



HAL
open science

Etude du comportement des poutres lamellées clouées boulonnées en flexion

Patrick Martin

► **To cite this version:**

Patrick Martin. Etude du comportement des poutres lamellées clouées boulonnées en flexion. Sciences of the Universe [physics]. ENGREF (AgroParisTech), 2006. English. NNT : 06ENGR0011 . pastel-00003306

HAL Id: pastel-00003306

<https://pastel.hal.science/pastel-00003306>

Submitted on 18 Mar 2008

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

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



ECOLE NATIONALE DU GENIE RURAL, DES EAUX ET DES FORÊTS

N° attribué par la bibliothèque
/ / / / / / / / / / / / / / / /

THESE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'ENGREF
Spécialité : Sciences forestières et du bois

présentée et soutenue publiquement par
Patrick MARTIN

le vendredi 13 janvier 2006

à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts
Centre de : Kourou

TITRE :
Etude du comportement des poutres
lamellées clouées boulonnées en flexion

devant le jury suivant :

Mme. Mériem FOURNIER
M. Bernard THIBAUT
M. Pascal TRIBOULOT
M. Gérard CHALANT
M. Jacques BEAUCHENE
M. Ouahcène NAIT RABAH

Professeur ENGREF
Directeur de recherche CNRS
Professeur
Professeur
Chercheur CIRAD
Maître de conférence UAG

Président de jury
Directeur de thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

Etude du comportement des poutres lamellées clouées boulonnées en flexion

Résumé

Le lamellé collé est un produit adapté pour répondre à la demande croissante du marché de la construction de Guyane, compte tenu de la ressource forestière. Cependant, des problèmes techniques, climatiques et économiques rendent le collage trop difficile en Guyane. Les professionnels de la construction bois, proposent souvent de réaliser des assemblages mécaniques simples en substituant la colle, mais aucun référentiel technique ne permet de justifier parfaitement ce produit.

Le boulonnage seul conduit à une poutre insuffisamment rigide du fait que les lames glissent l'une sur l'autre. Le clou est un organe d'assemblage simple et adapté à la reprise d'efforts tangents. Les travaux entrepris dans cette thèse se sont concentrés sur la question : comment des poutres constituées de lames en gonfalo clouées peuvent présenter une rigidité suffisante en flexion ?

Une série d'essais a permis de définir le comportement non linéaire d'un assemblage cloué cisailé par le glissement des lames. D'autres essais, réalisés sur des bilames cloués sollicités en flexion 4 points, ont montré qu'une densité de clouage suffisante permettait de se rapprocher de la rigidité que conférerait un collage.

La modélisation par éléments finis des lames clouées fléchies, utilisant la loi de comportement expérimentale de l'assemblage cloué, permet de définir la performance du bilame en fonction de la densité de clouage et du niveau de chargement. La prédiction correspond bien avec les résultats expérimentaux.

Finalement, un assemblage, caractérisé par une densité de clous prédite par le modèle, permet de conférer une rigidité satisfaisante à une poutre lamellée clouée lorsqu'elle est sollicitée en flexion.

Mots clés : Guyane, bois, poutre, lamellé, clou, boulon, modélisation, flexion.

Stiffness bending of nailed and bolted laminated timber

Abstract

Regarding the local forest resource, glued laminated timber is an adapted solution to the development of the timber construction market in French Guyana. However, lamellas bonding is difficult due to technical, climatic and economic problems in this country.

Timber construction professionals often suggest simple mechanical connections in place of the glue, but no technical documents exist to design this new product with nailed laminated timber.

Consequently, only bolting lamellas leads to insufficient beam stiffness due to lamellas sliding over each other. A nail is a simple connection, adapted to shear loads. The aim of this thesis is to determine how to produce nailed gonfalo laminated timber with a sufficient rigidity in flexion.

As a first step, a test series was carried out to define the nonlinear behaviour of a nailed connection loaded in shear due to the slip of laminates. Other tests performed on two nailed laminates under 4 points bending, showed that a sufficient density of nails enables reaching the stiffness obtained from glued joints.

In the next step, a finite elements model of this nailed lamellas based on the mechanical behaviour experimental data, allows the assessment of its efficiency according to nail density and loading level. Experimental and simulated stiffness values are in accordance.

Finally, a connection with a density of nails defined by the model enables an efficient bending stiffness of nailed laminated timber.

Key words : French Guyana, wood, beam, laminated, nail, bolt, computer model, bending.

Remerciements

Ce chapitre est l'occasion de faire un bilan personnel, de visionner une portion de sa vie, tel un film, marqué de rebondissements, et d'estimer le plaisir donné par chacun de ses acteurs. Une thèse en convention CIFRE nécessite une double vie professionnelle : industrielle et scientifique, et implique beaucoup d'intervenants, d'attentes, d'intérêts, de motivation et d'énergie. Cette tâche est plus une expérience en elle-même qu'elle ne portait sur l'expérimentation. Je pensais transformer le monde ce n'est qu'à présent que je comprends que c'est lui qui m'a fait devenir ce que je suis.

Je n'aurais pu me rendre compte de cette richesse sans Meriem Fournier qui m'a toujours soutenu et assuré toutes les étapes critiques, du vatariat à la soutenance, et pour qui je reste redevable. Merci Meriem, pour ce temps précieux, cette organisation et les nombreux avantages accordés par l'ENGREF, dont celui du logement sur le campus qui fait déborder ma mémoire de bons souvenirs.

Bernard Thibaut est l'autre personnage clé qui m'a permis de finaliser ce travail lorsque personne ni croyait plus. Lumière, connaissances et simplicité nous font sentir petits auprès de lui.

L'accueil au centre technique des bois de Guyane CIRAD a été grandement assuré par Jacques Beauchêne et Patrick Langbour. Les essais n'auraient pu être effectués sans le matériel de ce laboratoire, mais le plus important est la constante bonne humeur la disponibilité et le bon coup de pouce de ces personnes. Merci à Koesh et Fernand pour l'aide précieuse dans la préparation du matériel. Il me faut également souligner que le CIRAD-Forêt programme Bois m'a financièrement permis d'acquérir du matériel, d'organiser la réception du comité de thèse et autres déplacements depuis ce lieu retiré.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Joseph Grill qui a su recadrer mon sujet de recherche au bon moment, m'orienter dans la rédaction et me donner une meilleure vision sur la mécanique. Il m'a aussi permis de connaître au LMGC de l'université de Montpellier II, le très demandé Frédéric Dubois qui m'a initié au calcul par éléments finis sur Castem, et sans qui ce travail n'aurait pu être valorisé. Merci également à Sandrine Bardet pour son accueil chaleureux à Montpellier et sa transmission d'énergie.

Impossible d'oublier les membres du comité de thèse Pascal Triboulot, Gilles Duchanois, et Daniel Guitard pour leur sagesse, leurs conseils avisés, et la sueur qu'ils ont laissé pour m'aider.

Enfin merci à toutes les personnes qui se reconnaîtront dans ces moments de bonheurs partagés et dont la liste ne pourrait être exhaustive. Et même je pardonne tous les coups durs au goût vinaigre qui m'ont d'avantage permis d'apprécier celui du miel dans cette expérience.

Sommaire

1	INTRODUCTION	7
1.1	Contexte	7
1.1.1	Situation géographique	7
1.1.2	Evolution démographique et conséquences économiques	8
1.1.3	La filière bois en Guyane.....	9
1.1.4	La position du bois dans l'économie guyanaise.....	9
1.1.5	Disponibilité et conditionnement des bois de Guyane	10
1.1.6	Les enjeux écologiques.....	10
1.1.7	Polémique exploitation et déforestation tropicale.....	11
1.2	Attentes du type de produit	12
1.2.1	Avantages du lamellé.....	12
1.2.2	Contraintes du lamellé-collé	12
1.2.3	Les objectifs visés	13
1.2.4	Le glissement des lames.....	13
1.2.5	L'objet de la recherche.....	16
1.3	Etat de l'art	17
1.3.1	« Préhistoire »	17
1.3.2	Les structures Delorme	18
1.3.3	Les structures Emy	20
1.3.4	Les structures Ardant	23
1.3.5	Applications plus récentes du lamellé.....	25
2	ETUDE DES COMPORTEMENTS INDIVIDUELS	27
2.1	Caractéristiques du gonfalo	27
2.1.1	Données générales.....	27
2.1.2	Caractéristiques physiques et mécaniques	27
2.2	Caractérisation du matériau	28
2.2.1	Propriétés transverses	29
2.2.2	Essai de flexion 4 points.....	31
2.2.3	Affinement des résultats.....	34
2.3	Variabilité.....	37
2.4	Assemblages par tige métallique	39
2.4.1	Portance locale	39
2.4.2	Comportement de l'assemblage cloué en cisaillement	41
2.4.2.1	Principe et mesures.....	41
2.4.2.2	Estimation des erreurs et problèmes rencontrés.....	44
2.4.2.3	Modèle de comportement du clou.....	47
2.4.3	Comportement de l'assemblage cloué en arrachement.....	48
2.4.4	Influence de la disparité des assemblages	49
2.4.4.1	Approche algébrique - disparité des assemblages	49
2.4.4.2	Approche numérique - disparité des assemblages	56
2.5	Frottement	61
2.5.1	Essais de frottement bois-bois	61
2.6	Conclusion sur les comportements individuels.....	63

3	ETUDE STRUCTURELLE	65
3.1	Essais de flexion sur des éprouvettes clouées.....	65
3.1.1	Matériaux et matériels.....	65
3.1.2	Exploitation des données	66
3.2	Essais de flexion sur des planches clouées	68
3.2.1	Matériaux et matériels.....	68
3.2.2	Exploitation des données	71
3.3	Conclusion sur l'étude structurelle	73
4	MODELISATION	75
4.1	Modélisation d'une lame en flexion	75
4.2	Comportement en flexion d'un lamellé collé.....	77
4.2.1	2 Lames collées	78
4.2.2	Plus de 2 lames collées.....	79
4.2.2.1	Nombre de lames pair	79
4.2.2.2	Nombre de lames impair	81
4.2.3	Applications numériques	83
4.3	Modélisation de 2 lames superposées en flexion	84
4.3.1	Diffusion des efforts ponctuels	84
4.3.2	Influence du frottement.....	89
4.4	Modélisation d'un bilame cloué en flexion	90
4.4.1	Disponibilité des outils CASTEM.....	90
4.4.2	Principe de calcul et erreurs.....	91
4.4.3	2 Lames superposées clouées.....	92
4.4.3.1	Paramètres de modélisation	92
4.4.3.2	Résultats numériques sur un essai.....	92
4.4.3.3	Comparaison des différentes densités de clouage.	95
4.5	Conclusion sur la modélisation	100
5	CONCLUSIONS	101
6	PERSPECTIVES	103
7	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	105
8	ANNEXES	109
8.1	Annexe 1 : cisaillement d'un assemblage à n clous	109
8.2	Annexe 2 accélération de convergence	117
8.3	Annexe 3 : Flexion de 2 planches superposées sans assemblage.....	120
8.4	Annexe 4 : Flexion de 2 planches collées	124
8.5	Annexe 5 : Flexion de 2 planches clouées.....	128

1 Introduction

1.1 Contexte

1.1.1 *Situation géographique*

Située dans le nord-est de l'Amérique du Sud, entre le Surinam et le Brésil, la Guyane française constitue depuis 1946 un département français d'outre-mer, à l'instar de la Martinique, de la Guadeloupe et de l'île de la Réunion (dans l'océan Indien).

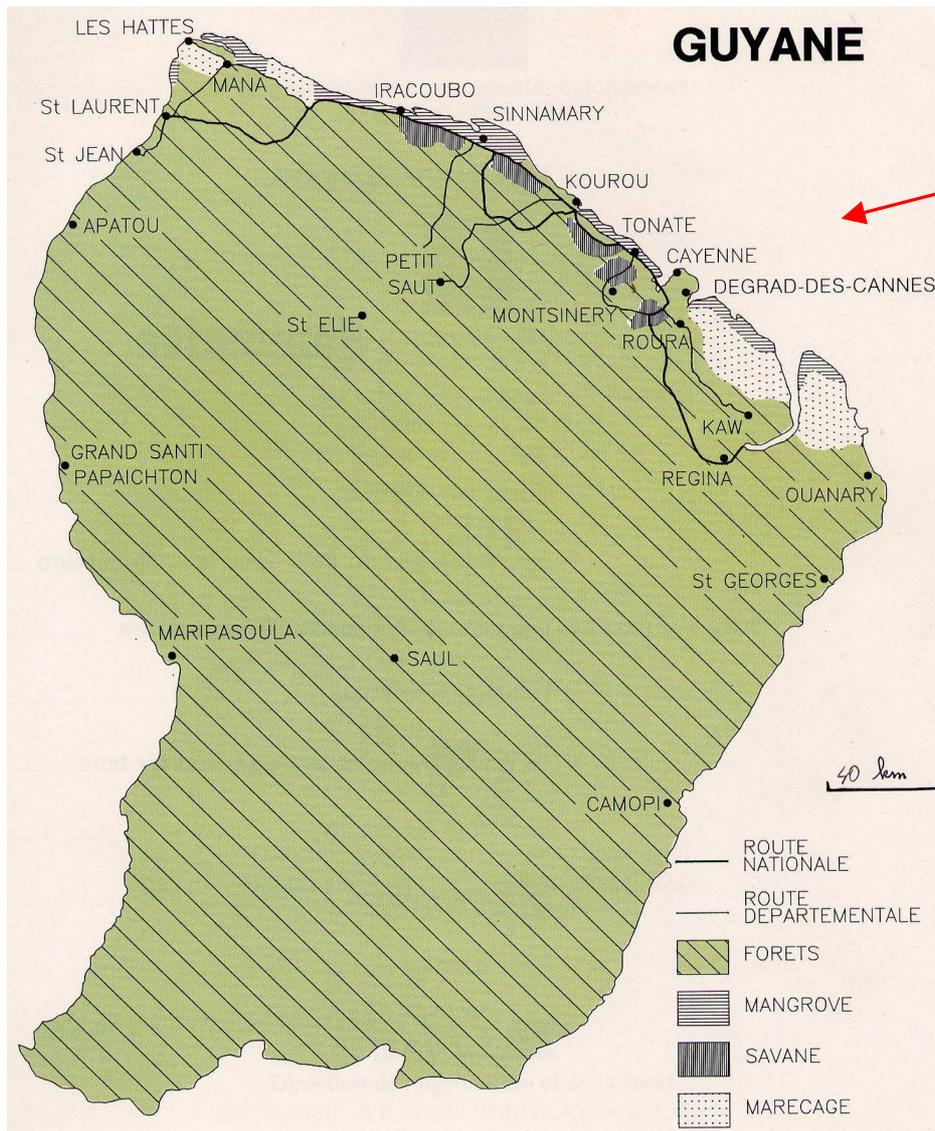


Figure 1
Carte de la Guyane

Si la Guyane est reconnue pour l'implantation du port spatial européen, ce département reste géographiquement isolé des zones industrialisées.

Étalée sur 86 500 km², la Guyane forme le plus vaste (équivalent à 16 % du territoire de l'Hexagone) et le moins peuplé des départements français. Avec le Surinam (de langue néerlandaise) et Guyana (de langue anglaise), la Guyane française compose l'une des trois Guyanes, territoires jadis délaissés par les Portugais et les Espagnols, puis accaparés par les Anglais, les Hollandais et les Français.

INTRODUCTION

La surface de ce département français, est concentrée à 80 % le long des 320 km de bande côtière bordée par l’océan Atlantique. D’ailleurs, le réseau routier ne dessert que cette frange côtière, et ce, du nord-ouest au nord-est en reliant les villes de Saint-Laurent-du-Maroni (à l’extrémité ouest: 20 000 hab.) jusqu’à Regina (vers l’est) sur le fleuve Approuague, en passant notamment par les villes de Sinnamary (3500 hab.), Kourou (20 000 hab.) et le chef-lieu, Cayenne (70 000 hab., avec sa banlieue de Matoury et de Rémire-Montjoly). Après plusieurs années d’études et de travaux, l’Administration locale a réussi en 2003 à prolonger le réseau routier jusqu’à Saint-Georges-de-l’Oyapock (à l’extrémité est).

Tout l’arrière-pays (90 % du territoire) est couvert de forêts tropicales denses et n’est accessible, hormis la voie aérienne, qu’en bateau grâce aux fleuves Maroni (qui sépare le Surinam et la Guyane), Mana, Sinnamary, Approuague et Oyapock (qui sépare la Guyane et le Brésil). En raison des nombreux sauts et dangereux rapides, la pirogue, généralement taillée dans un grand tronc d’arbre, demeure l’embarcation la plus utilisée pour accéder dans ces zones reculées.

1.1.2 Evolution démographique et conséquences économiques

Une des singularités paradoxales de la Guyane est l’explosion démographique. La Guyane compte officiellement environ 184 000 habitants [INC décembre 2003] (estimation 2005 : 187 000 hab.).

La population guyanaise se distingue par sa pluralité culturelle liée à la diversité de ses composantes provenant de tous les continents : Amérique, Europe, Afrique et Asie. Cette diversité reflète bien les événements historiques qui se sont déroulés depuis le XVI^e siècle.

Groupe	Population	Pourcentage	Langue maternelle
Guyanais mulâtres	71 000	37,9 %	créole guyanais (français)
Haïtiens	15 000	8,0 %	créole haïtien (français)
Français	14 000	7,4 %	français
Guyanais blancs	13 000	6,9 %	français
Antillais guadeloupéens	12 000	6,4 %	créole guadeloupéen
Surinamiens créoles	12 000	6,4 %	créole sranan-tongo
Caribéens de l’Inde	7 500	4,0 %	hindoustani caribéen
Chinois hakka	7 400	3,9 %	chinois hakka
Bushinengués	7 400	3,9 %	aukan
Brésiliens blancs	5 700	3,0 %	portugais
Brésiliens Branco	3 600	1,9 %	portugais
Saramacca	3 200	1,7 %	créole saramacca
Hmongs	2 900	1,5 %	hmong
Guyanais noirs	2 600	1,3 %	créole guyanais (anglais)
Caribes (Amérindiens)	2 100	1,1 %	caribe
Arabes libanais	1 900	1,0 %	arabe leventin du Nord
Caribéens javanais	1 900	1,0 %	javanais caribéen
Saint-Luciens	1 100	0,5 %	créole saint-lucien (français)
Arabes syriens	800	0,4 %	arabe leventin du Nord
Palikours (Amérindiens)	600	0,3 %	palikour
Wayampi (Amérindiens)	600	0,3 %	wayampi
Péruviens	500	0,2 %	espagnol
Surinamiens hindiphones	500	0,2 %	créole sranan-tongo
Arawaks (Amérindiens)	200	0,2 %	arawak
Emerillons (Amérindiens)	200	0,2 %	emerillon
Wayana (Amérindiens)	200	0,2 %	wayana
Juifs français	100	0,0 %	français
Total	187 000	100%	

Tableau 1 Répartition ethnique de la population guyanaise (estimation Joshua Project 2005)

La précision de ces chiffres est très relative. En 1995, la préfecture de Cayenne estimait la population totale de la Guyane à 150 000 personnes, dont 70 000 «étrangers», parmi lesquels il y aurait 30 000 «sans-papiers» ou immigrants clandestins. Chaque année, les autorités de la Guyane expulsent environ 15 000 personnes «irrégulières», soit presque un dixième de la population.

Depuis plusieurs années, la Guyane affiche un taux d'accroissement naturel d'environ 27 ‰.

L'accroissement naturel de la population guyanaise provient pour les trois quarts, de la forte croissance démographique (taux de natalité moyen : 30 ‰), le quart restant résultant du solde migratoire [Source IEDOM 2003]. Par ailleurs les immigrants sont responsables de 60 % des naissances. Aujourd'hui, plus de 50 % de cette population est âgée de moins de 25 ans et sa croissance exponentielle fait qu'elle double tous les 15 ans. [Les projections de population aux Antilles-Guyane à l'horizon 2030, INSEE 2000].

Les créoles immigrants et les clandestins vivent le plus souvent dans des quartiers sans équipements sanitaires constituant des bidonvilles. Les prisons sont pleines à 300 %. L'intégration culturelle, économique et sociale des immigrants (dans un milieu où 40 % de la population est touchée par le chômage) constitue un problème fondamental en Guyane.

Cette explosion démographique s'accompagne immédiatement d'un besoin d'habitations individuelles et de logements collectifs, mais aussi d'infrastructures (hôpitaux, établissements scolaires, complexes sportifs...). Pour répondre à cet urgent besoin, les organismes et autorités ont entamés une politique particulièrement favorable au marché de la construction.

Actuellement, chaque année la population augmente d'environ 7500 habitants (soit 2500 logements), dont 3000 scolaires. La construction d'établissements scolaires est de 15 000 m²/an, avec une croissance annuelle de 5 %. [Antiane septembre 2004]

1.1.3 La filière bois en Guyane

Avec près de 7,5 millions d'hectares de forêt, la Guyane dispose d'environ la moitié de la surface forestière hexagonale. L'ONF annonce 410 000 hectares de forêts aménagées en 2001 dont 12 000 à 15 000 ha sont ouverts à l'exploitation chaque année permettant d'extraire de la forêt environ 65 000 m³/an de bois (5,5 m³/ha). L'abondante ressource naturelle du bois, place ce matériau en tête de liste pour répondre au besoin de la construction. [ONF 2002]

Aujourd'hui, la filière bois guyanaise se résume à une première transformation peu performante : trois exploitants forestiers et quatorze scieries produisent environ 30 000 m³ de sciages chaque année, soit la production totale d'une scierie de taille moyenne en métropole.

Au niveau des échanges commerciaux, 20 % des bois sont exportés pour un montant de 2,5 M€ (principalement vers les Antilles) et 50 % sont utilisés en charpente en Guyane. Les importations annuelles représentent 17 000 m³ de bois transformé et de bois avivé¹ pour un montant de 3 M€ (venant à 50% de la métropole et 21% du Brésil).

1.1.4 La position du bois dans l'économie guyanaise

Au total, la filière bois représente 740 emplois : 70 à l'ONF, 230 dans la première transformation du bois et 440 dans la seconde transformation. [Antiane septembre 2004]

Du point de vue technique, la forêt reste difficile d'accès et se caractérise aussi par son extrême diversité, même en comparaison avec d'autres régions amazoniennes.

« Pour l'exploitant, le prix est de 11 €/m³ de bois sur pied, comprenant l'investissement pour la desserte et l'inventaire. Mais le coût véritable est de 45 €/m³ si on enlève les subventions publiques. Pour l'office, le coût net revient à 25 €/m³ » [Bois Mag 2002].

Par ailleurs, l'exploitation est concentrée durant la grande saison sèche. Au final, de telles caractéristiques entraînent une production de bois de sciés faible en volume et irrégulière dans le temps.

Le département d'Outre-Mer protège la position du bois local sur son marché par une taxe d'environ 20 % des produits importés. Le bois arrive à se maintenir sur le marché local en représentant les deux tiers des ventes. Mais ce marché limité ne favorise pas le développement de ce matériau.

¹ Présentant une section rectangulaire brute

Lorsqu'elles investissent, les entreprises disposent d'un outil de production sous employé. L'ouverture de la voie de transport entre la Guyane et le Brésil risque cependant de changer la donne sur ces prix. Au détriment de la première transformation, le coût du bois risque de diminuer, et, étant donné que les matériaux pouvant rentrer en concurrence avec le bois (acier, béton, brique) risquent au contraire de voir leur prix augmenter, l'utilisation du bois sur le marché local peut être favorisée.

Cette évolution devrait conforter l'emploi de main d'œuvre locale pour la transformation et la mise en œuvre.

1.1.5 Disponibilité et conditionnement des bois de Guyane

Une des particularités des forêts tropicales est la diversité des espèces animales et végétales.

En Guyane, qui n'est qu'un infime échantillon de la forêt amazonienne, les spécialistes ont estimé environ 1200 espèces d'arbres (dont le diamètre peut être supérieur à 10 cm de diamètre). Cette diversité pose est un handicap pour l'exploitation de la ressource bois. Parmi ces 1200 espèces dont 800 recensées, seulement 50 essences sont connues par les scieurs et les bûcherons ; 20 environ sont listés pour une exploitation systématique ; et enfin 4 essences représentent 80% de la production (angélique 36%, gonfolo 26%, grignon 10% et amarante 3%).

Les bois équarris représentent un volume d'exploitation très faible. La longueur des éléments peut atteindre 30 m et les sections 80x80 cm².

En dehors de ce marché marginal, la quasi totalité des sciages est produite par les scieries. La conformation des scies de tête de chaque scierie permet de débiter des éléments d'au plus 7 mètres de longueur. Au-delà de cette longueur certaines scieries sont équipées de scies mobiles montées sur rail, mais la longueur est encore limitée à 9 mètres.

Les sections du marché sont données pour des bois à l'humidité de référence de 20%. Les sciages sous forme de plots sont réalisés dans les épaisseurs de 20, 27, 34, 41, 45, 65, 75 et 80 mm. Les sciages avivés sont réalisés dans les mêmes épaisseurs avec des largeurs fixes allant de 75 à 350 mm avec un pas de 25 mm. (Une surcote doit être réalisée aux sciages frais afin de compenser le retrait de séchage).

1.1.6 Les enjeux écologiques

Depuis des milliers d'années, l'Homme a vécu et évolué avec le bois, qui représentait une source d'énergie, un matériau de construction, et plus encore : un matériau de « création », du prototype à l'outil. Il est aujourd'hui normal qu'un grand nombre d'entre nous ressentent « la chaleur » de ce matériau propre à un équilibre environnemental.

Depuis le début du XX^{ème} siècle, l'ère industrielle s'est caractérisée par une exploitation de toutes les ressources (substituant la plus part du temps le bois) nécessaires à son développement, sans souci de durabilité ou de conséquences sur l'environnement. La prise de conscience de ce danger ne remonte qu'en 1970, où l'on constatait la disparition de nombreuses espèces (animales et végétales), l'appauvrissement des ressources, la pollution, et globalement la modification des milieux de vie.

Le bois est un matériau de construction qui se distingue des autres du fait qu'il nécessite peu d'énergie nécessaire à sa transformation, son transport, sa mise en œuvre et son recyclage. Par ailleurs, il est essentiellement constitué de carbone issu d'un processus purifiant l'atmosphère (en réduisant le taux de dioxyde de carbone qu'il comprend).

La prise en compte de l'aspect environnemental est encore plus récente. Lors de la conférence de Rio de Janeiro en 1992, une convention sur les changements climatiques fixe le principe d'objectifs de réduction des gaz à effet de serre. En 1997, des dispositions concrètes et chiffrées ont été présentées par la majorité des pays développés lors de la conférence de Kyoto. En 1998, la conférence de Buenos Aires vise « un droit de polluer » fonction du nombre d'habitants.

Le dioxyde de carbone étant responsable à 55% des gaz contribuant à l'effet de serre, et le bois étant essentiellement constitué de carbone extrait du CO₂ de l'air, une politique favorisant l'utilisation du bois dans la construction fut immédiatement mise en place.

INTRODUCTION

La « Loi sur l'air » et le « rapport Bianco » exposent succinctement les conséquences de la filière bois sur l'environnement et avancent l'étude d'un décret visant à imposer une proportion de bois dans les constructions publiques neuves.

Une charte accord-cadre-environnement signée par 6 ministères et 9 organisations professionnelles de la construction et l'ADEME vise à accroître la part du marché du bois de 25% à l'horizon 2010. Actuellement, le bois d'œuvre représente en valeur 10% de l'ensemble du marché des matériaux de construction, ce qui situe la France dans la moyenne des pays d'Europe continentale.

L'élaboration d'un décret obligeant les maîtres d'ouvrage publics à choisir et afficher le niveau de contenance en bois des bâtiments qu'ils construisent est en cours ; 3 niveaux seront définis 1) faible ; 2) moyen ; 3) élevé.

Les volumes de bois sont exprimés en dm^3/m^2 SHON (Surface Hors d'Œuvre Nette), sauf pour les bâtiments à usage dominant de parking, de garages ou de transports et pour les bâtiments agricoles, pour lesquels les m^2 SHON sont remplacés par des m^2 SHOB (Surface Hors d'Œuvre Brute).

Catégories	Seuils			Unité
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	
Logements individuels	60	75	100	dm^3/m^2 SHON
Logements collectifs	35	45	70	
Bureaux	20	25	40	
Commerces	35	45	70	dm^3/m^2 SHOB
Garages, parkings, transports	10	15	20	
Bâtiments à caractère hôtelier	35	45	70	dm^3/m^2 SHON
Bâtiments résidentiels pour collectivités	25	30	50	
Bâtiments pour enseignement et recherche	30	40	60	
Bâtiments sanitaires et sociaux	25	30	50	
Bâtiments sportifs, de loisirs, culturels et religieux	25	30	50	dm^3/m^2 SHOB
Bâtiments agricoles	15	20	30	
Bâtiments industriels et de stockage	15	20	30	

Tableau 2 Proportion de bois dans les nouvelles constructions [projet de décret non officiel]

La cause visée par ces dispositions est honorable, cependant elles ne répondent qu'hypocritement au problème de dérèglement climatique de la planète. Elles n'absorberont pas la pollution produite par ailleurs (transport, production d'énergie...) en augmentation, mais permettront de déduire ce gain des productions polluantes et de conforter une plus grande liberté avec un « droit de polluer » proportionnel à la population. Cependant, le matériau bois stocke non seulement du carbone mais remplace un matériau beaucoup plus polluant dans les étapes de sa vie (énergie de transformation, transport, mise en œuvre et recyclage).

Finalement, le XXI^{ème} siècle doit être le début d'une ère où le bois, matériau de construction, est à l'honneur, en particulier dans la construction publique.

1.1.7 Polémique exploitation et déforestation tropicale

Le problème de déforestation est un sujet très médiatisé et souvent mal compris par le public. Chaque année 210 000 km^2 de forêt tropicale ancienne disparaissent de la surface de la terre [FAO], soit la surface d'un terrain de football toutes les 2 secondes. Sur le banc des accusés on a rapidement placé en premier plan les utilisateurs de bois tropicaux.

La grande diversité des essences fait que peu d'entre elles sont exploitées. La faible proportion de bois en essences commercialisées en forêt oblige l'exploitant forestier à travailler par « cueillette ». Deux à trois années suffisent pour que les dégâts causés par l'exploitation soient digérés par la forêt. Et une quinzaine d'années de jachère sont nécessaires avant de retrouver les essences exploitables à un diamètre suffisant.

En dehors du cas de l'Asie, l'exploitation du bois en forêt tropicale ne s'effectue pas par coupes rases. Le mélange des essences, l'enchevêtrement des troncs, branches et lianes rendraient le site inaccessible ; Le sol étant déjà très instable et peu adhérent.

La cause principale de la déforestation est l'agriculture (liée à l'expansion démographique). Cette dernière nécessite de grandes étendues de terres sans arbres, pour l'élevage comme pour les cultures. Défricher par des incendies volontaires est une pratique assez commune et efficace. La pauvreté des sols et le manque de moyen pour revaloriser la terre (par engrais) conduisent les paysans à déplacer régulièrement leurs exploitations. Seulement les terres abandonnées sont trop appauvries pour accepter une reforestation naturelle.

En proportion, la FAO estime qu'environ 86% des surfaces déforestées sont dues à un défrichage (par le feu) directement nécessaires à l'agriculture. Les 14% restant passent pour moitié par une exploitation forestière, mais la finalité de la déforestation est pour l'agriculture et la construction.

Certains « écologistes » ont œuvré pour boycotter les bois tropicaux. Seulement, par la dévalorisation du bois, l'arbre devient alors gênant pour l'agriculture. Finalement la déforestation par défrichage s'accélère alors que l'intention originelle était de la réduire.

Il est à noter que depuis 2002, l'ONF s'est mis en charge d'obtenir le label d'écocertification forestière en faveur d'une politique de gestion durable PEFC pour les bois guyanais.

1.2 Attentes du type de produit

1.2.1 *Avantages du lamellé*

Un matériau particulièrement utilisé en métropole pour les structures de grande portée en bois est le lamellé-collé.

Le principe est simple, il consiste à réaliser des éléments de structure de type poutre de grande longueur et de grande section à partir de planches (dites lames de bois) de petites sections et petites longueurs purgées des gros défauts. Les petits défauts sont répartis dans la masse, on obtient alors un matériau en bois homogène dans lequel les seuils inférieurs de propriétés retenus pour les classes d'usage sont meilleurs que ceux du bois massif. Cette technique permet d'obtenir des poutres de dimension quasi illimitée, cintrées, avec des inerties variables ...

Compte tenu du type de produits obtenus à l'issue de la première transformation en Guyane, l'utilisation de petites sections et de petites longueurs favorise : le rendement en scierie, la manutention pour le transport (scierie-atelier) et le séchage.

1.2.2 *Contraintes du lamellé-collé*

La réalisation du lamellé-collé nécessite un **marché**. Il n'est vraiment rentable que s'il est réalisé **industriellement**. Les produits sont généralement fabriqués sur mesure, et la production doit être absorbée par le marché en commande régulière. **L'investissement matériel**, représentant un coût minimum de 3 millions d'euros, peut difficilement tolérer les aléas d'un marché restreint.

Le **savoir-faire** doit être certifié par une **accréditation** pour la réalisation des éléments de plus de 6 m de longueur. Cette accréditation représente un coût élevé et difficilement amortissable par une petite entreprise.

La technique doit s'appuyer sur des **normes** et une assurance qualité contraignante pour le contrôle des paramètres (types de colles, temps de séchage, température, humidité du bois, type de bois, compatibilité des bois, acidité, rejet de corps gras ou de résines...).

Il faut assurer une préparation soignée des lames tant en surface pour l'encollage, qu'en bout où un usinage par aboutage et un collage sont indispensables pour réduire les amorces de rupture des plans de collages. [Charpentes en bois lamellé-collé, 1984]

Les documents techniques, normes ainsi que les colles ont été conçues pour réaliser du lamellé-collé avec des bois résineux, et bien que des progrès considérables ont été apportés dans le domaine des colles à bois, les précédentes difficultés exposées ne facilitent pas l'implication d'industriels pour une réalisation de lamellé-collé en Guyane.

L'alternative, souvent proposée par les professionnels de la construction et du bois, est de réaliser des assemblages mécaniques simples en substituant la colle, d'où le lamellé cloué boulonné.

1.2.3 Les objectifs visés

Les avantages « lamellé cloué boulonné » sont les mêmes que ceux du lamellé-collé. La seule différence réside dans l'absence de colle, ce qui permet de s'affranchir de contraintes techniques et réglementaires peu ou pas adaptées aux conditions guyanaises.

Le lamellé cloué boulonné se libère de beaucoup de contraintes. Les assemblages mécaniques font que ce produit reste un élément de structure « traditionnel ».

Il ne nécessite **pas d'accréditation** et ne pose pas de problèmes de réglementation sous couvert d'une justification par calcul, validée éventuellement par des essais mécaniques.

Il est facile à mettre en œuvre et se rapproche plus facilement de **l'artisanat** que de l'industrie. La production peut être interrompue **temporairement** sans conséquence néfaste sur le fonctionnement de l'entreprise.

Les moyens matériels sont simples et **bon marché**.

Les poutres préparées en atelier, peuvent être **transportées** en éléments simples (en camion, en pirogue ou en hélicoptère) puis montées sur le chantier.

Ses principaux inconvénients sont : qu'il n'existe pas de référentiel technique clairement défini, et que les propriétés mécaniques (moindre que celles du lamellé collé bien évidemment) n'ont jamais fait l'objet d'une étude visant à les définir ou les améliorer.

1.2.4 Le glissement des lames

L'étude bibliographique et les quelques expériences réalisées avec ce produit ont montré que le boulonnage seul induit une souplesse trop importante accompagnée du glissement des lames. [Encyclopédie de métiers, la construction et la charpente en bois, 1972].

La mise en place d'un boulon nécessite un pré perçage pour sa mise en place, d'où un jeu initial important permettant de ce fait aux lames de glisser au niveau des interfaces.

Il convient aussi de préciser que, depuis bien longtemps, des lames de bois superposées (assemblées soit à l'aide d'un étrier soit par boulonnage et trou oblong) ont été utilisées comme suspension dans les premiers véhicules pour amortir les chocs.

La souplesse est recherchée par ce système pour consommer l'énergie et la dissiper par frottement.

Un exemple simple permet d'illustrer le phénomène de glissement. Si l'on considère une poutre droite, de largeur b et de retombée (hauteur) $2h$, sollicitée en flexion 3 points et en supposant que toutes les conditions soient réunies pour l'application de la théorie des poutres. Pour la poutre, la contrainte de cisaillement (ou effort rasant) est déterminée par la relation de réciprocité $\tau_{yx} = \tau_{xy}$ et par l'effort tranchant

$$T = \int_S \tau_{xy} dS$$

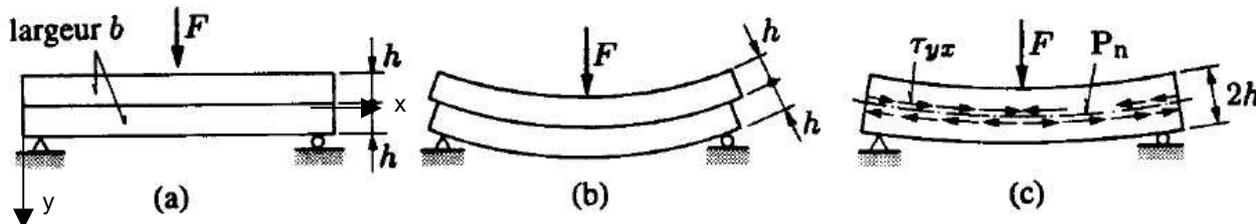


Figure 2 Mise en évidence du cisaillement dans une poutre en flexion
 a disposition de la poutre
 b lames superposées
 c lames collées avec contraintes internes de cisaillement

INTRODUCTION

Il en résulte, selon la théorie de Jourawski, une répartition des contraintes de cisaillement fonction de la hauteur de la surface S (section rectangulaire) :

$$\tau_{xy} = \frac{T_y}{2 I_z} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) \quad \text{soit } \tau_{xy \text{ max}} = \frac{3 T_y}{2 S}$$

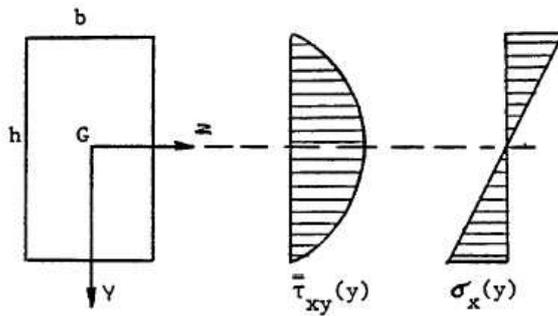


Figure 3 Mise en évidence du cisaillement dans une poutre en flexion

Si l'on considère une poutre droite, de largeur b et de retombée (hauteur) 2h, soumise à un moment de flexion constant M_F sur sa longueur, cette poutre se déforme alors en arc de cercle de rayon $R = \frac{E I}{M_F}$ (au niveau de l'axe neutre). Avec E le module d'élasticité longitudinal et I le moment d'inertie quadratique (orienté selon la même direction que le moment de flexion).

Si dans un second temps, la poutre est constituée de 2 poutres distinctes superposées de même largeur b mais de hauteur h. (Les propriétés élastiques E sont conservées). En supposant que le contact soit sans frottement et que les 2 poutres soient sollicitées d'un moment de flexion :

$$M_F' = \frac{M_F}{2}. \quad \text{Les moments d'inertie des poutres de hauteur h sont égales à } I' = \frac{I}{8}.$$

Il en ressort une déformation en arc de cercle avec un rayon $R' = \frac{E I'}{M_F'} = \frac{E I}{4 M_F}$

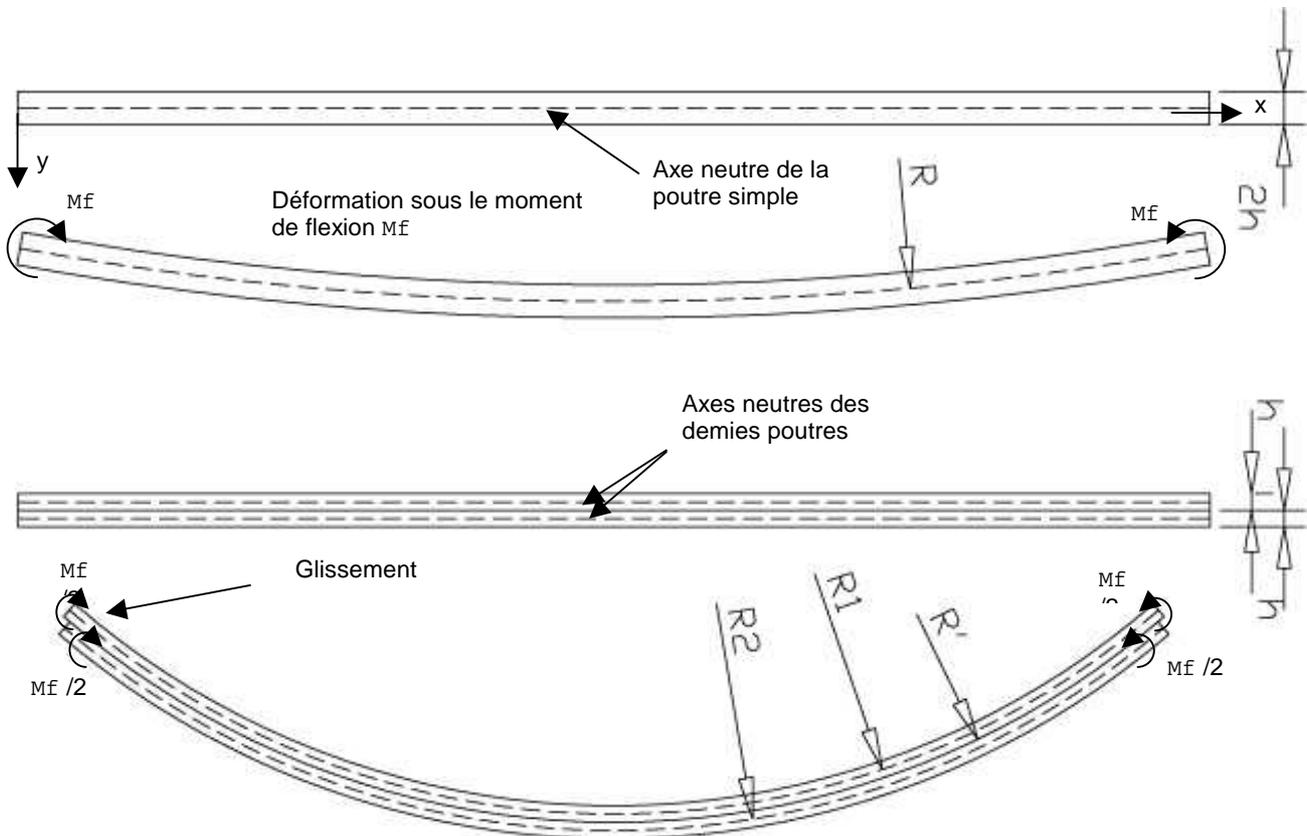


Figure 4 Mise en évidence du glissement observé sur un bilame en flexion

INTRODUCTION

Il est évident que ces deux types de sollicitations (M_f et $2x \frac{M_f}{2}$) sont différents, car dans le second cas, la lame supérieure devrait subir un effort normal de compression et la lame inférieure devrait subir un effort normal de traction, pour annihiler le glissement. Cependant lorsque le moment de flexion est créé par une flexion 4 points, entre les appuis intérieurs, c'est (à peu de chose près) ce qu'il se passe lorsque les lames sont superposées et libres.

A travers cet exemple, on obtient une flèche 4 fois plus importante et surtout du glissement à l'interface des lames.

A partir du point où le glissement entre les lames est nul, le glissement est fonction de la distance x .

Si l'on considère Δx le glissement de deux points de l'interface appartenant chacun à une lame distincte situés à la position x , on obtient :

$$x = R \cdot \alpha ; \Delta x = C_2 - C_1 ; R_2 = R_1 + h ; \frac{\Delta x}{x} = \frac{h}{2R} = \frac{h}{2} \frac{M_f}{E I}$$

Cet exemple montre que les contraintes « internes » (à l'interface) de cisaillement permettent de réduire la déformation totale en divisant la flèche par 4.

Pour gagner en raideur dans une poutre lamellée boulonnée, il faut trouver un moyen d'empêcher le glissement entre lames, ce que réalise la colle.

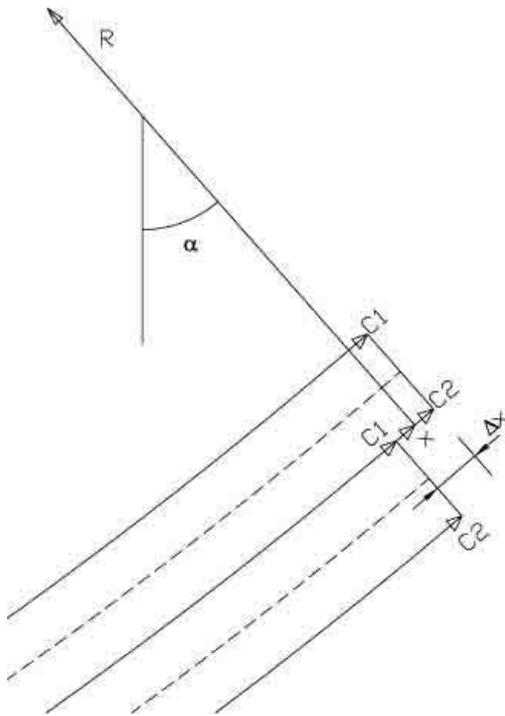


Figure 5 Glissement des lames

1.2.5 L'objet de la recherche

Les clous ne présentent pas de jeu d'assemblage initial. Ils devraient donc limiter ces glissements et donner un comportement en flexion plus rigide que par simple boulonnage. Dans la pratique, une poutre, constituée de plusieurs couches avec des joints de discontinuité et des efforts variablement répartis, présentera des zones dans lesquelles les clous travailleront en arrachement. Cet organe n'étant pas adapté à la reprise de ce genre de sollicitation, les boulons devront être utilisés aux bons endroits pour que les lames ne s'écartent pas.

Les présents travaux de recherche se concentrent donc sur l'étude du rôle du clouage comme moyen d'empêcher le glissement relatif des lames en flexion.

L'analyse se fera sur une poutre constituée de deux planches clouées.

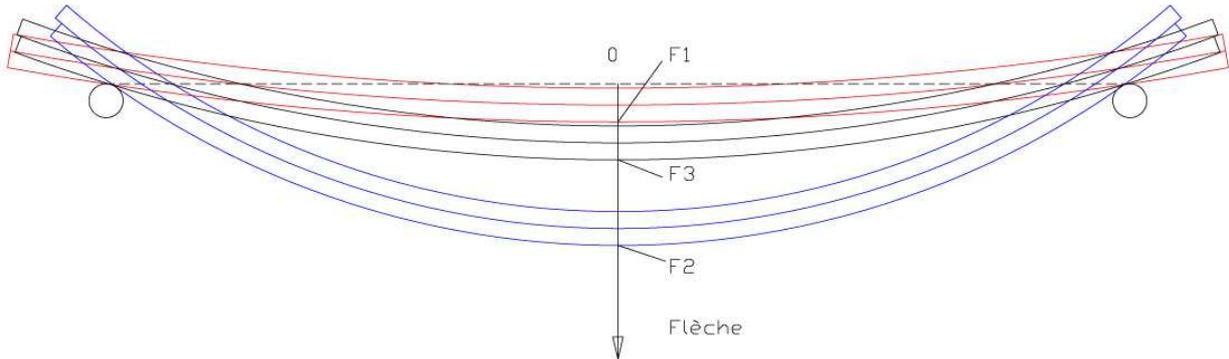


Figure 6 Flexion d'un bilame avec 3 configurations (même sollicitation)

- 1 (en rouge) lames collées
- 2 (en bleu) lames libres (frottement)
- 3 (en noir) lames clouées

La performance de l'assemblage est évaluée en comparaison des mêmes planches qui, au plus défavorable, sont désolidarisées (en dehors du frottement), et, au plus favorable, sont collées.

Cette performance nécessite l'introduction d'un paramètre G appelé « gain », défini par le rapport :

$$G = \frac{E_3 - E_2}{E_1 - E_2} \text{ Où } E_1, E_2, \text{ et } E_3, \text{ sont les modules d'élasticités respectifs des poutres 1, 2 et 3.}$$

Ce paramètre varie de 0% lorsque les lames dissociées, à 100% lorsque les lames collées.

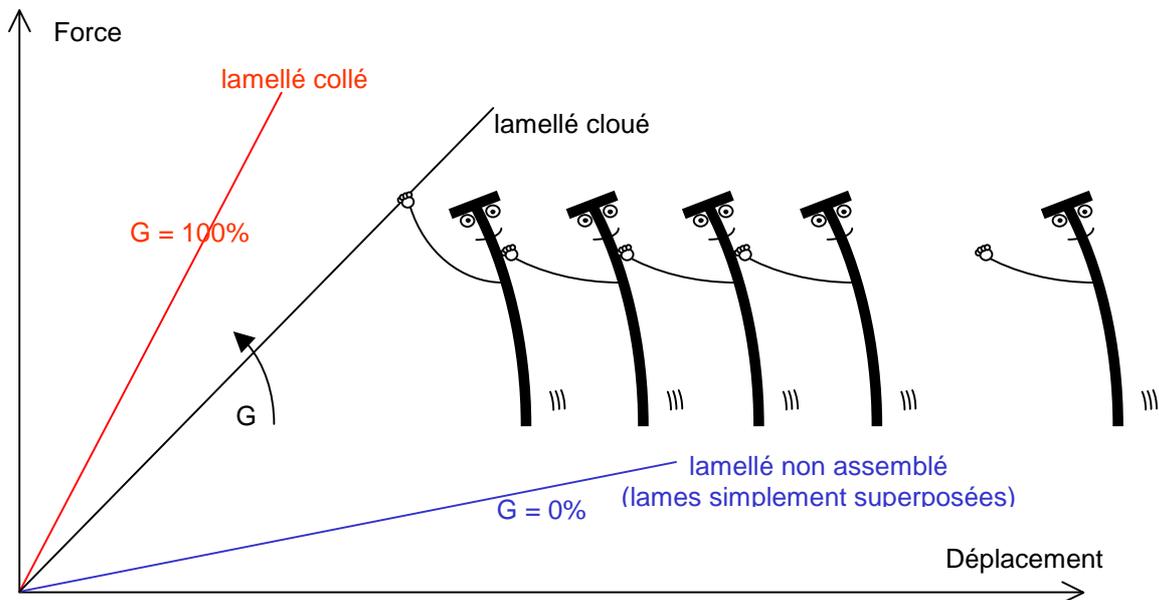


Figure 7 Objectif du clouage

1.3 Etat de l'art

1.3.1 « Préhistoire »

Durant de très nombreuses années l'architecture latine, introduit en Gaule à l'époque de l'Empire romain, s'est imposée pour la réalisation d'ouvrages de grande portée par le système de voûte en pierre. [Encyclopédie de métiers, la construction et la charpente en bois, 1972] [Traité du bâtiment, les charpentes en bois, 1975]. Qu'il s'agisse des ponts, des monuments religieux ou de châteaux, cette technique inspirait force et pérennité. Cependant, le temps de construction et l'énergie nécessaire à la mise en œuvre ont lentement fait place à un autre matériau plus accessible dans certaines régions : le bois.

L'utilisation de la charpente triangulée était limitée, dans la majorité des cas, par les assemblages entre éléments et leur longueur. Au 14^{ème} siècle, le principe d'arc de compression en voûte fût utilisé dans certaines charpentes. On pouvait y voir plusieurs avantages. En premier lieu, les assemblages travaillent en compression (comme pour la pierre) ; les assemblages sont alors beaucoup plus faciles à réaliser en toute sécurité. En second, la charpente peut être dissociée en deux parties : une partie inférieure en voûte et une partie supérieure triangulée, réduisant la longueur des arbalétriers coupés en deux. Enfin, cette architecture rassure l'utilisateur en lui rappelant les structures plus grandes en pierre et permet une décoration intérieure sur un volume en voûte très aisément.

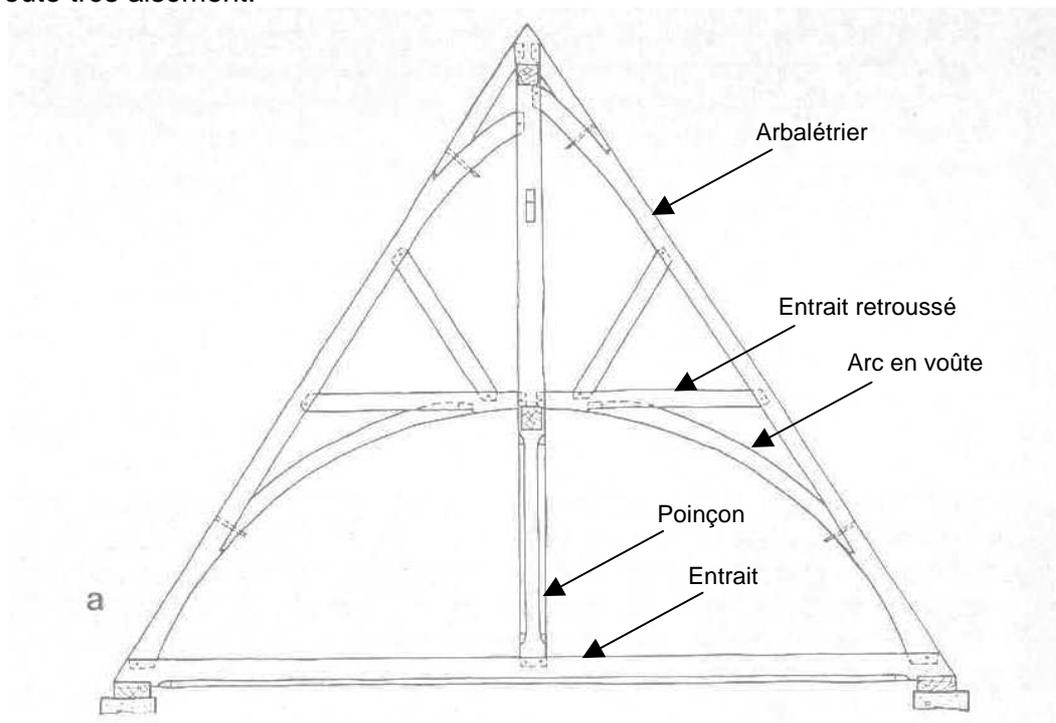


Figure 8 Ferme de la charpente de la nef de l'église de Mussy.
(Extrait page 421, tome 1.8, encyclopédie de métiers, la construction et la charpente en bois)

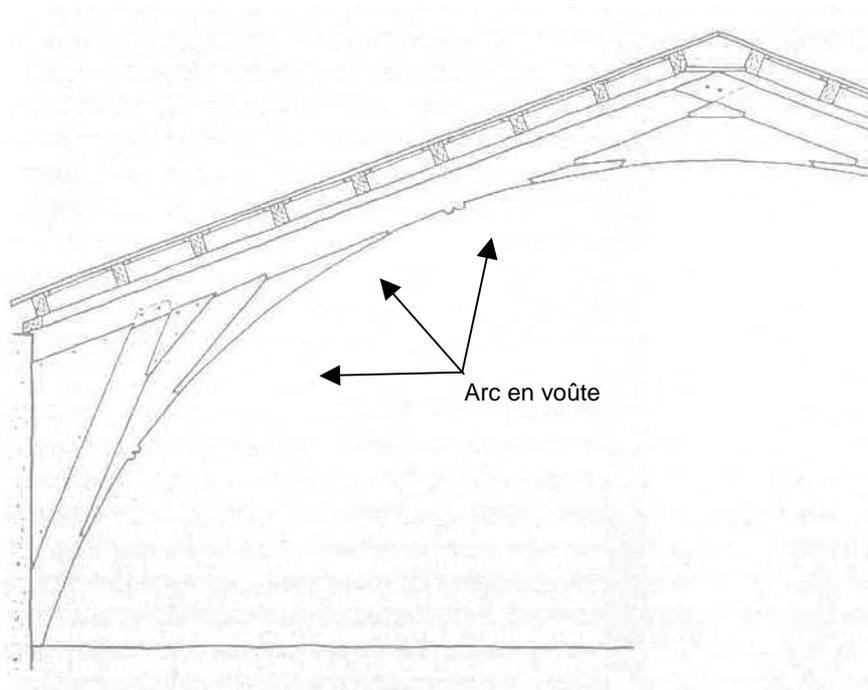


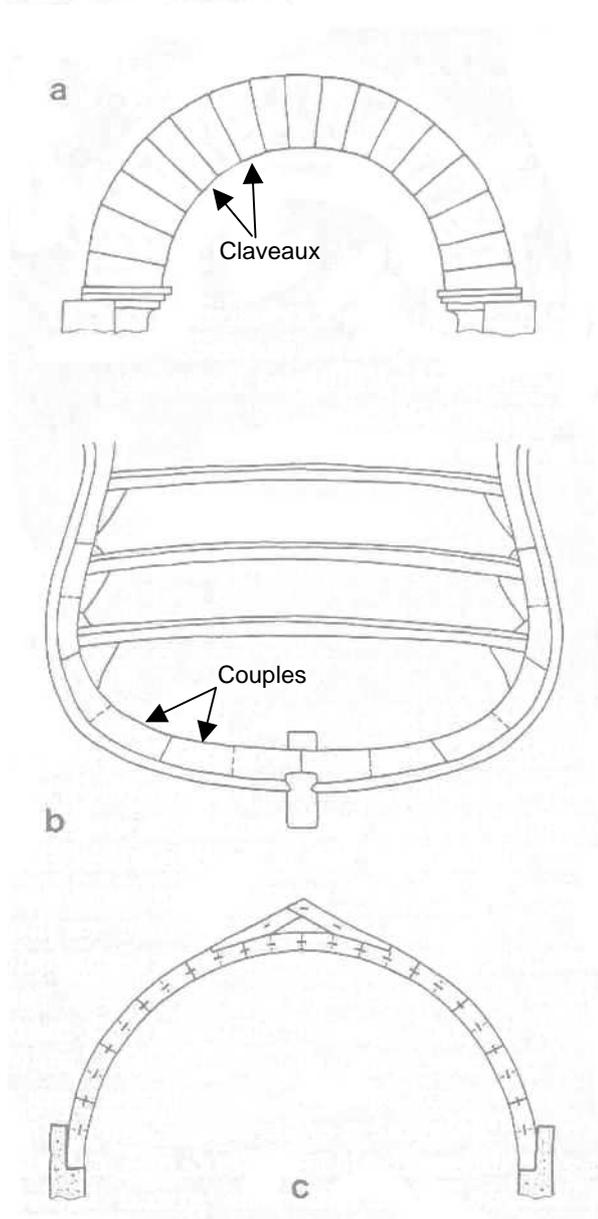
Figure 9 Ferme de la charpente de la « maison des Chevaliers » à Pont-Saint-Esprit.
(Extrait page 465, tome 1.9, encyclopédie de métiers, la construction et la charpente en bois)

1.3.2 Les structures Delorme

Au 16^{ème} siècle, Philibert Delorme, issu de deux générations de maçon, est affecté au poste d'ingénieur militaire au service de la marine. A trente trois ans, il relie les trois principes de structure : les claveaux d'un arc de pierre de taille appareillés, la charpente navale et la répartition des couples, et la charpente de comble pour réaliser en 1550 une structure à l'impériale de 20 mètres de portée (très supérieure aux charpentes de cette époque).

Figure 10 Sources techniques du principe de charpente de Philibert Delorme.
(Extrait page 578, tome 1.11, encyclopédie de métiers, la construction et la charpente en bois)

- a. arc en pierre
- b. couple d'un bateau
- c. proposition de Philibert Delorme



INTRODUCTION

A la suite, il imagine et met au point un système de charpente moderne. Composée d'éléments fait de planches (cerces) serrées les une contre les autres par des liernes clavetées, ce système peut être considéré comme la première expression d'une charpente d'ingénieur qui est sans aucun doute l'origine des structures en bois lamellé-collé. Toutefois, il eut du mal à survivre à son auteur (même si des structures de ce type furent réalisées au 17^{ème} siècle), et ne connut un regain de faveur qu'à la fin du 18^{ème} siècle, principalement grâce aux officiers du génie, qui l'employèrent pour couvrir des manèges.

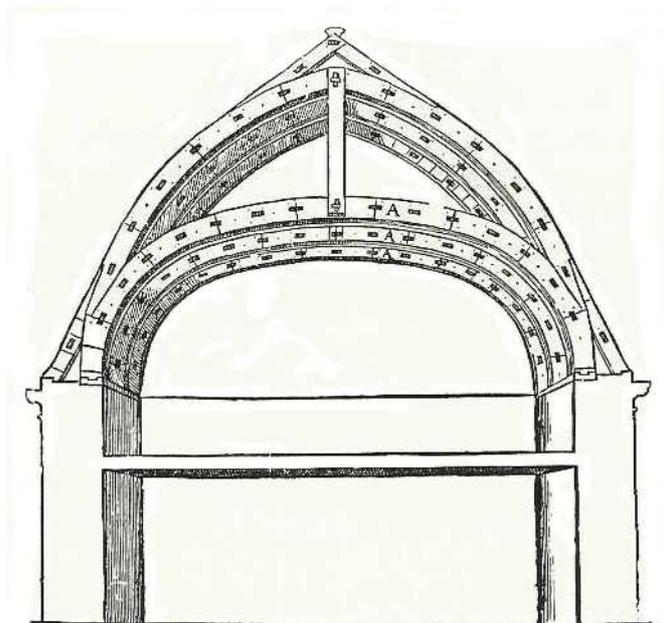


Figure 11 Charpente industrielle de Delorme.

Illustrations tirées des « Nouvelles inventions pour bien bastir & à petits fraiz... » de Philibert Delorme, édition 1626. Grand comble du château de la Muette.

(Extrait page 589, tome 1.11, encyclopédie de métiers, la construction et la charpente en bois)

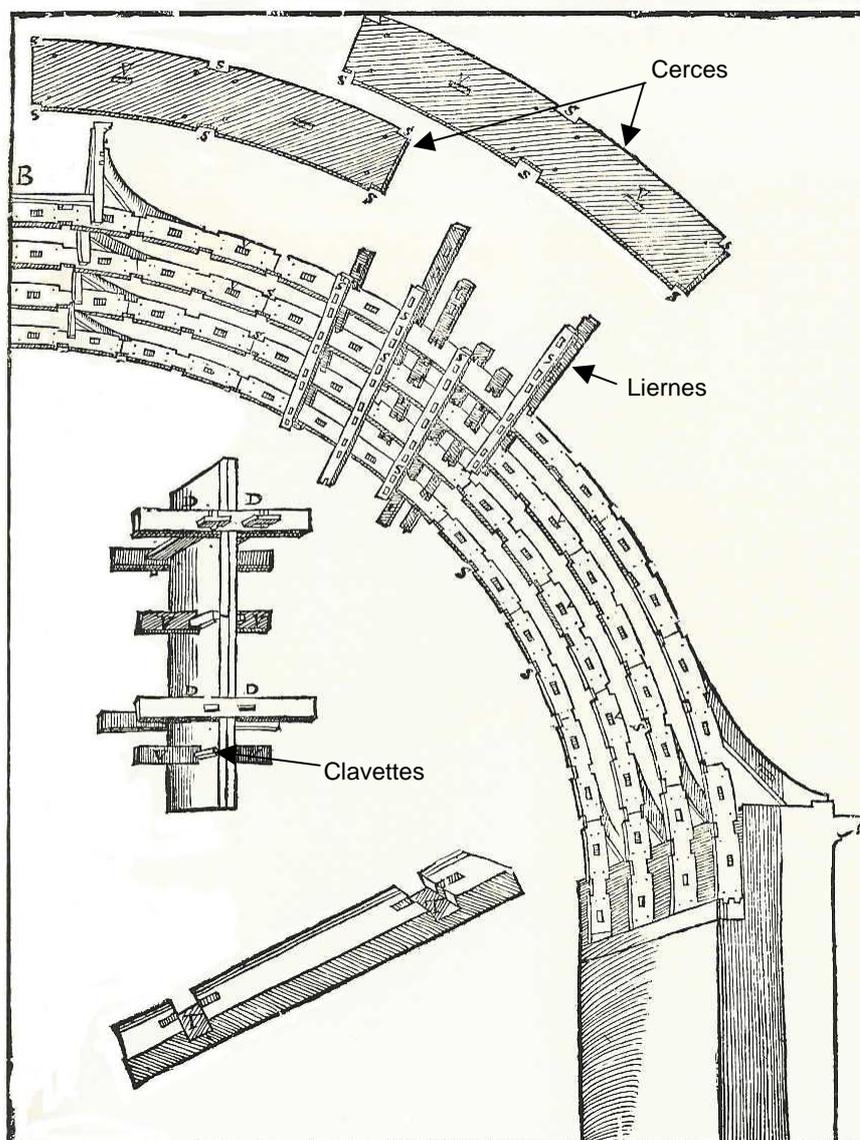


Figure 12 Vue éclatée de la charpente industrielle de Delorme

Historiquement, ce procédé avait déjà été pensé au premier siècle de notre ère par des indiens pour la réalisation d'un sanctuaire. Au 11^{ème} siècle, les coupoles couvertes de plomb de la basilique Saint-Marc à Venise sont supportées par des charpentes sans ferme ni panne dans lesquelles les chevrons courbes, constitués de planches clouées, sont réunis par des traverses entaillées. (Vers 1535, Philibert Delorme étudie à Rome les monuments antiques qu'il relève avec soin). Après sa mort, on a parfois douté que Philibert Delorme fût réellement l'inventeur de son système de charpente. Toutefois il est indéniable que Philibert Delorme soit le premier à laisser des informations écrites aussi précises qu'étudiées sur ce système.

Il convient de noter que dans le corps même de son livre, Philibert Delorme vante vigoureusement les nombreux avantages de son procédé de charpente (qui s'apparente sur beaucoup de points à ceux de ces travaux de recherche). Voici la citation de quelques passages :

« Il permet l'emploi de bois minces, courts, légers et de peu de valeur à la place de pièces longues et lourdes en chêne », et l'auteur estime l'économie de bois dans un rapport de 1 à 10. « Il est possible d'employer les essences de bois dont on dispose sur place, hêtre, rouvre, peuplier, tilleul, frêne, des sapins qui sont meilleurs et du châtaigner très bon. (...) Les bois peuvent être mis en œuvre après un simple ressuyage, au lieu de devoir attendre 3 ans pour qu'ils soient secs, car le bois de bout ne rapetisse point. (...) Du fait des pièces qui sont de dimensions réduites, il est possible de les débiter dans les bois de réemploi. (...) Elle permet une économie sur le transport du bois, sur les engins de levage, sur les échafaudages, et sur le temps passé, ce dernier étant réduit dans un rapport de 1 à 6. (...) La forme de la charpente offre un dégagement complet de l'intérieur des combles, afin de former de véritables voûtes susceptibles de s'accommoder de toutes sortes d'emplois et aussi de décoration. (...) Elle permet les séparations commodes de certaines parties sans devoir réaliser de gros travaux d'étalement. (...) Dans le domaines des cintres destinés à supporter des vousoirs en pierre, elle offre la possibilité de réaliser des économies importantes de bois qui peuvent, en outre, être réemployés pour un autre ouvrage et pratiquement sans perte et surtout sans qu'il soit nécessaire de dévier les cours d'eau. »

Si l'on pense que le premier souci de Delorme était de réaliser un certain nombre d'économies par rapport aux autres techniques de charpente, il faut reconnaître que le but est atteint.

Cependant l'auteur prétend que par sa légèreté, comparativement aux autres charpentes de son époque, celle qu'il a mise au point permet des économies sur les maçonneries la supportant. Malheureusement un arc (sans corde puisque sans entrant) a pour conséquence de produire des poussées horizontales importantes au niveau des appuis.

Par ailleurs, la courbure de la couverture rend beaucoup plus difficile pour l'époque la réalisation de l'étanchéité. Les contreventements longitudinaux ne sont pas abordés par Delorme, et la mise en avant d'une grande rigidité de cette structure a incité les charpentiers, trop confiant, à ne pas prendre suffisamment de précautions, ce qui a conduit à d'inévitables déboires.

Finalement, la structure de Philibert Delorme n'assure pas tous les avantages souhaités, mais celui-ci est à l'origine d'un mode de réflexion révolutionnaire pour arriver aujourd'hui aux structures en bois de grande portée.

1.3.3 Les structures Emy

En 1822, le colonel Emy adresse au ministère de la Guerre une étude intitulée « Mémoire sur un nouveau système de cintres en madriers courbés sur leur plat pour de grandes charpentes ».

En premier lieu, Emy rappelle l'apport de Philibert Delorme et l'heureuse application que J.G. Legrand et J. Molinos ont faite de cette technique sur la cour de la Halle aux blés à Paris. Cette remise en vogue du système est telle que peu d'ingénieurs et d'architectes laissent depuis passer l'occasion de l'employer. Toutefois il liste les inconvénients rencontrés et notamment la surconsommation de bois de petite dimension pour des ouvrages de dimension moyenne (15 à 20 mètres de portée), alors que le marché propose des dimensions plus importantes.

Pour palier cette difficulté, sans recourir directement à la ferme triangulée qui exige un cubage de bois important et une conception compliquée, il propose une solution intermédiaire qui consiste à utiliser un arc en planches cintrées destiné à raidir une ferme droite sur poteaux.

La ferme droite constitue un ensemble qu'on peut assimiler à un cadre, composé de deux poteaux et de deux arbalétriers, dont les angles sont renforcés par des jambes de force, un entrait retroussé et un poinçon. L'arc est obtenu au moyen de cinq à sept planches cintrées sur un gabarit ayant le profil de son intrados. Après leur mise en forme, les planches sont réunies entre elles par des boulons, qui les traversent perpendiculairement à leur axe médian, et par des étriers de fer plat destinés à presser les planches les unes contre les autres et à s'opposer à leur glissement pour que l'arc conserve sa forme. Dans le cas où les conditions optimales de portée, pente et hauteur, sont réunies, l'arc est tangent aux faces intérieures des pièces qui constituent la ferme droite, de manière à recevoir directement les efforts que celle-ci supporte.

Après la fabrication séparée de la ferme et de l'arc, ces éléments sont réunis l'un à l'autre par des pièces moisées placées le plus souvent derrière chacune des pannes afin de former des échantignolles. Généralement ces moises rayonnent vers le centre de l'arc, et sont entaillées de 15 à 20 mm à l'endroit où elles rencontrent les autres éléments qu'elles enserrrent et maintiennent dans le même plan.

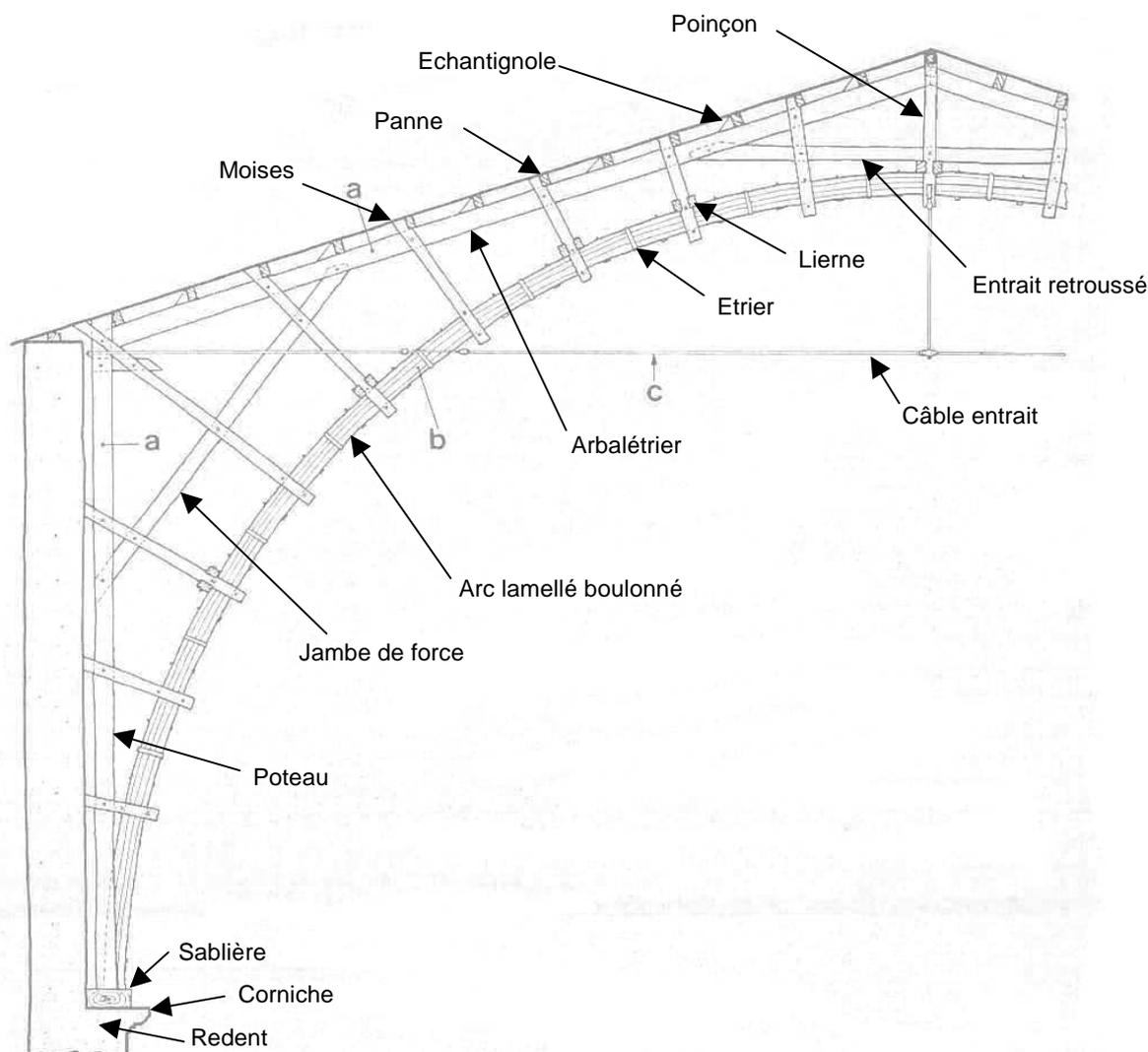


Figure 13 Ferme du manège de Libourne élaborée par le colonel Emy.

(Extrait page 531, tome 1.10, encyclopédie de métiers, la construction et la charpente en bois)

a. cadre formé d'éléments droits

b. arc en planches

c. tendeur métallique

INTRODUCTION

Les éléments ainsi construits sont assemblés en pied dans deux sablières placées sur des redents pratiqués dans les murs longitudinaux dont l'épaisseur est réduite depuis ces points d'appui jusqu'à l'entablement des corniches pour que les poteaux soient écartés des murs de 10 à 15 cm environ. Les fermes étant dressées dans le plan vertical, elles sont réunies les unes aux autres par plusieurs cours de liernes situées au point de croisement des moises et de l'extrados des arcs, tandis que des liens de faîtage assurent le contreventement de l'ensemble de la charpente.

Sans le savoir Emy réalise un arc à deux articulations et ne dispose pas d'outil mathématique pour déterminer les importantes poussées horizontales qu'il impose aux appuis. Intuitivement, lors de l'exécution, il fait prolonger les arbalétriers afin qu'ils aillent en scellement dans les murs. Bien que la stabilité s'en trouve confortée, l'arc trop souple ne soutient pas suffisamment la ferme et les efforts en tête de mur le pénalisent lourdement. L'entraxe des fermes est expérimentalement déterminé, passant de 1,50 m (charpente de Philibert Delorme) à 3,33 m.

Sa conclusion fût : « (...) le système de charpente ainsi décrit (...) résout la difficulté qui tient à la largeur de l'édifice et réunit à une grande solidité l'élégance et l'économie. (...) Il peut faire faire un très grand pas à l'art de la charpenterie et l'on peut s'étonner que depuis 300 ans (c'est-à-dire depuis Philibert Delorme) on ait marché dans cet art à côté d'une idée aussi simple sans avoir su la saisir (...) ».

Malheureusement sa découverte ne fera pas l'objet d'une circulaire ministérielle et cette technique ne connaîtra pas le développement que son auteur était en droit d'attendre. Par la suite, les arcs en planches seront employés en charpente mixte par le commandant Vainsot et le capitaine Ardant. La raison principale du manque de succès est, probablement pour des raisons d'économies, qu'Emy ne saura pas donner une résistance assez grande à ses fermes car les arcs, plus souples que les arbalétriers qu'ils sont destinés à soulager, auront toujours une retombée trop faible. Les appuis deviennent alors trop chers.

Il convient de noter que depuis l'invention de la charpente en lamellé par Emy en 1822 jusqu'aux premières réalisations en bois lamellé-collé en 1913 d'après le brevet de Hetzer, la technique n'a pas cessé d'être utilisée en France. Mais il faudra attendre 1960 pour qu'une charpente franchisse la limite des 100 m de portée dont le colonel Emy avait publié un projet.

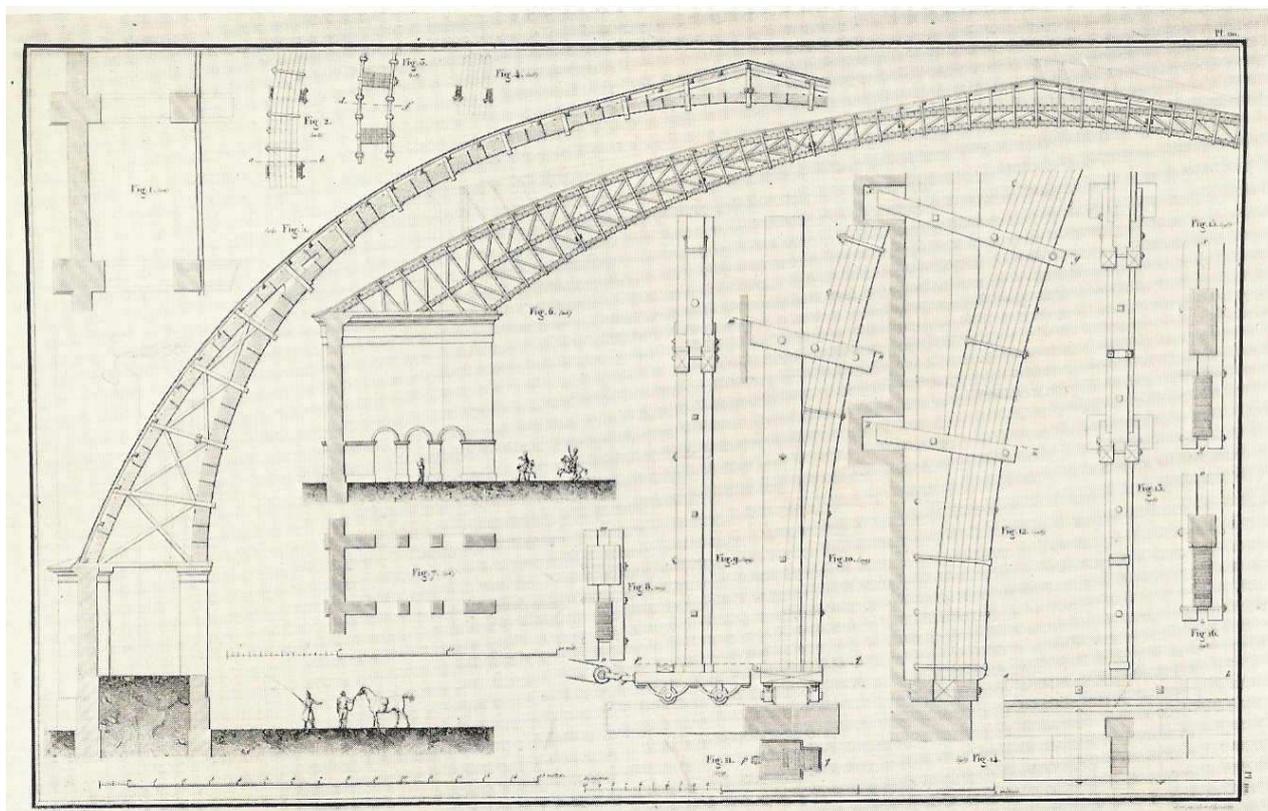


Figure 14 Projet d'une charpente de 100 m de portée, publié par le colonel Emy dans son traité de charpente. (Extrait page 490, tome 1.9, encyclopédie de métiers, la construction et la charpente en bois)

1.3.4 Les structures Ardant

En 1840, le capitaine Ardant propose un nouveau type de charpente à grande portée et rédige un ouvrage intitulé « Etudes théoriques et expérimentales sur l'établissement des charpentes à grande portée ». Ces travaux se concentrent essentiellement sur la détermination des réactions horizontales aux appuis, la déformation des faitages et le dimensionnement de l'équarrissage des structures de Delorme et Emy.

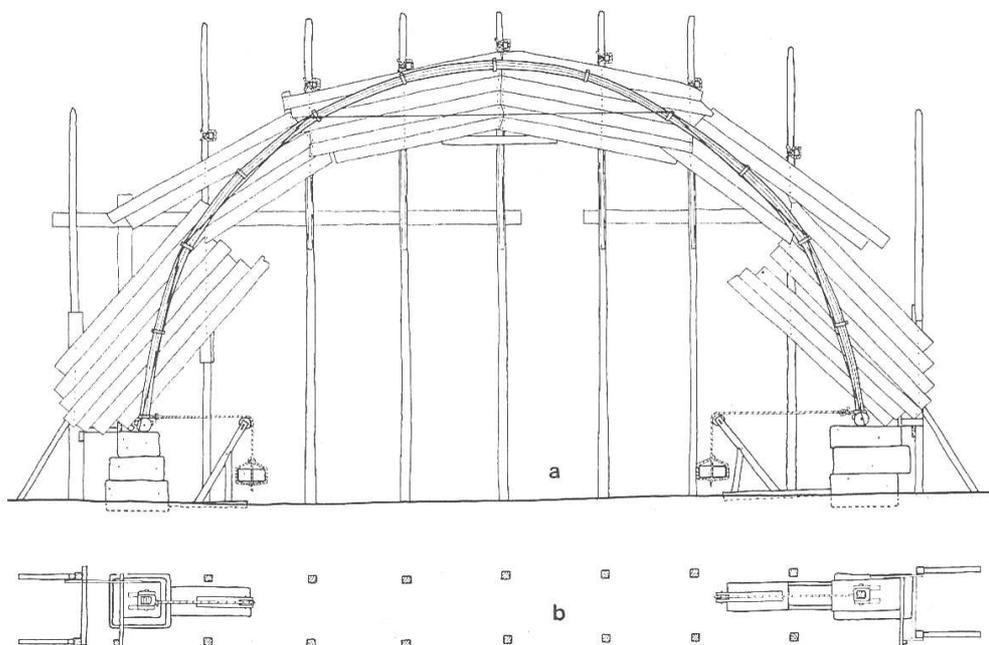


Figure 15 Appareil utilisé par le capitaine ardant pour connaître la résistance des fermes.
(Extrait page 534, tome 1.10, encyclopédie de métiers, la construction et la charpente en bois)
a. appareil vu de face et pourvu d'un arc en planches pliées
b. appareil vu de dessus

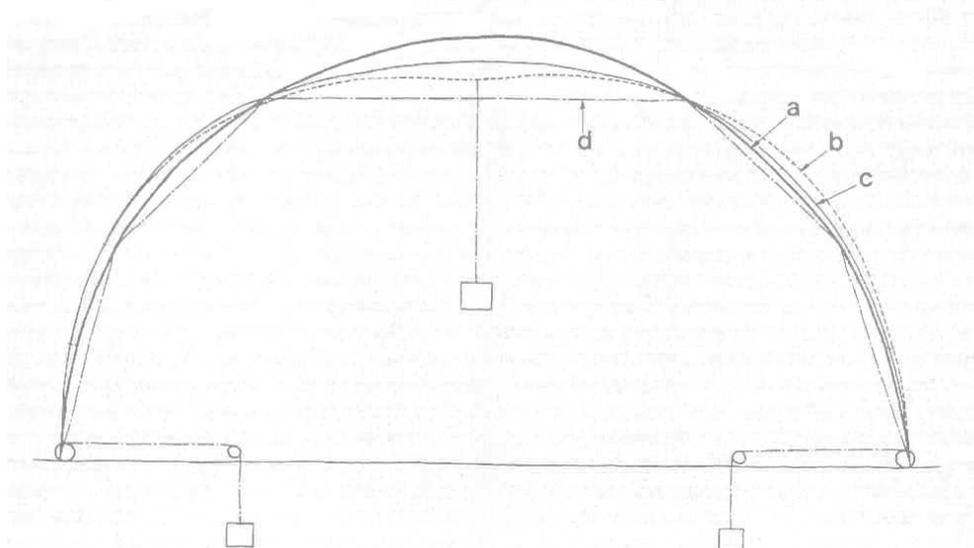


Figure 16 Graphique résultant de l'expérience sur un arc constitué de planches pliées, au sommet duquel une charge est suspendue.
(Extrait page 534, tome 1.10, encyclopédie des métiers, la construction et la charpente en bois)
a. courbe de l'arc avant chargement
b. courbe de l'arc au moment du chargement
c. courbe conservée par l'arc après que la charge ait été ôtée
d. polygone ayant servi à relever les différentes courbes.

INTRODUCTION

Les améliorations qu'il recommande d'apporter à la fabrication des arcs de planches pliées sont significatives : « Ces arcs doivent être le plus raide possible car leur flexion est une des causes de la destruction des édifices. Les lames employées doivent être les plus longues et les plus épaisses possible. Il convient d'éviter les joints entre deux lames consécutives, sur les reins en extrados ou au sommet en intrados. Il y a lieu d'augmenter le nombre des lames au point de la plus grande flexion qui se produit au tiers d'un demi arc à partir du pied ».

A propos de ces arcs, les rédacteurs de l'encyclopédie des métiers remarquent : « il est à regretter que l'auteur se soit arrêté à ce niveau dans ces recherches, car il aurait pu trouver combien de planches étaient réellement nécessaires pour augmenter la résistance de leurs reins de manière satisfaisante et par quel moyen (des clous par exemple) il était possible de réduire sensiblement le glissement des planches les unes sur les autres ».

Ce dernier aspect est d'autant plus regrettable que nous savons aujourd'hui quel développement a connu le bois lamellé-collé, mais aussi parce que l'auteur précisait : « Quand un arc ne peut être composé d'un seul morceau, tous les efforts du constructeur doivent tendre à unir les parties de manière que l'ensemble diffère aussi peu que possible d'un solide homogène continu. »

Ardant met alors au point un système nouveau, à mi chemin entre la charpente d'Emy et une structure polygonale, générant les mêmes efforts horizontaux aux appuis, consommant plus de bois, mais plus rigide.

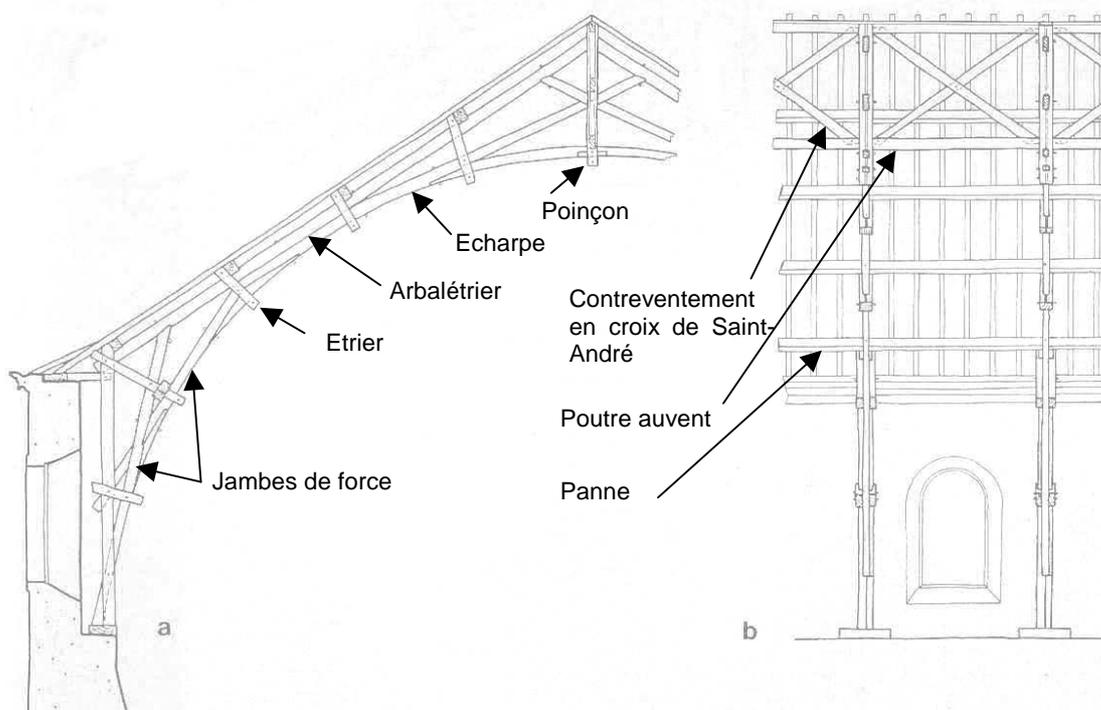


Figure 17 Charpente Ardant du manège de Pont-à-Mousson.

(Extrait page 538, tome 1.10, encyclopédie des métiers, la construction et la charpente en bois)

Par des propos manquant souvent d'objectivité, il parvient à réduire considérablement l'intérêt du système d'Emy pour mettre en avant le sien, recommandé d'emploi dans la circulaire du 20 septembre 1845.

L'arc lamellé est temporairement abandonné à partir de cette date. Viendront ensuite les charpentes Polonceau (sous-tendues, 1842), puis les charpentes triangulées (où le métal prend une place plus importante, 1845). Lorsque le capitaine Fabré publie en 1847 un mémoire sur les charpentes « funiculaires » consommant, deux fois moins de bois que la charpente Ardant pour une même portée, une circulaire, par laquelle le service des fortifications propose de renoncer à tout système de charpente uniquement construit en bois, est adoptée par le ministère de la guerre le 10 juin 1849.

Cette directive est probablement due aux critiques du capitaine Ardant à propos du système du colonel Emy, et des déformations importantes relevées sur deux ou trois de ses propres bâtiments. Une intéressante tentative française de charpente triangulée en bois se voyait condamnée au profit des fermes mixtes.

Il faudra attendre 1870, pour que le principe de l'arc à 3 articulations soit mis au point, et plus tard pour que le lamellé-collé prenne au début du 20^{ème} siècle un succès de grande ampleur.

1.3.5 Applications plus récentes du lamellé

Depuis, le lamellé cloué boulonné a été utilisé dans quelques cas de construction.

Au parc Eurodisney de Paris, des poteaux porteurs ont été réalisés en lamellé boulonné. La section des planches utilisées était de 60x180mm en 3 couches. Les poteaux de 6m de longueur ont été mis en place en 1997 puis remplacés en 2001 par un autre bâtiment. Aucune instabilité (telle que le flambement) n'a été observée durant cette période.

A Cologne en Allemagne, un hall de 17m de portée a été réalisé en 1998, à l'aide de poutre lamellé boulonné, à titre expérimental. Une dérogation spécifique avait été délivrée par les organismes de contrôle, mais en 2000, la structure a été renforcée par des poutres en lamellé collé. Des différences de flèches importantes avaient induit dans la toiture des problèmes d'étanchéité. L'infiltration des eaux de pluie risquait par ailleurs d'accélérer le fluage et la dégradation de l'ouvrage.

La validation du produit était non pas basée sur le calcul mais par des essais mécaniques.

Une maquette de poutre lamellée boulonnée a été réalisée à l'échelle 1/5^{ème} dans un premier temps pour expliquer le sujet de recherche et mettre en avant ses perspectives.

La poutre est constituée de 11 lames de section 30x5 mm avec différentes essences (Angélique, Saint-Martin rouge, Gonfolo, Manil, Grignon et Wacapou). Chaque lame comprend au moins un joint de discontinuité (lame mise bout en bout) avec une répartition précise. Les discontinuités de deux lames consécutives sont espacées d'au moins 15 cm, sans apparaître deux fois dans la section transversale de la poutre.

Les boulons sont des tiges filetées de 2 mm de diamètre, qui ont nécessité un pré perçage de 2,5 mm de diamètre pour leur mise en place. Ils sont disposés en quinconce sur deux rangées situées à 8 mm des bords tous les 10 cm (sur une même rangée). Les écrous sont serrés à un couple suffisant pour presser les lames les unes contre les autres sans qu'ils n'endommagent les lames extérieures (extrados et intrados).

Immédiatement après sa réalisation, la poutre présente des déformations instantanées et résiduelles très importantes sous de faibles chargements. Sous un chargement en flexion 4 points équidistants de 300 N la flèche est de 35 mm qui est la flèche maximale admissible dans la construction. Collée, la flèche admissible de la poutre ne serait apparue au pire qu'avec un chargement de 8200 N (pour un module d'élasticité de 12000 MPa).

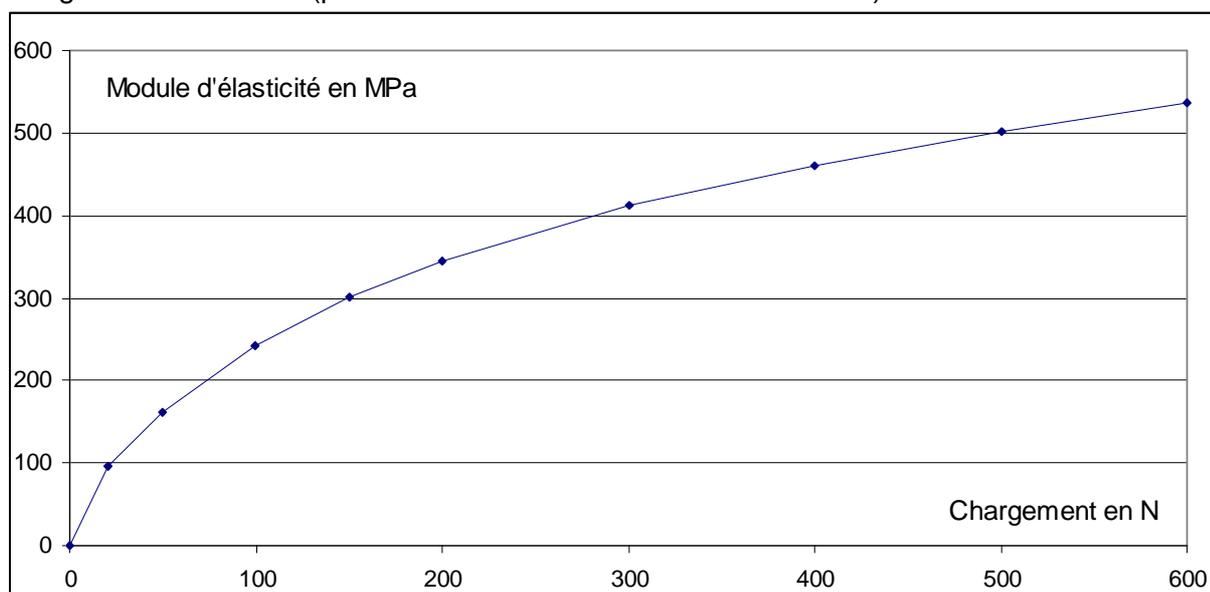


Figure 18 Evolution du module d'élasticité de la maquette en fonction du chargement de la flexion 4 points

2 Etude des comportements individuels

Pour répondre aux attentes des professionnels de la charpente (qui utilisent peu d'essence) et pour limiter le champ d'étude, l'essence utilisée est exclusivement le gonfolo (*Qualea spp.*, *Ruizterania spp.*).

Cette partie présente la caractérisation des différents paramètres du bois intervenant dans le comportement global de la poutre lamellée clouée boulonnée en flexion.

Il convient en premier lieu de définir les propriétés mécaniques des lames et leur plage de variation dans l'ensemble de sa masse (variabilité). Ensuite, il est nécessaire de caractériser la liaison et le contact des lames, c'est-à-dire le comportement mécanique des assemblages cloués en cisaillement et le frottement bois sur bois.

2.1 Caractéristiques du gonfolo

2.1.1 *Données générales*

La dénomination internationale (nom pilote) du gonfolo est : Mandioqueira, et les noms botaniques sont : *Qualea spp.* ; *Ruizterania spp.* [Bois des DOM-TOM, 1994]

Le gonfolo appartient à la famille des Vochysiacees. Sous le nom vernaculaire de gonfolo, sont principalement commercialisés : le *Qualea rosea* (gonfolo rose) et le *Ruizterania albiflora* (gonfolo gris). Ces deux bois, à l'exception de la couleur, présentent de nombreuses analogies tant en ce qui concerne leur structure anatomique que leurs propriétés physiques et mécaniques. Le gonfolo gris présente cependant une densité moyenne un peu plus importante. (Ce qui n'est pas vérifié dans cette étude).

L'apparition du gonfolo sur le marché est assez récente. Son introduction commerciale est due au CTFT (CIRAD-Forêt) qui dans les années soixante-dix a trouvé dans cette essence suffisamment d'avantages pour répondre aux attentes des différents intervenants commerciaux.

Les gonfolo sont de grands arbres de l'étage dominant, dont le fut est droit et cylindrique (de 20 m de longueur en moyenne), et présente un léger empatement à la base. D'après les inventaires, le volume brut des arbres de plus de 40 cm de diamètre est de l'ordre de 2 m³/ha, ce qui permet d'envisager des courants commerciaux réguliers.

2.1.2 *Caractéristiques physiques et mécaniques*

L'aubier est bien différencié et de couleur blanc grisâtre. Le bois parfait est soit rose brun (gonfolo rose) soit brun clair (gonfolo gris). Le débit peut présenter des colorations verdâtres appelées veines vertes. Le fil est généralement droit.

Le gonfolo est de densité moyenne (0,7 ; mi-lourd) et contient peu d'extractible et de cendre (0,01 à 0,05% de silice), ce qui facilite en général le sciage.

Le séchage est rapide et nécessite quelques précautions afin d'éviter les fentes et les gerces.

Les essais de durabilité effectués au CIRAD qualifient la résistance du gonfolo, vis-à-vis des champignons, assez bonne ; vis-à-vis des termites (variable mais) assez faible ; et vis-à-vis des insectes de bois sec très bonne. Compte tenu de ces propriétés et des classes de risque en Guyane, le gonfolo peut au mieux être utilisé en classe de risque 3A (bois soumis à des alternances rapides d'humidification, pas de stagnation d'eau et séchage complet avant réhumidification) après traitement.

Les assemblages par clous et vis s'effectuent facilement. La tenue à l'arrachement est assez bonne. Les connecteurs métalliques s'enfoncent difficilement. Le gonfolo se colle très bien et donne des plans de collage très résistants.

Les essais physiques et mécaniques ont été réalisés par le CIRAD-Forêt sur le gonfalo sur 9 essais (dont 8 complets). Un essai abouti à une donnée moyenne obtenue avec 10 éprouvettes issues d'un même arbre (séchées à 12 % d'humidité).

Densité moyenne : 0,70	(Mini : 0,65 ; Maxi : 0,75)
Dureté moyenne (Chalais Meudon) : 3,9	(Mini : 2,3 ; Maxi : 5)
Retrait volumique (%/%) : 0,58	(Mini : 0,33 ; Maxi : 0,8)
Contrainte de rupture en compression axiale (MPa) : 68	(Mini : 50 ; Maxi : 84)
Contrainte de rupture en flexion statique (MPa) : 163	(Mini : 105 ; Maxi : 210)
Module d'élasticité en flexion statique (MPa) : 15500	(Mini : 11500 ; Maxi : 18000)

Les essais de compression et de flexion sont réalisés sur des éprouvettes de section 2x2 cm.

2.2 Caractérisation du matériau

La prise en compte de l'orthotropie du bois pour le calcul par éléments finis nécessite une caractérisation complète des propriétés élastiques du matériau.

L'estimation des constantes élastiques peut être effectuée en fonction de la densité grâce aux modèles proposés dans la littérature « Mécanique du matériau bois et composites » [Guitard, 1985]. Les propriétés forfaitaires proposées par Daniel Guitard correspondent au modèle du « feuillu standard ». Les modules E_R et E_T ; et G_{LR} et G_{LT} , sont déterminés en fonction de la densité par des relations « puissance » : $E = E_{(\rho=0,65)} \times \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{\text{Puissance } \alpha}$

	Données Guitard $E_{(\rho=0,65)}$	Puissance α
$\rho \times 1000$	650	
E_L (MPa)	14400	1,03
E_R (MPa)	1810	1,30
E_T (MPa)	1030	1,74
G_{TL} (MPa)	971	1,26
G_{RL} (MPa)	1260	1,14
G_{RT} (MPa)	366	1,74
ν_{LR}	0,39	-0,11
ν_{LT}	0,46	-1,36
ν_{RL}	0,048	0,16
ν_{TL}	0,033	-0,65
ν_{RT}	0,68	1,11
ν_{TR}	0,38	1,55

Tableau 3 Propriétés élastiques du « feuillu standard » en fonction de la densité

Pour différentes essences de bois, Daniel Guitard propose des modules d'élasticités spécifiques avec leur densité moyenne. Cependant le gonfalo n'a pas été traité.

Les propriétés élastiques du gonfalo ont été mesurées sur 3 échantillons de gonfalo gris (*Ruizterania albiflora*) par Pierre Bérard à l'aide du goniomètre. La méthode et les résultats sont décrits dans les paragraphes suivants.

Les bois tropicaux présentent de plus grandes difficultés à différencier visuellement le quartier de la dosse (respectivement Radiale et Tangentielle) ; Les cernes sont peu visibles. Dans le milieu de la construction cette distinction est très souvent ignorée.

Par conséquent, à travers ces hypothèses et pour l'ensemble de ces travaux, les propriétés radiales et tangentielles sont prises égales entre elles. On note : TR, la direction transversale regroupant R et T, pour laquelle sont définies des propriétés élastiques moyennes.

Le module d'élasticité en flexion est moins bien corrélé à la densité du fait de la forte dépendance à la pente de fil. De ce fait, chaque élément étudié est caractérisé par 2 paramètres essentielles : la **densité** et le **module d'élasticité en flexion**. (L'humidité est le troisième paramètre mesuré pour information.)

La densité est aisément déterminée par le rapport de la masse totale des éléments sur leur volume, avec une bonne précision.

2.2.1 Propriétés transverses

Une technique de mesure directe, basée sur l'étude de propagation d'onde ultrasonore, est utilisée pour mesurer tous les paramètres nécessaires afin de déterminer le comportement élastique du bois. Cette méthode a été l'objet de travaux (Bérard, 2003) permettant de déterminer les caractéristiques du gonfalo à partir de 3 échantillons prélevés sur une planche destinée à l'étude du lamellé cloué boulonné et parfaitement débitée sur quartier.

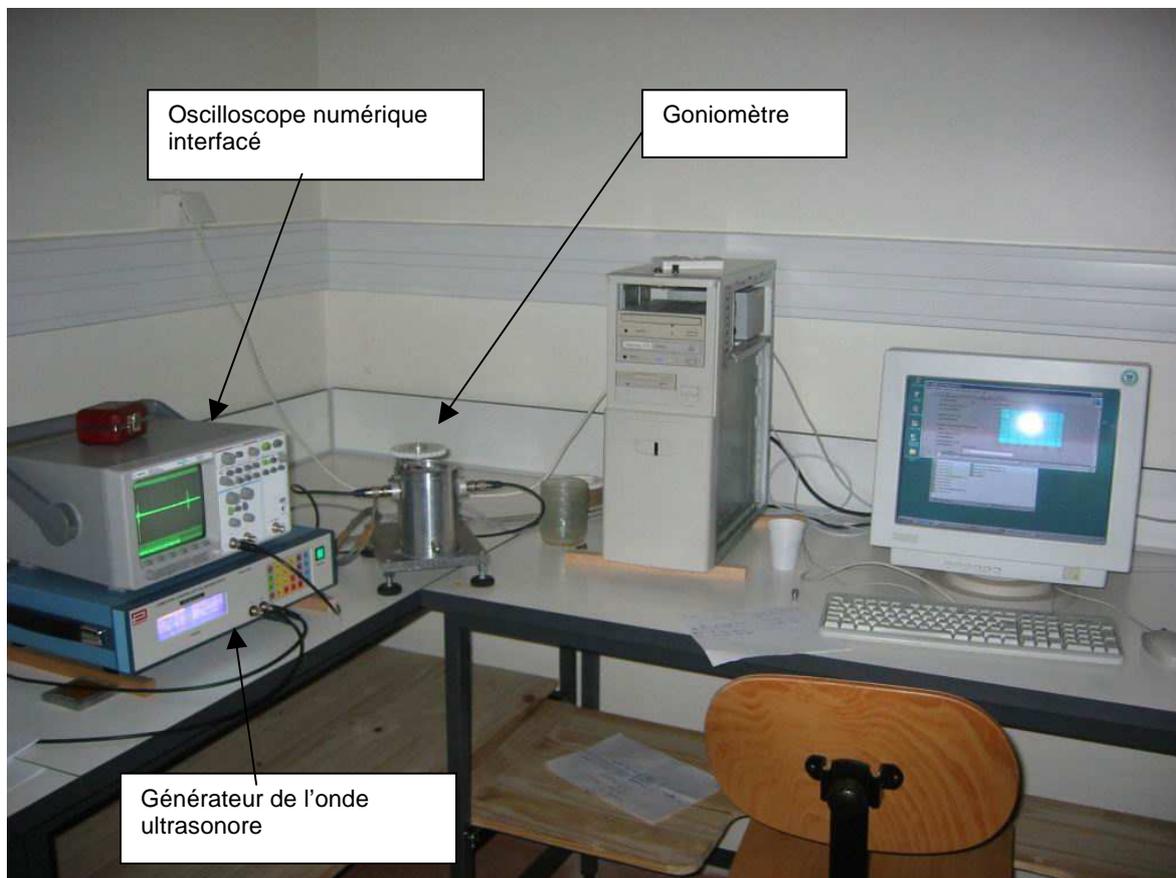


Figure 19 Ensemble du montage de goniométrie

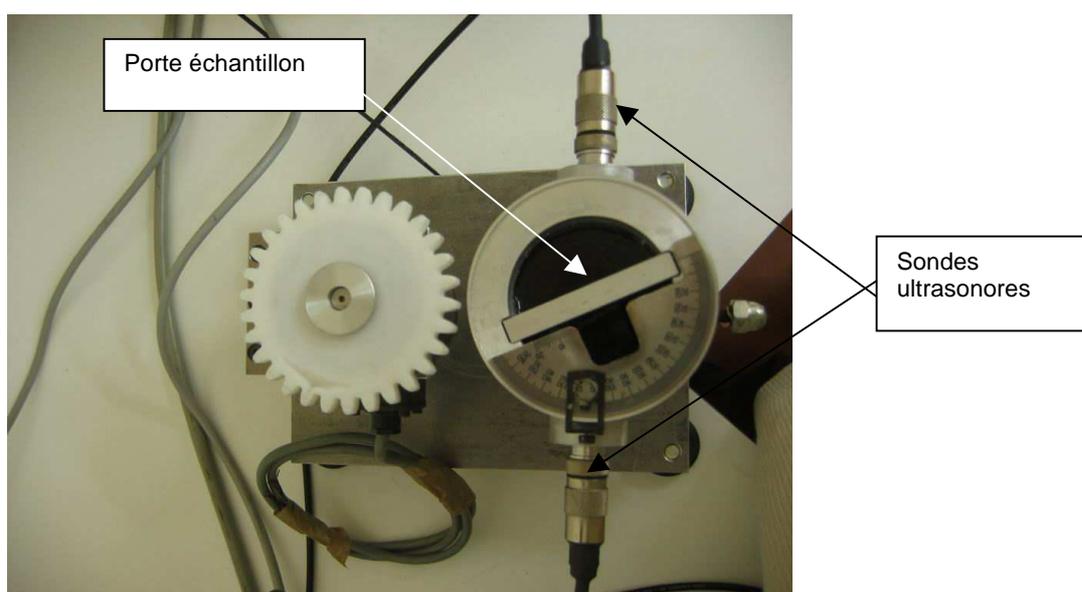


Figure 20 Cuve du goniomètre et sondes (vue de dessus)

Les 3 échantillons ont une densité moyenne de 0,66 avec un écart type faible (inférieur à 1%). Les moyennes des résultats sont présentées dans le tableau suivant. Pour les comparer avec les estimations de Daniel Guitard, ces dernières sont ramenées à une densité de 0,66.

En comparaison des différentes méthodes les écarts sont les suivants :

	Données Guitard $E_{(\rho=0,66)}$	Données Bérard $E_{(\rho=0,66)}$	Caractéristiques pour le calcul $R = T = T_R$	Puissance α pour le calcul	Ecart max
ρ	0,66	0,66	mesuré		
E_L	14628	14590	mesuré		
E_R	1846	1920	1600	1,5	-20%
E_T	1058	1285	1600	1,5	+20%
G_{TL}	990	986	1150	1,2	+13%
G_{RL}	1282	1303	1150	1,2	-13%
G_{RT}	376	374	380	1,7	-2%
ν_{LR}	0,39	0,364	0,38	1	+4%
ν_{LT}	0,45	0,394	0,38	1	-4%
ν_{RL}	0,048	0,048	0,042	1	-28%
ν_{TL}	0,033	0,035	0,042	1	+20%
ν_{RT}	0,69	0,625	0,52	1	-20%
ν_{TR}	0,39	0,419	0,52	1	+20%

Tableau 4 Données du Gonfolo gris (*Ruiezerania albiflora*)

Les mesures de Pierre Bérard sur du gonfolo et les données estimées par Daniel Guitard pour un bois feuillu standard sont proches. Toutefois une différence de 19% sur le module E_T , et une différence de 4% sur le module E_R sont à noter. Pour le reste les modules présentent une différence inférieure à 2 %.

Dans l'hypothèse où les directions radiales et tangentielles sont indifférenciées, on définit des valeurs des caractéristiques E_{Tr} ; G_{TrL} et G_{RT} évoluant avec la densité par des relations « puissance » de la même façon que le propose Daniel Guitard. (Tr : transversale)

$$E = E_{(\rho=0,65)} \times \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{\text{Puissance } \alpha}$$

Les coefficients de Poisson ont une influence négligeable sur le comportement en flexion des poutres et sont pris invariants par simplification.

Globalement pour une densité de 0,66, l'écart entre modèle et mesure sur E_R et E_T est d'environ 20% ; l'écart sur les modules de coulomb est d'au plus 13 % et sur les coefficients nu inférieur à 30%.

Finalement en fonction de ρ , on obtient :

$$E_{Tr} = 1600 \times \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,5}$$

$$G_{TrL} = 1150 \times \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,2}$$

$$G_{RT} = 380 \times \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,7}$$

$$\nu_{LTr} = 0,38$$

$$\nu_{TrL} = 0,042$$

$$\nu_{TR} = 0,52$$

2.2.2 Essai de flexion 4 points

Le module de flexion E est normalement déterminé par un essai non destructif de flexion 4 points, selon la norme NF B 51-008 et 016 (1987). Cet essai mécanique nécessite des éprouvettes de section $b \times h = 20 \times 20$ mm et de longueur $l = 360$ mm. La disposition des rouleaux (cf. figure suivante) permet de bénéficier d'une plage centrale exempte d'efforts tranchant dans laquelle on mesure la courbure de l'éprouvette.

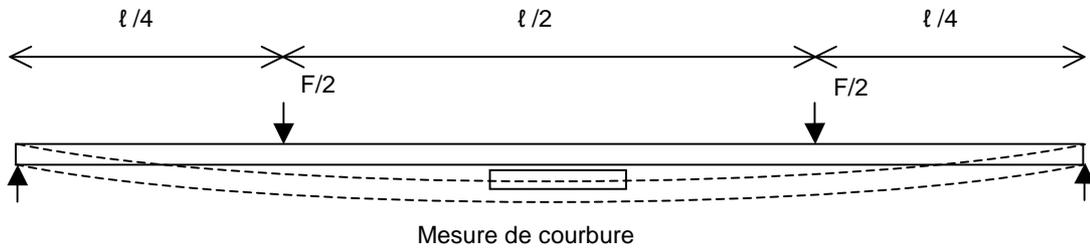


Figure 21 Schéma de la flexion 4 points

Respecter ce protocole présente cependant l'inconvénient de ne pas pouvoir superposer les éprouvettes et de les clouer (largeur insuffisante).

De ce fait, l'essai de flexion est modifié pour permettre de caractériser dans des conditions proches le matériau bois et l'élément composite (2 lames clouées).

Par ailleurs, la zone centrale n'est pas la plus défavorable. L'effort tranchant induit du cisaillement supplémentaire dans les assemblages de type « clou ». Cependant, conserver une zone (même courte) où le moment de flexion est constant, permet de mesurer la courbure et d'utiliser les mêmes formules de calcul pour les lames simples ou superposées.

Le matériel du CIRAD étant adapté et réglé pour des essais non destructifs en flexion 4 points équidistants, le module de flexion E est déterminé selon cette configuration. Cette disposition permet par ailleurs d'utiliser plusieurs capteurs de déplacements régulièrement espacés pour mieux comprendre le comportement du composite à deux lames en dehors de la zone où le moment de flexion est constant.

La vitesse de déplacement de la traverse de chargement est de 3 mm/min.

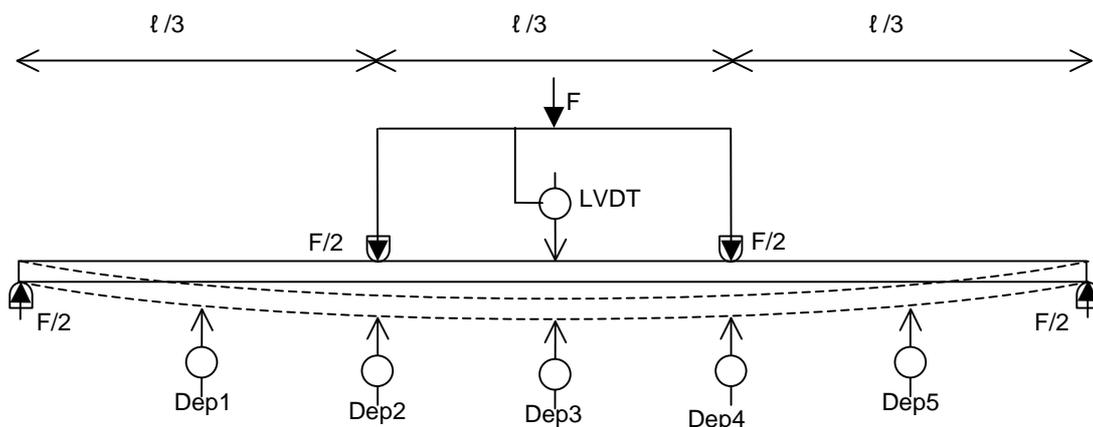


Figure 22 Disposition des capteurs de déplacements

En négligeant les efforts tranchants, la résolution de l'équation $M = E I_z \ddot{y}$, issue de la théorie des poutres, conduit au module d'Young par les formules suivantes :

$E_3 = \frac{13 \cdot (\ell/h)^3}{54 \cdot b \cdot \text{invpente } 3}$ où invpente 3 est le déplacement du point milieu (en $\frac{\ell}{2}$) par unité de force ;

$E_2 = \frac{5 \cdot (\ell/h)^3}{27 \cdot b \cdot \text{invpente } 2}$ où invpente 2 est le déplacement des points situés sous les appuis intérieurs (en $\frac{\ell}{3}$) par unité de force ;

$E_1 = \frac{23 \cdot (\ell/h)^3}{216 \cdot b \cdot \text{invpente } 1}$ où invpente 1 est le déplacement des points situés entre les appuis intérieurs et les appuis extérieurs (en $\frac{\ell}{6}$) par unité de force ;

Avec invpente $i = (\text{Dep } i_{\text{moyen}} / F)$

$\text{Dep } 1_{\text{moyen}} = (\text{Dep } 1 + \text{Dep } 5)/2$

$\text{Dep } 2_{\text{moyen}} = (\text{Dep } 2 + \text{Dep } 4)/2$

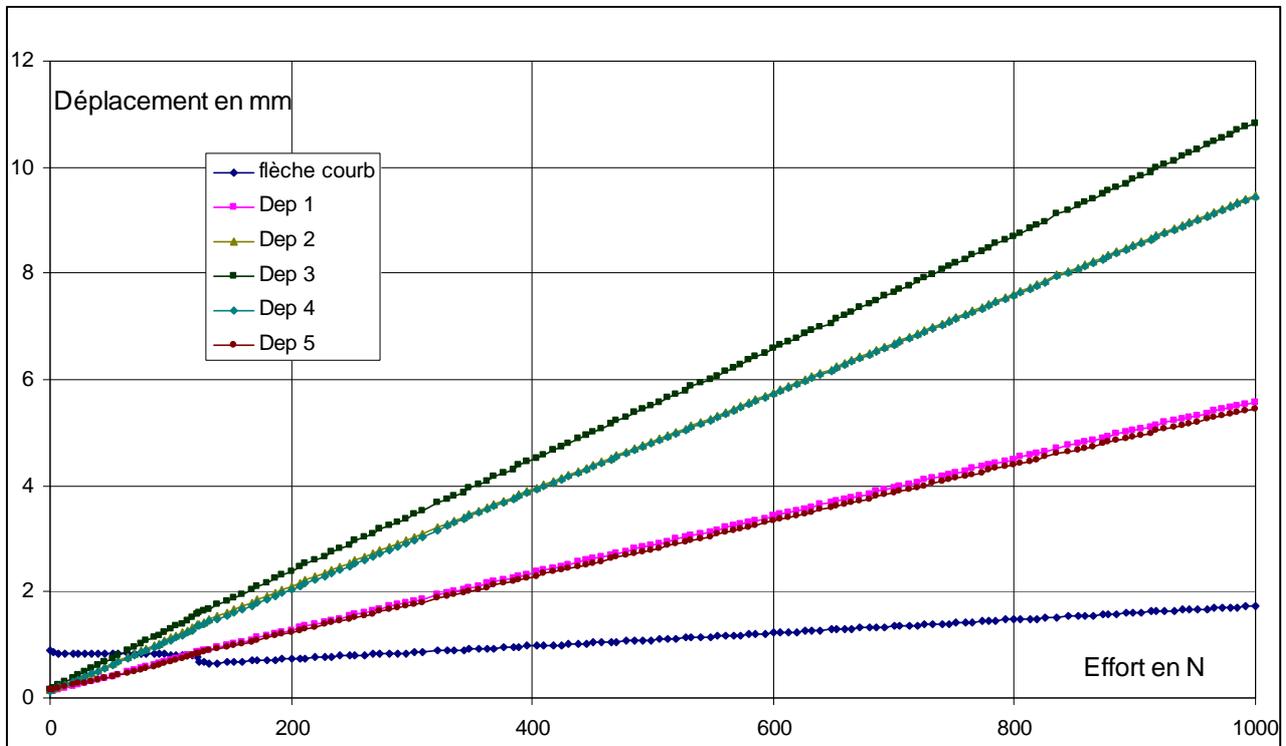


Figure 23 Graphique des courbes force - déplacement sur un essai en flexion 4 points

Par symétrie : $\text{Dep } 1 \approx \text{Dep } 5$ et $\text{Dep } 2 \approx \text{Dep } 4$

La dimension : flèche courb est la flèche de l'arc situé entre les appuis intérieurs soit :

$$\text{flèche courb} \approx \text{Dep } 3 - \frac{\text{Dep } 2 + \text{Dep } 4}{2}$$

Remarque : cette dernière donnée n'est pas étalonnée à zéro au début de l'essai (seule la pente est intéressante) ; et une erreur de manipulation en début d'essai apparaît également sur cet appareil de mesure (sans conséquence).

ETUDE DES COMPORTEMENTS INDIVIDUELS

Les essais ont été menés sur 42 éprouvettes en gonfolo (*Qualea sp.*).
(Longueur $l = 1100$ mm, largeur $b = 50$ mm et retombée $h = 27$ mm).

Les éprouvettes ont été conditionnées dans une salle climatisée jusqu'à la stabilisation de l'humidité à 10%. Les dimensions sont inchangées à 5 dixièmes de millimètre près.

N° éprouvette	densité	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	Emoyen	écartype
1	0,743	19097	19228	19253	19193	69
2	0,712	17047	17056	17152	17085	47
3	0,731	14234	13932	13842	14003	168
4	0,710	16469	16617	16644	16577	77
5	0,661	14297	14430	14486	14404	79
6	0,759	17763	17927	17773	17821	75
7	0,613	14398	14501	14567	14489	70
8	0,668	13914	13778	13812	13835	58
9	0,772	17757	17642	17488	17629	110
10	0,708	16761	16779	16820	16787	25
11	0,721	15636	15425	15743	15601	132
12	0,681	13938	13797	13630	13788	126
13	0,723	18736	18892	18934	18854	85
14	0,612	13793	13793	13734	13773	28
15	0,670	14755	14809	14863	14809	44
16	0,691	14891	14756	14616	14754	112
17	0,678	13894	13903	13906	13901	5
18	0,662	13333	13384	13442	13386	45
19	0,743	18148	18302	18352	18267	87
20	0,660	14947	15004	15070	15007	50
21	0,699	14784	14785	14824	14798	19
22	0,692	14028	13941	13953	13974	38
23	0,777	19062	19143	19107	19104	33
24	0,668	12971	13029	13049	13017	33
25	0,659	12730	12712	12734	12725	9
26	0,708	14274	14152	14159	14195	56
27	0,702	16627	16799	16897	16774	112
28	0,698	15574	15633	15627	15611	27
29	0,679	14448	14431	14433	14438	8
30	0,716	16457	16362	16390	16403	40
31	0,686	12697	12694	12700	12697	3
32	0,717	16032	15996	15893	15974	59
33	0,682	14189	14117	14084	14130	44
34	0,672	14890	14978	14991	14953	45
35	0,736	17464	17535	17569	17523	44
36	0,751	17781	17850	17925	17852	59
37	0,664	15345	15406	15433	15395	37
38	0,674	13930	13835	13864	13877	40
39	0,682	15605	15581	15608	15598	12
40	0,699	13245	13171	13195	13204	31
41	0,692	16408	16331	16282	16340	52
42	0,705	14903	14517	14295	14572	251
Moyenne	0,697	15411	15404	15408	15408	61

Tableau 5 Modules d'élasticité moyens des éprouvettes en MPa.

Le module d'élasticité calculé (en moyenne sur E1, E2 et E3) est de 15 400 MPa, avec un écartype moyen de 61 MPa.

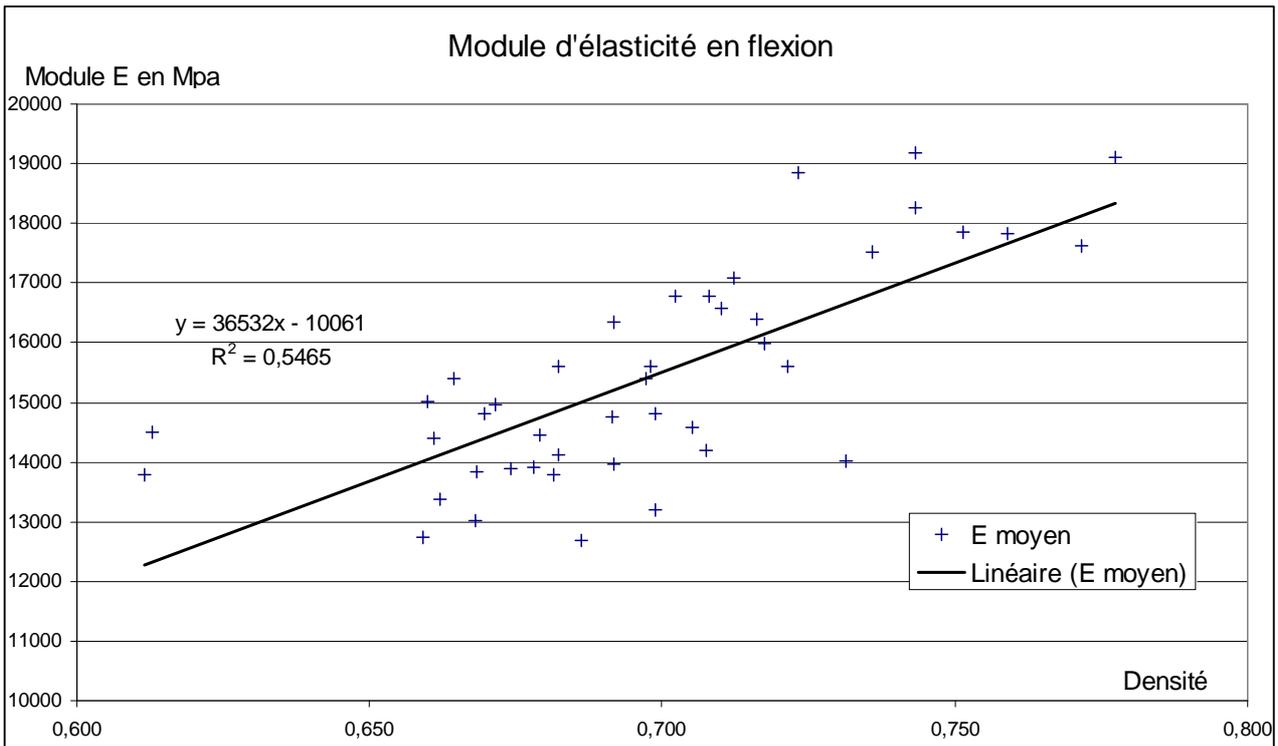


Figure 24 Relation module d'élasticité densité

2.2.3 Affinement des résultats

Ainsi les mesures et estimations effectuées pour convenir d'un matériau proche du gonfalo pour lequel les propriétés radiales et tangentielles (transverses) sont identiques, conduisent à un matériau type avec :

EL = mesuré MPa

ρ = mesuré

$$E_{Tr} = 1600x \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,5}$$

$$G_{LTr} = 1150x \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,2}$$

$$G_{RT} = 380x \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,7}$$

$$v_{LTr} = 0,38$$

$$v_{TiL} = 0,042$$

$$v_{RT} = v_{TR} = 0,52$$

Remarque : Dans l'hypothèse où les directions radiales et tangentielles ne sont pas différenciées, il convient de prendre $v_{LTr} = v_{LR} = v_{LT}$; $v_{TiL} = v_{RL} = v_{TL}$; $v_{RT} = v_{TR}$.

Les écarts entre les valeurs retenues et mesurées sont importants, mais restent sans véritable incidence sur la précision des résultats par le calcul sous une sollicitation en flexion [Vincent, 2003]

Le calcul aboutissant au module d'élasticité par la théorie des poutres négligeant les efforts tranchants nécessite l'hypothèse du rapport $l/h \gg 20$ (longueur sur retombée). Les essais menés sur les éprouvettes en gonfalo (1100 x 50 x 27 mm), présente un rapport $l/h = 33$. L'approximation des propriétés transverses permet de prendre en compte les efforts tranchants de la flexion 4 points.

Le calcul conduisant au module d'Young prenant en compte le cisaillement a déjà été traité [DEA Brancheriau, 1997].

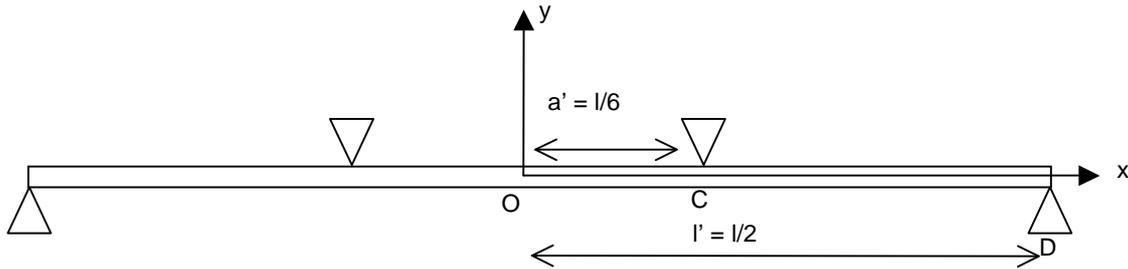


Figure 25 Paramètres pris en compte pour le calcul

Le déplacement U_y est de la forme :

$$U_y = \frac{a}{6} x^3 + \frac{b}{2} x^2 + c x + d + \frac{1}{2} (v_{xy} y^2 - v_{xz} z^2) (a x + b) - q z$$

Avec l'équation de la déformation de l'axe neutre $f(x) = a x^3 + b x^2 + c x + d$

Entre O et C :

$$U_{y1} = \frac{P (a' - l')}{4 E_x I_{Gz}} \left(l'^2 - x^2 - \frac{(l' - a')^2}{3} + v_{xy} \left[\frac{I_{Gz}}{S} - y^2 \right] - v_{xz} \left[\frac{2 I_{Gy}}{S} - z^2 \right] + \frac{2 E_x G_z}{I G_{yx} S} \right)$$

Entre C et D :

$$U_{y2} = \frac{P (l' - x)}{4 E_x I_{Gz}} \left(a'^2 - l'^2 - \frac{(l' - x)^2}{3} - v_{xy} \left[\frac{I_{Gz}}{S} - y^2 \right] + v_{xz} \left[\frac{2 I_{Gy}}{S} - z^2 \right] - \frac{2 E_x I_{Gz}}{G_{yx} S} \right)$$

Les déplacements mesurés étant

Entre O et C :

$$\text{Dep} (X_i) = - U_{y1} \left(X_i - \frac{l}{2}; - \frac{h}{2}; 0 \right)$$

Entre C et D :

$$\text{Dep} (X_i) = - U_{y2} \left(X_i - \frac{l}{2}; - \frac{h}{2}; 0 \right)$$

Remarque : Par symétrie $\text{Dep} (X_i) = \text{Dep} (l - X_i)$

$$E'_3 = \frac{\frac{23 \cdot l^2}{18} - v_{LTr} \cdot (h^2 + e^2)}{\frac{6 (\text{invpente } 3) \cdot e \cdot h^3}{l} - \frac{h^2}{G_{TrL}}}$$

$$\text{avec invpente } 3 = \frac{- U_{y1} \left(0; - \frac{h}{2}; 0 \right)}{P}$$

$$E'_2 = \frac{\frac{10 \cdot l^2}{9} - v_{LTr} \cdot (h^2 + e^2)}{\frac{6 (\text{invpente } 2) \cdot e \cdot h^3}{l} - \frac{h^2}{G_{TrL}}}$$

$$\text{avec invpente } 2 = \frac{- U_{y1} \left(\frac{l}{6}; - \frac{h}{2}; 0 \right)}{P}$$

$$E'_1 = \frac{\frac{25 \cdot l^2}{18} - v_{LTr} \cdot (h^2 + e^2)}{\frac{12 (\text{invpente } 1) \cdot e \cdot h^3}{l} - \frac{h^2}{G_{TrL}}}$$

$$\text{avec invpente } 1 = \frac{- U_{y2} \left(\frac{l}{3}; - \frac{h}{2}; 0 \right)}{P}$$

$$v_{LTr} = 0,38 ; \quad G_{LTr} = 1150 \text{ MPa.}$$

ETUDE DES COMPORTEMENTS INDIVIDUELS

N° éprouvette	E'1 (MPa)	E'2 (MPa)	E'3 (MPa)	N° éprouvette	E'1 (MPa)	E'2 (MPa)	E'3 (MPa)
1	19312	19479	19472	22	14138	14066	14062
2	17214	17248	17321	23	19278	19394	19324
3	14349	14059	13950	24	13065	13139	13145
4	16625	16801	16804	25	12821	12817	12825
5	14414	14568	14607	26	14390	14283	14273
6	17945	18141	17955	27	16787	16988	17063
7	14515	14637	14687	28	15711	15793	15766
8	14022	13900	13918	29	14568	14568	14552
9	17939	17849	17664	30	16612	16538	16544
10	16926	16969	16986	31	12785	12795	12789
11	15777	15582	15885	32	16180	16166	16039
12	14047	13920	13734	33	14302	14246	14196
13	18944	19136	19146	34	15016	15126	15119
14	13900	13916	13840	35	17642	17742	17750
15	14879	14953	14989	36	17966	18066	18114
16	15017	14897	14737	37	15477	15561	15567
17	14002	14027	14014	38	14037	13957	13970
18	13432	13499	13544	39	15740	15735	15742
19	18338	18525	18547	40	13341	13280	13290
20	15075	15153	15201	41	16563	16508	16434
21	14908	14929	14949	42	15026	14650	14407

Tableau 6 Modules d'élasticité moyens corrigés des éprouvettes en MPa.

Le module d'élasticité calculé (en moyenne sur E'1, E'2 et E'3) est alors de 15 550 MPa, l'écartype reste le même (62 MPa), le module est de 1% plus fort avec la prise en compte de l'effort tranchant.

La prise en compte de l'effort tranchant n'est pas significative et ne conduit pas à réduire les différences.

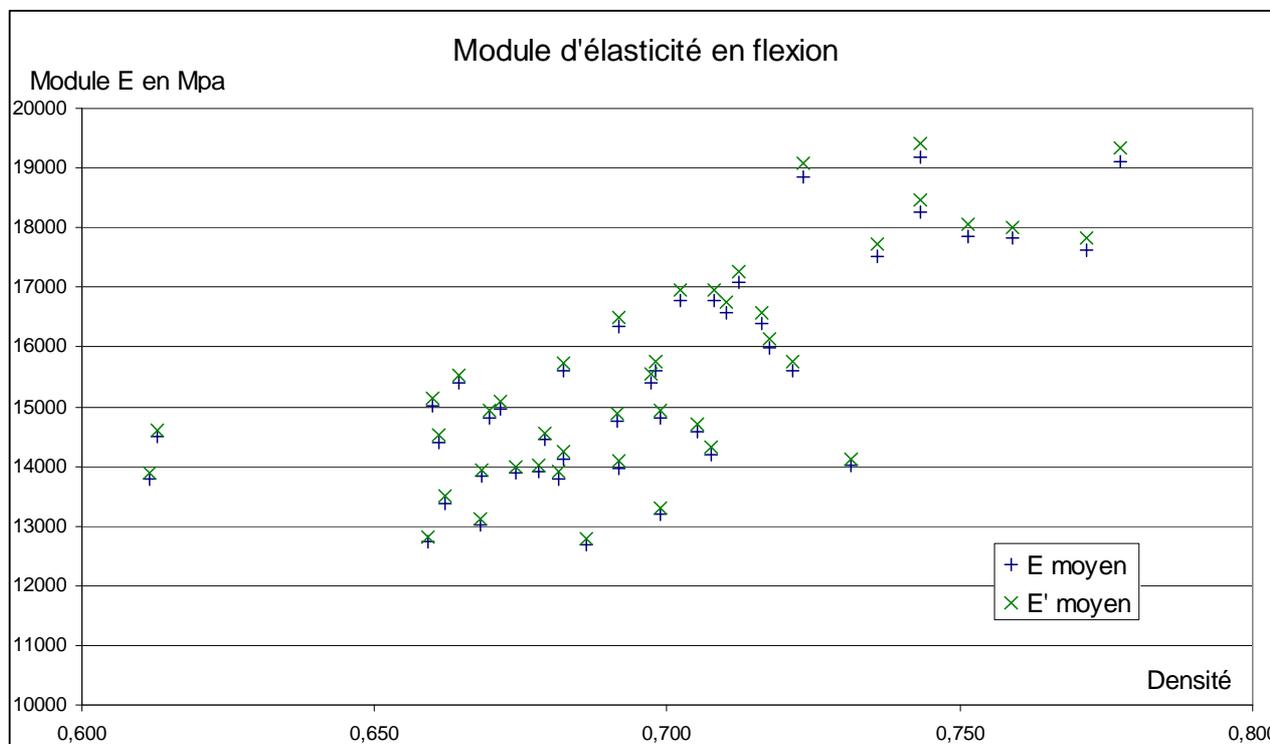


Figure 26 Module d'élasticité prise en compte de l'effort tranchant

2.3 Variabilité

La présentation des données bibliographiques (Cf. § 2.1) a montré une grande variabilité des propriétés mesurées du gonfalo (*Qualea rosea*).

Pour les premiers essais mécaniques, la variabilité des propriétés élastiques a été étudiée à partir de 20 éprouvettes. La densité moyenne est de 0,70 avec un écart type de 0,042 sur une plage de variation allant de 0,61 à 0,78. L'essai mécanique non destructif permettant de déterminer le module de flexion est réalisé 6 fois sur la même éprouvette selon différentes configurations (avec décalage et retournement) :

3 essais sur chaque face translaté de 8 cm par rapport à ses appuis.

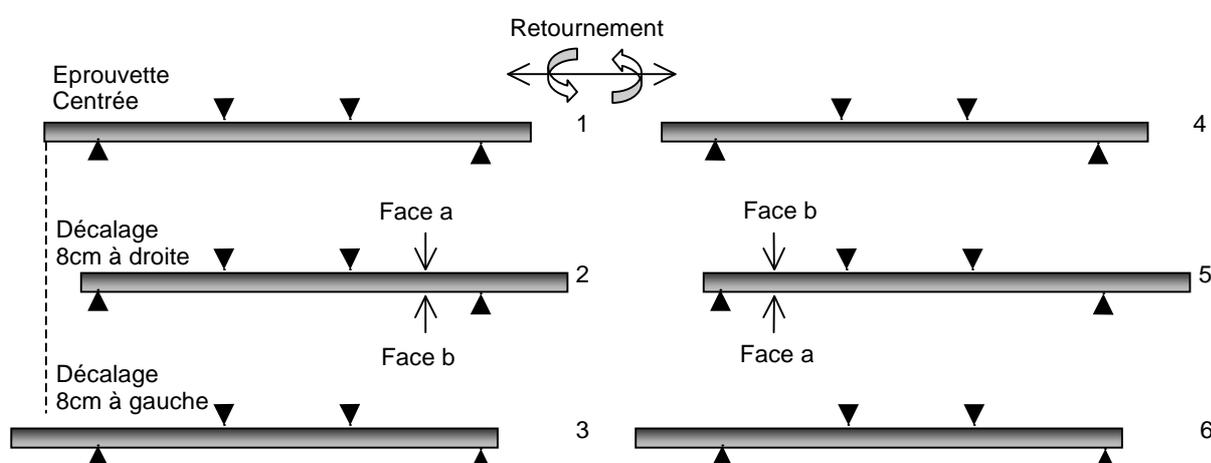


Figure 27 positions (6) de chaque éprouvette testée

Les éprouvettes ont été débitées en tolérant des nœuds de petite dimension (5 mm de diamètre maximal), sans aubier, sans fente ni défaut majeur (vermoulure, coup de vent, etc.).

La pente de fil et le contre-fil restent cependant assez marqués sur certaines éprouvettes de gonfalo (localement jusqu'à 30% d'inclinaison par rapport à l'axe de l'éprouvette).

Le module de flexion moyen sur l'ensemble des essais sur les 20 éprouvettes est de 20415 MPa avec un écartype moyen de 3970 MPa. Les valeurs s'échelonnent du simple au double entre 15000 MPa pour la valeur mini et 30 000 MPa pour la valeur maximale.

En décalant chaque éprouvette par rapport à ses appuis, l'écart maximum (sur les 3 essais par face et éprouvette) des mesures de E est de 5300 MPa. L'écart maximum moyen sur les 20 éprouvettes est de 940 MPa.

En retournant les éprouvettes, deux présentent une variation du module moyen de 3700 MPa. Pour le reste, la variation ne dépasse pas 2000 MPa. L'écart moyen sur l'ensemble des éprouvettes est de 970 MPa.

Le Centre Technique Forestier Tropical a établi certaines propriétés physiques et mécaniques par des essais. A partir de 33 arbres, 10 éprouvettes ont permis d'établir une valeur moyenne sur chaque arbre.

La densité moyenne de ces données est de 0,74 et l'écartype est de 0,097.

La moyenne des modules d'élasticité en flexion statique 3 points de ces données est de 14680 MPa et l'écartype est de 2850 MPa.

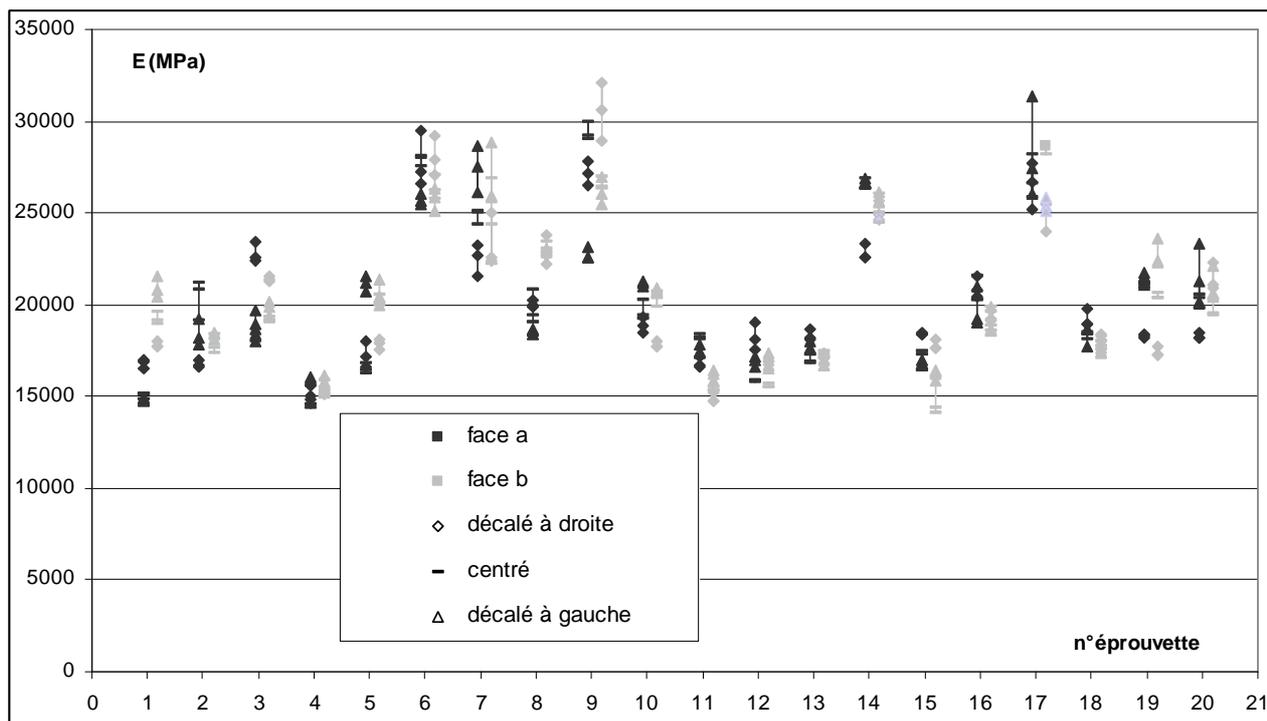


Figure 28 Variabilité de E dans chaque éprouvette

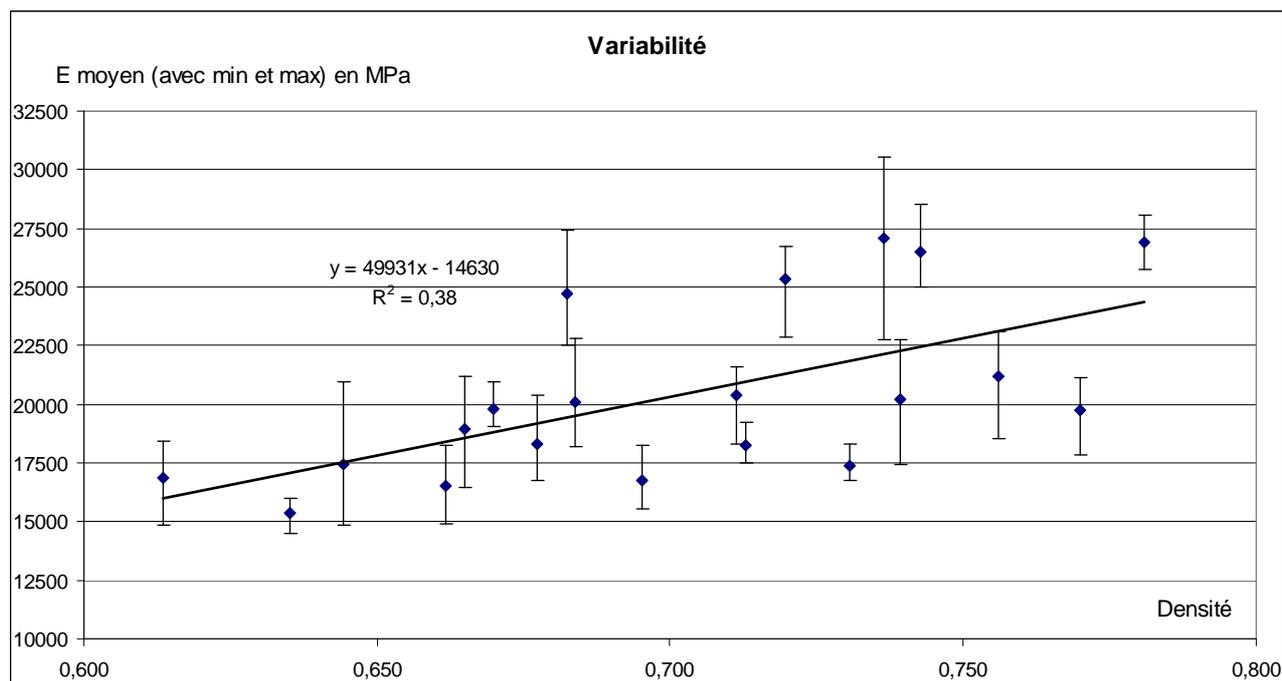


Figure 29 Relation module d'élasticité densité

Remarque : 5 éprouvettes parmi les plus denses se démarquent nettement du lot, aucune explication n'a pu être donnée sur cette différence.

2.4 Assemblages par tige métallique

2.4.1 Portance locale

L'Eurocode 5 propose une détermination du comportement mécanique des assemblages de type tige métallique par une caractérisation de certaines données plus simple à obtenir : portance locale.

Des essais normalisés (norme NF EN 383 et NF EN 26891) permettent d'obtenir le comportement général de l'assemblage et de l'utiliser dans le calcul d'une structure.

Les essais de portance locale à plusieurs angles de sollicitation (0° , 30° , 45° , 60° et 90°) ont été réalisés sur le Gonfalo Rose (*Qualea Rosea*) [Pouokam 2004] avec le même diamètre de clou et un pré perçage.

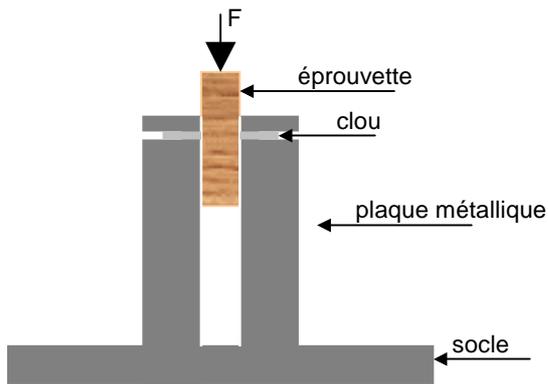


Figure 30 Essai de portance locale

Les caractéristiques de base dans ce type d'essai sont :

- F_{max} : force maximale enregistrée pour un déplacement inférieur ou égal à 5 mm
- F_p : force au seuil plastique
- F₀ : force pour 5% d'offset
- U_{max} : déplacement à la rupture
- K_{ser} : raideur du bois lors de la décharge
- K_i : raideur initiale du bois

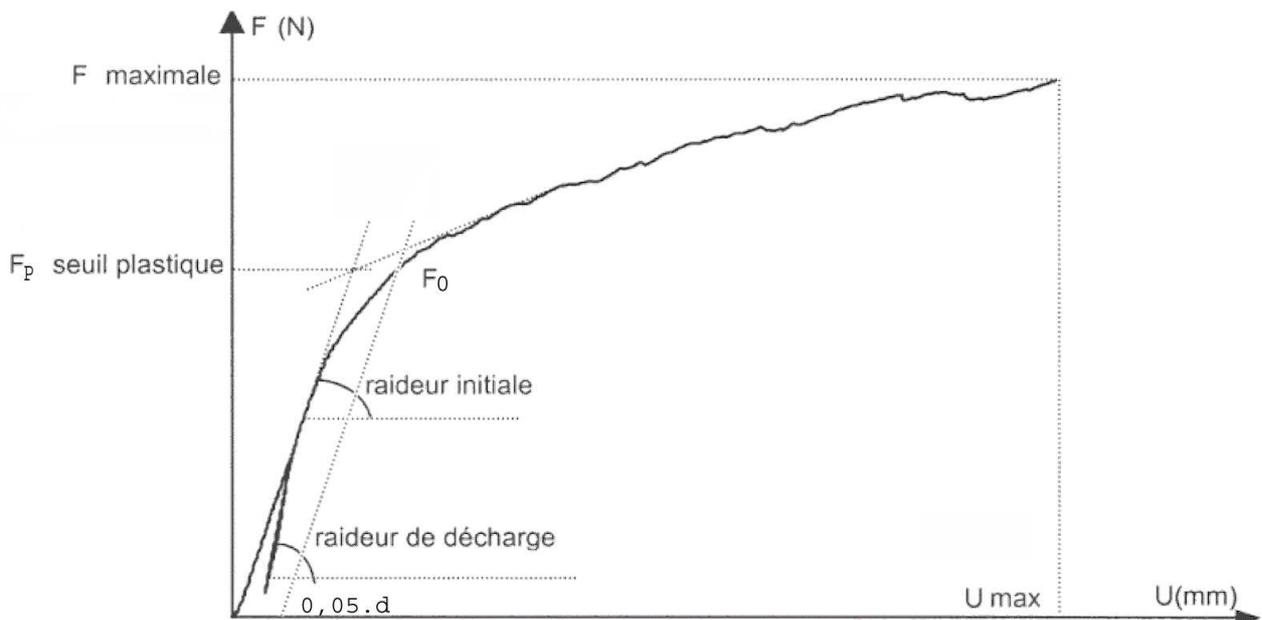


Figure 31 Caractéristiques mesurées lors d'un essai d'enfoncement

Le principe proposé dans l'EC 5, comme dans la méthode de Smith et Al., ne tiennent pas compte de l'orthotropie du bois. Dans notre cas la seule direction concernée est parallèle au fil du bois.

Les portances expérimentales F_h sont calculées par la formule suivante :

$$F_h \text{ (N/mm}^2\text{)} = \frac{F_p}{t.d} \quad \text{et non } \frac{F_{max}}{t.d} \text{ comme le proposent les normes et l'eurocode 5, étant}$$

donné que les résultats sont plus cohérents et plus justes au regard des sollicitations de services.

NB : "t" est l'épaisseur de l'éprouvette et "d" est le diamètre du clou.

La comparaison des différents modèles déterminant les paramètres de la portance locale a montré que celui de Smith et Al. était le plus proche des résultats expérimentaux selon cette direction (sens des fibres) et avec un pré perçage : $F_h = 0,071.\rho \left(\frac{d}{6}\right)^{-0,28}$

D'après Eurocode 5, la raideur élastique de l'assemblage cloué s'exprime selon la formule suivante :

$$\text{sans pré perçage : } K_{ser} = \rho^{1,5} \cdot \frac{d^{0,8}}{25} \text{ (N/mm)} \quad F_h = 0,082.\rho d^{-0,3}$$

Expérimentalement, la raideur initiale est directement proportionnelle au module de fondation élastique :

$$K_i = \frac{K_{ser}}{1,62}$$

La raideur d'écroûissage est constante et égale à 0,2 N/mm

Les essais de portance locale réalisés sur le Gonfolo Rose (*Qualea Rosea*) [Pouokam 2004] avec le même diamètre de clou ont montrés la cohérence des formules proposées par l'eurocode 5.

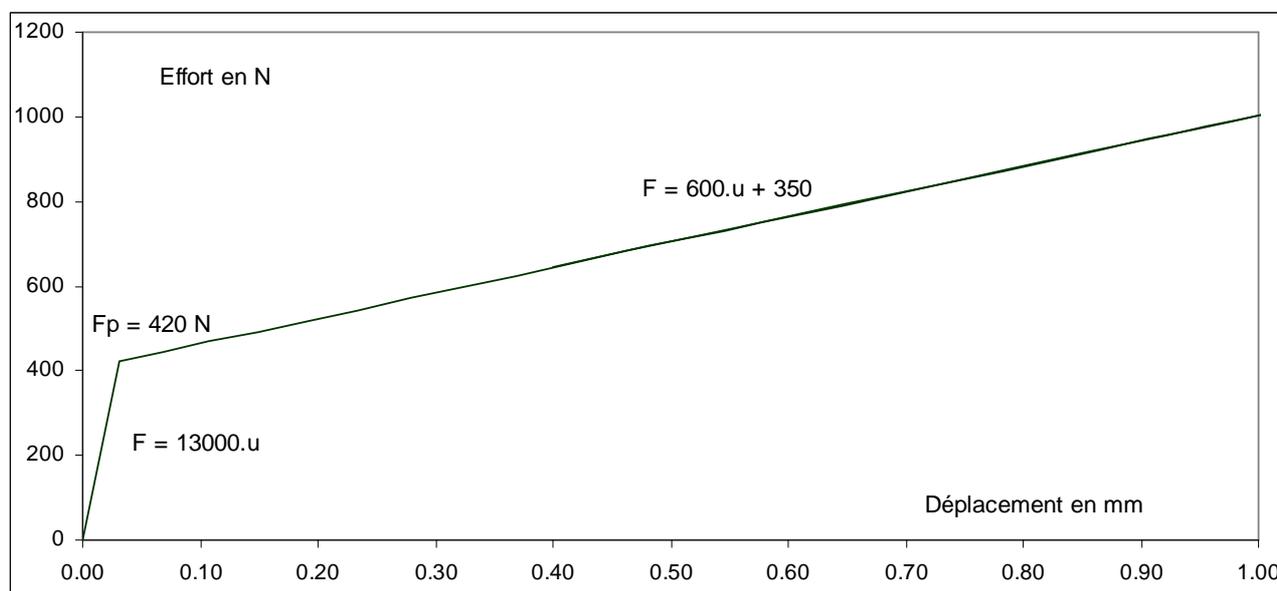


Figure 32 Comportement théorique d'un clou en simple cisaillement sur une planche de 27mm

2.4.2 Comportement de l'assemblage cloué en cisaillement

Bien que rigides, les assemblages cloués sont plus souples que les assemblages collés ; les contraintes secondaires et les concentrations de contraintes locales d'efforts sont donc plus faibles. L'enfoncement des clous n'abîme que peu les fibres du bois, qui sont repoussées de côté. Il n'est donc pas nécessaire (pour les clous minces tout au moins) de tenir compte d'un affaiblissement des sections.

La résistance des assemblages cloués n'est pas déterminée seulement par la matière des clous, mais aussi par la qualité du bois. Elle dépend aussi bien de la résistance des clous à la flexion que de la résistance du bois à l'enfoncement des clous, c'est-à-dire de la résistance à la pression latérale. (Mlynek) (Meyer - Beckum).

2.4.2.1 Principe et mesures

Les éléments en bois de gonfolo ont une section de 27x50 mm pour une longueur de 550 mm, et sont stabilisés à une humidité de 8,5 %. Les densités et les modules de flexion sont mesurés préalablement.

Les clous (ALSAFIX) : 50 mm de longueur, 2.3 mm de diamètre, cylindriques et lisses (tête plate) sont appliqués avec un pistolet cloueur pneumatique (même marque) dont la pression est réglée pour que la tête affleure le bois. Les éléments cloués proviennent du même morceau de bois (densité et humidité constante pour un essai).



Figure 33 Pistolet cloueur, compresseur et bobine de clous

Deux éprouvettes de bois sont clouées l'une sur l'autre suivant le schéma ci-dessous.

Le recouvrement des deux demi éprouvettes est de 350 mm. En extrémité 200 mm sont réservés pour la fixation de l'éprouvette à la machine de traction (MTS) et au positionnement d'un capteur de déplacement (mitutoyo).



Figure 34 Essai de cisaillement de clou sur la MTS

L'essai est réalisé trois fois avec 3 clous différents positionnés par un manipulateur sur l'axe des éprouvettes et le plus orthogonalement possible à la face d'application. Le positionnement des clous successifs et du capteur de déplacements est représenté sur le schéma suivant :

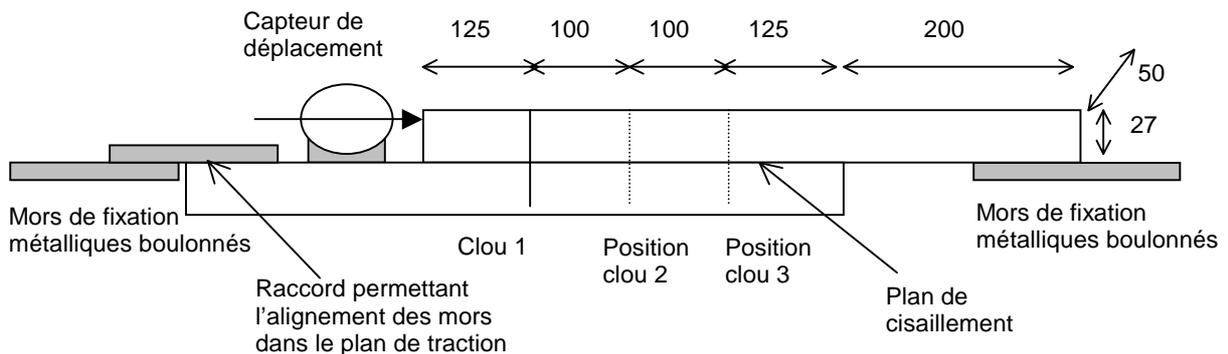


Figure 35 Schéma des essais de cisaillement

Ce type d'essai de résistance d'assemblage, est normalisé. La norme EN 26891 en définit les conditions et les paramètres caractéristiques à extraire. La machine avec laquelle les essais sont réalisés permet de piloter la traverse en déplacement. La norme demande un pilotage de la machine d'essais en effort ; les conséquences de cette modification sont négligeables, outre les réglages fastidieux des vitesses de déplacement permettant d'approcher les hypothèses normalisées.

Quelques essais préalables ont permis d'estimer l'effort maximal (à la rupture) repris par le clou à $F_{max} \approx 800$ N.

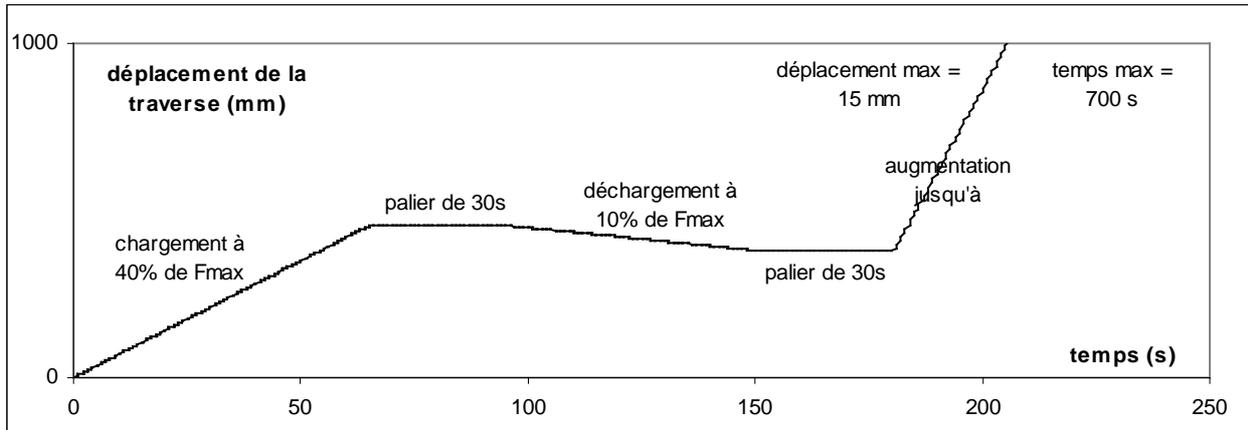


Figure 36 Pilotage de la machine de traction

L'acquisition des déplacements relatifs des 2 demi-éprouvettes mesurés par le capteur de déplacement « mitutoyo », est calée sur le temps (horloge de l'ordinateur de pilotage de la machine). La fréquence des relevés de mesure est de 4 Hz.

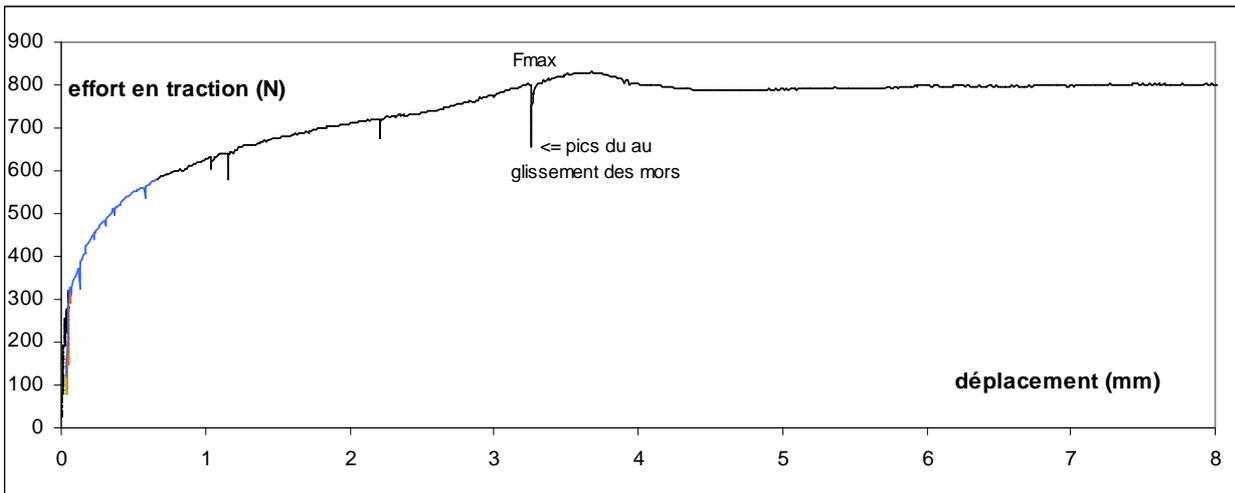


Figure 37 Exemple d'un essai cisaillement de clou sur un grand déplacement

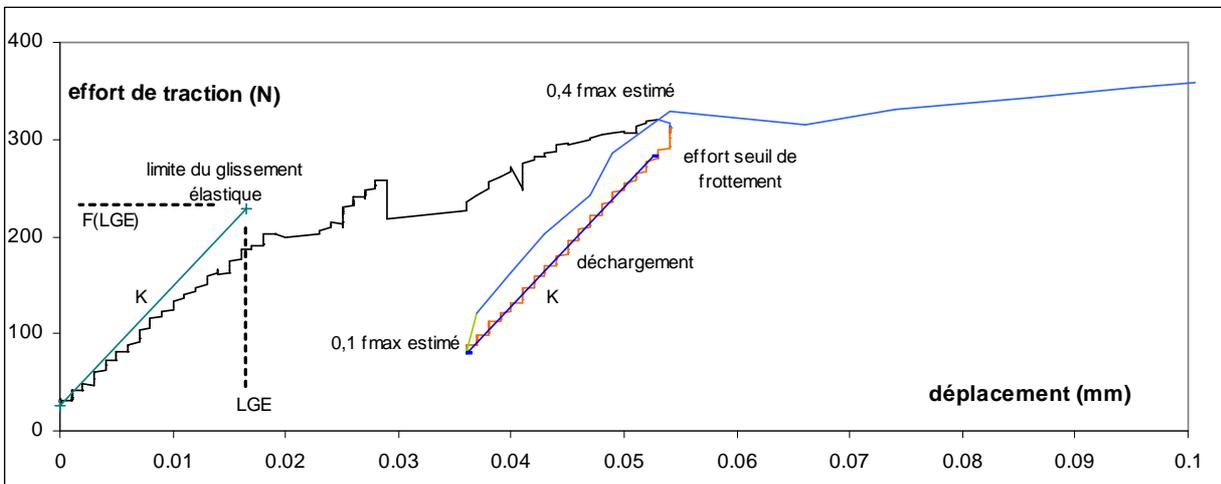


Figure 38 Même courbe de cisaillement de clou sur les phases de mises en charge (zoomé en début de chargement)

Le glissement élastique est calculé suivant la pente de déchargement.

La limite élastique est le déplacement pour lequel la différence entre le glissement théorique et le glissement réel est supérieure à 10 µm.

Le glissement élastique est approché suivant le modèle $F(u) = K.u$ où K est le glissement.

La pression de contact générée par le clou (cloué au pistolet cloueur) conduit à un effort seuil d'environ 20 N avant déplacement.

Le glissement plastique est caractérisé par les données situées entre la limite du glissement élastique jusqu'au seuil de 95 % de F_{max} estimé. Les données sont épurées de celles correspondant au déchargement à 10 % de F_{max} estimé et des pics dus à la mise en place des assemblages des mors.

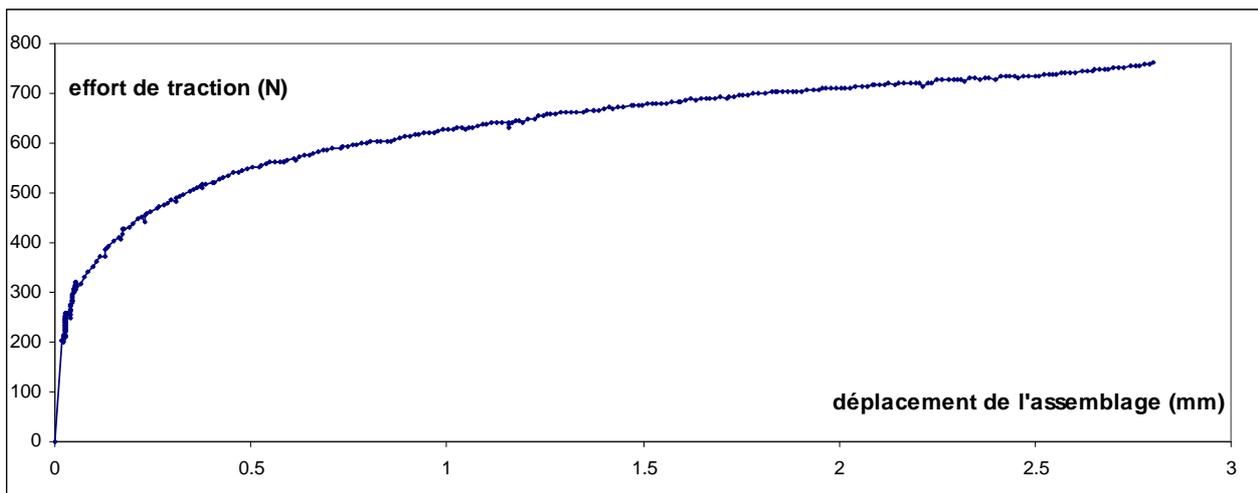


Figure 39 Domaine d'utilisation du comportement du clou (nettoyé des pics)

2.4.2.2 Estimation des erreurs et problèmes rencontrés

Le banc d'essai en traction utilisé pour l'essai de cisaillement n'est pas pilotable en évolution de force constante mais à vitesse de déplacement constante.

Les vitesses sont déterminées empiriquement par une série d'essais afin de s'approcher au mieux du protocole d'essai de la norme NF EN 28970 « Essai des assemblages réalisés par organe mécanique ».

Les conséquences de cette modification portent sur le glissement des assemblages par les mors.

Les mors étant constitués de plusieurs éléments métalliques assemblés et fixés sur le bois par l'intermédiaire d'un boulon de 6 mm de diamètre.

L'assemblage boulonné présente de grands glissements qui se réalisent par sauts liés à un relâchement brutal des surfaces comprimées (contact par frottement).

Le banc étant piloté en déplacement, un certain temps est nécessaire pour revenir à l'effort de traction avant le relâchement des assemblages des mors. Ce phénomène se retrouve sur les courbes [glissement du clou / effort] sur lesquels on peut observer les pics (chute d'effort) à glissement constant.

Une solution semblait permettre d'éviter les chutes brutales d'efforts en sollicitant, avant l'essai, les assemblages des mors jusqu'au niveau de plastification.

En assemblant les éprouvettes d'un seul morceau (1100 mm) aux mors, plusieurs cycles de chargement sont effectués à 3,75 fois la charge de rupture moyenne de l'assemblage cloué.

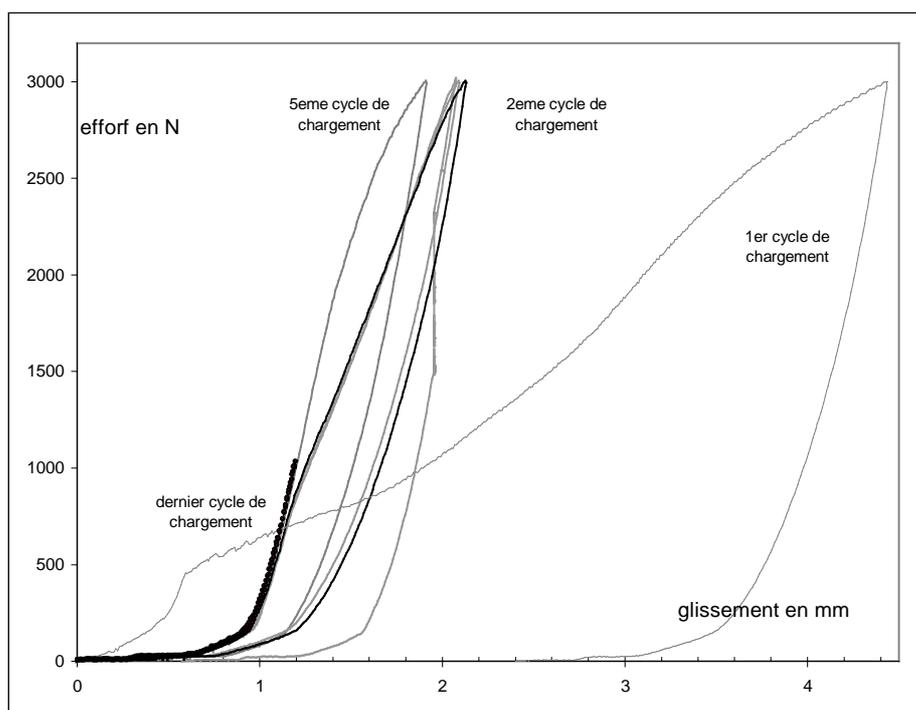


Figure 40
Préchargement

Finalement un dernier cycle chargement – déchargement à 1,2 fois la charge de rupture moyenne de l'assemblage cloué, montre que les mors ne présentent plus de relâchements brutaux. L'ensemble est démonté avec précaution par les goupilles de fixation du banc d'essai. L'éprouvette, sur laquelle sont encore fixés les mors, est coupée et les deux morceaux sont assemblés par la mise en place d'un clou pour l'essai. L'ensemble est remonté sur le banc et testé.

Cependant la pratique ne suit pas la théorie, en effet, la manipulation de l'ensemble (usinage, transport, clouage, déclouage...) fait que les assemblages des mors ne présentent plus de relâchement brutaux mais progressivement et sur un glissement plus important (en particulier pour le 3^{ème} essai). De ce fait, les temps d'application des efforts sont beaucoup plus longs et variables d'un essai à l'autre.

Le protocole fixé par la norme n'est plus respecté. Les essais sont réalisés dans des conditions très différentes les unes des autres, avec cette recherche de plastification d'assemblage.

Cette procédure n'est donc pas utilisée.

Un autre problème lié à la mise en place du clou apparaît dans ce type d'essai.

Dés lors que le centre de gravité de l'assemblage testé n'est plus dans l'axe des assemblages des mors, l'éprouvette subit une déformation en rotation dans l'épreuve de traction. La conséquence directe porte sur la mesure du glissement de l'assemblage cloué au niveau du capteur.

La mise en place du clou est difficile à contrôler avec l'utilisation du pistolet cloueur.

Cet appareil manuel doit être guidé verticalement (un angle de 20° est acceptable par l'appareil sans anomalie).

De plus l'embout du pistolet doit subir un effort de pression pour le déclenchement de la percussion du clou (sécurité). Cet embout étant d'un diamètre important, le positionnement de la pointe du clou reste approximatif. Un guide vertical est donc élaboré pour s'affranchir de ces paramètres. Cependant le fonctionnement du pistolet cloueur fait que le contrôle du positionnement du clou est très limité. Les clous sont soudés sur deux fils de laiton (ceinture du rouleau de clou placé dans le magasin). Chaque clou (tige de 1,5 mm diamètre et tête de 5 mm de diamètre) est maintenu dans la chambre de percussion de 8 mm de diamètre avant d'être percuté par une tige en acier de 7 mm de diamètre.

Entre le moment où le clou est percuté et le moment où la pointe rentre en contact avec le bois, le clou peut prendre une inclinaison de 5°.

La variation de densité (cerne, fil) et le choc dû à la percussion, peuvent amener le clou à être incliné de 7° dans le bois avec un excentrement de 4 mm par rapport à la position souhaitée.

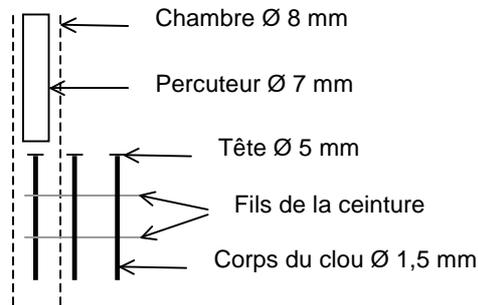


Figure 41 Schéma de la chambre de percussion des clous du pistolet

L'éprouvette est testée avec une répétabilité de 3 clous. Le clou le plus éloigné du capteur de déplacement est à $\ell_2 = 300$ mm. La position des mors se trouve à $\ell_1 = 180$ mm et $\ell_3 = 120$ mm. Avec $\Delta x = 5$ mm :

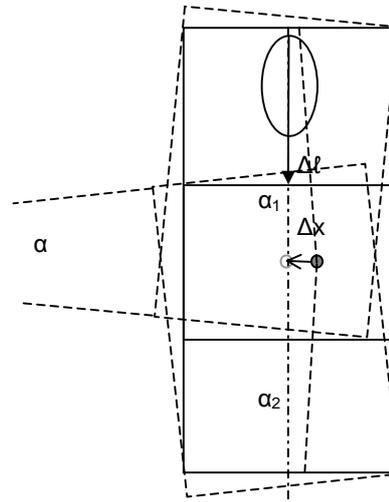
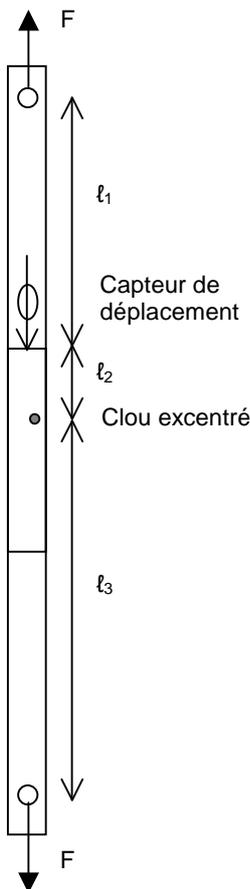


Figure 42 Zoom sur le clou excentré

L'angle de rotation de l'élément sur lequel se trouve le capteur de déplacement est de :

$$\alpha_1 = \text{Arctan} \frac{\Delta x}{\ell_1 + \ell_2} = 0,60^\circ$$

L'angle de rotation de l'autre élément est de :

$$\alpha_2 = \text{Actan} \frac{\Delta x}{\ell_3} = 2,39^\circ$$

L'angle de rotation global est de $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = 2,98^\circ$

L'erreur de mesure par le capteur de déplacement est donc de :

$$\Delta \ell = \left(\frac{\ell_2}{\cos \alpha} - \ell_2 \right) = 0,4 \text{ mm}$$

Figure 43 Clou excentré

Pour améliorer la mesure du comportement du clou en cisaillement, deux guides à roulement sont situés de part et d'autre des éprouvettes pour empêcher leur rotation autour de l'axe du clou et l'application des clous est réalisée avec le pistolet cloueur fixé sur un bâti, cf. Figure 34.

2.4.2.3 Modèle de comportement du clou

Le glissement plastique est approché par le modèle $F(u) = a \ln(b.u+c)$, débutant par une phase élastique où une limite de glissement élastique (LGE) est estimé à environ 0,015 mm (à partir du graphique).

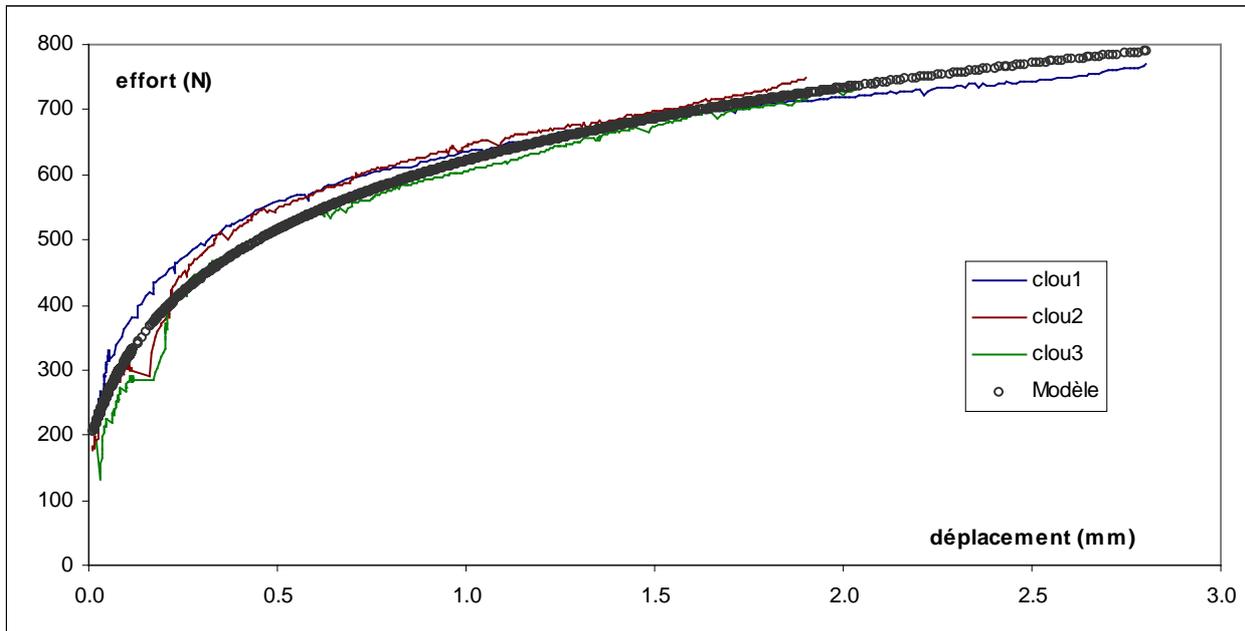


Figure 44 Comportement d'un clou en cisaillement (réponse force déplacement)

Les coefficients a, b, c, k, et LGE sont fonctions des propriétés du bois (densité).

k	LGE	a	b	c	ρ
13607	0,015	308	16	1,7	0,65

Tableau 7 Valeurs des coefficients définissant le comportement d'un clou en cisaillement

A déplacement donné, l'erreur sur l'estimation de la force peut atteindre 80 N ; et à effort donné, l'erreur peu atteindre 0,075 mm sur le déplacement (modèle déterminé sur 3 éprouvettes de 3 essais).

Une série d'essais prenant en compte différentes densités de bois et plusieurs clous conduit au modèle suivant : $F(u) = a \times \rho \times n^y \text{Ln}(b \times u + c)$, contrairement à ce que la littérature propose [Whale, Smith, I. and Hilson, 1989] [Blass, 1994] [Williams, 1992].

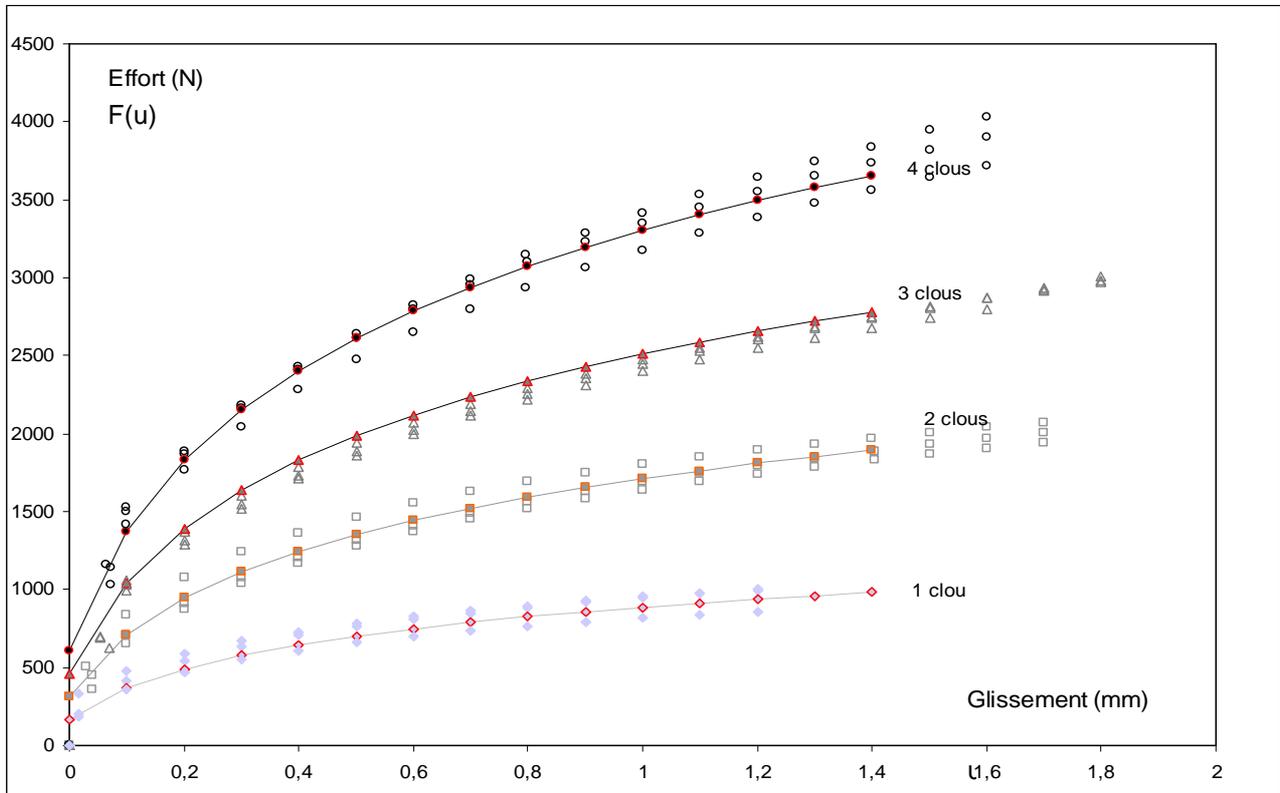


Figure 45 Comportement de plusieurs groupes de (1 à 4) clous en cisaillement

LGE	y	a	b	c
0.015	0.95	475	16	1.7

Les essais de flexion avec différentes densités de clouage permettront de vérifier si l'interaction entre les clous prédomine le phénomène de répartition des organes sur la longueur de l'assemblage.

$$F(u) = 475 \times \rho \times n^{0,95} \text{Ln}(16 \times u + 1,7)$$

F : effort de cisaillement, ρ : densité du bois, n : nombre de clous ; u : glissement

2.4.3 Comportement de l'assemblage cloué en arrachement

Des essais américains [source non citée, Lignum, Zurich] ont montré que la résistance à l'arrachement des clous lisses enfoncés perpendiculairement aux fibres d'un bois sec peut être calculée de la manière suivante :

$$P = 48,5 \times d \times \ell \times \rho^{2,5}$$

P : force d'arrachement en N
 d : diamètre du clou en mm
 ℓ : longueur d'adhérence du clou en mm
 ρ : densité du bois

(Un coefficient de sécurité de 6 est utilisé dans la pratique). La résistance à l'arrachement diminue considérablement à la suite d'apparition de fentes de clouage et de retrait. Les clous lisses enfoncés dans le bois humide perdent une partie importante de leur résistance lors du séchage du bois. Cette perte peut atteindre 80%. [Lignum, Zurich]

L'eurocode 5 propose pour la résistance à l'arrachement des pointes lisses :

$$R_d = 18 \times d \times \ell \times \rho^2$$

La longueur d'adhérence du clou ℓ devant être supérieure à $12 \cdot d$

L'augmentation d'humidité réduit cette valeur (sans être quantifiée).

Selon les deux codes, la résistance à l'arrachement d'un clou cylindrique et lisse de 2,3 mm de diamètre est de 1026N selon les règles Suisses Lignum et 472N selon l'eurocode 5.

2.4.4 Influence de la disparité des assemblages

2.4.4.1 Approche algébrique - disparité des assemblages

La répartition géométrique des « sites » de transmission d'effort entre deux éléments élastiques, induit une inégalité de reprise d'effort même si les organes de transmission sont identiques [Van Der Put, 1976]. Ce phénomène est particulièrement flagrant lorsque la répartition est faite suivant le sens de transmission d'effort, où les contraintes sont plus élevées aux extrémités de la zone d'assemblage, lorsque le système de liaison est discret, et lorsque les éléments joints sont peu rigides.

Exemple simple permettant de mettre en évidence la théorie :

Soit deux éléments liés par leur face latérale de $2n$ clous distants de d .

Les efforts transmis à travers l'assemblage à cisaillement multiple de clous sont de type discrets ponctuels.

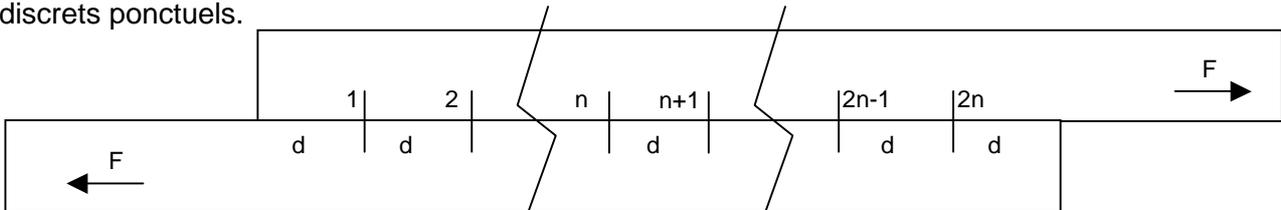


Figure 46 Schéma d'un assemblage à $2n$ clous en cisaillement

Une approche grossière du problème (sans tenir compte de la déformation des éléments liés) aurait conclu : chaque clou reprend un effort de $F/2n$.

En restant dans l'hypothèse (fausse pour un clou) que l'assemblage présente une raideur constante, chaque clou conduit à un glissement de $\Delta_{\text{clou}} = F/2nk$, d'où un glissement d'assemblage de $\Delta_{\text{assemblage}} = 2n \times \Delta_{\text{clou}} = F/k$.

Cependant une analyse de la déformation des matériaux liés dans la zone d'assemblage montre un équilibre de forces inhomogènes repris par chaque clou même dans l'hypothèse d'une raideur constante.

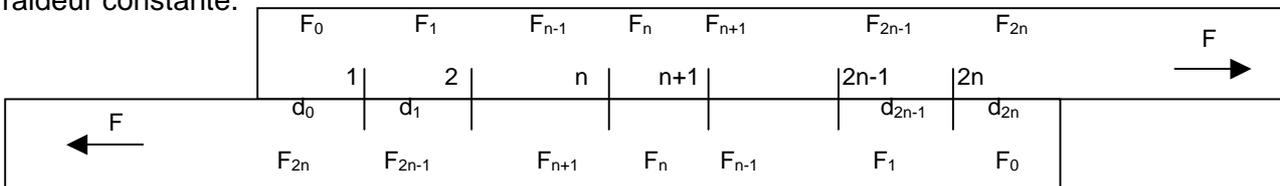


Figure 47 Schéma indication des paramètres

Soient les paramètres nécessaires au calcul les définitions suivantes :

S la section des substrats

F_i l'effort de traction subi par le substrat entre les clous i et $i+1$

d_i la longueur du substrat chargé séparant les clous i et $i+1$

u_i le glissement du $i^{\text{ème}}$ clou

F_i l'effort transmis par le $i^{\text{ème}}$ clou

E l'élasticité des substrats (matériaux liés identiques)

K souplesse de l'assemblage cloué ($K=1/k$)

Les équations d'équilibre permettent d'écrire :

La déformation linéaire élastique du clou est régie par $u_i = K_i F_i$

L'équilibre de la section donne : $F_i + F_{2n-i} = F$ d'où $F_n = \frac{F}{2}$

L'élasticité du substrat donne : $d_i = d \left(1 + \frac{F_i}{ES} \right)$ avec $d_0 = d$

L'équilibre du clou donne : $F_i = F_i - F_{i-1}$ avec $F_0 = 0$ et $F_{2n} = F$

Par symétrie : $u_i = u_{2n+1-i}$

Entre les clous i et $i+1$: $u_i = d_{2n-i} + u_{i+1} - d_i$

Au plan de cisaillement : $\sum_{i=1}^{2n} F_i = 2$



$$\sum_{i=1}^n F_i = F$$

La résolution du problème passe par la recherche de F_1 et u_0 :

$$u_{i+1} = K_{i+1} F_{i+1} = K_{i+1} (F_{i+1} - F_i)$$

$$d_{2n-i} = d \left(1 + \frac{F_{2n-i}}{ES} \right) = d \left(1 + \frac{F-F_i}{ES} \right)$$

$$u_i = K_i (F_i - F_{i-1}) = d_{2n-i} + u_{i+1} - d_i = d \left(1 + \frac{F-F_i}{ES} \right) + K_{i+1} (F_{i+1} - F_i) - d \left(1 + \frac{F_i}{ES} \right)$$

$$(K_i + K_{i+1}) F_i = K_{i+1} F_{i+1} + K_i F_{i-1} + \frac{dF}{ES} - 2 \frac{dF_i}{ES}$$

$$F_i \left(K_i + K_{i+1} + 2 \frac{d}{ES} \right) = K_{i+1} F_{i+1} + K_i F_{i-1} + \frac{dF}{ES}$$

Si la raideur est constante ; soit $T = \frac{d}{ES}$; F_i ($1 \leq i < n$) est solution de la suite récurrente :

$$\boxed{2F_i (K+T) = K (F_{i+1} + F_{i-1}) + TF}$$

Avec $K_i = K$; $F_0 = 0$, $F_n = F/2$ et $F_{2n} = F$

Résolution matricielle :

$$-K F_{i-1} + 2(K+T) F_i - K F_{i+1} = TF$$

Avec $F_{2n} = F$

$$\begin{bmatrix} 2(K+T) & -K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K & 2(K+T) & -K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K & 2(K+T) & -K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K & 2(K+T) & -K & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K & 2(K+T) & -K \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K & 2(K+T) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_{2n-3} \\ F_{2n-2} \\ F_{2n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TF \\ TF \\ TF \\ TF \\ TF \\ F(T+1) \end{bmatrix}$$

Les valeurs de F_i sont déterminées par inversion de la matrice

n	$2n.F_1/F$	$2n.F_2/F$	$2n.F_3/F$
1	1		
2	$1 + \frac{T}{K+T}$	$1 - \frac{T}{K+T}$	
3	$1 + \frac{10KT+8T^2}{3K^2+8KT+4T^2}$	$1 + \frac{6KT-4T^2}{3K^2+8KT+4T^2}$	$1 - \frac{16KT+4T^2}{3K^2+8KT+4T^2}$
4	$1 + \frac{7K^2T+14KT^2+6T^3}{K^3+5K^2T+6KT^2+2T^3}$	(...)	(...)
5	$1 + \frac{60K^3T+216K^2T^2+224KT^3+64T^4}{5K^4+40K^3T+84K^2T^2+56KT^3+16T^4}$	(...)	(...)

Tableau 8 Coefficients résultant de l'inhomogénéité de la répartition des efforts dans les clous

F_1 donne la valeur maximale

Ordre de grandeur des données dans le cas de lames de bois clouées :

- ρ : 0,65
- d : 100 mm
- E : 15 000 MPa
- S : 6 000 mm²
- k : 13 600 N/mm
- K : $7 \cdot 10^{-5}$ mm/N
- T : $1 \cdot 10^{-6}$ mm/N
- F : 1 000 N

$T = \frac{d}{ES}$ est en général petit devant K .

En négligeant T devant K , on obtient la relation :

$$2F_i = F_{i+1} + F_{i-1} + \frac{TF}{K}$$

Avec $K_i = K$; $F_0 = 0$, $F_n = F/2$ et $F_{2n} = F$

Par récurrence on montre qu'il existe deux suites S_n et U_n :

$$S_i = S_{i-1} - \frac{S_{i-2}}{4} \quad \text{avec } S_0 = S_1 = 1$$

$$U_i = U_{i-1} + S_{i-1} \quad \text{avec } U_1 = 1$$

Pour lesquelles :

$$F_i \times S_{n-i} = \frac{F}{2^{n-i+1}} + \frac{TF}{2^{n-i} K} \times U_{n-i} + \frac{F_{i-1}}{2} \times S_{n-i-1}$$

De ce fait pour chaque n le rapport $\frac{F_1}{F} = \frac{1 + \frac{2T U_{n-1}}{K}}{2^n S_{n-1}}$

Or il est facilement démontrable par récurrence que :

$$S_{n-1} = \frac{2n}{2^n} \quad \text{et} \quad U_{n-1} = \frac{n^2 - n}{2}$$

Ce qui conduit à : $\frac{F_1}{F} = \frac{1 + \frac{T(n^2 - n)}{K}}{2n}$

Soit finalement $F_1 \approx \frac{F}{2n} \left(1 + \frac{(n^2 - n) d}{KES} \right)$ lorsque $\frac{d}{KES} \ll 1$

La distance entre clous d étant constante dans ce calcul, la longueur de l'assemblage D dépend du nombre de clous $D = (2n + 1) d$ (avec les talons, distance la plus courte entre le clou et le bord).

Si la longueur de l'assemblage D est constante la proportion d'effort supplémentaire est proche de : $\frac{(n^2 - n) D}{(2n + 1) KES}$

Cette part d'effort supplémentaire repris par les clous situés aux extrémités de l'assemblage est donc d'autant plus importante que :

- la souplesse K est petite donc que la raideur k est grande ;
- l'élasticité du bois E est petite ;
- la section des éléments assemblés S est petite ;
- la longueur de l'assemblage D est grande ;
- le nombre de clous n disposés à intervalle régulier est important.

Les données calculées de l'exemple, présentées ci-dessus en ordre de grandeur, montrent qu'à partir de $n = 10$ (soit un assemblage de 20 clous), les clous situés aux extrémités supportent un effort double par rapport aux clous situés au milieu.

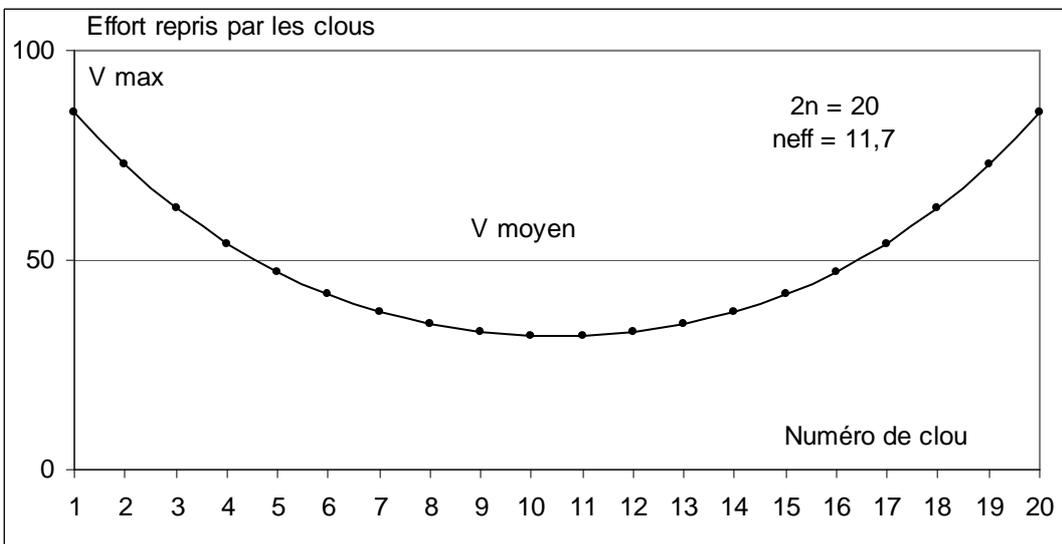


Figure 48 Répartition des efforts dans les clous dans un assemblage constitué de 20 clous en cisaillement (raideur constante)

Cette disparité de transmission d'effort, est caractérisée par un nombre de liaisons effectives :

$$n_{\text{eff}} = 2n \frac{V_{\text{moy}}}{V_{\text{max}}} = \frac{F}{F_1} \quad (= 11,7 \text{ dans l'exemple})$$

En outre, en terme de résistance, un assemblage constitué de 20 clous répartis en longueur sur un assemblage équivalent (dans cet exemple) à 11,7 clous sans intervalle en longueur et sans interaction entre eux.

L'approximation de F_1 précédemment établie, lorsque $\frac{d}{KES} \ll 1$, donne :

$$n_{\text{eff}} \approx n / \left(1 + \frac{(n^2 - n) d}{KES} \right)$$

Cependant, le comportement non linéaire du clou pour une sollicitation plus importante, joue en faveur d'un meilleur équilibre de la répartition des efforts (voir plus loin).

Pour prendre en compte le comportement non linéaire du clou, il convient d'introduire

K_i fonction de F_i .

$$F(u) = 13607 u \quad \text{si } u \leq 0,015 \text{ ou } F(u) \leq 204$$

$$F(u) = 308 \ln(16u + 1.7) \quad \text{si } u \geq 0,015$$

$$\text{si } u \leq 0,015 \quad u = \frac{1}{16} \left(\text{Exp} \left(\frac{F(u)}{308} \right) - 1,7 \right)$$

$$u_i = K_i F_i$$

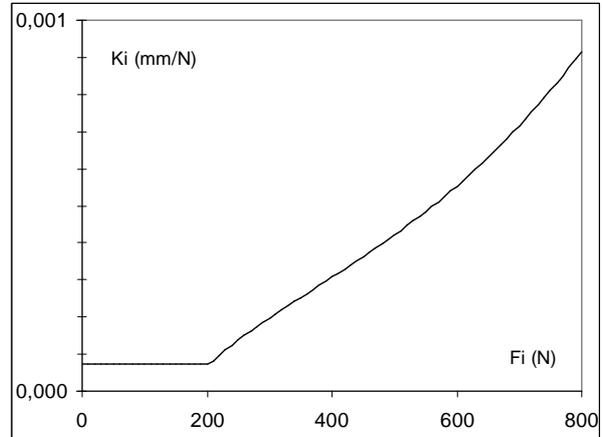
$$\begin{cases} K_i = 7,35 \cdot 10^{-5} & \text{si } F_i \leq 204 \\ K_i = \frac{\text{Exp} \left(\frac{F_i}{308} \right) - 1,7}{16 F_i} & \text{sinon} \end{cases}$$

Le raisonnement identique au précédent conduit à l'équation de récurrence :

$$- K_i F_{i-1} + (K_i + K_{i+1} + 2T) F_i - K_{i+1} F_{i+1} = TF$$

$$\text{Avec } F_0 = 0 \text{ et } F_{2n} = F$$

$$F_{i+1} = \frac{K_i + K_{i+1} + 2T}{K_{i+1}} F_i - \frac{K_i}{K_{i+1}} F_{i-1} - \frac{TF}{K_{i+1}}$$



Résolution par les matrices de transfert :

$$\begin{bmatrix} F_{i+1} \\ F_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_i + K_{i+1} + 2T}{K_{i+1}} & -\frac{K_i}{K_{i+1}} & -\frac{TF}{K_{i+1}} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_i \\ F_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$X_{i+1} = A_i \cdot X_i$$

Avec et avec $K_0 = 0$

Avec X_i et A_i ces matrices

La matrice $A_i [a^{(i)}]$ étant définie par :

$$a_{11}^{(i)} = \frac{K_i + K_{i+1} + 2T}{K_{i+1}}$$

$$a_{12}^{(i)} = \frac{-K_i}{K_{i+1}}$$

$$a_{13}^{(i)} = \frac{-TF}{K_{i+1}}$$

$$a_{21}^{(i)} = a_{33}^{(i)} = 1$$

$$a_{22}^{(i)} = a_{23}^{(i)} = a_{31}^{(i)} = a_{32}^{(i)} = 0$$

Par récurrence :

$$X_{2n} = A_{2n-1} \cdot A_{2n-2} \cdot (\dots) \cdot A_2 \cdot A_1 \cdot X_1$$

$$\text{Soit } B_{2n-1} = A_{2n-1} \cdot A_{2n-2} \cdot (\dots) \cdot A_2 \cdot A_1 = \prod_{i=1}^{2n-1} A_i$$

$$X_{2n} = B_{2n-1} \cdot X_1$$

$$\begin{bmatrix} F_{2n} \\ F_{2n-1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}^{(2n-1)} & b_{12}^{(2n-1)} & b_{13}^{(2n-1)} \\ b_{21}^{(2n-1)} & b_{22}^{(2n-1)} & b_{23}^{(2n-1)} \\ b_{31}^{(2n-1)} & b_{32}^{(2n-1)} & b_{33}^{(2n-1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Sachant que $K_0 = 0$, la multiplication des matrices A_i Avec $1 \leq i \leq m$ conduit à $B_m [b^{(m)}]$:

$$b_{12}^{(m)} = b_{22}^{(m)} = b_{23}^{(m)} = b_{31}^{(m)} = b_{32}^{(m)} = 0$$

$$b_{33}^{(m)} = 1$$

$$b_{21}^{(m+1)} = b_{11}^{(m)}$$

$$b_{23}^{(m+1)} = b_{13}^{(m)}$$

$$b_{11}^{(m+2)} = a_{11}^{(m+2)} \times b_{11}^{(m+1)} + a_{12}^{(m+2)} \times b_{21}^{(m+1)} = a_{11}^{(m+2)} \times b_{11}^{(m+1)} + a_{12}^{(m+2)} \times b_{11}^{(m)}$$

$$b_{13}^{(m+2)} = a_{11}^{(m+2)} \times b_{13}^{(m+1)} + a_{12}^{(m+2)} \times b_{23}^{(m+1)} + a_{13}^{(m+2)} \times b_{33}^{(m+1)}$$

$$b_{13}^{(m+2)} = a_{11}^{(m+2)} \times b_{13}^{(m+1)} + a_{12}^{(m+2)} \times b_{13}^{(m)} + a_{13}^{(m+2)}$$

Avec $a_{ij}^{(m)}$ les coefficients de A_m où $0 \leq m \leq 2n-2$

Par extension :

$$b_{11}^{(0)} = b_{13}^{(0)} = 1$$

$$b_{11}^{(1)} = a_{11}^{(1)}$$

$$b_{13}^{(1)} = a_{13}^{(1)}$$

Finalement :

$$\begin{bmatrix} F_{2n} \\ F_{2n-1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}^{(2n-1)} & 0 & b_{13}^{(2n-1)} \\ b_{21}^{(2n-1)} & 0 & b_{23}^{(2n-1)} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

D'où : $F_1 = \frac{F - b_{13}^{(2n-1)}}{b_{11}^{(2n-1)}}$ et F_i définis par la récurrence depuis $F_0 = 0$ et F_1 avec $2 \leq i \leq 2n$

Les efforts repris par les clous sont calculés avec $F_i = F_i - F_{i-1}$

Par conséquent si le comportement du clou est non linéaire, il est possible de lancer une itération pour déterminer les différents K_i en fonction de F_i et résolvant les équations jusqu'au dernier.

En reprenant l'exemple précédant (assemblage de 20 clous), avec un niveau de chargement moyen des clous tel que leur comportement (charge - glissement) soit non linéaire, par exemple 500 N, les écarts d'efforts repris par chaque clou s'amenuisent.

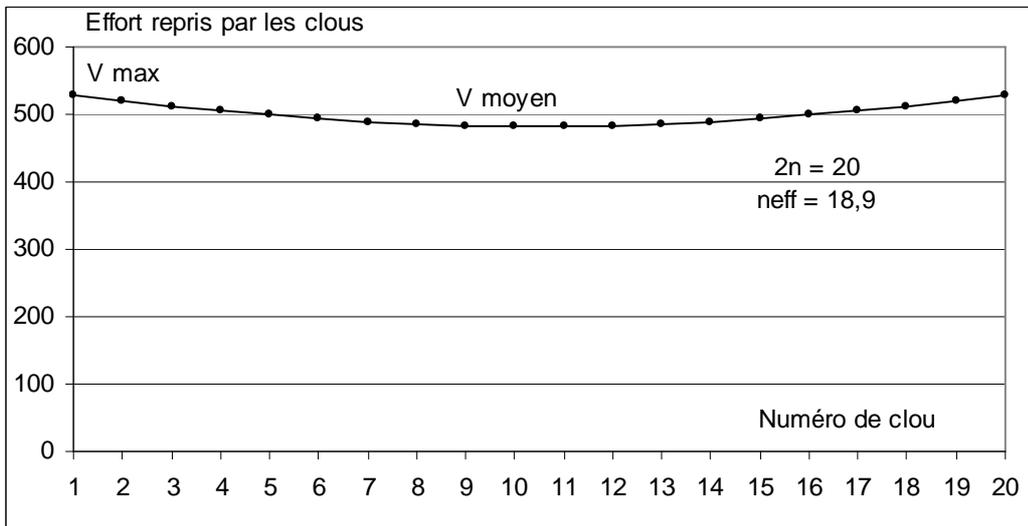


Figure 49 Répartition des efforts dans les clous dans un assemblage constitué de 20 clous en cisaillement (raideur décroissante)

$$n_{\text{eff}} = 2n \frac{V_{\text{moy}}}{V_{\text{max}}} = \frac{F}{F_1} = 18,9 \text{ dans cet exemple}$$

Exemple exagéré, pour un assemblage plus grand (10 mètres) en prenant en compte le comportement non linéaire des clous.

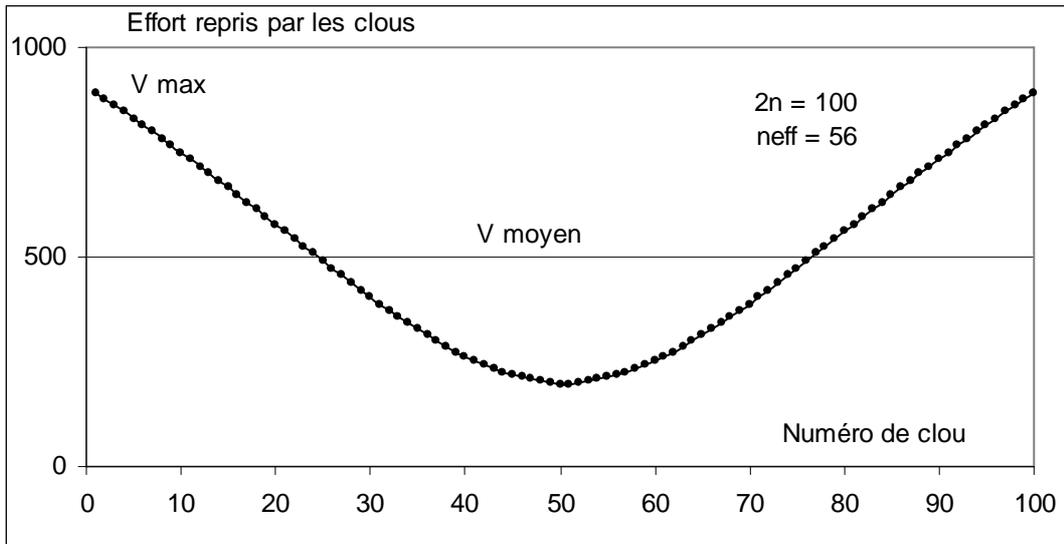


Figure 50 Répartition des efforts dans les clous dans un assemblage constitué de 100 clous en cisaillement

2.4.4.2 Approche numérique - disparité des assemblages

L'assemblage, composé de n clous répartis à égale distance, est modélisé à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis CASTEM.

Le problème est ramené en deux dimensions.

Le bois est modélisé à l'aide d'éléments surfaciques de type qua4 en tenant compte de l'orthotropie du matériau (dépendant de 2 paramètres E et ρ).

Le clou est intégré à l'aide d'un élément joint de type joi2. Cet élément est caractérisé par deux raideurs : KN transverse au joint et KS tangent, qui relie la force (F) et le déplacement (u) de deux lignes par une relation $F = K u$. Le comportement du clou en cisaillement résulte d'une relation force - déplacement non linéaire. De ce fait, par itération, une raideur fictive est associée au joint pour retrouver la relation entre force et déplacement des interfaces au niveau du clou de type :

$$F = a \ln (b.u+c).$$

De part et d'autre de l'élément joint, les interfaces des planches de bois sont équipées d'une relation de contact empêchant les matériaux de s'interpénétrer. Remarque : cette relation de contact ne peut pas prendre en compte le frottement, car l'opérateur de résolution est RESO, et que dans cette configuration, la seule pression de contact est introduite dès la mise en place du clou et que le frottement est pris en compte dans l'essai déterminant la loi de comportement du clou en cisaillement.

Les clous étant à égale distance, un volume élémentaire de répétition (VER) avec un clou est défini pour modéliser l'ensembles des planches. Le maillage de ce volume VER est densifié autour de l'élément joint définissant le clou.

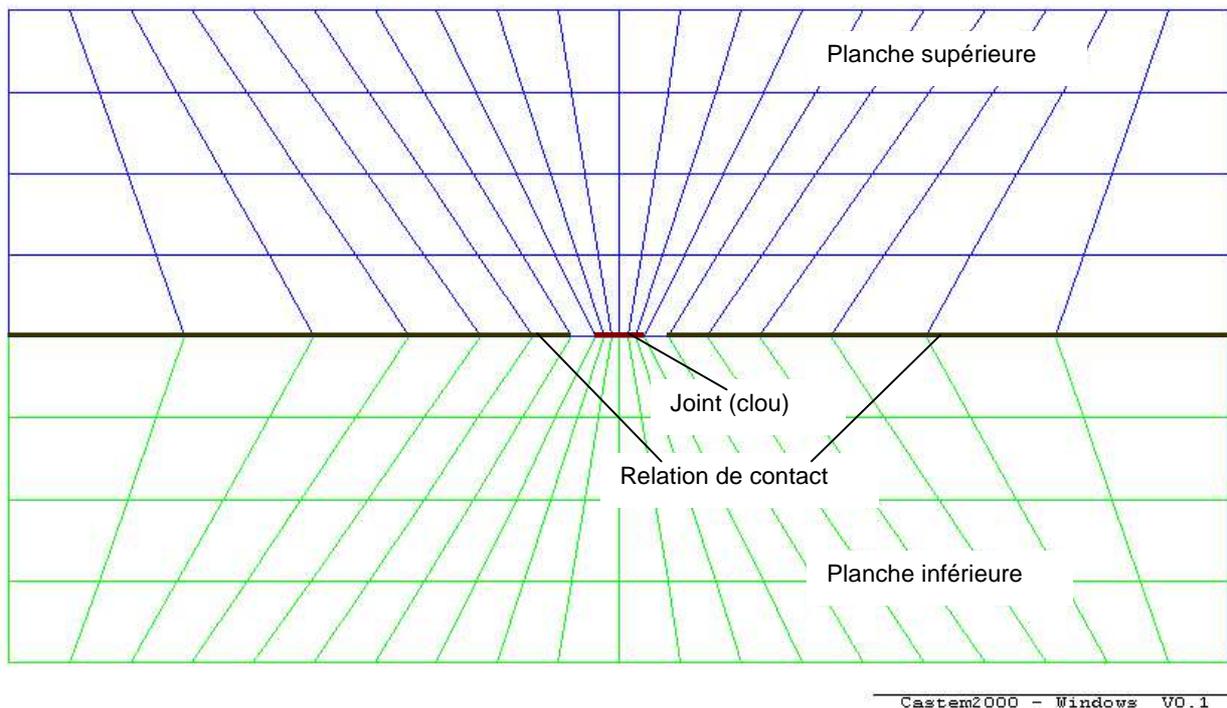


Figure 51 Maillage du Volume élémentaire de répétition avec un clou

La détermination des raideurs fictives des éléments joints, est réalisée par itération avec le procédé de convergence comprenant les étapes suivantes :

* Phase 1 : Les raideurs fictives de chaque joint sont initialisées à la valeur de la raideur initiale du clou soit :

$$\frac{405}{0,015} \times \frac{(\rho_{inf} + \rho_{sup})}{2} \times [\text{Ln} ((16 \times 0,015) + 1,7)] \text{ soit environ } 12500 \text{ N/mm (avec une densité de } 0,7)$$

* Phase 2 : Le calcul par éléments finis est lancé avec l'hypothèse de la phase 1 sur le système composé des VER avec ses conditions aux limites et le chargement.

* Phase 3 : Les couples (Force ; Déplacement) sont relevés à chaque joint représentant les clous.

* Phase 4 : Pour chaque clou, on calcul une force théorique Fth qu'aurait repris le clou avec le déplacement relevé à l'aide de la relation :

$$\text{Si } u < 0,015 \quad F_{th} = 405 \times \frac{(\rho_{inf} + \rho_{sup})}{2} \times [\text{Ln} ((16 \times u) + 1,7)]$$

$$\text{Si } u > 0,015 \quad F_{th} = 405 \times \frac{(\rho_{inf} + \rho_{sup})}{2} \times [\text{Ln} ((16 \times u) + 1,7)]$$

Et on corrige la raideur fictive du joint par sa nouvelle valeur $K = F_{th} / u$

* Phase 5 : L'itération est relancé à la phase 2 et stoppée lorsque le test :

$$\sum \left(\frac{F_{relevé} - F_{th}}{F_{th}} \right)^2 < 0,01\% \text{ effectué dans la phase 4 est réalisé.}$$

Ce procédé assure la convergence du problème même si la raideur est à un moment sous estimée.

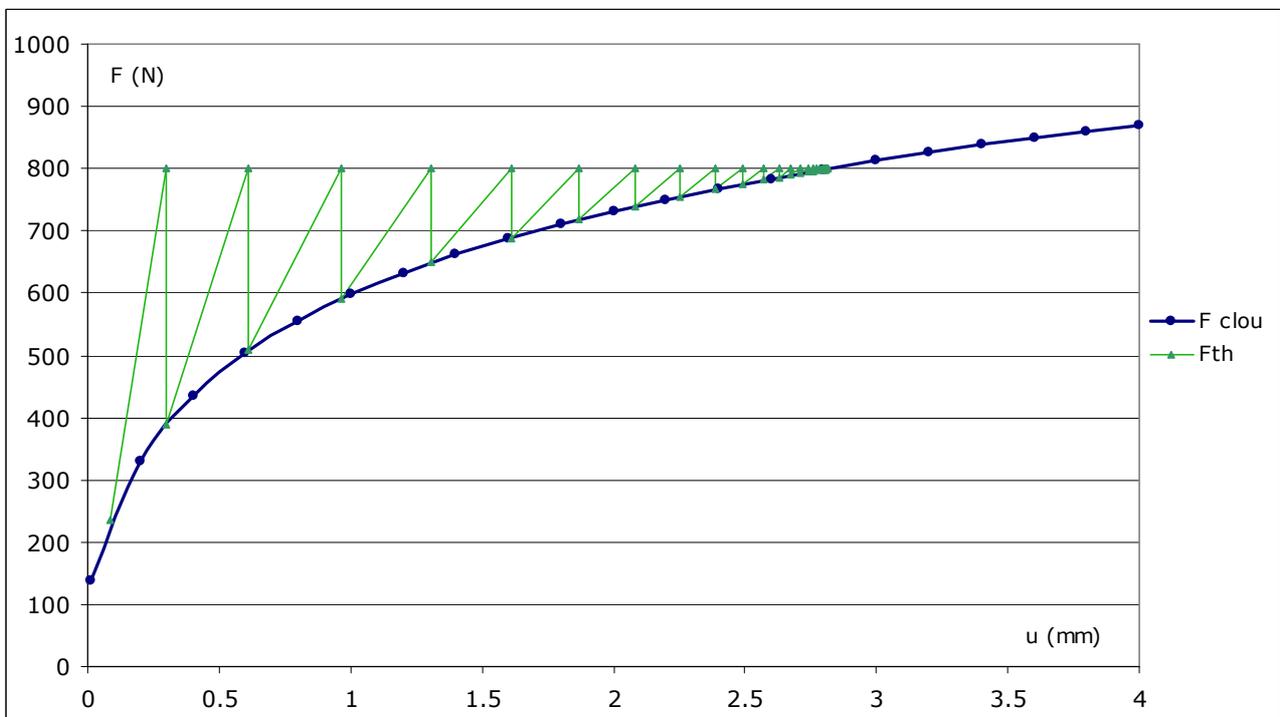


Figure 52 Itération permettant l'intégration du comportement de chaque clou en cisaillement (exemple d'un clou cisailé à 800 N)

Cette méthode paraît perfectible. Dans l'exemple de la figure 38 la force de cisaillement est constante. En supposant que dans un assemblage multiple l'évolution des couples (Force ; Déplacement) dans chaque clou est linéaire au fur et à mesure des itérations, il convient après deux relevés de résoudre une équation du type : $a \ln (b.u + c) = d.u + e$

Le logiciel CASTEM n'ayant pas de spécificité pour résoudre cette équation, une suite

$$U_n = \frac{\text{Exp} \left(\frac{d.U_{n-1} + e}{a} \right) - c}{b} \text{ avec } U_0 = u \text{ (de la deuxième itération)}$$

Cette suite converge très vite car pour U_0 compris entre 0 et 10, U_2 est égale à la solution à 0.001% près. U_3 est retenue comme solution.

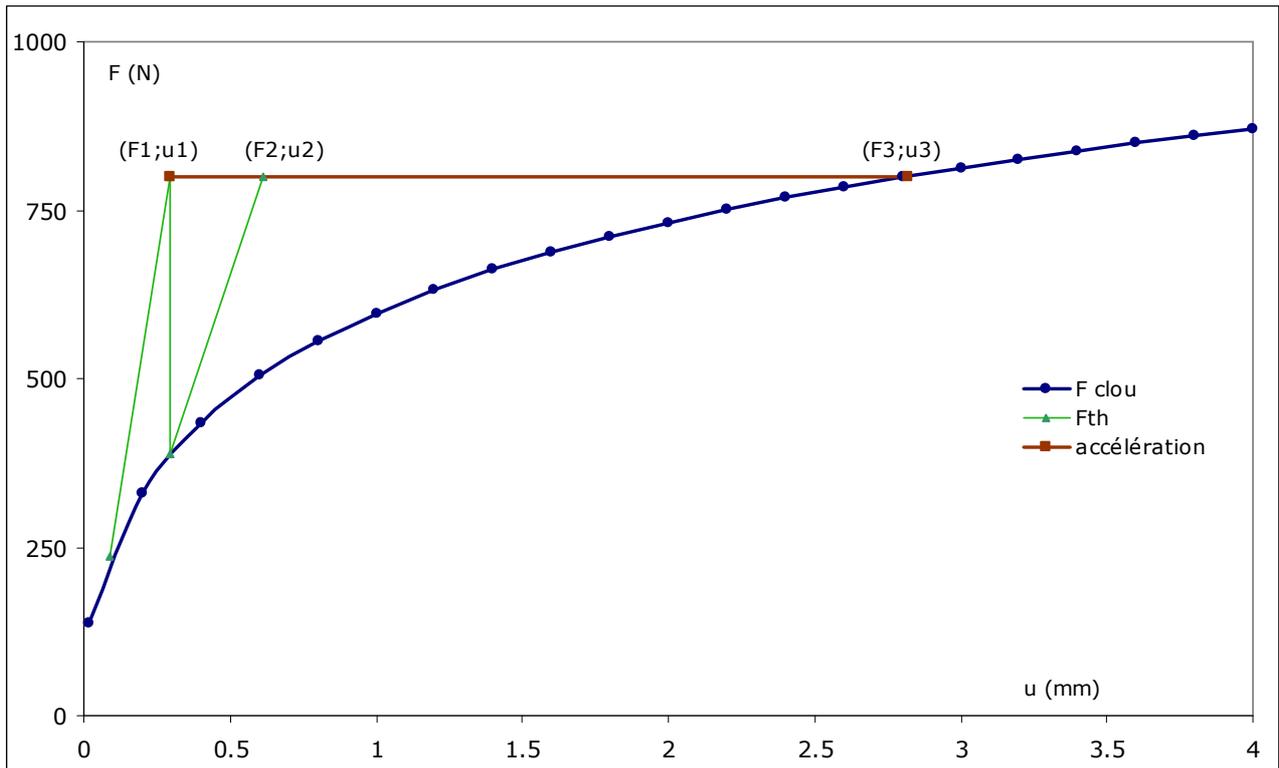


Figure 53 Accélération de convergence pour déterminer la raideur fictive

Selon cette configuration :

$$d = \frac{(F_2 - F_1)}{(u_2 - u_1)} \quad e = F_2 - d.u_2$$

Cette méthode nécessite le stockage des couples (Force ; Déplacement) de chaque joint et l'intégration d'une phase supplémentaire pour l'accélération.

Les deux méthodes (présentées en annexe 1 et annexe 2) sont comparées avec différents nombres de clous. La densité reste constante de 2 clous par décimètre carré, la hauteur des planches est de 27mm, la largeur : 50mm, la densité : 0,7, et le module d'élasticité : 20000 MPa.

Le chargement est tel que les clous supportent en moyenne un cisaillement moyen de 800 N.

Le calcul divise cette charge en 10 étapes régulières (80N, 160N, 240 N...) pour permettre un contrôle sur l'influence de l'évolution de la charge. Pour la comparaison sont relevés : les nombres de boucles nécessaires au calcul dans chacune des méthodes et le temps de calcul.

ETUDE DES COMPORTEMENTS INDIVIDUELS

Nombre de clous	Pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Nombre de boucles	Temps (sec)
1	cvn	1	1	22	17	15	15	15	16	17	18	137	10
	acc	3	3	6	3	3	3	3	3	3	3	33	8
	neff	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
2	cvn	1	1	23	17	16	16	16	17	18	19	144	18
	acc	3	3	18	9	6	6	6	6	6	6	69	12
	neff	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00		
3	cvn	1	1	24	18	16	16	16	17	19	20	148	25
	acc	3	3	18	9	9	9	9	6	6	6	78	16
	neff	2.95	2.95	2.99	2.99	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		
5	cvn	1	1	24	18	16	16	17	18	19	21	151	60
	acc	3	3	21	12	9	9	9	9	9	9	93	30
	neff	4.63	4.63	4.93	4.95	4.96	4.97	4.98	4.98	4.99	4.99		
7	cvn	1	5	25	19	17	17	17	18	20	21	160	120
	acc	3	100	24	12	9	9	9	9	9	9	193	50
	neff	5.88	5.94	6.77	6.82	6.87	6.90	6.92	6.94	6.96	6.97		
10	cvn	1	9	25	19	17	17	18	19	20	21	166	240
	acc	3	42	30	15	12	12	12	12	12	12	162	120
	neff	7.00	8.07	9.26	9.42	9.55	9.66	9.74	9.80	9.85	9.88		
15	cvn	1	11	27	20	18	17	18	19	21	22	174	600
	acc	3	6	57	18	15	12	12	12	15	15	165	300
	neff	7.71	10.81	12.60	13.08	13.49	13.81	14.08	14.28	14.45	14.58		
20	cvn	6	13	28	21	18	18	18	20	21	22	185	1000
	acc	ncv											
	neff	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
30	cvn	10	14	16	24	20	19	19	20	21	23	186	2000
	acc	ncv											
	neff	10.99	15.40	18.03	19.97	21.52	22.91	24.14	25.21	26.12	26.90		
50	cvn	14	15	16	17	19	22	20	20	21	23	187	4800
	acc	ncv											
	neff	21.40	23.56	25.94	28.42	30.89	33.24	35.49	37.63	39.62	41.45		
75	cvn	10	10	11	11	11	11	13	14	13	13	189	9000
	acc	ncv											
	neff	16.85	22.23	26.70	30.80	34.66	38.35	41.91	45.32	48.60	51.75		
100	cvn	10	11	11	11	11	12	12	12	17	14	191	14400
	acc	ncv											
	neff	18.85	25.27	30.80	35.91	40.74	45.36	49.81	54.13	58.33	62.41		

Tableau 9 Comparaison des méthodes de calcul

cvn : convergence normale
acc : accélération
neff : nombre efficace de clous
ncv : ne converge pas

La méthode avec accélération est très efficace mais ne converge plus à partir de 18 clous. Lorsqu'une différence est trop importante entre les clous les plus chargés et les clous les moins chargés, l'accélération sur les clous plus chargés que la moyenne donne en solution (avec $d > 0$) un déplacement très important et une raideur très faible. De ce fait à l'itération suivante, les clous « deuxièmement » plus chargés reçoivent une charge beaucoup plus importante, etc. d'où la divergence.

Remarque : le temps de calcul n'est pas proportionnel au nombre de boucles effectuées. La capacité mémoire de la machine informatique a beaucoup plus d'importance car le programme réalise d'autant plus de ménages automatiques pour regagner de l'espace mémoire que le nombre de clous est important.

Au passage, on peut relever le nombre de clou efficace et le coefficient permettant son estimation.

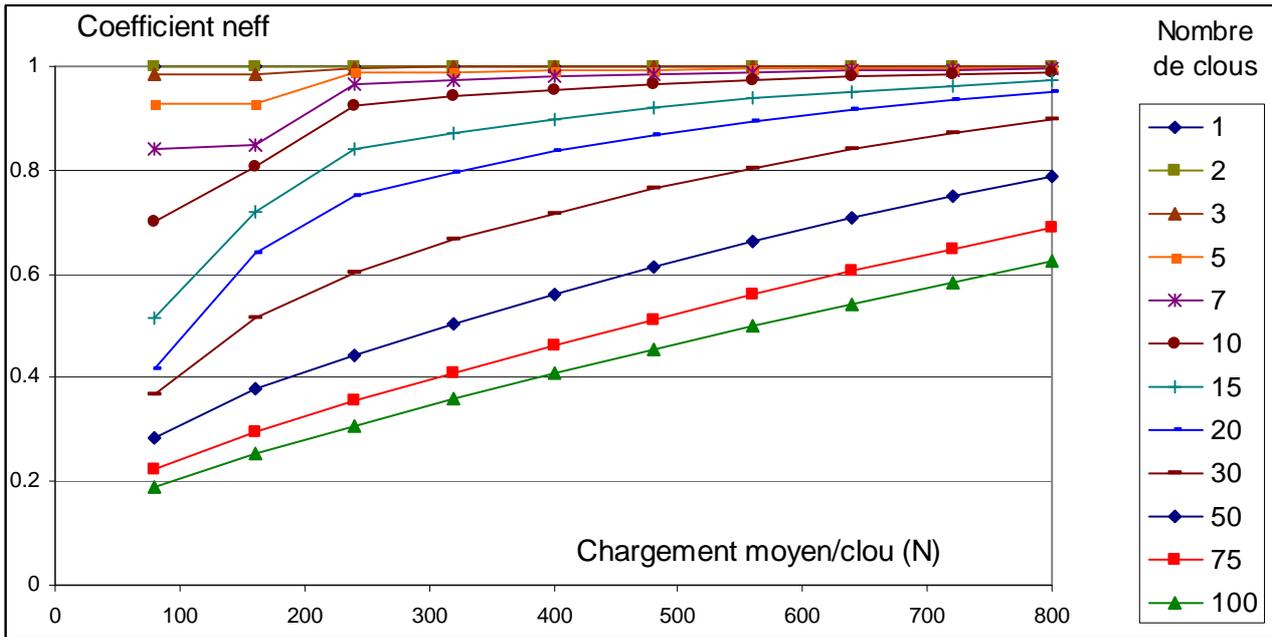


Figure 54 Coefficient de calcul du nombre efficace de clous en fonction du nombre de clous et de la charge moyenne par clou.

Rappel : Coefficient du nombre efficace = $\frac{\text{charge moyenne par clou}}{\text{charge maximale reprise par 1 clou}}$

Le coefficient du nombre efficace de clou est d'autant plus faible que le nombre total de clous est élevé, mais aussi lorsque le chargement moyen par clou est faible.

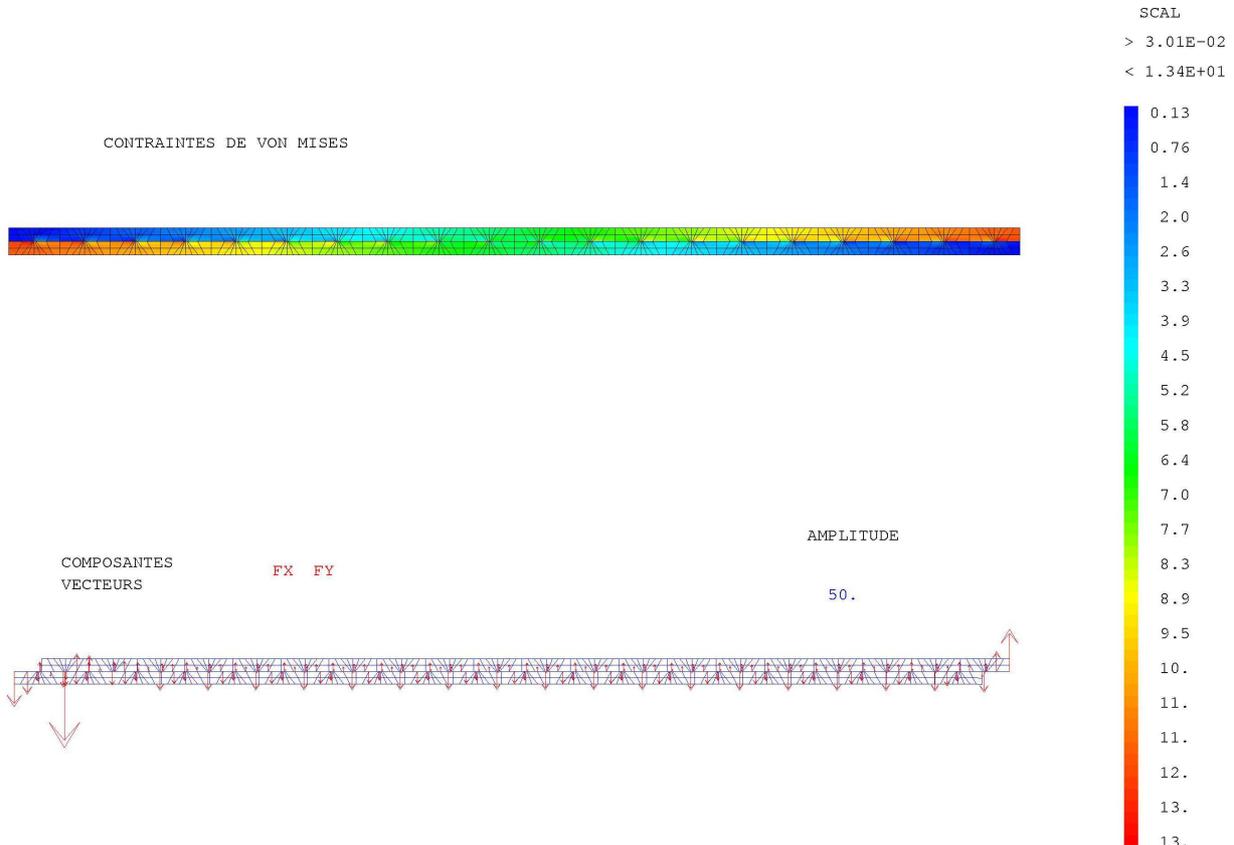


Figure 55 Modélisation des éprouvettes clouées travaillant en cisaillement

2.5 Frottement

2.5.1 Essais de frottement bois-bois

Les essais de frottement sont réalisés avec des charges normales au plan de frottement variant entre 5 et 35 kg.

L'essence de bois étudié est toujours le gonfolo.

La densité moyenne des éprouvettes utilisées est de 0,74.

La surface du patin est de 25 cm².

L'humidité d'équilibre du bois 12,5 % dans la pièce.

L'état de surface des plans en contact est raboté, poncé, lustré ou humidifié.

Le déplacement s'effectue dans le sens du fil du bois.

Le frottement est dominé par le phénomène de stick-slip (collé-glissé). De ce fait l'étude ne prend pas en compte la variation de vitesse du patin (celle-ci est grande et incontrôlable).

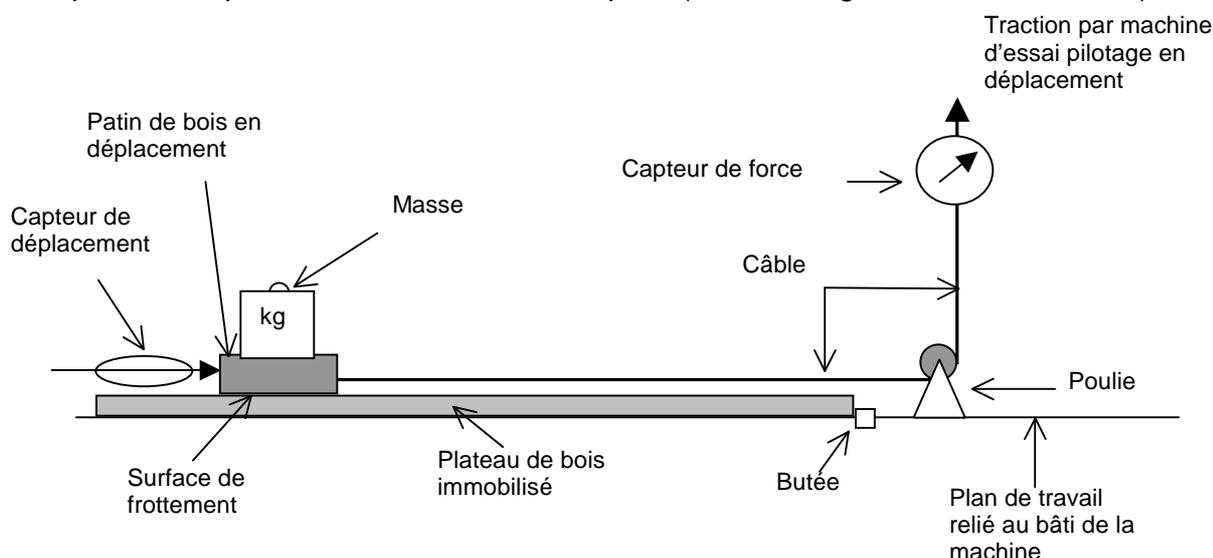


Figure 56 Dispositif expérimental pour caractériser le frottement bois-bois

Cinq essais sont réalisés dans les conditions ci-dessous :

* L'essai 1 se caractérise par des surfaces de contact ayant une pente de fil inférieur à 0,6 % . Les surfaces sont placées en contre-fil vis-à-vis du déplacement du patin.

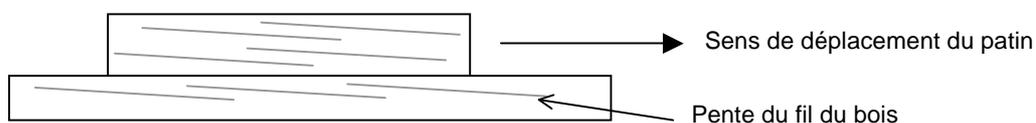


Figure 57 Schéma du patin et plateau avec la pente de fil

* L'essai 2 est réalisé avec un bois présentant une pente de fil accentuée (3,4 % courant). Les surfaces sont placées en contre-fil vis-à-vis du déplacement du patin.

* L'essai 3 est réalisé selon les mêmes conditions de l'essai 1 (même bois, même angle de fil, même configuration) après un passage du patin pendant 3 heures dans l'eau puis séché 10 minutes avant l'essai.

* L'essai 4 est réalisé selon les mêmes conditions de l'essai 1, après 10 passages successifs du patin chargé à 35 kg pour la prise en compte d'un effet de « lustrage ».

* L'essai 5 est réalisé selon les mêmes conditions de l'essai 1 avec les surfaces poncées avec un grain de 80g/cm².

Les essais se caractérisent par le graphique suivant :

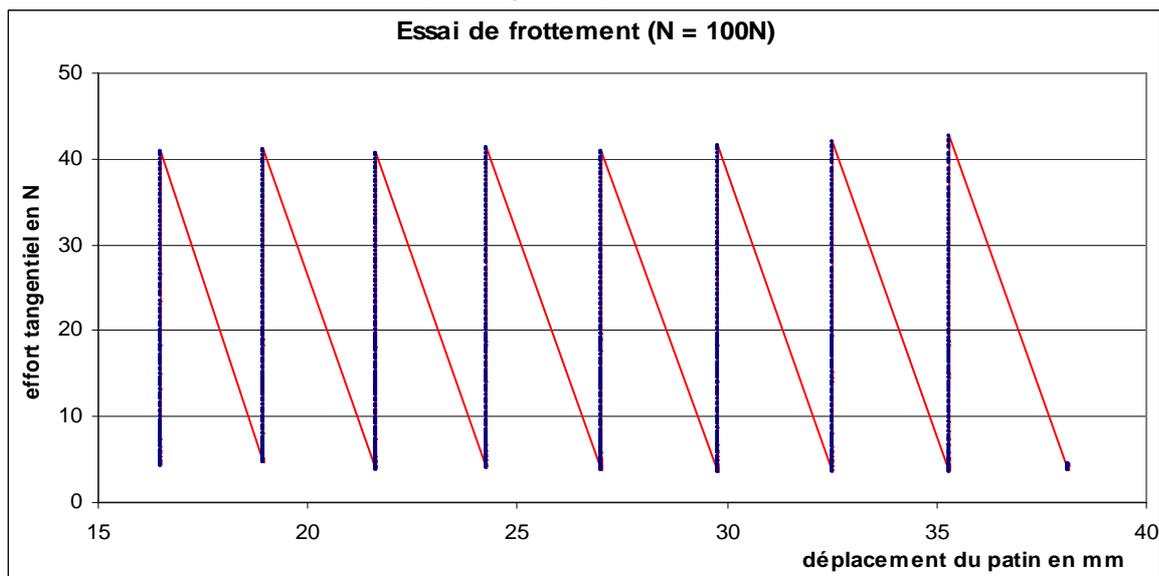


Figure 58 Courbe type des essais de frottement

Les informations relevées sont :

la moyenne des efforts tangentiels extrêmes (avant glissement) prise sur une dizaine de pics ;
 le déplacement moyen pendant le glissement (non utilisé car ne dépend que du dispositif) ;
 la vitesse de déplacement V de la traverse du banc d'essai est de 0,1 mm/s.

Des vitesses 10 et 100 fois plus faibles conduisent au même résultat (coefficient de frottement sensiblement plus fort).

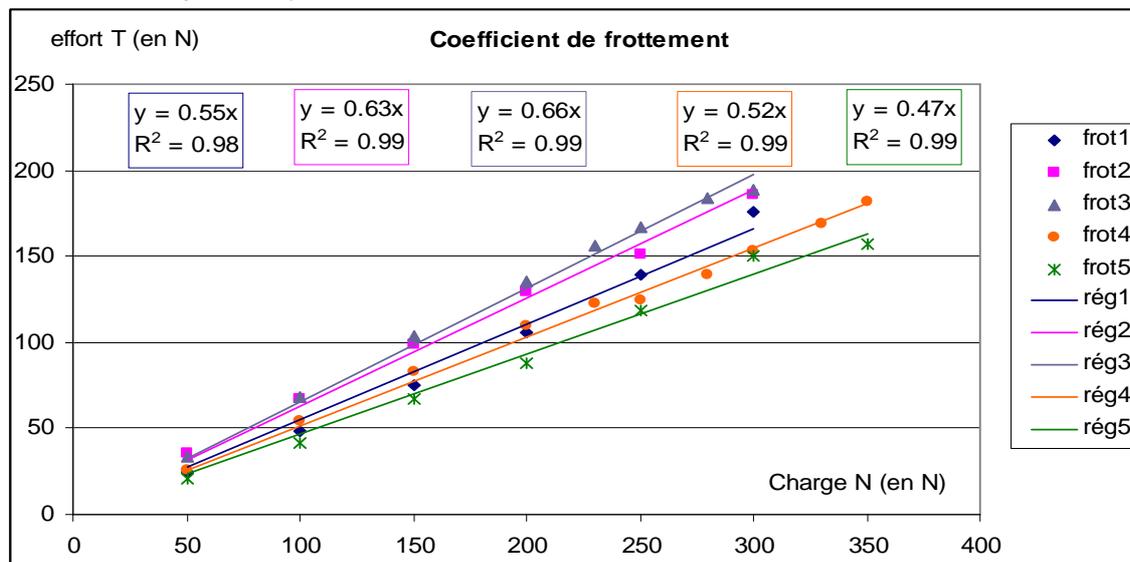


Figure 59 Graphique déterminant les coefficients de frottement bois-bois

Résultats :

Essai	Coefficient de frottement
1 : simplement raboté	0,55
2 : avec contre fil	0,63
3 : humidifié	0,66
4 : lustré	0,52
5 : poncé	0,47

Tableau 10 Coefficients de frottement bois – bois

2.6 Conclusion sur les comportements individuels

Pour conclure cette partie de l'étude, les propriétés mécaniques des lames utilisées dans la réalisation de poutres lamellées clouées sont définies par la mesure de 2 paramètres essentielles : la densité et le module d'élasticité en flexion.

Les autres propriétés sont définies par les relations :

$$E_{Tr} = 1600 \times \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,5}$$

$$G_{TrL} = 1150 \times \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,2}$$

$$G_{RT} = 380 \times \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,7}$$

$$\nu_{LTr} = 0,38$$

$$\nu_{TrL} = 0,042$$

$$\nu_{TR} = 0,52$$

Dans les conditions spécifiées de cette étude, le comportement d'un clou en cisaillement débute par une phase élastique, où une limite de glissement élastique est estimée à environ 0,015 mm et une limite élastique de 200 N (soit une raideur de 13600 N/mm). Au-delà de ces limites, le comportement du clou est de type plastique, la relation force déplacement est (dans les conditions spécifiées de cette étude) :

$$F(u) = 475 \times \rho \ln(16 \times u + 1,7).$$

L'effort maximum de reprise d'effort en cisaillement d'un clou est de l'ordre de 800N, pour un glissement d'environ 3mm. L'estimation de l'effort d'arrachement varie entre 472N et 1026N selon les codes de calculs utilisés.

Lorsque les clous sont rapprochés aux distances limites acceptables, un coefficient fonction du nombre de clous ($n^{-0,05}$, $n < 4$) réduit la raideur de l'assemblage.

Lorsque l'assemblage est constitué d'un grand nombre de clous répartis sur une grande longueur, la répartition des efforts dans les clous n'est pas uniforme. Les pointes situées aux extrémités de l'assemblage reçoivent des efforts plus importants, même si le cisaillement devait, à première vue, conduire à une répartition uniforme des efforts.

Enfin, le contact des lames induit par le frottement une certaine résistance au cisaillement. Le coefficient de frottement varie en fonction de l'état de surface (de contact), de l'orientation des fibres, et de l'humidité du bois. Globalement les essais ont permis d'évaluer le coefficient de frottement bois sur bois (gonfalo) entre 0,45 et 0,65. Ce coefficient de frottement (moyen de 0,55) permet de prendre en compte la relation de contact dans le calcul par éléments finis.

3 Etude structurelle

Cette partie présente les essais de flexion 4 points menés sur différentes poutres lamellées clouées. La première série d'essais porte sur des éléments de petites dimensions (50x1100mm), et la seconde sur des éléments de grandeur réelle type planche (20x3500mm).

Le comportement est caractérisé par un module d'élasticité de flexion. L'apport du clouage dans les performances d'une poutre lamellée en flexion est évalué par un paramètre G appelé « gain », défini par le rapport :

$$G = \frac{E_{\text{cloué}} - E_0}{E_{\text{collé}} - E_0} \quad \text{Avec :}$$

$E_{\text{cloué}}$, le module d'élasticité de la poutre composite clouée

E_0 , le module d'élasticité de la poutre composite sans assemblage

$E_{\text{collé}}$, le module d'élasticité de la poutre composite collée.

Le gain varie de 0% lorsque les lames dissociées, à 100% lorsque les lames collées.

3.1 Essais de flexion sur des éprouvettes clouées

3.1.1 Matériaux et matériels

Pour étudier l'influence de la densité de clouage, des couples d'éprouvettes (1100x27x50 mm) en gonfolo sont cloués avec trois types de pointes : lisses, torsadées et annelées, de 50 mm avec un nombre de clous « n » variant de 10 à 40, et éprouvée en flexion 4 points équidistants sur des appuis distants de 900 mm, dans les mêmes conditions décrites au chapitre 2.2.2. La vitesse de déplacement de la traverse de chargement de 3 mm/min.

Les mesures de déplacements sont effectuées en 5 endroits (1/6, 1/3, 1/2, 4/3, 5/6)

Les distances espaçant chaque clou des autres clous et du bord des éprouvettes, sont les suivantes :

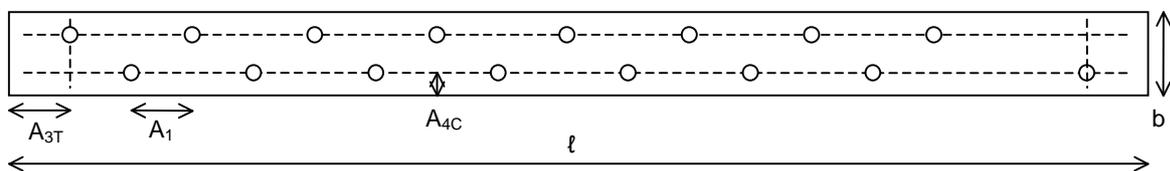


Figure 60 Plan de clouage

$$A_{3T} = 100 \text{ mm}$$

$$A_{4C} = 15 \text{ mm}$$

Nb clous	10	20	30	40	n
A_1 en mm	100	47,4	31,0	23,1	$(900/(n-1))$
Densité de clou en cl/dm ²	2	4,22	6,45	8,66	$(200/A_1)$

Tableau 11 Relation entre nombre de clous, distance entre clous et densité de clouage

Les modules d'élasticité sont déterminés par les courbes force – déplacement de chaque essai. Pour ne pas détériorer les éprouvettes lors de l'essai de flexion, un calcul préliminaire a défini le niveau de chargement extrême.

Calcul :

$$\sigma = Pl/(bh^2) = 70 \text{ MPa}$$

$$\text{Charge de rupture : } P = 50 \times 27^2 \times 70 / 900 = 2835 \text{ N}$$

Il n'y a pas de rupture à 100 daN de chargement pour les éprouvettes seules.

Le déplacement des rouleaux d'appuis sous ce chargement de 100 daN est d'environ :

$$f = 23Pl^3/(108Ebh^3) = 23 \times 1000 \times 900^3 / (27 \times 14000 \times 50 \times 27^3) \approx 45 \text{ mm}$$

Les éprouvettes superposées sont testées avec un chargement de 200 daN sans risque de ruine. Enfin l'essai sur les éprouvettes clouées peut être conduit jusqu'à la ruine, la limite matériel étant définie par le capteur de force (500 daN maxi) utilisé dans les essais sans clou.

3.1.2 Exploitation des données

Des déplacements et forces mesurés par les capteurs, les modules d'élasticité évalués par les formules (théorie des poutres en négligeant l'effort tranchant) suivantes :

$$\text{En } \frac{l}{6} \text{ ou } \frac{5l}{6} : E_1 = F/y \frac{23}{216 b} \left(\frac{l}{h}\right)^3$$

$$\text{En } \frac{l}{3} \text{ ou } \frac{2l}{3} : E_2 = F/y \frac{5}{27 b} \left(\frac{l}{h}\right)^3$$

$$\text{En } \frac{l}{2} : E_3 = F/y \frac{23}{108 b} \left(\frac{l}{h}\right)^3$$

Eprouvette	Humidité	Densité à h%	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E moyen
GonfDC01	13,96%	0,743	19097	19228	19253	19193
GonfDC02	13,85%	0,712	17047	17056	17152	17085
GonfDC03	13,43%	0,731	14234	13932	13842	14003
GonfDC04	16,21%	0,710	16469	16617	16644	16577
GonfDC05	15,99%	0,661	14297	14430	14486	14404
GonfDC06	16,34%	0,759	17763	17927	17773	17821
GonfDC07	15,39%	0,613	14398	14501	14567	14489
GonfDC08	15,69%	0,668	13914	13778	13812	13835
GonfDC09	15,67%	0,772	17757	17642	17488	17629
GonfDC10	13,19%	0,708	16761	16779	16820	16787
GonfDC11	16,20%	0,721	15636	15425	15743	15601
GonfDC12	14,28%	0,681	13938	13797	13630	13788
GonfDC13	16,04%	0,723	18736	18892	18934	18854
GonfDC14	16,32%	0,612	13793	13793	13734	13773
GonfDC15	15,80%	0,670	14755	14809	14863	14809
GonfDC16	14,34%	0,691	14891	14756	14616	14754
GonfDC17	15,34%	0,678	13894	13903	13906	13901
GonfDC18	14,73%	0,662	13333	13384	13442	13386
GonfDC19	13,17%	0,743	18148	18302	18352	18267
GonfDC20	14,14%	0,660	14947	15004	15070	15007
GonfDC21	15,95%	0,699	14784	14785	14824	14798
GonfDC22	15,58%	0,692	14028	13941	13953	13974
GonfDC23	16,05%	0,777	19062	19143	19107	19104
GonfDC24	15,08%	0,668	12971	13029	13049	13017
GonfDC25	15,14%	0,659	12730	12712	12734	12725
GonfDC26	15,16%	0,708	14274	14152	14159	14195
GonfDC27	16,55%	0,702	16627	16799	16897	16774
GonfDC28	13,73%	0,698	15574	15633	15627	15611
GonfDC29	14,30%	0,679	14448	14431	14433	14438
GonfDC30	13,67%	0,716	16457	16362	16390	16403
GonfDC31	14,89%	0,686	12697	12694	12700	12697
GonfDC32	14,62%	0,717	16032	15996	15893	15974
GonfDC33	15,21%	0,682	14189	14117	14084	14130
GonfDC34	14,05%	0,672	14890	14978	14991	14953
GonfDC35	16,35%	0,736	17464	17535	17569	17523
GonfDC36	16,52%	0,751	17781	17850	17925	17852
GonfDC37	13,89%	0,664	15345	15406	15433	15395
GonfDC38	12,66%	0,674	13930	13835	13864	13877
GonfDC39	14,22%	0,682	15605	15581	15608	15598
GonfDC40	13,08%	0,699	13245	13171	13195	13204
GonfDC41	15,15%	0,692	16408	16331	16282	16340
GonfDC42	16,38%	0,705	14903	14517	14295	14572
Moyenne	14,96%	0,697	15411	15404	15408	15408

Tableau 12 Propriétés des éprouvettes individuelles

Les 3 méthodes permettant de déterminer le module d'élasticité en flexion de chaque éprouvette donne un écart maximum moyen de 60 MPa (la moyenne étant de 15400 MPa).

Le bois est à 15% d'humidité la densité moyenne est de 0,7.

Remarque : l'effort tranchant est négligeable lorsque $l/h \gg 6$ or $l/h = 33$ dans l'essai.

La prise en compte de l'effort tranchant conduit à une estimation des modules d'élasticité en flexion supérieure de 1% en moyenne.

Les couples d'éprouvettes sont réalisés en suivant l'ordre de la numérotation des éprouvettes individuelles. Elles sont dans le pire des cas retournées pour que le contact des surfaces soit le meilleur possible.

Couples d'éprouvettes	type de clou	E_0 moyen (MPa)	Ecart maximum sur les 3 mesures	nb clous	densité cl/dm ²	$E_{\text{cloué}}$ moyen (MPa)	Ecart maximum sur les 3 mesures	$E_{\text{collé}}$ moyen (MPa)	Gain (%)
1	lisse	4900	15	10	2	4887	21	18340	-0,10
2	lisse	4084	11	10	2	4683	18	15430	5,28
3	lisse	4264	41	10	2	4628	49	16270	3,04
4	lisse	3799	28	20	4,22	4623	68	14280	7,86
5	lisse	4562	20	20	4,22	5673	60	17390	8,67
6	lisse	3906	20	20	4,22	4768	34	14820	7,90
7	lisse	4269	32	30	6,44	5148	121	16480	7,20
8	lisse	3912	19	30	6,44	5336	42	14910	12,9
9	lisse	3524	20	30	6,44	4916	38	13750	13,6
10	lisse	4380	37	30	6,44	5720	71	16810	10,8
11	lisse	3890	24	40	8,67	5105	22	14510	11,4
12	lisse	4175	7	40	8,67	5445	13	16220	10,5
13	lisse	3573	15	40	8,67	4713	9	13570	11,4
14	torsadé	4292	26	10	2	4796	36	16350	4,19
15	torsadé	3994	17	20	4,22	5021	16	15560	8,88
16	torsadé	3793	8	30	6,44	5947	30	14460	20,2
17	torsadé	3807	28	40	8,67	5229	28	14670	13,1
18	annelé	4742	30	10	2	5167	15	17880	3,24
19	annelé	3843	16	20	4,22	4936	18	14760	10,0
20	annelé	3833	11	30	6,44	5875	77	14520	19,1
21	annelé	4088	37	40	8,67	5226	8	15600	9,89

Tableau 13 Propriétés des couples d'éprouvettes clouées et gain par rapport au collage

Les modules d'élasticité sont les moyennes des 3 modules calculés avec les pentes mesurées aux 3 points de l'éprouvette.

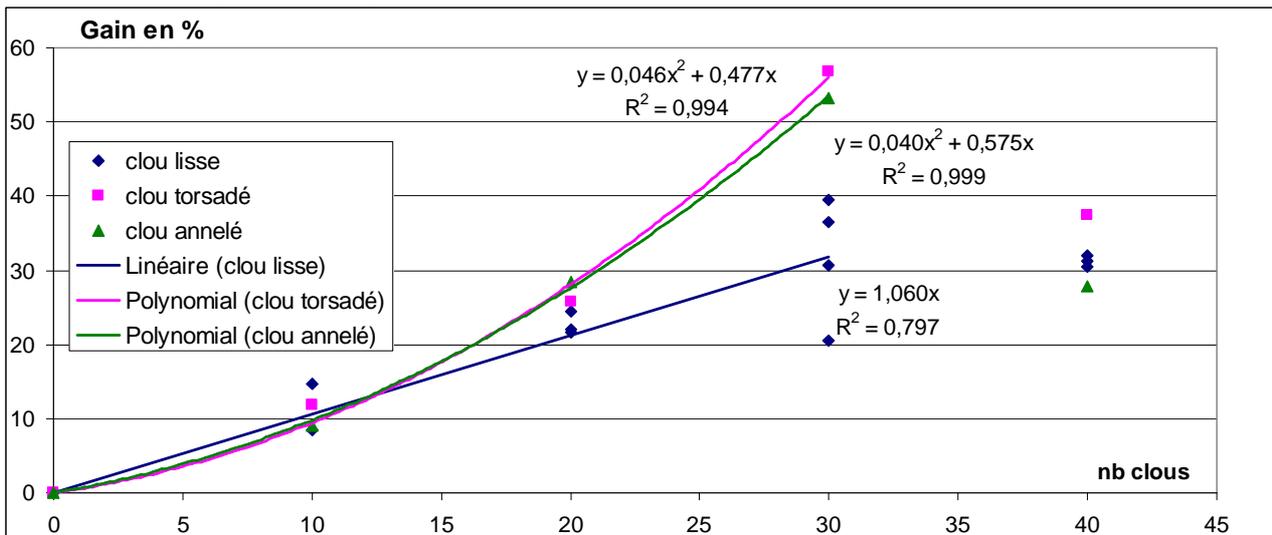


Figure 61 Gain fonction de la densité de clouage

Au-delà de 7 clous par décimètre carré le bois se fissure dès la mise en place des clous. (Les éprouvettes ont une dimension insuffisante pour le clouage). A nombre de pointes égales, les pointes lisses donnent globalement un gain plus faible avec un accroissement 1,75% / (clou/dm²).

Les clous torsadés et annelés créent moins de dégâts lorsque la densité des pointes augmente. Le gain présente une évolution polynomiale d'ordre 2 avec le nombre de pointes.

3.2 Essais de flexion sur des planches clouées

3.2.1 Matériaux et matériels

Les planches en gonfalo rabotées (3500x196x27 mm) ont une densité moyenne de 0,75 et une humidité moyenne de 16%. Les débits sont sur dosse.

Chaque planche est éprouvée individuellement en flexion 4 points sans endommagement sur un banc d'essai dont les appuis sont espacés de 1m les uns des autres. (Chargement à 2500 N).

Outre le bâti et le vérin générant la contrainte de flexion, le banc d'essai est équipé de :

une cellule de force de 100kN (précision de 1‰, soit 10 daN)

un capteur de déplacement des appuis intérieurs

un capteur de déplacement par laser du point inférieur central de la poutre

un appareil de mesure de la courbure (appelé fléchomètre) situé sur la partie supérieure au centre de la poutre.

Le « fléchomètre » repose sur 3 appuis distants (2 à 1) de $l' = 510$ mm. Deux tiges métalliques relient les appuis et supportent un capteur de déplacement transversal. Le rayon de courbure R de la poutre est fonction de la flèche f mesurée par le capteur de déplacement :

$$R = \frac{f}{2} + \frac{32510}{f}$$

Le paramètre ressortant est la pente obtenue avec le rapport du déplacement mesuré et de la force exercée par le vérin du banc d'essai.

Le module d'élasticité est directement proportionnel à la pente suivant une formule obtenue par la théorie des poutres (en négligeant les efforts tranchants) :

$$E = \frac{3 \cdot (l-a) \times l^2}{8 \cdot bh^3} \times \text{pente}$$

Les dimensions étant identiques pour toutes les planches, le module d'élasticité est environ 50,6 x pente en MPa, avec la pente en N/mm.

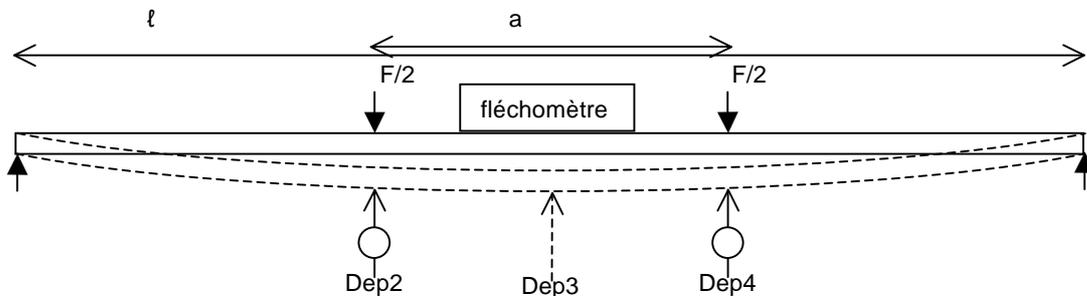


Figure 62 Schéma de flexion



Figure 63 Fléchomètre

Les planches sont caractérisées sans distinction particulière.

Eprouvette	humidité	largeur	épaisseur	longueur	densité	pente	Module
	%	mm	mm	mm		N/mm	MPa
G 1	13,4	196,2	26,8	3502	0,726	381,7	19727
G 2	13,2	196,3	26,9	3502	0,713	358,9	18360
G 3	14,3	196,4	26,8	3502	0,776	334,5	17175
G 4	13,9	196,1	27,0	3502	0,749	389,5	19691
G 5	14,4	196,3	27,0	3502	0,776	375,3	18907
G 6	13,8	196,7	26,8	3502	0,745	389,4	19957
G 7	13,4	196,2	26,9	3502	0,727	326,9	16731
G 8	13,6	196,5	26,8	3502	0,738	367,9	18935
G 9	14,2	196,3	26,8	3502	0,770	380,8	19559
G 10	13,8	196,2	26,9	3502	0,743	360,4	18310
G 11	14,4	196,5	27,0	3502	0,773	416,1	20881

Tableau 14 Propriétés des planches individuelles

Les couples de planches sont réalisés de façon à ce que les déformations permettent la réalisation d'une poutre sans induire d'effort d'arrachement dans les clous, et que les modules d'élasticité soient le plus proches possible.

Les couples de planches sont à la suite cloués avec différentes densités de clous selon les plans de clouages suivants :

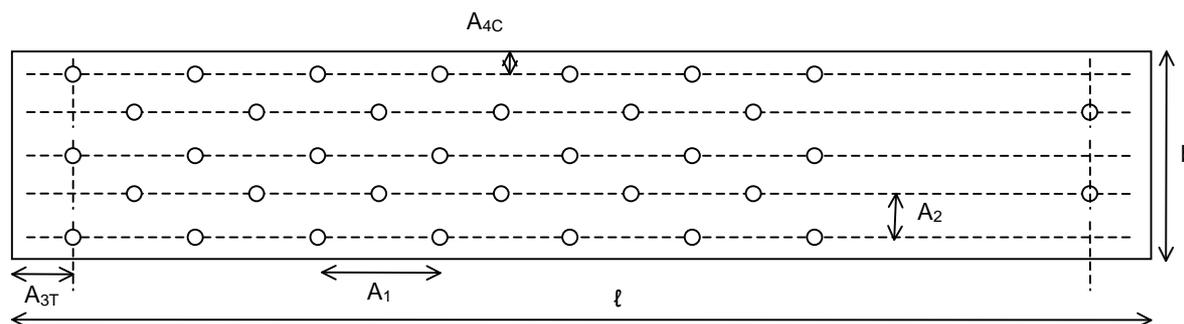


Figure 64 Plan de clouage avec 5 rangées de clous

$l = 3500 \text{ mm}$
 $b = 200 \text{ mm}$
 $A_{3T} = 100 \text{ mm}$
 $A_{4C} = 15 \text{ mm}$
 $A_2 = 34 \text{ mm}$

Nb de clous n	57	81	105	129	160	165	350	600
Nb de rangée	3	3	3	3	3	3	5	5
A_1 en mm	183	127	97	79	106	61	48	28
Densité de clou en cl/dm ²	0,89	1,26	1,63	2,00	2,56	2,49	5,36	9,45

Tableau 15 Correspondance entre nombre et rangées de clous avec la densité de clouage

ETUDE STRUCTURELLE

A partir de deux planches, 5 poutres bilames clouées ont été réalisées avec une densité croissante de clouage (0,89 ; 1,26 ; 1,63 ; 2,00 et 2,49 clous/dm²), en densifiant de l'extrémité vers le centre de la poutre.

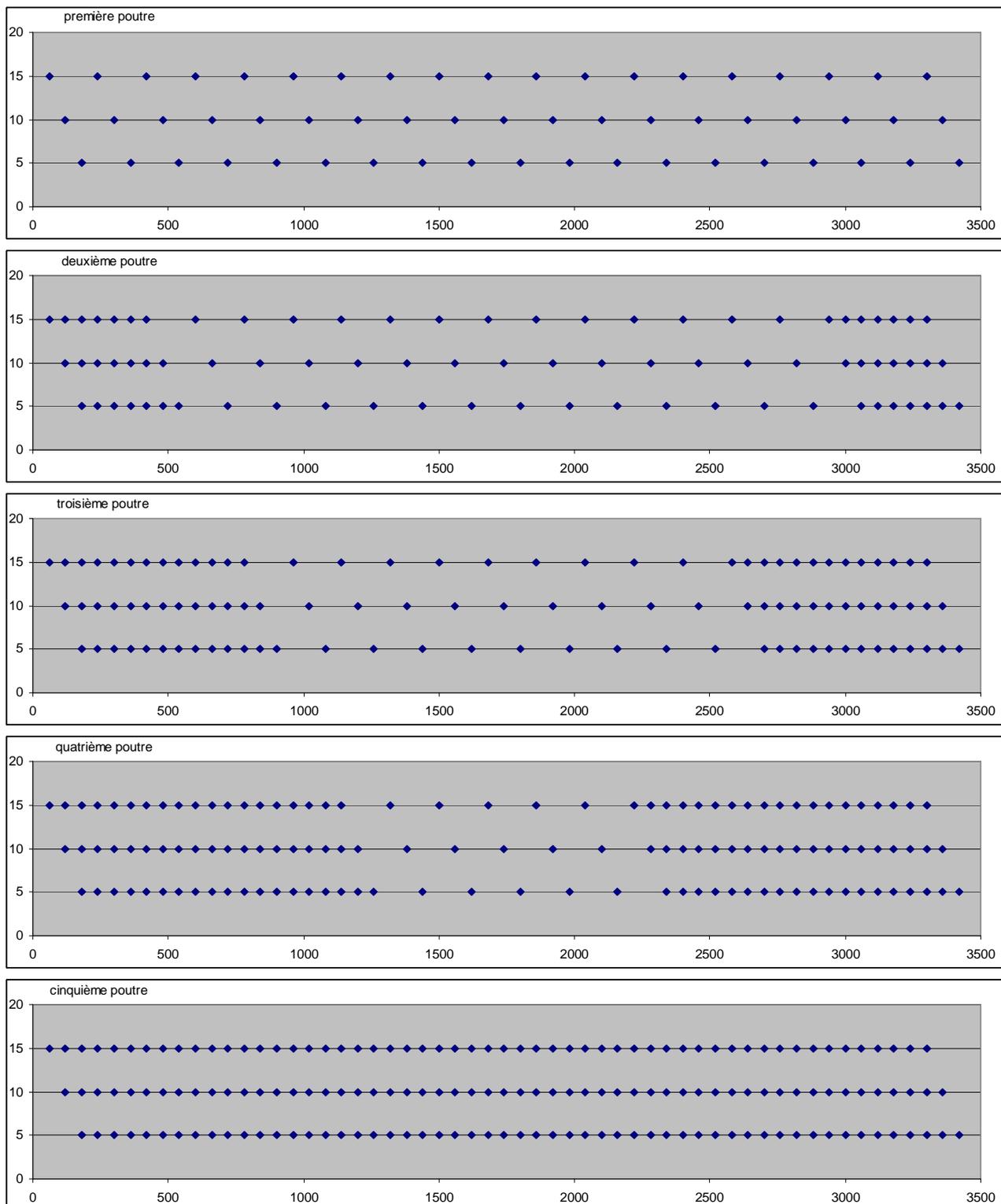


Figure 65 Plans de clouage des 5 poutres réalisées avec 2 planches et 3 rangées de clous

3.2.2 Exploitation des données

Le module d'élasticité reste proportionnel à la pente :

$$E = \frac{3 \cdot (l-a) \times l^2}{8 \cdot bh^3} \times \text{pente}$$

Les dimensions étant identiques pour toutes les planches, le module d'élasticité, pour un couple de planches superposées, est environ 6,32 x pente en MPa, avec la pente en N/mm.

Le chargement des couples de planches est fractionné en trois parties.

Une première série (répétée 4 fois) de chargements pour que le fléchomètre passe de 0 à 150 µm (R = 216,75m);

puis un deuxième de 0 à 1000 µm (R = 32,51m);

et enfin une troisième de 0 à 2000 µm (R = 16,26m).

Dans chaque étape, la pente et le déplacement résiduel du fléchomètre sont relevés en moyenne et en fin de chargement.

Notation : G9R1 est constituée des planches G1 et G2. R indique qu'une des planches a été retournée pour un meilleur contact, car elles n'étaient pas complètement planes.

Les lettres a, b, c, d et e indiquent une différence de densité de clouage (croissante).

G611 est constituée des planches G6 et G11...

Eprouvette		G9R1	G9R1a	G9R1b	G9R1d	G9R1e	G611	G210	G73
densité cl	clou/dm ²	0,89	1,26	1,63	2,00	2,56	2,49	5,36	9,45
E collé	MPa	19643	19643	19643	19643	19643	20419	18335	16953
E sans clou	MPa	4922	4922	4922	4922	4922	5130	4748	4527
F1 à 150µm	N	318	357	390	405	424	431	411	389
E1	MPa	13392	15053	16439	17081	17867	18144	17312	16397
gain 1	%	57,5	68,8	78,2	82,6	87,9	85,1	92,5	95,5
F2 à 1mm	N	1309	1482	1639	1815	2033	2032	2318	2484
E2	MPa	8273	9369	10357	11473	12848	12842	14652	15699
gain 2	%	22,8	30,2	36,9	44,5	53,8	50,4	72,9	89,9
F3 à 2mm	N	2056	2434	2667	2986	3312	3290	4071	4662
E3	MPa	6496	7692	8429	9435	10465	10397	12863	14732
gain 3	%	10,7	18,8	23,8	30,7	37,7	34,5	59,7	82,1

Tableau 16 Propriétés des couples de planches clouées et gain par rapport au collage

A la fin des chargements de la première série, le fléchomètre revient à sa position initiale.

A la fin des chargements de la deuxième série, le fléchomètre indique un rayon de courbure compris entre 160 et 220 m. (150µm < f < 200µm)

A la fin des chargements de la troisième série, le fléchomètre indique un rayon de courbure compris entre 37 et 65 m. (540µm < f < 880µm)

Remarque : le rayon de courbure résultant est d'autant plus fort que la densité de clou est importante. Une fois déchargés, les couples d'éprouvettes présentent un retour viscoélastique vers sa forme initiale (sans l'atteindre).

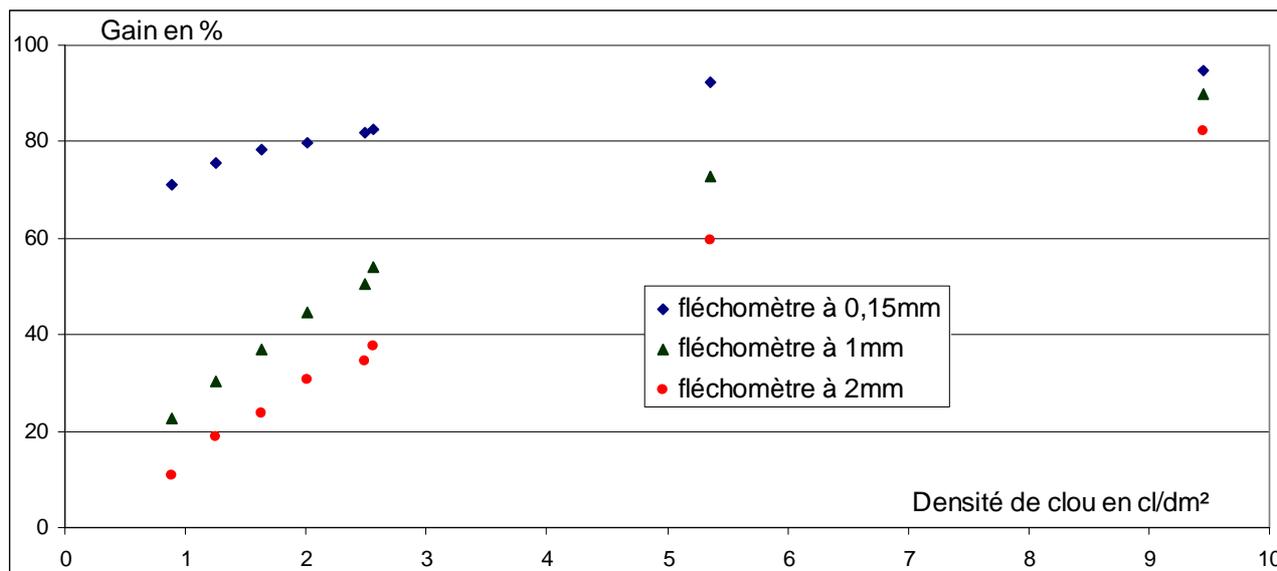


Figure 66 Evolution du gain en fonction de la densité de clouage selon les trois épreuves de flexion

Pour des chargements faibles, une faible densité de clou permet d'atteindre un gain satisfaisant assez rapidement ; densifier le clouage à ce moment devient superflu.

En revanche pour un chargement plus important, le gain croît plus régulièrement avec l'augmentation de la densité de clouage, dans une plage de densité de clou comprise entre 1 et 10 clous/dm².

Les modules d'élasticité des poutres sont calculés à partir de l'effort et de la déformation absolus.

Ceci est parfaitement compréhensible lorsque les lames ne comprennent pas d'assemblage, ou lorsqu'elles sont collées (le module d'élasticité étant constant lors du chargement).

Cependant lorsque les lames sont clouées, le module d'élasticité absolu décroît au fur et à mesure du chargement. En fait à un niveau de chargement il conviendrait de définir un module apparent avec une déformation correspondante de la poutre.

La pente ne serait plus calculée par la formule :

$$\text{pente} = \frac{\text{Force}_{\text{flexion}}}{\text{déplacement}_{\text{mesuré}}}$$

$$\text{mais par pente}' = \frac{\Delta \text{Force}_{\text{flexion}}}{\Delta \text{déplacement}_{\text{mesuré}}}$$

Par simplification et par hypothèse de conservation, cette déformation initiale n'est pas estimée et le module d'élasticité est sous estimé avec le module apparent.

Les différentes poutres réalisées permettent ainsi de comparer les gains en fonction de la densité du clouage.

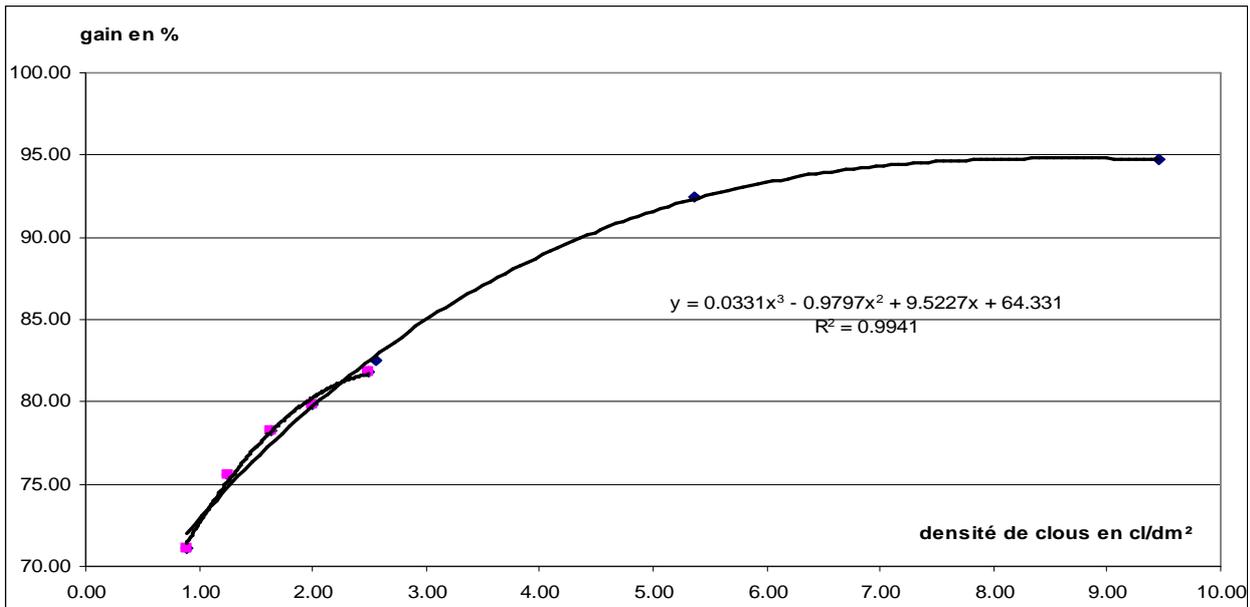


Figure 67 Gain initial fonction de la densité de clouage

L'équation de régression $G = 0,033 \times d^3 - 0,98 \times d^2 + 9,52 \times d + 64,3$ n'est acceptable que pour une densité d comprise entre 1 et 10 clous. On peut attendre une asymptote à un gain de 95% (voire une chute puisque le bois est dégradé avec une densité de clous élevée).

Jusqu'à 10 clous/dm² le bois ne fissure pas (à la mise en place et lors de l'essai).

Aux alentours de 1 clou/dm², l'accroissement du gain est de 12% par clou au décimètre carré supplémentaire, alors qu'aux environs de 10 clous/dm², l'accroissement du gain est au plus de 0,3% par clou au décimètre carré supplémentaire.

La densité de 10 clous/dm² présente un comportement des poutres assez proches du collage.

Parmi ces données, les 5 essais dont les densités de clous sont les plus faibles ont été réalisés avec les mêmes planches. La densité de 0,89 clous/dm² est obtenue avec 19 rangées (diagonales) de 3 clous espacés tous le 18 cm sur 3,30 m. Les densités suivantes sont obtenues en comblant les 2 derniers espacements des extrémités avec 4 fois 6 clous, puis les 2 avants derniers, et ainsi de suite pour obtenir une densité uniforme de 2,5 clous/dm² soit 55 rangées de 3 clous sur 3,30 m.

On remarque donc que les clous disposés aux extrémités apportent plus rapidement de meilleures des propriétés mécaniques.

L'écartement des lames lors de l'essai montre que des organes d'assemblages transverses tels que des boulons doivent être utilisés pour que les clous travaillent dans les meilleures conditions.

Il faut noter que la courbure permanente prise par l'ensemble des deux planches clouées après une flexion de forte amplitude (1000 ou 2000µm) est forte lorsque les deux planches ne sont pas parfaitement jointes (jour visible par endroits entre les deux planches sur la tranche) après clouage. Cela montre la nécessité des organes d'assemblages transverses tels que des boulons pour effectuer le serrage transversal que les clous ne peuvent assumer.

3.3 Conclusion sur l'étude structurelle

Ces essais permettent de se rendre compte de la réalité du problème. Dans le cas des éprouvettes, les dimensions sont insuffisantes pour couvrir la plage de densités de clouage désirée. L'utilisation de pointes annelées et torsadées limite le risque de fendage du bois. Les planches clouées ne fendent pas même avec des densités de clouage plus importantes. La densification du plan de clouage aux extrémités améliore les propriétés mais insuffisamment par rapport aux difficultés industrielles et de contrôle qu'induit cette disposition.

L'intérêt de ces essais est de comparer les gains réels avec les gains calculés par la méthode des éléments finis exposée dans la partie suivante.

4 Modélisation

Cette partie est destinée à définir une méthode de calcul, suffisamment précise pour prédire le comportement en flexion d'un bilame lamellé cloué et sa performance avec le gain. Le calcul par éléments finis est mené sur le logiciel CASTEM développé par le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique).

Le problème est approché par étapes successives : flexion d'une lame simple, d'une poutre constituées de 2 lames dissociées, collées, puis clouées en comparant les résultats numériques aux résultats expérimentaux. Un paragraphe traite le problème de détermination du comportement en flexion d'une poutre lamellée dont les lames ont des propriétés différentes. Un autre paragraphe est consacré à l'étude de la répartition des pressions de contact, que génèrent les lames les une sur les autres, et qui de ce fait modifie la nature de la sollicitation globale. Et enfin un dernier paragraphe est réservé à l'étude des conséquences de la prise en compte du frottement.

4.1 Modélisation d'une lame en flexion

Le problème est ramené sur deux dimensions par un calcul en éléments finis avec CASTEM. Par symétrie, l'éprouvette subissant une flexion 4 points équidistants est modélisée sur sa moitié. Les appuis sont modélisés par des demi rouleaux de 25 mm de diamètre. Les rouleaux étant libres en rotation, le contact avec l'éprouvette conduit à un coefficient de frottement nul.

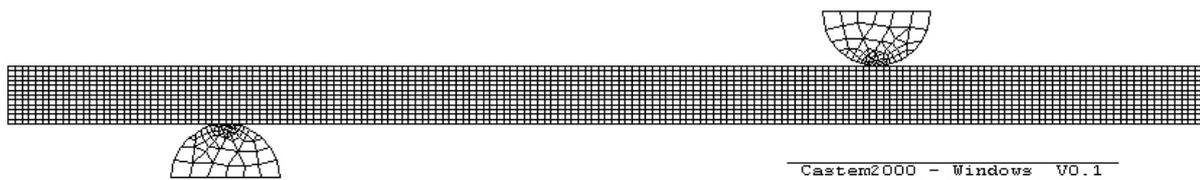


Figure 68 Maillage d'une demie éprouvette en flexion 4 points

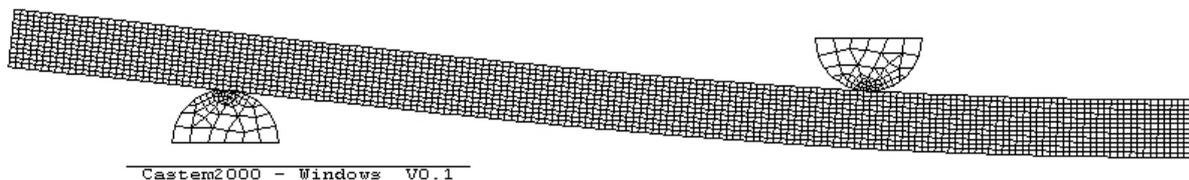


Figure 69 Déformation de la demie éprouvette en flexion 4 points

Le module d'élasticité en flexion E, a été déterminé par un essai en flexion est une formule mathématique issue de la théorie des poutres en négligeant les efforts tranchants.

Rappel : $E = \frac{5 \cdot \text{pente} \cdot (\ell/h)^3}{27 \cdot b}$ où pente est le rapport force / déplacement des points situés sous

les appuis intérieurs.

Dans la configuration d'éprouvettes de 54x50 mm dans un banc de flexion 4 points équidistants de 900mm au total, la relation donne $E = 17,15 \times \text{pente}$ (ou pente = 0,0583 x E)

En ne négligeant pas les efforts tranchants, la relation est un peu plus compliquée :

$$E' = \frac{\frac{10 \cdot \ell^2}{9} - v_{LTr} \cdot (h^2 + e^2)}{\frac{6 \cdot e \cdot h^3}{\ell \cdot \text{pente}} - \frac{h^2}{G_{TrL}}}$$

relation polynomiale du second degré : $\text{Pente} = -2 \cdot 10^{-7} \cdot E^2 + 0.0583 \cdot E$

La modélisation par éléments finis donne une relation sensiblement différente des deux relations précédemment établies. En outre, il est à rappeler que la précision du modèle en éléments finis est limitée par la taille des éléments qui le composent (maillage) et que par rapport au modèle mathématique exposé dans le chapitre 2, ce modèle prend en compte des appuis sur rouleaux non purement ponctuels.

La corrélation entre la flèche et le module d'élasticité est réalisée au niveau de l'appui intérieur.

Le maillage est effectué sur l'éprouvette, de section projetée 27x550 mm, en 12 couches et 176 tranches, soit une finesse d'éléments de 2,25x3,125 mm.

Dans cette configuration (éprouvette de 54x50 mm dans un banc de flexion 4 points équidistants de 900mm au total), la théorie des poutres et le calcul par éléments finis donnent des résultats très proches. Le modèle mathématique prenant en compte l'effort tranchant diverge sensiblement lorsque le module d'élasticité est plus important.

Exemple sur une éprouvette de section $b = 50\text{mm}$; $h = 54\text{mm}$; $l = 900\text{mm}$, en flexion quatre points équidistants.

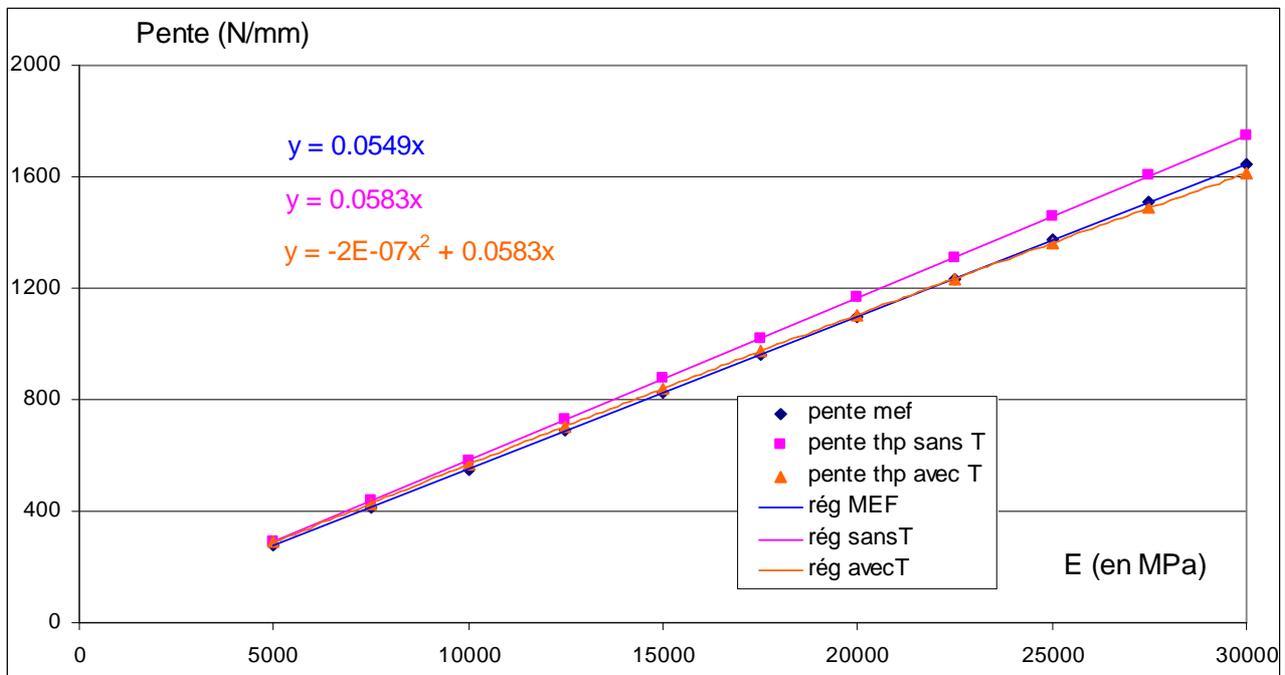


Figure 70 Comparaison des méthodes reliant le module d'élasticité et la pente (méthode des éléments finis et théorie des poutres avec et sans efforts tranchants T)

Le rapport (longueur/hauteur) est de $16,7 < 20$ dans cet exemple, pour mettre en évidence la différence entre la prise en compte de l'effort tranchant et son ignorance.

4.2 Comportement en flexion d'un lamellé collé

Si les propriétés mécaniques des lames sont les mêmes, on obtient simplement le même matériau avec une retombée plus importante.

Si les propriétés mécaniques des lames sont différentes, on obtient un matériau dont le module d'élasticité est dépendant des élasticités des éprouvettes qui le composent.

Rappel : Avec l'hypothèse de Navier et Bernoulli, pour une poutre homogène et régulière, les sections restent perpendiculaires à l'axe neutre avant et après déformation.

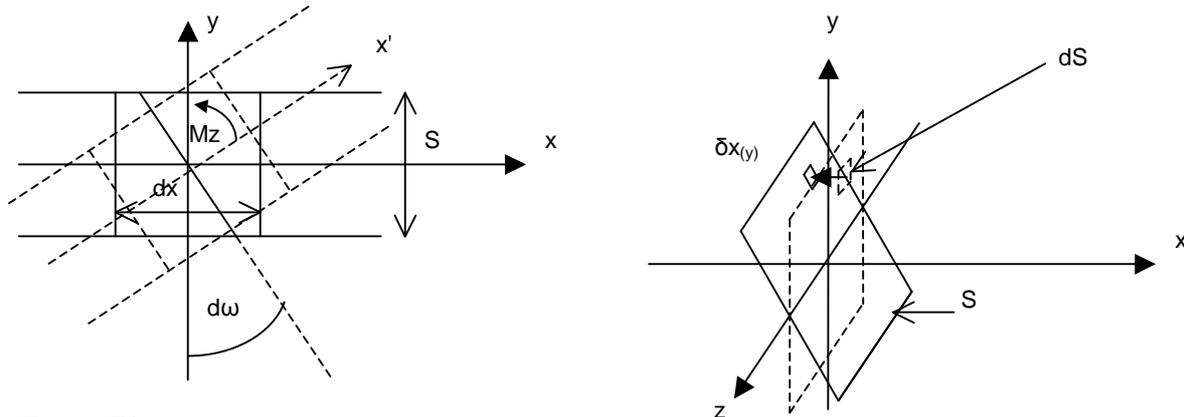


Figure 71 Hypothèse de Navier et Bernouilli pour l'application de la théorie des poutres

En outre :

$$N = \int_S \sigma \, dS \quad \text{et} \quad M = \int_S \sigma \cdot y \, dS$$

Si la section S reste plane et inclinée d'un angle $d\omega$ pour une épaisseur de matériau dx , alors pour une petite section dS (de hauteur dy et de largeur dz), située à une hauteur y par rapport à l'axe neutre orienté par x , le niveau de contrainte est $\sigma_{(y)} = a \cdot y$

L'angle $d\omega$ peut être exprimé en fonction de $\delta x_{(y)}$ par : $\text{tang}(d\omega) = \frac{\delta x_{(y)}}{y}$ ce qui pour des angles

très petits peut être approximé par $d\omega = \frac{\delta x_{(y)}}{y} = a$

Dans le domaine élastique, la contrainte et la déformation sont liées par la loi de Hooke :

$$\sigma_{(y)} = E \delta x_{(y)} = E d\omega y$$

$$N = \int_S \sigma \, dS = \int_z \int_y E a y \, dz \, dy = E a \int_y a y \, dy = \int_y E a y \, dy = E a \left[\frac{ay^2}{2} \right]_{-h/2}^{h/2} = 0$$

$N = 0$ si l'axe neutre passe au milieu de la section par rapport à l'axe y .

$$M = \int_S \sigma \cdot y \, dS = E a \int_z \int_y y^2 \, dz \, dy = E a I_z$$

Avec $I_z = \int_S y^2 \, dS$ (moment d'inertie quadratique)

Pour une section rectangulaire de largeur e et de hauteur h

$$I_z = \int_S y^2 \, dS = \int_z \int_y y^2 \, dz \, dy = \left[\frac{zy^3}{3} \right]_{-h/2}^{h/2} = \frac{eh^3}{12}$$

On obtient : $M = E I_z d\omega$, avec $\sigma_{\max} = Mf / (I_z/v)$ la contrainte maximale et $M = E I_z \ddot{y}$ pour déterminer la déformée de la poutre.

4.2.1 2 Lames collées

Dans l'hypothèse où la poutre est constituée de deux planches d'élasticité E_1 et E_2 de hauteur h .

$$\varepsilon = a.y + b$$

$$\sigma_{(y)} = E(y) \times \varepsilon$$

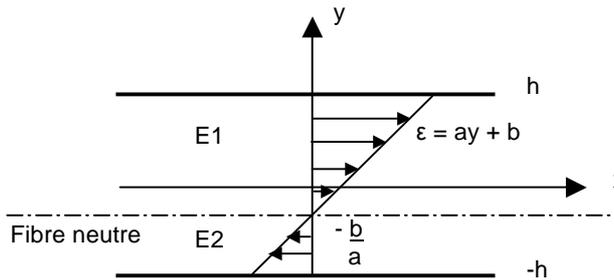


Figure 72 Répartition des déformations dans une poutre à 2 planches

L'axe neutre se situant à $y = -\frac{b}{a}$

$$N = \int_S \sigma \, dS = \int_{S_1} \sigma \, dS + \int_{S_2} \sigma \, dS = 0$$

$$\frac{N}{e} = E_2 \cdot \left[\frac{ay^2}{2} + b.y \right]_{-h}^0 + E_1 \cdot \left[\frac{ay^2}{2} + b.y \right]_0^h = \frac{ah^2}{2} (E_1 - E_2) + bh \cdot (E_1 + E_2) = 0$$

$$\text{D'où } \frac{b}{a} = \frac{h.(E_2 - E_1)}{2.(E_2 + E_1)}$$

$$M = \int_S \sigma y \, dS = \int_{S_1} \sigma y \, dS + \int_{S_2} \sigma y \, dS$$

$$\frac{M}{e} = E_2 \cdot \left[\frac{ay^3}{3} + \frac{by^2}{2} \right]_{-h}^0 + E_1 \cdot \left[\frac{ay^3}{3} + \frac{by^2}{2} \right]_0^h = \frac{ah^3}{3} \cdot (E_1 + E_2) + \frac{bh^2}{2} \cdot (E_1 - E_2)$$

En comparaison avec un matériau équivalent homogène d'élasticité E_q d'une hauteur de $2h$:

$$\frac{M}{e} = \frac{8 ah^3}{12} \cdot E_q$$

$$\text{Soit } E_q = \frac{4.(E_2 + E_1)^2 - 3.(E_2 - E_1)^2}{8.(E_2 + E_1)}$$

Remarques : Cette relation est vraie pour $E_2 > E_1$ ou le contraire et surtout dans l'hypothèse où les poutres restent très élancées : hauteur totale inférieure au vingtième de la longueur.

Le module d'élasticité résultant de la poutre est inférieur à la moyenne des modules des lames qui la compose. « La propriété globale est tirée par les propriétés les plus faibles »

E1 \ E2	5000	7500	10000	12500	15000	17500	20000	22500	25000
5000	100,0	97,0	91,7	86,2	81,3	76,9	73,0	69,6	66,7
7500	97,0	100,0	98,5	95,3	91,7	88,0	84,5	81,3	78,3
10000	91,7	98,5	100,0	99,1	97,0	94,4	91,7	88,9	86,2
12500	86,2	95,3	99,1	100,0	99,4	97,9	96,0	93,9	91,7
15000	81,3	91,7	97,0	99,4	100,0	99,6	98,5	97,0	95,3
17500	76,9	88,0	94,4	97,9	99,6	100,0	99,7	98,8	97,7
20000	73,0	84,5	91,7	96,0	98,5	99,7	100,0	99,7	99,1
22500	69,6	81,3	88,9	93,9	97,0	98,8	99,7	100,0	99,8
25000	66,7	78,3	86,2	91,7	95,3	97,7	99,1	99,8	100,0

Tableau 17 Proportion en pourcentage entre le module d'élasticité résultant de la poutre et la moyenne des modules des lames qui la compose

4.2.2 Plus de 2 lames collées

4.2.2.1 Nombre de lames pair

Soit n tel que la poutre est constituée de 2n planches d'élasticité $E_{inf,i}$ et $E_{sup,j}$, de largeur e, et de hauteur h.

$$\varepsilon = a.y + b$$

$$\sigma_{(y)} = E(y) \times \varepsilon$$

L'axe neutre se situant à $y = -\frac{b}{a}$

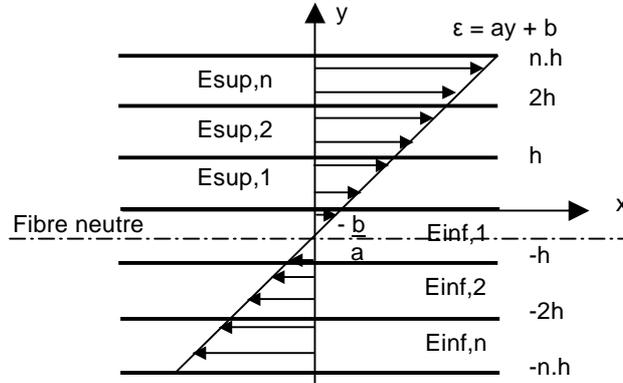


Figure 73 Répartition des déformations dans une poutre à 2n planches

$$N = \int_S \sigma \, dS = \sum_{i=1}^{i=n} \int_{S_{inf,i}} \sigma \, dS + \sum_{j=1}^{j=n} \int_{S_{sup,j}} \sigma \, dS$$

$$\frac{N}{e} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left[\frac{ay^2}{2} + b.y \right]_{-i.h}^{(1-i).h} + \sum_{j=1}^{j=n} E_{sup,j} \cdot \left[\frac{ay^2}{2} + b.y \right]_{(j-1).h}^{j.h}$$

$$\frac{N}{e} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left(\frac{a(i-1)^2 h^2}{2} - b(i-1)h - \frac{ai^2 h^2}{2} + bih \right) + \sum_{j=1}^{j=n} E_{sup,j} \cdot \left(\frac{aj^2 h^2}{2} + bjh - \frac{a(j-1)^2 h^2}{2} - b(j-1)h \right)$$

$$\frac{N}{e} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left(\frac{ah^2}{2} \cdot [(i-1)^2 - i^2] + bh \cdot [(i-1) - i] \right) + \sum_{j=1}^{j=n} E_{sup,j} \cdot \left(\frac{ah^2}{2} \cdot [j^2 - (j-1)^2] + bh \cdot [j - (j-1)] \right)$$

$$\frac{N}{e} = \frac{ah^2}{2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} ((2i-1) (E_{sup,i} - E_{inf,i})) + bh \cdot \sum_{j=1}^{j=n} (E_{sup,j} + E_{inf,j})$$

$$\frac{N}{e} = 0 \quad \text{D'où} \quad \frac{b}{a} = -\frac{h}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=n} ((2i-1) (E_{sup,i} - E_{inf,i}))}{\sum_{j=1}^{j=n} (E_{sup,j} + E_{inf,j})}$$

$$M = \int_S \sigma \cdot y \, dS = \sum_{i=1}^{i=n} \int_{S_{inf,i}} \sigma \cdot y \, dS + \sum_{j=1}^{j=n} \int_{S_{sup,j}} \sigma \cdot y \, dS$$

$$\frac{M}{e} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left[\frac{ay^3}{3} + \frac{by^2}{2} \right]_{-i \cdot h}^{(1-i) \cdot h} + \sum_{j=1}^{j=n} E_{sup,j} \cdot \left[\frac{ay^3}{3} + \frac{by^2}{2} \right]_{(j-1) \cdot h}^{j \cdot h}$$

$$\frac{M}{e} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left(-\frac{a(i-1)^3 h^3}{3} + \frac{b(i-1)^2 h^2}{2} + \frac{ai^3 h^3}{3} - \frac{bi^2 h^2}{2} \right)$$

$$+ \sum_{j=1}^{j=n} E_{inf,i} \cdot \left(\frac{aj^3 h^3}{3} + \frac{bj^2 h^2}{2} - \frac{a(j-1)^3 h^3}{3} - \frac{b(j-1)^2 h^2}{2} \right)$$

$$\frac{M}{e} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left(\frac{ah^3}{3} \cdot [i^3 - (i-1)^3] + \frac{bh^2}{2} \cdot [(i-1)^2 - i^2] \right)$$

$$+ \sum_{j=1}^{j=n} E_{sup,j} \cdot \left(\frac{ah^3}{3} \cdot [j^3 - (j-1)^3] + \frac{bh^2}{2} \cdot [j^2 - (j-1)^2] \right)$$

$$\frac{M}{e} = \frac{ah^3}{3} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} ((3i^2 - 3i + 1) (E_{sup,i} + E_{inf,i})) + \frac{bh^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{j=n} ((2j-1) (E_{sup,i} - E_{inf,i}))$$

$$\frac{M}{e} = \frac{ah^3}{12} \cdot \left(4 \times \sum_{i=1}^{i=n} ((3i^2 - 3i + 1) (E_{sup,i} + E_{inf,i})) - 3 \times \frac{\left(\sum_{j=1}^{j=n} ((2j-1) (E_{sup,j} - E_{inf,j})) \right)^2}{\sum_{k=1}^{k=n} (E_{sup,k} + E_{inf,k})} \right)$$

En comparaison avec un matériau équivalent homogène d'élasticité E_q d'une hauteur de $2nh$:

$$\frac{M}{e} = \frac{8an^3 h^3}{12} \cdot E_q \quad 2n \text{ planches}$$

$$\text{Soit } E_q = \frac{1}{8n^3} \cdot \left(4 \times \sum_{i=1}^{i=n} ((3i^2 - 3i + 1) (E_{sup,i} + E_{inf,i})) - 3 \times \frac{\left(\sum_{j=1}^{j=n} ((2j-1) (E_{sup,j} - E_{inf,j})) \right)^2}{\sum_{k=1}^{k=n} (E_{sup,k} + E_{inf,k})} \right)$$

4.2.2.2 Nombre de lames impair

Soit n tel que la poutre est constituée de $2n + 1$ planches d'élasticité $E_{inf,i}$, E_0 et $E_{sup,j}$, de largeur e , et de hauteur h .

$$\varepsilon = a.y + b$$

$$\sigma_{(y)} = E(y) \times \varepsilon$$

L'axe neutre se situant à $y = \frac{b}{a}$

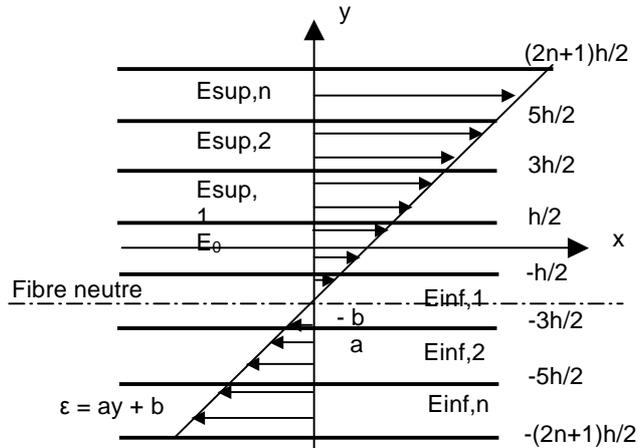


Figure 74 Répartition des déformations dans une poutre à $2n+1$ planches

$$N = \int_s \sigma \, dS = \sum_{i=1}^{i=n} \int_{S_{inf,i}} \sigma \, dS + \int_{S_0} \sigma \, dS + \sum_{j=1}^{j=n} \int_{S_{sup,j}} \sigma \, dS$$

$$\frac{N}{e} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left[\frac{ay^2}{2} + b.y \right]_{-(2i+1)h/2}^{-(2i-1)h/2} + E_0 \cdot \left[\frac{ay^2}{2} + b.y \right]_{-h/2}^{h/2} + \sum_{j=1}^{j=n} E_{sup,j} \cdot \left[\frac{ay^2}{2} + b.y \right]_{(2j-1)h/2}^{(2j+1)h/2}$$

$$\frac{N}{e} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left(\frac{a(2i-1)^2 h^2}{8} - \frac{b(2i-1)h}{2} - \frac{a(2i+1)^2 h^2}{8} + \frac{b(2i+1)h}{2} \right) + E_0 \cdot \left(\frac{ah^2}{8} + \frac{bh}{2} - \frac{ah^2}{8} + \frac{bh}{2} \right)$$

$$+ \sum_{j=1}^{j=n} E_{sup,j} \cdot \left(\frac{a(2j+1)^2 h^2}{8} + \frac{b(2j+1)h}{2} - \frac{a(2j-1)^2 h^2}{8} - \frac{b(2j-1)h}{2} \right)$$

$$\frac{N}{e} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left(\frac{ah^2}{8} \cdot [(2i-1)^2 - (2i+1)^2] + \frac{bh}{2} \cdot [(2i+1) - (2i-1)] \right) + E_0 \cdot bh$$

$$+ \sum_{j=1}^{j=n} E_{sup,j} \cdot \left(\frac{ah^2}{8} \cdot [(2j+1)^2 - (2j-1)^2] + \frac{bh}{2} \cdot [(2j+1) - (2j-1)] \right)$$

$$\frac{N}{e} = ah^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} (i \cdot (E_{sup,i} - E_{inf,i})) + bh \cdot \left(E_0 + \sum_{j=1}^{j=n} (E_{sup,j} + E_{inf,j}) \right)$$

$$\frac{N}{e} = 0 \quad \text{D'où} \quad \frac{b}{a} = -h \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (i \cdot (E_{sup,i} - E_{inf,i}))}{E_0 + \sum_{j=1}^{j=n} (E_{sup,j} + E_{inf,j})}$$

$$\begin{aligned}
 M &= \int_S \sigma \cdot y \, dS = \sum_{i=1}^{i=n} \int_{S_{inf,i}} \sigma \cdot y \, dS + \int_{S_0} \sigma \, dS + \sum_{j=1}^{j=n} \int_{S_{sup,j}} \sigma \cdot y \, dS \\
 \frac{M}{e} &= \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left[\frac{ay^3}{3} + \frac{by^2}{2} \right]_{-(2i+1) \cdot h/2}^{-(2i-1) \cdot h/2} + E_0 \cdot \left[\frac{ay^3}{3} + \frac{by^2}{2} \right]_{-h/2}^{h/2} + \sum_{j=1}^{j=n} E_{sup,j} \cdot \left[\frac{ay^3}{3} + \frac{by^2}{2} \right]_{(2j-1) \cdot h/2}^{(2j+1) \cdot h/2} \\
 \frac{M}{e} &= \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left(-\frac{a(2i-1)^3 h^3}{24} + \frac{b(2i-1)^2 h^2}{8} + \frac{a(2i+1)^3 h^3}{24} - \frac{b(2i+1)^2 h^2}{8} \right) \\
 &+ E_0 \cdot \left(\frac{ah^3}{24} + \frac{bh^2}{8} + \frac{ah^3}{24} - \frac{bh^2}{8} \right) \\
 &+ \sum_{j=1}^{j=n} E_{inf,j} \cdot \left(\frac{a(2j+1)^3 h^3}{24} + \frac{b(2j+1)^2 h^2}{8} - \frac{a(2j-1)^3 h^3}{24} - \frac{b(2j-1)^2 h^2}{8} \right) \\
 \frac{M}{e} &= \sum_{i=1}^{i=n} E_{inf,i} \cdot \left(\frac{ah^3}{24} \cdot [(2i+1)^3 - (2i-1)^3] + \frac{bh^2}{8} \cdot [(2i-1)^2 - (2i+1)^2] \right) + E_0 \cdot \frac{ah^3}{12} \\
 &+ \sum_{j=1}^{j=n} E_{sup,j} \cdot \left(\frac{ah^3}{24} \cdot [(2j+1)^3 - (2j-1)^3] + \frac{bh^2}{8} \cdot [(2j+1)^2 - (2j-1)^2] \right) \\
 \frac{M}{e} &= \frac{ah^3}{12} \cdot \left(E_0 + \sum_{i=1}^{i=n} ((12 \cdot i^2 + 1) (E_{sup,i} + E_{inf,i})) \right) + bh^2 \cdot \sum_{j=1}^{j=n} (j \cdot (E_{sup,i} - E_{inf,i})) \\
 \frac{M}{e} &= \frac{ah^3}{12} \cdot \left(E_0 + \sum_{i=1}^{i=n} ((12 \cdot i^2 + 1) (E_{sup,i} + E_{inf,i})) - 12 \times \frac{\left(\sum_{j=1}^{j=n} (j \cdot (E_{sup,j} - E_{inf,j})) \right)^2}{E_0 + \sum_{k=1}^{k=n} (E_{sup,k} + E_{inf,k})} \right)
 \end{aligned}$$

En comparaison avec un matériau équivalent homogène d'élasticité E_q d'une hauteur de $(2n+1)h$:

$$\frac{M}{e} = \frac{(2n+1)^3 ah^3}{12} \cdot E_q \quad (2n+1) \text{ planches}$$

$$\text{Soit } E_q = \frac{1}{(2n+1)^3} \cdot \left(E_0 + \sum_{i=1}^{i=n} ((12 \cdot i^2 + 1) (E_{sup,i} + E_{inf,i})) - 12 \times \frac{\left(\sum_{j=1}^{j=n} (j \cdot (E_{sup,j} - E_{inf,j})) \right)^2}{E_0 + \sum_{k=1}^{k=n} (E_{sup,k} + E_{inf,k})} \right)$$

4.2.3 Applications numériques

Pour mettre en avant l'importance des modules d'élasticité de chaque lame (et en particulier leur différence), une série de calcul par éléments finis est effectuée sur des éprouvettes collées. Les modules d'élasticités des éprouvettes inférieure et supérieure varient de 5000 MPa à 30000 MPa avec un pas de 2500 MPa.

En relevant la flèche sous les appuis des rouleaux supérieurs en fonction de la force de flexion appliquée, il en ressort que le module d'élasticité équivalent du composite par la relation définie dans le paragraphe précédent pour un composite homogène de hauteur double de celle d'une éprouvette.

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Sup Inf	5000	7500	10000	12500	15000	17500	20000	22500	25000	27500	30000
5000	4989	6056	6874	7549	8136	8658	9140	9594	10026	10439	10839
7500	6061	7501	8621	9536	10315	11007	11631	12204	12738	13241	13719
10000	6885	8627	10012	11148	12129	12990	13760	14461	15107	15709	16276
12500	7565	9552	11161	12507	13672	14696	15611	16441	17200	17899	18554
15000	8156	10344	12144	13678	15012	16187	17229	18174	19045	19855	20609
17500	8686	11042	13006	14708	16184	17488	18673	19751	20737	21651	22502
20000	9175	11671	13781	15618	17230	18682	19991	21192	22296	23317	24271
22500	9632	12249	14487	16439	18193	19767	21192	22495	23694	24803	25839
25000	10067	12785	15123	17207	19076	20763	22296	23701	24998	26201	27325
27500	10483	13290	15721	17918	19893	21684	23317	24821	26210	27502	28708
30000	10886	13770	16292	18585	20655	22543	24271	25865	27341	28717	30005

Tableau 18 Module d'élasticité d'une poutre constituée de 2 poutres (inférieure et supérieure) à module d'élasticité variable ; résolution par la méthode des éléments finis

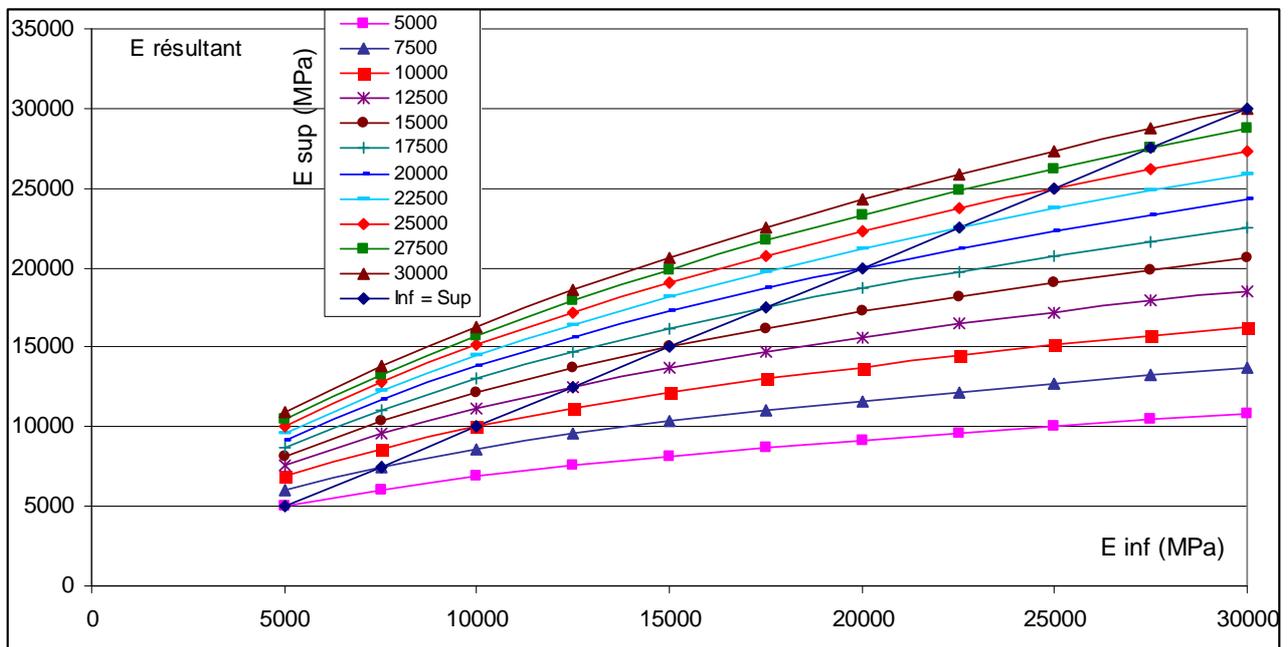


Figure 75 Elasticité résultante en fonction de celles des lames inférieure et supérieure MEF

La différence entre le calcul par éléments finis et la relation :
$$E_q = \frac{4 \cdot (E_2 + E_1)^2 - 3 \cdot (E_2 - E_1)^2}{8 \cdot (E_2 + E_1)}$$

définie au paragraphe 4.2.1, n'est qu'au plus de 0,76 %.

Lorsque la meilleure éprouvette (module le plus fort) est située au-dessous, le composite présente sensiblement (0,5%) de meilleures performances (alors que la relation est symétrique).

4.3 Modélisation de 2 lames superposées en flexion

4.3.1 Diffusion des efforts ponctuels

Lors d'un essai en flexion 4 points de 2 lames superposées, une pression de contact et un glissement s'induit à l'interface des lames.

Les figures suivantes exposent un cas de flexion 4 points sur 2 éprouvettes superposées non collées, avec un frottement nul. Les dimensions sont : $b = 50\text{mm}$; $h = 54\text{mm}$; $l = 900\text{mm}$, en flexion quatre points équidistants avec un effort total de 1200 N.

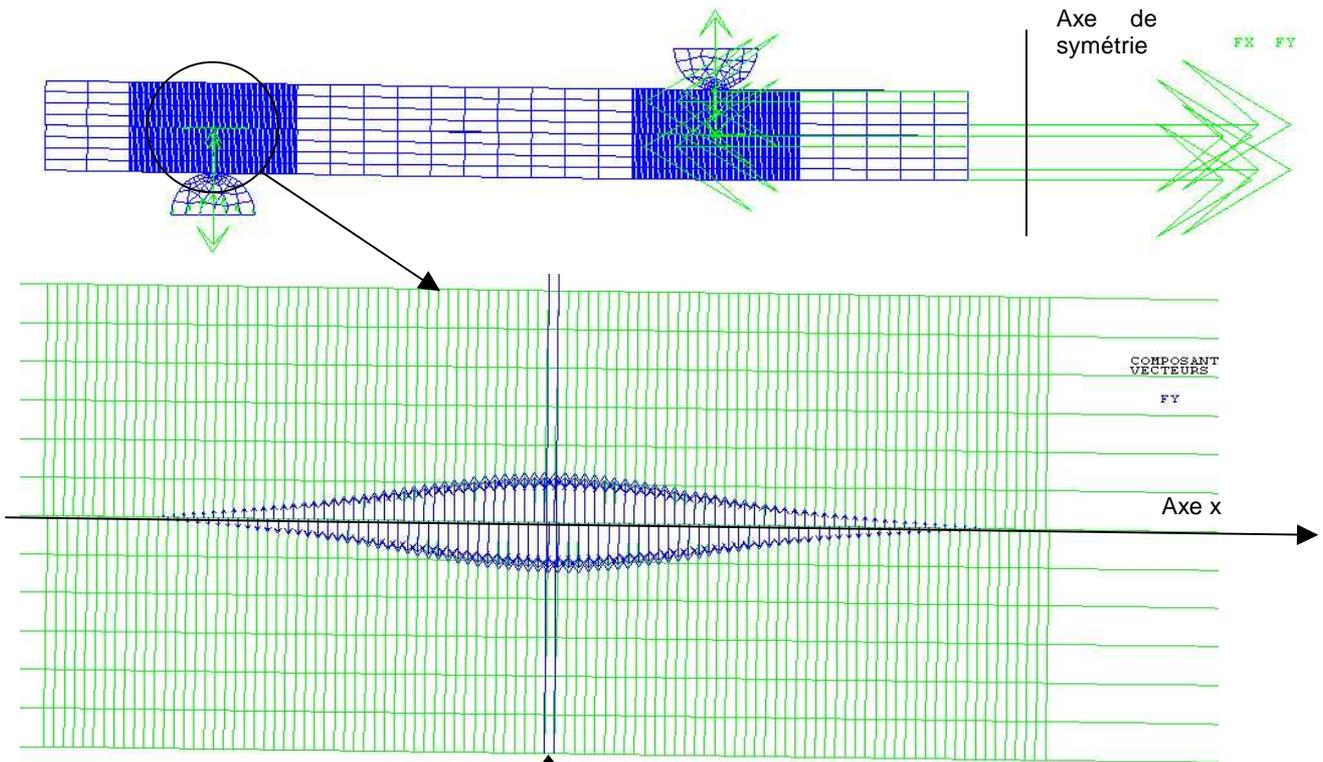


Figure 76 Pression de contact

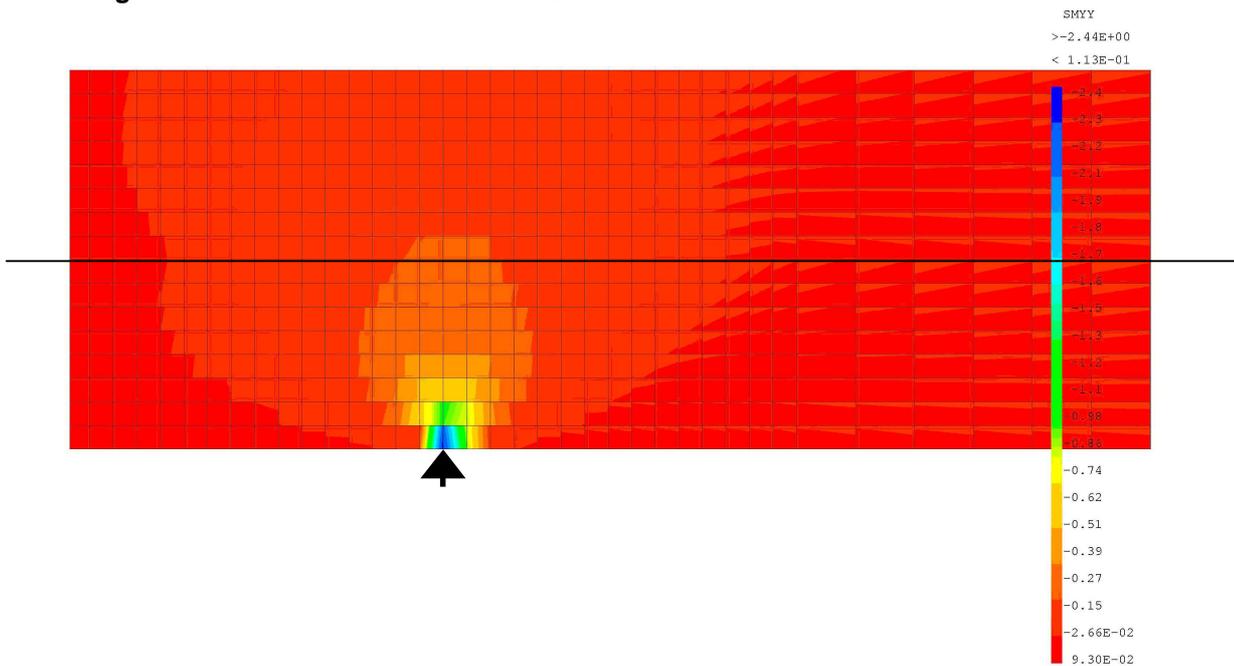


Figure 77 Répartition des contraintes transverses

La répartition de la pression de contact est une courbe de Gauss.

La pression transverse $P = a \cdot E^{-b x^2}$ où x est centré au droit de l'effort ponctuel.

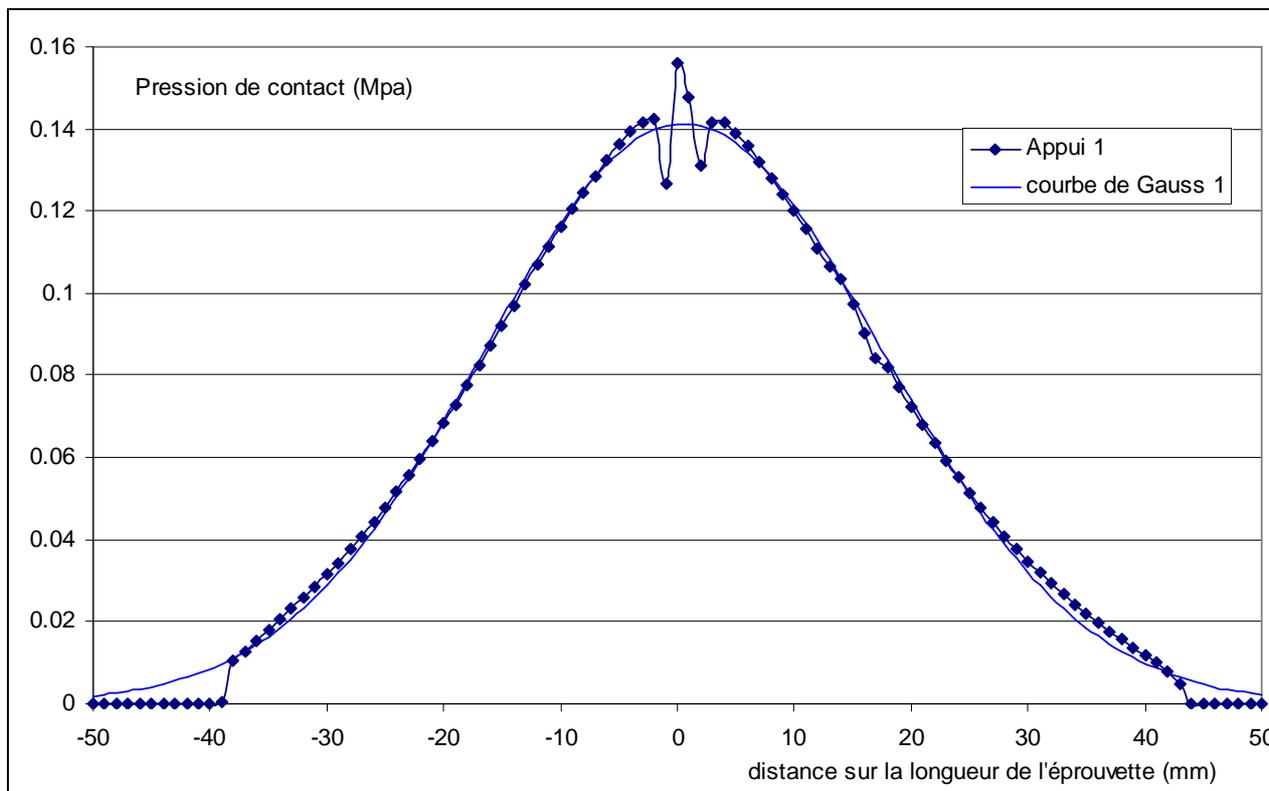


Figure 78 Répartition des pressions de contact

Remarques : Le calcul par éléments finis conduit à des imprécisions autour des pieds de la courbe de Gauss et au sommet. L'intégration renvoie à la même valeur que celle de l'appui ponctuel. La modélisation du rouleau n'a que très peu d'influence sur la définition des appuis, l'effort reste ponctuel.

Les coefficients a et b définissant la répartition par la courbe de Gauss dépendent de l'épaisseur des planches et de leur module d'élasticité. La répartition est indépendante de l'effort, la contrainte est simplement proportionnelle.

Pour caractériser l'influence de l'épaisseur sur les coefficients a et b de la formule de répartition gaussienne, on se limite à 2 éprouvettes superposées en fixant les paramètres :

$b = 50\text{mm}$; $l = 900\text{mm}$; $E_1 = 20000\text{ MPa}$; $E_2 = 20000\text{ MPa}$; sous un effort total de 300 N.

L'épaisseur e varie de 10 à 70 mm.

épaisseur (mm)	E1	E2	a	b
10	20000	20000	$3,811 \cdot 10^{-01}$	$1,226 \cdot 10^{-02}$
15	20000	20000	$2,536 \cdot 10^{-01}$	$5,461 \cdot 10^{-03}$
20	20000	20000	$1,900 \cdot 10^{-01}$	$3,068 \cdot 10^{-03}$
27	20000	20000	$1,403 \cdot 10^{-01}$	$1,677 \cdot 10^{-03}$
30	20000	20000	$1,262 \cdot 10^{-01}$	$1,359 \cdot 10^{-03}$
40	20000	20000	$9,394 \cdot 10^{-02}$	$7,465 \cdot 10^{-04}$
50	20000	20000	$7,506 \cdot 10^{-02}$	$4,836 \cdot 10^{-04}$
60	20000	20000	$6,315 \cdot 10^{-02}$	$3,463 \cdot 10^{-04}$
70	20000	20000	$5,397 \cdot 10^{-02}$	$2,558 \cdot 10^{-04}$

Tableau 19 Influence de l'épaisseur e sur les coefficients a et b de la répartition de la pression de contact

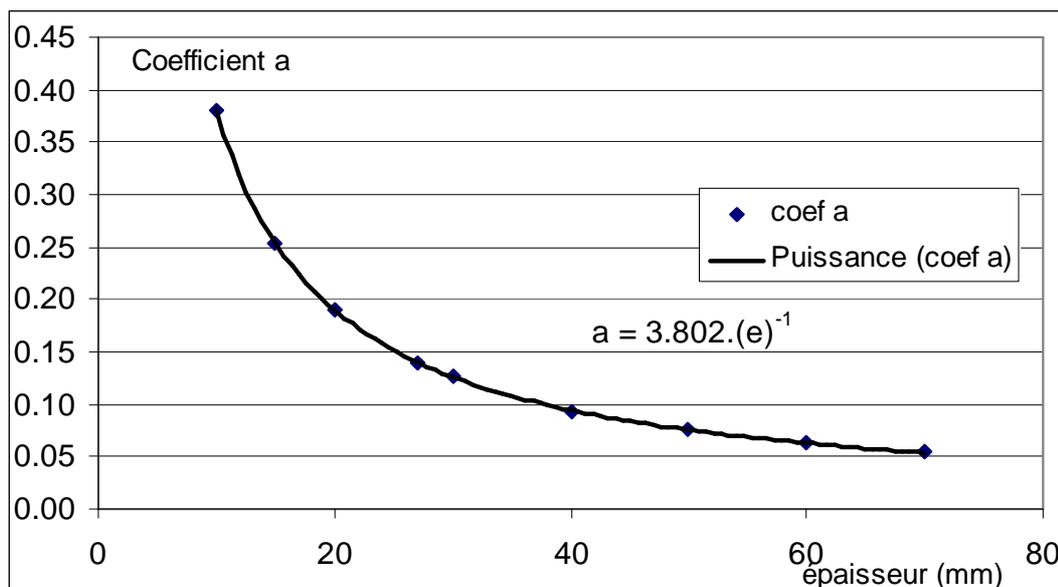


Figure 79 Coefficient a fonction de l'épaisseur

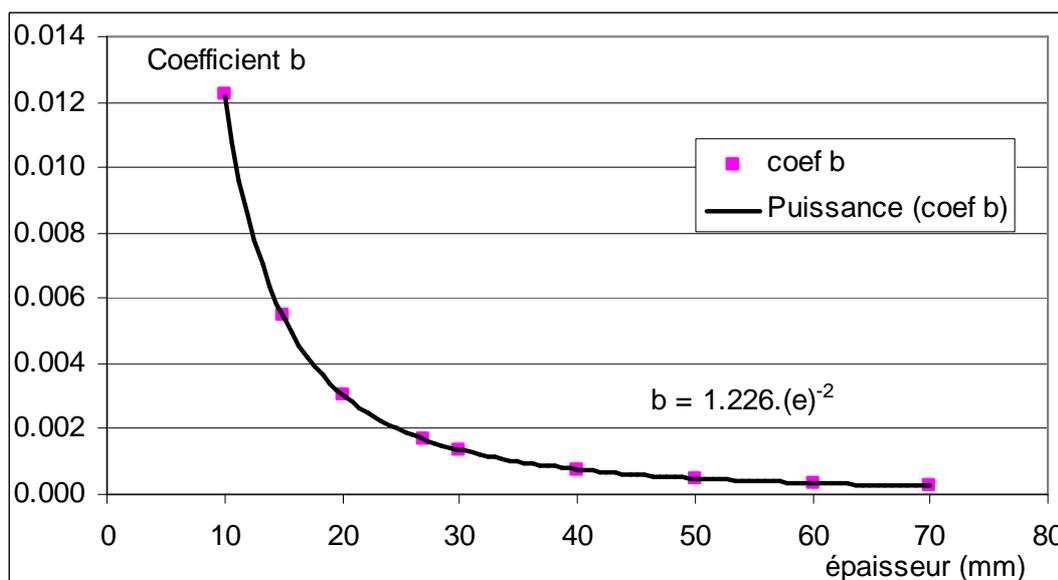


Figure 80 Coefficient b fonction de l'épaisseur

Il en ressort en fonction de l'épaisseur e en mm :

$$a = \frac{3,802}{e} \quad ; \quad b = \frac{1,226}{e^2}$$

$$\text{Soit } P = \frac{3,802}{e} \cdot E \left(-1,226 \cdot (x/e)^2 \right)$$

Les modules d'élasticité E_1 et E_2 n'ont pas d'influence sur la répartition de la pression de contact.

Les résultats sont identiques aux précédents avec des modules d'élasticité E_1 et E_2 variant de 5000 à 30000 MPa. Cette constatation est faite dans l'hypothèse où les modules d'élasticités longitudinales sont indépendants de la densité (ce qui peu probable dans la réalité).

En revanche les modules d'élasticité transverses et les modules de cisaillement, dépendant de la densité, ont tous deux une influence sur la répartition de la pression de contact.

$$\text{Rappel : } E_{Tr} = 1600. \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,5} \quad G_{TL} = 1150. \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,2}$$

Pour caractériser l'influence des densités ρ_1 et ρ_2 sur les coefficients a et b de la formule de répartition gaussienne, on se limite à 2 éprouvettes superposées et en fixant les paramètres :
 $e = 27 \text{ mm}$; $b = 50\text{mm}$; $L = 900\text{mm}$; sous un effort total de 300 N.

Les modules d'élasticité ρ_1 et ρ_2 égaux dans un premier temps varient de 0,3 à 1.

rho1	rho2	a	b
1	1	$1,513.10^{-01}$	$1,910.10^{-03}$
0,9	0,9	$1,486.10^{-01}$	$1,878.10^{-03}$
0,8	0,8	$1,448.10^{-01}$	$1,792.10^{-03}$
0,7	0,7	$1,407.10^{-01}$	$1,699.10^{-03}$
0,6	0,6	$1,362.10^{-01}$	$1,600.10^{-03}$
0,5	0,5	$1,311.10^{-01}$	$1,491.10^{-03}$
0,4	0,4	$1,252.10^{-01}$	$1,373.10^{-03}$
0,3	0,3	$1,184.10^{-01}$	$1,242.10^{-03}$

Tableau 20 Coefficient a en fonction de la densité

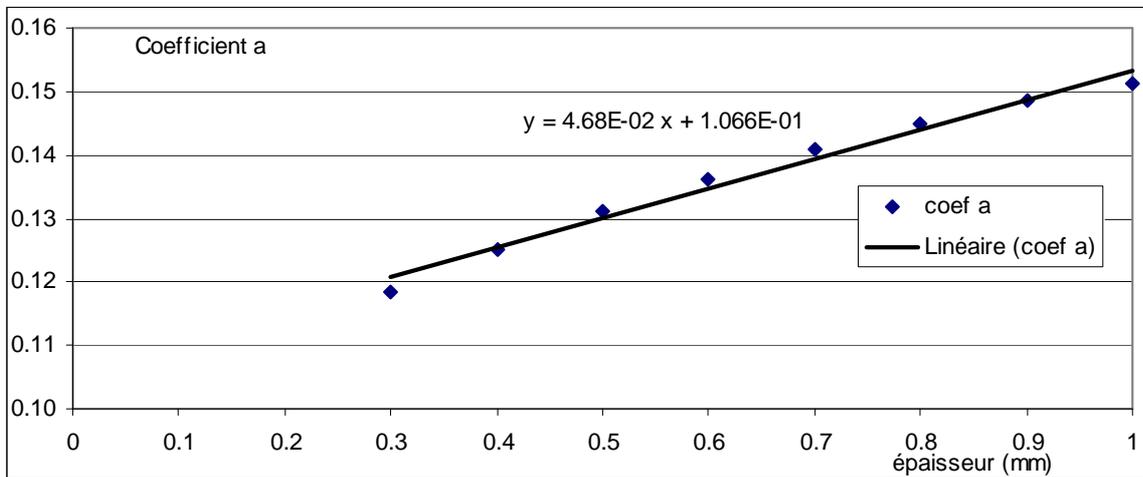


Figure 81 Coefficient a en fonction de la densité

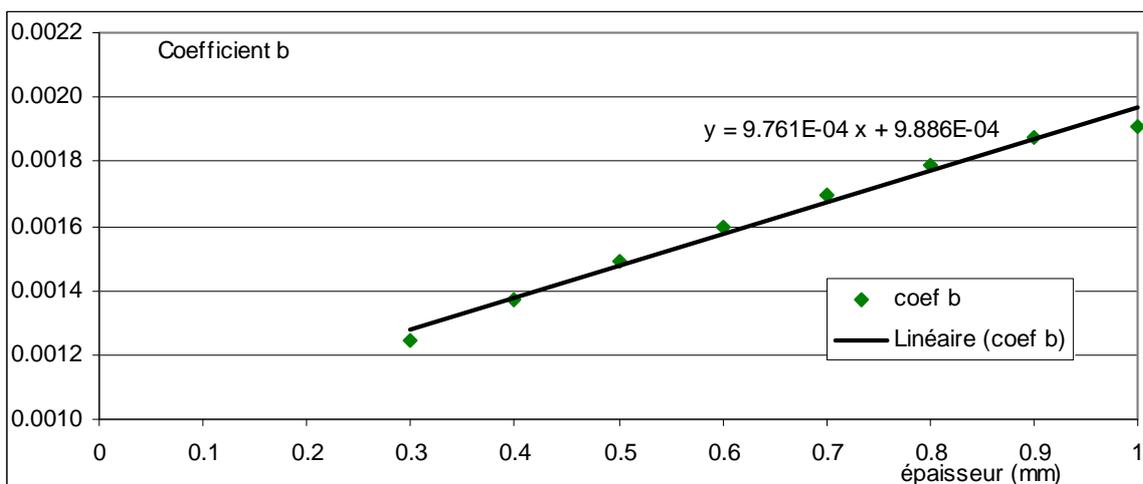


Figure 82 Coefficient b en fonction de la densité

MODELISATION

Il en ressort en fonction de la densité ρ en mm :

$$a = 4,68 \cdot 10^{-2} \rho + 1,07 \cdot 10^{-1} \quad ; \quad b = 9,76 \cdot 10^{-4} \rho + 9,89 \cdot 10^{-4}$$

Soit
$$P = \frac{1,346 \cdot \rho + 2,838}{e} \cdot E \left(- (0,769 \cdot \rho + 0,692) \cdot (x/e)^2 \right)$$

Lorsque les modules d'élasticité sont différents, si l'effort passe par une planche de densité faible, la pression de contact est assez localisée et si l'effort passe par une planche de densité forte la pression de contact est plus répartie.

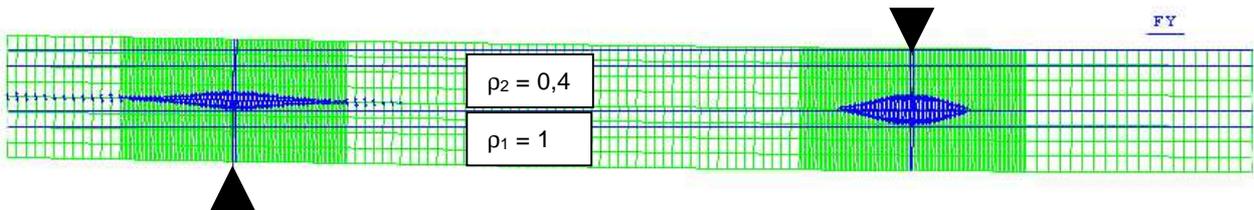


Figure 83 Répartition des pressions de contact entre deux planches de densité différente

Les conséquences de cette répartition d'effort sont qu'individuellement les planches ne subissent pas le même type d'effort. Une planche subit des efforts ponctuels au niveau des appuis et partiellement répartis par l'intermédiaire des planches qui l'entourent.

Cette répartition s'accroît avec le nombre de planche. L'étalement de la courbe de Gauss augmente d'une planche à l'autre.

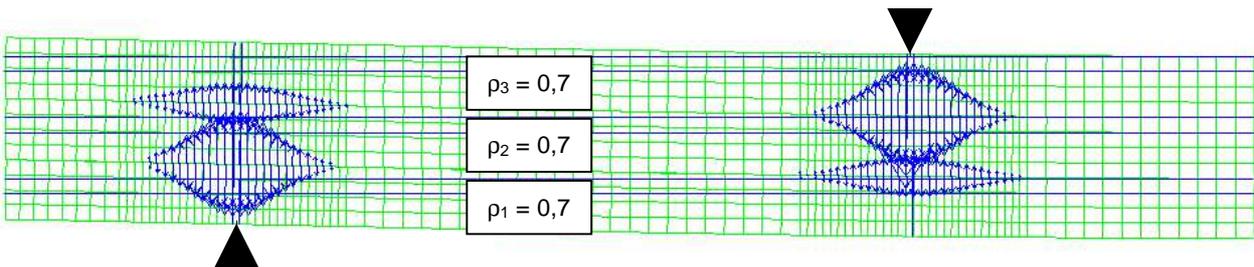


Figure 84 Répartition des pressions de contact entre trois planches de densité différente

De ce fait le principe de superposition n'est pas applicable.

Pour une déformation donnée sous une sollicitation de flexion quatre points, une poutre constituée de n planches nécessite un effort supérieur à la somme des efforts nécessaires pour obtenir la même déformation de chaque planche.

Sans clou une poutre composite présente, par définition du gain, un gain égal à 0. Mais il convient de retenir la différence : les propriétés en flexion de deux planches sont légèrement supérieures à 2 fois celles d'une seule (dans la même configuration) par le seul fait que la répartition des pressions de contact transforme des charges ponctuelles en charges partiellement réparties.

4.3.2 Influence du frottement

Le coefficient de frottement au niveau du contact des éprouvettes vaut approximativement : 0,55, en variant de 0,4 à 0,7.

Dans cette hypothèse, une modélisation de deux planches superposées sous CASTEM est effectuée pour étudier l'importance du frottement avec différentes configurations. Le frottement est de type Coulomb.

Le modèle de base ou témoin comprend deux planches de section 27x200mm, de longueur 3m en flexion 4 points équidistants, de densité 0,65 et de module d'élasticité 15000 MPa. Le coefficient de frottement est 0,55.

Les paramètres pouvant intervenir dans le frottement sont :

Le coefficient de frottement

La largeur des planches

L'épaisseur des planches

Le module d'élasticité et la densité

Lorsque le coefficient de frottement varie de 0 à 1, la pente du bilame diminue de : $(2,4 \times \text{coef}_{\text{frottement}})$ pourcent. En outre la prise en compte du frottement réduit au plus de 2,4 % le module d'élasticité du bilame si on considère que le coefficient de frottement atteint 1 au plus.

La surface de contact dépend de la largeur des planches. En faisant varier la largeur de 50mm à 300mm, la pente du bilame (en N/mm) reste proportionnelle à la largeur. Le facteur largeur des planches n'intervient pas sur le frottement.

Lorsque l'épaisseur et les propriétés mécaniques des planches augmentent, l'effort global de flexion augmente pour une déformation identique. Le frottement dépend de la pression de contact, mais en faisant varier l'épaisseur des planches de 20mm à 50mm, et le module d'élasticité des planches de 5 000 à 30 000 MPa, la pente (en N/mm) du bilame reste proportionnelle au cube de l'épaisseur et proportionnelle au module d'élasticité des planches.

Globalement dans ce cas, la prise en compte du frottement est négligeable. Ce facteur, est d'autant moins pertinent pour les planches clouées car le frottement est déjà pris en compte dans le comportement en cisaillement de l'assemblage avec 1 clou.

4.4 Modélisation d'un bilame cloué en flexion

4.4.1 *Disponibilité des outils CASTEM*

Compte tenu de la symétrie du problème, la modélisation numérique a été effectuée en 2 dimensions. Le logiciel CASTEM, développé par le CEA, permet le calcul par éléments finis avec deux opérateurs propres à la résolution.

Le premier « RESO » permet de déterminer un champ de déplacement à partir d'une matrice de rigidité et d'un champ de force. La matrice de rigidité comprend la géométrie du problème et son maillage, les propriétés des matériaux et les conditions aux limites. La solution est directement obtenue par inversion et multiplication de matrice.

Le second « PASAPAS » permet d'effectuer un calcul non linéaire incrémental. La non linéarité peut provenir soit du matériau (plasticité) soit des grands déplacements soit des deux à la fois.

Les résultats sont calculés à des valeurs du paramètre d'évolution (pseudo temps ou temps réel) définies par l'utilisateur. Cette procédure est incontournable pour prendre en compte le frottement.

La difficulté d'utiliser la procédure PASAPAS réside dans la disponibilité des outils de CASTEM. Le choix s'est arrêté sur l'utilisation d'un raccord de type JOI2 (joint de deux éléments lignes en deux dimensions).

La définition d'un joint élastique isotrope nécessite la déclaration de deux raideurs KN et KS (normale et tangentielle au joint 2D). Les contraintes d'utilisation sont que ces deux raideurs doivent être égales. La raideur associe l'effort subi par le joint et le déplacement (différence de déplacement des nœuds initialement confondus des joints) par la relation $F = K.u$

Il convient de noter que contrairement à PASAPAS, par la résolution avec RESO, les raideurs associent contraintes et déformations par la relation $\sigma = 2.K.\epsilon$

L'utilisation d'une loi d'évolution des propriétés de KS ou KN n'a pas été maîtrisée. Le calcul indique une solution avec la raideur initiale alors que le déplacement est très supérieur au seuil plastique.

Les procédures propres aux joints plastiques sont :

* Les joints « mécanique élastique plastique » de Coulomb, dont les paramètres nécessaires à leur définition sont :

KN et KS, les raideurs initiales

ECN, le seuil de déformation en dessous duquel la raideur normale passe de KN à EF.

EF, la seconde raideur normale

COHE et FRIC la cohésion et l'angle de friction

FTRC, la résistance maximale à la traction

Ce joint est de type dilatant et ne s'intéresse qu'aux variations de la raideur normale.

* Les joints de type Amadei peuvent prendre ne compte les variations des propriétés en cisaillement mais sont spécifiques aux éléments granulaires.

* Les joints de type joint_soft et joint_coat utilisent des variables de type évolution : SJTB, SJCB et SJSB permettant de définir des relations entre contraintes et glissement, en cisaillement, ouverture du joint ou fermeture du joint. Des paramètres BETA, permettant le contrôle de la décharge, ou CPLG, permettant le couplage des relations contraintes déformations, sont théoriquement utilisables pour la définition du joint. Cependant les notices et exemples sont insuffisants pour l'utilisation de tels outils.

4.4.2 Principe de calcul et erreurs

Le principe de calcul retenu pour modéliser deux planches superposées clouées afin d'en déterminer le comportement en flexion, est calqué sur celui du cisaillement de deux planches décrit au chapitre 2.4.4.2 « Approche numérique - disparité des assemblages ».

La relation de contact ne pouvant être établie avec l'opérateur de type RESO, la relation entre les nœuds des Volumes Élémentaires de Répétition est réalisée avec l'opérateur RELA. Cet outil impose une relation sur les coordonnées des nœuds situés initialement en des positions confondues. Dans le cas du cisaillement la relation de contact des VER consiste simplement à imposer aux nœuds de conserver la même « altitude » (cote selon l'axe transverse).

En flexion cette relation n'est pas satisfaisante car en conservant cette relation les VER inférieurs et supérieurs s'interpénètrent (cf. figure suivante).

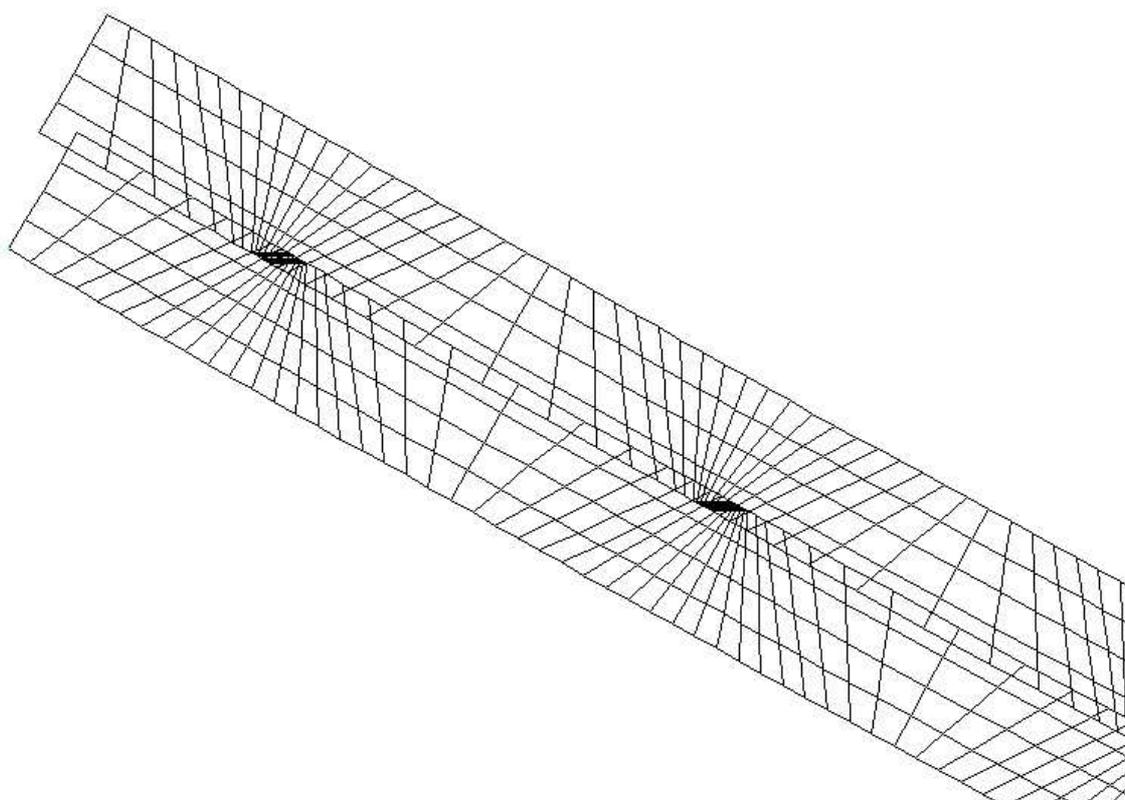


Figure 85 Interpénétration des VER due à la relation de contact RELA

L'erreur est très difficilement quantifiable. Elle dépend de la longueur totale des planches, du module d'élasticité longitudinal, et de l'inclinaison des planches par rapport à l'horizontale. (Elle est indépendante du maillage)

Elle porte sur la déformation globale des planches et sur les efforts repris par les clous qui travaillent non seulement en cisaillement mais aussi en traction.

Une relation de différence de coordonnées non nulle entre les nœuds a été tentée sous forme de table, de la même façon que la raideur fictive de chaque joints, mais malheureusement la gestion des deux paramètres ne permet pas une convergence du programme vers la solution.

Le calcul numérique est donc effectué par ce type de modélisation, et doit se contenter des erreurs qu'elle induit. Cf. annexe 3

4.4.3 2 Lames superposées clouées

4.4.3.1 Paramètres de modélisation

Pour reprendre les essais effectués sur des planches en flexion dans le chapitre 3.2 « Essais de flexion sur des planches clouées », la modélisation est effectuée avec les mêmes conditions de matériaux, géométrie et densité de clouage. Les planches de 3,30m sont fléchies en flexion 4 points équidistant d'un mètre. Le tableau suivant expose les paramètres pris en compte.

	G 9R1a	G 9R1b	G 9R1c	G 9R1d	G 9R1e	G 611	G 210	G 73
Densité de clou en cl/dm ²	0,89	1,26	1,63	2,00	2,56	2,49	5,36	9,45
Long (mm)	173,68	122,22	94,29	76,74	60,00	58,93	40,24	28,95
Epai (mm)	65,33	65,33	65,33	65,33	65,33	68,60	46,59	36,75
ntc	19	27	35	43	54	55	81	112
E1 (MPa)	19559	19559	19559	19559	19559	19957	18360	16731
ρ_1	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,75	0,71	0,73
E2 (MPa)	19727	19727	19727	19727	19727	20881	18310	17175
ρ_2	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,77	0,74	0,78

Tableau 21 Paramètres des essais réels pour la modélisation avec CASTEM

4.4.3.2 Résultats numériques sur un essai

Cas de l'essai G 9R1a

Le calcul est effectué avec une force totale de flexion allant de 0 à 2400 N avec un pas de 1/10^{ème}. Les trois programmes utilisés sont :

- un calcul (pasapas) de 2 lames superposées avec un coefficient de frottement de 0,55 ;
- un calcul (boucle reso) de 2 lames superposées clouées avec la densité de clou de l'essai ;
- un calcul (pasapas) de 2 lames superposées collées.

L'architecture des programmes est présentée dans les annexes respectives 3, 4 et 5.

Au niveau de l'appui inférieur ;

Le calcul 1 avec simple frottement conduit à une pente de la poutre de 31,4 N/mm.

Le calcul 3 avec collage conduit à une pente de la poutre de 121,4 N/mm.

Le calcul 2 avec clouage conduit à une pente de la poutre évoluant de 93 à 44,4 N/mm.

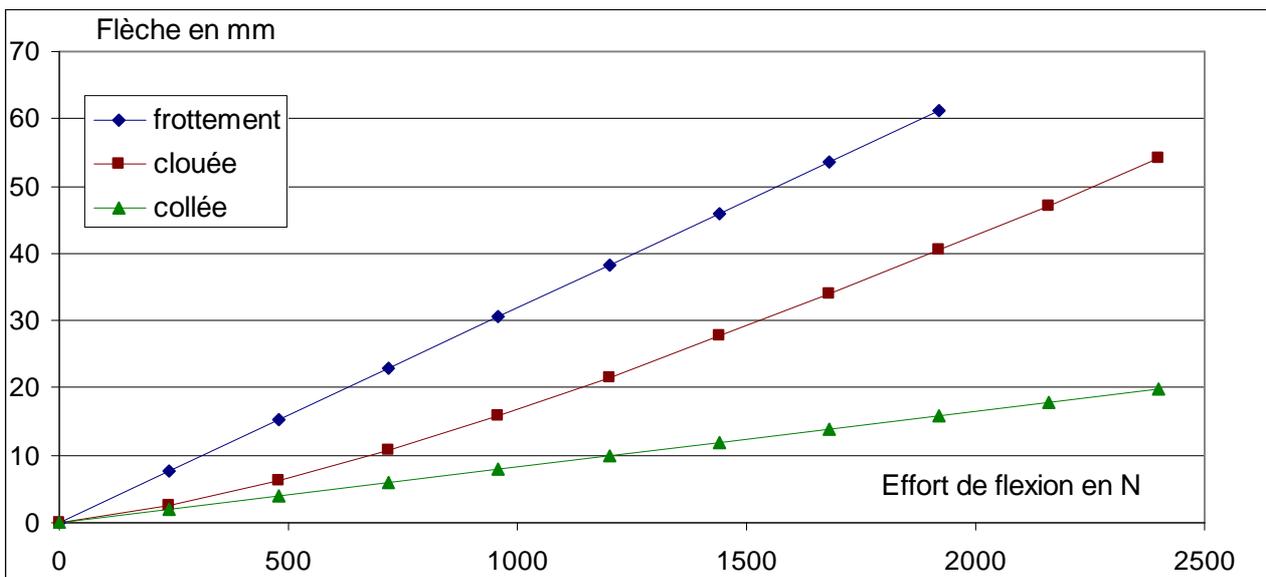


Figure 86 Résultats des essais sur G9R1a par la modélisation MEF

MODELISATION

Le gain est défini par $G = \frac{E_{\text{cloué}} - E_0}{E_{\text{collé}} - E_0}$ soit $\frac{\frac{1}{\text{Pente}_{\text{cloué}}} - \frac{1}{\text{Pente}_0}}{\frac{1}{\text{Pente}_{\text{collé}}} - \frac{1}{\text{Pente}_0}}$,

Sous un effort de flexion faible, les clous sont sollicités dans leur phase élastique, le gain est constant. Dans le cas de G9R1 : $G_0 = 79,28 \%$

Dès lors que les clous sont sollicités dans leur phase plastique, le gain chute en suivant, en fonction de l'effort de flexion, une loi de type $G = \frac{a}{F + b}$

Avec, dans le cas de G9R1 : $\begin{cases} a = 42050 \text{ N} \\ b = 370 \text{ N} \end{cases}$

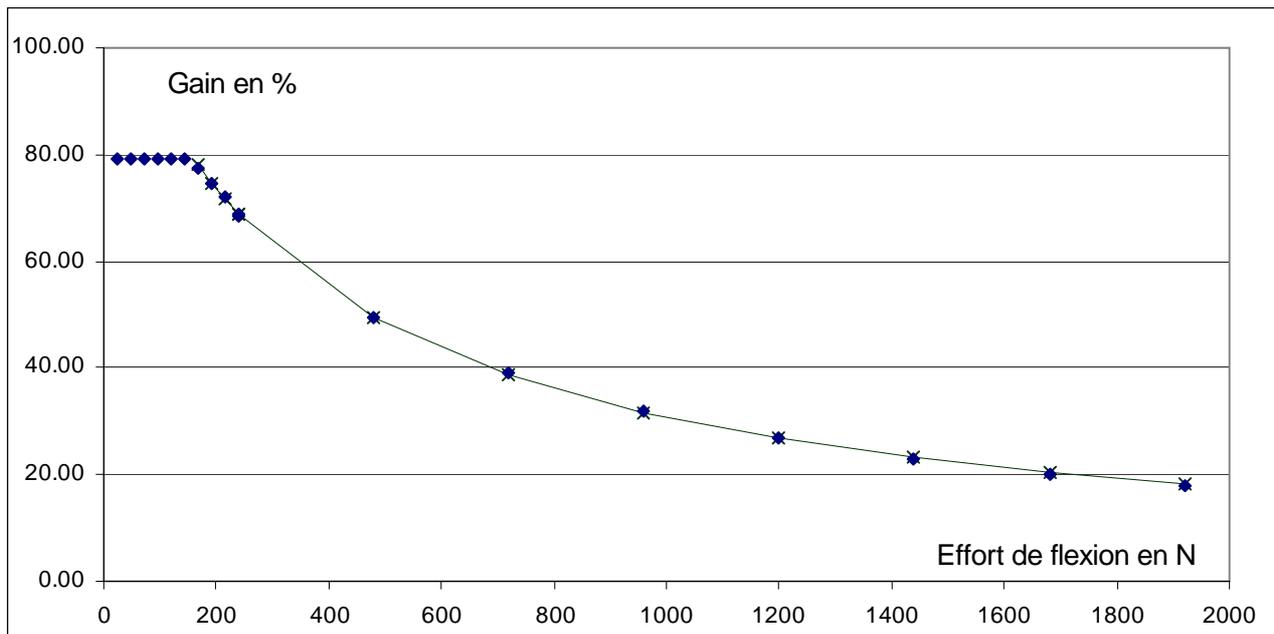


Figure 87 Gain fonction de l'effort de flexion sur G9R1a par la modélisation MEF

Force (N)	0	240	480	720	960	1200	1440	1680	1920	2160	2400
Dep cloué (mm)	0	2,58	6,33	10,82	15,96	21,61	27,64	33,95	40,48	47,18	54,01
Dep frot (mm)	0	7,66	15,29	22,94	30,58	38,20	45,86	53,52	61,18	ncv	ncv
Dep frot théorique	0	7,66	15,33	22,99	30,66	38,32	45,99	53,65	61,31	68,98	76,64
Dep collé (mm)	0	1,98	3,96	5,93	7,91	9,89	11,86	13,84	15,81	17,79	19,75
Dep col théorique	0	1,98	3,96	5,94	7,92	9,90	11,88	13,86	15,84	17,81	19,79
Gain calculé	79,28	68,66	49,49	39,06	31,95	26,81	23,00	20,10	17,82		
Gain par formule	79,28	68,84	49,42	38,55	31,60	26,77	23,22	20,50	18,36	16,61	15,18

Tableau 22 Valeurs des déplacements et gains fonction de l'effort de flexion sur G9R1a par la modélisation MEF

La modélisation de G9R1a est effectuée sur une bande de 65,3 mm de largeur avec 1 clou tous les 173,7 mm, soit 10 clous. Les clous sont numérotés de l'extrémité de la poutre vers le milieu.

Remarque : le premier volume élémentaire de répétition ne repose pas sur l'appui en son extrémité, étant donné que les appuis ont une position fixe. Le premier clou peut donc présenter un comportement singulier par rapport aux clous suivants.

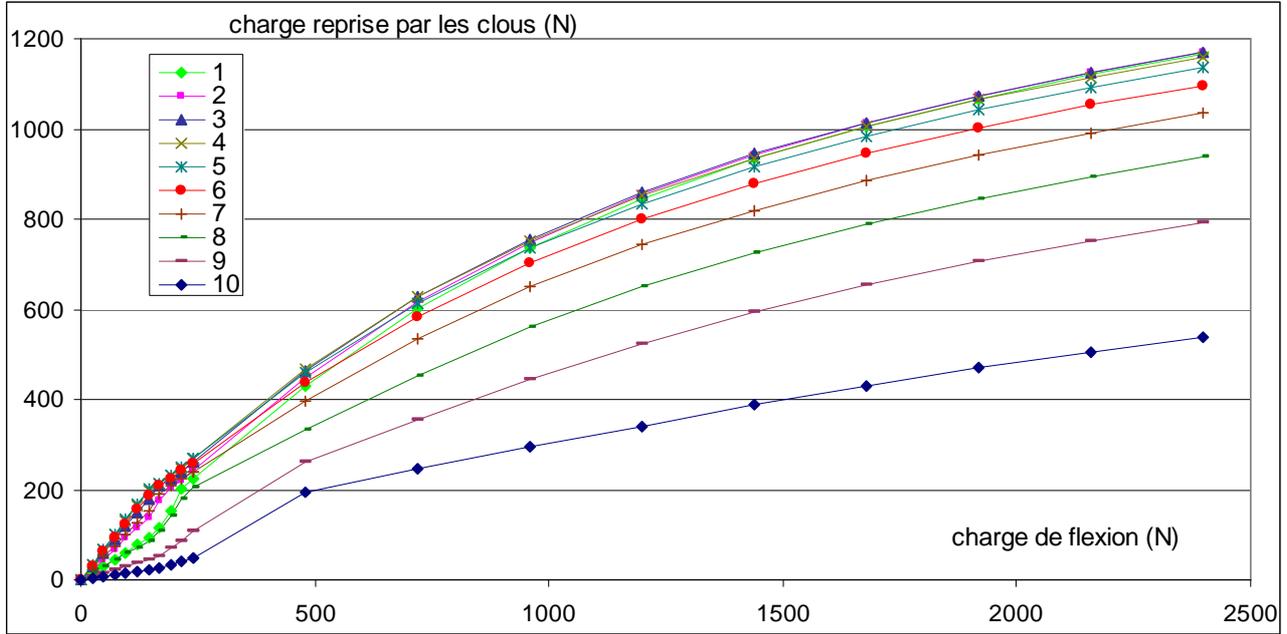


Figure 88 Effort repris par chaque clou en fonction de la charge de flexion

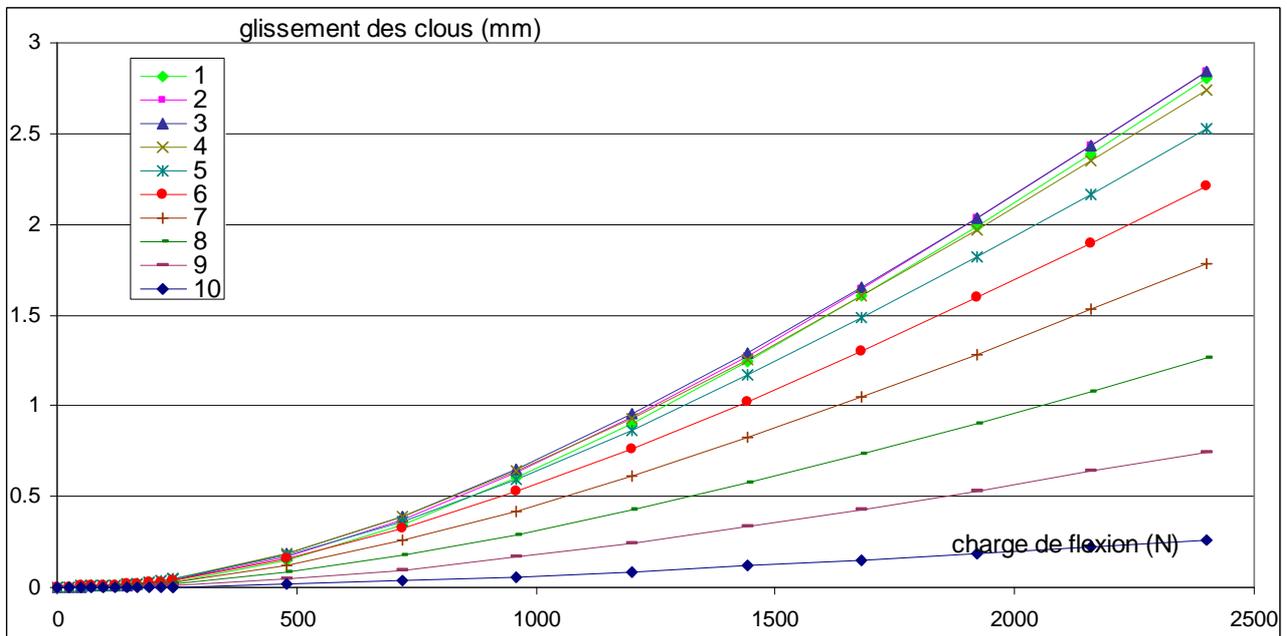


Figure 89 Glissement encaissé par chaque clou en fonction de la charge de flexion

Remarque : Au-delà de 1200 N de charge de flexion les clous 1 à 5 reprennent un effort en cisaillement supérieur à 900 N seuil de rupture du clou. Le modèle est donc faux au-delà de cet effort.

4.4.3.3 Comparaison des différentes densités de clouage.

Jusqu'au seuil de chargement plastique, le gain est constant égal à G_0 .

G_0 est directement lié à la densité de clouage par la relation :

$$G_0 = 100 - (19,25 \cdot (\text{dens})^{-0,59}) \quad \text{avec dens, la densité de clouage en clou/dm}^2.$$

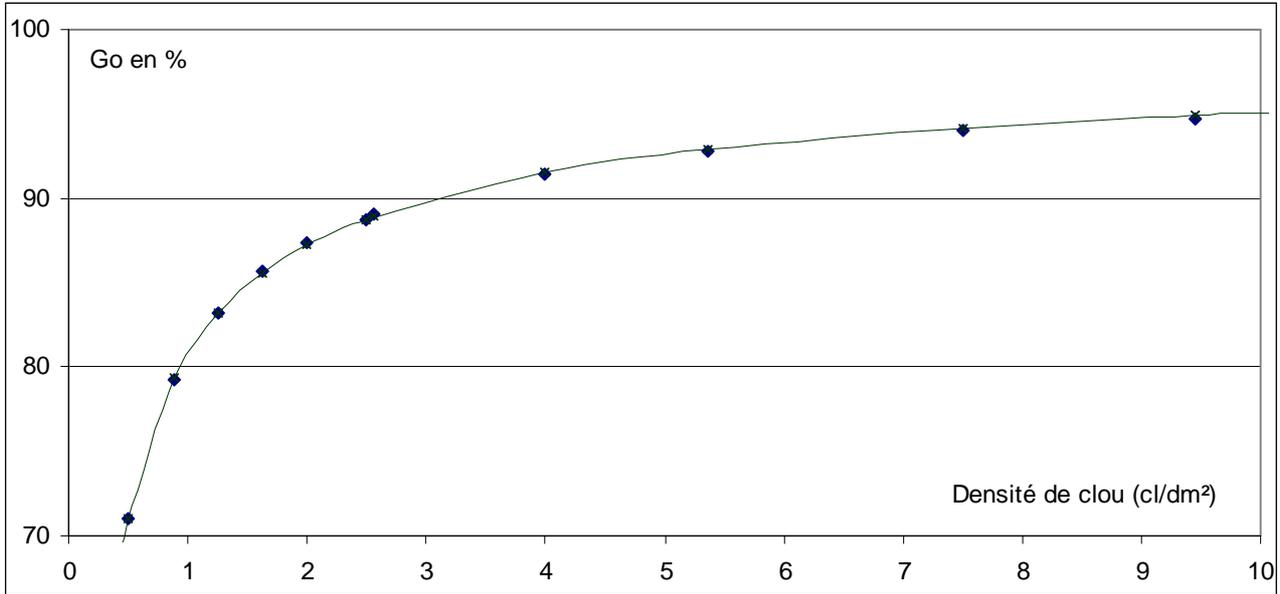


Figure 90 Gain initial G_0 en fonction de la densité de clouage

Remarque pour une densité de clouage inférieure à 0,5 clou/dm² la relation n'est plus valable car $G_0 = 0$ pour une densité de clouage nulle.

Au-delà du seuil de chargement plastique, le gain évolue en fonction de deux paramètres : la densité de clouage et le niveau de chargement.

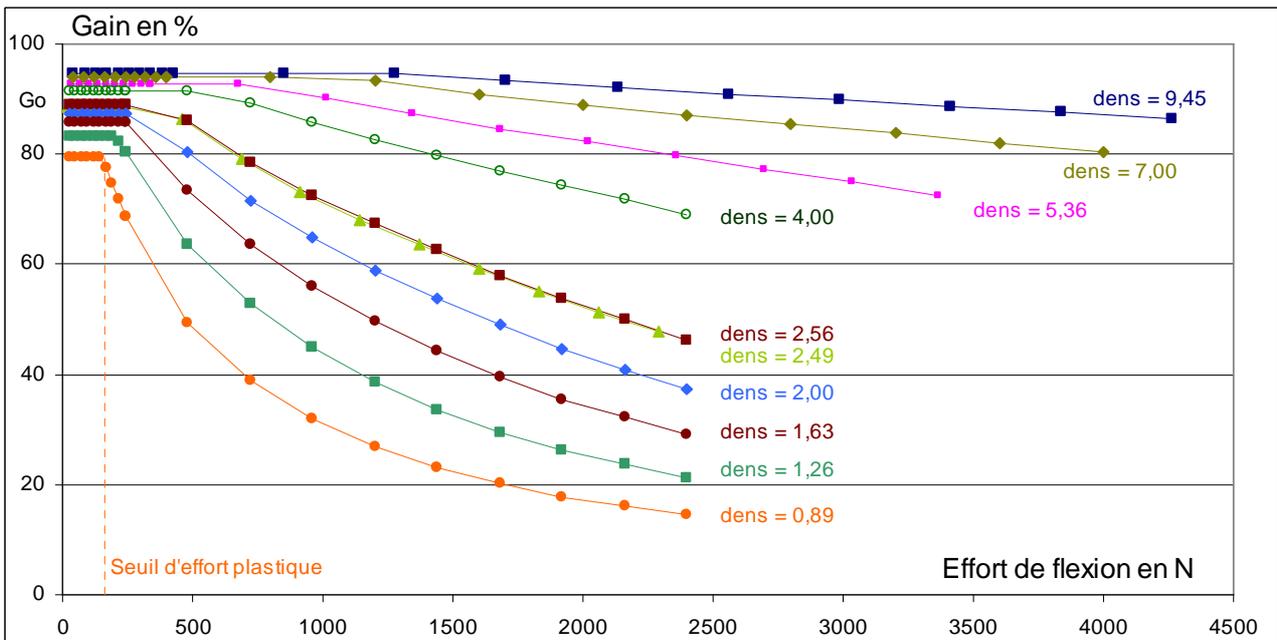


Figure 91 Gain en fonction de la densité de clouage et du niveau de chargement en flexion

En comparaison avec les essais expérimentaux on obtient les écarts suivants :

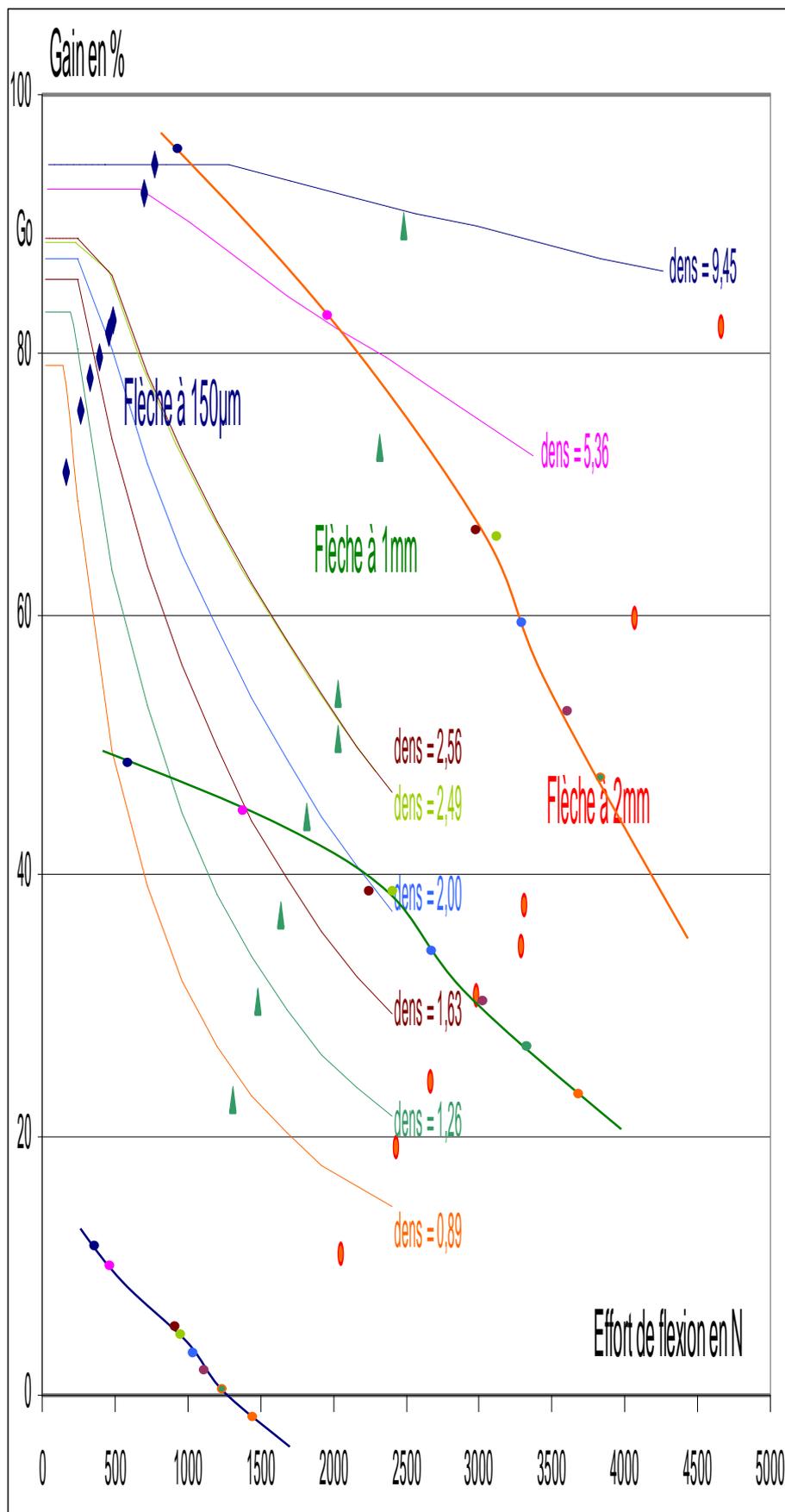


Figure 92 Comparaison entre les essais expérimentaux et la méthode des éléments finis

MODELISATION

Lorsque les clous sont sollicités dans leur phase plastique et que la densité de clouage est inférieure à 3 cl/dm², le gain fonction de l'effort de flexion, est régie par une loi de type $G = \frac{a_1}{F + b_1}$

Avec,

$$a_1 = 34925 (\text{dens})^2 + 117,9 (\text{dens})$$

$$b_1 = 363 (\text{dens})^2 + 54,86 (\text{dens})$$

Où a_1 et b_1 sont en Newton et dens la densité de clouage en clou/dm²

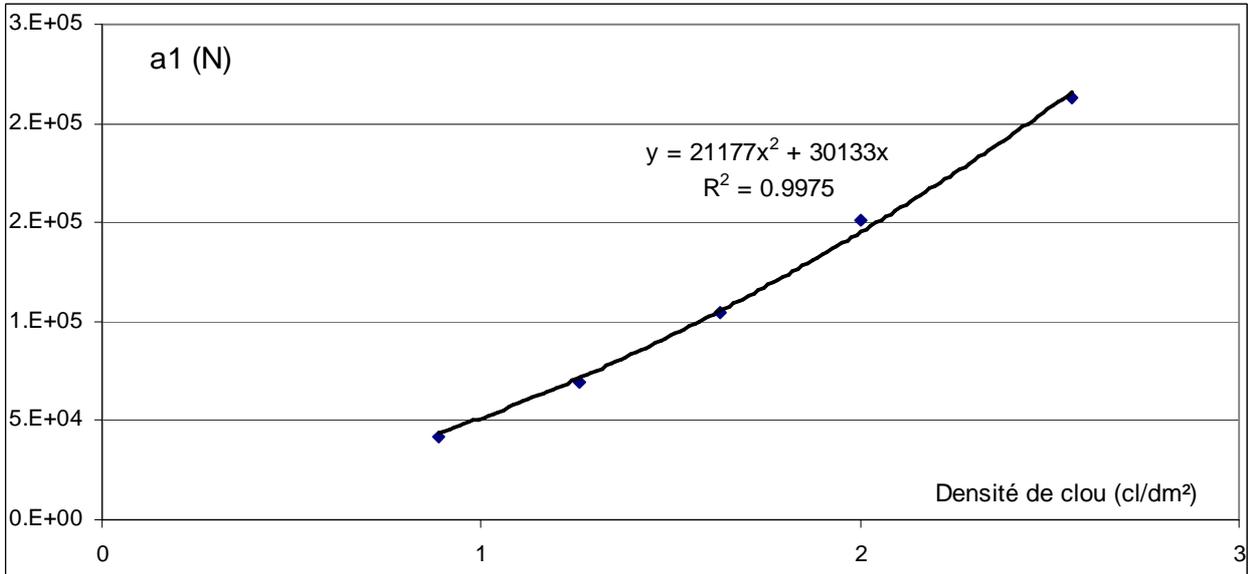


Figure 93 Coefficient a_1 en fonction de la densité de clouage

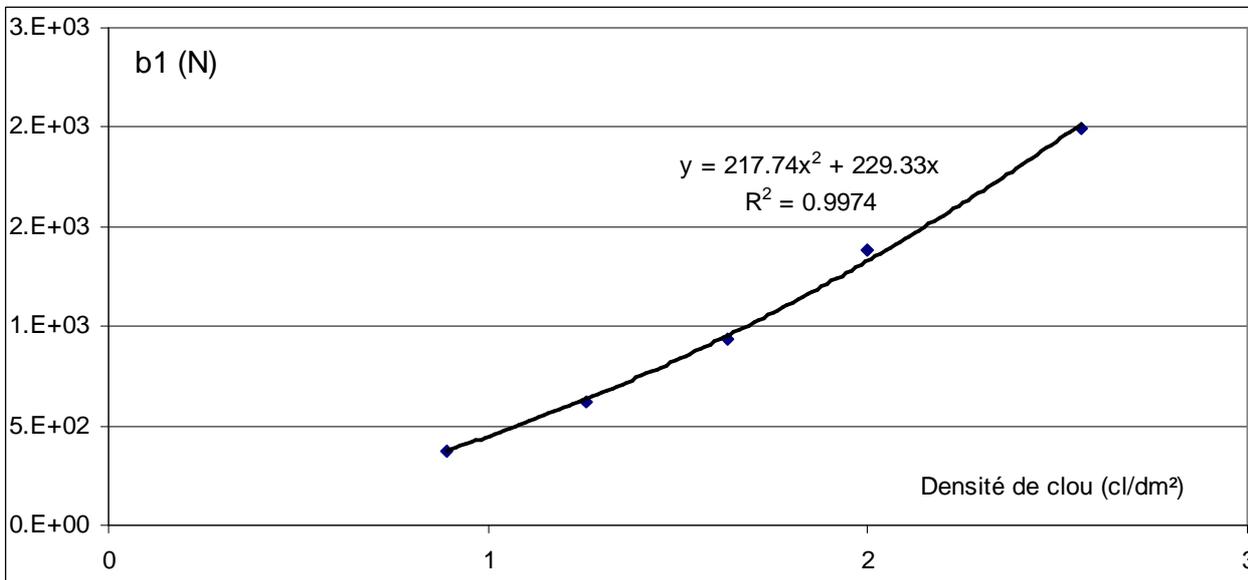


Figure 94 Coefficient b_1 en fonction de la densité de clouage

MODELISATION

Lorsque les clous sont sollicités dans leur phase plastique et que la densité de clouage est supérieure à 3 cl/dm², le gain décroît linéairement en fonction de l'effort de flexion.

$$G = a_2 \times F + b_2$$

Avec,

$$a_2 = 6.10^{-5}x (\text{dens})^3 - 1,54.10^{-3}x (\text{dens})^2 + 1,37.10^{-2}x (\text{dens}) - 4,54.10^{-2}$$

$$b_2 = 0,0274x (\text{dens})^2 - 0,0122x (\text{dens}) + 95,61$$

Où a_2 est sans unité, b_2 en Newton et dens la densité de clouage en clou/dm²

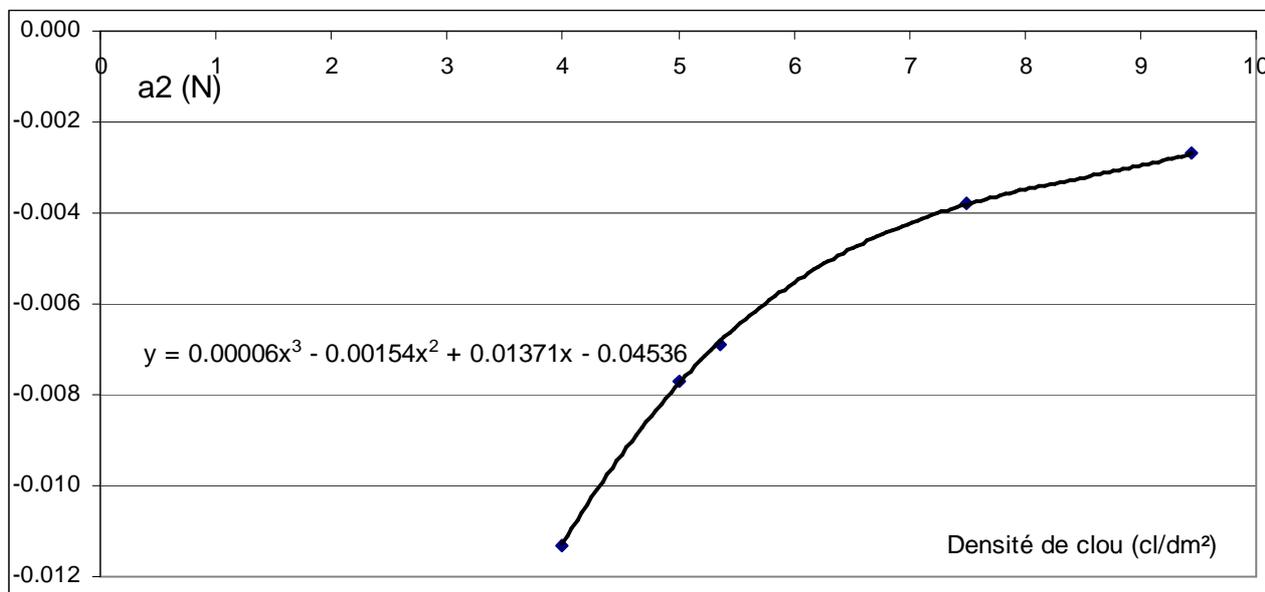


Figure 95 Coefficient a en fonction de la densité de clouage

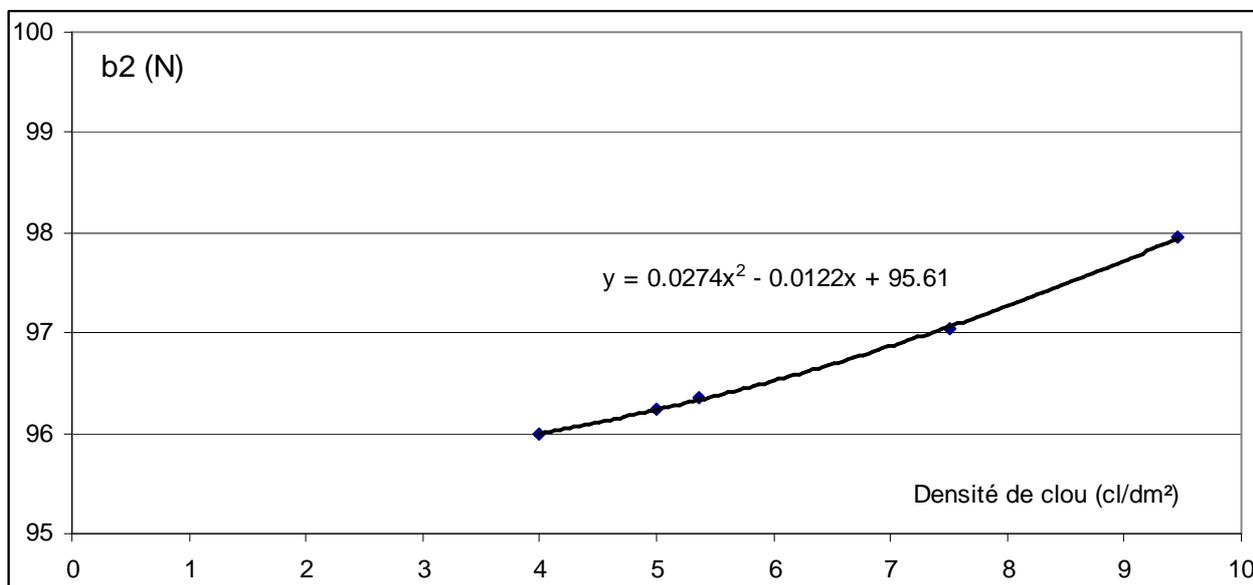


Figure 96 Coefficient b en fonction de la densité de clouage

Le seuil de plasticité des poutres est proportionnel à la densité de clouage

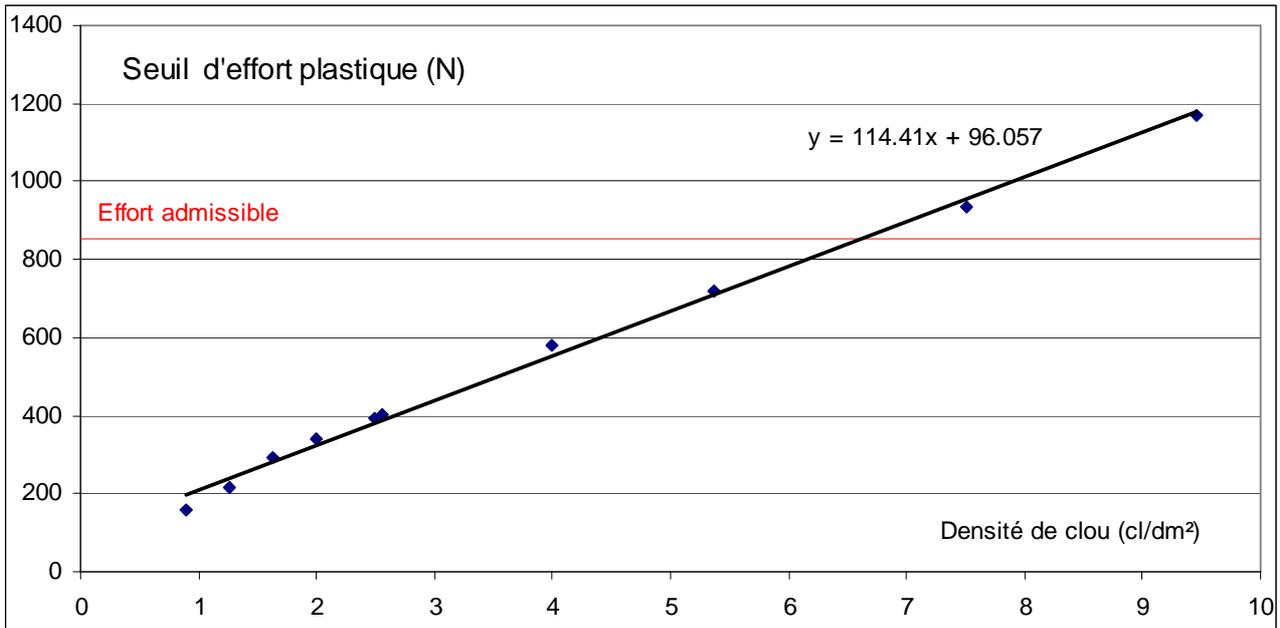


Figure 97 Seuil d'effort plastique en fonction de la densité de clouage

La flèche admissible la plus courante en construction est de $1/300^{\text{ème}}$ de la longueur fléchie.

Dans le cas d'une poutre de 3m, cette flèche est de $f_{adm} = 10\text{mm}$.

En raisonnant sur 2 planches collées, de module d'élasticité 18000 MPa et de densité 0,75,

l'effort de flexion admissible est de $\text{Effort}_{adm} = \frac{54 \cdot b \cdot E \cdot f_{adm}}{13 \cdot (l/h)^3} = 855 \text{ N}$

Dans la même configuration avec 2 planches non assemblées l'effort de flexion est de :

$F = 214 \text{ N}$.

Sous ce niveau d'effort (de 855 N dans notre cas), le gain en fonction de la densité devient :

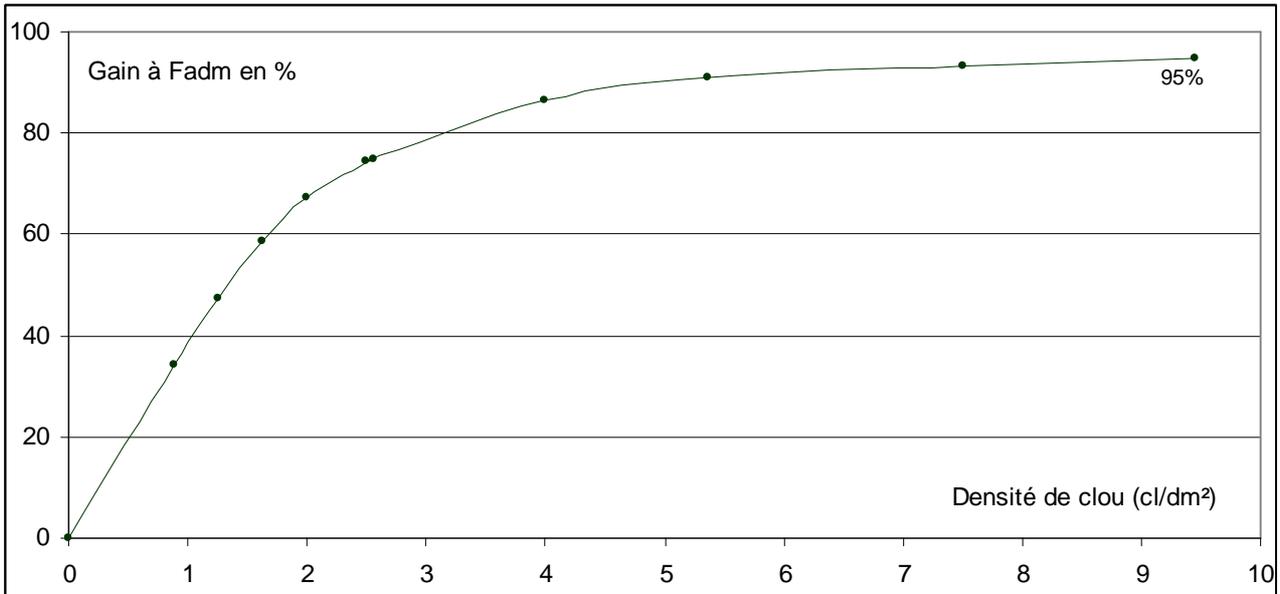


Figure 98 Gain sous effort admissible en fonction de la densité de clouage

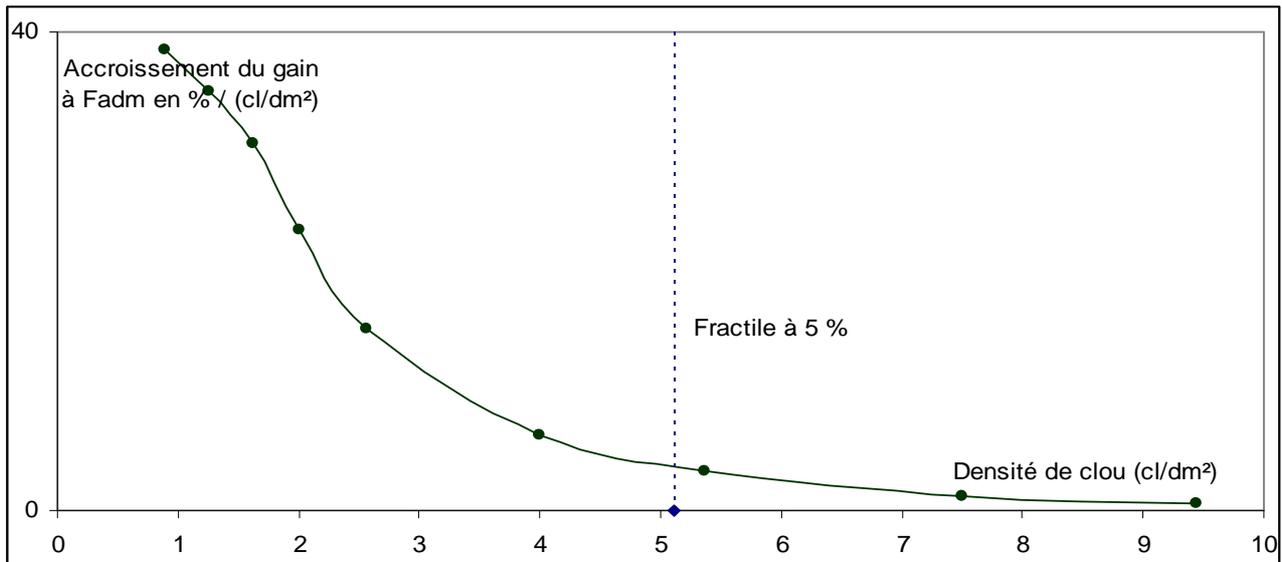


Figure 99 Accroissement du gain sous effort admissible en fonction de la densité de clouage

La performance de l'assemblage n'augmente plus significativement à partir d'une densité de clouage de 5,11 cl/dm², appelée densité de clouage significative. Ce résultat est obtenu avec l'hypothèse de 2 planches de module d'élasticité 18000 MPa et de densité 0,75.

Lorsque le module d'élasticité varie entre 16000 MPa et 20000 MPa, la densité de clouage significative oscille entre 4,80 et 5,35 cl/dm². En fait plus les propriétés en flexion des planches individuelles sont bonnes et plus l'assemblage prend de l'importance.

Remarque : l'effort admissible augmente par la même occasion, variant de 760 à 950 N.

La densité de clouage homogène significative est donc de l'ordre de 5 cl/dm².

De cette densité de clouage, il résulte :

un gain initial $G_0 = 92,6 \%$;

un effort plastique 668 N

une réduction du gain en fonction de l'effort de flexion de 0,0077 %/N (à partir de l'effort plastique)

un gain à l'effort admissible de $G = 90,9 \%$

La flèche à l'effort admissible est alors de 12,7mm au lieu de 10mm lorsque les planches sont collées (et 40mm lorsqu'elles ne sont pas assemblées).

4.5 Conclusion sur la modélisation

Les calculs par éléments finis conduisent à des résultats très proches de ceux obtenus par expérimentation qu'il s'agisse d'une lame simple, d'une poutre constituées de 2 lames dissociées, collées, ou clouées.

Lorsque les lames ont des propriétés mécaniques différentes, le module d'élasticité résultant du lamellé est inférieur à la moyenne des modules des lames qui le compose.

La répartition des pressions de contact entre les lames se fait selon une courbe de Gauss.

$$P = \frac{1,35 \cdot \rho + 2,84}{e} \cdot E \left(- (0,77 \cdot \rho + 0,69) \cdot \left(\frac{X}{e}\right)^2 \right)$$

Avec e l'épaisseur et ρ la densité de la lame par laquelle l'effort ponctuel transversal (généralisé par un appui) est transformé en pression de contact (avec une répartition de type gaussienne). De ce fait la sollicitation subie par chaque lame n'est pas une véritable flexion « 4 points ».

La prise en compte du frottement n'a pas de conséquence marquée dans la reprise du cisaillement (augmente le gain d'au plus 2 %).

Enfin, la densité de clouage homogène significative est évaluée à 5 cl/dm², pour un gain à l'effort admissible de $G = 90 \%$

5 Conclusions

Les travaux entrepris dans cette thèse concernent la question : comment des poutres constituées de lames clouées peuvent elles présenter une rigidité suffisante en flexion, contrairement à des lames simplement boulonnées.

Les propriétés mécaniques des lames utilisées sont définies par la mesure de 2 paramètres: la densité et le module d'élasticité en flexion.

Les autres propriétés élastiques sont déterminées par les relations :

$$E_{Tr} = 1600 \times \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,5}$$

$$G_{TIL} = 1150 \times \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,2}$$

$$G_{RT} = 380 \times \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,7}$$

$$n_{ULTr} = 0,38$$

$$n_{UTIL} = 0,042$$

$$n_{UTR} = 0,52$$

Le contact des lames induit par le frottement une certaine résistance au cisaillement. Le coefficient de frottement varie en fonction de l'état de surface (de contact), de l'orientation des fibres, et de l'humidité du bois. Globalement les essais ont permis d'évaluer le coefficient de frottement bois sur bois pour le Gonfolo entre 0,45 et 0,65.

Une série d'essais a permis de définir le comportement non linéaire d'un clou travaillant en sollicitation de type cisaillement, pour un bilame cloué.

Ce comportement débute par une phase élastique, où une limite élastique de glissement est estimée à environ 0,015 mm et une limite de charge élastique de 200 N (soit une raideur de 13600 N/mm). Au-delà de ces limites, le comportement du clou est de type plastique, la relation force déplacement est (dans les conditions spécifiées de cette étude) :

$$F(u) = 475 \times \rho \ln(16 \times u + 1,7).$$

L'effort maximum de reprise d'effort en cisaillement d'un clou est de l'ordre de 800N, pour un glissement d'environ 3mm. L'estimation de l'effort d'arrachement varie entre 472N et 1026N selon les références de calculs utilisées.

D'autres essais réalisés sur des bilames cloués sollicités en flexion 4 points ont montré comment une densité de clouage suffisante permettait de se rapprocher de la rigidité que conférerait un collage pour ce bilame.

La modélisation par éléments finis (développée sur CASTEM) des lames clouées fléchies, utilisant la loi de comportement du clou résultant de l'expérimentation, permet de définir l'évolution de la performance du bilame en fonction de la densité de clouage et du niveau de chargement. La prise en compte du frottement n'a pas de conséquence marquée dans la reprise des efforts tangents (augmente le gain d'au plus 2 %).

La prédiction correspond bien avec les résultats expérimentaux, et un assemblage, caractérisé par une densité de clous pouvant être prédite par le modèle, permet de conférer une rigidité satisfaisante à une poutre lamellée clouée lorsqu'elle est sollicitée en flexion, ce qui permet de compenser la souplesse trop grande de l'assemblage simplement boulonné.

Ce type d'assemblage peut être amélioré en densifiant le plan de clouage au niveau des extrémités. Cependant le gain supplémentaire n'est pas très important et cette option est difficilement envisageable dans la pratique car elle nécessiterait un plan de clouage spécifique suivant la configuration des planches.

Il est possible d'utiliser l'outil numérique pour prédire le comportement d'une poutre quelconque réalisée avec plusieurs couches (plus de deux).

6 Perspectives

Les résultats obtenus montrent la possibilité de regagner suffisamment en rigidité pour la réalisation de poutres lamellées clouées boulonnées de grande portée. Pour aller plus loin sur la faisabilité de telles poutres il convient d'aborder successivement les étapes suivantes.

En premier lieu, il faut étendre la portée des résultats des travaux entrepris dans cette thèse. Le modèle numérique aboutit à une prédiction du comportement d'un bilame de Gonfolo très proche de ce que l'on obtient par expérimentation. Le calcul par éléments finis permet de prédire le comportement en flexion d'une poutre lamellée clouée constituée de n planches, où $n \geq 3$, avec différentes densités de clouage, la concordance avec l'expérimentation reste-t-elle bonne ?

Par ailleurs le Gonfolo présente une gamme de densité relativement réduite (0,65 à 0,75). En utilisant d'autres essences, sortant largement de cette gamme de densité, le modèle numérique permet-il toujours de prédire le comportement d'une poutre lamellée clouée ? Notamment, le comportement du clou reste-t-il valable en dehors de la gamme de densité du Gonfolo ?

Sur le marché guyanais, la disponibilité des essences dépend d'un grand nombre de paramètres. La plupart du temps, les professionnels de la seconde transformation du bois doivent, pour réaliser un ouvrage, mélanger les essences en conciliant les propriétés mécaniques, la durabilité, les couleurs, le séchage, les sections, le prix etc. Le Gonfolo étant l'essence la plus courante sur le marché guyanais de la charpente, l'étude a été limitée à cette essence. Cependant, la réalisation d'une poutre lamellée clouée avec différentes essences induit :

- la vérification de la validité du modèle numérique prédisant le comportement en flexion de la poutre ;
- l'intégration des propriétés mécaniques spécifiques à chaque essence ;
- la vérification de l'extension du comportement de l'assemblage cloué en cisaillement avec des densités allant de 0,3 à 1,1 et des différences sensibles entre lames superposées.

Le deuxième point qu'il conviendrait d'étudier est la prise en compte des discontinuités des lames. Pour mémoire, le principe du lamellé est de réaliser une poutre de longueur et de retombée théoriquement illimitées à partir des lames tirées de planches courtes (maximum 7 mètres sur le marché guyanais).

Une poutre expérimentale constituée de 5 planches, de 27 mm d'épaisseur, avec une densité de clouage de 0,3 cl/dm², et une discontinuité dans chaque couche (distantes les unes des autres de 1 mètre au moins) a présenté une rigidité à peine équivalente à celle de deux planches continues non clouées. La médiocrité de ce résultat est due à des efforts transverses qui écartent les lames (délamination) au niveau de leur extrémité (celle réalisant le joint dans une même couche). Ces écartements engendrent des efforts d'arrachement des clous. La résistance en arrachement des clous étant faible, les pointes sortent de leur logement.

Ce point particulier est aussi redouté par les lamellistes dans la réalisation du lamellé collé. Les joints d'aboutage en long des planches nécessitent un contrôle rigoureux, car même dans le bois massif la résistance aux efforts transverses est faible.

PERSPECTIVES

Une attention particulière doit être portée sur ces joints de discontinuité des lames afin de trouver des solutions réalistes : le boulonnage peut se faire à leur niveau afin de reprendre les efforts transverses ; des plaques métalliques, chevauchant les joints de discontinuité des lames et servant de « rondelle » de serrage pour les boulons placés de part et d'autre de ces joints, pourraient aussi limiter ce problème de discontinuité.

Il est indispensable de traiter cette question avec rigueur avant de proposer tout développement du procédé.

Ensuite, l'étude du comportement de la poutre lamellée clouée boulonnée en flexion ne peut se limiter à l'étude de sa rigidité ; Il convient d'étudier sa résistance et l'énergie dissipée dans la poutre pour parvenir à la rupture. La plus grande souplesse de ce type de poutre pourrait être utilisée comme avantage (en dissipant beaucoup d'énergie) dans les constructions antisismiques.

Egalement, le vieillissement des poutres lamellées clouées boulonnées doit être examiné. Dans ce problème intervient le fluage du bois, mais aussi le comportement de l'assemblage cloué cisailé sur une longue durée qui induit de l'écrasement des fibres (et donc l'aspect viscoélastique du bois) et le vieillissement même du clou (sa corrosion).

Enfin, une étude de faisabilité et une étude économique doivent être réalisées dans le contexte guyanais. Les dispositions techniques et les coûts à prendre en compte commencent depuis la scierie, en passant par le transport, la réalisation, le contrôle et la mise en œuvre, pour finir avec les assemblages.

7 Références bibliographiques

- Antiane-Eco**, septembre 2004, INSEE, Huard D. Société de conseils et d'ingénierie Internet basée aux Antilles n°61. 36 p.
- Balma**, D.A. décembre 1999. Master of science in civil engineering. Evaluation of bolted connections in wood plastic composites. Washington State University. 76 p. ASAE (American Society of Agricultural and biological Engineers) n°994177 11 p.
- Bianco**, J. L., 25 août 1998, Rapport Bianco : La forêt, une chance pour la France. 78 p.
- Berard**, 2003. Valorisation des taillis de châtaignier en bois ronds pour usage extérieur : étude et optimisation d'un traitement oléo-thermique pour améliorer l'aspect et la durée de vie du produit. Université Montpellier II, thèse de doctorat.
- Blass**, H.J. 1993. Variation of load-slip behavior in nailed joints : variation parallel to the grain. Forest products journal. J. 44(1). 20 p.
- Blass**, H.J. 1993. Variation of load-slip behavior in nailed joints : variation perpendicular to the grain. Forest products journal. J. 44(2). 34 p.
- Blass**, H.J. 1994. Characteristic strength of nailed joints. Forest products journal. 44(4) : 39 p.
- Bocquet**, 1997. Modélisation des déformations locales du bois dans les assemblages brochés et boulonnés, Université Blaise Pascal Clermont II, thèse de doctorat, 186 p.
- Bohnhoff**, D.R. 1989. Evaluation of spliced, nail laminated wood members without butt joint reinforcement. ASAE, 32 : 5, 1806 p.
- Bohnhoff**, D.R. 1997. Load sharing in nail-laminated assemblies subjected to bending loads. ASAE, n° 974090, 25 p.
- Bohnhoff**, D.R. 1998. Bending properties of STP laminated wood girders. ASAE, n°984015, 14 p.
- Bouchair**, A ; 1993. Modélisation non linéaire du comportement local des assemblages bois, Université Blaise Pascal Clermont II, thèse de doctorat. 176 p.
- Bouchair**, A ; 1995. An application of the Tsai criterion as a plastic flow law for timber bolted joint modelling. Wood Science and Technology. 30 (1) : 19 p.
- Byerly**. M.S. Nail laminated posts with metal plated joints. ASAE 25 : 2, 444 p.
- Canadian Wood Construction Datafile**, 1977. Nails, spikes and staples. N°WJ-2, 12 p.
- Charte accord-cadre-environnement**, 10 objectifs
- Chui**, Y.H. 1999. Developing pre engineered designs for eccentrically loaded bolted timber connections. Forest Research Bulletin vol 2. N°212, 216 p.
- CIRAD-Forêt**, 1994. Bois des DOM-TOM. Tome 1 Guyane. 231 p.
- Conférence de Buenos Aires**, novembre 1998. FAO, 4ème Conférence mondiale sur les changements climatiques.
- Conférence de Kyoto**, mars 2001. FAO, Rapport de la 16^{ème} session au COAG (COmité de l'AGriculture), Convention cadre sur le changement climatique.
- Conférence de Rio de Janeiro**, 12 août 1992. FAO, Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement. Convention sur les changements climatiques, 27 principes A/CONF.151/26 (Vol. I)
- Courrier de l'industrie du bois et de l'ameublement**, 1981. Bolted joints in glulam structures. N°39, xix
- Daudeville**, L. 1999. Prediction of the load carrying capacity of bolted timber joints. Wood Science and Technology. 33 (1) : 29 p.
- DTU CB 71**, 1984. Règles de calcul et de conception des charpentes en bois, Document Technique Unifié, NF P-21-701, 182 p.
- Dubois**, 1999. Introduction à l'utilisation de CASTEM, document interne LMGC Université Montpellier 2, 58 p.
- Dutko**, P. 1991. Loading capacity of homogeneous and nonhomogeneous beams made wood and steel. Drevarsky-Vyskum. N°130, 69 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ehlbeck, J.; Werner, H.;** 1992. Softwood and hardwood embedding strength for dowel type fasteners. Working Commission W18 – Timber Structure. Inter. Council for Building Res. Studies and Documentation, Univ. of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany. 10 p.
- Encyclopédie de métiers,** 1972. Edition Les compagnons du devoir. La construction et la charpente en bois
- Eurocode 5,** janvier 1996. Calcul des structures en bois, Règles générales et règles pour les bâtiments, édition Eyrolles. 157 p.
- Fox, S.P.** 1979. Connection capacity of new Griplam nails. Canadian Journal of Civil Engineering, reprint National Research Council Canada 6 : 1, 64 p.
- Gasc et Delporte,** 1975. Traité du bâtiment, les charpentes en bois, édition Eyrolles. 336 p.
- Gesualdo, F.A.R.** 1999. Structures formed by non parallel layers joined by connectors. Forest Research Bulletin vol 2. N°212, 301 p.
- Guéneau et Al.,** 1976, rapport BMR n°8 CTBA
- Guitard,** 1985. Mécanique du matériau bois et composites, éditions Cepadues. 238 p.
- Hoadley, R.B.** 1977. Comparison of lag screws and threaded nails in a typical structural joint. Forest products journal J. 27 (12): 47 p.
- Inoue, M.** 1999. Structural behavior of box beam jointed by new connecting system. Forest Research Bulletin vol 3. N°212, 130 p.
- INSEE,** 2000, Les projections de population aux Antilles-Guyane à l'horizon 2030. 26 p.
- Johnson, E.** 1999. Connection design methodology for structural composite lumber (engineered wood producte, made by gluing together veneer sheets, strips of wood or smaller wood elements). Wood Design Focus 10 : 4, 20 p.
- Keating, W.G.** 1973. Nail laminating. Forest products Newsletter. N°393, 4 p.
- Koska, P.** 1998. Calculating deformation constants of joints with reference to prestressing in bolted joints. Avta Facultatis Xylogogiae Zvolen res Publica Slovaca. N°39, 152 p.
- Le fichoux,** 1998, Présentation et utilisation de CASTEM, document interne ENSTAM - LME. 72 p.
- LOI n°96-1236 sur l'air** et l'utilisation rationnelle de l'énergie, 30 décembre 1996. NOR : ENVX9500163L
- Masuda, M.** 1999. Fracture analysis of bolted joints using Digital Image Correlation Method. Forest Research Bulletin vol 2. N°212, 333-340 p.
- Natterer, Sandoz, Rey,** Traité de génie civil, construction en bois, 1999. Volume 13, 472 p.
- Norme européenne,** .EN 26891 Structure en bois – Assemblages réalisés avec des éléments mécaniques de fixation – Principes généraux pour la détermination des caractéristiques de résistances et de déformation, 6 p.
- Norme européenne,** .EN 28970 Structure en bois – Essai des assemblages réalisés par organes mécaniques – Exigences concernant la masse volumique des bois, 7 p.
- Norme européenne,** .EN 383, Structure bois – méthodes d'essais – détermination des caractéristiques de fondation et de portance locale d'élément d'assemblage de type broche, 11 p.
- Norme européenne,** .EN 409, Structure bois – méthodes d'essais – détermination du moment plastique des organes de type tige – pointe, 8 p.
- Norme française,** 1987. NF B 51-008 et 016. 24 p.
- Norme française,** 1993. Détermination des caractéristiques de fondation et de la portance locale d'éléments de type broche. NF EN 383 ; 11 p.
- Norme française,** 2004. Bois de structure et bois lamellé collé. Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques. NF EN 408 ; 29 p.
- Petit-Vergara, J.** 1972. Joints in structural timber : nails and screws. Informe Tecnico Instituto Forestal Chile, N°36, 220 p.
- Pouokam,** 2004, Caractérisation de la résistance en portance locale pour le clouage du gonfalo rose (qualea rosea). Mémoire de DEA Sciences du bois, ENSTIB, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 24p.
- Prion, H.G.L.** 1999. Bolted connections in structural composite lumber : anisotropiv plasticity model. Forest Research Bulletin vol 2. N°212, 99 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Racher**, 1992. Les assemblages de structures bois. Annales ITBTP, N°504.
- Salenikovitch**, A.J. 1996. Understanding the performance of timber connections made with multiple bolts. Wood Design Focus 7 : 4, 26 p.
- Sandie**, R.B. 1989. Buckling strength of nail laminated and spaces beam columns. Proceedings of the second Pacific Timber Engineering Conference. Vol 2, 240 p.
- Sandie**, R.B. 1989. The flexural behaviour of nailed timber box beams. Proceedings of the second Pacific Timber Engineering Conference. Vol 1, 117 p.
- SIA - Lignum**, 1998. Construction en bois. Union suisse en faveur du bois, Service de consultations, Zurich, Office Romand, Neuchâtel.
- Smith**, I. 1984. Mechanical Properties of nails and their Influence on mechanical properties of nailed timber joints subjected to lateral loads. Meeting seventeen Rapperswil, Switzerland. N°CIB-W18-17-1
- Stern**, E.G. 1973. Flitch beams. Forest products journal. J. 23 (5). 47 p.
- Structures en bois aux états limites**, janvier 2000. Introduction à l'Eurocode 5. Matériaux et bases de calcul. Edition Eyrolles, 2ème édition, 260 p.
- Stukov**, V.P. 1992. Calculation of a nail in wood. Izvestiya Vysshikh Uchenbnykh Zavedenii Lesnoi Zhurnal N°3, 66 p.
- Stukov**, V.P. 1992. The case of calculation of a nail in wood. Izvestiya Vysshikh Uchenbnykh Zavedenii Lesnoi Zhurnal N°2, 54 p.
- Syndicat National des constructeurs de charpentes en bois lamellé-collé**, 1984. Charpentes en bois lamellé-collé, édition Eyrolles. 222 p.
- Taylor**, S.B. 1992. Bending properties of treated and untreated spliced nail laminated hardwood posts. ASAE, n°924548, 29 p.
- Taylor**, S.B. 1995. Bending properties of nail laminated hardwood posts. ASAE, 38 : 1, 217-224 p.
- Turnbull**, J.E. 1981. Multi laminated nail truss connections. Canadian Agricultural Engineering 23 : 2, 113-119 p.
- Van Der Put**, 1976. Algèbres des fonctions continues des p-adiques
- Vernay**, 1997. Guide d'utilisation des bois de Guyane dans la construction. ISBN : 2-87614-268-6. 202 p.
- Whale**, L.R.J. ; **Smith**, I. and **Hilson**, B.O. 1989. Caractéristique properties of nailed and bolted joints under short term lateral load. Part 4. The influence of testing mode and fastener diameter upon embedment test data. J inst Wood Science 11(5). 161 p.
- Williams**, G.D, 1992. Bending properties of four layer nail laminated posts. ASAE, Nashville, n°924543, 23 p.
- Williams**, G.D, 1994. Bending properties of four layer nail laminated posts. Research Paper Forest Products Laboratory, FLP-RP 528, 16 p.
- Winistorfer**, S.G. 1987. Bending performance of spliced, nailed laminated posts. ASAE. 30 : 6, 1796 p.
- Woeste**, F.E. 1988. A comparison of five laminated wall column designs. Applied Engineering in Agriculture. 4 : 1, 75 p.
- Yamishita**, A. 1989. Motion analysis of skilled and unskilled woodworkers nailing with a hammer. Journal of the Japan Wood Research Society. 35 : 5, 405 p.

8 Annexes

8.1 Annexe 1 : cisaillement d'un assemblage à n clous

Programmation CASTEM

```
OPTI dime 2 elem qua4 mode plan cont;
OPTI TRAC PSC;
OPTI IMPR 10 IMPR 'data3.txt';
TEMPS NOEC ZERO;
```

*

* VARIABLES-----

*

*nombre de clous sur la longueur totale

ntc = 2;

* test pour ntc = 1 alors ntcc = vrai (shintage de boucle)

ntcc = ntc EGA 1;

*nombre d'itérations max pour la convergence

nbocl = 100;

*nombre d'incrémentations divisant la force max

ncal = 10;

*coefficient de viscosité pour la convergence

visc = 1;

*force approximative max par joint

Frc = 800.;

Frc = Frc * ntc;

*

* GEOMETRIE BOIS-----

*

*longueur du VER

long = 100.;

vtc = (long 0.);

*longueur du joint

ljo = 4.;

*longueur de l'élément de transition joint et contact

hoa = 2.;

*dimensions des planches

haut1 = 27.;

haut2 = 27.;

epai = 50.;

*critère de convergence

rsdmax = 0.0001;

*propriétés des planches

Eb1 = 20000.;

rho1 = 0.7;

Eb2 = 20000.;

rho2 = 0.7;

*raideur initiale du joint

GLISK = 202.5 * (rho1+rho2) *(log ((16*0.015) + 1.7)) / 0.015;

*coefficients pour le maillage du VER

nb1 = 20;

nb2 = 4;

ANNEXES

nb3 = 10;

*

* TABLES-----

*

* droites.....

drab1 = table;

drbc1 = table;

drdc1 = table;

drde1 = table;

dref1 = table;

drfg1 = table;

drgh1 = table;

drha1 = table;

draf1 = table;

drab2 = table;

drbc2 = table;

drdc2 = table;

drde2 = table;

dref2 = table;

drfg2 = table;

drgh2 = table;

drha2 = table;

draf2 = table;

* surfaces.....

sur1 = table;

sur2 = table;

*joints.....

joint = table;

clconab = table;

clconcd = table;

clconef = table;

jeu1 = table;

jeu2 = table;

jeu3 = table;

modjoi = table;

matjoi = table;

GLK = table;

GLS = table;

*itération.....

dcl = table;

fcl = table;

fclt = table;

dpcl = table;

frcl = table;

RIJ = table;

p1a = (long) 0.;

p1b = ((long/2) + ((lloi/2)+hoa)) 0.;

p1c = ((long/2) + (lloi/2)) 0.;

p1d = ((long/2) - (lloi/2)) 0.;

p1e = ((long/2) - ((lloi/2)+hoa)) 0.;

p1f = 0. 0.;

p1g = 0. (-1* haut1.);

ANNEXES

p1h = (long) (-1* haut1.);

p2a = (long) 0.;
 p2b = ((long/2) + ((lloi/2)+hoa)) 0.;
 p2c = ((long/2) + (lloi/2)) 0.;
 p2d = ((long/2) - (lloi/2)) 0.;
 p2e = ((long/2) - ((lloi/2)+hoa)) 0.;
 p2f = 0. 0.;
 p2g = 0. (haut2);
 p2h = (long) (haut2);

drab1.1 = p1a droi (-1*(nb1-nb3+2)/2) p1b 'DINI' 15 'DFIN' 1;
 drbc1.1 = p1b droi 1 p1c;
 drcd1.1 = p1c droi (nb3-4) p1d;
 drde1.1 = p1d droi 1 p1e;
 dref1.1 = p1e droi (-1*(nb1-nb3+2)/2) p1f 'DINI' 1 'DFIN' 15;
 drfg1.1 = p1f droi nb2 p1g;
 draf1.1 = drab1.1 et drbc1.1 et drcd1.1 et drde1.1 et dref1.1;
 drgh1.1 = p1g droi nb1 p1h;
 drha1.1 = p1h droi nb2 p1a;
 sur1.1 = dall draf1.1 drfg1.1 drgh1.1 drha1.1 coul rose;

drab2.1 = p2a droi (-1*(nb1-nb3+2)/2) p2b 'DINI' 15 'DFIN' 1;
 drbc2.1 = p2b droi 1 p2c;
 drcd2.1 = p2c droi (nb3-4) p2d;
 drde2.1 = p2d droi 1 p2e;
 dref2.1 = p2e droi (-1*(nb1-nb3+2)/2) p2f 'DINI' 1 'DFIN' 15;
 drfg2.1 = p2f droi nb2 p2g;
 draf2.1 = drab2.1 et drbc2.1 et drcd2.1 et drde2.1 et dref2.1;
 drgh2.1 = p2g droi nb1 p2h;
 drha2.1 = p2h droi nb2 p2a;
 sur2.1 = dall draf2.1 drfg2.1 drgh2.1 drha2.1 coul jaun;

sur10 = sur1.1;
 sur20 = sur2.1;
 trac (sur10 et sur20);

SI ntcc;
 SINON;
 *boucle de création des VER dans la longueur*****
 REPE bcl1 (ntc-1);
 nw = &bcl1 + 1;

drab1.nw = drab1.&bcl1 plus vtc;
 drbc1.nw = drbc1.&bcl1 plus vtc;
 drcd1.nw = drcd1.&bcl1 plus vtc;
 drde1.nw = drde1.&bcl1 plus vtc;
 dref1.nw = dref1.&bcl1 plus vtc;
 draf1.nw = drab1.nw et drbc1.nw et drcd1.nw et drde1.nw et dref1.nw;
 drfg1.nw = drfg1.&bcl1 plus vtc;
 drgh1.nw = drgh1.&bcl1 plus vtc;
 drha1.nw = drha1.&bcl1 plus vtc;
 elim (draf1.nw et drfg1.nw et drgh1.nw et drha1.nw) 0.005;
 sur1.nw = dall draf1.nw drfg1.nw drgh1.nw drha1.nw coul vert;
 sur10 = sur10 et sur1.nw;

drab2.nw = drab2.&bcl1 plus vtc;

ANNEXES

drbc2.nw = drbc2.&bcl1 plus vtc;
drcd2.nw = drcd2.&bcl1 plus vtc;
drde2.nw = drde2.&bcl1 plus vtc;
dref2.nw = dref2.&bcl1 plus vtc;
draf2.nw = drab2.nw et drbc2.nw et drcd2.nw et drde2.nw et dref2.nw;
drfg2.nw = drfg2.&bcl1 plus vtc;
drgh2.nw = drgh2.&bcl1 plus vtc;
drha2.nw = drha2.&bcl1 plus vtc;
elim (draf2.nw et drfg2.nw et drgh2.nw et drha2.nw) 0.005;
sur2.nw = dall draf2.nw drfg2.nw drgh2.nw drha2.nw coul bleu;
sur20 = sur20 et sur2.nw;

ELIM 0.001 sur10;
ELIM 0.001 sur20;

fin bcl1;
*fin boucle de création des VER dans la longueur*****
trac (sur10 et sur20);
FINSI;

*
* MODELE BOIS-----
*

modb1 = modl sur10 mecanique elastique orthotrope;
modb2 = modl sur20 mecanique elastique orthotrope;

*
* CARACTERISTIQUES DU BOIS-----
*

Pet = 1.5;
Pgt = 1.2;
Eg1 = (1600*((rho1/0.65)**Pet));
Eg2 = (1600*((rho2/0.65)**Pet));
GT1 = (1150*((rho1/0.65)**Pgt));
GT2 = (1150*((rho2/0.65)**Pgt));

matb1 = mate modb1 direction (1. 0.)
YG1 Eb1 YG2 Eg1 YG3 Eg1
NU12 0.43 NU23 0.53 NU13 0.43
G12 GT1;

matb2 = mate modb2 direction (1. 0.)
YG1 Eb2 YG2 Eg2 YG3 Eg2
NU12 0.43 NU23 0.53 NU13 0.43
G12 GT2;

*
* GEOMETRIE JOINT1-----
*

joint.1 = RACC 0.0005 drcd1.1 drcd2.1;
join = joint.1;
modjoi.1 = MODL joint.1 mecanique elastique isotrope JOI2;

*
* RELATION DE CONTACT1-----
*

ANNEXES

```

clconab.1 = RELA MAXI UY drab1.1 - UY drab2.1;
jeu1.1 = DEPIMP clconab.1 0.;
JEUX = jeu1.1;
clconcd.1 = RELA UY drcd1.1 - UY drcd2.1;
jeu2.1 = DEPIMP clconcd.1 0.;
JEUX = JEUX et jeu2.1;
clconef.1 = RELA MAXI UY dref1.1 - UY dref2.1;
jeu3.1 = DEPIMP clconef.1 0.;
JEUX = JEUX et jeu3.1;
clco = clconab.1 et clconcd.1 et clconef.1;

SI ntcc;
SINON;
*boucle de création des joints dans la longueur*****
REPE bcl2 (ntc-1);
nw = &bcl2 + 1;

*
* GEOMETRIE JOINT-----
*
joint.nw = RACC 0.0005 drcd1.nw drcd2.nw;
join = join et joint.nw;
*
* MODELE JOINT-----
*
modjoi.nw = MODL joint.nw mecanique elastique isotrope JOI2;

*
* RELATION DE CONTACT-----
*

clconab.nw = RELA MAXI UY drab1.nw - UY drab2.nw;
jeu1.nw = DEPIMP clconab.nw 0.;
jeux = jeux et jeu1.nw;
clconcd.nw = RELA UY drcd1.nw - UY drcd2.nw;
jeu2.nw = DEPIMP clconcd.nw 0.;
jeux = jeux et jeu2.nw;
clconef.nw = RELA MAXI UY dref1.nw - UY dref2.nw;
jeu3.nw = DEPIMP clconef.nw 0.;
jeux = jeux et jeu3.nw;
clco = clco et clconab.nw et clconcd.nw et clconef.nw;

fin bcl2;
*fin boucle de création des joints dans la longueur*****
FINSI;
*
* CONDITIONS AUX LIMITES-----
*

Adrb1 = sur10 POIN DROIT (0. 0.) (0. (haut1+haut2)) 0.001;
CL1x = bloq UX Adrb1;
Adrb2 = sur10 POIN DROIT (0. 0.) ((2*long) 0.) 0.001;
CL1y = bloq UY Adrb2;

clappui = CL1x ET CL1y;

*boucle initialisaion de la raideur des joints*****

```

ANNEXES

```
REPE bcl3 ntc;
GLK.&bcl3 = GLISK;
fin bcl3;
*fin boucle initialisaion de la raideur des joints*****

*****
*boucle de calcul avec évolution du chargement*****
REPE bcl10 ncal;
frcl.&bcl10 = table;
dpcl.&bcl10 = table;

*
* CHARGEMENT-----
*
adrt = sur20 POIN DROIT ((ntc*long) 0.) ((ntc*long) (haut2)) 0.001;
Fcal = &bcl10*Frc/(epai*ncal);
f1 = FORC (Fcal 0.) adrt;
ftot = f1 ET jeux;

nbc = 0;
*boucle évaluation du résidu pour la convergence*****
REPE bcl7 nbocl;
nbc = nbc + 1;

*
* CARACTERISTIQUES DU JOINT-----
*
REPE bcl4 ntc;
GLS.&bcl4 = GLK.&bcl4/ljoi/epai;
matjoi.&bcl4 = MATE modjoi.&bcl4 KS GLS.&bcl4 KN GLS.&bcl4;
fin bcl4;

*
* MATRICE DE RIGIDITE-----
*
R11 = RIGI modb1 matb1;
R12 = RIGI modb2 matb2;
RIJ.1 = RIGI modjoi.1 matjoi.1;
R13 = RIJ.1;
SI ntcc;
SINON;
REPE bcl5 (ntc-1);
nw = &bcl5 + 1;
RIJ.nw = RIGI modjoi.nw matjoi.nw;
R13 = R13 et RIJ.nw;
fin bcl5;
FINSI;
R11 = R11 ET R12 ET R13 ET clappui ET clco;

*
*RESOLUTION RESO-----
*
DEP1 = RESO (R11) Ftot;

*
*CRITERE DE CONVERGENCE-----
*
```

ANNEXES

vphil = 0.;

*boucle calcul de F et delta u des joints*****

```

REPE bcl6 ntc;
DEFR1 = EPSI (modjoi.&bcl6) DEP1;
DEFR2 = CHAN NOEUD (modjoi.&bcl6) DEFR1;
CHP12 = CHAN CHPO (modjoi.&bcl6) DEFR2;
CNT1 = SIGM (modjoi.&bcl6) (matjoi.&bcl6) DEP1;
CNT2 = CHAN NOEUD (modjoi.&bcl6) CNT1;
CHP11 = CHAN CHPO (modjoi.&bcl6) CNT2;
Pclo = joint.&bcl6 poin proc (((long/2)+((&bcl6-1)*long)) 0.);
fcl.&bcl6 = extr CHP11 SMSN Pclo;
fcl.&bcl6 = fcl.&bcl6*ljoi*epai;
dcl.&bcl6 = extr CHP12 DRSN Pclo;
vpatd = abs (dcl.&bcl6/2);
vpatf = abs (fcl.&bcl6/2);
SI (vpatd < 0.015);
GLK.&bcl6 = GLISK;
fcl.&bcl6 = GLISK * vpatd;
SINON;
fcl.&bcl6 = 202.5 * (rho1+rho2) *(log ((16*vpatd) + 1.7));
vphil = vphil + (((vpatf-fcl.&bcl6)/fcl.&bcl6)**2);
fgh = (1-visc)*(vpatf-fcl.&bcl6);
GLK.&bcl6 = abs(((fcl.&bcl6 + fgh)/vpatd));
FINSI;
fin bcl6;

```

*fin boucle calcul de F et delta u des joints*****

```

vphil = vphil**0.5;
crit = vphil < rsdmax;

```

```

SI crit;
QUITTER bcl7;
FINSI;

```

FIN bcl7;

*fin boucle évaluation du résidu pour la convergence*****

```

mess 'nbc'&bcl10;
mess nbc;

```

*

*RESULTATS-----

*

*boucle capture des forces et déplacements au niveau des clous*****

```

REPE bcl8 ntc;
frcl.&bcl10.&bcl8 = fcl.&bcl8/2;
dpcl.&bcl10.&bcl8 = dcl.&bcl8/2;
fin bcl8;

```

*fin boucle capture des forces et déplacements au niveau des clous***

*boucle tracage des contraintes et deformations*****

```

DEF0 = DEFO 0. (sur10 et sur20 et join) DEP1 ROUGE;
REA1 = REAC DEP1 RII;
VECT1 = VECT REA1 0.1 FX FY ROUGE;
DER1 = DEFO 20. (sur10 et sur20 et join) DEP1 VECT1 BLANC;
*TRAC (DEF0 ET DER1);

```

ANNEXES

```
CONT1 = SIGM (modb1 et modb2) (matb1 et matb2) DEP1;
CONT2 = CHAN NOEUD (modb1 et modb2) CONT1;
CHPO10 = CHAN CHPO (modb1 et modb2) CONT2;
SIG1 = REDU CONT2 modb1;
SIG2 = REDU CONT2 modb2;
Sigmas11 = Vmis SIG1 modb1;
Sigmas21 = vmis SIG2 modb2;
TITR 'CONTRAINTES DE VON MISES';
*TRAC (Sigmas11 et Sigmas21) (modb1 et modb2);
*fin boucle tracage des contraintes et deformations*****

*Pg4 = (cont sur20) poin proc (0. (haut2/2));
*DP.&bcl10 = EXTR DEP1 UX Pg4;

FIN bcl10;
*fin boucle de calcul avec évolution du chargement*****
*****

*RESTITUTION.....
*boucle de restitution des efforts et deplact dans les clous*****
REPE bcl13 ncal;
REPE bcl12 ntc;
mess frcl.&bcl13.&bcl12;
FIN bcl12;
FIN bcl13;
REPE bcl15 ncal;
REPE bcl14 ntc;
mess dpcl.&bcl15.&bcl14;
FIN bcl14;
FIN bcl15;
*fin boucle de restitution des efforts et deplact dans les clous*****
TEMPS;
fin;
```

8.2 Annexe 2 accélération de convergence

Programmation CASTEM (substituant la boucle 7 de l'annexe 1)

*boucle évaluation du résidu pour la convergence*****

REPE bcl7 nbocl;

nbc = nbc + 1;

*

* CARACTERISTIQUES DU JOINT-----

*

REPE bcl4 ntc;

GLS.&bcl4 = GLK.&bcl4/ljoi/epai;

matjoi.&bcl4 = MATE modjoi.&bcl4 KS GLS.&bcl4 KN GLS.&bcl4;

fin bcl4;

*

* MATRICE DE RIGIDITE-----

*

RI1 = RIGI modb1 matb1;

RI2 = RIGI modb2 matb2;

RIJ.1 = RIGI modjoi.1 matjoi.1;

RI3 = RIJ.1;

SI ntc;

SINON;

REPE bcl5 (ntc-1);

nw = &bcl5 + 1;

RIJ.nw = RIGI modjoi.nw matjoi.nw;

RI3 = RI3 et RIJ.nw;

fin bcl5;

FINSI;

RII = RI1 ET RI2 ET RI3 ET clappui ET clco;

*

*RESOLUTION RESO-----

*

DEP1 = RESO (RII) Ftot;

*boucle calcul de F et delta u des joints*****

REPE bcl6 ntc;

DEFR1 = EPSI (modjoi.&bcl6) DEP1;

DEFR2 = CHAN NOEUD (modjoi.&bcl6) DEFR1;

CHP12 = CHAN CHPO (modjoi.&bcl6) DEFR2;

CNT1 = SIGM (modjoi.&bcl6) (matjoi.&bcl6) DEP1;

CNT2 = CHAN NOEUD (modjoi.&bcl6) CNT1;

CHP11 = CHAN CHPO (modjoi.&bcl6) CNT2;

Pclo = joint.&bcl6 poin proc (((long/2)+((&bcl6-1)*long)) 0.);

fcl.z.&bcl6 = extr CHP11 SMSN Pclo;

fcl.z.&bcl6 = fcl.z.&bcl6*ljoi*epai/2;

dcl.z.&bcl6 = extr CHP12 DRSN Pclo;

dcl.z.&bcl6 = dcl.z.&bcl6/2;

fin bcl6;

*fin boucle calcul de F et delta u des joints*****

tess = z EGA 1;

ANNEXES

```

SI tess;
REPE te1 ntc;
vpatd = abs (dcl.z.&te1);
vpatf = abs (fcl.z.&te1);
tes2 = vpatd < 0.015;

SI tes2;
GLK.&te1 = GLISK;
fclt.&te1 = GLISK * vpatd;
SINON;
fclt.&te1 = ka*(log ((kb*vpatd) + kc));
GLK.&te1 = abs(fclt.&te1/vpatd);
FINSI;
FIN te1;
FINSI;

tess = z EGA 2;
SI tess;
*accélération si u > 0.015
REPE acc ntc;
vpatd = abs (dcl.z.&acc);
vpatf = abs (fcl.z.&acc);

tes2 = vpatd < 0.015;
SI tes2;
GLK.&acc = GLISK;
SINON;
numa = fcl.z.&acc - fcl.(z-1).&acc;
dena = dcl.z.&acc - dcl.(z-1).&acc;
deno = dena EGA 0;
SI deno;
*mess 'deno'&acc;
*mess dcl.z.&acc;
*mess dcl.(z-1).&acc;
GLK.&acc = vpatf/vpatd;
SINON;
kd = numa / dena;
ke = vpatf - (kd * vpatd);
u0 = vpatd;
u1 = (exp(((kd*u0)+ke)/ka)-kc)/kb;
u2 = (exp(((kd*u1)+ke)/ka)-kc)/kb;
u3 = (exp(((kd*u2)+ke)/ka)-kc)/kb;
fclt.&acc = ka *(log ((kb*u3) + kc));
GLK.&acc = abs(fclt.&acc/u3);
FINSI;
FINSI;

FIN acc;
FINSI;

tess = z EGA 3;
SI tess;
*critère de convergence
vphil = 0.;

REPE bcl9 ntc;
vpatd = abs (dcl.z.&bcl9);

```

ANNEXES

```
vpatf = abs (fcl.z.&bcl9);  
tes2 = vpatd < 0.015;
```

```
SI tes2;  
GLK.&bcl9 = GLISK;  
fclt.&bcl9 = GLISK * vpatd;  
SINON;  
fclt.&bcl9 = ka*(log ((kb*vpatd) + kc));  
vphil = vphil + (((vpatf-fclt.&bcl9)/fclt.&bcl9)**2);  
GLK.&bcl9 = abs(fclt.&bcl9/vpatd);  
FINSI;
```

```
fin bcl9;
```

```
vphil = vphil**0.5;  
crit = vphil < rsdmax;
```

```
SI crit;  
QUITTER bcl7;  
FINSI;
```

```
Z = 0;  
*fin de si z=3  
FINSI;
```

```
Z = Z + 1;
```

```
FIN bcl7;  
*fin boucle évaluation du résidu pour la convergence*****
```

8.3 Annexe 3 : Flexion de 2 planches superposées sans assemblage

```
opti dime 2 elem qua4 mode plan cont;
OPTI IMPR 10 IMPR 'esvir1.txt';
```

```
*
```

```
* GEOMETRIE
```

```
*
```

```
*---bois1 et bois2
```

```
*dimensions des planches
```

```
long = 2*48*34.01;
```

```
haut = 27.;
```

```
epai = 39.20;
```

```
*positions des appuis par rapport à 0
```

```
app1 = long/2;
```

```
app1 = app1-1500;
```

```
app2 = long/2;
```

```
app2 = app2-500;
```

```
lar = 50.;
```

```
*rayon du rouleau
```

```
ry1 = 25.;
```

```
nb1 = 4;
```

```
nb2 = 60;
```

```
nb3 = 30;
```

```
nb4 = 3;
```

```
nbla = 16;
```

```
frcm = 80.;
```

```
PCHAR = 10;
```

```
*propriétés des planches
```

```
Eb1 = 20000.;
```

```
rho1 = 0.75;
```

```
Eb2 = 20000.;
```

```
rho2 = 0.75;
```

```
p1a = 0. 0.;
```

```
p1a1 = (app1-lar) 0.;
```

```
p1a2 = (app1+lar) 0.;
```

```
p1a3 = (app2-lar) 0.;
```

```
p1a4 = (app2+lar) 0.;
```

```
p1b = (long/2.) 0.;
```

```
p1c = (long/2.) haut;
```

```
p1c1 = (app2+lar) haut;
```

```
p1c2 = (app2-lar) haut;
```

```
p1c3 = (app1+lar) haut;
```

```
p1c4 = (app1-lar) haut;
```

```
p1d = 0. haut;
```

```
p2a = 0. haut;
```

```
p2a1 = (app1-lar) haut;
```

```
p2a2 = (app1+lar) haut;
```

```
p2a3 = (app2-lar) haut;
```

```
p2a4 = (app2+lar) haut;
```

```
p2b = (long/2.) haut;
```

```
p2c = (long/2.) (2.*haut);
```

```
p2c1 = (app2+lar) (2.*haut);
```

ANNEXES

p2c2 = (app2-lar) (2.*haut);
p2c3 = (app1+lar) (2.*haut);
p2c4 = (app1-lar) (2.*haut);
p2d = 0. (2.*haut);

c111 = p1a droi nb1 p1a1;
c112 = p1a1 droi nbla p1a2;
c113 = p1a2 droi nb2 p1a3;
c114 = p1a3 droi nbla p1a4;
c115 = p1a4 droi nb3 p1b;
c11 = c111 et c112 et c113 et c114 et c115;
c12 = p1b droi nb4 p1c;
c131 = p1c droi nb3 p1c1;
c132 = p1c1 droi nbla p1c2;
c133 = p1c2 droi nb2 p1c3;
c134 = p1c3 droi nbla p1c4;
c135 = p1c4 droi nb1 p1d;
c13 = c131 et c132 et c133 et c134 et c135;
c14 = p1d droi nb4 p1a;
sur11 = dall c11 c12 c13 c14 coul vert;

c211 = p2a droi nb1 p2a1;
c212 = p2a1 droi nbla p2a2;
c213 = p2a2 droi nb2 p2a3;
c214 = p2a3 droi nbla p2a4;
c215 = p2a4 droi nb3 p2b;
c21 = c211 et c212 et c213 et c214 et c215;
c22 = p2b droi nb4 p2c;
c231 = p2c droi nb3 p2c1;
c232 = p2c1 droi nbla p2c2;
c233 = p2c2 droi nb2 p2c3;
c234 = p2c3 droi nbla p2c4;
c235 = p2c4 droi nb1 p2d;
c23 = c231 et c232 et c233 et c234 et c235;
c24 = p2d droi nb4 p2a;
sur21 = dall c21 c22 c23 c24 coul bleu;

p4a = (app1+ry1) (-1*ry1);
p4b = app1 0.;
p4c = (app1-ry1) (-1*ry1);
p4d = app1 (-1*ry1);

p5a = (app2-ry1) ((2.*haut)+ry1);
p5b = app2 (2.*haut);
p5c = (app2+ry1) ((2.*haut)+ry1);
p5d = app2 ((2.*haut)+ry1);

c41 = cerc -15 p4a p4d p4b 'DINI' 10 'DFIN' 1;
c42 = cerc -15 p4b p4d p4c 'DINI' 1 'DFIN' 10;
c43 = p4c droi 6 p4a;
sur3 = surf (c41 et c42 et c43) coul rouge;

c51 = cerc -15 p5a p5d p5b 'DINI' 10 'DFIN' 1;
c52 = cerc -15 p5b p5d p5c 'DINI' 1 'DFIN' 10;
c53 = p5c droi 6 p5a;
sur4 = surf (c51 et c52 et c53) coul rouge;
*trac (sur11 et sur21 et sur3 et sur4);

*-----CONDITION DE CONTACT-----

MAILCON1 = IMPO 'MAIL' 20. c13 c21;
 mailfrob = IMPF mailcon1;
 MAILCON2 = IMPO 'MAIL' 20. c11 (c41 et c42);
 mailfroa = IMPF mailcon2;
 MAILCON3 = IMPO 'MAIL' 20. c23 (c51 et c52);
 mailfroc = IMPF mailcon3;

*

* MODELE

modb1 = modl sur11 mecanique elastique orthotrope;
 modb2 = modl sur21 mecanique elastique orthotrope;
 moda3 = modl sur3 mecanique elastique isotrope;
 moda4 = modl sur4 mecanique elastique isotrope;
 modfrob = MODE mailfrob 'FROTTEMENT' 'COULOMB';
 modfroa = MODE mailfroa 'FROTTEMENT' 'COULOMB';
 modfroc = MODE mailfroc 'FROTTEMENT' 'COULOMB';

*

* CARACTERISTIQUES DU bois

Ea3 = 210000.;
 Ea4 = 210000.;

matfrob = MATE modfrob 'MU' 0.55;
 matfroa = MATE modfroa 'MU' 0.;
 matfroc = MATE modfroc 'MU' 0.;

Pet = 1.5;
 Pgt = 1.2;
 $Eg1 = (1600 * ((rho1 / 0.65) ** Pet));$
 $Eg2 = (1600 * ((rho2 / 0.65) ** Pet));$
 $GT1 = (1150 * ((rho1 / 0.65) ** Pgt));$
 $GT2 = (1150 * ((rho2 / 0.65) ** Pgt));$

matb1 = mate modb1 direction (1. 0.)
 YG1 Eb1 YG2 Eg1 YG3 Eg1
 NU12 0.43 NU23 0.53 NU13 0.43
 G12 GT1;

matb2 = mate modb2 direction (1. 0.)
 YG1 Eb2 YG2 Eg2 YG3 Eg2
 NU12 0.43 NU23 0.53 NU13 0.43
 G12 GT2;

mata3 = mate moda3 youn Ea3 nu 0.3;
 mata4 = mate moda4 youn Ea4 nu 0.3;

*

* CONDITIONS AUX LIMITES

T1 = (cont sur11) poin DROI p1b p1c 0.1;
 T2 = (cont sur21) poin DROI p2b p2c 0.1;
 T3 = (cont sur3) poin DROI p4a p4c 0.1;
 P1 = (cont sur4) poin proc (app2 (2.*haut));
 P2 = (cont sur4) poin proc (app2 (2.*haut+25.));

CL1x = bloq UX T1;
 CL2x = bloq UX T2;
 CL3 = bloq UX UY T3;

ANNEXES

CL4 = bloq UX (P1 et P2);
clappui = CL1x ET CL2x ET CL3 ET CL4;

*

* CHARGEMENT

Fmax = frcm/epai;

P3 = (cont sur4) poin proc (app2 ((3.*haut)+ry1));

fo1 = forc (0. (-0.5*Fmax)) P3;

list1 = prog 0 pas 1. PCHAR;

lisf1 = prog 0 pas (1./PCHAR) 1.;

evf1 = evol manu 'TEMPS' list1 'FORCE' lisf1;

cha1 = char 'MECA' fo1 evf1;

**** RESOLUTION PAS A PAS ****

TAB1 = TABLE;

TAB1.TEMPS_CALCULES = list1;

TAB1.PROCEDURE_PERSONO1 = FAUX;

TAB1.GRANDS_DEPLACEMENTS = vrai;

TAB1.GRANDES_ROTATIONS = VRAI;

TAB1.GRANDES_DEFORMATIONS = VRAI;

TAB1.K_SIGMA = VRAI;

TAB1.'CONTACT' = (MAILCON1 et MAILCON2 et MAILCON3);

TAB1.'FROTTEMENT' = (MAILFROa et MAILFROb et MAILFROc);

TAB1.BLOCAGES_MECANQUES = clappui;

TAB1.CHARGEMENT = cha1;

TAB1.MODELE = (modb1 et modb2 et moda3 et moda4 et modfroa
et modfrob et modfroc);

TAB1.CARACTERISTIQUES = (matb1 et matb2 et mata3 et mata4
et matfroa et matfrob et matfroc);

pasapas TAB1;

Pap = (cont sur11) poin proc (app2 0.);

Pfl = (cont sur11) poin proc ((long/2) 0.);

ufa = table;

ufl = table;

REPE bou1 PCHAR;

rer = tab1.REACTIONS.&bou1;

dd1 = TAB1.DEPLACEMENTS.&bou1;

*---calcul de la fleches

ufa.&bou1 = extr dd1 uy Pap;

ufl.&bou1 = extr dd1 uy Pfl;

*---fin de calcul de la flèche

FIN bou1;

REPE bcl1 pchar;

mess ufa.&bcl1;

fin bcl1;

REPE bcl2 pchar;

mess ufl.&bcl2;

fin bcl2;

fin;

8.4 Annexe 4 : Flexion de 2 planches collées

opti dime 2 elem qua4 mode plan cont;
OPTI IMPR 10 IMPR 'esvir1.txt';

*

* GEOMETRIE

*

*---bois1 et bois2

*dimensions des planches

long = 2*48*34.01;

haut = 27.;

epai = 39.20;

*positions des appuis par rapport à 0

app1 = long/2;

app1 = app1-1500;

app2 = long/2;

app2 = app2-500;

lar = 50.;

*rayon du rouleau

ry1 = 25.;

nb1 = 4;

nb2 = 60;

nb3 = 30;

nb4 = 3;

nbla = 16;

frcm = 80.;

PCHAR = 10;

*propriétés des planches

Eb1 = 20000.;

rho1 = 0.75;

Eb2 = 20000.;

rho2 = 0.75;

p1a = 0. 0.;

p1a1 = (app1-lar) 0.;

p1a2 = (app1+lar) 0.;

p1a3 = (app2-lar) 0.;

p1a4 = (app2+lar) 0.;

p1b = (long/2.) 0.;

p1c = (long/2.) haut;

p1c1 = (app2+lar) haut;

p1c2 = (app2-lar) haut;

p1c3 = (app1+lar) haut;

p1c4 = (app1-lar) haut;

p1d = 0. haut;

p2c = 0. (2.*haut);

p2c1 = (app1-lar) (2.*haut);

p2c2 = (app1+lar) (2.*haut);

p2c3 = (app2-lar) (2.*haut);

p2c4 = (app2+lar) (2.*haut);

p2d = (long/2.) (2.*haut);

c111 = p1a droi nb1 p1a1;

ANNEXES

c112 = p1a1 droi nbla p1a2;
c113 = p1a2 droi nb2 p1a3;
c114 = p1a3 droi nbla p1a4;
c115 = p1a4 droi nb3 p1b;
c11 = c111 et c112 et c113 et c114 et c115;
c12 = p1b droi nb4 p1c;
c131 = p1c droi nb3 p1c1;
c132 = p1c1 droi nbla p1c2;
c133 = p1c2 droi nb2 p1c3;
c134 = p1c3 droi nbla p1c4;
c135 = p1c4 droi nb1 p1d;
c13 = c131 et c132 et c133 et c134 et c135;
c14 = p1d droi nb4 p1a;
sur11 = dall c11 c12 c13 c14 coul vert;

c22 = p1d droi nb4 p2c;
c231 = p2c droi nb1 p2c1;
c232 = p2c1 droi nbla p2c2;
c233 = p2c2 droi nb2 p2c3;
c234 = p2c3 droi nbla p2c4;
c235 = p2c4 droi nb3 p2d;
c23 = c231 et c232 et c233 et c234 et c235;
c24 = p2d droi nb4 p1c;
sur21 = dall c13 c22 c23 c24 coul bleu;
elim 0.001 (sur11 et sur21);

p4a = (app1+ry1) (-1*ry1);
p4b = app1 0.;
p4c = (app1-ry1) (-1*ry1);
p4d = app1 (-1*ry1);

p5a = (app2-ry1) ((2.*haut)+ry1);
p5b = app2 (2.*haut);
p5c = (app2+ry1) ((2.*haut)+ry1);
p5d = app2 ((2.*haut)+ry1);

c41 = cerc -15 p4a p4d p4b 'DINI' 10 'DFIN' 1;
c42 = cerc -15 p4b p4d p4c 'DINI' 1 'DFIN' 10;
c43 = p4c droi 6 p4a;
sur3 = surf (c41 et c42 et c43) coul rouge;

c51 = cerc -15 p5a p5d p5b 'DINI' 10 'DFIN' 1;
c52 = cerc -15 p5b p5d p5c 'DINI' 1 'DFIN' 10;
c53 = p5c droi 6 p5a;
sur4 = surf (c51 et c52 et c53) coul rouge;

*trac (sur11 et sur21 et sur3 et sur4);
*PATIN (c13 et c21);
*PATIN (c11 et c31 et c32);
*PATIN (c23 et c41 et c42);

*-----CONDITION DE CONTACT-----

MAILCON2 = IMPO 'MAIL' 20. c11 (c41 et c42);
mailfroa = IMPF mailcon2;
MAILCON3 = IMPO 'MAIL' 20. (inve c23) (c51 et c52);
mailfroc = IMPF mailcon3;

ANNEXES

*

* MODELE

*

modb1 = modl sur11 mecanique elastique orthotrope;
modb2 = modl sur21 mecanique elastique orthotrope;
moda3 = modl sur3 mecanique elastique isotrope;
moda4 = modl sur4 mecanique elastique isotrope;
modfroa = MODE mailfroa 'FROTTEMENT' 'COULOMB';
modfroc = MODE mailfroc 'FROTTEMENT' 'COULOMB';

*

* CARACTERISTIQUES DU bois

*

Ea3 = 210000.;
Ea4 = 210000.;

matfroa = MATE modfroa 'MU' 0.;
matfroc = MATE modfroc 'MU' 0.;

Pet = 1.5;
Pgt = 1.2;
Eg1 = (1600*((rho1/0.65)**Pet));
Eg2 = (1600*((rho2/0.65)**Pet));
GT1 = (1150*((rho1/0.65)**Pgt));
GT2 = (1150*((rho2/0.65)**Pgt));

matb1 = mate modb1 direction (1. 0.)
YG1 Eb1 YG2 Eg1 YG3 Eg1
NU12 0.43 NU23 0.53 NU13 0.43
G12 GT1;

matb2 = mate modb2 direction (1. 0.)
YG1 Eb2 YG2 Eg2 YG3 Eg2
NU12 0.43 NU23 0.53 NU13 0.43
G12 GT2;

mata3 = mate moda3 youn Ea3 nu 0.3;
mata4 = mate moda4 youn Ea4 nu 0.3;

*

* CONDITIONS AUX LIMITES

*

T1 = (cont sur11) poin DROI p1b p1c 0.1;
T2 = (cont sur21) poin DROI p1c p2d 0.1;
T3 = (cont sur3) poin DROI p4a p4c 0.1;
P1 = (cont sur4) poin proc (app2 (2.*haut));
P2 = (cont sur4) poin proc (app2 (2.*haut+25.));

CL1x = bloq UX T1;
CL2x = bloq UX T2;
CL3 = bloq UX UY T3;
CL4 = bloq UX (P1 et P2);

clappui = CL1x ET CL2x ET CL3 ET CL4;

*

* CHARGEMENT

*

Fmax = frcm/epai;

ANNEXES

P3 = (cont sur4) poin proc (app2 ((3.*haut)+ry1));

fo1 = forc (0. (-0.5*Fmax)) P3;

list1 = prog 0 pas 1. PCHAR;

lisf1 = prog 0 pas (1./PCHAR) 1.;

evf1 = evol manu 'TEMPS' list1 'FORCE' lisf1;

cha1 = char 'MECA' fo1 evf1;

**** RESOLUTION PAS A PAS ****

TAB1 = TABLE;

TAB1.TEMPS_CALCULES = list1;

TAB1.PROCEDURE_PERSONO1 = FAUX;

TAB1.GRANDS_DEPLACEMENTS = vrai;

TAB1.GRANDES_ROTATIONS = VRAI;

TAB1.GRANDES_DEFORMATIONS= VRAI;

TAB1.K_SIGMA= VRAI;

TAB1.'CONTACT' = (MAILCON2 et MAILCON3);

TAB1.'FROTTEMENT' = (MAILFROa et MAILFROc);

TAB1.BLOCAGES_MECANIQUES = clappui;

TAB1.CHARGEMENT = cha1;

TAB1.MODELE = (modb1 et modb2 et moda3 et moda4 et modfroa et modfroc);

TAB1.CARACTERISTIQUES = (matb1 et matb2 et mata3 et mata4 et matfroa et matfroc);

pasapas TAB1;

Pap = (cont sur11) poin proc (app2 0.);

Pfl = (cont sur11) poin proc ((long/2) 0.);

ufa = table;

ufl = table;

REPE bou1 PCHAR;

rer = tab1.REACTIONS.&bou1;

dd1 = TAB1.DEPLACEMENTS.&bou1;

*---calcul de la fleches

ufa.&bou1 = extr dd1 uy Pap;

ufl.&bou1 = extr dd1 uy Pfl;

*---fin de calcul de la flèche

FIN bou1;

REPE bcl1 pchar;

mess ufa.&bcl1;

fin bcl1;

REPE bcl2 pchar;

mess ufl.&bcl2;

fin bcl2;

fin;

8.5 Annexe 5 : Flexion de 2 planches clouées

```

OPTI dime 2 elem qua4 mode plan cont;
OPTI TRAC PSC;
OPTI IMPR 10 IMPR 'esvir10.txt';

*nombre de clous sur la longueur totale
ntc = 48;
* test pour ntc = 1 alors ntcc = vrai (shintage de boucle)
ntcc = ntc EGA 1;
*nombre d'itérations max pour la convergence
nbocl = 100;
*longueur du VER
long = 34.01;
*nombre d'incrémentations divisant la force max
ncal = 10;
*position de l'appui inférieur
pri = (ntc*long);
pri = pri-1500;
*position de l'appui supérieur
prs = (ntc*long);
prs = prs-500;
*effort de flexion
frc = 800.;
*
* GEOMETRIE BOIS-----
*
*longueur du VER
vtc = (long 0.);
vtd = (-100 0.);
*longueur du joint
ljo1 = 4.;
*longueur de l'élément de transition joint et contact
hoa = 2.;
*dimensions des planches
haut1 = 27.;
haut2 = 27.;
haut1 = haut1-7.;
haut2 = haut2-7.;
epai = 39.20;
*critère de convergence
rsdmax = 0.0000001;
*propriétés des planches
Eb1 = 20000.;
rho1 = 0.75;
Eb2 = 20000.;
rho2 = 0.75;
*raideur initiale du joint
GLISK = 202.5 * (rho1+rho2) *(log ((16*0.015) + 1.7)) / 0.015;
*coefficients pour le maillage du VER
nb1 = 12;
nb2 = 3;
nb3 = 6;
lmail = long/nb1;
*

```

* TABLES-----

*

* droites.....

drab1 = table;
 drbc1 = table;
 drcd1 = table;
 drde1 = table;
 dref1 = table;
 drfg1 = table;
 drgh1 = table;
 drha1 = table;
 draf1 = table;
 drab2 = table;
 drbc2 = table;
 drcd2 = table;
 drde2 = table;
 dref2 = table;
 drfg2 = table;
 drgh2 = table;
 drha2 = table;
 draf2 = table;

* surfaces.....

sur1 = table;
 sur2 = table;

*joints.....

joint = table;
 clconab = table;
 clconcd = table;
 clconef = table;
 jeu1 = table;
 jeu2 = table;
 jeu3 = table;
 modjoi = table;
 matjoi = table;
 GLK = table;
 GLS = table;

*itération.....

dcl = table;
 fcl = table;
 fclt = table;
 dpcl = table;
 dpta = table;
 dptt = table;
 frcl = table;
 RIJ = table;

p1a = (long) 0.;
 p1b = ((long/2) + ((lloi/2)+hoa)) 0.;
 p1c = ((long/2) + (lloi/2)) 0.;
 p1d = ((long/2) - (lloi/2)) 0.;
 p1e = ((long/2) - ((lloi/2)+hoa)) 0.;
 p1f = 0. 0.;
 p1g = 0. (-1* haut1.);
 p1h = (long) (-1* haut1.);

ANNEXES

p2a = (long) 0.;
 p2b = ((long/2) + ((lloi/2)+hoa)) 0.;
 p2c = ((long/2) + (lloi/2)) 0.;
 p2d = ((long/2) - (lloi/2)) 0.;
 p2e = ((long/2) - ((lloi/2)+hoa)) 0.;
 p2f = 0. 0.;
 p2g = 0. (haut2);
 p2h = (long) (haut2);

drab1.1 = p1a droi (-1*(nb1-nb3+2)/2) p1b 'DINI' 5 'DFIN' 1;
 drbc1.1 = p1b droi 1 p1c;
 drcd1.1 = p1c droi (nb3-4) p1d;
 drde1.1 = p1d droi 1 p1e;
 dref1.1 = p1e droi (-1*(nb1-nb3+2)/2) p1f 'DINI' 1 'DFIN' 5;
 drfg1.1 = p1f droi nb2 p1g;
 draf1.1 = drab1.1 et drbc1.1 et drcd1.1 et drde1.1 et dref1.1;
 drgh1.1 = p1g droi nb1 p1h;
 drha1.1 = p1h droi nb2 p1a;
 sur1.1 = dall draf1.1 drfg1.1 drgh1.1 drha1.1;

drab2.1 = p2a droi (-1*(nb1-nb3+2)/2) p2b 'DINI' 5 'DFIN' 1;
 drbc2.1 = p2b droi 1 p2c;
 drcd2.1 = p2c droi (nb3-4) p2d;
 drde2.1 = p2d droi 1 p2e;
 dref2.1 = p2e droi (-1*(nb1-nb3+2)/2) p2f 'DINI' 1 'DFIN' 5;
 drfg2.1 = p2f droi nb2 p2g;
 draf2.1 = drab2.1 et drbc2.1 et drcd2.1 et drde2.1 et dref2.1;
 drgh2.1 = p2g droi nb1 p2h;
 drha2.1 = p2h droi nb2 p2a;
 sur2.1 = dall draf2.1 drfg2.1 drgh2.1 drha2.1;

sur10 = sur1.1;
 sur20 = sur2.1;
 *trac (sur10 et sur20);

SI ntcc;
 SINON;
 *boucle de création des VER dans la longueur*****
 REPE bcl1 (ntc-1);
 nw = &bcl1 + 1;

drab1.nw = drab1.&bcl1 plus vtc;
 drbc1.nw = drbc1.&bcl1 plus vtc;
 drcd1.nw = drcd1.&bcl1 plus vtc;
 drde1.nw = drde1.&bcl1 plus vtc;
 dref1.nw = dref1.&bcl1 plus vtc;
 draf1.nw = drab1.nw et drbc1.nw et drcd1.nw et drde1.nw et dref1.nw;
 drfg1.nw = drfg1.&bcl1 plus vtc;
 drgh1.nw = drgh1.&bcl1 plus vtc;
 drha1.nw = drha1.&bcl1 plus vtc;
 elim (draf1.nw et drfg1.nw et drgh1.nw et drha1.nw) 0.005;
 sur1.nw = dall draf1.nw drfg1.nw drgh1.nw drha1.nw coul vert;
 sur10 = sur10 et sur1.nw;

drab2.nw = drab2.&bcl1 plus vtc;
 drbc2.nw = drbc2.&bcl1 plus vtc;

ANNEXES

drcd2.nw = drcd2.&bcl1 plus vtc;
 drde2.nw = drde2.&bcl1 plus vtc;
 dref2.nw = dref2.&bcl1 plus vtc;
 draf2.nw = drab2.nw et drbc2.nw et drcd2.nw et drde2.nw et dref2.nw;
 drfg2.nw = drfg2.&bcl1 plus vtc;
 drgh2.nw = drgh2.&bcl1 plus vtc;
 drha2.nw = drha2.&bcl1 plus vtc;
 elim (draf2.nw et drfg2.nw et drgh2.nw et drha2.nw) 0.005;
 sur2.nw = dall draf2.nw drfg2.nw drgh2.nw drha2.nw coul bleu;
 sur20 = sur20 et sur2.nw;

ELIM 0.001 sur10;
 ELIM 0.001 sur20;

fin bcl1;
 *fin boucle de création des VER dans la longueur*****
 *trac (sur10 et sur20);
 FINSI;

dl10 = drgh1.1;
 dl20 = drgh2.1;
 REPE bou1 (ntc-1);
 nw = &bou1 + 1;
 dl10 = dl10 et drgh1.nw;
 dl20 = dl20 et drgh2.nw;
 fin bou1;
 elim 0.001 dl10;
 elim 0.001 dl20;

p01g = dl10 poin proc (0. (-1* haut1.));
 p01h = dl10 poin proc ((ntc*long) (-1* haut1.));
 p02g = dl20 poin proc (0. (haut2));
 p02h = dl20 poin proc ((ntc*long) (haut2));
 haut1 = haut1+7.;
 haut2 = haut2+7.;
 p11g = 0. (-1* haut1.);
 p11h = (ntc*long) (-1* haut1.);
 p12g = 0. (haut2);
 p12h = (ntc*long) (haut2);
 ro1 = pri (-1*haut1);
 ro2 = prs haut2;

n1 = 0;
 n2 = 0;
 REPE bou2 (ntc*nb1);
 SI (pri > (lmail*n1));
 n1 = n1 + 1;
 FINSI;
 SI (prs > (lmail*n2));
 n2 = n2 + 1;
 FINSI;
 FIN bou2;
 mess n1;
 mess n2;

dl11 = p01h droi 1 p11h;
 dl21 = p02h droi 1 p12h;

ANNEXES

dli1 = p11h droi ((nb1*ntc)-n1) ro1;
dli2 = ro1 droi (n1) p11g;
dls1 = p12h droi ((nb1*ntc)-n2) ro2;
dls2 = ro2 droi (n2) p12g;
dl12 = dli1 et dli2;
dl22 = dls1 et dls2;
dl13 = p11g droi 1 p01g;
dl23 = p12g droi 1 p02g;

cou1 = dall dl10 dl11 dl12 dl13 coul jaun;
cou2 = dall dl20 dl21 dl22 dl23 coul jaun;

sur10 = sur10 et cou1;
sur20 = sur20 et cou2;
ELIM 0.001 sur10;
ELIM 0.001 sur20;
trac (sur10 et sur20);
*

* MODELE BOIS-----

modb1 = modl sur10 mecanique elastique orthotrope;
modb2 = modl sur20 mecanique elastique orthotrope;
*

* CARACTERISTIQUES DU BOIS-----

Pet = 1.5;
Pgt = 1.2;
Eg1 = (1600*((rho1/0.65)**Pet));
Eg2 = (1600*((rho2/0.65)**Pet));
GT1 = (1150*((rho1/0.65)**Pgt));
GT2 = (1150*((rho2/0.65)**Pgt));

matb1 = mate modb1 direction (1. 0.)
YG1 Eb1 YG2 Eg1 YG3 Eg1
NU12 0.43 NU23 0.53 NU13 0.43
G12 GT1;

matb2 = mate modb2 direction (1. 0.)
YG1 Eb2 YG2 Eg2 YG3 Eg2
NU12 0.43 NU23 0.53 NU13 0.43
G12 GT2;
*

* GEOMETRIE JOINT1-----

joint.1 = RACC 0.0005 drcd1.1 drcd2.1;
join = joint.1;
modjoi.1 = MODL joint.1 mecanique elastique isotrope JOI2;
*

* RELATION DE CONTACT1-----

clconab.1 = RELA MAXI UY drab1.1 - UY drab2.1;
jeu1.1 = DEPIMP clconab.1 0.;
JEUX = jeu1.1;
clconcd.1 = RELA UY drcd1.1 - UY drcd2.1;
jeu2.1 = DEPIMP clconcd.1 0.;
JEUX = JEUX et jeu2.1;
clconef.1 = RELA MAXI UY dref1.1 - UY dref2.1;
jeu3.1 = DEPIMP clconef.1 0.;
JEUX = JEUX et jeu3.1;
clco = clconab.1 et clconcd.1 et clconef.1;

ANNEXES

```
SI ntc;
SINON;
*boucle de création des joints dans la longueur*****
REPE bcl2 (ntc-1);
nw = &bcl2 + 1;
*
* GEOMETRIE JOINT-----
joint.nw = RACC 0.0005 drcd1.nw drcd2.nw;
join = join et joint.nw;
*
* MODELE JOINT-----
modjoi.nw = MODL joint.nw mecanique elastique isotrope JOI2;
*
* RELATION DE CONTACT-----
clconab.nw = RELA MAXI UY drab1.nw - UY drab2.nw;
jeu1.nw = DEPIMP clconab.nw 0.;
jeux = jeux et jeu1.nw;
clconcd.nw = RELA UY drcd1.nw - UY drcd2.nw;
jeu2.nw = DEPIMP clconcd.nw 0.;
jeux = jeux et jeu2.nw;
clconef.nw = RELA MAXI UY dref1.nw - UY dref2.nw;
jeu3.nw = DEPIMP clconef.nw 0.;
jeux = jeux et jeu3.nw;
clco = clco et clconab.nw et clconcd.nw et clconef.nw;

fin bcl2;
*fin boucle de création des joints dans la longueur*****
FINSI;
*
* CONDITIONS AUX LIMITES-----
CL1y = bloq Uy ro1;

*symétrie de l'éprouvette inférieure
CL1x = bloq UX drha1.ntc;
*symétrie de l'éprouvette inférieure
CL2x = bloq UX drha2.ntc;

clappui = CL1x ET CL2x ET CL1y;

*boucle initialisaion de la raideur des joints*****
REPE bcl3 ntc;
GLK.&bcl3 = GLISK;
fin bcl3;
*fin boucle initialisaion de la raideur des joints*****

*****
*boucle de calcul avec évolution du chargement*****
REPE bcl10 ncal;
frcl.&bcl10 = table;
dpcl.&bcl10 = table;

*
* CHARGEMENT-----
Fcal = &bcl10*Frc/(epai*ncal);
f1 = FORC (0. (-1*Fcal)) ro2;
ftot = f1 ET jeux;
```

ANNEXES

```

nbc = 0;
*boucle évaluation du résidu pour la convergence*****
REPE bcl7 nbocl;
nbc = nbc + 1;
*
* CARACTERISTIQUES DU JOINT-----
REPE bcl4 ntc;
GLS.&bcl4 = GLK.&bcl4/ljoi/epai;
matjoi.&bcl4 = MATE modjoi.&bcl4 KS GLS.&bcl4 KN GLS.&bcl4;
fin bcl4;
*
* MATRICE DE RIGIDITE-----
R11 = RIGI modb1 matb1;
R12 = RIGI modb2 matb2;
RIJ.1 = RIGI modjoi.1 matjoi.1;
R13 = RIJ.1;
SI ntcc;
SINON;
REPE bcl5 (ntc-1);
nw = &bcl5 + 1;
RIJ.nw = RIGI modjoi.nw matjoi.nw;
R13 = RIJ et RIJ.nw;
fin bcl5;
FINSI;
R11 = R11 ET R12 ET R13 ET clappui ET clco;
*
*RESOLUTION RESO-----
DEP1 = RESO (R11) Ftot;
*
*CRITERE DE CONVERGENCE-----
vphil = 0.;

*boucle calcul de F et delta u des joints*****
REPE bcl6 ntc;
DEFR1 = EPSI (modjoi.&bcl6) DEP1;
DEFR2 = CHAN NOEUD (modjoi.&bcl6) DEFR1;
CHP12 = CHAN CHPO (modjoi.&bcl6) DEFR2;
CNT1 = SIGM (modjoi.&bcl6) (matjoi.&bcl6) DEP1;
CNT2 = CHAN NOEUD (modjoi.&bcl6) CNT1;
CHP11 = CHAN CHPO (modjoi.&bcl6) CNT2;
Pclo = joint.&bcl6 poin proc (((long/2)+(&bcl6-1)*long) 0.);
fcl.&bcl6 = extr CHP11 SMSN Pclo;
fcl.&bcl6 = fcl.&bcl6*ljoi*epai;
dcl.&bcl6 = extr CHP12 DRSN Pclo;
vpatd = abs (dcl.&bcl6/2);
vpatf = abs (fcl.&bcl6/2);
SI (vpatd < 0.015);
GLK.&bcl6 = GLISK;
fclt.&bcl6 = GLISK * vpatd;
SINON;
fclt.&bcl6 = 202.5 * (rho1+rho2) *(log ((16*vpatd) + 1.7));
vphil = vphil + (((vpatf-fclt.&bcl6)/fclt.&bcl6)**2);
GLK.&bcl6 = abs((fclt.&bcl6/vpatd));
FINSI;
fin bcl6;
*fin boucle calcul de F et delta u des joints*****

```

ANNEXES

vphil = vphil**0.5;
crit = vphil < (ntc*rsdmax);

SI crit;
QUITTER bcl7;
FINSI;

FIN bcl7;
*fin boucle évaluation du résidu pour la convergence*****
mess 'nombre de boucles';
mess nbc;
*

*RESULTATS-----
*boucle capture des forces et déplacements au niveau des clous*****
REPE bcl8 ntc;
frcl.&bcl10.&bcl8 = fcl.&bcl8/2;
dpcl.&bcl10.&bcl8 = dcl.&bcl8/2;
fin bcl8;
*fin boucle capture des forces et déplacements au niveau des clous***

*tracage des contraintes et deformations*****
DEF0 = DEFO 0. (sur10 et sur20 et join) DEP1 ROUGE;
REA1 = REAC DEP1 RII;

CONT1 = SIGM (modb1 et modb2) (matb1 et matb2) DEP1;
CONT2 = CHAN NOEUD (modb1 et modb2) CONT1;
CHPO10 = CHAN CHPO (modb1 et modb2) CONT2;
SIG1 = REDU CONT2 modb1;
SIG2 = REDU CONT2 modb2;
Sigmas11 = Vmis SIG1 modb1;
Sigmas21 = vmis SIG2 modb2;
*TITR 'CONTRAINTES DE VON MISES';
*TRAC (Sigmas11 et Sigmas21) (modb1 et modb2);
*fin boucle tracage des contraintes et deformations*****

Pg4 = (cont sur20) poin proc (prs haut2);
dpta.&bcl10 = EXTR DEP1 UY Pg4;
Pg5 = (cont sur10) poin proc ((ntc*long) 0.);
dptt.&bcl10 = EXTR DEP1 UY Pg5;

FIN bcl10;
*fin boucle de calcul avec évolution du chargement*****

*RESTITUTION.....
*boucle de restitution des efforts et deplact dans les clous*****
REPE bcl13 ncal;
REPE bcl12 ntc;
mess frcl.&bcl13.&bcl12;
FIN bcl12;
FIN bcl13;
REPE bcl15 ncal;
REPE bcl14 ntc;
mess dpcl.&bcl15.&bcl14;
FIN bcl14;
FIN bcl15;
REPE bcl18 ncal;

ANNEXES

mess dpta.&bcl18;

FIN bcl18;

REPE bcl19 ncal;

mess dptt.&bcl19;

FIN bcl19;

*fin boucle de restitution des efforts et deplact dans les clous*****

fin;

Etude du comportement des poutres lamellées clouées boulonnées en flexion

Résumé

Le lamellé collé est un produit adapté pour répondre à la demande croissante du marché de la construction de Guyane, compte tenu de la ressource forestière. Cependant, des problèmes techniques, climatiques et économiques rendent le collage trop difficile en Guyane. Les professionnels de la construction bois, proposent souvent de réaliser des assemblages mécaniques simples en substituant la colle, mais aucun référentiel technique ne permet de justifier parfaitement ce produit.

Le boulonnage seul conduit à une poutre insuffisamment rigide du fait que les lames glissent l'une sur l'autre. Le clou est un organe d'assemblage simple et adapté à la reprise d'efforts tangents. Les travaux entrepris dans cette thèse se sont concentrés sur la question : comment des poutres constituées de lames en gonfolo clouées peuvent présenter une rigidité suffisante en flexion ?

Une série d'essais a permis de définir le comportement non linéaire d'un assemblage cloué cisailé par le glissement des lames. D'autres essais, réalisés sur des bilames cloués sollicités en flexion 4 points, ont montré qu'une densité de clouage suffisante permettait de se rapprocher de la rigidité que conférerait un collage.

La modélisation par éléments finis des lames clouées fléchies, utilisant la loi de comportement expérimentale de l'assemblage cloué, permet de définir la performance du bilame en fonction de la densité de clouage et du niveau de chargement. La prédiction correspond bien avec les résultats expérimentaux.

Finalement, un assemblage, caractérisé par une densité de clous prédite par le modèle, permet de conférer une rigidité satisfaisante à une poutre lamellée clouée lorsqu'elle est sollicitée en flexion.

Mots clés : Guyane, bois, poutre, lamellé, clou, boulon, modélisation, flexion.