dans la partie 2.4, permet de calculer la déformation d'une poutre mécaniquement assemblée grâce à des ressorts. Attachés aux deux lames qui composent la poutre, ces ressorts, modélisés par des barres d'acier, ont un module de Young E calculé en fonction du k_{ser} .

De la même manière, le module de glissement en cisaillement est déterminé en fonction de la densité des poutres testées et est ensuite injecté dans le modèle numérique SCIA. Les valeurs obtenues par ce modèle sont reprises au tableau 3.6 :

Poutre	Densité [kg/m^3]	$k_{ser,analytique}$ [N/mm^3]	$F_{\ell/150}$ [N]	$F_{\ell/300}$ [N]	$F_{\ell/500}$ [N]
1	338,72	8,37	7050	3530	2120
2	447,55	10,68	7250	3630	2180
3	452,00	10,77	7250	3620	2170
4	465,45	11,05	7270	3630	2180
5	501,17	11,80	7320	3660	2200
6	519,08	12,16	7340	3670	2200

TABLE 3.6 – Efforts utilisés par le modèle SCIA pour obtenir les 3 déformations considérées des poutres en bois lamellé-agrafé

Modèle PAMIR

Décrit à la section 2.5, ce modèle requiert moins de paramètres puisque la méthode de calcul et les valeurs caractérisant les connecteurs viennent du fabricant MITEK.

Ainsi, une poutre de classe C24 ($\rho_m = 420 [kg/m^3]$), assemblée avec des connecteurs M20, répond selon MITEK de la manière suivante :

$F_{\ell/150}$ [N]	$F_{\ell/300}$ [N]	$F_{\ell/500}$ [N]
6720	3360	2020

TABLE 3.7 – Efforts utilisés par le modèle *PAMIR* pour obtenir les 3 déformations considérées des poutres en bois lamellé-agrafé

Le graphique suivant résume les 3 estimations faites jusqu'ici concernant le comportement des poutres en bois lamellé-agrafé. Par clarté et parce qu'il est représentatif de l'ensemble des essais, seul le comportement de la 1^{ère} poutre est exposé ici. Les autres graphiques sont disponibles à l'annexe J.

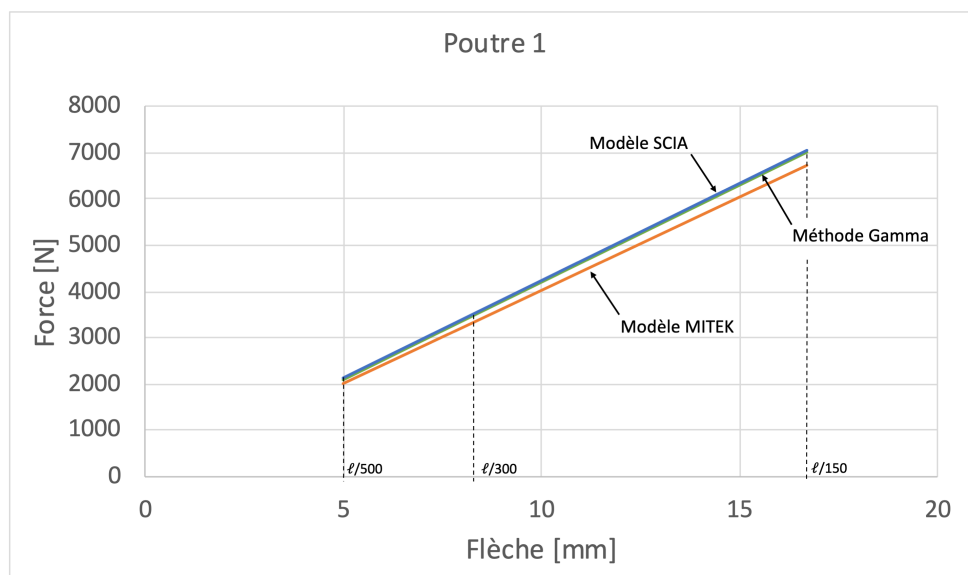


FIGURE 3.27 – Synthèse graphique des estimations faites grâce aux modèles

De manière générale, le modèle *PAMIR* est le plus sévère. Les deux autres modèles se comportent de façon quasi identique.

3.4.3.2 | Résultats de la DIC

Grâce à la *DIC*, on peut observer le glissement relatif entre les deux lames de bois et donc calculer un module de glissement k_{ser} . Les possibilités de mesures sont infinies et plusieurs méthodes ont été comparées pour s'assurer de la bonne compréhension du logiciel.

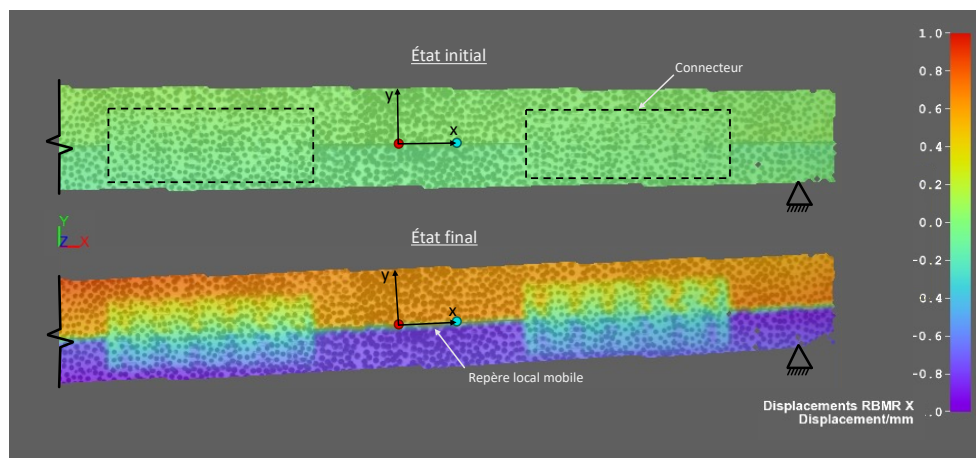


FIGURE 3.28 – Définition du repère mobile

Dans cette configuration de poutre, le déplacement concerné est dans la direction locale de la fibre neutre, le long de la ligne d'assemblage entre les deux lames. Les caméras étant fixes et indépendantes du déplacement de la poutre, c'est bien du point de vue Eulérien que l'on observe les déplacements. Ceci veut dire, qu'en plus du glissement entre les lames, les caméras prennent également en compte la déformation verticale de la poutre, due à l'application des charges. Pour parer à cela, le logiciel permet de définir un repère mobile sur la poutre qui, dans ce cas, est orienté selon la ligne d'assemblage entre les deux lames, comme le montre la figure 3.28.

Méthode de mesure

La première façon de mesurer le déplacement est d'utiliser des points (A_i, B_i, C_i) , que l'on fixe sur la poutre à la première image capturée par les caméras. Ensuite, on en tire le déplacement selon l'axe mobile x au cours du temps. Cette méthode ponctuelle est représentée à la figure 3.29.

La seconde méthode est une méthode continue. La mesure est prise en continu, le long d'une ligne parcourant la hauteur de la poutre. En fonction du temps, il est possible de voir la déformation de cette ligne, uniquement dans la direction du repère local x . Cette méthode est représentée à la figure 3.30.

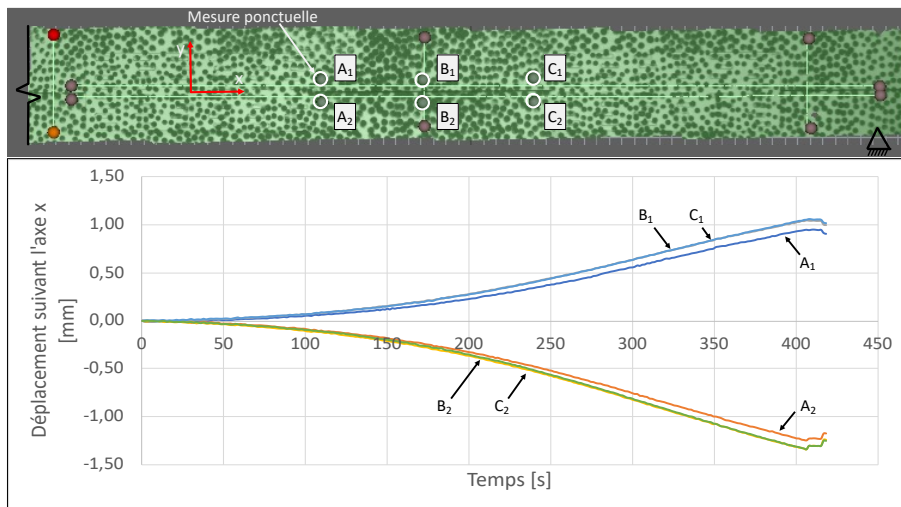


FIGURE 3.29 – Utilisation de 6 points de mesure pour étudier le déplacement des lames

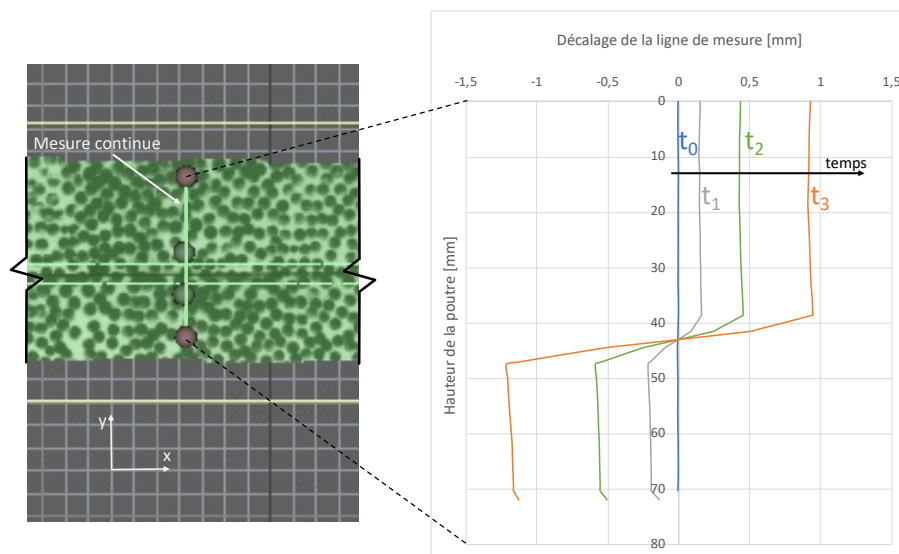


FIGURE 3.30 – Utilisation d'une hauteur continue pour étudier le déplacement des lames

Pour finir, une troisième méthode consiste à mesurer en continu les déplacements dans la direction du repère local x , sur toute la longueur de la zone étudiée. Les courbes qui en sont tirées montrent clairement que le déplacement le plus important se passe entre les connecteurs. Le connecteur, lui, se déforme peu.

En revanche, on peut observer à l'endroit d'implantation des dents de la plaque métallique, que le bois glisse sous le connecteur. Ceci est marqué par l'apparition locale de pics dans la zone du connecteur. Toutes ces observations se trouvent à la figure 3.31.

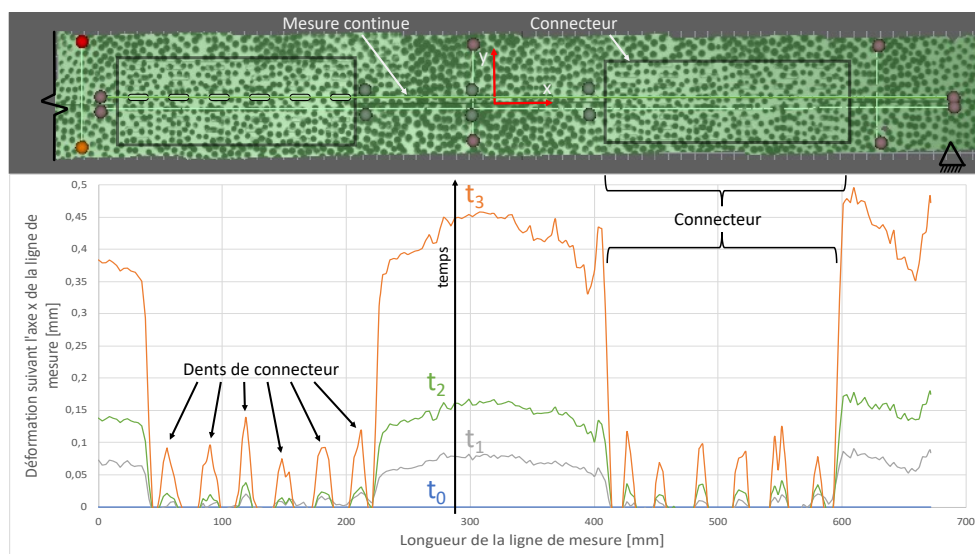


FIGURE 3.31 – Utilisation d’une longueur continue pour étudier le déplacement des lames

Détermination du k_{ser}

Pour déterminer le module de glissement réellement observé dans les poutres en bois lamellé-agrafé lors des essais, l’effort R , sollicitant le connecteur, doit être connu. Une démonstration, basée sur le théorème de réciprocité des contraintes, est réalisée à l’annexe I, afin de calculer cet effort au droit du connecteur situé à l’appui.

Connaissant cet effort et le déplacement v au droit de la connexion entre les deux lames de bois, il est possible de calculer le module de glissement, au cours du temps, de la manière suivante⁷ :

$$K_{ser} = \frac{(R_{04} - R_{01})}{(v_{04} - v_{01})} \quad (3.16)$$

Ces nouvelles valeurs du module de glissement peuvent être réinjectées dans les modèles⁸ pour donner les résultats du tableau 3.8.

Comparés avec les précédents tableaux, les modules de glissement calculés ici sont de l’ordre de 3 fois plus grands que ceux estimés avec la formule analytique du k_{ser} en cisaillement (équation 3.15). Cela se ressent sur le comportement des modèles à la figure 3.32.

7. Cette formule est construite sur base de ce qui est prescrit dans la norme ISO 6891

8. Le modèle PAMIR prenant en compte les valeurs données par la déclaration de performance de MITEK, seuls la méthode Gamma et le modèle SCIA sont recalculés.

Poutre	$k_{ser,DIC} [N/mm^3]$	Méthode Gamma [N]			Modèle SCIA [N]		
		$F_{\ell/150}$	$F_{\ell/300}$	$F_{\ell/500}$	$F_{\ell/150}$	$F_{\ell/300}$	$F_{\ell/500}$
1	19,36	7990	3995	2400	7640	3820	2292
2	21,08	8100	4050	2430	7690	3840	2310
3	46,05	8575	4285	2570	8020	4010	2410
4	30,15	8340	4170	2500	7860	3930	2360
5	33,27	8400	4200	2520	7900	3950	2370
6	45,19	8565	4280	2570	8010	4000	2400

TABLE 3.8 – Résultats de la modélisation utilisant les modules de glissement mesurés avec la DIC

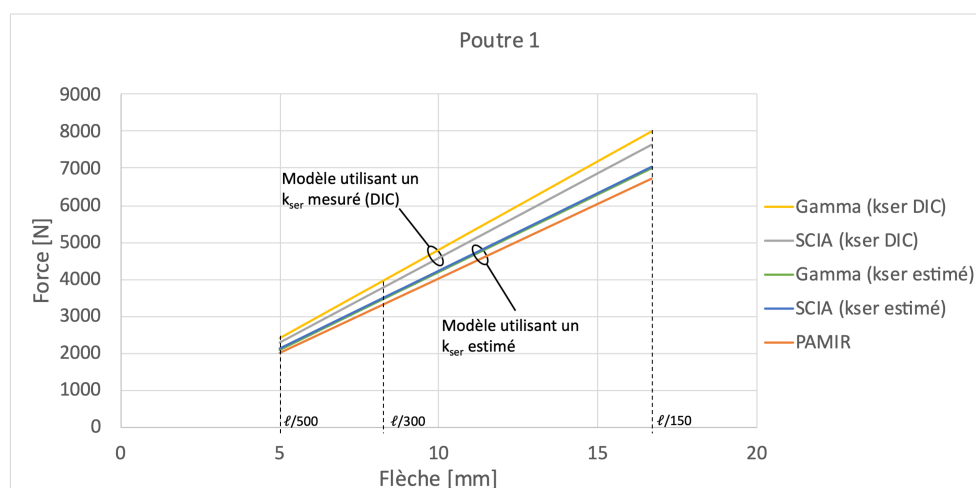


FIGURE 3.32 – Comparaison des estimations faites à l'aide des modèles pour des valeurs de modules de glissement estimées et mesurées.

En regardant ce graphique, les modèles prévoient un comportement plus optimiste de la poutre en utilisant le k_{ser} réellement mesuré grâce à la DIC. Au vu des différences entre les modules de glissement déterminés à l'aide de la formule analytique et ceux mesurés avec la DIC, c'est bel et bien ce résultat qui était attendu.

Il reste un dernier élément à considérer. Au cours des essais, la flèche de la poutre a été mesurée en fonction de la charge appliquée par le vérin. Cette mesure permet de reconstruire le comportement réellement observé lors des essais.

Voyons maintenant, à la figure 3.33, ce que valent toutes ces estimations par rapport au véritable comportement d'une poutre en bois lamellé-agré.

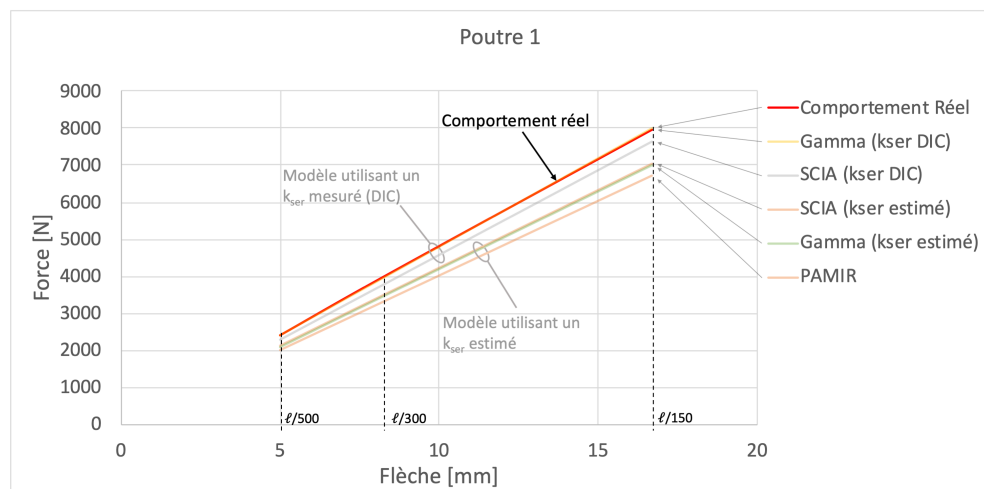


FIGURE 3.33 – Comparaison entre le comportement réel de la poutre et les estimations faites grâce aux modèles

3.4.3.3 | Discussions

La figure 3.33 représente bien tout le travail d'analyse qui a été fait autour des 6 poutres en bois lamellé-agrafé testées au laboratoire. On peut notamment remarquer que :

1. Le comportement en service d'une poutre en bois lamellé-agrafé peut être prédit grâce au logiciel *PAMIR* du fabricant *MITEK*. Ce modèle s'est montré très strict, en donnant des déformations plus grandes que ce qui a été observé en réalité.
2. La méthode Gamma et le modèle *SCIA* sont deux bons moyens de calculer les déformations de ces poutres mécaniquement assemblées. Ils réagissent globalement de manière similaire, pour des valeurs estimées du module de glissement, et permettent une estimation sécuritaire du comportement des poutres en bois lamellé-agrafé.
3. Pour les valeurs de k_{ser} mesurées avec la *DIC*, la méthode Gamma et le modèle *SCIA* ont tendance à se différencier et englober le comportement réel de la poutre (considérer les graphiques à l'annexe J). Cela démontre bien que ces deux modèles sont bien fidèles à la réalité quand la véritable valeur du k_{ser} est utilisée.

Une comparaison chiffrée est faite au tableau 3.9. Celui reprend, pour chaque modèle et pour chacune des 3 déformations considérées, le rapport entre le modèle et le comportement réel des six poutres.

Poutre		1	2	3	4	5	6	Moyenne
Gamma (k_{ser} DIC)	$\ell/150$	100 %	100 %	93 %	96 %	108 %	104 %	100 %
	$\ell/300$	99 %	98 %	91 %	93 %	103 %	102 %	97 %
	$\ell/500$	100 %	98 %	89 %	94 %	102 %	103 %	97 %
SCIA (k_{ser} DIC)	$\ell/150$	96 %	95 %	87 %	90 %	102 %	97 %	95 %
	$\ell/300$	95 %	93 %	85 %	88 %	97 %	95 %	92 %
	$\ell/500$	95 %	93 %	83 %	89 %	96 %	96 %	92 %
Gamma (k_{ser} estimé)	$\ell/150$	88 %	91 %	80 %	85 %	96 %	91 %	88 %
	$\ell/300$	87 %	89 %	78 %	83 %	92 %	89 %	86 %
	$\ell/500$	87 %	89 %	76 %	83 %	91 %	90 %	86 %
SCIA (k_{ser} estimé)	$\ell/150$	88 %	90 %	79 %	84 %	94 %	89 %	87 %
	$\ell/300$	88 %	88 %	77 %	81 %	89 %	87 %	85 %
	$\ell/500$	88 %	88 %	75 %	82 %	89 %	88 %	85 %
PAMIR ($k_{ser} = 14,7$)	$\ell/150$	84 %	83 %	73 %	77 %	87 %	82 %	81 %
	$\ell/300$	83 %	81 %	71 %	75 %	82 %	80 %	79 %
	$\ell/500$	84 %	81 %	70 %	76 %	82 %	81 %	79 %

TABLE 3.9 – Comparatif des différentes méthodes utilisées pour prédire le comportement des poutres en bois lamellé-agrafé

3.4.3.4 | Le bois lamellé-agrafé est-il compétitif ?

Pour finir, il faut se demander à quel point la solution proposée a sa place sur le marché. Pour cela, deux poutres en bois massif sont passées sur le même banc d'essai que les six poutres en bois lamellé-agrafé.

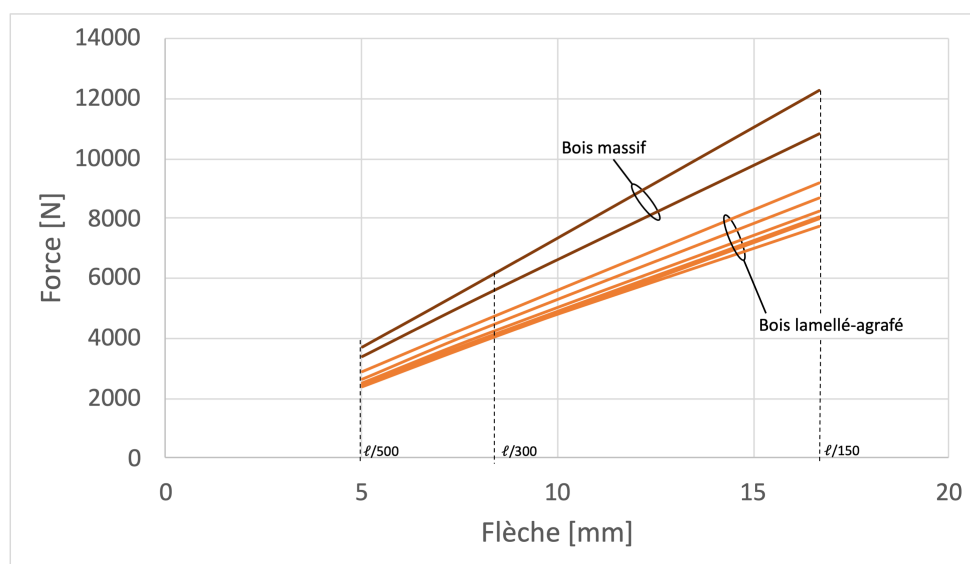


FIGURE 3.34 – Comparaison entre le bois massif et le bois lamellé-agrafé

En terme de déformation, la figure 3.34 montre que le bois massif reste plus performant que le bois lamellé-agrafé. En effet, il est évident que la rigidité effective d'une poutre complètement homogène est supérieure à la rigidité d'une poutre mécaniquement assemblée. Toutefois, le système de poutre étudié dans ce mémoire, permet d'arriver, en moyenne, à 64 [%] des capacités d'une poutre en bois massif.

L'idée de remplacer le bois massif par du bois lamellé-agrafé n'a pas vraiment lieu d'être. En effet, si les conditions de charges et de portées sont satisfaites par l'utilisation du bois massif, on ne trouve pas d'avantage à assembler deux plus petites sections avec des connecteurs. L'étude présente vise plutôt à rendre plus accessible la fabrication d'éléments de haute section, pour le franchissement de portées allant au-delà de ce qui est permis par la nature. Citons le bois lamellé-collé, véritable révolution dans la construction bois. Aucun essai n'ayant été réalisé sur le bois lamellé-collé, on peut tout de même mesurer sa capacité avec celle du bois lamellé-agrafé grâce au rapport de leur rigidité :

$$\eta = 64 \cdot \frac{E_{mean,C24}}{E_{mean,GL28h}} = 64 \cdot \frac{11000}{12600} = 56 \% \quad (3.17)$$

Ainsi, le bois lamellé-agrafé (BLA) arriverait en moyenne à un peu plus de la moitié des capacités du bois lamellé-collé (BLC). Présenté comme cela, il y a de quoi se demander quelle serait l'utilité de ces nouvelles poutres en bois lamellé-agrafé.

La raison qui continue de pousser le développement de ce sujet d'étude est le prix. En effet, sans faire une étude approfondie des coûts, des investissements et amortissements liés à la fabrication de ces deux types de poutres, il y a de bonnes raisons de penser que le bois lamellé-agrafé se fabrique à un prix plus abordable que le bois lamellé-collé.

Pour justifier l'intérêt qu'il pourrait y avoir autour du BLA, il faudrait arriver à prouver que le coût de sa production descend au moins deux fois en dessous du coût du bois lamellé-collé. Ceci pour contraster le pourcentage obtenu à l'équation 3.17. Il faudrait dans ce cas une transparence complète de la part des fabricants de BLC et une étude financière très rigoureuse. Cela n'est pas l'objet de ce travail, mais il est toutefois possible d'énumérer certains faits.

En supposant que le BLA et BLC sont composés de bois au même prix :

1. L'équipement nécessaire à la fabrication du BLA est bien plus modeste que celui nécessaire à la fabrication du BLC. En se renseignant simplement sur le prix de l'encolleuse permettant d'abouter les lames qui constitueront le bois lamellé-collé, on peut trouver sur la toile des prix allant jusqu'à 200 000€ pour une machine d'occasion. Sans même passer en revue le restant de la chaîne de production du BLC, il faut noter que la fabrication du BLA nécessite seulement une presse (50 000€) destinée à enfoncer les connecteurs. Ceux-ci servant à la fois à solidariser les lames mais aussi à les abouter⁹. D'autant plus que, si c'est un fabricant de fermette préfabriquée qui veut se lancer dans la production de BLA, il sera forcément déjà en possession de cette presse.
2. La règle concernant l'humidité des bois lors de la fabrication est également différente. Le bois utilisé pour la fabrication de BLC doit être à 13% d'humidité. Comme je l'ai expérimenté dans ce travail, c'est rarement le cas des bois sortant de la scierie. Un investissement dans un séchoir ainsi qu'un temps destiné à ce séchage sont donc requis. En ce qui concerne le BLA, une règle présente dans le DTU31.3 demande simplement d'exécuter la fabrication de fermettes à l'aide de bois contenant une humidité de 18%. Cette règle peut également s'appliquer au BLA et peut être satisfaite sans moyen de séchage artificiel.
3. La colle étant un composant délicat et essentiel au bon fonctionnement du BLC, son séchage est également primordial. Les locaux doivent donc être correctement isolés et tempérés.
4. Si la section commandée en bois lamellé-collé n'est pas une section courante, cela entraîne des changements plus conséquents que pour le bois lamellé-agré dans la ligne de production. Cela se traduit souvent par de longs délais d'attente. Encore une fois, le bois lamellé-agré devrait offrir une plus grande réactivité.

Cette liste, non-exhaustive, met en évidence les points qui pourraient démarquer le BLA face au BLC. Cette réflexion doit encore faire l'objet d'une plus grande étude mais laisse déjà penser, à ce stade, que le BLA reste une solution qui peut être considérée pour construire des éléments de forte section. En particulier, pour des conditions de production qui se veulent moins coûteuses, moins contraignantes et plus rapides. Ces trois aspects peuvent être résumés en un : **l'accessibilité**.

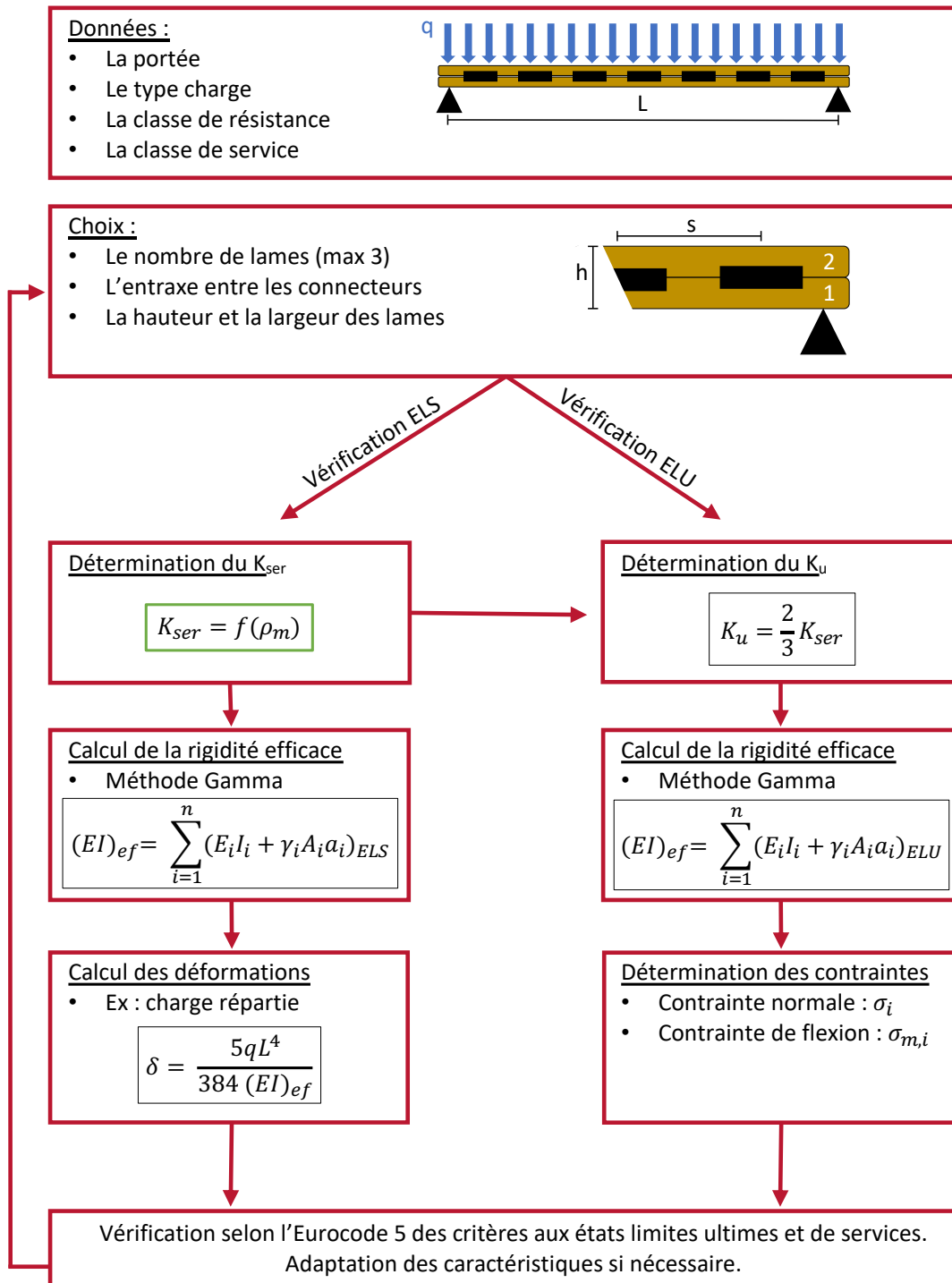
9. Le paragraphe §8.8.5.1(4) de l'Eurocode 5 décrit la manière de réaliser ces aboutages

3.4.4 | Méthodologie pour le dimensionnement de poutre en bois lamellé-agrafé

Les études réalisées, d'abord sur les connecteurs métalliques et ensuite sur les poutres assemblées avec ceux-ci, permettent d'avoir une vue plus globale sur la manière de calculer ces éléments.

Le schéma à la page suivante est un résumé de la méthode de dimensionnement décrite par l'*Eurocode 5*. Il met en évidence les grandes étapes qui sont à prendre en compte dans le dimensionnement d'une poutre en bois lamellé-agrafé. On peut y voir clairement, dans l'encadré vert, que la détermination du module de glissement K_{ser} est un point carrefour de la démarche. Ceci démontre bien l'utilité des études faites tout au long de ce mémoire et encourage le développement de nouvelles recherches pour affiner l'expression analytique du K_{ser} .

Organigramme du dimensionnement d'une poutre en bois lamellé-agréé selon l'EC5



Pistes d'améliorations

Ce mémoire est la suite d'une année d'étude réalisée par Corto Lahaye, sur le bois lamellé-agrafé et ses plaques métalliques embouties. Les perspectives futures qu'il imaginait concernant ce projet étaient déjà nombreuses et il faut maintenant se demander, après une année d'étude supplémentaire, où nous en sommes. Cette partie suggère quelques sujets de recherche pour ceux ou celles qui voudraient continuer cette étude.

4.1 | Paramètres liés au connecteur

À la section 3.1.1, nous faisons une simplification conséquente :

$$K_{ser} = f(\rho_m, d, \alpha, \beta, L/l) \approx f(\rho_m) \quad (4.1)$$

Cette équation montre bien le chemin qu'il reste encore à parcourir avant de pouvoir complètement caractériser les plaques métalliques embouties.

4.1.1 | La densité des dents (d)

Pour des raisons expliquées à la partie 3.1.2, seul un type de connecteur a été considéré dans l'étude expérimentale de ce mémoire. Or d'autres types de connecteurs comme le *WOLF* ou le *BOVA* étaient en notre possession. Le nouveau connecteur continu *Sharp-Metal*, mis sur le marché par *Rhotoblass* (voir section 1.4.2.3) est maintenant disponible et de bons contacts avec les responsables commerciaux sont entretenus.

Étudier d'autres types de connecteurs permettrait de mettre en évidence l'influence de la densité des dents. Ce paramètre est le point de départ vers la détermination du connecteur optimal. Comme relevé dans le précédent mémoire, vaut-il mieux privilégier un connecteur avec peu de longues dents, comme un *BOVA*, ou plutôt un connecteur avec de nombreuses dents plus courtes comme un *MITEK* ou encore un *WOLF* ?

En plus de faire varier la densité des dents, le *SharpMetal* permet également de réaliser des poutres mécaniquement assemblées en continu sur toute la longueur. À la lumière de ce qui a été observé à la figure 3.31 de la partie 3.4.3.2, ces connecteurs pourraient apporter beaucoup à la rigidité globale de la poutre. En effet, il a été montré avec la *DIC* que la grande partie des déplacements se trouvait entre les connecteurs. Un connecteur continu pourrait ainsi diminuer la possibilité de ces déplacements.

4.1.1.1 | L'orientation du connecteur (α et β)

Ces deux angles sont considérés dans le calcul de capacité d'ancrage du connecteur et ont, potentiellement aussi une influence sur le module de glissement. De plus, ce travail a permis de mettre en évidence que l'inclinaison du connecteur cisailé, par rapport à la ligne d'assemblage, permettait de faire intervenir le frottement entre les éléments de bois. Il serait donc également intéressant de refaire une campagne d'essais sur des poutres connectées à l'aide de connecteurs inclinés par rapport à la ligne d'assemblage. Aussi, il a été démontré dans la méthode Gamma (section 2.3) que les organes d'assemblage induisaient des contraintes normales dans la poutre. Celles-ci rendent le diagramme des contraintes de flexion dissymétrique dans la section de poutre et décalent la fibre neutre de la ligne d'assemblage. Dans ce cas, il serait également pertinent de se questionner sur la position verticale du connecteur. Est-ce préférable de placer le connecteur sur la ligne d'assemblage, sur la fibre neutre où les contraintes sont nulles, ou encore du côté où les contraintes sont les plus importantes de manière à les reprendre ?

4.1.1.2 | La taille du connecteur (L/l)

Ce paramètre vient de la notion du nombre efficace (n_{ef}) dans les assemblages tiges. Ceux-ci voient toujours leurs tiges extérieures être plus sollicitées que les intérieures. Dans notre cas, les tiges peuvent être assimilées aux dents du connecteur et une étude sur le sujet permettrait de fixer une longueur et une largeur optimales vis-à-vis de la sollicitation sur la plaque. Pour l'instant, ce n'est pas évident de savoir quelle taille choisir, même si le logiciel *PAMIR* permet déjà d'être conseillé à ce sujet.

4.2 | Modèle théorique

Au total, trois modèles ont été utilisés dans ce travail et ont tous les 3 fait preuve d'une bonne fidélité à la réalité. Cependant, le nombre d'essais sur les poutres a été assez restreint et il est intéressant de continuer à les utiliser pour vérifier leur exactitude et les développer si nécessaire.

Un autre modèle qui n'a pas été utilisé dans ce travail est un modèle basé sur la méthode de *Kreuzinger*. Celui-ci a bien été étudié par Corto Lahaye et permettait d'étudier des poutres mécaniquement assemblées à plus de trois lames. Il pourrait donc s'avérer utile dans le cas où on développerait le sujet jusqu'à l'utilisation de poutres de très grandes sections, ou encore si les lames sont positionnées à plat et plus sur chant, ce qui pourrait élever le nombre de lames au dessus de 3.

4.3 | Amélioration de la méthode d'essai sur les poutres

Au cours des essais, Bertrand Dubois, ingénieur en recherche et développement chez *Scidus sa*, a émis l'idée de faire des essais non destructifs sur les poutres en bois massif avant de réaliser les essais sur poutres mécaniquement assemblées.

Son idée était donc de tester, dans un premier temps, une poutre en bois massif, jusqu'au critère de flèche défini comme non-destructif ($\ell/350$). On peut grâce à cet essai déterminer la rigidité en flexion de la poutre (EI).

Ensuite, on déligne la poutre dans sa longueur et on l'assemble de nouveau à l'aide des connecteurs. On refait alors l'essai sur la même poutre qui, cette fois, est assemblée mécaniquement. Ceci conduit à la détermination d'une nouvelle rigidité de flexion $(EI)_{ef}$ qui permet de comparer les capacités de la même poutre, dans sa configuration unie et dans sa configuration mécaniquement assemblée.

4.4 | Analyse statistique

Pour terminer, l'entrevue avec Mme Catherine Rasse a permis de démontrer l'importance des statistiques dans la détermination d'une expression analytique sur base d'un certain nombre de résultats. Cette approche aurait dû être faite dès le début et plus de temps aurait dû y être consacrée. J'encourage alors les futurs aspirants à ce sujet à prendre cet aspect plus au sérieux.

Conclusions et perspectives

Ce mémoire met en évidence la possibilité de construire des éléments en bois de forte section à l'aide de plaques métalliques embouties. Il est le fruit de deux années d'étude qui mettent en perspective l'utilisation de poutres en bois lamellé-agrafé dans le bâtiment. Ces poutres, constituées d'une superposition de plusieurs éléments élancés assemblés par ces connecteurs métalliques, peuvent être aperçues à l'entrait d'une ferme ou encore comme renfort d'une vieille poutre. Toutefois, aucune étude sérieuse pour proposer le bois lamellé-agrafé comme solution à part entière n'a encore vu le jour.

En parallèle, ce travail vise à caractériser le module de glissement K_{ser} des plaques métalliques embouties. Cette notion est directement liée à la rigidité des assemblages utilisant ce type d'organe. À l'heure actuelle, l'*Eurocode 5* donne la possibilité de calculer le module de glissement pour certains types d'assemblage, mais aucun moyen analytique ne permet de calculer celui de ces plaques métalliques. Il était donc nécessaire de comprendre le comportement de ces assemblages avant de commencer à assembler des poutres.

La première étape était de se mettre à la recherche de toute la matière théorique permettant de comprendre le calcul des assemblages par plaques métalliques embouties. Les normes, ainsi que quelques ouvrages sur le sujet, ont permis de me familiariser avec le connecteur surfacique et de me construire un bagage théorique solide. C'est aussi cette première reconnaissance qui a permis de décider de la direction à donner à ce travail.

Un premier moyen de modéliser des poutres mécaniquement assemblées est apparu dans l'annexe B de l'*Eurocode 5*. Cette méthode, aussi appelée la méthode Gamma, fait intervenir le module de glissement K_{ser} pour permettre de calculer les déformations et les contraintes subies par de telles poutres. Dès lors, ce modèle avait déjà permis de comprendre l'influence du paramètre K_{ser} sur le comportement des poutres mécaniquement assemblées.

Très vite, l'envie de vérifier l'exactitude de ce modèle en le confrontant à d'autres s'est faite sentir. Un second modèle numérique, imaginé sur le logiciel de calcul *SCIA*, s'est alors construit. Celui-ci a permis de constater que le même comportement était observé en utilisant deux approches différentes.

Pour notre plus grande joie, le fabricant de connecteurs *MITEK* a décidé d'apporter son aide dans cette étude et a mis à disposition son logiciel de calcul, *PAMIR*. Cela m'a permis de comptabiliser trois moyens de modéliser le comportement des poutres en bois lamellé-agrafé.

Ensuite, trois campagnes d'essais ont vu le jour. La première était destinée à trouver une formule analytique liant le module de glissement K_{ser} à la densité des bois assemblés à l'aide des plaques métalliques embouties. Cette expression a été déterminée et comparée à d'autres formules trouvées dans la littérature pour finalement sembler satisfaire l'objectif.

La seconde campagne était une campagne de transition pour permettre de caractériser un assemblage réalisé à l'aide de connecteurs, sollicités en cisaillement. Ces essais ont permis de déterminer, en partie, le glissement entre les lames de la poutre en bois lamellé-agrafé. La troisième campagne a pu alors commencer.

Cette dernière permettait de répondre à la problématique initiale : le bois lamellé-agrafé est-il une solution sérieuse qui pourrait avoir sa place sur le marché ? Pour le savoir, cette campagne d'essais a permis de réaliser une comparaison, basée sur les déplacements entre le bois lamellé-agrafé et le bois lamellé-collé. Les résultats d'essais ont montré que nos poutres en bois lamellé-agrafé subissaient des déformations de l'ordre de deux fois plus grandes que celles qui seraient observées avec du bois lamellé-collé.

Bien que probablement moins coûteux, le BLA continue de se déformer de manière excessive. Toutefois, une amélioration se marque par rapport au premier travail sur le sujet et j'encourage donc la poursuite des réflexions entamées dans ce mémoire.

*"There is no such thing as **failure**. There are only **results**"*

***Anthony Jay Robbins**, Auteur américain*

Comparaison des connecteurs *WOLF* et *MITEK*

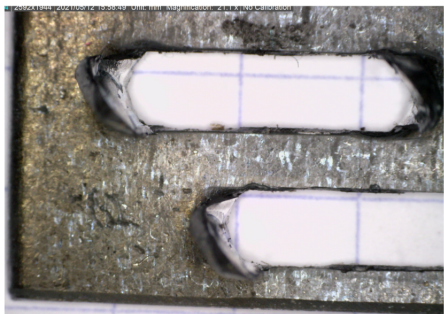
L'utilisation d'une caméra de précision permet de mettre en évidence certaines différences au niveau de la torsion des dents. La taille de celles-ci est plus petite chez *MITEK* et le pattern d'emboutissage diffère entre les deux connecteurs également.



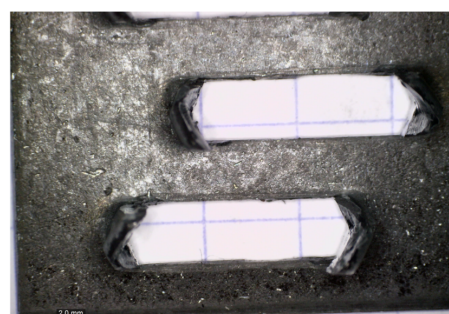
(a) Dents du connecteur *WOLF*



(b) Dents du connecteur *MITEK*



(a) Vue en plan du connecteur *WOLF*



(b) Vue en plan du connecteur *MITEK*

Mécanique des ressorts

Cette annexe redémontre brièvement les formules qui permettent de calculer la rigidité équivalente k_{eq} pour des systèmes de ressorts disposés en série et en parallèle.

B.1 | Ressorts en parallèle

Soient deux ressorts de rigidités différentes attachés à une masse. La particularité d'un tel système est l'équivalence des déplacements subis par les deux ressorts.

Les équations sont :

$$\begin{cases} F_{eq} = F_1 + F_2 \\ F_i = k_i \cdot \Delta L \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

On peut dès lors écrire :

$$k_{eq} \cdot \Delta L = k_1 \cdot \Delta L + k_2 \cdot \Delta L \quad (\text{B.2})$$

$$k_{eq} = k_1 + k_2 \quad (\text{B.3})$$

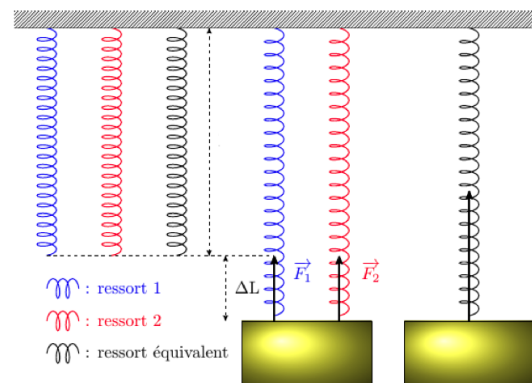


FIGURE B.1 – Système de ressorts en parallèle [60]

B.2 | Ressorts en série

Soient deux ressorts de rigidités différentes attachés l'un à la suite de l'autre puis reliés à une masse. La particularité d'un tel système est l'équivalence des forces subies par les deux ressorts.

Les équations sont :

$$\begin{cases} \Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 \\ F_{eq} = F_1 = F_2 \\ F_i = k_i \cdot \Delta L_i \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

On peut dès lors écrire :

$$\frac{F_{eq}}{k_{eq}} = \frac{F_1}{k_1} + \frac{F_2}{k_2} \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (\text{B.6})$$

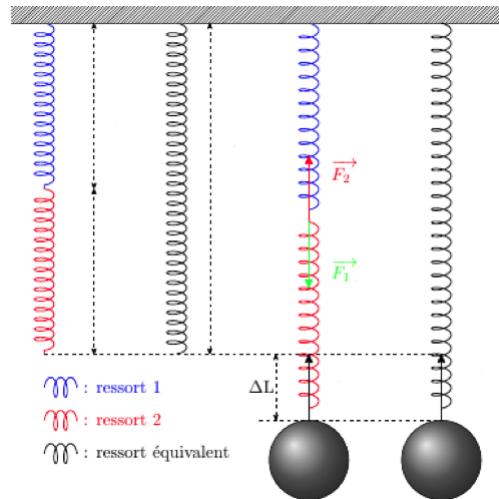


FIGURE B.2 – Système de ressorts en série

[60]

Simplification des expressions bois-béton

Pour le calcul de poutres mécaniquement assemblées constituées de lames en bois de même classe de résistance, il est possible de simplifier les 4 expressions suivantes

- A. $\frac{\sigma_{i,m} + \sigma_{i,n}}{f_{c,d}} \leq 1$
- B. $\frac{\sigma_{i,m} -^* \sigma_{i,n}}{f_{t,d}} \leq 1$
- C. $\frac{\sigma_{i,m}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{i,n}}{f_{c,d}} \leq 1$
- D. $\frac{\sigma_{i,m}}{f_{m,d}} -^* \frac{\sigma_{i,n}}{f_{t,d}} \leq 1$

* En cas de traction dans la membrure, la contrainte $\sigma_{i,n}$ est négative. Le signe négatif permet alors d'ajouter l'effet de cette contrainte normale à la contrainte de flexion.

Pour une poutre mécaniquement assemblée normalement fléchie, il faut :

- Vérifier la membrure supérieure comprimée.
 - Vérifier le critère A. S'il est vérifié, alors le critère C l'est aussi car $f_{m,d} > f_{c,d}$.
 - Vérifier le critère B.
 - Le critère D n'a pas lieu d'être car la membrure est en flexion et compression.
- Vérifier la membrure inférieure tendue.
 - Vérifier le critère A. Le critère C n'a pas lieu d'être car la membrure est en flexion et traction.
 - Vérifier le critère B. S'il est vérifié, alors le critère D l'est aussi car $f_{m,d} > f_{t,d}$.
 - Le critère D n'a pas lieu d'être car la membrure est en flexion et compression.

En conclusion, on peut dans ce cas se limiter à vérifier les critères A et B.

Module de glissement des éprouvettes en traction

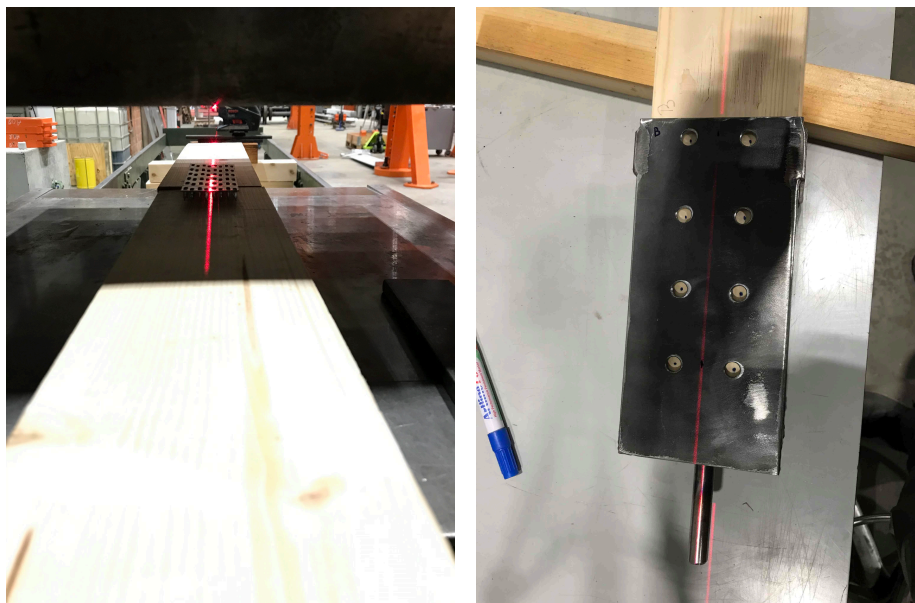
Cette annexe, présente sous forme de tableau les résultats obtenus à la suite des essais de traction. Au total, 10 éprouvettes ont été testées par essence. Ce qui constitue 3 groupes de 10 échantillons et donc 30 résultats.

Épicéa	$K_{ser} [N/mm]$	$k_{ser} [N/mm^3]$	$\rho_{eprouvette} [kg/m^3]$	Humidité moyenne [%]
1	46911,47	13,34	460,97	10,35
2	44965,91	12,79	457,31	10,00
3	41931,18	11,93	451,95	11,05
4	40766,50	11,60	442,95	10,85
5	41463,69	11,80	431,8	10,65
6	44478,98	12,65	420,11	10,70
7	34076,33	9,69	388,21	9,90
8	34771,42	9,89	370,31	10,25
10	32975,13	9,38	357,31	10,40
11	36481,01	10,38	405,75	10,15
Cv [%]	12,5	12,5	8,9	3,6
Moyenne	39882,16	11,35	418,67	10,43

Chêne	$K_{ser} [N/mm]$	$k_{ser} [N/mm^3]$	$\rho_{eprouvette} [kg/m^3]$	Humidité moyenne [%]
1	58610,55	16,67	643,89	11,40
2	74934,89	21,32	672,51	12,50
3	78080,90	22,21	681,19	10,95
4	63769,85	18,14	694,7	11,05
5	59431,25	16,91	704,59	10,95
6	82466,26	23,46	722,96	13,65
7	70289,06	19,99	729,17	11,20
8	61717,13	17,56	738,92	10,00
9	59873,59	17,03	749,32	9,75
10	73397,40	20,88	776,34	13,15
Cv [%]	12,7	12,7	5,6	11,1
Moyenne	68257,09	19,42	711,36	11,46

Hêtre	$K_{ser} [N/mm]$	$k_{ser} [N/mm^3]$	$\rho_{eprouvette} [kg/m^3]$	Humidité moyenne [%]
1	63697,25	18,12	722,45	12,10
2	74475,99	21,19	738,89	12,25
3	66343,18	18,87	743,38	13,05
4	59108,27	16,81	748,8	12,85
5	83957,93	23,88	750,04	12,40
6	83992,50	23,89	753,19	11,50
7	79205,82	22,53	759,73	11,60
8	85042,91	24,19	765,32	11,90
9	70610,00	20,09	771,29	11,70
10	84770,63	24,11	776,35	12,40
Cv [%]	12,9	12,9	2,1	4,3
Moyenne	75120,45	21,37	752,94	12,18

Préparation et rupture des éprouvettes en traction



(a) Alignement connecteur-bois

(b) Alignement connecteur-bois-mors

FIGURE E.1 – Utilisation d'un laser pour s'assurer d'un bon alignement de tous les composants de l'éprouvette en traction

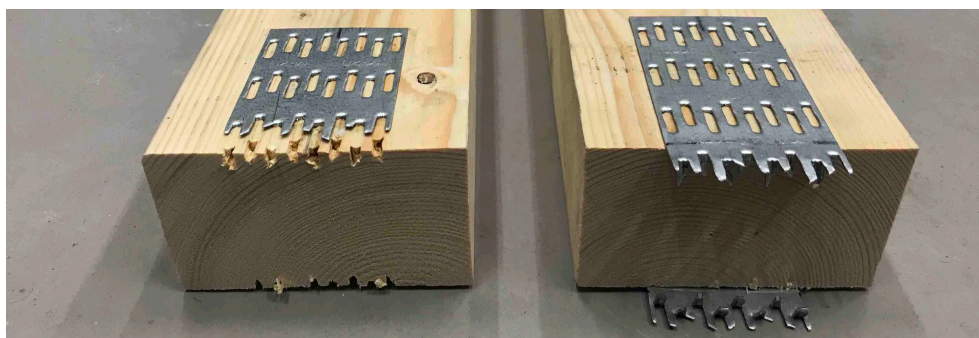


FIGURE E.2 – Rupture dans la plaque

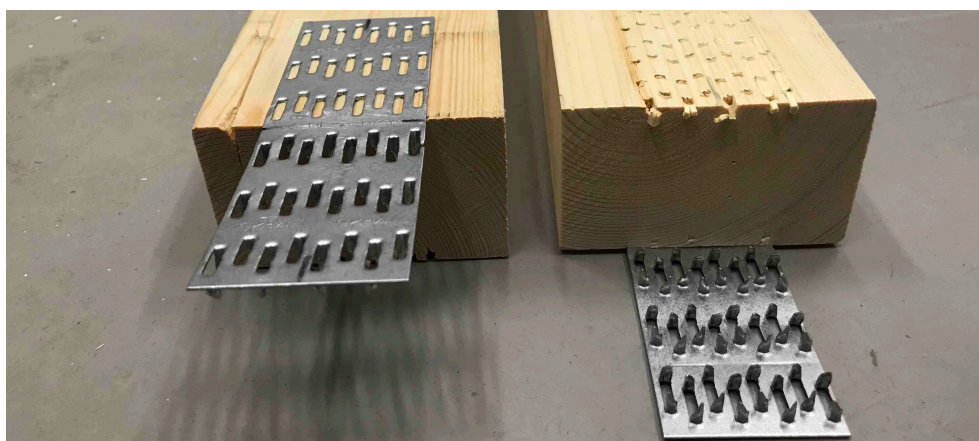


FIGURE E.3 – Rupture à la surface d'ancrage

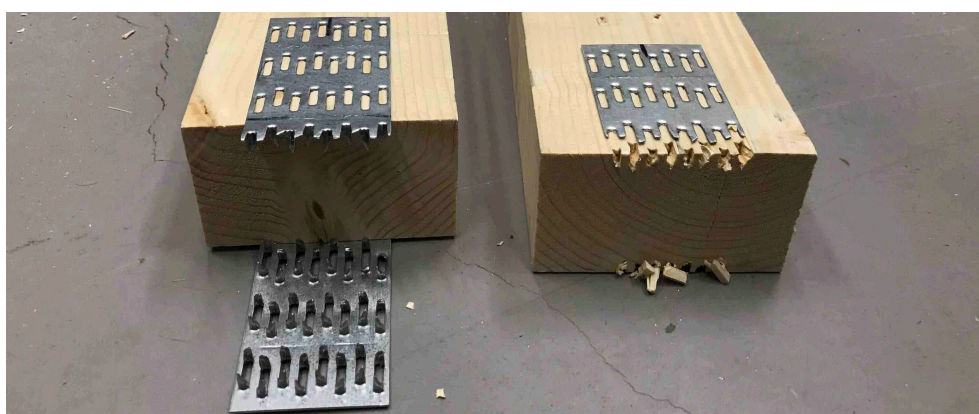


FIGURE E.4 – Rupture mixte

Module de glissement ultime K_u

Les valeurs du module de glissement ultime K_u , calculées sur base des courbes expérimentales du chêne et du hêtre, sont reprises dans les tableaux ci-dessous.

Chêne	$K_{ser} [N/mm]$	$K_u [N/mm]$	$K_u / K_{ser} [-]$
1	58610,55	36553,76	0,62
2	74934,89	59700,29	0,80
3	78080,90	68589,68	0,88
4	63769,85	51143,74	0,80
5	59431,25	43910,71	0,74
6	82466,26	68258,36	0,83
7	70289,06	56471,86	0,80
8	61717,13	51347,57	0,83
9	59873,59	40159,57	0,67
10	73397,40	59526,31	0,81
Moyenne	68257,09	53566,19	0,78

Hêtre	$K_{ser} [N/mm]$	$K_u [N/mm]$	$K_u / K_{ser} [-]$
1	63697,25	37248,42	0,58
2	74475,99	64134,32	0,86
3	66343,18	46275,21	0,70
4	59108,27	33271,68	0,56
5	83957,93	71623,19	0,85
6	83992,50	69201,32	0,82
7	79205,82	65288,04	0,82
8	85042,91	62905,53	0,74
9	70610,00	49818,21	0,71
10	84770,63	68520,03	0,81
Moyenne	75120,45	56828,59	0,75

Module de glissement des éprouvettes en cisaillement

Chêne	$k_{ser,gauche} [N/mm^3]$	$k_{ser,droit} [N/mm^3]$	$\rho_{eprouvette} [kg/m^3]$
1	11,41	15,40	672,46
2	20,45	12,44	689,62
3	15,77	16,97	736,13
4	25,17	14,00	752,99
5	30,80	12,59	801,47
6	8,27	21,82	834,30
Cv [%]	45,6	22,7	8,4
Moyenne	18,64	15,54	747,83

Hêtre	$k_{ser,gauche} [N/mm^3]$	$k_{ser,droit} [N/mm^3]$	$\rho_{eprouvette} [kg/m^3]$
1	16,24	12,27	676,50
2	14,43	14,17	715,58
3	17,46	14,79	736,07
4	25,36	14,56	749,44
5	14,94	17,04	766,70
6	19,68	17,21	776,01
7	19,48	20,79	791,34
8	16,05	22,67	803,19
9	16,62	15,41	821,20
Cv [%]	18,8	20,1	6,0
Moyenne	17,81	16,54	759,56

Calcul au déversement d'une poutre

Bien que le rapport L/h de nos poutres ne dépasse pas 3, il y a lieu de s'assurer qu'elles ne déverseront pas lors de l'essai de flexion 4 points.

La poutre est considérée comme insensible au déversement lorsque le coefficient pondérateur k_{crit} vaut 1. Celui-ci se calcul comme :

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{si } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{si } 0,75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{si } \lambda_{rel,m} > 1,4 \end{cases} \quad (H.1)$$

Avec :

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (H.2)$$

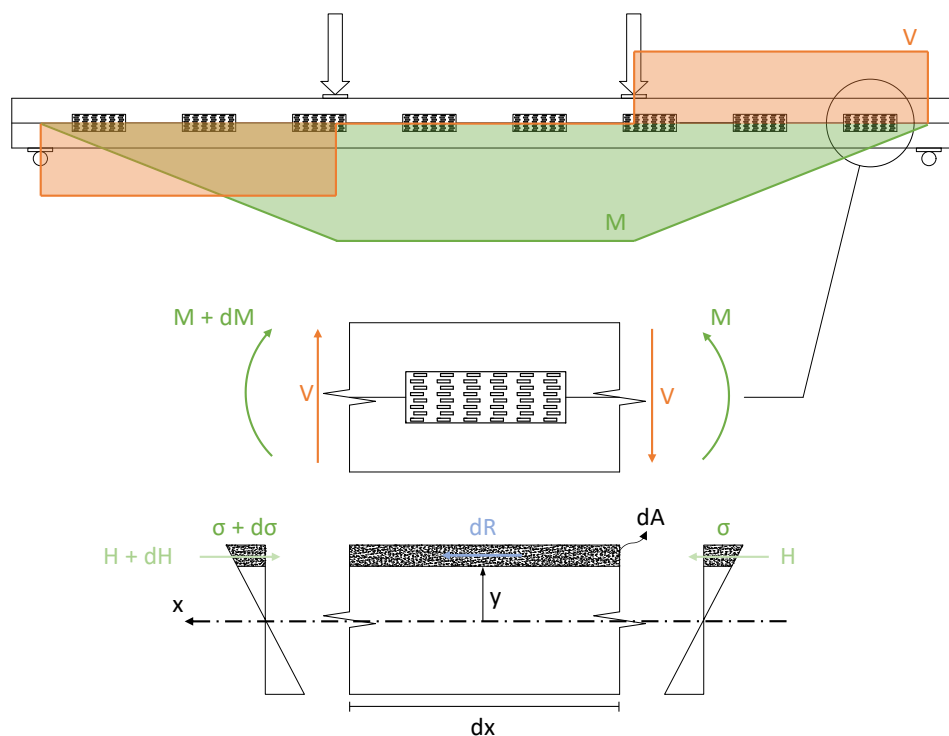
$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2 \cdot E_{0,k}}{h \cdot L_{ef}} \quad (H.3)$$

En prenant une longueur effective de $L_{ef} = 2500 [mm]$, un module de Young caractéristique $E_{0,k} = 7400 [MPa]$ correspondant à une classe de résistance C24 et une résistance en flexion $f_{m,k} = 24 [MPa]$, la largeur (b) de la poutre doit se trouver sous les 52 [mm] pour donner un k_{crit} inférieur à l'unité, et donc déverser.

Dans notre cas, la largeur de la poutre est de 60 [mm], ce qui évite toutes précautions à prendre vis-à-vis du déversement.

Effort sollicitant les connecteurs d'une poutre en bois lamellé-agrafé

Cette annexe démontre le lien existant entre l'effort tranchant dans la poutre et l'effort de cisaillement dans le connecteur situé près de l'appui. Lors de l'essai de flexion 4 points, le connecteur au droit de l'appui se trouve dans une zone où l'effort tranchant est constant et le moment croît dans la direction du milieu de la poutre.



En faisant l'équilibre d'un petit morceau de poutre de longueur dx , on se rend compte que l'équilibre horizontale existe, si et seulement si, un effort dR existe. Celui-ci doit-être tel que $dR = dH$. En partant de cet équilibre et en intégrant la différence de contrainte $d\sigma$ sur toute la section A de la poutre, on peut trouver :

$$\begin{aligned}
 dR &= dH \\
 &= \int_A d\sigma \cdot dA \\
 &= \int_A \left(\frac{y}{I} \cdot dM \right) dA \\
 &= \int_A \left(\frac{y}{I} (V \cdot dx) \right) dA \\
 &= \frac{V \cdot dx}{I} \int_A y \cdot dA \\
 dR &= \frac{V \cdot S_y}{I} \cdot dx
 \end{aligned} \tag{I.1}$$

La dernière expression fait intervenir S_y , le moment statique de l'aire A par rapport à l'axe neutre. Celui-ci vaut pour une section rectangulaire :

$$\begin{aligned}
 S_y &= \int_y^{h/2} y \cdot dA \\
 &= \int_y^{h/2} y \cdot (b \cdot dy) \\
 &= \frac{b}{2} \cdot [y^2]_y^{h/2} \\
 &= \frac{b}{2} \cdot \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right)
 \end{aligned} \tag{I.2}$$

Les poutres mécaniquement assemblées étant constituées de lames de mêmes hauteurs, l'effort rasant à considérer est celui à mi-hauteur de la poutre. Dans ce cas, il faut se placer à la hauteur de la fibre neutre. Ceci se traduit par une valeur $y = 0$ et donc :

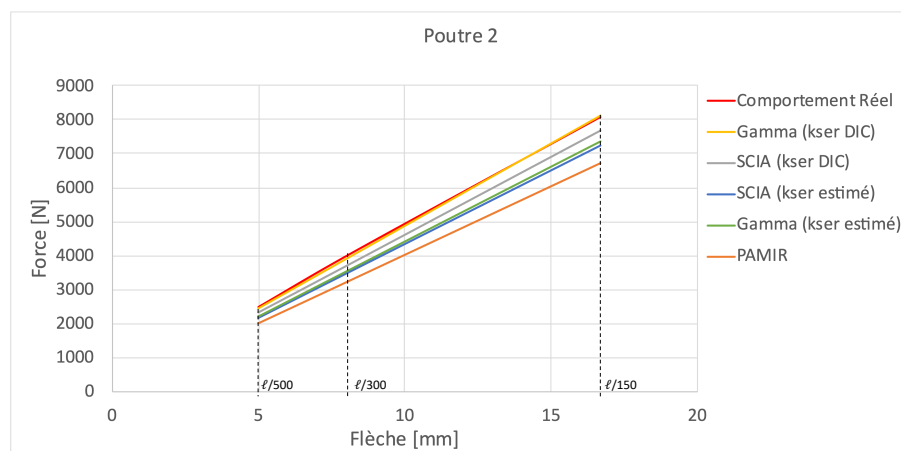
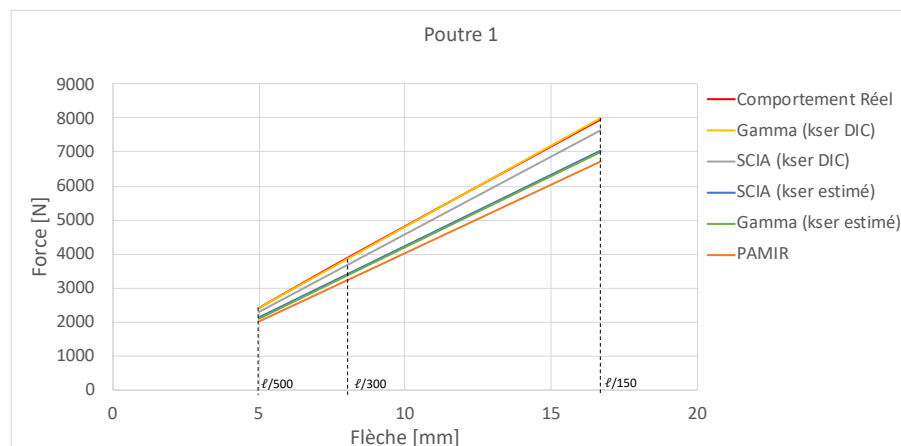
$$S_y = \frac{b \cdot h^2}{8} \tag{I.3}$$

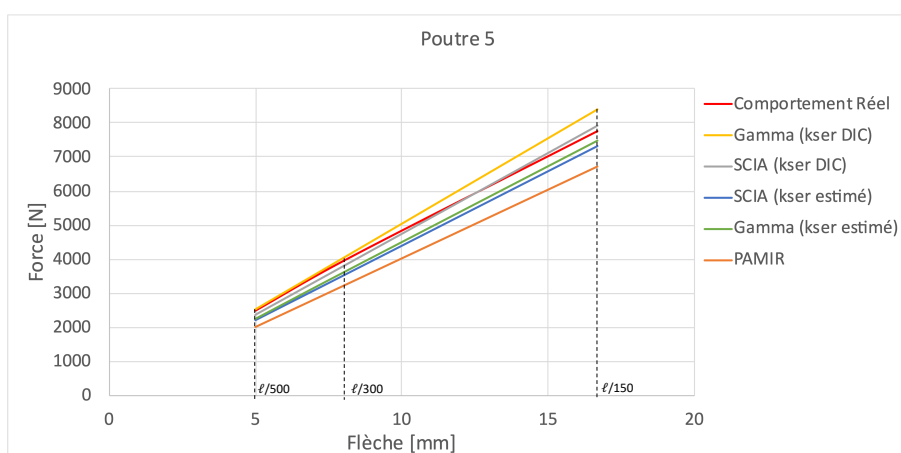
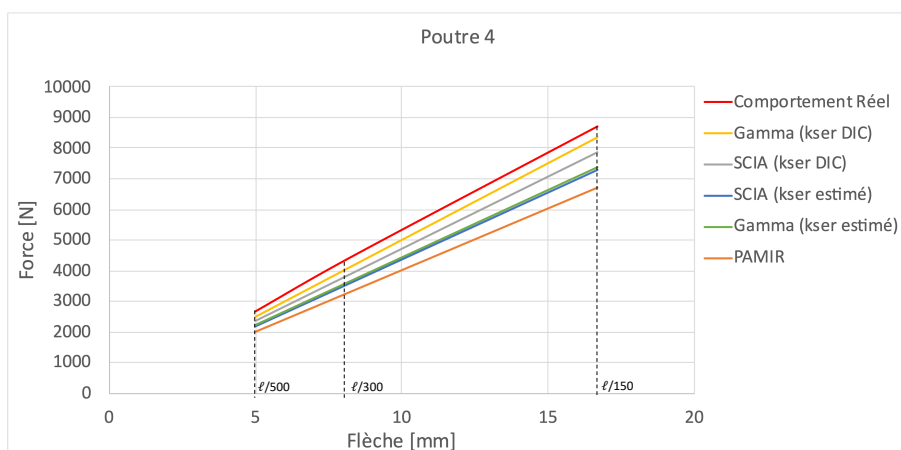
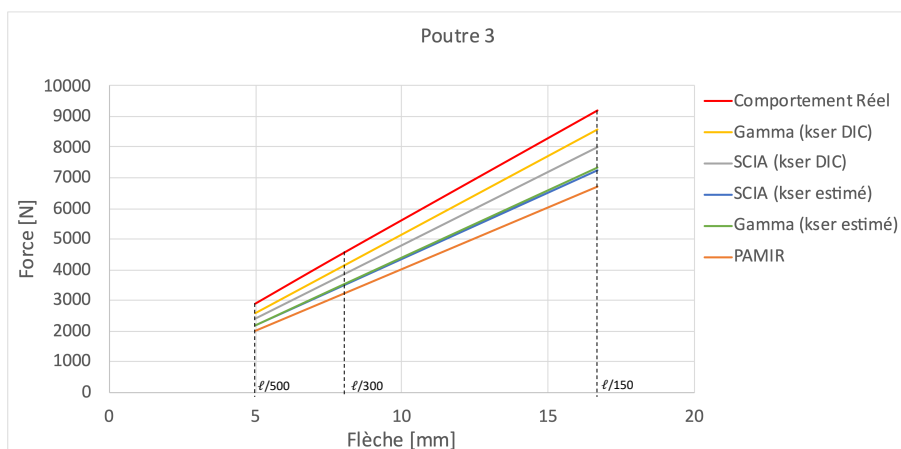
et par conséquent un effort rasant égale à :

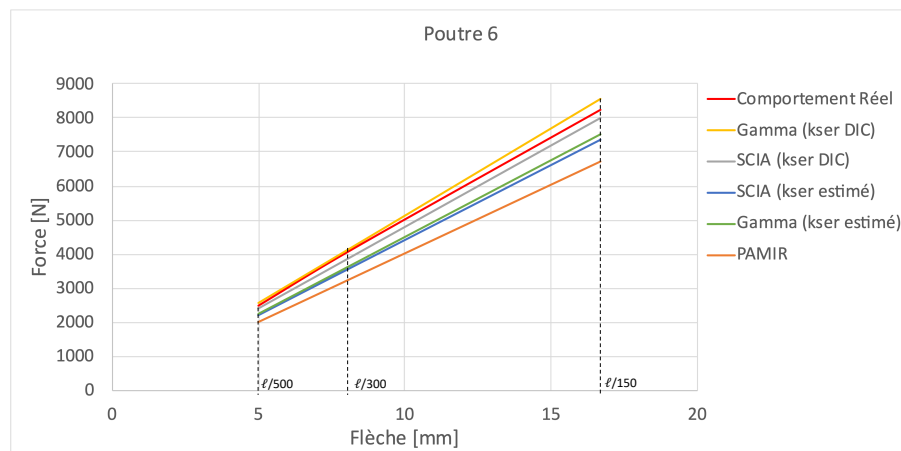
$$\begin{aligned}
 dR &= \frac{V \cdot (b \cdot h^2/8)}{b \cdot h^3/12} \\
 &= \frac{3}{2} \cdot \frac{V \cdot dx}{h}
 \end{aligned} \tag{I.4}$$

Cet effort rasant doit, dans le cas d'une poutre mécaniquement assemblée, être repris par l'organe d'assemblage. En considérant que ce dernier reprend l'effort rasant sur une zone égale à l'entraxe des connecteurs ($dx = 310 [mm]$), l'effort rasant vaut : $R = 3,32 \cdot V$

Synthèse graphique de l'analyse des 6 poutres







Description des machines utilisées pour les essais

K.1 | Essais de cisaillement



- Fabricant : Zwick
- Type : Z250/2
- Année : 2009
- Numéro de dossier Zwick DO705427
- Caractéristiques :
 - Capacité (traction/compression) : 250 [kN]
 - Capteur de force : 10 et 250 kN
 - Course : 2200 [mm]
 - Vitesse maximum : 600 [mm/min]
 - Mors hydrauliques de : 100 [kN]
 - Éprouvette cylindrique : diamètre de 10 à 24 [mm]
 - Plateau de compression : diamètre de 300 [mm]
- Électronique HBM Spider 8 : 8 canaux pour l'ajout de jauges et LVDT

K.2 | Essais de traction



- Fabricant : MTS
- Type : 319.25
- Année : 2010
- Caractéristiques :
 - Capacité (traction/compression) : 250 [kN]
 - Capacité de torsion : 2200 [N · m]
 - Course axiale : 150 [mm]
 - Course en rotation : +/- 50 °
 - Vitesse maximum : 1 [m/s]
 - Dimension max d'échantillon : 1147 [mm]

- Extensomètre axial dynamique - base de mesure 25 [mm] pour une utilisation dans une plage de température : -100°C à +175°C.
- Mors hydrauliques axial-torsion pour une utilisation dans une plage de températures : -18°C à +65°C
- Éprouvettes cylindriques : diamètres de 10,7 à 26,2 [mm] + jeu Bodair 26-33 [mm]

K.3 | DIC

- Matériel : Dantec
- Software : Limes

Bibliographie

- [1] A. M. P. G. Dias. Analysis of the Nonlinear Behavior of Timber-Concrete Connections. *Journal of Structural Engineering*, 2012. URL : https://www.researchgate.net/publication/258498707_Analysis_of_the_Nonlinear_Behavior_of_Timber-Concrete_Connections, doi:10.1061/(asce)st.1943-541x.0000523.
- [2] AB-Outils. Référence d'agrafe par marque. URL : <https://www.ab-outils.fr/content/6-tableau-d-equivalence-des-agrafes>.
- [3] American Society of Testing and Materials (ASTM). E489. 2005. URL : <https://www.astm.org/DATABASE.CART/WITHDRAWN/E489.htm>.
- [4] American Society of Testing and Materials (ASTM). E767. 2005.
- [5] American Society of Testing and Materials (ASTM). D1761. 2020.
- [6] Batiment.wallonie.be. Assemblages par tiges - boulons. URL : https://batiments.wallonie.be/files/unzip/html_CCTB_01.09/Content/24-42-1c-Assemblages-par-tiges-boulons.html.
- [7] Batirama. Match béton/bois : quel matériau est le gagnant?
- [8] Biblio-Bois. Histoire de la construction bois. 2003. URL : <https://www.biblio-bois.info/wp-content/uploads/2015/10/E1Histoire-de-la-construction-bois-CNDB-2003.pdf>.
- [9] Bova-Nail. BV15/O. URL : <http://bova-nail.cz/produkt/stycknikova-deska-oboustranna-bv15o-01-07/>.
- [10] Bricozor. Composition d'une vis. URL : <https://guide.bricozor.com/choisir-vis.html>.

- [11] . Bureau de Normalisation. NF DTU 31.3 Charpentes en bois assemblées par connecteurs métalliques ou goussets. URL : <https://boutique.cstb.fr/31-constructions-en-bois/451-nf-dtu-313-charpentes-en-bois-assemblees-par-connecteurs-metalliques-ou-goussets-326.html>.
- [12] Bureau de Normalisation. NBN ISO 6891 : Structures en bois - Assemblages réalisés avec des éléments mécaniques de fixation - Principes généraux pour la détermination des caractéristiques de résistance et de déformation. 1992.
- [13] Bureau de Normalisation. NB EN 1995-1-1 : Conception et calcul des structures en bois. 2008.
- [14] Bureau de Normalisation. NBN EN 408 : Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques. 2012.
- [15] Bureau de Normalisation. NBN EN 1075 : Structures en Bois - Méthodes d'essai - Assemblages réalisés avec des connecteurs métalliques à plaque emboutie. 2015.
- [16] Bureau de Normalisation. NBN EN 338 : Bois de structure - Classes de résistance. 2016.
- [17] Canada Wood. Wood Trusses Building series NO . 2 Introduction. (2). URL : <https://canadawood.org/downloads/technical-publications/>.
- [18] Canadian Standart Association (CSA). S347 :14. 2018. URL : <https://www.csagroup.org/store/product/S347-14/>.
- [19] Cbs-cbt. La construction bois comme remède providentiel à la crise. URL : <https://cbs-cbt.com/multimedia/documents/13977412517094456q2082a7u.pdf>.
- [20] A Ceccotti. Composite concrete – timber structures. 2002. URL : https://www.academia.edu/31160670/Composite_concrete_timber_structures, doi:10.1002/pse.126.
- [21] Cecoboïs. Guide de conception des assemblages pour les charpentes en bois. page 99, 2015. URL : https://cecoboïs.com/wp-content/uploads/2020/04/CECO-5600_Guide_Assemblage_2015_WEB.pdf.
- [22] CSTC. Antenne Normes Eurocodes structuraux. URL : https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=services&sub=standards_regulations&pag=norm_eurocodes.

- [23] CSTC. COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MÉCANIQUE DES PLANCHERS MIXTES EN BOIS-BÉTON. 2010. URL : <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=search&id=CSTC102386>.
- [24] Daas Baksteen. MITEK M20 : Declaration of Performance (DoP). 2013. URL : https://www.tpbliege.be/files/uploads/2016/07/dopm20_mitek.pdf.
- [25] Thierry Descamps. Université de Mons Faculté Polytechnique Dimensionnement et Technologie des Structures en Bois. 2014.
- [26] Thierry Descamps, Michel Monhonval, and Pierre Latteur. An assessment methodology for timber beams in a restoration context, based on a dimensionless formulation of EC5 design criteria. *International Journal of Architectural Heritage*, 2018. URL : https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal%3A199887/datastream/PDF_01/view,doi:10.1080/15583058.2018.1442527.
- [27] Écohabitation. POURQUOI LA STRUCTURE DE BOIS L'EMPORTE RÉELLEMENT FACE À L'ACIER ET AU BÉTON. URL : <https://www.ecohabitation.com/guides/1012/pourquoi-la-structure-bois-lemporte-reellement-face-a-lacier-et-au-beton/>.
- [28] Futura-Maison. Comment choisir ses vis à bois. 2020. URL : <https://www.futura-sciences.com/maison/questions-reponses/bricolage-choisir-vis-bois-13068/>.
- [29] Marc Georges. Le bois lamellé-collé. URL : https://houtinfobois.be/wp-content/uploads/2019/01/81_FR_boislamellecolle.pdf.
- [30] Glulam.org. Portail du Bois Lamellé : Process de fabrication. URL : <http://www.glulam.org/lindustrie-du-bois-lamelle/process-de-fabrication/>.
- [31] GripMetal. Technical data sheet. 2018. URL : <https://www.gripmetal.com/about-us/>.
- [32] Rakesh Gupta, Milan Vatovec, and Thomas H. Miller. Metal-Plate-Connected Wood Joints : A literature review. *Forest Research Laboratory*, (April), 1996. URL : <http://wsedev.forestry.oregonstate.edu/sites/woodscience/files/gupta/pdf/Metal-Plate-ConnectedWoodJointsALiteratureReview.pdf>.
- [33] Houtinfobois. Chai en bois. URL : <https://houtinfobois.be/realisations/chai-en-bois/>.

- [34] Houtinfobois. L'eau et le bois.
- [35] International Organization for Standardization (ISO). ISO 8969. 2011. URL : <https://www.iso.org/fr/standard/46314.html>.
- [36] Nicolas Jacquier. *Development and Evaluation of Mechanical Joints for Composite Floor Elements with Cross Laminated Timber*. 2015. URL : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990749/FULLTEXT01.pdf>.
- [37] Benoit Jourez. Anatomie et identification des bois. 2011. URL : <http://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/148477/1/ULGFORE0024-1SyllabusCoursAnatomie2011.pdf>.
- [38] Corto Lahaye. Des poutres en bois lamellé-agrafé à l'aide de bifaces comme alternative au bois lamellé collé . 2020. URL : <https://dial.uclouvain.be/memoire/ucl/object/thesis:26392>.
- [39] Pierre Latteur. LGCIV2043 : Structures en bois - Partie 1. 2017. URL : http://www.issd.be/PDF/B0IS_Partie1.pdf.
- [40] Pierre Latteur. LGCIV2043 : Structures en Bois - Partie 4. 2017. URL : <https://docplayer.fr/66851254-Lgciv2043-structures-en-bois.html>.
- [41] Claire Leloy and Dominique Millereux. Manuel du Bois Lamellé. 1, 2018. URL : http://www.glulam.org/wp-content/uploads/GlulamHandbook_Volume1_Corr02.pdf.
- [42] MITEK Industries (SA). UBAtc : Agreement Technique avec Certification. 2009.
- [43] Jacek Mucha and Jacek Tutak. Analysis of the influence of blanking clearance on the wear of the punch, the change of the burr size and the geometry of the hook blanked in the hardened steel sheet. *Materials*, 12, 2019. URL : <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F1996-1944%2F12%2F8%2F1261%2Fpdf&psig=A0vVaw3gWNTTA99LAfTV5HZurpJc&ust=1613922300619000&source=images&cd=vfe&ved=OCA0QjhxqFwoTCKj4-p7n-04CFQAAAAAAdAAAAABAT,doi:10.3390/ma12081261>.
- [44] Julius Natterer, Jean-Luc Sandroz, and Martial Rey. Construction en bois - Traité de génie civil de l'EPFL. 13. URL : <https://www.epflpress.org/produit/64/9782880749491/construction-en-bois-tgc-volume-13>.

- [45] Lucas Paiva, Manuel Braz-Cesar, and Miguel Paula. Numerical Analysis of Load Distribution in Joint Lines with Punched Metal Plate Fasteners. *KnE Engineering*, 2020, 2020. URL : <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/7023/12664>, doi:10.18502/keg.v5i6.7023.
- [46] Lucas Carvalho Paiva. LOAD TRANSFER MODELS IN JOINT LINES OF PUNCHED METAL PLATE FASTENERS. 2019. URL : https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjo3J6u-vjuAhWatKQKHYvqCsUQFjAAegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fbibliotecadigital.ipb.pt%2Fbitstream%2F10198%2F20529%2F1%2Fpauta-relatorio-34.pdf&usg=AOvVaw2PRR2i6UXmfrz5_N7KcHOT.
- [47] Paris Agreement. Delivering the Paris Agreement – The Role of the Built Environment. 2020. URL : https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2050LetterFinal_0.pdf.
- [48] Jack Porteous and Abdy Kermani. *Structural Timber dDesign*, volume 15. 2007. URL : https://www.academia.edu/36114499/Jack_Porteous_Abdy_Kermani_Structural_Timber_Design_to_Eurocode_5_Wiley_Blackwell_2008_.
- [49] Programme Aqcen. Manuels d’application des Eurocodes pour les structures bois. URL : <http://nebula.wsimg.com/e1dd8e3ca1bfd6acf820c8ea37947b75?AccessKeyId=47D83E135CD091048F82&disposition=0&alloworigin=1>.
- [50] Randek. AutoEye Truss System - SF022.
- [51] Rocdacier. Cours sur le cisailage.
- [52] Rocdacier. Cours sur le poinçonnage.
- [53] Rona. Choisir le bon clou. URL : http://www.rona.ca/RonaContentDetailDisplay?docName=B2CTST2_009235&urlRequestType=Base&catalogId=10051&urlLangId=-2&record=B2CTST2_009808&langId=-2&xCommonName=cn_B2CTST2_009235&storeId=10151&altdocName=B2CTST2_009808.
- [54] Rothoblaas. SHARP METAL. 2021. URL : <https://www.rothoblaas.fr/produits/fixation/equerres-et-plaques/plaques-de-clouage-et-feuillards/sharp-metal>.
- [55] Rothoblass. Vis et connecteurs pour bois. 2021. URL : <https://issuu.com/rothoblaas/docs/vis-et-connecteurs-pour-bois-2021-fr?mode=embed>.

- [56] Chainarong Srikunwong. Modélisation du procédé de soudage par points Chainarong Srikunwong. 2007. URL : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00151464/document>.
- [57] Gang-Nail Trusses. Gang-Nail Trusses & Building Components. URL : <http://gangnailtruss.ca>.
- [58] G. Turrini and M. Piazza. Una tecnica di recupero statico dei solai in legno. 1983.
- [59] Atsushi Ueda. Pourquoi la pagode à cinq toits ne s'effondre-t-elle pas? URL : http://www.lycee-international.ac-versailles.fr/IMG/pdf/section_japonaise_la_pagode__5_toits.pdf.
- [60] Vanoise. Ressorts équivalents & Condensateurs équivalents. URL : http://vanoise49.free.fr/ressorts_equivalents.pdf.
- [61] Wolf Connection. W101. URL : <https://www.wolf-connexion.fr/produits/connecteurs/types>.
- [62] WolfSystem. Leistungserklaerung-Nagelplatte-W101, 2011. URL : <https://www.wolfnagelplatten.at/assets/WOLF-AT/WOLF-Nagelplatten/Nagelplatten/Qualitaetssicherung/Zulassungen-und-Leistungserklaerungen/Leistungserklaerung-Nagelplatte-W101-N022013-.pdf>.
- [63] Bohan XU. Modélisation du comportement mécanique d' assemblages bois avec prise en compte de critères de rupture. 2012. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00725264/document>.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl