

Analyse théorique et expérimentale de l'impact de la rigidité des connexions bois à organes multiples sur le comportement d'un portique courant.

Ing. A. BAJRAKTARI
ECAM – Bruxelles

En structure bois, la rigidité des connexions est un point qui est encore assez peu précis et abordé de manière très simplifiée dans les normes actuelles. En général, un assemblage est considéré soit comme encastré, soit comme rotulé. Cependant ce n'est pas toujours le cas et la théorie pourrait être affinée sur le sujet.

Mots-clefs: Assemblage, bois lamellé collé, rigidité en flexion, ductilité

In timber structures, the stiffness of connections is a point that is still relatively imprecise and addressed in a very simplified manner in current standards. Generally, an assembly is considered either fixed or hinged. However, this is not always the case, and the theory could be further refined on this subject.

Keywords: Assembly, glued laminated timber, bending stiffness, ductility

1. Introduction

Cet article traite de la rigidité des connexions bois à organes multiples, type boulons. Dans les structures bois, la rigidité des connexions est un point qui est encore assez difficile à déterminer de manière précise, alors que les structures d'aujourd'hui en bois lamellé collé sont de plus en plus importantes. L'article a pour but de comparer la rigidité selon les normes Européenne (1), Suisse (2) et des essais effectués dans le laboratoire du département construction à l'ECAM, pour ensuite pouvoir calculer le déplacement dans un portique courant avec une charge en tête de colonne.

Pour ce faire, le travail se base sur une partie théorique brève et une partie expérimentale plus développée avec une ligne directrice en 3 parties :

- 1) Essai de portance locale et définition d'une loi de comportement bilinéaire du bois
- 2) Comportement d'un boulon sur une fondation en bois et calcul de la rigidité en flexion de l'assemblage
- 3) Essai en vraie grandeur d'un assemblage.

Ces étapes sont reprises ci-après montrant l'assemblage type étudié :

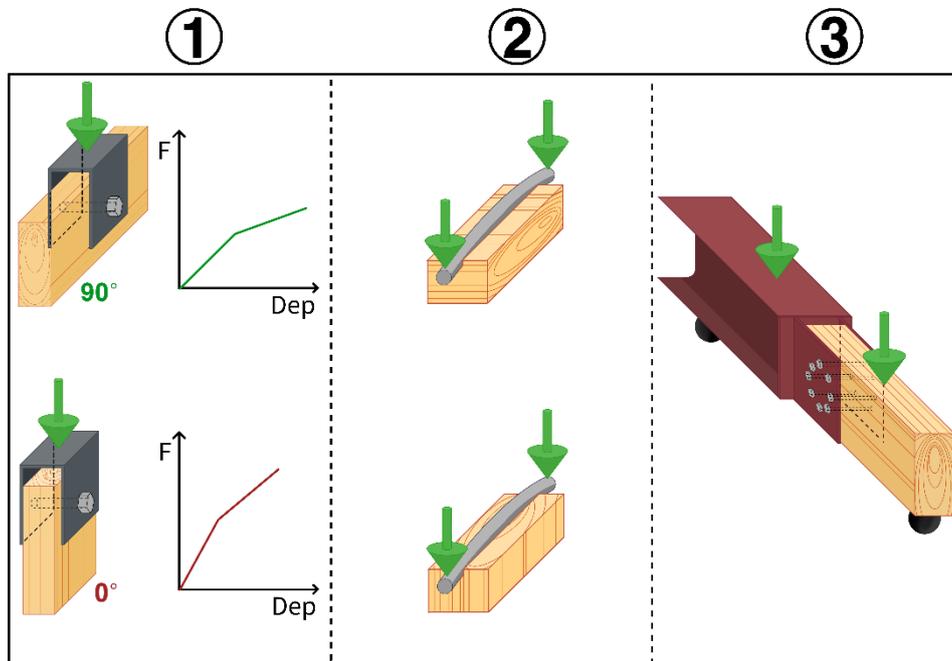


Figure 1 : Etapes récapitulatives du travail

1.1. Contexte

En termes de rigidité d'assemblage, on trouve peu de littérature qui permette de pousser le sujet très loin. On trouve les formulations théoriques données par les normes (1) et (2) qui nous donnent des rigidités axiales pour différents organes qui dépendent du diamètre de ceux-ci ainsi que de la masse volumique du bois. Il n'est d'ailleurs pas défini de vérification en termes de raideur de connexion à prendre dans un portique courant. Cela est laissé à la volonté de l'ingénieur.

Pourtant, il est intéressant de constater que plusieurs ouvrages, dont le livre STEP 1 (3), mettent l'accent sur l'importance de l'influence des liaisons dans les structures. Voici un court extrait de l'ouvrage :

« Couramment, les calculs de structures considèrent soit des encastremets, soit des rotules pour la modélisation des liaisons. Compte tenu des glissements importants dans les assemblages engendrés par les déformations du bois en portance locale, le modèle de calcul doit tenir compte de la rigidité des liaisons » Chapitre V-16-3, Liaisons sollicitées en flexion.

En ce qui concerne les connexions bois/boulons, en plus de la rigidité du bois en portance locale, le jeu entre le trou et l'organe peut exercer une influence non négligeable sur le comportement de l'assemblage (4).

En plus de cela, les formulations théoriques données par les normes pour les assemblages bois/boulons n'incluent pas la longueur de l'organe dans les calculs alors que c'est un élément non négligeable pour certaines configurations (5).

1.2. Objectifs

L'objectif principal de ce travail est de pouvoir vérifier dans une configuration type, l'influence de la prise en compte de la rigidité d'une connexion dans un portique courant. La connexion étudiée sera un assemblage en couronne avec deux plats recouvrant une poutre en bois GL24, le tout connecté via des boulons traversants comme expliciter à la figure 1.

On sait qu'en acier, le terme « semi-rigide » n'est plus quelque chose de nouveau. C'est un concept démontré et utilisé dans les structures actuelles. Pour les structures bois, la semi-rigidité en est encore au stade d'esquisse ce qui est un point à approfondir comme dit plus haut.

2. Étude théorique

L'étude théorique de la rigidité s'est basée sur deux normes en vigueur : la norme Européenne EN 1995 et la norme Suisse SIA 265. Son objectif est de calculer la rigidité d'un assemblage en couronne, comme indiqué à la figure 1.

Pour ce faire, on calcule d'abord une rigidité axiale qui sera ensuite utilisée pour calculer la rigidité en flexion. En effet, lorsqu'on applique un moment de force aux différents organes de connexion, on peut déterminer la charge que chaque organe supporte, avec une direction perpendiculaire à celle-ci. Par conséquent, on peut également déterminer le déplacement de chaque organe si l'on connaît la rigidité associée.

2.1. Rigidité axiale

La formulation de l'Eurocode 5 pour un glissement acier/bois se note :

$$K_{ser} = 2 \left(2 * \frac{d}{23} * \rho_m^{1,5} \right) = 2 \left(2 * \frac{12}{23} * 420^{1,5} \right) = 17\,963,35 \text{ [N/mm]}$$

Où :

d est le diamètre du boulon [mm]

ρ_m est la masse volumique moyenne du bois GL24 [kg/m³]

La formulation de la norme Suisse pour un glissement se note :

$$K_{ser,0^\circ} = 4 \left(3 * d^{1,7} * \rho_k^{0,5} \right) = 4 * \left(3 * d^{1,7} * \rho_k^{0,5} \right) = 16\,088,65 \text{ [N/mm]}$$

$$K_{ser,90^\circ} = 4 \left(1,5 * d^{1,7} * \rho_k^{0,5} \right) = 4 * \left(1,5 * d^{1,7} * \rho_k^{0,5} \right) = 8\,044,33 \text{ [N/mm]}$$

$$K_{ser,45^\circ} = K_{ser,0^\circ} * \sin^2 \alpha^\circ + K_{ser,90^\circ} * \cos^2 \alpha^\circ = 12\,066,49 \text{ [N/mm]}$$

Où :

ρ_k est la masse volumique caractéristique du bois GL24 [kg/m³]

Le facteur 4 devant les expressions de l'Eurocode 5 et de la norme Suisse s'explique par le fait que la norme préconise un facteur 2 lorsque l'on travaille en assemblage bois-acier et qu'en plus de cela, la norme travaille par plan de cisaillement. Le nombre de plan cisailé ici est au nombre de 2.

2.2. Rigidité en flexion

Pour ce faire on utilise la formule suivante : $K_w = \Sigma K_{ser} * r^2$

Où K_{ser} est la rigidité axiale et r le rayon

On obtient pour la norme EN 1995 ; 1 738,84 [kN.m/rad]

pour la norme SIA 265 ; 1 168,04 [kN.m/rad]

3. Étude expérimentale de la rigidité

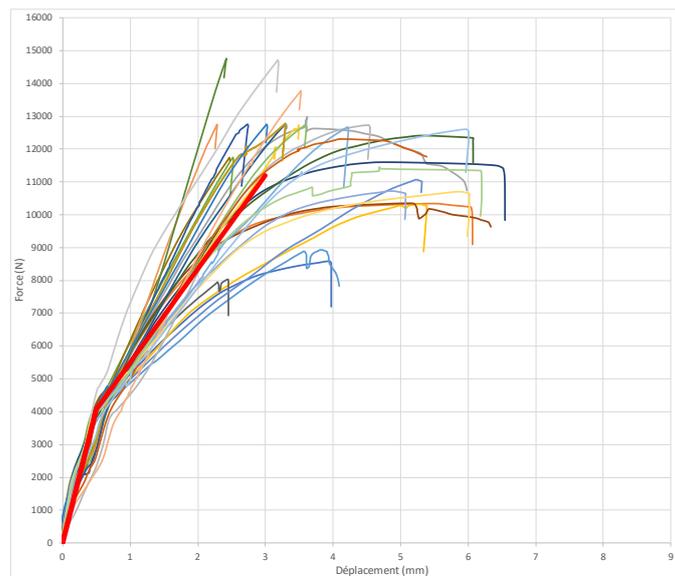
3.1. Essai de portance locale

L'essai de portance locale, conforme à la norme EN 383, consiste en l'application d'une contrainte moyenne de compression/traction sur un échantillon de bois en utilisant un élément d'assemblage considéré comme rigide.

L'objectif de l'essai de portance dans le cadre de cette étude était de déterminer les rigidités axiales en fonction de l'orientation des fibres du bois. Le bois utilisé est du bois lamellé collé GL24 (épicéa). Au total, 60 essais de portance ont été réalisés à deux angles différents : un premier parallèle aux fibres du bois (0°) et un deuxième perpendiculaire aux fibres du bois (90°). Grâce aux résultats obtenus à partir de ces 60 essais, il est possible de créer, selon la norme EN 383, une loi de comportement linéaire via le module de fondation.

3.2. Loi de comportement bilinéaire

Après avoir établi une première loi de comportement pour chaque essai, il a été remarqué que celle-ci s'éloignait rapidement des résultats obtenus lors des essais pratiques. Cela est illustré dans la figure 2, où la première loi de comportement s'écarte significativement après un déplacement de seulement 1/2 mm. Par conséquent, une deuxième loi de comportement a été étudiée afin de mieux correspondre à la réalité des essais effectués. Ce processus a été réalisé pour chaque orientation des fibres du bois (0° et 90°).



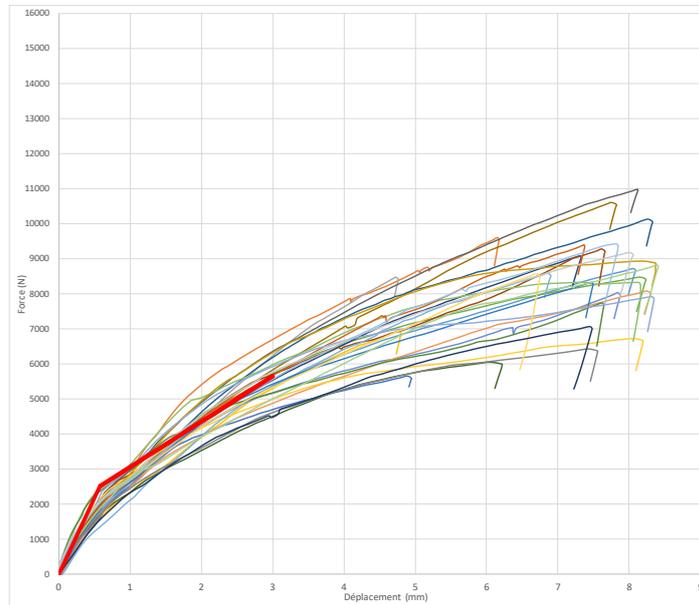


Figure 2 : Graphe force/déplacement des essais traités + loi de comportement bilinéaire (0° et 90°)

Les lois de comportement se nomment E1 et E2 pour les deux sens du fil du bois. Finalement les rigidités axiales sont reprises dans le tableau suivant ;

E1	Rigidité axiale 0°	Rigidité axiale 90°
	8153,94 N/mm	4348,12 N/mm
E2	Rigidité axiale 0°	Rigidité axiale 90°
	2989,50 N/mm	1364,11 N/mm

Tableau 1: Loi de comportement expérimentale (0°,90°)

4. Comportement boulon/bois modèle numérique

Après avoir établi la loi de comportement bilinéaire du bois, il a été décidé d'étudier le comportement d'un boulon en acier sur une fondation en bois. Pour ce faire, l'étude a été menée à l'aide du logiciel d'éléments finis Finelg (Logiciel spécialement conçu pour les analyses non linéaires en partenariat avec l'université de Liège). Ainsi, la dite étude a pu prendre en compte la plastification du boulon en acier, ainsi que la deuxième loi linéaire du bois, comme détaillé au point 3.2.

Lorsque le moment se découple, l'effort transite via les deux plats métalliques chargeant ainsi les boulons aux deux extrémités. Cela a donc pour effet de mettre les boulons en flexion.

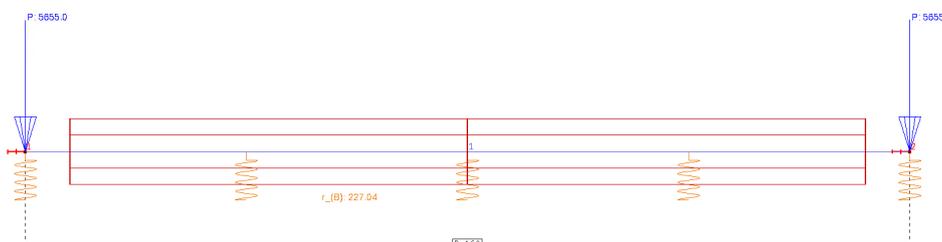


Figure 3 : Modélisation d'un boulon sur une fondation de bois

C'est ce phénomène qui est étudié ici afin de déterminer le déplacement à l'extrémité d'un boulon sous l'effet d'un moment qui augmente progressivement

En résumé, l'étude numérique s'est déroulée en trois niveaux : le premier niveau a testé le boulon en acier comme étant parfaitement élastique, avec une loi de comportement du bois également élastique (NL(E1) - L). Le deuxième niveau a utilisé la loi bilinéaire du bois trouvée, toujours avec le boulon en acier considéré comme parfaitement élastique (NL(E2) - L). Enfin, le troisième niveau a utilisé la loi bilinéaire du bois en conjonction avec une loi élastique comportant un palier plastique pour le boulon (NL(E2) - NL).

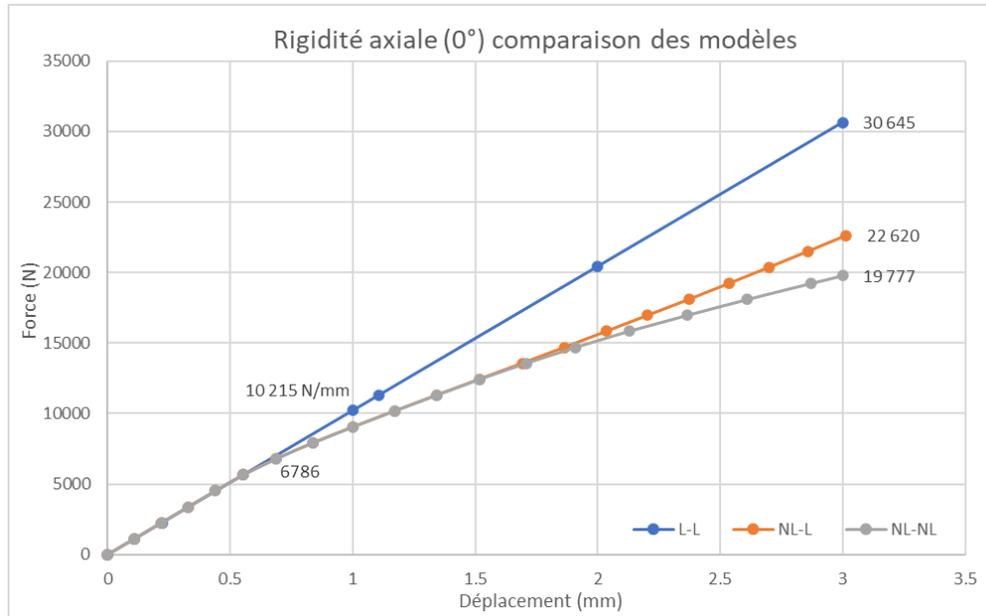


Figure 4 : Graphique force/déplacement de l'extrémité d'un boulon suivant différente loi

Après avoir obtenu les rigidités à l'extrémité du boulon pour ces trois niveaux, et ce, pour chaque orientation des fibres du bois, la rigidité en flexion a été calculée en utilisant la même méthode que celle de l'étude théorique.

5. Étude expérimentale de la rigidité d'un assemblage type

En plus des essais de portance locale, il a été décidé de réaliser 6 essais en vraie grandeur conformément à la norme EN 26891 sur un assemblage en couronne. La figure 5 décrit l'essai à 4 points, qui a ensuite servi à déterminer la rotation de la section au niveau de l'assemblage.

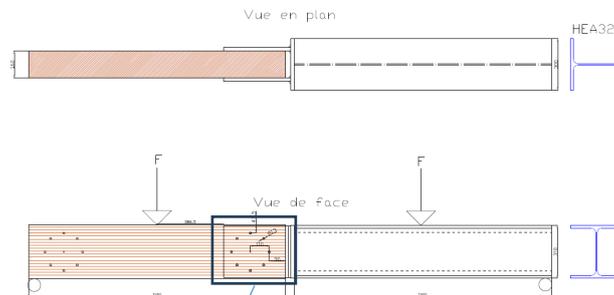


Figure 5 : Croquis des essais en vraie grandeur

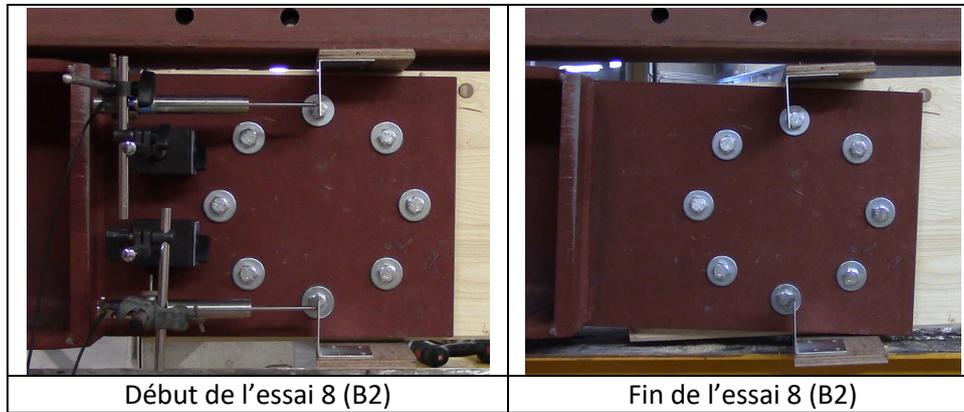


Figure 6 : Photo lors des essais de l'assemblage type

La figure 5 nous montre l'essai 8 avant et après chargement afin de visualiser la rotation de la section. Cela a permis d'avoir un point de comparaison avec la rigidité en flexion obtenue des normes ainsi que celle due à la première ligne directrice décrite en introduction.

	Kser 90°	Kser 0°	Kw
L(E1)-L	6 848 N/mm	10 215 N/mm	826 kN.m/rad
NL(E2)-L	4 632 N/mm	6 592 N/mm	543 kN.m/rad
EC5	17 963 N/mm	17 963 N/mm	1739 kN.m/rad
SIA265	8 044 N/mm	16 088 N/mm	1168 kN.m/rad
Essai_Flexion			517 kN.m/rad

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des rigidités (K_{ser} ; K_w)

On obtient finalement le tableau 2, qui rend possible la comparaison entre les différentes rigidités en flexion. On observe une nette approche des méthodes numériques par rapport aux essais en flexion si l'on utilise une loi de comportement bi-linéaire du bois au lieu d'une seule loi linéaire comme le prescrit l'EN 383. Ce qui peut être compréhensible au vu du comportement du bois lors des essais de portance locale à la figure 2 qui démontrent un comportement linéaire uniquement en début de graphique.

6. Étude de la rigidité d'un portique courant

Enfin, la dernière étape de ce travail a consisté à comparer les déplacements horizontaux d'un portique courant afin d'évaluer l'influence de la rigidité en flexion de la connexion. Les rigidités en flexion obtenues au point 5 ont été intégrées dans le logiciel Finelg pour calculer le déplacement en tête sous une charge de service. Cela permet de quantifier la réelle différence entre les calculs et les essais.

Le présent portique est composé de deux poteaux HEA140 avec comme poutre, un élément rectangulaire en bois de section 315x160 (GL24).

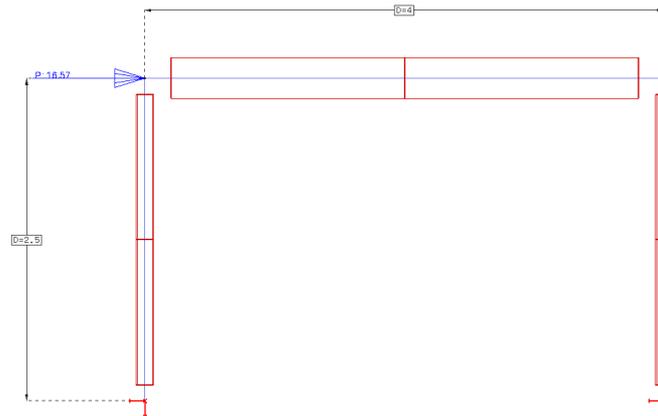


Figure 7 : Modélisation du portique type via le logiciel Finelg

On observe des différences significatives dans le tableau 3 entre les déplacements dus aux différentes rigidités aux nœuds. Les déplacements horizontales entre l'EC5 et les essais en flexion sont non négligeable. On a une augmentation de plus du double de ce qui est prévu théoriquement.

	Kser 90°	Kser 0°	Kw	Dép. horizontal
L(E1)-L	6 848 N/mm	10 215 N/mm	826 kN.m/rad	89.30 mm
EC5	17 964 N/mm	17 963 N/mm	1739 kN.m/rad	56.65 mm
SIA265	8 044 N/mm	16 088 N/mm	1168 kN.m/rad	71.20 mm
Essai_Flexion			517 kN.m/rad	127.00 mm
			Rigide	26.87 mm

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des déplacements selon les rigidités aux nœuds

7. Conclusions et perspectives

En conclusion, l'impact de la rigidité des connexions, selon les essais et les normes EC5 et SIA265, est un sujet qui mérite d'être approfondi, étant donné les divergences de résultats entre la norme Européenne et la norme Suisse, ainsi qu'entre les normes et les résultats obtenus par les essais expérimentaux.

La première différence peut s'expliquer par le fait que la norme Européenne calcule une raideur identique quelle que soit l'orientation des fibres du bois, tandis que la norme Suisse établit un facteur deux entre les rigidités en fonction des différentes orientations des fibres du bois. La deuxième différence entre les normes et les essais pourrait s'expliquer par le fait que les normes travaillent sur un plan de cisaillement sans prendre en compte l'épaisseur de l'assemblage.

Une perspective pour cette étude serait d'approfondir la notion de ductilité du bois et celle d'un assemblage bois/boulon. Cela permettrait potentiellement de concevoir des structures sécurisées qui pourraient présenter un comportement ductile lors de charges accidentelles telles que les séismes, les explosions ou les vents violents.

8. Bibliographie

[1] « EN 1995 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités - Règle communes et règle pour les bâtiments. » s.d.

[2] « SIA 265 : Construction en bois ». s.d.

[3] P. Racher et J.-P. Biger, Structure en bois aux états limites - Step 1. Paris, 1996.

[4] B. Xu, « Modélisation du comportement mécanique d'assemblages bois avec prise en compte du critère de rupture. », Université Blaise Pascal., 2012.

[5] L. Bléron, « Contribution à l'optimisation des performances d'assemblages bois en structure - Analyse de la portance dans les assemblages de type tige. », Henri Poincaré.