



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



École Doctorale Sciences et Ingénierie
Ressources Procédés Produits Environnement
Collegium : Sciences et Technologies

Caractérisation et modélisation numérique des poutres en Bois Massif Reconstitué (BMR) réalisées avec une essence locale feuillue

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 12 décembre 2014 pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Spécialité : **Sciences du bois et des fibres**

par

Van Dang TRAN

Devant le jury composé de :

Jean-Louis BATOZ	Professeur, Université de Technologie de Compiègne (Président)
Patrick MARTIN	Professeur, Arts et Métiers ParisTech, Centre de Metz (Rapporteur)
Hakim NACEUR	Professeur, Université de Valenciennes (Rapporteur)
André LECOMTE	Professeur, Université de Lorraine (Examinateur)
Pierre-Jean MÉAUSOONE	Professeur, Université de Lorraine (Directeur de thèse)
Marc OUDJENE	Maître de Conférences, Université de Lorraine (Co-Directeur de thèse)

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été effectué au Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB) de l'Université de Lorraine. Cette thèse est financée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

Je remercie particulièrement la marque "Terres de Hêtre" pour la fourniture du bois me permettant de réaliser les expérimentations de ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse, Monsieur Pierre-Jean MÉAU-SOONE, Professeur et Monsieur Marc OUDJENE, Maître de Conférences à l'Université de Lorraine, qui par leurs conseils judicieux, ont su me guider tout en préservant mon autonomie. J'aimerais aussi leur rappeler toute ma sincère reconnaissance.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous les membres de jury : Monsieur André LECOMTE, Professeur à l'Université de Lorraine, Monsieur Patrick MARTIN, Professeur à Arts et Métiers ParisTech, Centre de Metz, Monsieur Hakim NACEUR, Professeur à l'Université de Valenciennes et Monsieur Jean-Louis BATOZ, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne pour l'honneur qu'ils me font d'accepter l'examen de ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements à tout le personnel de l'ENSTIB et du LERMAB, et particulièrement, Cyril DEHARBE et Stéphane AUBERT, qui m'ont aidé avec enthousiasme pendant toute ma thèse. Je n'oublie pas Linda BOSSERR pour sa gentillesse et qui a toujours été serviable.

Je remercie également le Critt bois, en particulier Coralie PELLETIER pour la fourniture du matériels d'instrumentation et son aide précieuse pendant les tests mécaniques.

Je remercie Nadhir LEBAAL pour son aide concernant la procédure d'optimisation.

Mes remerciements vont à tout ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail, la famille LEMOINE, mon professeur de français Madame Annie CALOT, mon tuteur de stage de master Monsieur Quang-Huy NGUYEN, mes collègues à l'ENSTIB, mes camarades.

A mes parents TRAN Hung Vuong et TRIEU Thi Hoa, A ma famille.

Je remercie tout particulièrement mon amie MAI Thi Hoa qui m'a encouragé et soutenu durant ces trois années.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
NOTATION	ix
CHAPITRE 1 :INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 2 :ETAT DE L'ART	7
2.1 Introduction	7
2.1.1 Ressources forestières	7
2.1.2 Situation comparée Feuillus/Résineux	8
2.1.3 La filière bois en France	9
2.1.4 Le marché de la construction bois	10
2.2 Le Hêtre - une essence locale feuillue	12
2.2.1 Caractéristiques morphologiques et mécaniques du hêtre	13
2.2.2 Le hêtre dans la construction	16
2.3 Le bois reconstitué par collage	17
2.3.1 Différents types du bois reconstitué par collage	17
2.3.2 Avantages et inconvénients du bois reconstitué par collage	20
2.3.3 Aspects normatifs et classements	21
2.4 Fabrication industrielle de poutres en bois reconstitué par collage	22
2.4.1 Préparation des planches de bois	23
2.4.2 Réalisation des aboutages	23
2.4.3 Rabotage des lamelles aboutées	24
2.4.4 Encollage - Pressage	25
2.4.5 Finition	25
2.4.6 Les colles structurales	25
2.4.7 Paramètres importants de l'aboutage par entures multiples	28
2.5 Littérature scientifique	33
2.6 Conclusion	34
CHAPITRE 3 :CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE	37
3.1 Introduction	37
3.2 Choix des matériaux et composants	37
3.3 Fabrication en laboratoire des poutres en bois reconstitué par collage	38
3.3.1 Préparation des lamelles individuelles	38
3.3.2 Réalisation des aboutages (entures multiples)	39
3.3.3 Encollage des lamelles	41
3.3.4 Finition des poutres multicouches	42

3.4	Tests de résistance mécanique	42
3.4.1	Caractérisation des lamelles individuelles	42
3.4.2	Caractérisation de la colle	49
3.4.3	Caractérisation des aboutages	51
3.4.4	Caractérisation des poutres multi-couches sans aboutage	57
3.4.5	Caractérisation des poutres multi-couches avec aboutages	61
3.5	Récapitulation des essais mécaniques	68
3.6	Conclusion	70

CHAPITRE 4 : MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DES POUTRES MULTI-COUCHES 73

4.1	Introduction	73
4.2	Choix des modèles de comportement	74
4.2.1	Comportement mécanique du bois	74
4.2.2	Comportement mécanique des joints collés	79
4.3	Identification des paramètres matériaux	83
4.3.1	Paramètres du Hêtre	83
4.3.2	Paramètres de la colle	86
4.4	Simulation du comportement des aboutages	88
4.4.1	Modèle éléments finis	88
4.4.2	Résultats et discussion	89
4.5	Simulation du comportement des poutres multi-couches	90
4.5.1	Poutres sans aboutage	90
4.5.2	Poutres avec aboutages	92
4.6	Etude paramétrique	95
4.6.1	Influence de l'épaisseur	96
4.6.2	Influence du module d'élasticité	97
4.6.3	Influence de la géométrie de l'aboutage	98
4.7	Conclusion	101

CHAPITRE 5 : OPTIMISATION DE LA GÉOMÉTRIE DE L'ENTURE 103

5.1	Introduction	103
5.2	Les différentes classes d'optimisation	104
5.3	Problème général d'optimisation	104
5.3.1	Fonction objectif	105
5.3.2	Espace de recherche	105
5.3.3	Conditions d'optimalité	105
5.3.4	Normalisation	106
5.4	Méthode des Surfaces de Réponse (MSR)	107
5.5	Procédure d'optimisation adoptée	108
5.5.1	Plan composite	109
5.5.2	Méthode d'approximation et d'interpolation	110

5.6	Stratégie d'optimisation	112
5.7	Application à l'enture multiple	114
5.7.1	Formulation du problème d'optimisation	114
5.7.2	Résultats et discussion	114
5.8	Conclusion	117
CHAPITRE 6 :CONCLUSION GÉNÉRALE		119
6.1	Conclusion	119
6.2	Perspectives	121
LISTE DES TABLEAUX		123
LISTE DES FIGURES		125
BIBLIOGRAPHIE		129

NOTATION

f_m	: résistance en flexion, MPa
$f_{m,k}$: résistance au 5ème percentile en flexion, MPa
$f_{m,k}$ (h=150 mm)	: résistance au 5ème percentile en flexion relativement à une hauteur de référence h=150 mm, MPa
$E_{m,global}$: module d'élasticité global en flexion, MPa
$E_{m,local}$: module d'élasticité local en flexion, MPa
$f_{t,0}$: résistance en traction axiale, MPa
$f_{t,0,k}$: résistance au 5ème percentile en traction axiale, MPa
$f_{c,0}$: résistance en compression axiale, MPa
$f_{c,0,k}$: résistance au 5ème percentile en compression axiale, MPa
$f_{t,90}$: résistance en traction transversale, MPa
$f_{t,90,k}$: résistance au 5ème percentile en traction transversale, MPa
$f_{c,90}$: résistance en compression transversale, MPa
$f_{c,90,k}$: résistance au 5ème percentile en compression transversale, MPa
$f_{v,k}$: résistance au 5ème percentile en cisaillement, MPa
$f_{m,j,k}$: résistance caractéristique des aboutages, MPa
$f_{m,gs,k}$: résistance caractéristique des poutres BMR, MPa
L	: Longueur de l'enture multiple, mm
p	: pas de l'enture multiple, mm
b_t	: extrémité de l'enture multiple, mm
α	: pente de la dent de l'enture multiple, degré
K_n, K_s	: rigidité de collage en traction pure et en cisaillement, respectivement, N/mm^3
σ_n^0, σ_s^0	: résistance de collage en traction pure et en cisaillement, respectivement, MPa
G_n, G_s	: énergie de rupture de collage en traction pure et en cisaillement, respectivement, N/mm
BMR	: Bois Massif Reconstitué (Glued Solid Timber)
BLC	: Bois Lamellé-Collé (Glued Laminated Timber)
LVL	: Lamibois (Laminated Veneer Lumber)
PRF-Tanin	: résine Phénol Résorcine Formaldéhyde Tanin
MUF	: résine Mélamine Urée Formaldéhyde
NF	: Norme Française
EN	: Norme Européenne
FCBA	: Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement
ENSTIB	: École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois
LERMAB	: Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le Matériau Bois

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En France, le marché du bois reconstitué par collage, notamment le Bois Massif Reconstitué (BMR) est en développement permanent, ces dernières années, en raison d'un besoin croissant en construction bois, favorisé par la montée en puissance du concept du développement durable.

Selon la norme française NF B 52-010 [1], à la différence du bois lamellé-collé (BLC) le bois massif reconstitué (BMR) s'obtient par empilage de 2 à 5 lamelles, aboutées ou non, de fortes épaisseurs comprises, généralement, entre 45 mm et 80 mm ou bien à partir de 2 à 3 lamelles pour des lames d'épaisseurs inférieures ou égales à 45 mm. La section des poutres BMR obtenue ne doit pas, par ailleurs, dépasser 260 mm x 320 mm (figure 1.1).

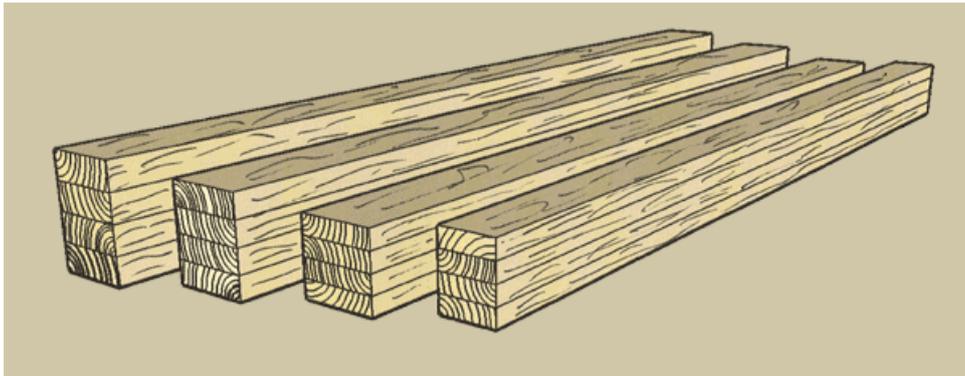


Figure 1.1 – Exemples de poutres en Bois Massif Reconstitué (BMR).

Ces éléments structuraux en BMR (poutres, poteaux), sont généralement utilisés pour reprendre de fortes sollicitations. Ils sont très répandus dans les systèmes de contreventement, dans les planchers et en charpente traditionnelle (figure 1.2).

Actuellement, les éléments structuraux en BMR sont fabriqués à partir des essences résineuses (sapin, épicéa, douglas...etc) pour lesquelles les techniques et le processus de fabrication sont bien maîtrisés. En effet, les normes européennes actuelles ont été rédigées exclusivement pour les essences résineuses et les recommandations de conception et de fabrication sont basées essentiellement sur des tests expérimentaux réalisés sur des bois résineux. Très peu d'informations sont disponibles en ce qui concerne les bois feuillus, en particulier le hêtre, qui est aujourd'hui limité à la classe de service 1 et aux produits d'intérieur et d'ameublement. Le choix technique des normes actuelles de point de vue classement mécanique est très sécuritaire et limité à la

classe GT24 (24 MPa), en ce qui concerne les BMR en bois feuillus reconstitué par collage, par manque de connaissances et de caractérisation mécanique.



Figure 1.2 – Charpente réalisée en BMR.

Le marché Français du BMR est en forte croissance et l'importation de poutres en BMR, d'Allemagne et d'Autriche, a fortement augmenté (80% des produits importés), ces dernières années [2]. Dans ce contexte, la fabrication de produits en BMR à partir d'essences feuillues françaises, notamment le hêtre, constitue un axe de développement important et répond à un besoin industriel bien identifié.

Pour la fabrication de poutres en bois reconstitué par collage pour un usage structural, l'aboutage¹ admis, et communément utilisé, est le joint à entures multiples (figure 1.3).



Figure 1.3 – Aboutage par entures multiples.

La performance mécanique des poutres en BMR dépend principalement de deux paramètres : la classe mécanique des planches constitutives et la résistance des aboutages par entures mul-

1. un assemblage longitudinal (bout à bout) réalisé par le collage de pièces de bois

tiples. Le premier paramètre est plutôt favorable dans le cas des essences feuillues, en particulier le hêtre qui présente de bonnes caractéristiques de résistance et de rigidité. En revanche, les aboutages sont souvent un paramètre réducteur. En effet, plusieurs études [3, 4] montrent que les poutres en bois reconstitué par collage sont, généralement, fragilisées par la faiblesse des aboutages situés en zone de tension maximum des poutres fléchies.

La fabrication de poutres en bois reconstitué par collage nécessite donc une bonne exécution des joints collés, en particulier les aboutages, qui jouent un rôle crucial dans la résistance globale des poutres. En effet, le comportement des joints de colle en construction bois est fortement dépendant des paramètres de collage qu'il convient de maîtriser pour obtenir la meilleure fiabilité. Sans prétendre étudier de manière approfondie l'ensemble des paramètres de collage, dans ce travail, le joint par entures multiples fera l'objet d'une attention particulière. En effet, l'utilisation de bois feuillus (durs) comme le hêtre est susceptible d'amener d'autres problèmes liés au collage de bois denses.

Dans le cadre de la valorisation des essences feuillues locales (françaises), en usage structural, l'expérimentation de poutres en bois de hêtre reconstitué par collage (BMR) est envisagée dans cette étude. Pour cela, il est nécessaire d'évaluer les performances mécaniques du hêtre ainsi que des produits fabriqués à partir de cette essence. Nous avons donc, proposé une méthodologie expérimentale et numérique, par éléments finis, dans le but de réduire les tests expérimentaux coûteux et onéreux.

Ainsi le présent mémoire de thèse est décomposé en 6 chapitres et organisé de la manière suivante :

Chapitre 2 :

Ce chapitre est consacré à la revue de l'état de l'art sur le bois massif reconstitué, en usage structural. Nous nous intéresserons d'abord à la ressource forestière de la France, au marché français bois-construction, avec une attention particulière aux produits en bois reconstitué par collage mais aussi aux aspects normatifs. Ensuite, nous présenterons les aspects liés à leur fabrication et au collage. Enfin, nous rapporterons quelques travaux scientifiques antérieurs en relation avec les trois points suivants :

- Caractérisation de poutres en bois reconstitué par collage
- Étude des aboutages par entures multiples
- Étude du collage et de l'adhésion bois-colle

Chapitre 3 :

Dans ce chapitre, nous présentons la caractérisation expérimentale des matériaux utilisés et des produits fabriqués en BMR. Les essais de caractérisation sont donc effectués selon les normes européennes appropriées. Afin de respecter les exigences des normes européennes, en ce qui concerne la caractérisation des éléments structuraux en bois reconstitué par collage (Bois Lamellé-collé (BLC), Bois Massif Reconstitué (BMR),...etc.), les tests suivants ont été réalisés :

- Tests de caractérisation des planches de hêtre (lamelles individuelles) en vue de déterminer leur classe de résistance mécanique (normes EN 408 [5], EN 338 [6]) ;
- Tests sur les colles structurales afin de vérifier leurs aptitudes au collage structural (EN 302-1 [7] et EN 302-3 [8]) ;
- Tests sur les aboutages par entures multiples afin de vérifier les exigences de la norme NF B 52-010 [1] ;
- Tests de caractérisation des BMR à 2 lamelles (DUO) et à 3 lamelles (TRIO) avec et sans aboutages (EN 408 [5], EN 14080 [9])

La fabrication de l'ensemble des éprouvettes (lamelles individuelles, lamelles aboutées, BMR DUO et TRIO avec ou sans aboutages) et la réalisation des tests expérimentaux ont été effectuées avec les moyens du laboratoire (LERMAB). Nous décrirons et présenterons, par ailleurs, en détail, les étapes de fabrication et de réalisation des essais mécaniques.

Chapitre 4 :

Le chapitre 4 est consacré à la modélisation du comportement des poutres en BMR avec et sans aboutages. Nous présentons tout d'abord les outils numériques choisis pour les modèles éléments finis en ce qui concerne le bois de hêtre et la modélisation des joints de colle. Nous nous servirons ensuite des tests expérimentaux réalisés dans le précédent chapitre afin d'identifier les paramètres des modèles numériques. Les paramètres du hêtre sont identifiés principalement sur des essais de flexion et de compression. Les paramètres du joint de colle sont identifiés sur la base du mode I (mode d'ouverture) et du mode II, puis un cas test sur une lamelle aboutée est réalisé pour vérifier la pertinence du modèle en ce qui concerne le mode mixte, combinant mode I et II.

Une fois les paramètres matériaux bien identifiés, nous présentons des simulations numériques sur des poutres en BMR à 2 et à 3 lamelles avec et sans aboutages. Les résultats des simulations numériques sont ensuite comparés aux résultats expérimentaux pour vérifier la qualité des modèles éléments finis utilisés. Enfin, une étude paramétrique est effectuée pour étudier l'influence de plusieurs paramètres (géométriques et mécaniques) sur la résistance des aboutages par en-

tures multiples et des poutres en BMR.

Chapitre 5 :

Dans ce chapitre, nous avons formulé le problème d'optimisation de la géométrie de l'enture multiple afin d'augmenter la résistance des aboutages, qui constituent un facteur réducteur, en ce qui concerne les BMR en hêtre. Tous les paramètres géométriques définissant la géométrie de l'enture ont été considérés comme variables d'optimisation. Des limitations de faisabilité respectant les exigences des normes européennes en ce qui concerne la fabrication des aboutages ont été également considérées. La fonction objectif est définie en fonction de la résistance maximale en flexion de l'aboutage. Pour la résolution du problème d'optimisation, la méthode des surfaces de réponse couplée à un algorithme de minimisation, de type SQP, disponible dans Matlab a été utilisée.

Chapitre 6 :

Ce chapitre rappelle les objectifs du travail et dresse une conclusion générale et ouvre quelques réflexions et pistes de développements futurs.

CHAPITRE 2

ETAT DE L'ART

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur la ressource forestière française ainsi que sur le secteur bois-construction. Compte tenu de la multiplicité des champs disciplinaires, un état de l'art précis des connaissances sur l'ensemble des domaines de la filière bois est délicat. Nous avons donc pris le parti d'éclairer cet état de l'art sur la filière bois en France en se limitant au bois d'oeuvre reconstitué par collage.

2.1.1 Ressources forestières

En Europe, la forêt couvre en moyenne 45 % de la superficie totale des terres, ce qui représente un peu plus d'un milliard d'hectares, soit 25 % de la superficie forestière mondiale [10]. Avec une superficie boisée de 16,1 millions d'hectares, la France se classe au troisième rang européen, après la Suède et la Finlande [11].

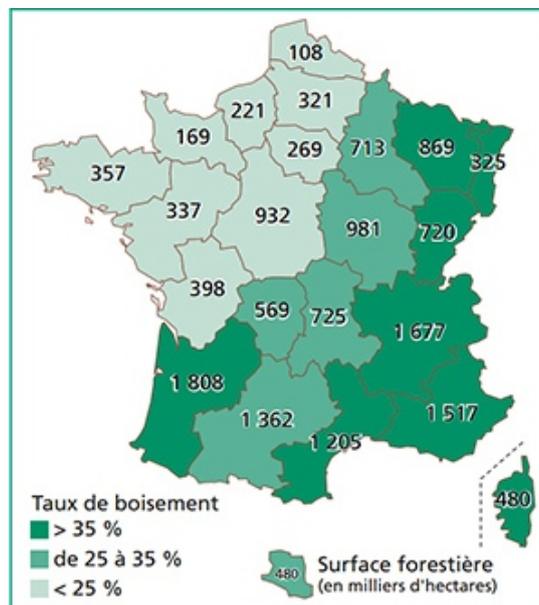


Figure 2.1 – Surface et taux de boisement du territoire français [12].

La forêt française est la première forêt feuillue d'Europe et la troisième forêt résineuse d'Europe. Elle occupe 30% du territoire national et soutient environ 450 000 emplois, directs et associés, selon le rapport Puech [13]. Selon ce même rapport, la superficie de la forêt française a doublé depuis son renouveau, à partir du XIX siècle, et elle continue à s'accroître de 25 000 hectares

par an. Le volume moyen à l'hectare de bois sur pied à triplé. La forêt est donc un atout naturel considérable pour la France.

L'Inventaire Forestier National (IFN) fait apparaître clairement que l'accroissement spontané de la "forêt" reste très important dans les régions de l'arc méditerranéen et sud-ouest (figure 2.1). Toutes les analyses montrent de larges disponibilités en matière de récolte, notamment en montagne et en forêts privées.

Les feuillus sont les essences les plus répandues en surface couverte (figure 2.2) et ils représentent environ 71 % de la surface boisée [14].

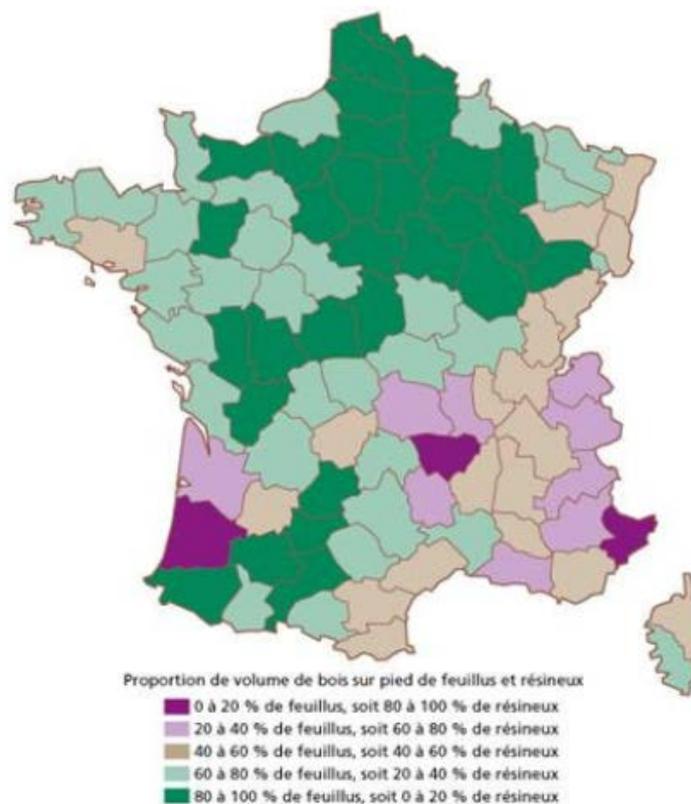


Figure 2.2 – Proportion de volume de bois sur pied de feuillus et résineux [12].

2.1.2 Situation comparée Feuillus/Résineux

Au travers la figure 2.3, il apparaît clairement que la forêt feuillue domine tant en surface qu'en volume de bois sur pied. En revanche, en ce qui concerne la récolte et surtout la production de sciages, la situation est nettement inversée.

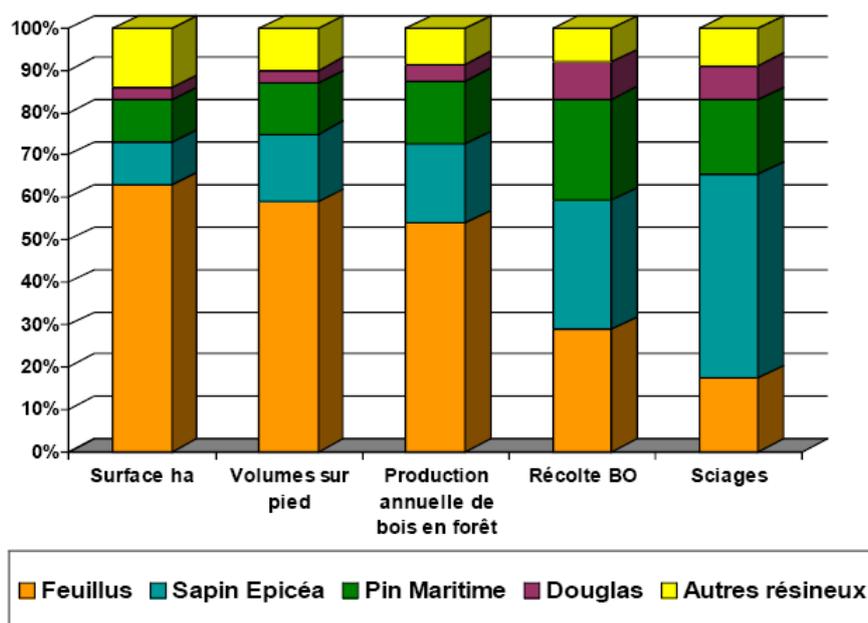


Figure 2.3 – Répartition des Feuillus/Résineux en France [15].

Les productions ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}$) des feuillus représentent seulement la moitié de celles des résineux (tableau 2.1).

	Surfaces		Volumes m^3/ha	Productions $\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}(1)$
	x 1000 ha	%		
Chênes	3 585	24	178	4,9
Hêtre	1 394	9	205	6,0
Châtaignier	740	5	168	7,8
Autres feuillus	5 046	33	102	5,3
TOTAL FEUILLUS	10 765	71	145	5,6
Sapin/Epicéa	1 151	8	311	14,8
Pin maritime	1 105	7	120	11,2
Pin sylvestre	914	6	146	6,0
Douglas	409	3	232	16,7
Autres résineux	891	6	138	7,1
TOTAL RÉSINEUX	1 470	29	188	10,8

Tableau 2.1 – Surfaces boisées, volumes sur pied et productions courantes des essences dominantes [14].

2.1.3 La filière bois en France

Le poids de la filière bois en France est évalué en 2008 par le Sessi [16] à 40 Mds d'euros et 231 000 salariés. La forêt fait vivre plus de 45 000 personnes en France, en emplois directs et associés.

Selon le rapport Puech [13], la balance extérieure de la France pour l'ensemble de la filière bois affiche un déficit d'environ 6,3 milliards d'euros, soit le deuxième déficit commercial de la France

après celui de l'énergie.

Le tableau 2.2 montre la balance de la filière bois. On observe un fort déficit de la filière bois qui est imputable pour une grande part à l'industrie de l'ameublement et à la production de papiers et cartons. Par contre, Le déficit de l'amont de la filière bois est dû essentiellement aux sciages de conifères, et dans une moindre mesure à ceux de feuillus. La question de la capacité des industries de première transformation du bois à répondre aux exigences normatives et environnementales résultant du Grenelle de l'environnement est posée.

Produits d'exploitation forestière, de carbonisation et de scierie	Exportations	Importations	Solde
Bois de conifères (grumes + trituration)	74	84	- 10
Bois de feuillus (grumes + trituration)	160	160	+ 0
Plaquettes, particules et délignure	51	41	+ 10
Sciages de conifères	152	723	- 571
Sciages de feuillus	189	286	- 97
Traverses	26	8	+ 19
Autres produits (1)	40	62	- 22
TOTAL	693	1 364	- 671

Produits des industries du bois et des pâtes et papiers	Exportations	Importations	Solde
Feuilles de placage	79	128	- 49
Panneaux (bois et fibres), contreplaqués	918	734	+ 184
Autres produits du travail mécanique du bois	776	1 267	- 491
Meubles et sièges en bois	1 087	2 868	- 1 780
Pâtes de bois et vieux papiers	444	1 087	- 643
Papiers et cartons	6 226	7 562	- 1 336
TOTAL	9 530	13 646	- 4 116

Tableau 2.2 – Solde des échanges en valeur de la filière bois en 2006 [15].

Pour ne pas aggraver ce déficit, il est donc indispensable de prévoir un couplage entre les mesures de croissance de la demande, en bois d'oeuvre, notamment, et de l'offre venant de l'exploitation des bois du territoire national. En effet, comme le marché du bois est mondial, le risque est de voir entrer de plus en plus de bois européens ou de provenance plus lointaine sur le marché français, creusant ainsi le déficit actuel.

2.1.4 Le marché de la construction bois

Le marché mondial du bois de construction est actuellement en pleine mutation. La France occupait en 2005 une place importante au plan européen. Elle était le premier producteur en stock de bois sur pied, le quatrième producteur de grumes, après la Suède, l'Allemagne et le Finlande, et le cinquième producteur de sciages, après l'Allemagne, la Suède, Finlande et

l’Autriche. Depuis, les marchés du bois ont été secoués par la crise économique mondiale et sont au seuil de mutations structurelles. La structure du commerce mondial des produits forestiers, produits parmi les plus ”circulants” sur la planète, reste malgré tout dominée par l’Europe, comme en témoigne le tableau 2.3.

	Importations (en milliards de \$)	Exportations (en milliards de \$)	Commerce net (en milliards de \$)	Part des exportations mondiales (en %)
Europe	109	116	7	51,7
dont UE-27	102	110	7	49
dont Allemagne	19	22	3	9,7
Finlande	2	15	13	6,8
France	11	8	-3	3,6
Italie	11	5	-6	2,4
Pologne	4	3	-1	1,2
Royaume Uni	12	3	-9	1,4
Suède	3	16	13	7,2
Russie	2	10	8	4,6
Amérique du Nord	33	48	15	21,2
TOTAL MONDE	229	224	47	100%

Source: FAOSTAT 2010

Tableau 2.3 – Structure du commerce mondial des produits forestiers en moyenne 2006-2008

En France, la part du bois dans la construction représente environ 10% et reste donc en second plan derrière les matériaux plus classiques tels que le béton et l’acier. Bien que cette part soit en progression ces dernières années, elle reste très inférieure à celle observée dans d’autres pays où la construction bois est plus développée.

Le bois d’oeuvre regroupe en France environ 2000 structures de différentes tailles, avec principalement des PME et des TPE qui représentent environ 90% des entreprises. Selon le Sessi 2006 [17], la production des entreprises françaises du secteur bois-construction est en progression depuis 2000. Les entreprises ont accru leurs effectifs de 7%, leur chiffre d’affaires et leur valeur ajoutée de 25% et leur investissements de 30% [16]. Ceci s’explique en grande partie par la conjoncture environnementale plus favorable pour le secteur bois-construction.

Le marché des produits reconstitués par collage, notamment le bois massif reconstitué (BMR) est aussi en développement permanent. En effet, en 2008, on estimait que 50 à 60 000 m^3 de BMR se vendaient en France avec 80% de produits importés d’Allemagne et d’Autriche [2]. La demande de ce type de produits est en forte augmentation, avec la montée en puissance du concept de développement durable. Par ailleurs, une étude d’analyse du cycle de vie du bois lamellé-collé, réalisée par le FCBA en 2000 a montré que 40% des émissions de gaz à effet de serre était dû au transport des bois d’importation [2]. Ainsi, les produits de type BMR fabriqués avec des essences de bois français constituent un axe de développement majeur pour la promo-

tion des bois français dans la construction pour les années à venir.

De nombreux projets collaboratifs ont été menés sur le classement mécanique de poutres BMR fabriquées à partir d'essences locales résineuses, en vue de valoriser les bois français en usage structural :

- Projet Bing [18] : développement d'une machine de classement mécanique des sciages destinés à la construction pour le Sapin et Epicéa en partenariat avec La CCI de Lozère, ARFOBOIS et le FCBA.
- Etude MOKUZAI initiée par le FCBA en 2001 et 2002 qui a montré que pour des sciages issus de peuplements d'âge varié et d'origine géographique étendue, le potentiel en classe mécanique C30 est de 72%. Pour des sciages issus de peuplements de 70 ans, ce potentiel passe à 90% [19].
- Projet FCBA 2007-2010 [19] , en collaboration avec trois entreprises (Ets PROLIGNUM, Ets COSYLVA et Ets BARLET) sur le développement du BMR avec des essences de bois français douglas et sapin/épicéa.
- Projet de l'APIB [20] en partenariat avec France Douglas et le FCBA sur l'accompagnement de la filière bois construction pour le classement par machine en vue d'une utilisation en structure pour le Douglas.

2.2 Le Hêtre - une essence locale feuillue

Selon les statistiques sur le prix du bois (figures 2.4 et 2.5), le hêtre est évalué à un prix beaucoup moins cher que le chêne, et très légèrement supérieur à celui des résineux.

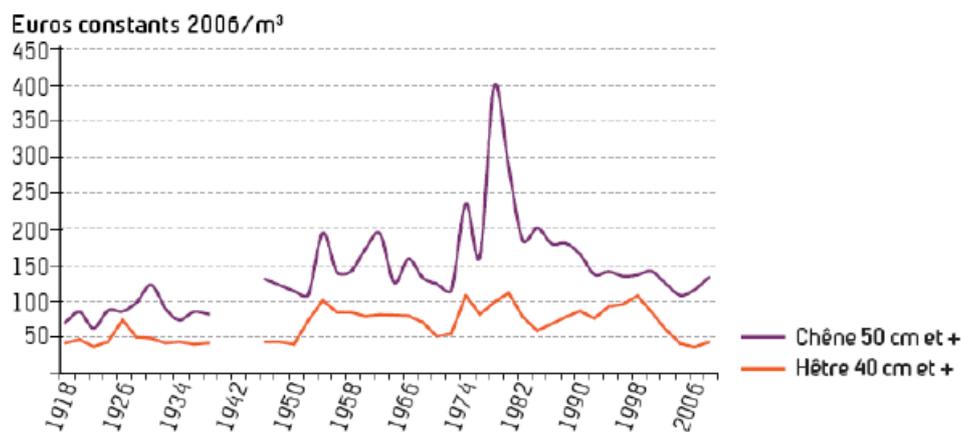


Figure 2.4 – Evolution du prix du bois de hêtre et du bois de chêne [21].

Par ailleurs, le hêtre est le bois d'intérieur par excellence, car il est très utilisé en ameublement. Le hêtre est actuellement une essence sous employée dans l'industrie. Avec la crise de l'ameublement en Europe, il se trouve souvent exporter sous forme de grumes dans les pays fabriquant de l'ameublement.

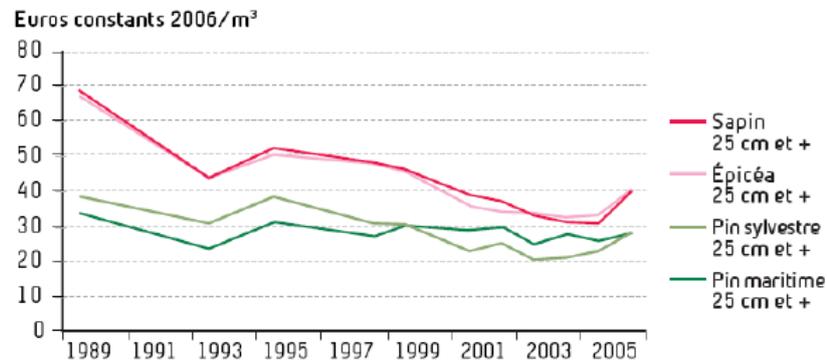


Figure 2.5 – Evolution du prix des bois résineux [21].

2.2.1 Caractéristiques morphologiques et mécaniques du hêtre

- Morphologie du hêtre

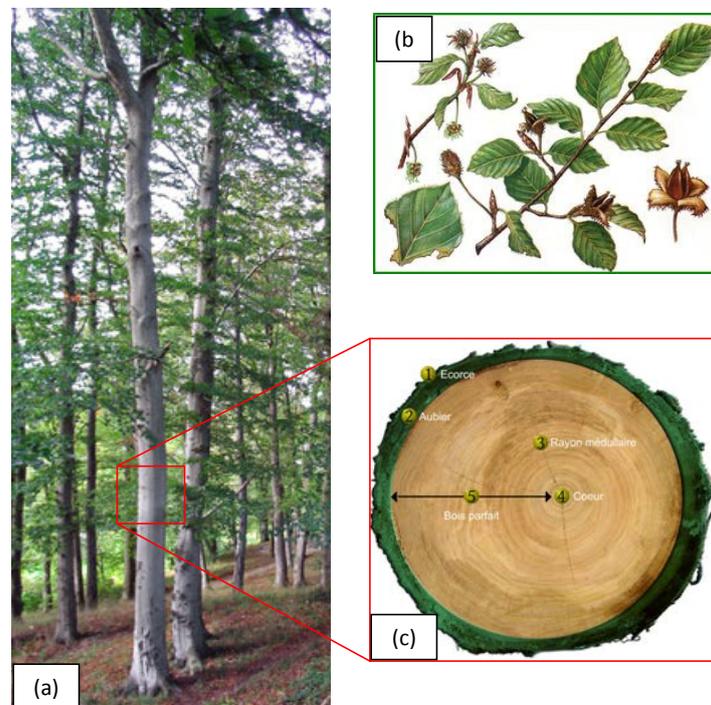


Figure 2.6 – (a) Forêt du hêtre ; (b) feuilles et grains du hêtre ; (c) une coupe transversale.

Le hêtre appartient à la famille des Fagacées qui comprend environ 900 espèces réparties en 7 à 9 genres, les plus connus étant : *Fagus* (Hêtre), *Castanea* (Châtaignier), *Quercus* (Chêne). Son nom français moderne vient de l'allemand *heister*. Il tire ses noms anciens de *fayard* et *fau*, d'où viennent les mots *fouet* et *fouine*. La dénomination latine du hêtre européen est *Fagus Sylvatica*. L'arbre du hêtre présente 40 à 90 cm de diamètre en moyenne. Il peut dépasser 40 mètres de hauteur totale (figure 2.6) et 250 ans d'âge.

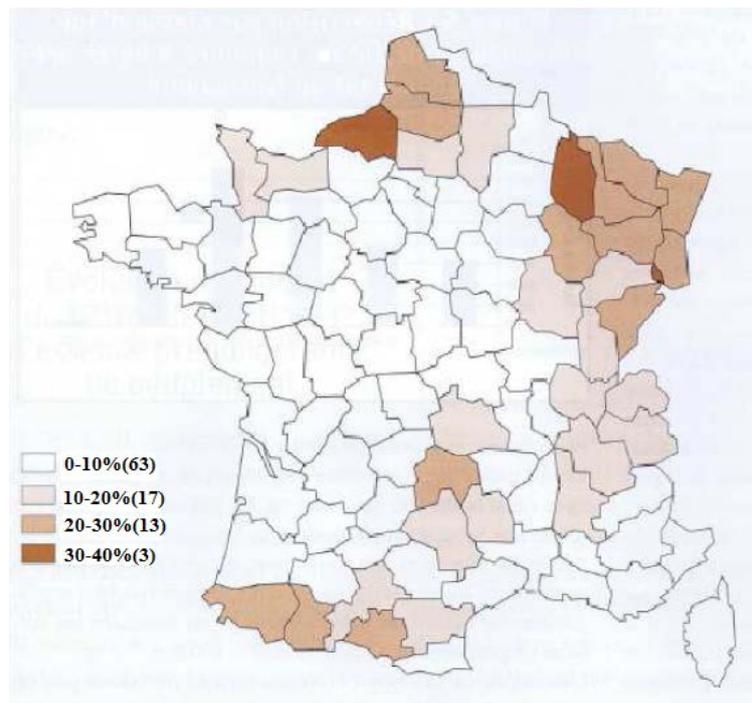


Figure 2.7 – Importance des surfaces boisées de hêtre par rapport aux surfaces boisées dans les départements [21].

Le hêtre est une essence par excellence des climats océaniques, tempérés et assez pluvieux (figure 2.7), il se répand en plaine dans le Nord. Il s'élève en montagne jusqu'à 1200 m dans les Vosges, 1500 m dans le Jura et les Alpes et 1700 m dans les Pyrénées et en Corse.

En France, le hêtre est une essence principale des feuillus couvrant 9 % de la surface totale boisée (tableau 2.1). Son accroissement en volume total est en nette augmentation (7 632 000 m^3 par an [22]).

- **Propriétés physiques**

Le hêtre est un bois clair dont la couleur de l'aubier ne se distingue pas de celles du coeur (duramen). Chez les arbres âgés, le coeur peut être coloré en rouge foncé ce qui le rend diffi-

cilement utilisable en décoration. Le bois est homogène avec des vaisseaux égaux de diamètre assez faible en moyenne, nombreux et régulièrement disséminés dans le cerne d'accroissement annuel. Il présente assez peu de différence entre le bois de printemps et le bois d'été. Cette qualité d'homogénéité rend le bois de hêtre intéressant dans une utilisation esthétique.

Le hêtre est un bois mi-dur. Sa masse volumique est d'environ 710 ± 30 kg/m³ à 12 % d'humidité. Ce bois est très nerveux, il tend à se fissurer et à gondoler. Une fois les planches débitées, elles sont souvent lattées aux extrémités pendant quelques jours pour éviter la fente, due aux tensions internes. Il est de durabilité faible, de l'ordre de 5 ans (bois périssable). Sensible aux intempéries, il est peu durable à l'air s'il n'est pas traité ou injecté. Au travers du tableau 2.4, on peut remarquer l'importance des retraits transversaux du hêtre par rapport aux autres essences.

	Bois Feuillus			Bois Résineux				
	Hêtre	Chêne	Châtaignier	Sapin	Epicéa	Pin Sylvestre	Pin maritime	Douglas
Densité* (kg/m ³)	710±30	740±50	640	490±50	450±60	550	550	540±40
Coefficient de retrait volumique(%)	0,54±0,04	0,44±0,05	0,42	0,44±0,07	0,39±0,04	0,45	0,45	0,46±0,02
Retrait tangentiel total (RT) (%)	11,6±1,2	9,7±0,9	6,9	8,7±2,3	8,2±0,8	8,3	9	6,9±1,2
Retrait radial total (RR) (%)	5,7±0,9	4,5±0,5	4,2	4,0±1,1	3,9±1,4	5,2	4,5	4,7±0,4
Point de saturation des fibres (%)	32	31	30	29	33	30	32	27
Stabilité en service	Peu stable	Moyennement stable à peu stable	Moyennement stable à peu stable	Moyennement stable				

Tableau 2.4 – Propriétés physiques des essences dominantes ; (*) à l'humidité H=12% [23].

- **Propriétés mécaniques**

D'un point de vue mécanique, les feuillus en général et le hêtre en particulier sont caractérisés par une meilleure résistance comparés aux essences résineuses, très utilisées en construction.

Essence		Module d'élasticité en flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)
Résineux	Douglas	11000÷13200	42÷68	82÷105
	Epicéa	10000÷12000	40÷50	80÷90
	Erable	9100÷12000	46÷62	80÷140
	Pin sylvestre	10800÷13000	45÷55	99÷105
	Sapin blanc	10000÷14500	40÷52	80÷93
	Mélèze	10600÷14500	45÷62	92÷110
Feuillus	Chêne	10500÷14500	52÷64	88÷110
	Hêtre	12300÷16400	52÷64	100÷135

Tableau 2.5 – Propriétés mécaniques des essences dominantes [24].

Le tableau 2.5 résume et compare les potentiels en termes de résistances mécaniques de quelques essences résineuses et feuillues. On observe que le hêtre présente les meilleures caractéristiques de résistance et de rigidité.

Par ailleurs, les normes européennes classent les essences résineuses selon douze classes de résistance mécanique : de C14 à C50. La plus faible (C14) correspond à une résistance en flexion de 14 MPa et la plus élevée correspond à 50 MPa. Tandis que les classes de résistance des feuillus couvrent une plus large plage de résistance allant de D18 à D70, c'est à dire de 18 MPa à 70 MPa (tableau 2.6).

Résineux	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	-	-
Feuillus	-	-	D18	-	-	D24	-	D30	D35	D40	-	D50	D60	D70

Tableau 2.6 – Classes de résistance du bois massif [6].

Les propriétés mécaniques et physiques du hêtre sont résumées par divers auteurs dans le tableau 2.7.

Auteurs de référence	H (%)	ρ (kg/m ³)	E_R (GPa)	E_T (GPa)	E_L (GPa)	G_{LR} (GPa)	G_{LT} (GPa)	G_{RT} (GPa)	ν_{LR}	ν_{RL}	ν_{LT}	ν_{TL}	ν_{RT}	ν_{TR}
Stamer 1933	10,5	745	2,24	1,14	13,7	1,25	0,7	0,62	0,07	0,45	0,04	0,51	0,36	0,75
Hearmon et Barkas 1941	12	750	1,70	1,03	11,9	0,98	0,76	0,37	---	---	---	---	---	---
Burcur et Archer 1984	---	674	1,85	1,04	9,16	1,39	0,97	0,35	1,24	0,25	0,9	0,1	0,26	0,14
Daniel Guitard 1987	10,5	740	2,28	1,16	14	1,64	1,08	0,47	0,45	0,07	0,52	0,04	0,71	0,36
Tomasz Ozyhar et al, 2013	9,6	689	2,31	0,56	11,18	1,37	1,01	0,43	0,01	0,04	0,11	2,21	0,26	1,09

Tableau 2.7 – Propriétés mécaniques et physiques du hêtre.

2.2.2 Le hêtre dans la construction

Bien que le hêtre présente un potentiel de valorisation très intéressant comparé aux bois résineux, d'un point de vue résistance mais aussi en terme de disponibilité de la ressource, il reste très loin derrière les résineux en terme d'utilisation comme bois d'oeuvre. En effet, depuis longtemps, le hêtre est considéré comme une essence de second rang et 80% de la récolte totale est destinée au bois de chauffage.

De plus, les normes européennes actuelles limitent l'utilisation du hêtre en construction aux structures de classe de service 1 [25], c'est à dire de moindre importance. La faible durabilité du hêtre, comparée aux résineux, le manque de classement mécanique mais aussi de normalisation, la non-connaissance, autant de facteurs qui peuvent expliquer cette limitation en usage structural.

2.3 Le bois reconstitué par collage

Dans cette partie, on se limitera volontairement aux éléments constructifs reconstitués par collage, soumis à de fortes sollicitations mécaniques, de type poteaux, poutres. Les éléments structuraux en bois reconstitué par collage sont des éléments constructifs dont la performance mécanique dépend de deux paramètres principaux, directement liés à sa fabrication : la classe mécanique des planches de bois, la résistance mécanique des aboutages par entures multiples.

Dans le cas d'une poutre reconstituée par collage, par exemple, le module d'élasticité de la poutre (E_{RC}) peut, théoriquement, être déduit des caractéristiques (E_i, A_i, I_i^0, d_i^2) des n planches constitutives comme suit :

$$E_{RC} = \sum_{i=1}^n E_i (I_i^0 + A_i d_i^2) \quad (2.1)$$

Où : E_i, A_i, I_i^0 sont le module d'élasticité, la section et le moment d'inertie de la planche i , respectivement. d_i est la distance entre l'axe neutre de la planche i et celui de la poutre.

2.3.1 Différents types du bois reconstitué par collage

- **Bois massif abouté par entures multiples**

L'ancêtre de la technique d'aboutage est d'utiliser des pièces coupées en biseau afin de les coller (figure 2.8 (A et E)). Les premières applications industrielles datent de la seconde guerre mondiale en Allemagne lors de la construction de ponts. Le joint à biseau pose des difficultés de fabrication puisqu'il est difficile d'obtenir une bonne exactitude ainsi qu'une bonne précision dans l'alignement des blocs. De plus, il engendre une grande perte de longueur [26].

Au début des années 1950, des efforts ont été concentrés au développement d'un profil de joint permettant d'obtenir un joint ayant une meilleure résistance, tout en gardant constant le volume de bois à usiner (figure 2.8 (B, C, D)).

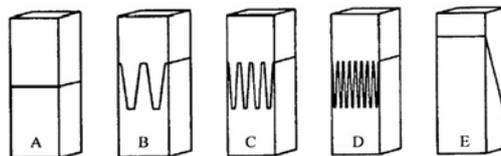


Figure 2.8 – Géométrie de l'aboutage [27].

L'aboutage à entures multiples est un assemblage longitudinal réalisé par le collage de pièces de bois avec des extrémités dans lesquelles ont été pratiqués des coins trapézoïdaux semblables,

appelés entures [28] (figure 2.9).



Figure 2.9 – Bois massifs aboutés.

- **Bois lamellé-collé (BLC)**

Le BLC est un élément structurel obtenu par l'aboutage et le collage de lamelles de bois. L'épaisseur des lamelles est limitée à 45 mm pour les classes d'emploi 1 et 2, et à 33 mm pour les classes d'emploi 3 et 4 [29]. Le BLC peut être en forme droite ou courbe (figure 2.10).

Le BLC permet de s'affranchir des limites imposées par la taille des grumes disponibles. Les dimensions maximales réalisables sont en fait fonction du transport depuis l'usine vers le site d'utilisation et les dimensions de l'atelier de fabrication. Des poutres droites de 60 m peuvent être réalisées. La hauteur peut atteindre jusqu'à 2,5 m et la largeur doit au moins être égale à 1/10 de la hauteur.

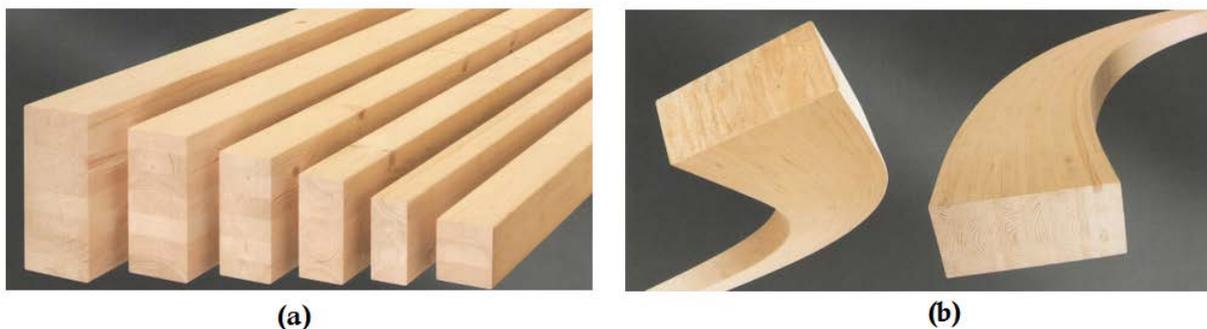


Figure 2.10 – Poutres en bois lamellé-collé droites (a) et courbes (b).

- **Bois massif reconstitué (BMR)**

Le BMR correspond à des éléments structurels reconstitués par collage de lames de bois massif de forte épaisseur (figure 2.11). Le procédé de reconstitution permet de fabriquer des éléments

de section fixe et de grande longueur. Le BMR est un élément en bois de structure ayant des dimensions de section transversale ne dépassant pas $260 \times 320 \text{ mm}^2$ constitué de deux à cinq lamelles collées ayant la même classe de résistance ou le même profil de résistance spécifique au fabricant et une épaisseur de lamelle finie supérieure à 45 mm et inférieure à 80 mm. Les éléments constitués de 2 à 3 lamelles d'épaisseur inférieure ou égale 45 mm sont aussi considérés comme du BMR [1].

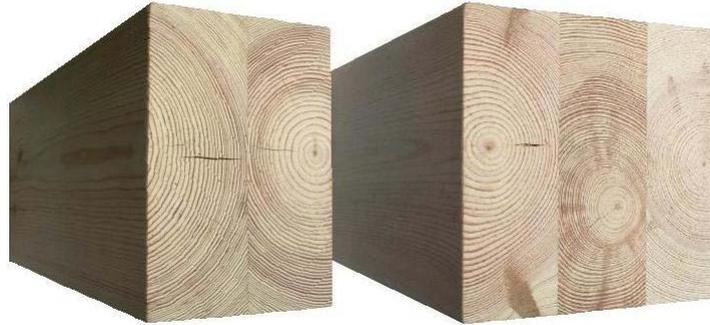


Figure 2.11 – Poutres en Bois Massif Reconstitué (BMR).

- **Lami-Bois**

Le Lami-bois, appelé aussi "Laminated Veneer Lumber (LVL)" est un produit de bois d'ingénierie composé de plusieurs couches de placages obtenues par déroulage et d'une épaisseur de 1 à 2 mm en moyenne, collées avec des adhésifs (figure 2.12). La technique de fabrication est semblable à celle du contreplaqué. La nature composite de LVL signifie qu'il est plus uniforme, plus fort, plus droit, et beaucoup plus stable. Il est disponible en grandes sections et sur des longueurs pouvant atteindre 23 m. Une poutre lamellé-collé fabriqué à partir de 16 lamibois possède une très grande résistance en compression, environ 70 MPa [30].



Figure 2.12 – Poutre en lamibois

2.3.2 Avantages et inconvénients du bois reconstitué par collage

En général, les éléments structuraux (poteaux poutres, ...etc) en bois reconstitué par collage, notamment le BMR et le BLC, présentent plusieurs avantages :

- permet de fabriquer des éléments de grandes dimensions et portées, repoussant ainsi les limites imposées par la taille des grumes ;
- aspect esthétique, grande stabilité dimensionnelle, et homogénéité, meilleure résistance mécanique, par comparaison au bois massif, grâce notamment à la purge des défauts (noeuds, par exemple) lors de la phase d'aboutage (figure 2.13) ;
- le procédé de reconstitution par collage garantit l'utilisation d'un bois sec, à moins de 15% d'humidité en général ;

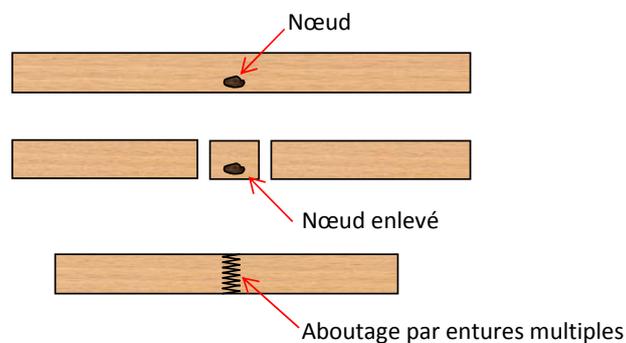


Figure 2.13 – Aboutage par entures multiples fabriqué en enlevant les noeuds naturels

Par ailleurs, l'utilisation du hêtre peut garantir un grand potentiel en résistance mécanique par comparaison aux produits réalisés en bois résineux. L'utilisation du hêtre français conduirait également à la réduction des gaz à effet de serre, dus aux transports des bois importés et contribuerait positivement à la balance commerciale, d'autant plus que la ressource est disponible en France.

En revanche, ces produits reconstitués par collage présentent aussi des inconvénients :

- la présence des aboutages et des joints de colle fragilisent, généralement, l'élément structural (risque de rupture des aboutages, risque de délaminage) ;
- les normes européennes limitent sévèrement les épaisseurs des lamelles des bois feuillus, en raison des retraits transversaux importants (figure 2.14) qui risquent de générer des concentrations de contraintes au niveau des joints de colle ;

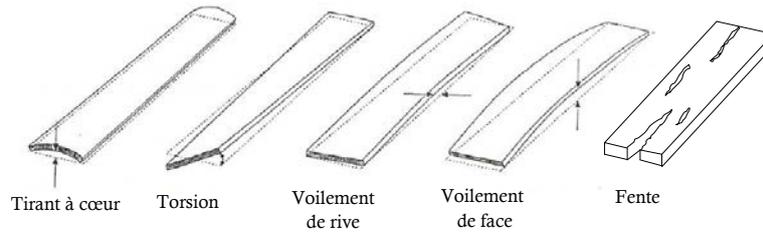


Figure 2.14 – Les principaux défauts du retrait transversal du bois [31–33].

- difficultés de collage des bois feuillus ayant une densité supérieure à 0.7 ;
- absence de normes en ce qui concerne le classement mécanique des produits en bois feuillus reconstitués par collage ;
- toutes les normes européennes de fabrication sont établies sur la base de tests expérimentaux réalisés sur des essences résineuses ;

2.3.3 Aspects normatifs et classements

La qualité finale des poutres en bois reconstitué par collage, en termes de caractéristiques de résistance et de rigidité, est fortement dépendante de la qualité des planches constitutives. Les normes européennes organisent ces poutres multi-couches en plusieurs classes de résistance mécanique résumées dans le tableau 2.8 distinguant entre produits en bois lamellé-collé (BLC) et le bois massif reconstitué (BMR). Ce tableau de classement indique des classes de résistance allant du GL20 (20 MPa en flexion) jusqu'à GL32 (32 MPa) pour le bois lamellé-collé (BLC) fabriqué à partir d'essences résineuses. En revanche, le classement mécanique pour les poutres en bois massif reconstitué (BMR), issues d'essences résineuses, est plus défavorable puisque le classement est limité à deux classes de résistance, à savoir GT18 (18 MPa) et GT24 (24 MPa). En effet, la norme française NF B 52-010 [1] sur le BMR est plus orientée sur les aspects de fiabilité et de durabilité du collage que sur l'aspect mécanique, pour lequel le choix technique est sécuritaire par manque de données dans ce domaine.

Par ailleurs, il n'existe aucun classement, normatif, des produits en bois reconstitué par collage (BLC, BMR) fabriqués à partir d'essences feuillues.

BLC panaché	-	GL 20c	GL 22c	GL 24c	GL 26c	GL 28c	GL 30c	GL 32c
BLC homogène	-	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
BMR	GT 18	-	-	GT 24	-	-	-	-

Tableau 2.8 – Les différentes classes de résistance des BLC et BMR [1, 9].

En ce qui concerne la qualité du bois, la norme NF B 52-010 [1] donne les qualités d'approvi-

sionnement pour les planches constitutives en fonction des performances recherchées des classes des BMR données dans le tableau 2.8.

Pour éviter la vérification de la résistance des aboutages, la norme française NF B 52-010 [1] exige une résistance minimale en ce qui concerne les aboutages par entures multiples, et ce en fonction de la qualité du produit fini souhaité. La résistance caractéristique $f_{m,j,k}$ des aboutages doit alors satisfaire la condition suivante :

$$f_{m,j,k} = K_j f_{m,gs,k} \quad (2.2)$$

Où : $K_j = 1 + 0.07(N - 1)$ pour $1 < N < 4$ où N est le nombre de lames.

$K_j = 1, 2$ à partir $N = 4$;

$f_{m,gs,k}$ est la résistance caractéristique de l'élément reconstitué par collage (BMR).

Type de BMR	DUO	TRIO	QUADRO
K_j	1,07	1,14	1,2
$f_{m,j,k}$ (MPa) pour GT 18	19,3	20,5	21,6
$f_{m,j,k}$ (MPa) pour GT 24	25,7	27,4	28,8

Tableau 2.9 – Exigences sur la résistance des aboutages des poutres BMR (dont les classes mécaniques sont notées GTxx).

Outre, la norme EN 14080 [9] donne les exigences en terme du profil géométrique de l'enture.

La longueur de l'enture et la pente définissant l'inclinaison du plan de collage doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \alpha \leq 7,1^\circ, \\ L \geq 4p(1 - 2\frac{b_t}{p}), \end{cases} \quad (2.3)$$

Ainsi, la pente de l'enture est donnée par la relation suivante [34] :

$$\tan \alpha = \frac{1}{l_j} \left(\frac{1}{2p} - b_t \right) \quad (2.4)$$

2.4 Fabrication industrielle de poutres en bois reconstitué par collage

En règle générale, la fabrication de poutres en bois reconstitué par collage (BMR, BLC...) fait appel à quatre principales étapes : préparation des planches, fabrication des aboutages, collage, rabotage/ finition (figure 2.15). En outre, chaque étape principale peut nécessiter plusieurs autres étapes intermédiaires de préparation.

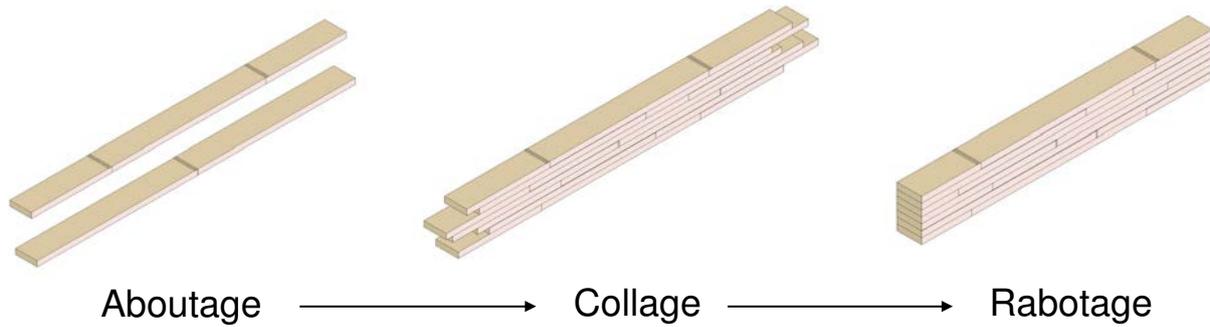


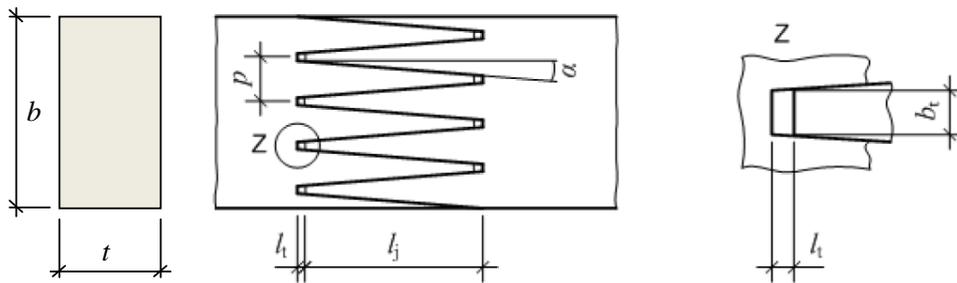
Figure 2.15 – Etapes principales de fabrication des poutres en bois reconstitué par collage.

2.4.1 Préparation des planches de bois

Le bois est livré et stocké dans un environnement contrôlé (température 20°C , humidité relative 65%). En règle générale, l'humidité du bois ne doit pas dépasser 15% (idéalement 12%). Ensuite, des planches sont débitées. Préalablement à la fabrication des poutres, ces planches de bois sont rabotées à la dimension désirée en fonction du produit final à réaliser et classées mécaniquement. Le classement mécanique des planches est un paramètre essentiel du processus de fabrication car il conditionne la qualité et donc la classe mécanique du produit fini.

2.4.2 Réalisation des aboutages

Les planches de bois sont d'abord purgées de tous les défauts pouvant affecter leur résistance mécanique (noeuds, fente...) et donc la résistance globale du produit fini. Ensuite, elles sont assemblées bout à bout pour obtenir des lamelles continues de grande longueur. En usage structural, l'aboutage admis est le joint à entures multiples (figure 2.16) [34].

Figure 2.16 – Profil d'une enture multiple : l_j : longueur, p : pas, b_t : extrémité de l'enture, α : pente, l_t : jeu au fond de l'enture, b : hauteur, t : largeur [9].

Les entures (figure 2.17) peuvent être usinées, visible sur la face de la planche (joint vertical) ou visible sur le chant (joint horizontal).

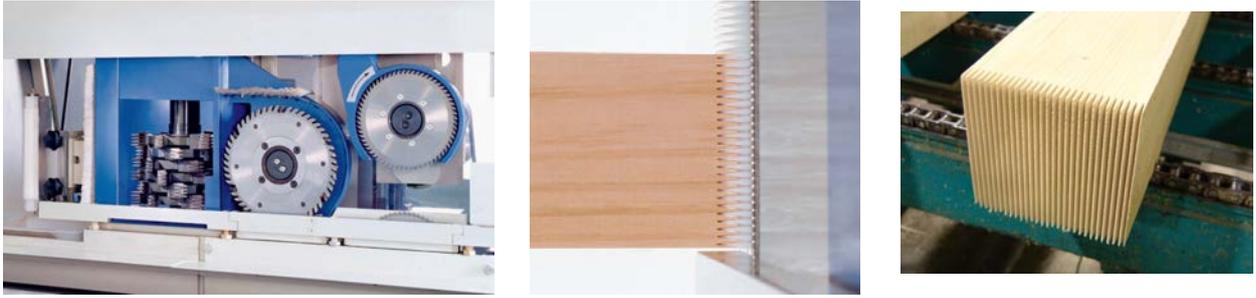


Figure 2.17 – Usinage de l'enture multiple.

Le joint horizontal est le plus communément utilisé en usage structural en Amérique du Nord, alors que le joint vertical est le plus répandu en Europe. La géométrie de l'enture multiple est définie par les normes européennes, notamment l'EN 14080 [9], pour les bois résineux.

L'aboutage par entures multiples est un élément essentiel de la performance mécanique des éléments structuraux car il est très souvent un point de fragilité de la planche tendue de la poutre en flexion.

Ensuite, les lamelles aboutées obtenues sont stockées dans un environnement contrôlé pour permettre une polymérisation complète de la colle avant toute autre opération.

2.4.3 Rabotage des lamelles aboutées

Les lamelles aboutées sont rabotées (figure 2.18) pour obtenir une épaisseur finale uniforme mais aussi pour éliminer tout décalage des entures ainsi que les bavures de colle restantes.

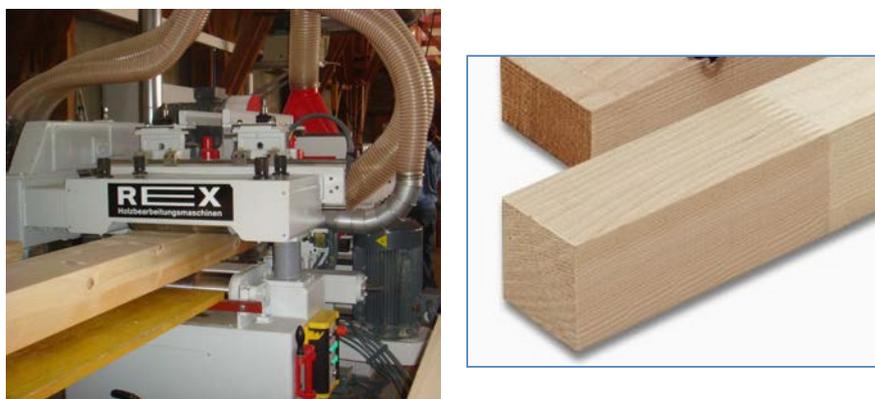


Figure 2.18 – Rabotage des lamelles.

2.4.4 Encollage - Pressage

Les lamelles aboutées sont encollées (figure 2.19(a)) puis empilées les unes sur les autres (figure 2.19(b)) pour obtenir la section désirées et mises sous pression (figure 2.19(c)). Afin d'assurer un bon collage, les lamelles doivent avoir une humidité uniforme, généralement une différence inférieure à 5% est admise [35]. Généralement l'empilage des lamelles aboutées se fait suivant un décalage évitant la superposition des aboutages sur une même section transversale.



Figure 2.19 – (a) application de colle, (b) assemblage des lamelles, (c) pressage.

2.4.5 Finition

Une fois la durée de polymérisation de la colle finie, les poutres sont rabotées sur leurs quatre faces pour obtenir la section finale désirée (figure 2.20), exempte de tout défaut géométrique et afin d'éliminer les bavures de colle. Cette phase réunit également les opérations de perçages, de taillage et d'application de produits de préservation.



Figure 2.20 – Les produits finis.

2.4.6 Les colles structurales

La notion de colle structurale est apparue dans les années 1940, en Grande-Bretagne et en Allemagne, lors de la mise au point des polyuréthanes et des colles phénoliques destinées aux assemblages métal/métal dans l'aéronautique. Leur science s'est depuis largement développée,

permettant la mise au point d'adhésifs de plus en plus performants. La plupart des colles modernes ont une résistance au cisaillement supérieure à celle du bois.

Une colle doit être bien choisie avant la fabrication, afin d'être adéquate avec le bois utilisé et de produire des liaisons durables et fiables pendant la durée de vie de la structure [36].

Pour les produits en bois reconstitué par collage destinés à être utilisés dans la construction, les colles doivent être choisies, afin de respecter les exigences de la norme NF-EN-301 [36].

Les facteurs influençant la résistance du collage sont en premier la qualité de surface du bois avant encollage, puis la régularité de la colle appliquée (épaisseur du joint). La meilleure résistance de collage est obtenue pour un joint de colle mince. Ce dernier est établi par la capacité de pénétration de colle dans le bois. Les paramètres de production tels que le temps d'assemblage fermé¹, le temps de pressage et la pression d'assemblage sont aussi importants.

Il est nécessaire de respecter les caractéristiques des colles données par le fabricant afin d'éviter de nombreux désagréments lors de l'étape du collage. Les principaux points à surveiller sont cités ci-dessous [37].

- Le grammage (en g/m^2) est le paramètre réglant la quantité de la colle lors de son application. Un grammage trop élevé empêche un étalement homogène de la colle, créant ainsi un joint non conforme (joint épais), et inversement, un grammage trop faible étale de façon excessive la colle créant ainsi des joints maigres. La viscosité et la composition de la colle sont des paramètres intervenant dans la qualité du joint de colle.
- La température et le temps de polymérisation représentent la durée de vie de la colle, c'est-à-dire le temps de prise entre la colle et le bois. Plus la température ambiante est élevée, plus le temps de polymérisation est réduit (temps d'exécution du collage réduit).
- L'environnement du stockage de la colle agit sur le vieillissement de l'adhésif. L'humidité et la température accélèrent la détérioration des joints de colle et donc des produits.

Les colles appartiennent à l'une des trois catégories suivantes (EN 14080 [9]) :

- Adhésifs de nature phénolique et aminoplaste (par exemple MF, MUF, PRF, UF)
- Adhésifs polyuréthanes monocomposants durcissant à l'humidité (PUR)
- Adhésifs à base d'isocyanate et de polymère en émulsion (EPI)

Dans la première catégorie, on trouve les grandes familles de résines utilisées en construction bois

1. le temps s'écoule entre la mise en contact des constituants et le pressage

(Urée-Formol, Mélamine-Urée-Formol, Phénol-Formaldéhyde, Résorcinol-Formaldéhyde, Phénol-Résorcinol-Formaldéhyde et PRF-Tanin,...)

Les colles structurales les plus utilisées en construction bois sont :

– **Urée-Formol**

Les colles sont formées à base d'urée-formaldéhyde et sont très répandues dans l'industrie du bois. Ces adhésifs requièrent une basse température de polymérisation [38] et souvent peu chères et impliquent un usage limité quant aux domaines d'application du produit fini. En effet, celles-ci sont sensibles à l'humidité et sont recommandées pour un usage en intérieur sec [39].

– **Mélamine-Urée-Formol**

Les colles Mélamine-Urée-Formol sont semblables aux colles Urée-Formol. Cependant, le fait de remplacer un groupe Urée par un groupe Mélamine permet d'augmenter la résistance à l'humidité de l'adhésif du fait que ce groupe ne soit pas soluble dans l'eau [37, 39].

– **Phénol-Formaldéhyde**

Il existe deux principaux types de colles Phénol-Formaldéhydes (PF) : les colles "à chaud" et celles "à froid". Cependant, les adhésifs de type PF à froid ne sont pas recommandés car ils nécessitent un catalyseur à forte acidité pouvant dégrader la surface du bois encollé [40]. Les adhésifs PF à chaud (température de 110 à 140°C) produisent des joints comportant un bon vieillissement et résistant à l'humidité [41, 42].

– **Résorcinol-Formaldéhyde et Phénol-Résorcinol-Formaldéhyde**

Du fait de leur prix élevé, les résorcines sont de moins en moins utilisées à l'état brut, mais mélangées avec une colle de type Phénol-Formaldéhyde [38]. Ceci permet, pour un coût moindre, d'obtenir les mêmes résistances mécaniques avec une température de polymérisation plus basse que les PF (15 à 20°C). Sa longue durée d'utilisation, retardant la polymérisation de la colle, est un des points forts de cet adhésif pour une utilisation en climat tropical [43, 44]. L'adhésif du type RF et PRF est recommandé pour les feuillus par Labosky [45].

– **Système Honeymoon PRF-Tanin**

Le système Honeymoon PRF-tanin fut présenté par Pizzi et al.[46] avec le système m-aminophénol-tanin. La substitution d'une partie de la PRF traditionnelle, et surtout de la résorcine, par des tanins diminue considérablement le prix de la colle et améliore son bilan environnemental par ajout d'un composant naturel et non toxique. En plus, le système honeymoon a su conquérir

le marché des colles structurales en affichant un temps de polymérisation beaucoup plus court que les colles traditionnelles. Enfin, ce système de colle est adapté à l'usage structural comme en témoigne de nombreuses applications [47–49].

2.4.7 Paramètres importants de l'aboutage par entures multiples

- **Profil de l'enture multiple**

Le profil géométrique d'une enture multiple est défini par trois paramètres, à savoir la longueur l_j , le pas p et l'extrémité b_t (figure 2.16). Il existe plusieurs profils de joints. Le profil géométrique conditionne la surface de collage est obtenue en fonction de ces paramètres comme suit [34] :

$$S_{col} = \frac{1}{\sin(\alpha)} b_t \quad (2.5)$$

Une étude [50] a montré qu'une pente de $3,8^\circ$ a permis d'atteindre une moyenne de 82% de la résistance mécanique à la traction du bois massif, tandis qu'une pente de $9,6^\circ$ a permis d'atteindre seulement 54% de cette résistance. Une pente faible garantit donc une bonne résistance de l'aboutage. Mais, selon [28], une faible pente diminue aussi le pas, ce qui augmente le nombre des extrémités des entures conduisant ainsi à un mauvais collage. De plus, il est difficile d'usiner des entures minces [50].

La longueur de l'enture a une forte influence sur la résistance mécanique de l'aboutage [4, 51–55]. Les entures courtes donnent moins de pertes de bois. Cependant, pour un usage structural, les entures doivent être suffisamment longues, pour garantir une surface de collage suffisante. Par contre, les entures plus longues produisent des pertes de bois et requièrent plus de puissance pendant l'usinage. En général, les entures structurales sont plus longues que celles non-structurales. D'après la norme EN 14080 [9], le facteur de réduction $\nu = b_t/p$ doit être inférieur à 0,18. Divers auteurs [9, 52, 53] ont recommandé des longueurs d'usage pour les entures multiples (tableau 2.10). Nous pouvons noter que ces valeurs augmentent au fur et à mesure de la date des travaux.

Auteurs de référence	Longueur recommandée de l'enture (mm)
Sunley J.G. 1980	10 ÷ 15
Raknes 1982	22 ÷ 28
Norme EN 14080: 2012	15 ÷ 30

Tableau 2.10 – Valeurs de longueur d'enture recommandées par divers auteurs [9, 52, 53].

L'épaisseur de l'extrémité de l'enture affecterait la résistance mécanique du bois abouté. Une extrémité aussi faible que possible est recommandée par [26, 54]. Selon Strickler [56], cette valeur

ne doit pas dépasser 0,8 mm. Les résultats obtenus par Selbo [54] démontrent qu'une extrémité plus faible développe une meilleure résistance mécanique (figure 2.21). Par ailleurs, l'épaisseur de l'extrémité est limitée par les conditions de faisabilité en usinage. Avec une extrémité faible, le pas doit être suffisamment grand pour éviter la concentration des contraintes à l'extrémité des entures [26].

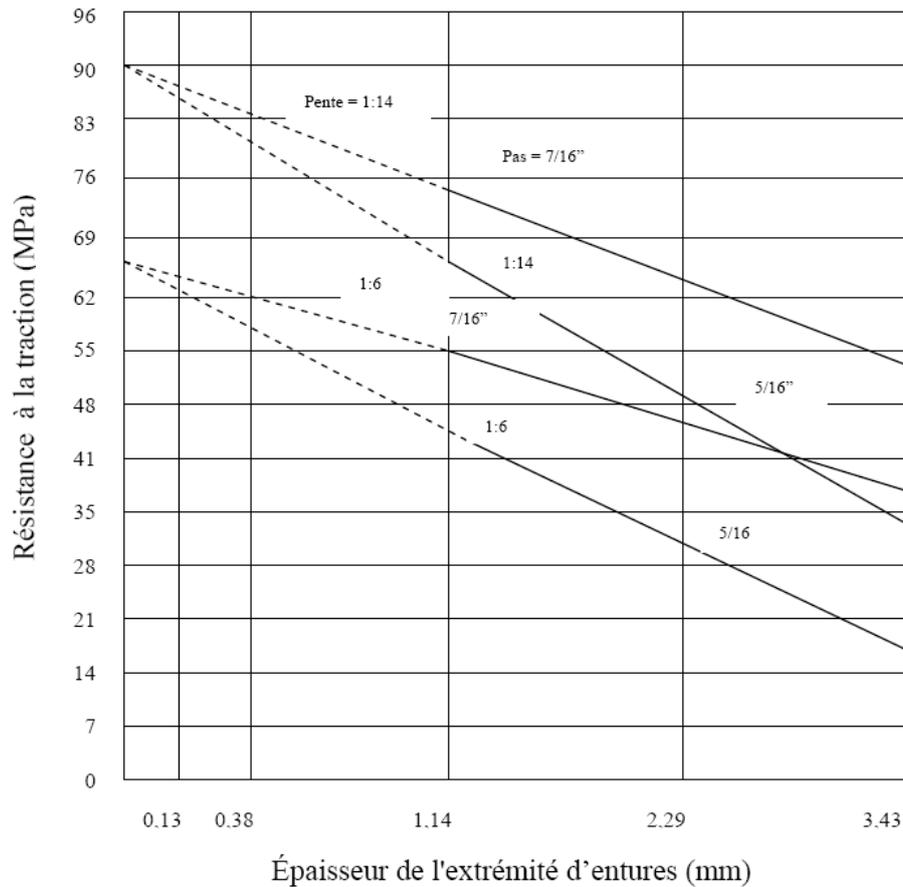


Figure 2.21 – Effet de l'épaisseur de l'extrémité de l'enture sur la résistance mécanique en traction longitudinale du bois abouté [54].

Longueur l_j (mm)	Pas p (mm)	Extrémité b_t (mm)	Facteur de réduction ν
15	3,8	0,42	0,11
20	5,0	0,5	0,10
20	6,2	1,0	0,16
30	6,2	0,6	0,10

Tableau 2.11 – Valeurs recommandées du profil de l'aboutage [9].

Les dimensions géométriques de l'enture recommandées par la norme EN 14080 [9] sont données

dans le tableau 2.11. La longueur de l'enture varie de 15 à 30 mm. Le pas varie de 3,8 à 6,2 mm et l'extrémité de l'enture varie de 0,42 à 1,0 mm.

- **Orientation de l'enture**

En aboutage, il existe deux types de joint : le joint vertical dont le profil est visible sur la face et le joint horizontal dont le profil est visible sur le chant (figure 2.22).

Dans le cas du joint horizontal en flexion, les entures extérieures supportent la majorité de la contrainte tandis que dans le joint vertical, la contrainte est répartie plus uniformément entre toutes les entures. Théoriquement, le joint vertical donne une meilleure résistance en comparaison avec le joint horizontal. Cela a été démontré dans les résultats expérimentaux de Jokerst [26]. Cependant, ces travaux n'indiquent pas le mode de chargement, à savoir sur chant ou à plat.

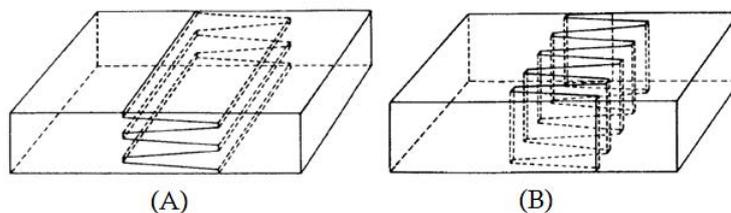


Figure 2.22 – Types de joint, A : joint horizontal ; B : joint vertical [26].

- **Type de configuration des joints**

Les configurations des entures multiples les plus utilisées pour l'assemblage du bois sont : joint sans épaulement, joint mâle-femelle et joint inversé (figure 2.23). En vue de la fabrication, il semble plus facile à usiner un joint sans épaulement qu'un joint mâle-femelle ou inversé. D'ailleurs, la présence des épaulements dans deux types de joint mâle-femelle et inversé représente un point fort de fragilité. La rupture apparaît plus facilement dans ces deux types. Selon [57], la surface de collage du joint sans épaulement est de 7% à 15% supérieure que celle du joint mâle-femelle ou inversé, respectivement. D'après Cecilia [57], le joint sans épaulement offre une meilleure résistance par rapport aux autres. Puis le joint mâle-femelle et en dernier le joint inversé. En résumé, un joint sans épaulement est recommandé en usage structural.

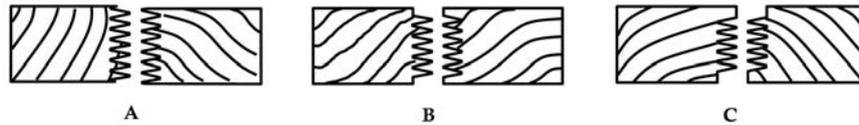


Figure 2.23 – Types de configuration des joints A : Sans épaulement, B : Mâle-femelle, C : Inversé [57].

- **Pression d'assemblage**

Ce paramètre de fabrication a été étudié dans plusieurs recherches [26, 57–59]. Mais, les résultats obtenus sont quelques fois contradictoires. Fisette et Rice [58] indiquent qu'une pression adéquate devrait être appliquée afin que les pièces aboutées soient bien agencées, et il ne faut pas que cette pression endommage l'extrémité des entures. Cette prescription est aussi affirmée dans les rapports de Jorkerst [26] et Cecilia [57]. Par contre, Ayarkwa [59] a constaté qu'il n'y a pas d'influence significative de la pression d'assemblage sur la résistance en flexion, ni sur la rigidité.

En effet, la pression d'assemblage dépendrait de la viscosité de l'adhésif appliqué, ainsi que des caractéristiques du bois (absorption, qualité de surface). En bref, ce paramètre de fabrication doit être optimisé pour chaque essence de bois et chaque type d'adhésif.

- **Paramètres d'usinage**

Les paramètres d'usinage tels que l'avance par dent, la vitesse de coupe et l'angle de coupe affectent effectivement la résistance du bois abouté [57, 60, 61]. L'avance par dent (mm) correspond à la quantité de bois enlevée par chaque dent lors d'une rotation complète de l'outil. Ce paramètre doit être parfaitement choisi afin de fournir une bonne finition sur la surface du bois.

La vitesse de coupe V_c (m/s) est la vitesse tangentielle de l'outil en rotation. La vitesse d'avance V_f (m/min) est la vitesse d'avance de l'outil mobile/pièce fixe ou de la pièce mobile/outil fixe. Ces deux vitesses influent sur la qualité de surface du bois usiné. Selon Reeb [62], la surface de collage devient rugueuse et plus irrégulière lors d'une utilisation prolongée des outils. Par conséquent, l'entretien des outils de coupe est important, afin de produire des surfaces de collage de bonne qualité.

Les résultats obtenus par Dagenais [61] sur l'érable à sucre ont montré que la vitesse de coupe de 45÷56 m/s, l'avance par dent de 0,6 à 0,7 mm donne une meilleure résistance de l'aboutage en traction (figure 2.24).

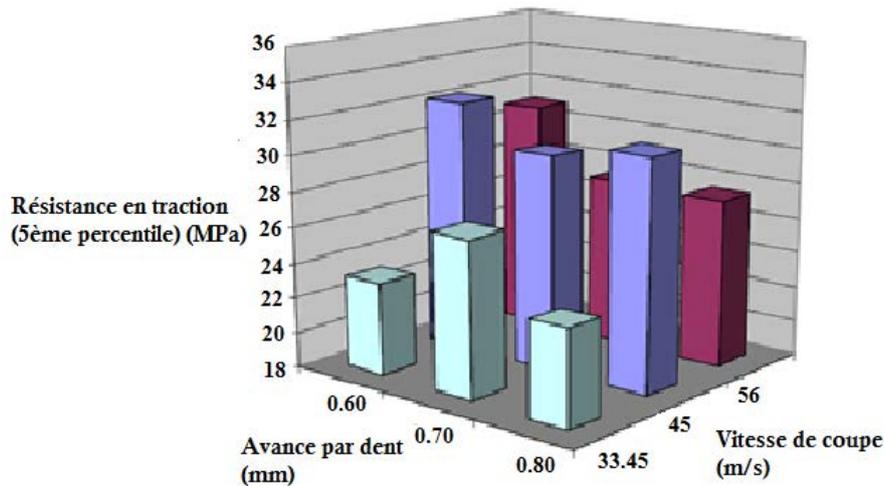


Figure 2.24 – Effet de l'avance par dent et de la vitesse de coupe sur la résistance des aboutages en traction de l'érable à sucre.

- **Qualité du matériau bois**

La masse volumique influence le temps d'assemblage fermé à cause de la porosité du bois [61], permettant de laisser pénétrer l'adhésif.

La teneur en humidité est un paramètre important qui affecte les propriétés du bois et l'activation de la colle [26]. Le bois utilisé pour l'aboutage doit être séché à une humidité convenable pour un collage. Par exemple, le produit doit posséder une humidité de 8 à 18 % au moment de l'usinage [35], afin de donner une surface correcte du bois. De plus, l'écart dans la teneur en humidité entre les extrémités de bois à abouter ne doit pas dépasser 5 % [35].

La température du bois influence la viscosité de la colle, cela affecte le temps de durcissement, ainsi que la pression d'assemblage. Une température doit être correcte lors de l'assemblage afin que la colle soit correctement activée. Selon la norme EN 385 [35], la température du bois au niveau de l'aboutage ne doit pas être inférieure à 15°C. A 20°C, les adhésifs à base phénolique, polyuréthane polymérisent pendant au moins 72 h après la fin de serrage et 24 h pour les adhésifs à base aminoplaste et polyuréthane [1].

Les noeuds forment des points de discontinuité dans le bois, cela détermine une rupture locale. La présence de noeuds pourrait être la cause de la rupture du bois abouté. Il faut éviter un noeud dans la zone des entures. Par conséquent, la distance minimale entre le noeud et la base des entures recommandée doit être supérieure à 3 fois le diamètre du noeud [9, 35, 53] (figure 2.25). De plus, les noeuds de diamètre supérieur à 6 mm sont déconseillés [35].

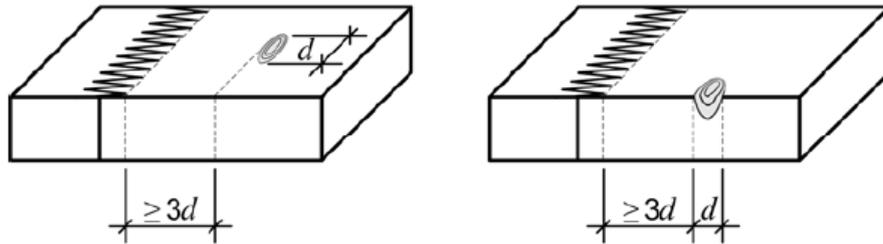


Figure 2.25 – Distance minimale d’un noeud par rapport à la base des entures multiples selon la norme EN 14080 [9].

2.5 Littérature scientifique

Les éléments structuraux en bois reconstitué par collage sont un domaine qui fait l’objet de nombreuses recherches aussi bien au niveau expérimental que numérique. Bien entendu, nous ne prétendons pas citer, dans ce chapitre, tous les travaux qui couvrent le sujet et nous nous limiterons volontairement à la documentation plus académique en ce qui concerne les éléments structuraux (poteaux et poutres) en bois feuillu reconstitué par collage.

Les travaux scientifique dans ce domaine sont répartis suivant trois grandes thématiques : l’étude et la caractérisation des poutres en bois reconstitué par collage avec ou sans renforcements, l’étude des aboutages par entures multiples et l’étude des aspects liés au collage et à la formation des joints de colle.

- **Caractérisation des poutres en bois reconstitué par collage**

La faisabilité et la performance mécanique d’éléments structuraux en hêtre reconstitué par collage ont été démontrées par plusieurs études depuis longtemps [63–66]. Plus récemment, Frese et al. [67] ont étudié de manière expérimentale le comportement de poutres en bois de hêtre lamellé-collé, en vue d’un classement mécanique. Aicher et al. [68, 69] ont étudié expérimentalement le comportement en cisaillement ainsi que les modes de rupture, notamment le délaminage de poutres en bois de hêtre lamellé-collé. Aussi, la faisabilité du bois lamellé-collé fabriqué à partir d’essences tropicales, de bois durs issus de la Guyane française a été expérimentée [3].

- **Etude des aboutages par entures multiples**

L’étude et l’analyse mécanique des aboutages par entures multiples ont également fait l’objet de plusieurs publications. Une campagne de tests expérimentaux réalisée par Colling [70] sur 227 lamelles aboutées a montré une rupture brutale des joints à entures multiples dans 220 éprou-

vettes. Ceci confirme bien que la performance mécanique des aboutages est essentielle et joue un rôle crucial dans la résistance globale des poutres.

L'influence de plusieurs paramètres, notamment la géométrie de l'entures multiples, sur la résistance mécanique des aboutages a été étudiée par plusieurs auteurs [4, 26, 50–54, 56, 57]. Les résultats de toutes ces études s'accordent à dire que parmi les paramètres inhérents au collage, la fiabilité des aboutages est une fonction de la géométrie de l'enture multiple. Outre, les paramètres de fabrication, notamment la pression d'assemblage, [26, 57–59], les paramètres d'usinage [57, 60, 61] et les propriétés du bois [26, 53, 61] ont aussi une influence sur la résistance mécanique des aboutages.

Par ailleurs, des modèles de simulation numérique, par éléments finis, du comportement des aboutages à entures multiples ont été présentés par plusieurs auteurs [4, 33, 71–76]. La mécanique linéaire de la rupture est généralement utilisée pour prédire la rupture progressive des joints de colle dans les aboutages.

- **Etude du collage et des joints de colle**

Cette thématique aborde les aspects liés à l'adhésion bois/colle. Plusieurs études montrent que la performance des joints de colle réalisés par plusieurs essences de bois, notamment les aboutages, dépend de plusieurs paramètres inhérents tels que l'épaisseur du joint de colle, le temps d'assemblage fermé, la pression d'assemblage, l'essence de bois, l'état de surface, les paramètres d'usinage, épaisseur des lamelles [3]. Schmidt et al. [77] ont étudié l'effet des caractéristiques du hêtre sur la polymérisation du joint de colle. Plusieurs autres auteurs ont analysé l'effet de la pénétration de l'adhésif dans les vides cellulaires (vaisseaux, rayon, trachéides) sur la formation et la résistance du joint de colle [78–82]. Collett [83] et Wake [84] ont étudié l'effet de la composition chimique de l'adhésif et le mouillage du bois sur la formation du joint de colle et sa résistance.

2.6 Conclusion

Au travers l'état de l'art présenté, nous avons montré l'importance de la ressource forestière dans la balance commerciale de la France. En effet, la filière bois affiche un déficit d'environ 6,3 milliards d'euros, soit le deuxième déficit commercial de la France après celui de l'énergie. Par ailleurs, l'augmentation en besoin de produits répondant aux normes européennes (marquage CE), pour un usage structural, a été satisfait par l'importation depuis l'Allemagne, l'Autriche et les pays scandinaves. En ce qui concerne le bois reconstitué par collage, environ 80% des produits

sont importés principalement d'Allemagne et d'Autriche. Il est donc impératif d'encourager les investissements dans les scieries françaises afin de les moderniser, de les rendre compétitives et de les adapter au marché d'aujourd'hui, en termes de sciages, séchage, rabotage et bois reconstitués et contribuer ainsi au redressement du déficit. Dans ce contexte, les essences feuillues locales (françaises), notamment le hêtre, ont un grand potentiel de valorisation tant au niveau de la ressource disponible que de leurs performances mécaniques. L'utilisation des feuillus, notamment le hêtre, pour la fabrication des produits reconstitués constitue donc un axe de développement majeur et répond à un besoin industriel bien identifié mais le savoir-faire pour les fabriquer et les employer avec succès en usage structural n'est pas encore complètement maîtrisé. De plus, les normes européennes, actuelles, sont très restrictives en ce qui concerne les feuillus, notamment le hêtre.

Aussi, la revue de l'état de l'art montre que les normes européennes, en ce qui concerne le bois reconstitué par collage (BMR, BLC), sont rédigées spécialement pour les bois résineux et très peu d'informations sont disponibles pour les feuillus, notamment d'un point de vue mécanique. C'est pourquoi il est nécessaire de mener une étude de caractérisation expérimentale de poutres en bois reconstitué, en particulier en BMR, fabriquées à partir d'une essence feuillue locale : le hêtre. L'objectif principal de cette étude de caractérisation sera de déterminer la correspondance entre les performances mécaniques des poutres BMR et des lamelles constitutives.

Par conséquent, l'étude de poutres en BMR fabriquées à partir du hêtre est un sujet qui peut intéresser beaucoup de partenaires dans le domaine de la construction bois. Dans ce cadre, nous développerons et nous validerons dans les chapitres suivants une méthodologie expérimentale et numérique pour l'analyse du comportement mécanique des poutres en BMR en vue d'évaluer leur potentiel en termes de résistance mécanique.

CHAPITRE 3

CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des tests de caractérisation de poutres en bois de hêtre reconstitué par collage, avec et sans aboutages. Nous allons nous intéresser au module d'élasticité des poutres ainsi qu'au module de rupture en flexion. Les tests mécaniques sur les poutres multi-couches ont été effectués en flexion 4 points conformément à la norme EN 408 [5].

Afin de respecter les exigences des normes européennes, en ce qui concerne la caractérisation des éléments structuraux en bois reconstitué par collage (Bois Lamellé-collé (BLC), Bois Massif Reconstitué (BMR),...etc.), plusieurs étapes de vérification et de validation sont nécessaires :

- Caractérisation des lamelles constitutives, pour obtenir la classe de résistance des planches de hêtre utilisé ;
- Validation des exigences en terme de résistance mécanique de la colle utilisée (tests sur les joints de colle) ;
- Validation des assemblages par entures multiples (tests sur les aboutages) ;
- Enfin, tests de caractérisation mécanique des poutres multicouches avec et sans aboutages.

L'objectif de ce chapitre, est de présenter les différentes étapes de vérification et de validation décrites ci-dessus.

3.2 Choix des matériaux et composants

Le choix de l'essence du bois était simple. En effet, l'objectif principal de cette étude était de vérifier le potentiel de résistance mécanique de poutres reconstituées par collage et réalisées avec une essence de bois locale (française) feuillue, en usage structural, soit le hêtre.

Deux colles sont acceptées par les normes européennes pour la fabrication des bois reconstitués par collage, en usage structural. Ces colles sont : la Mélamine-Urée-Formaldéhyde (MUF) et la Phénol-Résorcinol-Formaldéhyde (PRF). Afin de respecter les normes européennes, nous avons choisi de travailler principalement avec la colle MUF. Comme deuxième colle, nous avons opté pour une colle environnementale, développée au sein du laboratoire : une PRF à base de tanin, de type Honeymoon [85, 86]. Elle n'est pas actuellement recommandée par les normes européennes, mais elle présente des avantages d'un point de vue environnemental.

Pour le choix des paramètres de collage, nous avons adopté les préconisations des fabricants ou du laboratoire, sans oublier les résultats de la littérature, notamment en ce qui concerne le grammage (tableau 3.1 [49]), le temps d'assemblage fermé, la pression de serrage et le temps de serrage.

Système Honeymoon PRF-Tanin				
Composition A avec 1050 cP de viscosité				
PRF	Tannin	Durcisseur	H ₂ O	Ethanol
70	30	40	50	6
Composition B avec 1100 cP de viscosité				
Tannin	H ₂ O	Soude		
50	70	25		

Mélamine Urée Formaldéhyde (MUF)	
Résine PREFERE 4535	Durcisseur PREFERE 5035
100	15

Tableau 3.1 – Composition des colles MUF [87] et PRF à base de tanin [49], (unité : gramme).

3.3 Fabrication en laboratoire des poutres en bois reconstitué par collage

Dans cette étude, deux lots de hêtre, correspondant à deux approvisionnements différents, ont servi pour la fabrication des éprouvettes et des produits en BMR. Les deux lots sont donc caractérisés et classés mécaniquement.

Par ailleurs, les lots de hêtre ont été utilisés comme suit :

- Le lot 1 a servi pour la fabrication des lamelles massives, des poutres DUO et TRIO sans aboutages ;
- Le lot 2 a servi pour la fabrication des lamelles massives, des lamelles aboutées, des poutres DUO et TRIO avec aboutages.

3.3.1 Préparation des lamelles individuelles

Avant toute transformation, les plots de hêtre (figure 3.1 (a)) ont été préalablement séchés et conditionnés en climat ambiant (20°C et 65% d'humidité relative), à l'ENSTIB, pour les stabiliser.



Figure 3.1 – Plots et avivés de hêtre

Avant de les transformer, une vérification du taux d'humidité a été réalisée conformément à la norme NF B51-004 [88]. Ensuite, les pièces ont été dégauchies, rabotées puis débitées afin de réaliser les échantillons destinés aux tests de flexion sur lamelles individuelles mais aussi ceux destinés pour la fabrication des bois aboutés (figure 3.1 (b)).

3.3.2 Réalisation des aboutages (entures multiples)

A partir des lamelles préparées précédemment, des entures multiples ont été profilées conformément aux recommandations de la norme EN 14080 [9] (figure 3.2(a)), en ce qui concerne la géométrie (figure 3.2(b)). Selon le sens d'introduction de la lamelle dans la machine, les entures peuvent être usinées suivant l'épaisseur (aboutage visible sur le chant, figure 3.2(c)) ou suivant la largeur (aboutage visible sur la face, figure 3.2 (d)).

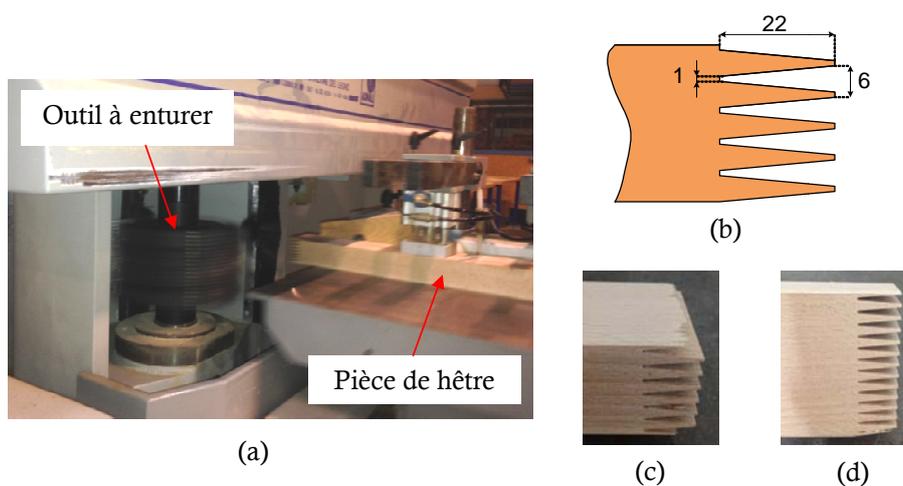


Figure 3.2 – (a) : Machine pour l'aboutage (b) Géométrie (unité en *mm*), (c) aboutage visible sur le chant, (d) aboutage visible sur la face.

Chapitre 3. Caractérisation expérimentale

La colle est appliquée manuellement, à l'aide d'une brosse, sur les deux surfaces des entures à coller. Nous rappelons que les opérations d'assemblages des aboutages ont été effectuées selon les recommandations de la norme NF-EN 385 [35] au plus tard 24 h, après l'usinage des planches, afin d'obtenir une meilleure qualité du collage [89].

La valeur de la pression de serrage de 100 bar (10 MPa) a été adoptée sur la base de tests préliminaires avec plusieurs pressions de serrage (figure 3.3). Cette valeur de 10 MPa est en cohérence avec les préconisations des fabricants (figure 3.4) et la littérature en ce qui concerne les bois feuillus [89].

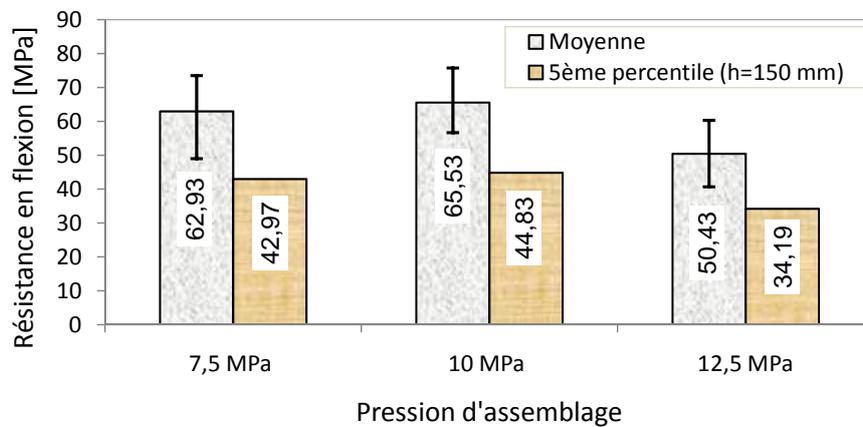


Figure 3.3 – Résistance en flexion des aboutages en fonction de la pression de serrage.

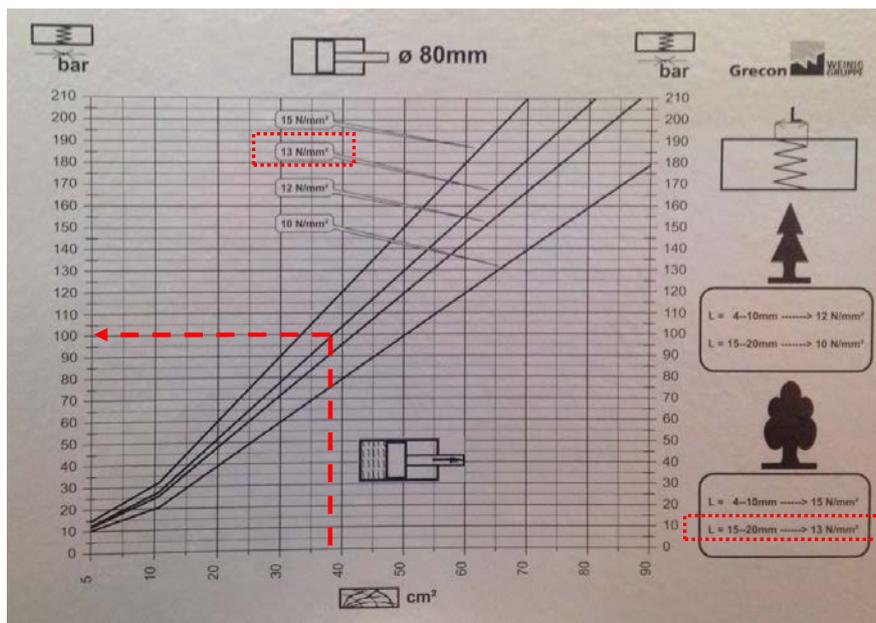


Figure 3.4 – Valeurs préconisées par le fabricant Weinig.

En effet, la pression de serrage à appliquer est fonction de la longueur de l'enture, de la section des planches à abouter et de l'essence du bois utilisée. Le temps d'assemblage fermé est de 15 minutes [87]. Quant au temps de pressage, il était de 2 s [35] (figure 3.5).

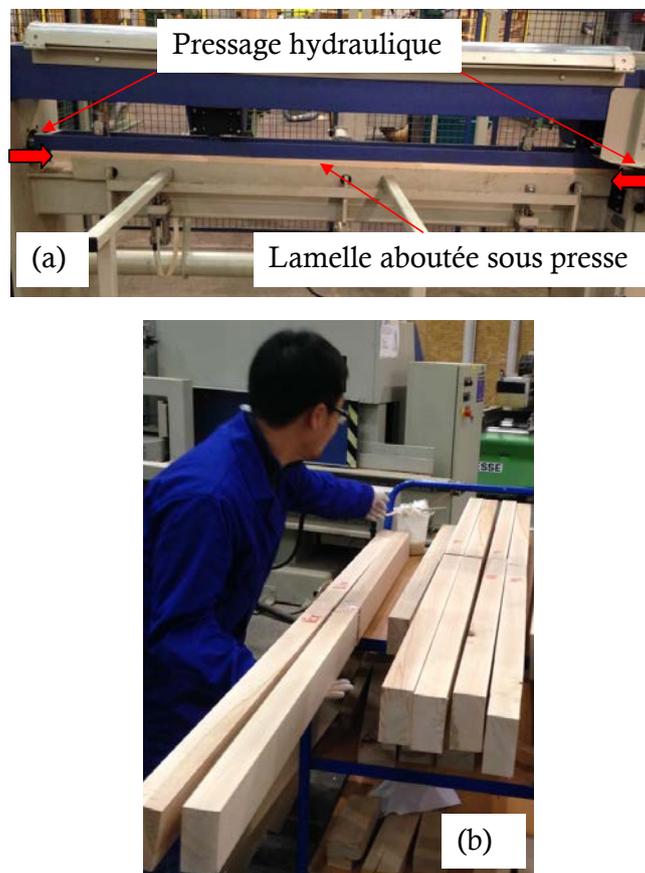


Figure 3.5 – (a) Pressage de l'aboutage, (b) lamelles aboutées après pressage.

Une fois les aboutages réalisés, les éprouvettes sont rabotées à la section désirée ($42 \times 80 \text{ mm}^2$) pour éliminer les bavures de colle, et laissées dans un climat ambiant de 20°C et 65% d'humidité relative avant d'être soumises aux tests de flexion.

3.3.3 Encollage des lamelles

Avant l'encollage des lamelles, celles-ci ont été rabotées pour obtenir une épaisseur uniforme. En s'appuyant sur les résultats présentés dans [89], nous avons choisi d'encoller les lamelles sur les deux faces afin d'augmenter la qualité et la résistance du collage. Notons que dans le milieu industriel, l'étape d'encollage se fait sur une seule face. Ensuite, les lamelles ont été empilées les unes sur les autres tout en veillant à ce que les aboutages soient placés à mi-portée des lamelles les plus tendues (en flexion) pour être dans le cas le plus défavorable, puis mises sous

une pression comprise entre 0.8 et 1.2 MPa [87], pendant 24 h. Une fois le pressage terminé, les éléments sont conditionnés avant la finition afin de permettre à la colle une polymérisation totale.

3.3.4 Finition des poutres multicouches

Une fois la période de conditionnement terminée, les poutres sont rabotées sur leurs quatre faces afin d'obtenir la section désirée, sans défauts géométriques mais aussi afin d'éliminer toutes les bavures de colle restantes.



Figure 3.6 – Poutres multicouches fabriquées, (a) DUO, (b) TRIO.

3.4 Tests de résistance mécanique

Dans cette section, nous présentons les résultats des tests de caractérisation mécanique. Avant de caractériser les poutres reconstituées par collage, nous présentons d'abord les tests effectués au préalable pour classer mécaniquement le hêtre utilisé dans cette étude. Puis, nous présentons les tests de vérification de la résistance de la colle ainsi que des assemblages aboutés par entures multiples. Enfin, nous présentons les différents tests mécaniques pour évaluer la résistance des poutres multi-couches avec et sans aboutages.

3.4.1 Caractérisation des lamelles individuelles

3.4.1.1 Test de flexion 4 points

Des tests de flexion 4 points (figure 3.7) ont été menés sur les lamelles individuelles, selon les recommandations et les exigences de la norme EN 408 [5]. On s'intéresse au module d'élasticité longitudinal des lamelles ainsi qu'au module de rupture (résistance en flexion).

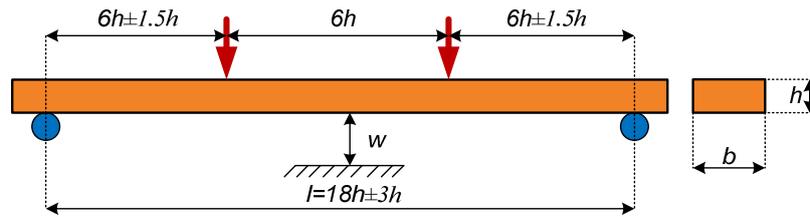


Figure 3.7 – Dispositif du test de flexion 4 points selon la norme EN 408 [5]

Le module d'élasticité longitudinal et la résistance en flexion sont obtenus à l'aide de l'équation (3.1) et de l'équation (3.2), respectivement [5].

$$E_{m,global} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (3.1)$$

$$f_m = \frac{3F_{max}a}{bh^2} \quad (3.2)$$

Où :

- $(F_2 - F_1)$ est un accroissement de force en N sur la ligne de régression avec un coefficient de corrélation de 0.99 ou mieux (voir figure 3.8).
- $(w_2 - w_1)$ est l'accroissement de flèche correspondant à $(F_2 - F_1)$, en mm .
- G est le module de cisaillement. S'il n'est pas connu, G peut être pris égal à l'infini.
- F_{max} est la force maximale appliquée
- a est la distance, en millimètres, entre un point de chargement et l'appui le plus proche dans un essai de flexion.
- b, h sont la largeur et la hauteur de la section transversale, respectivement.

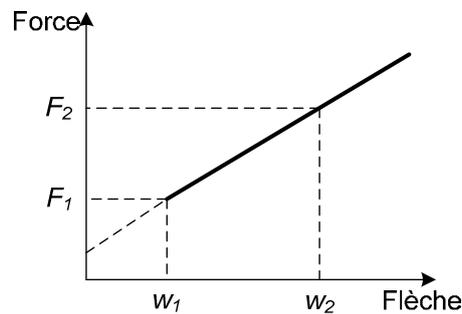


Figure 3.8 – Courbe force-flèche dans la plage des déplacements élastiques.

Rappelons que pour des poutres de hauteur h inférieure à 150 mm, la norme EN 384 [90] préconise de ramener la résistance mécanique à une hauteur de référence de 150 mm en utilisant

un coefficient de correction k_{ref} , pour palier au problème de l'effet d'échelle.

$$k_{ref} = \left(\frac{150}{h}\right)^{0.2} \quad (3.3)$$

Le module d'élasticité local est donné par l'équation (3.4) selon la norme EN 384 [90] :

$$E_{m,local} = (E_{m,global} * 1.3) - 2690 \quad (3.4)$$

La figure 3.9 montre le dispositif de l'essai de flexion des lames massives selon la norme EN 408 [5].

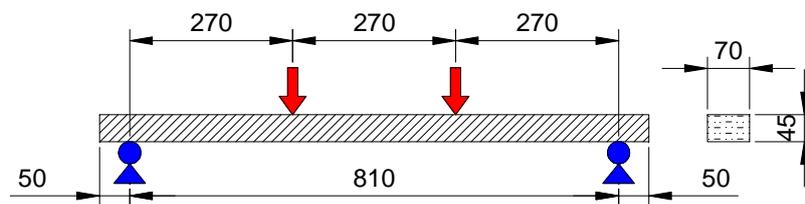


Figure 3.9 – lame massive en flexion 4 point selon la norme EN 408 [5].

La figure 3.10 illustre les courbes expérimentales force-flèche des lames massives en flexion 4 points. On observe un comportement linéaire élastique jusqu'à environ 10 mm de flèche suivi d'un comportement non-linéaire (plastique). La rupture est brutale et survient principalement par rupture des fibres en traction.

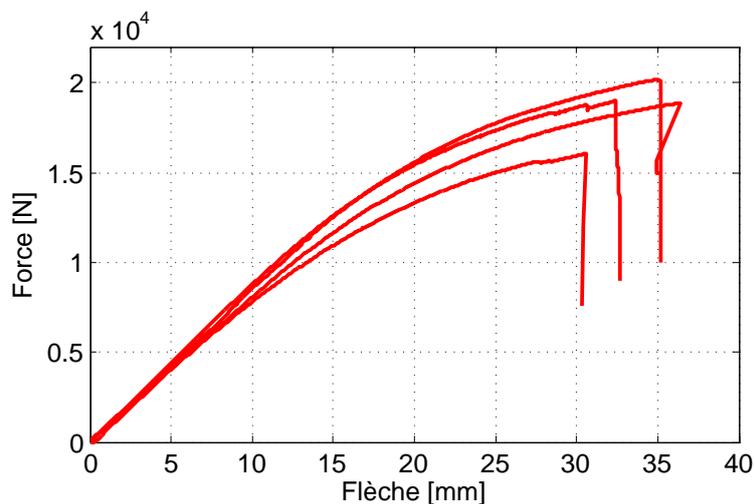


Figure 3.10 – Courbes expérimentales force-flèche des lamelles massives en flexion 4 points.

Les valeurs de résistance caractéristiques sont résumées dans le tableau 3.2.

	f_m (MPa)	$f_{m,k}$ ($h=150$ mm) (MPa)	$E_{m, global}$ (MPa)	$E_{m, local}$ (MPa)
Moyenne	108,24		14788	16534
Ecart-type	10,11		844	
CV	9%		6%	
minimum	91,83		13920	
maximum	117,65		15767	
5% (EN 14358)	90,56	71,18	---	

Tableau 3.2 – Valeurs de résistance caractéristiques des lamelles massives.

Compte tenu de la valeur de résistance caractéristique ($f_{m,k}$) des lames massives (tableau 3.3), le bois de hêtre, en ce qui concerne le lot 2, utilisé dans cette étude, peut être classé en classe **D70**, la plus élevée proposée par la norme EN 338 [6].

3.4.1.2 Détermination de la classe de résistance des lamelles

Pour attribuer une classe de résistance à une essence de bois donnée, il existe principalement trois méthodes :

- Classement visuel NF B52-001-2 [91] : ce classement est basé sur le triage du bois et sur des critères d'observation visuelle (présence de noeuds, fente...etc.) ;
- Classement selon la norme EN 338 [6] : cette classification fait intervenir la densité du bois ainsi que les résistances caractéristiques au 5ème percentile, calculées par des formules empiriques en fonction du module de rupture en flexion. Toute essence est donc susceptible d'être classée à partir du moment où les essais de caractérisation ont été faits suivant les normes d'essai associées (EN 408 [5])
- Classement mécanique selon la norme EN 408 [5] : dans ce type de classement, toutes les résistances caractéristiques sont déterminées sur la base de tests mécaniques (destructifs).

- **Classement selon l'EN 338**

Il est possible, selon la norme EN 338 [6], d'obtenir la classe de résistance du bois en calculant les valeurs de résistance caractéristique en fonction de la densité du bois ($\rho_k=591$ kg/m³) et de la résistance caractéristique en flexion ($f_{m,k} = 71,18$ MPa), déterminée par tests, comme suit :

- Résistance à la traction axiale : $f_{t,0,k} = 0,6f_{m,k}$
- Résistance à la compression axiale : $f_{c,0,k} = 5(f_{m,k})^{0,45}$
- Résistance à la traction transversale : $f_{t,90,k}=0,6$ pour les feuillus

- Résistance à la compression transversale : $f_{c,90,k} = 0,015\rho_k$ pour les feuillus.
- Résistance au cisaillement : $f_{v,k}=5$ MPa pour les feuillus en classe **D70**
- Module d'élasticité longitudinal : $E_{0,05} = 0,84(E_{0,mean})$
- Module d'élasticité transversal moyen : $E_{90,mean} = E_{0,mean}/15$
- Module de cisaillement moyen : $G_{mean} = E_{0,mean}/16$

Les valeurs calculées à l'aide des formules précédentes en ce qui concerne les lames massives individuelles, sont résumées dans le tableau 3.3.

Résistances caractéristiques (au 5 ^{ème} percentile) (MPa)				
$f_{t,0,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{v,k}$
42,71	34,08	0,6	8,87	5,0
Modules d'élasticité (MPa)				
$E_{0,05}$	$E_{90,moyen}$	G_{moyen}		
12422	986	924		

Tableau 3.3 – Valeurs de résistance caractéristiques calculées selon l'EN 338 [6].

- **Classement mécanique**

Pour obtenir les résistances caractéristiques du hêtre, des tests mécaniques complémentaires ont été réalisés en compression (axiale et transversale) et en traction (axiale et transversale) selon les configurations géométriques recommandées par la norme EN 408 [5] (figure 3.11). En effet, la détermination des caractéristiques de résistance par tests destructifs permettra, d'une part, de vérifier les valeurs calculées précédemment à l'aide des formules empiriques selon la norme EN 338 [6] et d'autre part, d'alimenter les modèles numériques utilisés dans le chapitre 4, en ce qui concerne le bois de hêtre.

Les résultats des tests sont résumés dans le tableau 3.4. En raisonnant sur les valeurs caractéristiques (au 5^{ème} percentile), on remarque que les résistances en traction et compression axiales, mais aussi en traction transversale sont nettement supérieures à celles calculées par la norme EN 338 [6]. Tandis que la résistance en compression transversale est inférieure à celle calculée par la norme EN 338 [6]. Ceci est en cohérence avec les constatations reportées dans [34].

Par ailleurs, à titre indicatif, nous comparons dans le tableau 3.5 les caractéristiques de résistance et de rigidité des deux lots de hêtre.

Valeurs caractéristiques	COMPRESSION TRANSVERSALE		TRACTION TRANSVERSALE	
	$f_{c,90}$ (MPa)	$E_{c,90}$ (MPa)	$f_{t,90}$ (MPa)	$E_{t,90}$ (MPa)
Moyenne	7,11	435	2.99	105
Ecart-type	0,26	29	0.41	14
CV	4%	7%	14%	13%
minimum	6,54	400	2.47	83
maximum	7,27	478	3.66	121
(5ème percentile)	6,33	---	2.17	---
Valeurs caractéristiques	COMPRESSION AXIALE		TRACTION AXIALE	
	$f_{c,0}$ (MPa)	$E_{c,0}$ (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)	$E_{t,0}$ (MPa)
Moyenne	51,25	7180	174,46	5501
Ecart-type	5,74	581	14,11	522
CV	11%	8%	8%	9%
minimum	44,79	6559	188,01	6112
maximum	62,08	8172	150,86	4986
(5ème percentile)	45,57	---	153,84	---

Tableau 3.4 – Valeurs caractéristiques du hêtre déterminées par tests.

	Résistance caractéristique $f_{m,k}$ (h=150 mm) (MPa)	Module d'élasticité $E_{m,global}$ (MPa)
Lot 1	63,65	11147
Lot 2	71,18	14788

Tableau 3.5 – Comparaison des caractéristiques de résistance et de rigidité des deux lots de hêtre.

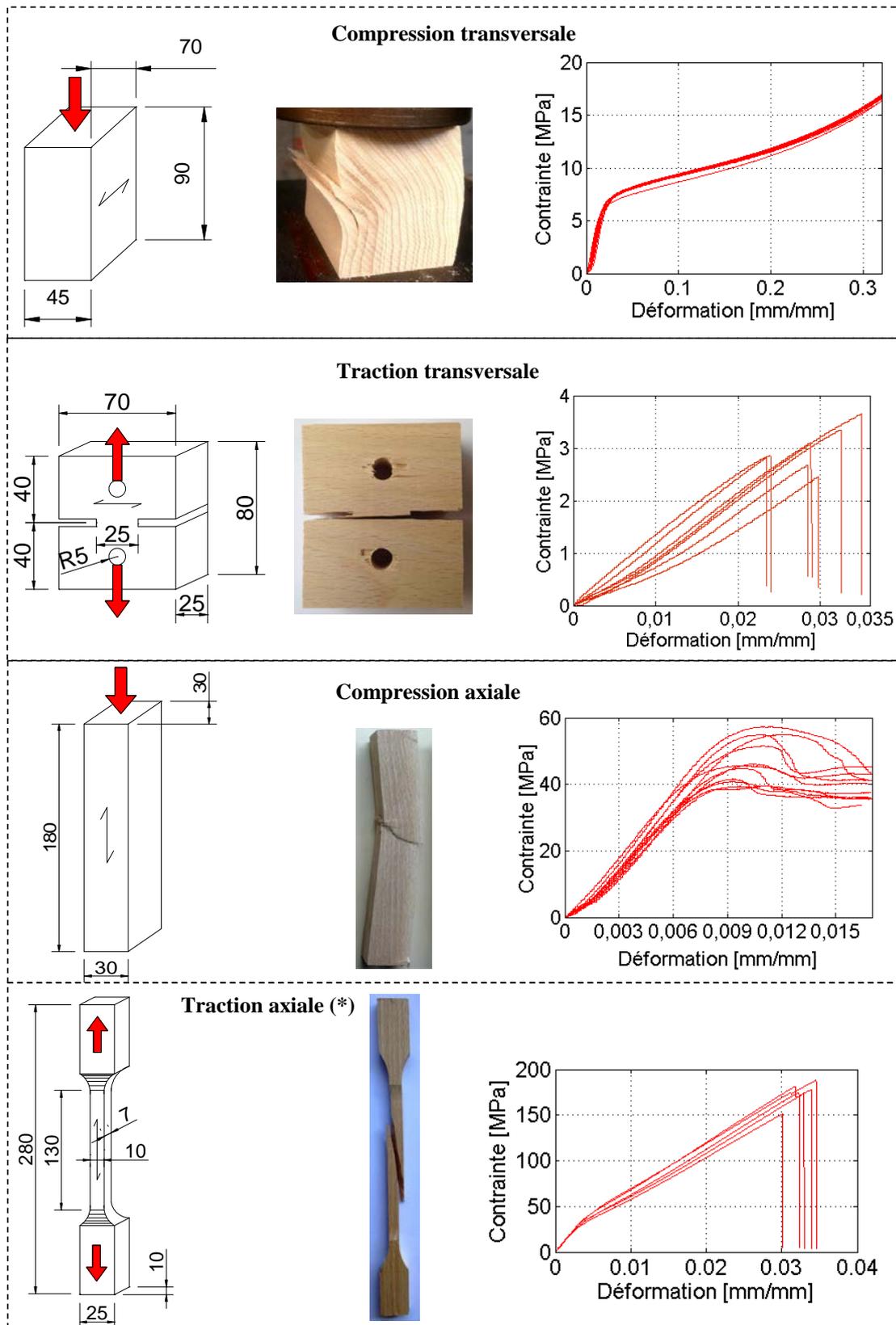


Figure 3.11 – Tests complémentaires de caractérisation du hêtre selon l'EN 408 [5]; (*) : Le test de traction axiale est basé sur le test de Kufner [92, 93].

3.4.2 Caractérisation de la colle

Dans cette partie, les colles utilisées, MUF et PRF à base de tanin (Honeymoon), ont été caractérisées en traction et en cisaillement selon les normes EN 302-3 [8] et EN 302-1 [7], respectivement. On s'intéresse aux résistances en traction, σ_n^0 , et en cisaillement, σ_s^0 pour vérifier la performance de la colle vis-à-vis des exigences réglementaires. Afin d'alimenter les modèles numériques utilisés en chapitre 4 pour la simulation du comportement des joints de colle, nous nous intéressons également aux paramètres suivants :

- Valeurs des raideurs en traction, K_n , et en cisaillement, K_s ;
- Valeurs des énergies de rupture en traction, G_n , et en cisaillement, G_s .

3.4.2.1 Test de traction

Des éprouvettes ont été préparées selon le schéma de la figure 3.12 et testées en traction jusqu'à rupture.

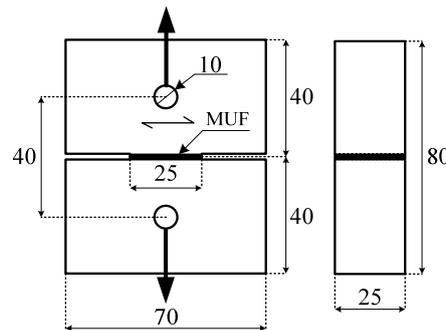


Figure 3.12 – Schématisation de l'essai de traction du joint de colle.

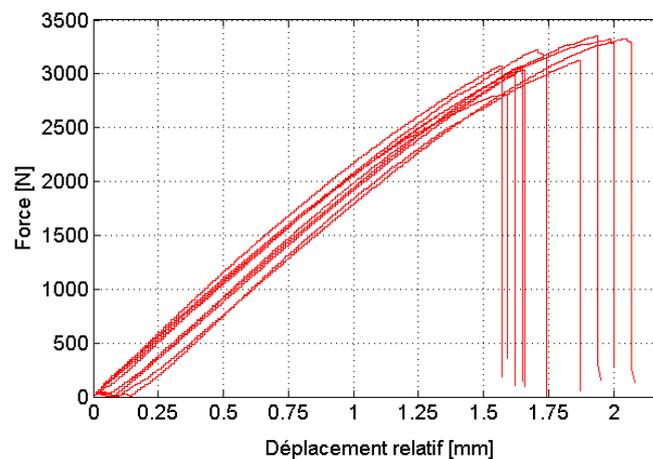


Figure 3.13 – Courbes expérimentales force-déplacement de la colle MUF en traction.

La figure 3.13 montre les courbes expérimentales force-déplacements obtenues en ce qui concerne la colle MUF. On remarque que le comportement de la colle en traction est principalement linéaire élastique suivi d'une rupture brutale.

Les valeurs caractéristiques de la colle MUF sont résumées dans le tableau 3.6.

	K_n (N/mm ³)	σ_n^0 (N/mm ²)	G_n (N/mm)
Moyenne	3,47	5,02	4,81
Ecart-type	0,15	0,28	0,86
CV	4%	6%	18%
Minimum	3,30	4,49	3,98
Maximum	3,69	5,36	6,20

Tableau 3.6 – Valeurs caractéristiques du joint de colle MUF en traction.

3.4.2.2 Test de cisaillement

Le test de cisaillement est mené suivant le dispositif décrit en figure 3.14.

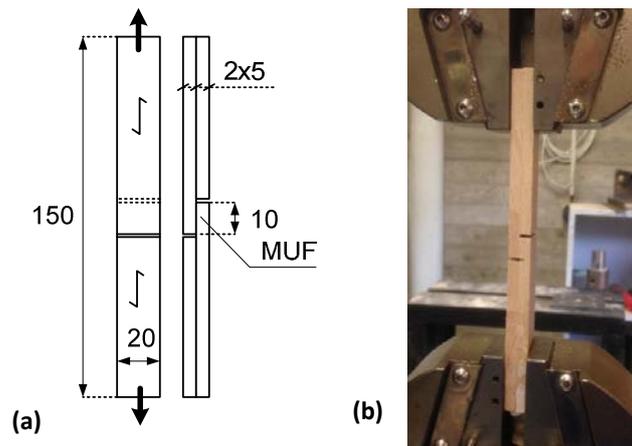


Figure 3.14 – Test de cisaillement : (a) Géométrie des éprouvettes [7], (b) Dispositif de l'essai.

La figure 3.15 présente les courbes expérimentales force/glissement de la colle MUF. On observe un comportement élastique, suivi d'un comportement élasto-plastique avant une rupture brutale.

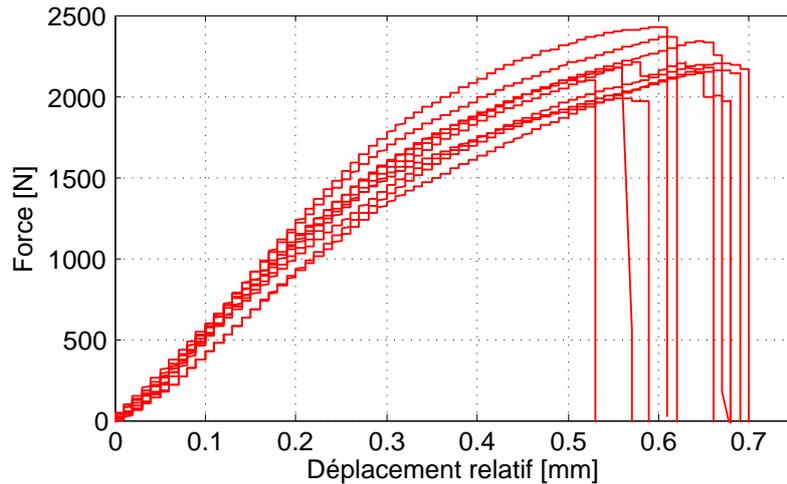


Figure 3.15 – Courbes expérimentales force/déplacement de la colle MUF en cisaillement.

Les résultats des tests sont résumés dans le tableau 3.7 et le tableau 3.8. Les valeurs de résistance moyennes de la colle MUF (11,89 MPa) et de la colle PRF-Tanin (10,79 MPa) en cisaillement satisfont aux exigences (10 MPa) de la norme EN 302-1 [7] dans la perspective d'un usage structural.

	K_s (N/mm ³)	σ_s^0 (N/mm ²)	G_s (N/mm)
Moyenne	28,19	11,89	4,87
Ecart-type	3,47	0,68	1,02
CV	12%	6%	21%
Minimum	21,84	10,82	2,55
Maximum	35,16	12,86	6,20

Tableau 3.7 – Valeurs caractéristiques du joint de colle MUF en cisaillement.

	K_s (N/mm ³)	σ_s^0 (N/mm ²)	G_s (N/mm)
Moyenne	20,67	10,79	5,53
Ecart-type	2,50	1,84	1,92
CV	12%	17%	35%
Minimum	16,22	8,76	3,03
Maximum	25,01	14,17	8,43

Tableau 3.8 – Valeurs caractéristiques du joint de colle Honeymoon PRF-tanin en cisaillement.

3.4.3 Caractérisation des aboutages

Les lamelles aboutées, à mi-portée, ont été testées en flexion 4 points selon la norme EN 408 [5]. Plusieurs configurations (figure 3.16) d'aboutage (horizontal et vertical) ont été testées en

flexion 4 points sur chant et à plat (figure 3.17). On s'intéresse au module d'élasticité global et au module de rupture (résistance en flexion).

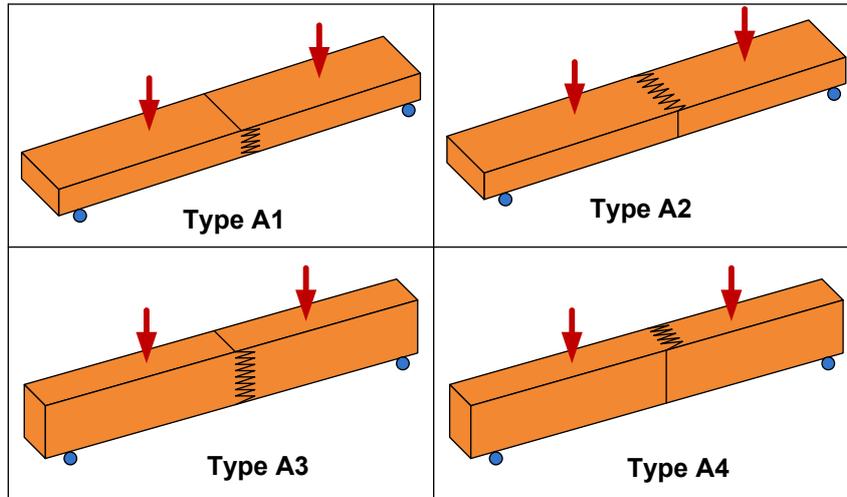


Figure 3.16 – Différentes configurations des lamelles aboutées.

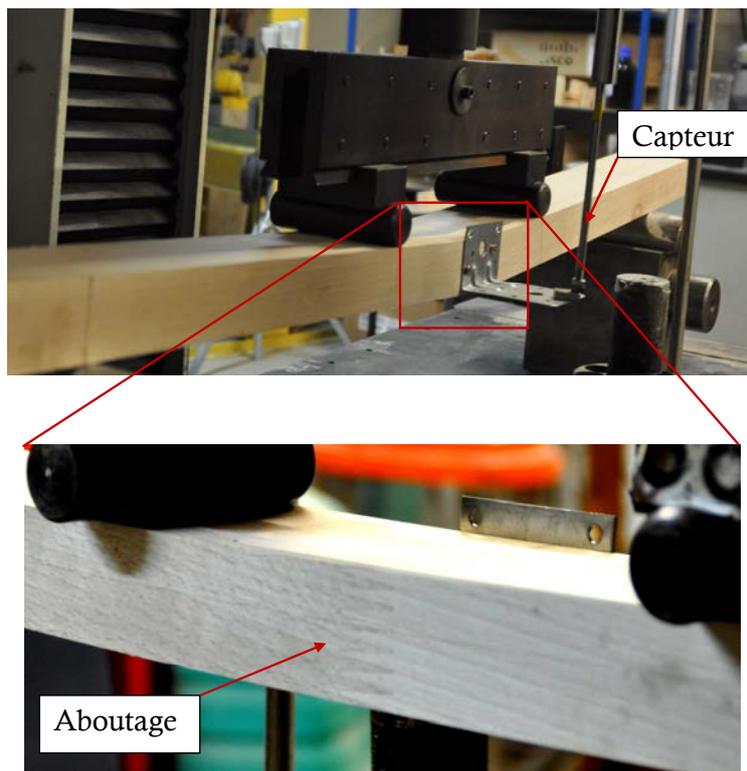


Figure 3.17 – Dispositif de l'essai de flexion des lamelles aboutées.

La figure 3.18 montre les différentes configurations des lamelles aboutées testées en flexion 4 points selon la norme EN 408 [5].

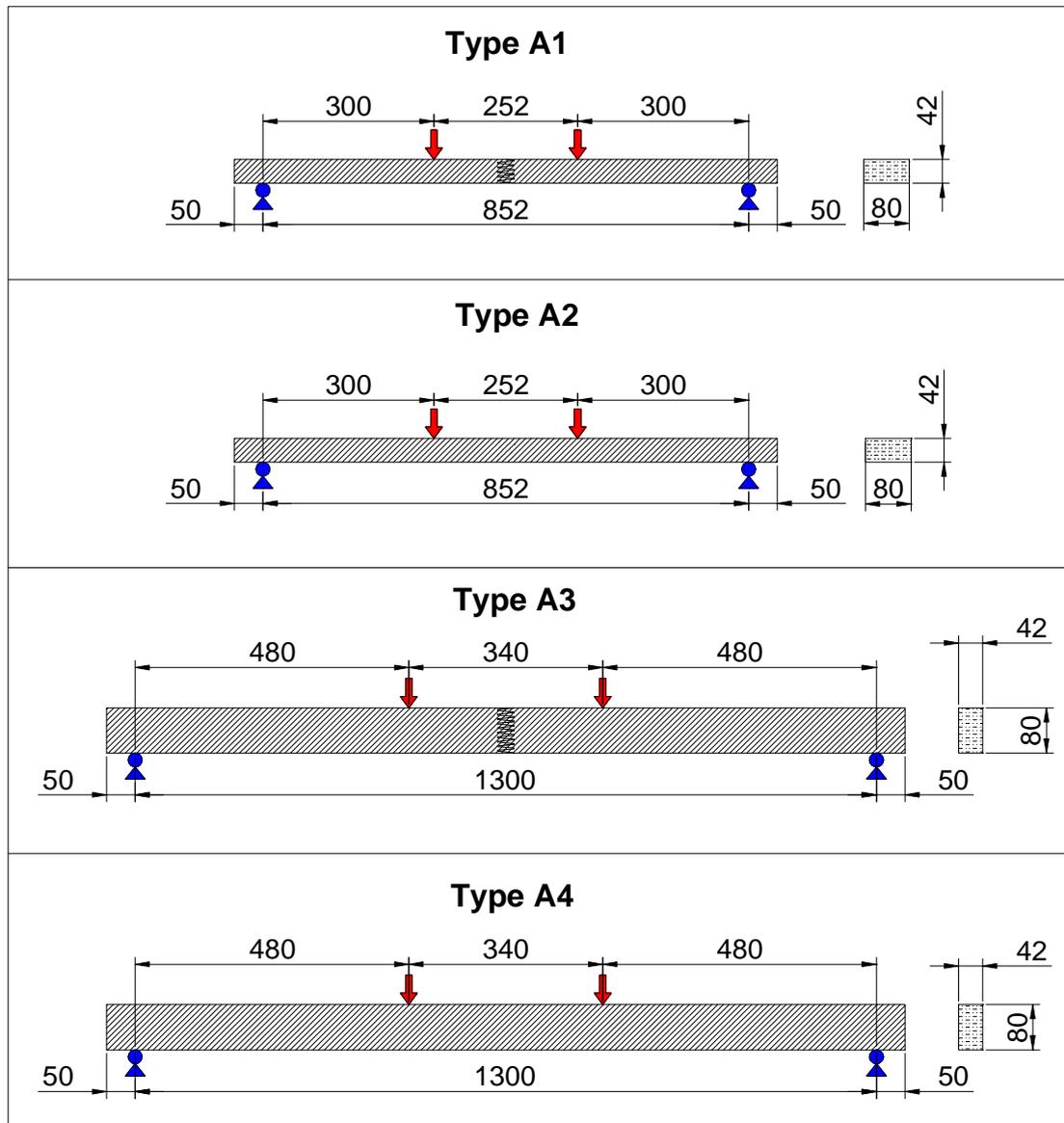


Figure 3.18 – Les différentes configurations des lamelles testées en flexion 4 points.

La figure 3.19 montre les courbes expérimentales force-flèche des lamelles aboutées (type A1). On remarque que, contrairement aux lamelles massives, le comportement des lamelles aboutées est principalement linéaire jusqu'à la rupture. En effet, le comportement en flexion est gouverné essentiellement par le comportement linéaire élastique de la colle au niveau de l'aboutage. La rupture prématurée des aboutages empêche l'apparition du comportement non-linéaire du bois.

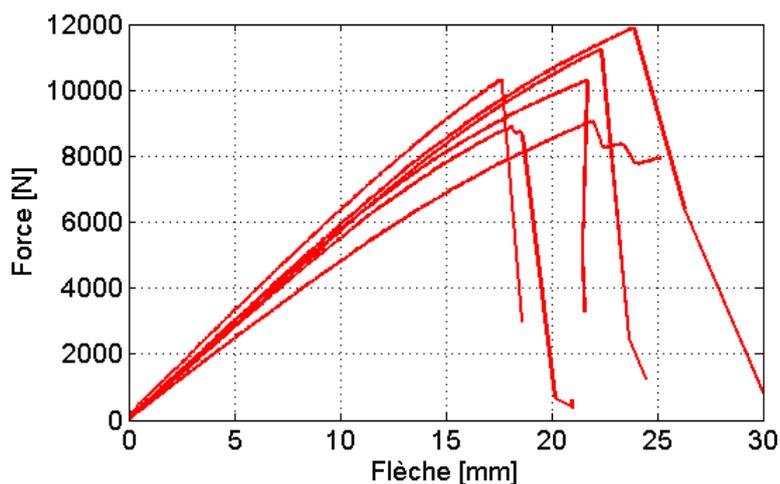


Figure 3.19 – Courbes expérimentales force-flèche de l'aboutage A1 (réalisé avec la MUF).

A travers la figure 3.20, il apparaît que les modules d'élasticité des aboutages type A2 et A4 sont sensiblement les mêmes par comparaison au module des lamelles massives. On note, par ailleurs, une légère diminution de la valeur des modules en ce qui concerne les types A1 et A3, de l'ordre de 14% dans le cas du type A3. Cette légère baisse peut être attribuée à la souplesse introduite par les aboutages.

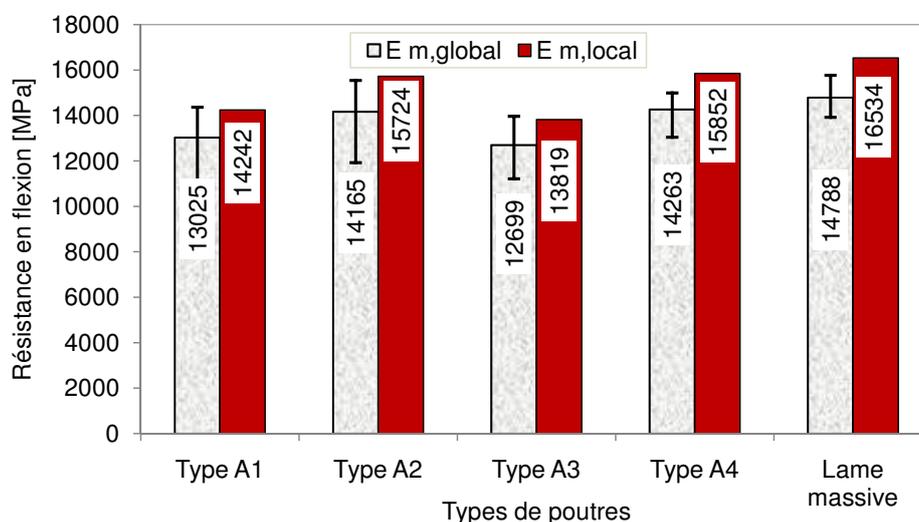


Figure 3.20 – Comparaison des modules d'élasticité des lamelles aboutées.

Les résultats des tests, en ce qui concerne la résistance, ont été ramenés à une hauteur de référence ($h = 150$ mm), conformément à la norme EN 384 [90], et comparés aux valeurs de référence issues des tests sur les lamelles individuelles massives (Lot 2).

Les valeurs de résistance caractéristiques des différents aboutages testés à plat et sur chant sont illustrées sur la figure 3.21 et comparées à la valeur de référence (lames massives).

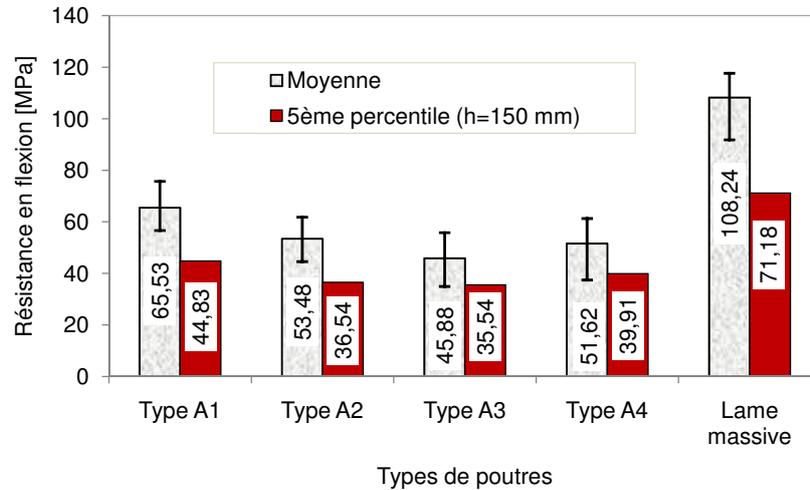


Figure 3.21 – Comparaison des résistances des lamelles aboutées.

On remarque que dans toutes les configurations testées, les aboutages respectent les exigences de la norme NF B52-010 [1] en ce qui concerne la résistance mécanique en flexion des aboutages. La résistance de ces aboutages est donc satisfaisante pour la réalisation de BMR au moins de classe GT24, la plus élevée proposée par la norme en ce qui concerne les BMR.

Si, par ailleurs, la norme européenne devait évoluer dans le futur pour considérer des classes de résistance supérieures, la performance mécanique de ces aboutages serait alors satisfaisante pour fabriquer des BMR de classe supérieure, par exemple GT30 (qui n'existe pas jusqu'à présent).

Il apparaît que l'aboutage vertical testé sur chant et à plat (type A2 et A3) semblent présenter des résistances équivalentes. Par ailleurs, l'aboutage horizontal (type A1 et A4) lorsqu'il est testé sur chant et à plat présente plus de variabilité. En effet, cette variabilité peut s'expliquer par le fait que dans le cas de l'aboutage horizontal testé sur chant (type A4), un défaut de collage ou une fissure se trouvant dans la dent la plus tendue de l'enture amorce facilement une propagation des fissures, fragilisant ainsi la résistance de l'aboutage. En revanche, dans le cas de l'aboutage testé à plat (type A1), un défaut ou une fissure peut être compensé vue la largeur importante de la dent de l'enture, retardant ainsi la rupture de l'aboutage [89].

La figure 3.22 présente les modes de rupture typiques des différentes configurations des lames aboutées. On remarque que dans toutes les configurations testées, la rupture est amorcée au niveau de l'enture multiple et se propage ensuite dans le bois.

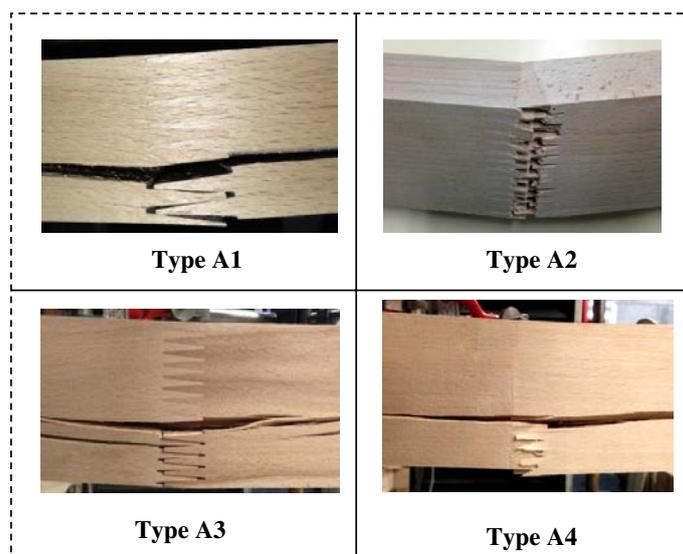


Figure 3.22 – Modes de rupture des différentes configurations des lames aboutées

Les valeurs caractéristiques de résistance et de rigidité des différents aboutages testés ainsi que la variabilité des résultats sont résumées dans le tableau 3.9.

Par conséquent, l'aboutage horizontal, type A1, est adopté pour la suite du travail.

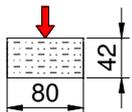
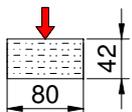
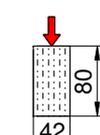
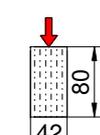
Configurations	Description		f_m (MPa)	$f_{m,k}$ (MPa) ($h=150$ mm)	$E_{m,global}$ (MPa)	$E_{m,local}$ (MPa)
	Lame aboutée (joint horizontal) en flexion à plat (type A1)	Moyenne	65,53		13025	14242
		Ecart-type	7,5		1100	
		CV	11%		8%	
		minimum	56,66		11054	
		maximum	75,73		14362	
		$f_{m,k}$ (au 5 ^{ème} percentile)	57,83	44,83	---	
	Lame aboutée (joint vertical) en flexion à plat (type A2)	Moyenne	53,48		14165	15724
		Ecart-type	6,72		1329	
		CV	13%		9%	
		minimum	44,6		11922	
		maximum	61,85		15541	
		$f_{m,k}$ (au 5 ^{ème} percentile)	47,14	36,54	---	
	Lame aboutée (joint vertical) en flexion sur chant (type A3)	Moyenne	45,88		12699	13819
		Ecart-type	7,06		1230	
		CV	15%		10%	
		minimum	34,94		11215	
		maximum	55,83		13966	
		$f_{m,k}$ (au 5 ^{ème} percentile)	40,3	35,54	---	
	Lame aboutée (joint horizontal) en flexion sur chant (type A4)	Moyenne	51,62		14263	15852
		Ecart-type	8,4		813	
		CV	16%		6%	
		minimum	37,46		13040	
		maximum	61,33		14991	
		$f_{m,k}$ (au 5 ^{ème} percentile)	45,26	39,91	---	

Tableau 3.9 – Valeurs caractéristiques des différentes configurations de lames aboutées.

3.4.4 Caractérisation des poutres multi-couches sans aboutage

La figure 3.23 illustre les différentes configurations des poutres multi-couches sans aboutage testées en flexion 4 points : on distingue des poutres à deux lamelles (DUO) à plat (type A) et sur chant (type B), et des poutres à trois lamelles (TRIO) à plat (type C).

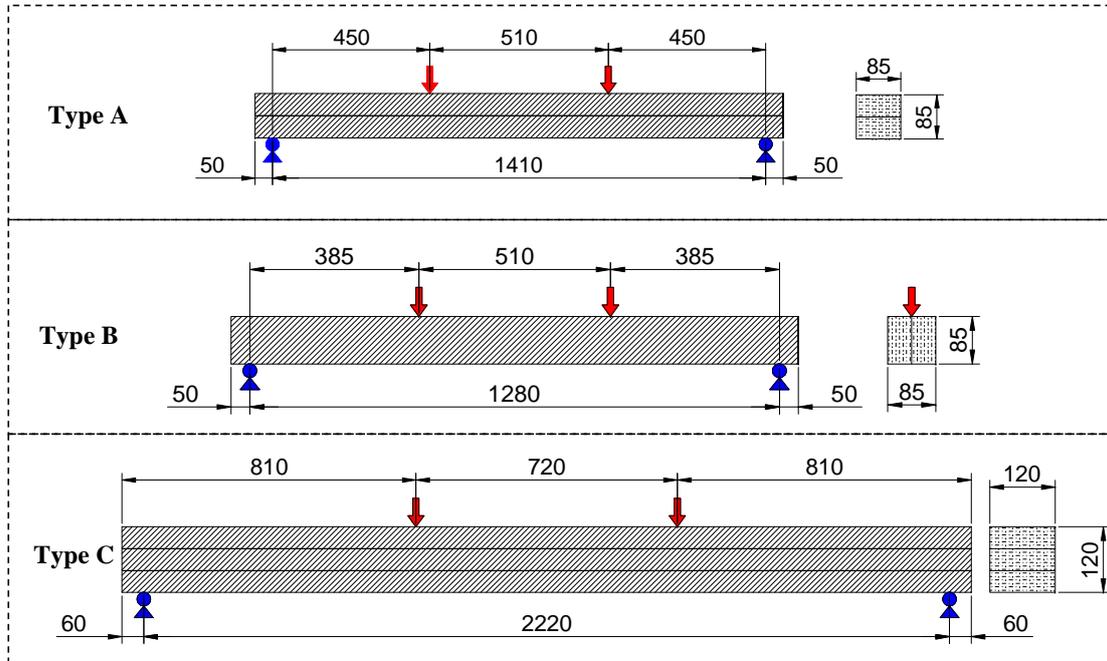


Figure 3.23 – Différentes configurations des poutres multicouches sans aboutage

Les figures 3.24, 3.25 et 3.26 montrent les modes de rupture des différentes configurations des poutres (type A, B et C).

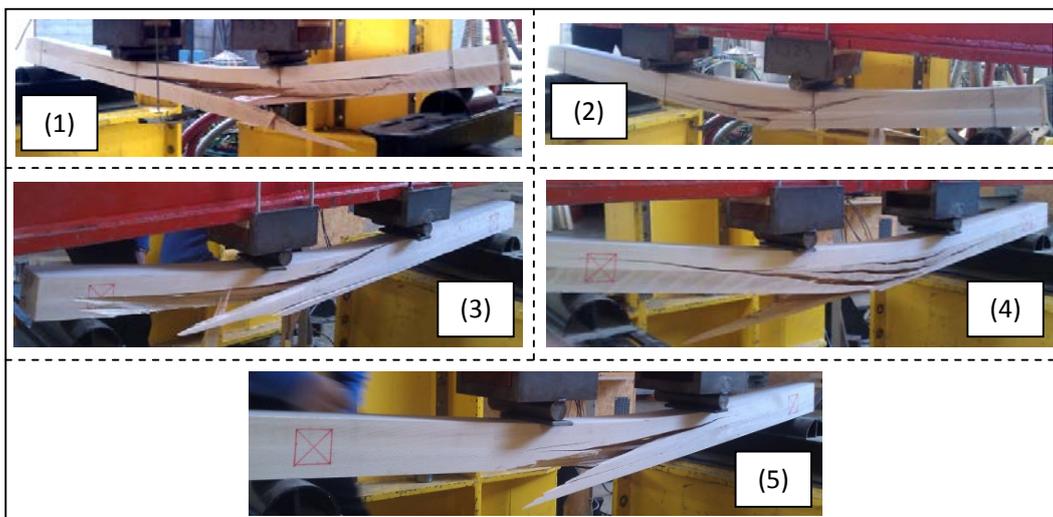


Figure 3.24 – Modes de rupture en flexion à plat des poutres DUO sans aboutage (type A).

Chapitre 3. Caractérisation expérimentale

La rupture des fibres de bois en traction, dans la face la plus tendue de la lamelle inférieure, est le mode de rupture observé expérimentalement dans toutes les configurations testées. En ce qui concerne les poutres DUO (figure 3.24) et TRIO (figure 3.25) en flexion à plat, nous observons que la rupture se propage ensuite en mode d'ouverture (mode I), dans le sens longitudinal des poutres et à l'interface du collage.

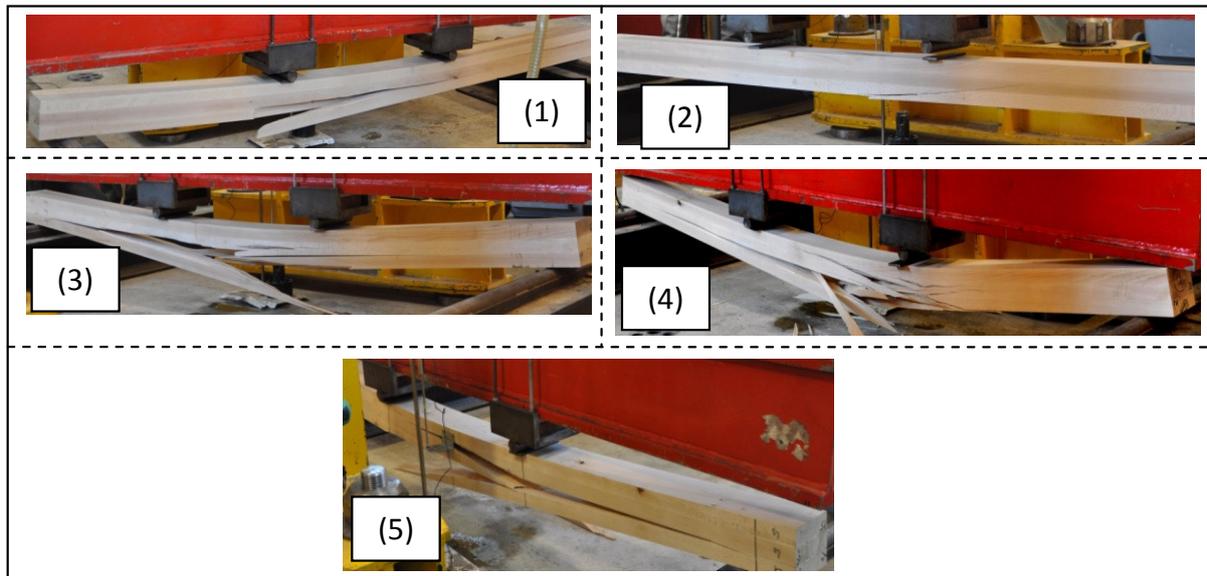


Figure 3.25 – Modes de rupture en flexion à plat des poutres TRIO sans aboutage (type C).

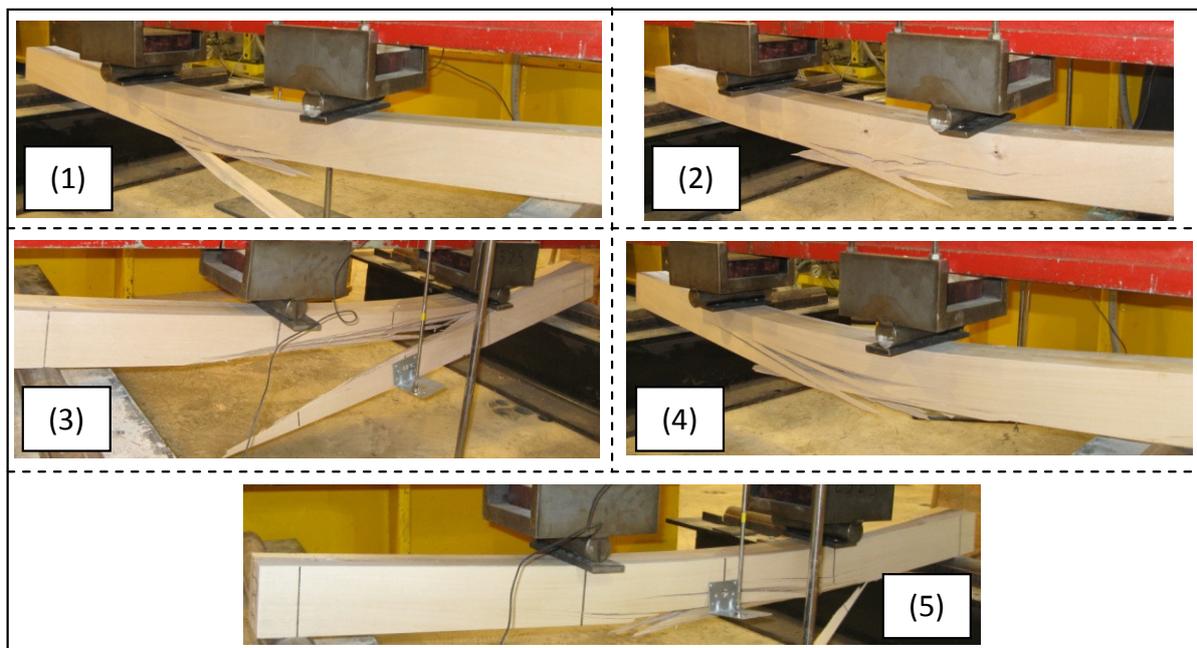
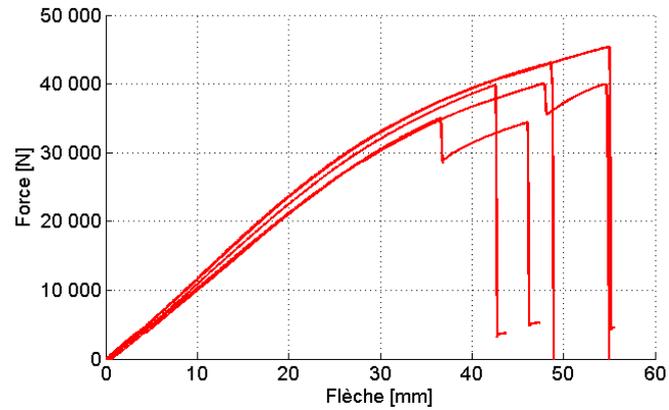
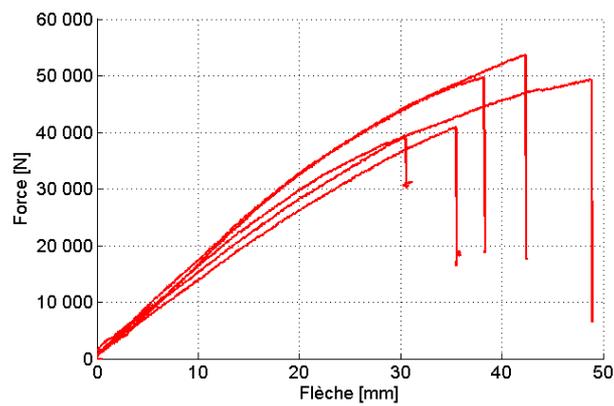


Figure 3.26 – Modes de rupture en flexion sur chant des poutres DUO sans aboutage (type B).

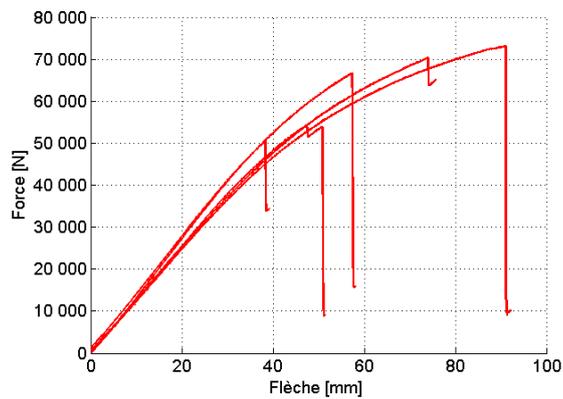
Par contre, dans le cas des poutres DUO en flexion sur chant (type B), la rupture se propage principalement dans le bois (figure 3.26). En effet, le joint de colle n'est pas sollicité en mode d'ouverture dans ce cas.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.27 – Courbes expérimentales force-flèche : (a) Poutres DUO (type A), (b) Poutres DUO (type B), (c) Poutres TRIO (type C).

Les figures 3.27 (a), (b) et (c) présentent les courbes expérimentales force-flèche des poutres types A, B et C, respectivement. On observe un comportement global élasto-plastique suivi d'un mode de rupture brutal, semblable au comportement des lamelles massives (figure 3.10).

Sur les figures 3.28 et 3.29, nous présentons les comparaisons en ce qui concerne le module d'élasticité et le module de rupture en flexion, respectivement. A travers la figure 3.28, il apparaît que le module d'élasticité des poutres DUO et TRIO sans aboutage est sensiblement le même, comparé à celui des lamelles massives (valeur témoin). On note, par ailleurs, un module d'élasticité légèrement supérieur dans le cas des poutres testées sur chant (type B).

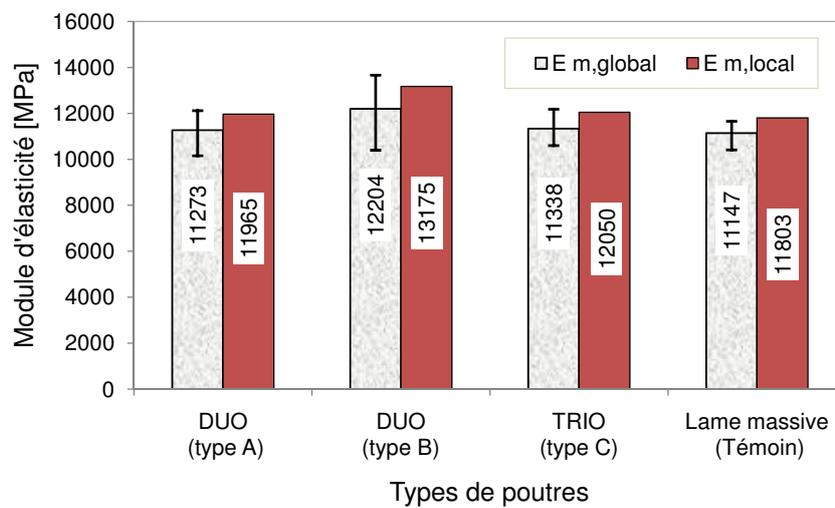


Figure 3.28 – Comparaison du module d'élasticité en flexion des poutres sans aboutage.

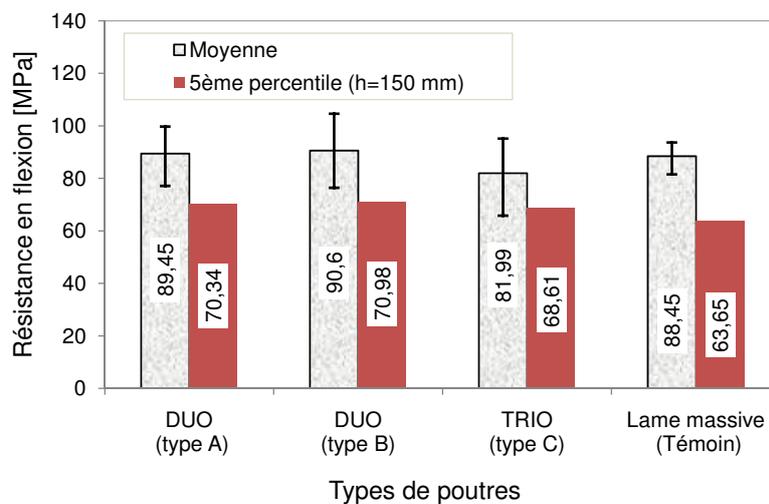


Figure 3.29 – Comparaison de la résistance en flexion des poutres sans aboutage.

La figure 3.29 montre que les poutres DUO et TRIO présentent une résistance en flexion équivalente à celle des lamelles massives. Bien que la valeur de résistance moyenne expérimentale des lamelles massives soit sensiblement équivalente à celle des poutres DUO, l'introduction d'une hauteur de référence ($h=150$ mm) conduit à une valeur de résistance légèrement inférieure.

En raisonnant sur la valeur caractéristique, on constate un effet système positif (gain de résistance) du BMR qui est d'environ 1.10 et 1.07 pour les poutres DUO et TRIO respectivement. Les joints de colle présents à l'interface des lamelles ne semblent donc pas être un facteur réducteur pour les BMR.

Les valeurs caractéristiques des poutres sans aboutage ainsi que la variabilité des résultats expérimentaux sont résumées dans le tableau 3.10.

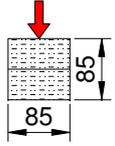
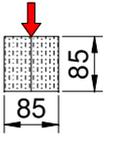
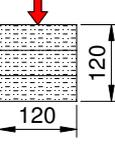
Configurations	Description		f_m (MPa)	$f_{m,k}$ (MPa) ($h=150$ mm)	$E_{m,global}$ (MPa)	$E_{m,local}$ (MPa)
	Poutre DUO en flexion à plat (type A)	Moyenne	89,45		11273	11965
		Ecart-type	8,53		888	
		CV	10%		8%	
		minimum	77,14		10159	
		maximum	99,74		12119	
		$f_{m,k}$ (au 5 ^{ème} percentile)	78,8	70,34	---	
	Poutre DUO en flexion sur chant (type B)	Moyenne	90,6		12204	13175
		Ecart-type	12,1		1496	
		CV	13%		12%	
		minimum	76,41		10398	
		maximum	104,64		13666	
		$f_{m,k}$ (au 5 ^{ème} percentile)	79,53	70,98	---	
	Poutre TRIO en flexion à plat (type C)	Moyenne	81,99		11338	12050
		Ecart-type	13,02		697	
		CV	16%		6%	
		minimum	65,81		10599	
		maximum	95,15		12185	
		$f_{m,k}$ (au 5 ^{ème} percentile)	71,74	68,61	---	

Tableau 3.10 – Valeurs caractéristiques des poutres multicouches sans aboutage [55].

3.4.5 Caractérisation des poutres multi-couches avec aboutages

La figure 3.30 illustre les différentes configurations des poutres avec aboutages testées, à plat, en flexion 4 points : on distingue des poutres DUO avec aboutage à mi-portée de la lamelle supérieure (type D), des poutres DUO avec aboutage à mi-portée de la lamelle inférieure (type E) et des poutres TRIO avec plusieurs aboutages dont un à mi-portée de la lamelle inférieure (type F).

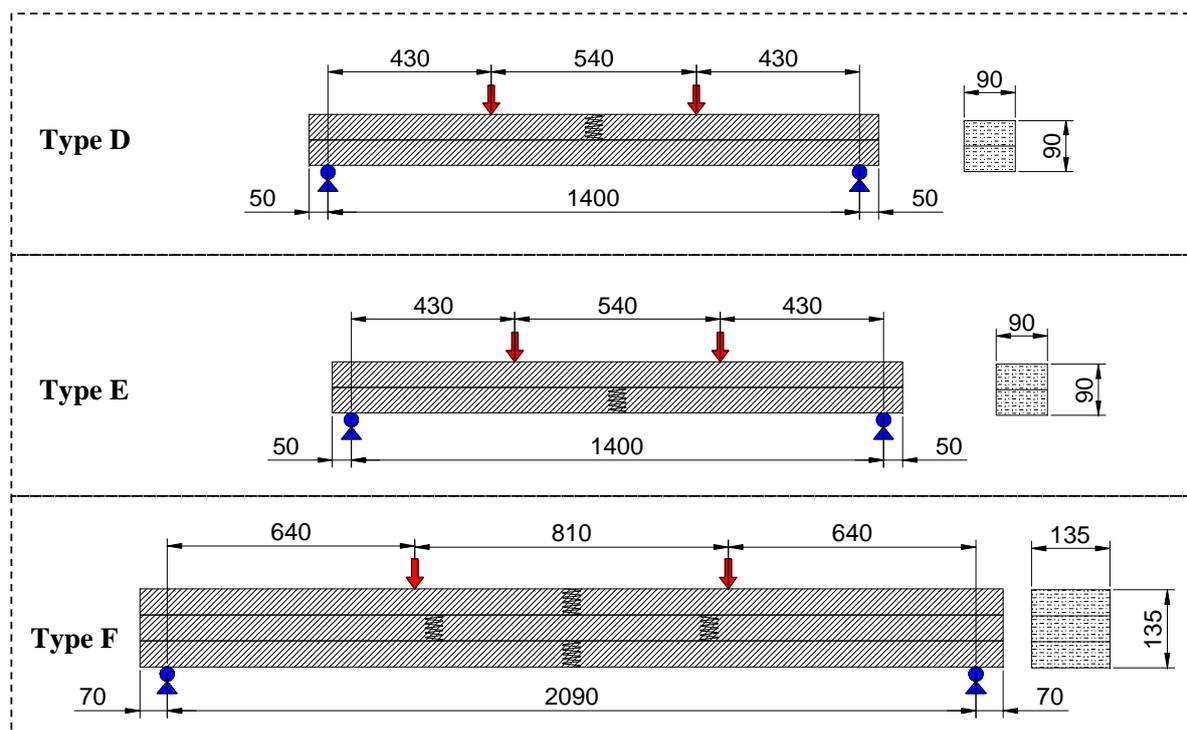


Figure 3.30 – Différentes configurations des poutres multi-couches avec aboutages

En terme de comportement global des poutres, nous observons un comportement linéaire (figures 3.31 (b) et (c)) jusqu'à rupture semblable à celui des lamelles aboutées, dans le cas des poutres DUO et TRIO ayant un aboutage à mi-portée de la lamelle tendue (types E et F). Le comportement (figures 3.31 (a)) des poutres DUO avec aboutage situé dans la lamelle comprimée (type D) est semblable à celui des lamelles massives et des poutres DUO et TRIO sans aboutage. En effet, comme dans le cas des lamelles aboutées, le comportement des poutres multi-couches avec aboutages est essentiellement gouverné par le comportement linéaire élastique et fragile des aboutages.

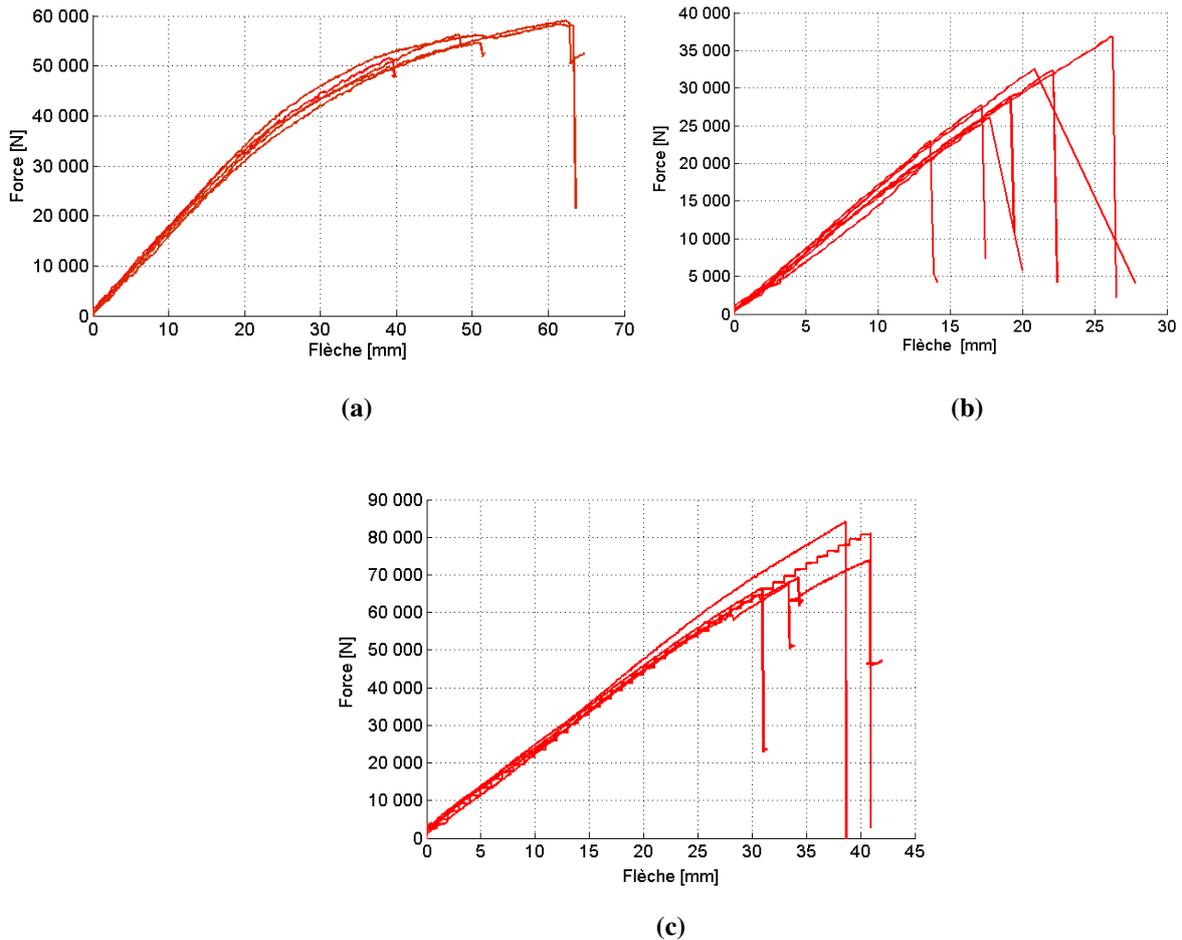


Figure 3.31 – Courbes expérimentales force-flèche des poutres avec aboutages : (a) Poutres DUO avec aboutage supérieur (type D), (b) Poutres DUO avec aboutage inférieur (type E), (c) Poutres TRIO avec aboutages inférieurs (type F).

Les figures 3.32 et 3.33 présentent les modes de rupture des poutres DUO (type E) et des poutres TRIO (type F) avec aboutage à mi-portée de la lamelle tendue, respectivement. Les modes de rupture observés expérimentalement confirment les comportements globaux précédents en ce qui concerne les courbes expérimentales force-flèche. Dans tous les cas, la rupture est amorcée au niveau des aboutages tendus et se propage ensuite à l'interface collée des lamelles, dans le sens longitudinal, en mode d'ouverture (mode I).

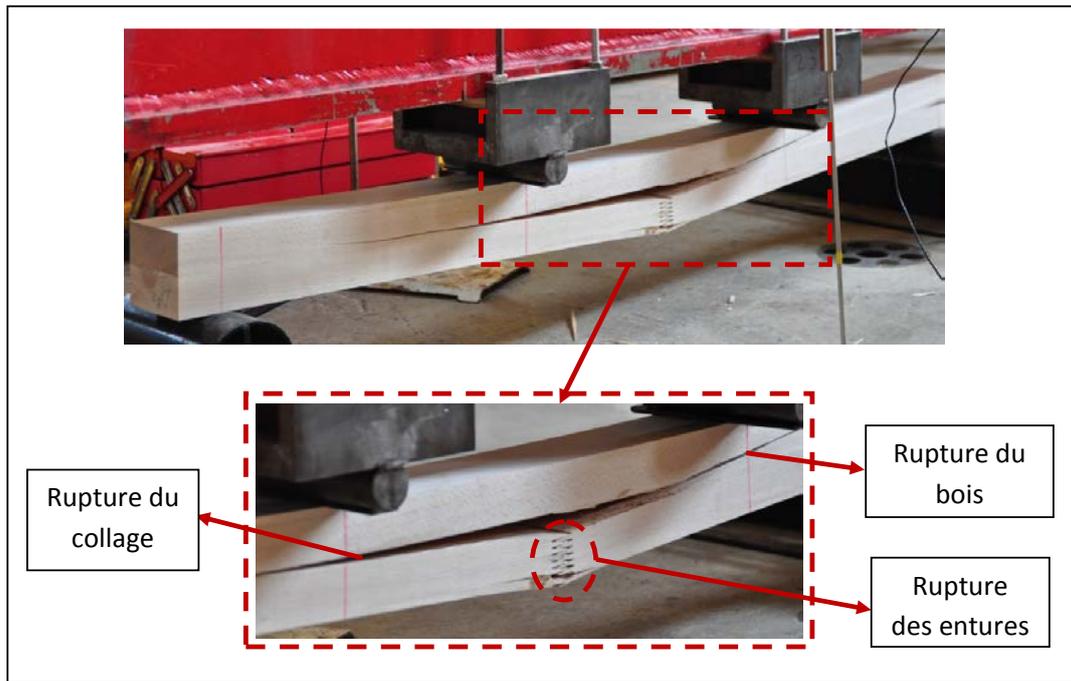


Figure 3.32 – Mode de rupture typique des poutres DUO avec aboutage inférieur (type E).

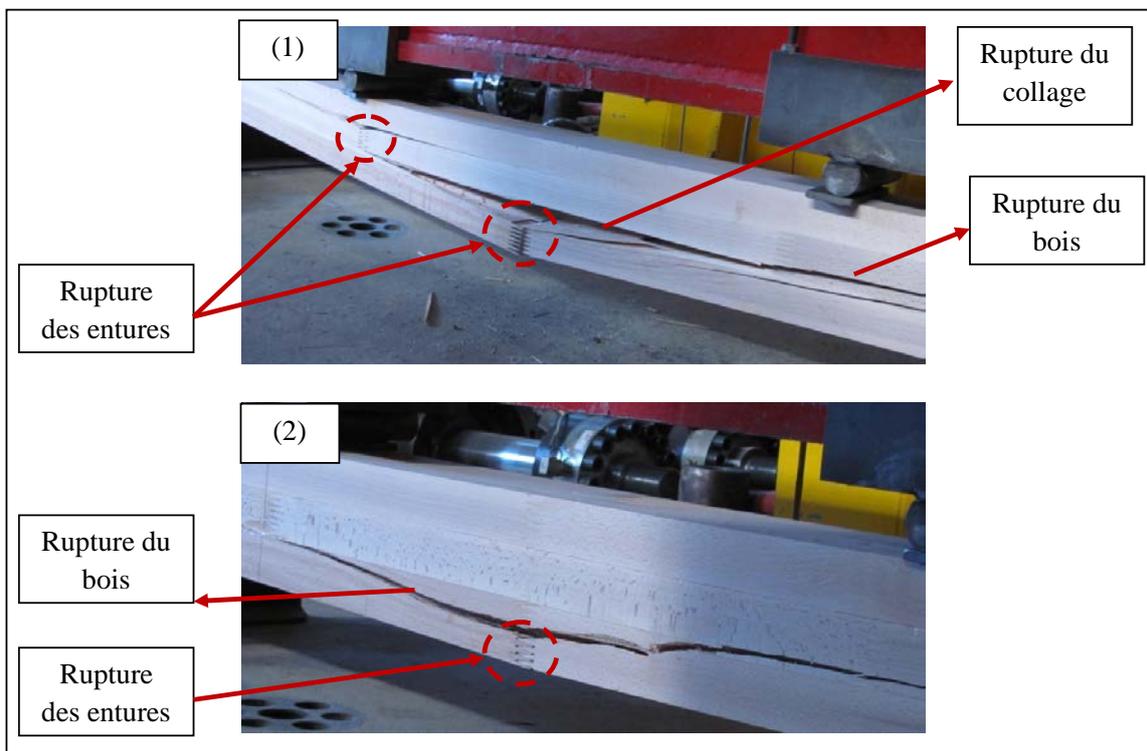


Figure 3.33 – Modes de rupture typiques des poutres TRIO avec aboutage inférieur (type F).

En revanche, le mode de rupture des poutres DUO avec aboutage situé dans la lamelle comprimée (type D), est dû principalement à la rupture du bois en traction (figure 3.34).

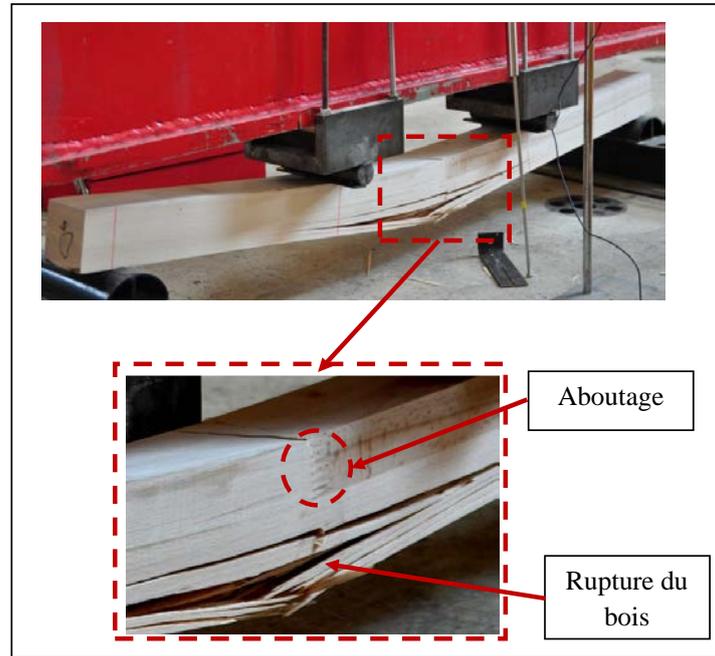


Figure 3.34 – Mode de rupture typique des poutres DUO avec aboutage supérieur (type D).

Les valeurs caractéristiques des différentes poutres sont résumées dans le tableau 3.11.

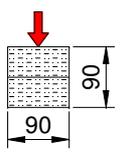
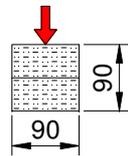
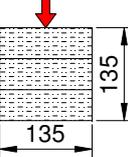
Configurations	Description		f_m (MPa)	$f_{m,k}$ (MPa) ($h=150$ mm)	$E_{m,global}$ (MPa)	$E_{m,local}$ (MPa)
	Poutre DUO en flexion à plat (type D)	Moyenne	101,99		13936	15427
		Ecart-type	5,86		474	
		CV	6%		3%	
		minimum	92,87		13504	
		maximum	107,86		14658	
		$f_{m,k}$ (au 5 ^{ème} percentile)	90,07	83,32	---	
	Poutre DUO en flexion à plat (type E)	Moyenne	52,42		13725	15153
		Ecart-type	8,16		1119	
		CV	16%		8%	
		minimum	40,72		11822	
		maximum	65,15		15262	
		$f_{m,k}$ (au 5 ^{ème} percentile)	46,2	41,71	---	
	Poutre TRIO en flexion à plat (type F)	Moyenne	59,36		11626	12424
		Ecart-type	6,4		439	
		CV	11%		4%	
		minimum	52,98		11017	
		maximum	67,38		12009	
		$f_{m,k}$ (au 5 ^{ème} percentile)	52,25	51,16	---	

Tableau 3.11 – Valeurs caractéristiques des poutres multi-couches avec aboutages [55].

La figure 3.35 illustre la comparaison du module d'élasticité des poutres multi-couches avec aboutages. Cette comparaison montre que le module d'élasticité des poutres DUO a diminué, comparé à celui des lamelles massives. Nous obtenons respectivement les valeurs de 7% et 6% de diminution du module d'élasticité global moyen pour le DUO avec aboutage inférieur et pour le DUO avec aboutage supérieur. En revanche, dans le cas des poutres TRIO avec aboutages dans les lamelles tendues, la diminution (21%) du module d'élasticité est plus prononcée. Ce résultat est cohérent avec celui obtenu dans le cas des lamelles aboutées. On note aussi que les poutres TRIO présentent la rigidité la plus faible, en comparaison à celle des poutres DUO. Cela peut s'expliquer, probablement, par la présence de plusieurs aboutages dans la zone la plus tendue (lamelle inférieure).

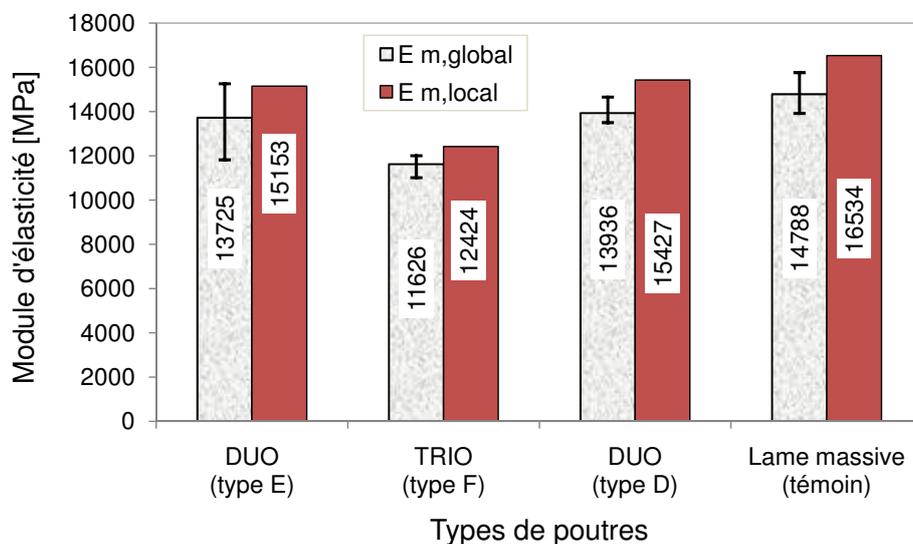


Figure 3.35 – Comparaison du module d'élasticité des poutres avec aboutages.

La figure 3.36 montre la comparaison de la résistance en flexion des différentes configurations de poutres avec aboutages. On remarque que la valeur de résistance expérimentale moyenne des poutres DUO et TRIO ayant un aboutage situé à mi-portée de la lamelle tendue (type E et type F, respectivement) a considérablement diminué comparée à celle des lames massives, tandis que celle des poutres DUO ayant un aboutage dans la lamelle comprimée (type D) reste inchangée. En terme de résistance caractéristique, $f_{m,k}$, les poutres DUO et TRIO ayant des aboutages dans les lamelles tendues présentent respectivement une perte de résistance de 41% et 28% comparativement aux lames massives. Les aboutages semblent donc être un facteur réducteur des poutres BMR. On note, par ailleurs, un meilleur comportement des BMR TRIO (type F), par comparaison au BMR DUO (type E).

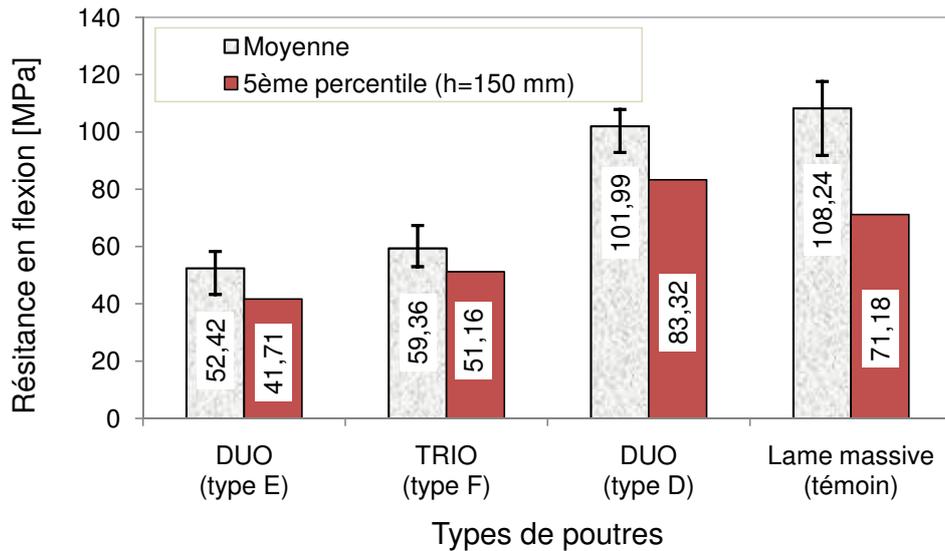


Figure 3.36 – Comparaison de la résistance en flexion des poutres multi-couches avec aboutages.

Par ailleurs, la résistance des éprouvettes fabriquées avec la colle Honeymoon (PRF à base de tanin) est équivalente à celle des éprouvettes fabriquées en utilisant la colle MUF. La figure 3.37 montre la comparaison entre les deux colles dans le cadre des poutres DUO avec aboutage inférieur.

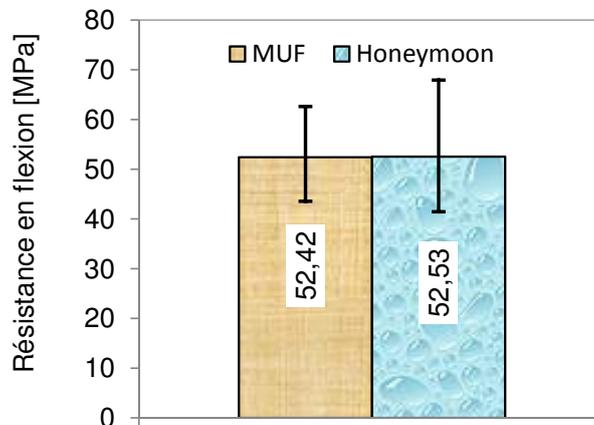


Figure 3.37 – Comparaison de la résistance en flexion des poutres DUO avec aboutage fabriquées avec la colle MUF et la colle Honeymoon.

3.5 Récapitulation des essais mécaniques

Cette partie récapitule les essais mécaniques réalisés (configuration, nombre d’essais) dans cette étude.

Les essais à grande échelle comportent :

- 15 poutres sans aboutage et 22 poutres avec aboutages (Tableau 3.12)
- 8 lamelles massives et 36 lamelles aboutées (Tableau 3.13)

Les essais à moyenne échelle comportent :

- 35 tests complémentaires en compression et traction sur le bois massif (Tableau 3.14)
- 39 tests en traction pur, en cisaillement et de type DCB sur les colles utilisées (Tableau 3.15)

En résumé, 155 essais ont été réalisés correspondants à volume de 3 m³ de hêtre usinés.

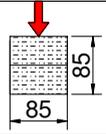
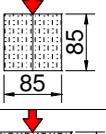
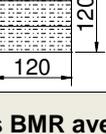
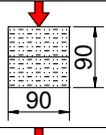
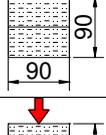
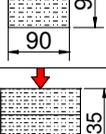
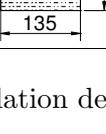
Description	Section transversale	Longueur (mm)	Nombre de poutres
Poutres BMR sans aboutage			
BMR 2 lamelles (type A)		1510	5
BMR 2 lamelles (type B)		1380	5
BMR 3 lamelles (type C)		2340	5
Poutres BMR avec aboutages			
BMR 2 lamelles (type D)		1500	5
BMR 2 lamelles (type E)		1500	7
BMR 2 lamelles (réalisées avec PRF-Tanin)		1500	5
BMR 2 lamelles (type F)		2230	5

Tableau 3.12 – Récapitulation des essais sur les poutres BMR.

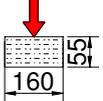
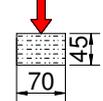
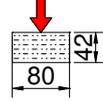
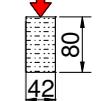
Description	Section transversale	Longueur (mm)	Nombre de poutres
Lamelles massives			
Tests sur le lot 1		820	4
Tests sur le lot 2		1170	4
Lamelles aboutées			
Tests en flexion à plat		952	24
Tests en flexion sur chant		1400	12

Tableau 3.13 – Récapitulation des essais sur les lamelles individuelles.

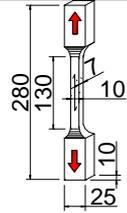
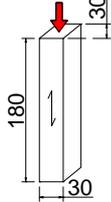
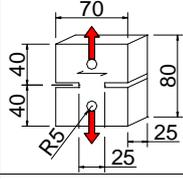
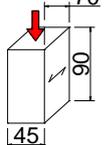
Description	Configuration	Nombre d'essais
Traction axiale		10
Compression axiale		11
Traction transversale		7
Compression transversale		7

Tableau 3.14 – Récapitulation des essais complémentaires sur le bois massif.

Description	Configuration	Nombre d'essais
Traction pure		10
Cisaillement (colle MUF)		11
Cisaillement (colle PRF-Tanin)		11
Test DCB		7

Tableau 3.15 – Récapitulation des essais sur les colles utilisées.

3.6 Conclusion

Dans cette partie, des essais expérimentaux ont été réalisés pour caractériser :

- Le bois de hêtre utilisé
- Les colles utilisées (MUF et PRF-Tanin)
- Les lamelles aboutées par entures multiples
- Les poutres multi-couches (DUO et TRIO) avec et sans aboutages

En ce qui concerne la caractérisation du hêtre, des essais en flexion, en traction transversale et axiale, en compression transversale et axiale ont été réalisés. Les valeurs caractéristiques obtenues ont permis d'attribuer au hêtre la classe **D70**, la plus élevée proposée par la norme EN 338 [6] en ce qui concerne les feuillus. Par ailleurs, les résultats ont montré une grande différence entre les valeurs caractéristiques issues des tests et celles attribuées selon la norme EN 338 [6].

Concernant la caractérisation des colles, les deux colles (MUF et PRF-Tanin) utilisées ont été vérifiées en traction et en cisaillement. Elles satisfont aux exigences de la norme EN 302-1 [7] en

vue d'un usage structural.

Les résultats des tests effectués sur les lamelles aboutées ont montré que les aboutages respectaient les exigences de la norme NF B 52-010 [1], bien que l'aboutage apparaisse comme un facteur réducteur par comparaison avec les lamelles massives. En effet, la résistance actuelle des aboutages permet de fabriquer des BMR de classe GT24.

Les poutres multicouches (DUO et TRIO) avec et sans aboutages ont été caractérisées en flexion conformément à la norme EN 408 [5]. Les résultats ont montré que :

- Les poutres BMR DUO et TRIO sans aboutage possèdent une résistance équivalente à celle des lamelles massives, il y a donc correspondance entre la résistance des lamelles et des BMR ;
- Les poutres BMR DUO et TRIO avec aboutages inférieurs ont une résistance nettement inférieure à celle des lamelles massives, à cause de la faiblesse des aboutages ;
- La présence des aboutages dans les zones tendues semble affecter légèrement les caractéristiques de rigidité globale des poutres.

Les résultats obtenus dans ce chapitre serviront également à valider les modèles numériques développés dans le chapitre 4.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DES POUTRES MULTI-COUCHES

4.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons pu comprendre la complexité de la fabrication des poutres en bois reconstitué, notamment au niveau du collage. En effet, elle fait appel à plusieurs étapes de fabrication, qui doivent s'enchaîner correctement. De la même manière, la réalisation des tests de caractérisation expérimentale n'est pas une tâche facile, puisqu'elle nécessite la préparation des protocoles expérimentaux, la réalisation des nombreux tests et le traitement des données. Ces phases engagent des coûts importants en terme de qualité de matériaux, de temps de fabrication et de temps d'essais. La simulation numérique peut être un outil d'aide à la décision pour les choix technologiques, inter-agissant sur les opérations de fabrication. Elle apparaît également comme un outil indispensable pour réduire le nombre d'essais et donc le coût des tests expérimentaux. De plus, elle permet d'accéder à des informations difficilement accessibles ou inaccessibles expérimentalement.

L'autre avantage de la simulation numérique est la possibilité d'effectuer une étude paramétrique pour étudier l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement mécanique à moindre coût. Ce chapitre s'inscrit dans ce cadre : la modélisation par éléments finis du comportement de poutres en bois reconstitué par collage visant à diminuer le nombre et le coût des tests expérimentaux.

Dans ce travail, le code de calcul par éléments finis Abaqus est utilisé pour la simulation numérique du comportement des poutres en BMR. L'objectif principal de la modélisation proposée est d'étudier numériquement le comportement de poutres multi-couches (reconstituées par collage) prises dans leur complexité : comportement orthotrope et élasto-plastique anisotrope du hêtre, non-linéarité géométrique, présence des aboutages, endommagement et rupture des joints de colle...etc. On s'intéresse principalement au module de rupture (MOR) des poutres multi-couches avec une attention particulière sur le comportement des aboutages qui constituent souvent un point de fragilité. La précision des simulations numériques est évaluée par comparaison des résultats numériques avec ceux issus de l'expérience.

Dans la suite de ce chapitre, nous abordons les modèles de comportement adoptés pour le bois ainsi que pour les joints de colle. L'identification de l'ensemble des paramètres nécessaires pour

alimenter les modèles numériques est également abordée. Enfin, nous présentons les résultats des simulations numériques des aboutages ainsi que des poutres multi-couches en bois reconstitué par collage.

4.2 Choix des modèles de comportement

4.2.1 Comportement mécanique du bois

Le bois est un matériau naturel, hétérogène, discontinu et anisotrope. En ce qui concerne le bois à l'échelle macroscopique, celui-ci est composé de plusieurs couches annuelles appelées "cernes" (figure 4.1). Ces cernes sont divisés en deux zones, formées chaque année. La première zone est le bois de printemps (bois initial), c'est un bois tendre. La seconde zone est faite de bois d'été (bois final), plus dense.

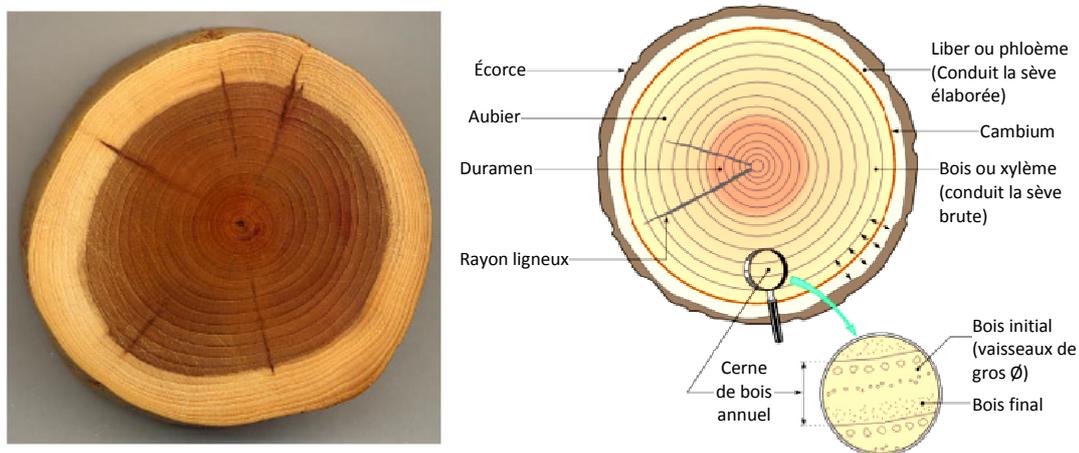


Figure 4.1 – Coupe transversale d'un tronc d'arbre [94]

En terme de propriétés mécaniques, le bois est un matériau orthotrope avec trois directions principales (figure 4.2) : la direction longitudinale (L), suivant Z, correspondant à celle des fibres, la direction radiale (R) correspondant à celle de croissance en diamètre, et la direction tangentielle (T) correspondant aux cernes annuels [95–97].

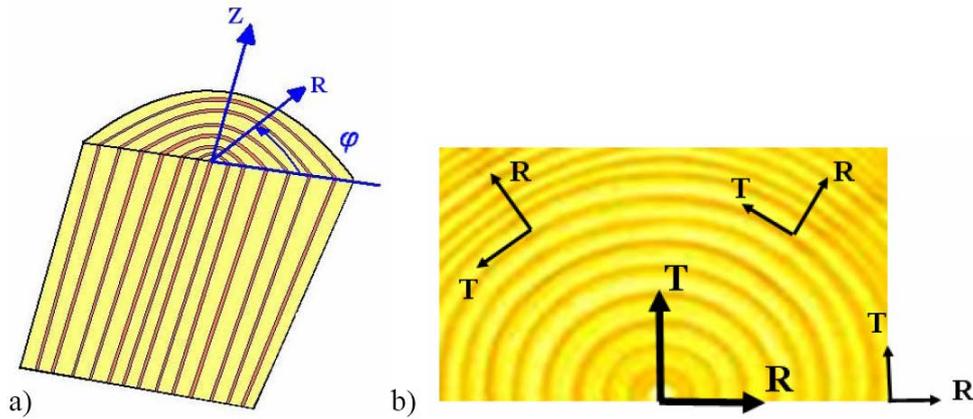


Figure 4.2 – (a) : Coupes longitudinale et transversale, (b) : Axe local définissant les directions d'orthotropie [98]

En terme de comportement mécanique, le bois est un matériau cellulaire complexe : orthotrope et fortement anisotrope (figure 4.3).

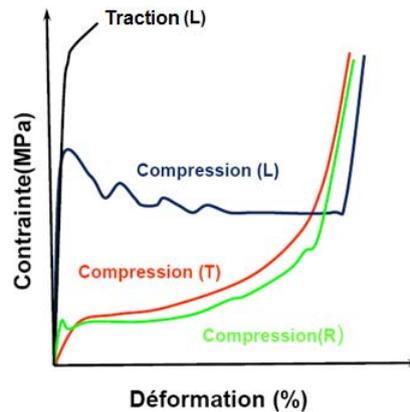


Figure 4.3 – Courbes typiques contrainte-déformation du bois

Il est à noter que le module d'élasticité du bois est sensiblement plus faible en compression qu'en traction, mais les hypothèses générales accordent un module de Young équivalent en compression, traction et donc en flexion. Cependant, la limite d'élasticité en compression est considérablement inférieure à celle de traction, comme le montre la figure 4.3.

Quant au mode de rupture en compression longitudinale, il est généralement induit par la combinaison de la traction transversale (décohésion des fibres) et le cisaillement (figure 4.4) [99]. En effet, sous compression longitudinale au delà de la limite d'élasticité, il se produit une plastification des fibres, occasionnée par leur flambage longitudinal.

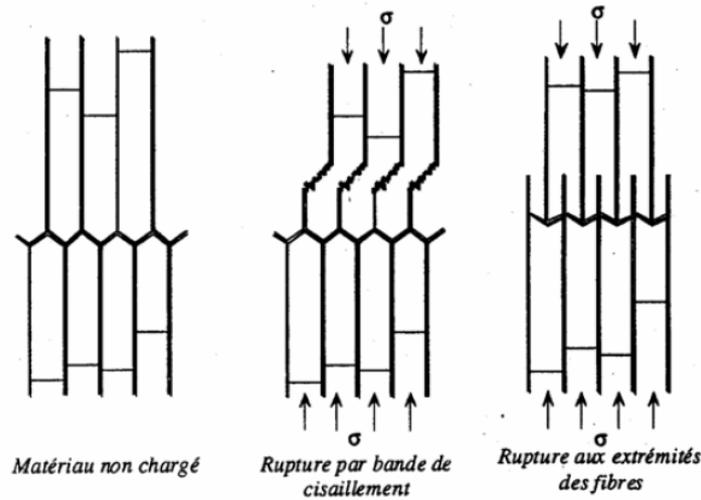


Figure 4.4 – Modes de rupture en compression longitudinale [95, 99].

Le comportement du bois en compression sous charge statique est très largement étudié dans la littérature [81, 95–97, 99–108]. Les études concernent principalement les propriétés élastiques et élasto-plastique à des niveaux de déformations relativement faibles. En effet, la plupart des modèles ont été formulés dans le contexte des assemblages boulonnés. Contrairement à la compression longitudinale, les comportements en compression radiale et tangentielle présentent un plateau quasi-horizontale dû à l'effondrement plastique de sa structure cellulaire, semblable à celui des mousses métalliques (figure 4.5).

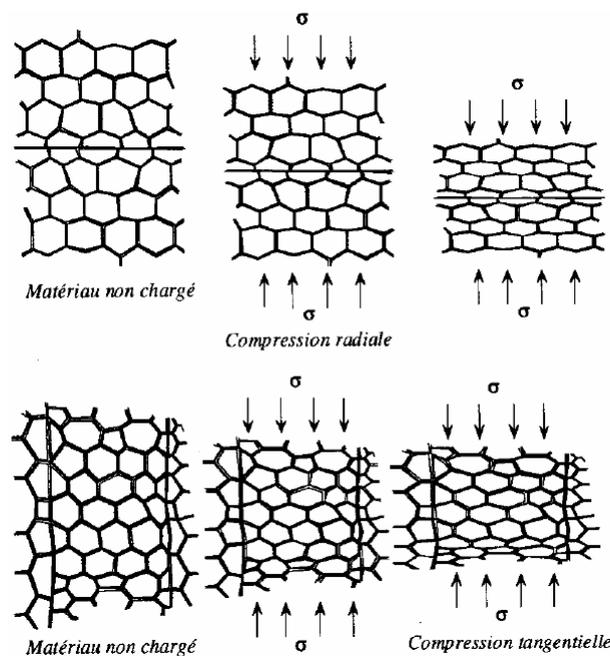


Figure 4.5 – Mécanismes de rupture des trachéides du bois dans les sens tangential et radial [95]

La déformation se localise sous forme de strates tandis que le reste du matériau reste intact (déformations localisées). Une déformation plastique plus importante produit une densification des cellules effondrées ce qui conduit à une augmentation rapide de la contrainte qui tend alors vers l'infini pour un certain niveau de déformation (supérieur à 50%, en général).

En traction, le bois présente un comportement fragile avec un niveau de contrainte supérieur à la compression suivant l'axe longitudinal. Quant au comportement suivant les deux autres axes orthogonaux, le comportement fragile en traction est encore plus faible.

D'un point de vue macroscopique, le bois est considéré comme un matériau homogène. Son comportement linéaire orthotrope est régi par la loi de Hooke généralisée :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{LR}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Où :

- $\varepsilon_L, \varepsilon_R, \varepsilon_T$ sont les déformations suivant les directions L, R et T, respectivement
- $\gamma_{LR}, \gamma_{RT}, \gamma_{TL}$ sont les déformations angulaires par rapport à LR, RT et LT, respectivement
- $\sigma_L, \sigma_R, \sigma_T$ sont les contraintes suivant les directions L, R et T, respectivement
- $\tau_{RT}, \tau_{LT}, \tau_{LR}$ sont les contraintes de cisaillement dans les plans RT, LT et LR, respectivement
- E_L, E_R, E_T , sont les modules d'élasticité suivant les directions L, R et T, respectivement
- G_{RT}, G_{LT}, G_{LR} sont les modules de cisaillement dans les plans RT, LT et LR, respectivement
- $\nu_{RL}, \nu_{TL}, \nu_{TR}, \nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}$ sont les coefficients de Poisson équivalents suivant les plans RL, TL, TR, LR, LT, RT, respectivement.

Quant au comportement élasto-plastique anisotrope, il est modélisé par le critère quadratique de Hill [109]. Le critère de Hill est une extension du critère isotrope de Von-Mises et il est donné par la relation suivante :

$$\phi(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 \quad (4.2)$$

Où F, G, H, L, M et N sont les constantes d'anisotropie de Hill, qu'il convient de déterminer, de manière expérimentale, à l'aide de tests de caractérisation appropriés.

La loi de comportement élasto-plastique à écrouissage isotrope adoptée est détaillée dans [110, 111]. Le potentiel de dissipation $F(\hat{\underline{\sigma}}, R)$ est donné par l'équation 4.3 :

$$F(\hat{\underline{\sigma}}, R) = f(\hat{\underline{\sigma}}, R) + \frac{1}{2} \frac{b}{Q} R^2 \quad (4.3)$$

Où : $f(\hat{\underline{\sigma}}, R) = \|\hat{\underline{\sigma}}_{eq}\| - R - \sigma_c = 0$ (écoulement plastique)

$\|\hat{\underline{\sigma}}_{eq}\| = \sqrt{\hat{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{H}} : \hat{\underline{\sigma}}}$ (contrainte équivalente)

σ_c est la limite d'élasticité,

R représente l'écrouissage isotrope,

Q et b sont les paramètres d'écrouissage isotropes,

$\underline{\underline{H}}$ est le tenseur du 4ème ordre de Hill.

Ainsi, les paramètres de plasticité à identifier sont :

- La limite d'élasticité : σ_c
- Les paramètres d'écrouissage isotropes : Q et b
- Les constants d'anisotropie de Hill : F, G, H, L, M, N

Pour tenir compte de la différence du comportement en traction et en compression et afin de prédire les modes de rupture, souvent fragiles, il est généralement fait appel à un critère de rupture fragile, de type Hoffman, adapté aux matériaux orthotropes [110–115] :

$$C_1 (\sigma_y - \sigma_z)^2 + C_2 (\sigma_z - \sigma_x)^2 + C_3 (\sigma_x - \sigma_y)^2 + C_4 \sigma_x + C_5 \sigma_y + C_6 \sigma_z + C_7 \tau_{yz}^2 + C_8 \tau_{xz}^2 + C_9 \tau_{xy}^2 = 1 \quad (4.4)$$

$$\text{Avec : } C_1 = \frac{1}{f_{t,90} f_{c,90}} - \frac{1}{2 f_{t,0} f_{c,0}}, \quad C_2 = C_3 = \frac{1}{2 f_{t,0} f_{c,0}}, \quad C_4 = \frac{1}{f_{t,0}} - \frac{1}{f_{c,0}}, \quad C_5 = C_6 = \frac{1}{f_{t,90}} - \frac{1}{f_{c,90}},$$

$$C_7 = C_8 = C_9 = \frac{1}{f_v^2}.$$

Où : $f_{t,90}$ et $f_{t,0}$ sont les contraintes limites de traction perpendiculaire et parallèle aux fibres, respectivement. $f_{c,90}$ et $f_{c,0}$ sont les contraintes limites de compression perpendiculaire et parallèle aux fibres, respectivement. f_v est la contrainte limite de cisaillement.

D'autres travaux utilisent des critères multi-surfaces pour décrire la différence entre les modes de comportement en traction et en compression [116–118]. Un certain nombre de travaux inclut la modélisation de la densification (figure 4.3) en compression radiale et tangentielle [111, 116, 118, 119].

4.2.2 Comportement mécanique des joints collés

L'inconvénient des joints collés est le grand nombre de paramètres qualitatifs à maîtriser pour obtenir une résistance acceptable. Ces paramètres sont liés à la colle utilisée, à l'essence de bois et à la géométrie des pièces assemblées [120]. Les caractéristiques générales de la colle sont :

- le type, la qualité et le mélange de la colle ;
- la durée de durcissement ;
- la pression de serrage et l'épaisseur du joint de colle ;
- la température de l'air et des pièces à assembler.

Les critères liés au bois sont :

- l'essence du bois ;
- le taux d'humidité des pièces à assembler ;
- la qualité des surfaces à coller (rugosité).

Et les critères liés à la géométrie des aboutages sont :

- les caractéristiques géométriques de l'enture multiple ;
- la dimension des surfaces de collage ;
- la précision de façonnage ;
- la direction des fibres.

Le comportement mécanique des joints collés dépend fortement des propriétés mécaniques de la colle utilisée et donc de son comportement.

De manière générale, la rupture d'un joint collé correspond à la séparation des deux pièces assemblées. La rupture est le plus souvent amorcée à partir d'une entaille ou d'un défaut préexistant [121]. Selon Irwin [122], les mouvements possibles des lèvres de la fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants de rupture (figure 4.6) :

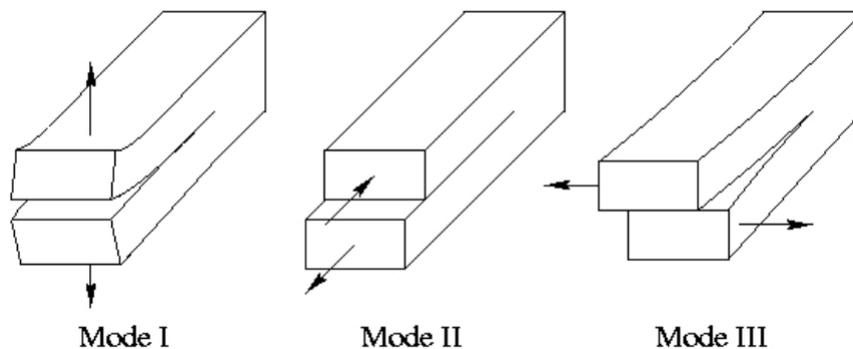


Figure 4.6 – Les différents modes de rupture d'un joint de colle [122, 123]

- le mode I, ou mode par ouverture, correspond à un écartement relatif des deux surfaces de la fissure par ouverture angulaire ;
- le mode II fait référence à un cisaillement plan ;
- le mode III, ou mode de cisaillement anti-plan correspond à un glissement transversal des deux surfaces de la fissure, en sens opposés, mais cette fois dans une direction parallèle au front de la fissure.

Le mode I est considéré comme le plus sévère en terme d'extension de la fissure ; cependant, une fois amorcée et pour des sollicitations mixtes ou des géométries complexes, la fissure a tendance à bifurquer, et reste donc rarement rectiligne (2D ou 3D).

Dans le cas des assemblages collés, on peut également distinguer différents modes de rupture en fonction de l'endroit où intervient la fissuration (figure 4.7) :

- la rupture peut être confinée dans l'un des deux substrats ou dans l'adhésif, ce qui signifie que la cohésion d'un de ces matériaux est plus faible que l'adhésion entre constituants. On parle alors de rupture cohésive ;
- la rupture peut intervenir à l'interface et on parle alors de rupture adhésive ou interfaciale. Cependant, la rupture se fait parfois non pas à l'interface stricto sensu, mais très proche de celle-ci. On parle de rupture dans "l'interphase" car la proximité d'une interface peut être synonyme de gradient de propriétés ;
- la rupture peut également être mixte si elle est cohésive par endroit et adhésive à d'autres.

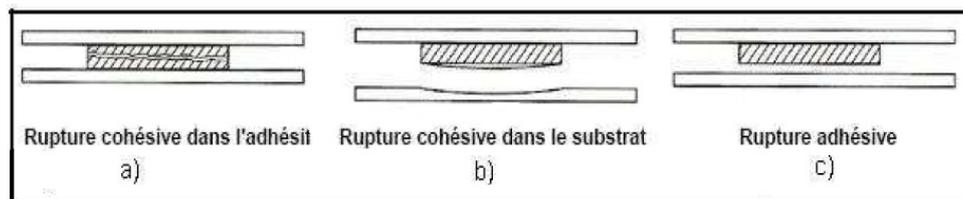


Figure 4.7 – Présentation schématique des modes de rupture des joints collés selon Cognard [124]

Pour la simulation du comportement des joints collés, il existe plusieurs outils numériques, utilisant différentes approches qui permettent de prédire avec précision l'initiation et la propagation de fissures dans le joint. Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser le modèle cohésif disponible dans le logiciel Abaqus. Les versions récentes d'Abaqus offrent la possibilité d'utiliser un modèle basé sur des surfaces cohésives au lieu d'éléments finis cohésifs.

Ainsi, le comportement cohésif initial (avant rupture) est considéré comme linéaire élastique et obéit à une loi de traction-séparation (figure 4.8).

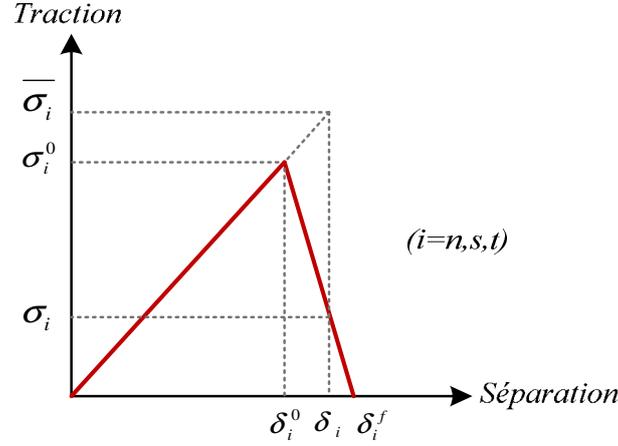


Figure 4.8 – Comportement élastique linéaire de traction-séparation [125].

Ce modèle est assez largement employé pour simuler le comportement de ce type d'application, comme en témoigne la littérature [125–130].

L'expression de la loi de traction-séparation est donnée par l'équation (4.5) :

$$\begin{pmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{sn} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{tn} & K_{ts} & K_{tt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

σ_n , σ_s , σ_t représentent les trois composantes de contraintes normale et tangentielles, respectivement. δ_n , δ_s , δ_t sont les déplacements de séparation dans la direction normale et les deux directions orthogonales, respectivement.

L'initiation de l'endommagement est régie par un critère quadratique en contrainte maximum [125] :

$$\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_n^0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_s^0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_t^0}\right)^2 = 1 \quad (4.6)$$

Où σ_n^0 , σ_s^0 , σ_t^0 représentent les contraintes limites dans les directions normale et tangentielle, respectivement.

Afin de modéliser la dégradation progressive du joint de colle, une loi d'évolution linéaire a été adoptée et les composantes de contraintes sont affectées par une variable d'endommagement, D , comme suit :

$$\sigma_n = \begin{cases} (1 - D) \bar{\sigma}_n, & \bar{\sigma}_n \geq 0 \\ \bar{\sigma}_n, & \bar{\sigma}_n \leq 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\sigma_s = (1 - D) \bar{\sigma}_s \quad (4.8)$$

$$\sigma_t = (1 - D) \bar{\sigma}_t \quad (4.9)$$

Avec : $\bar{\sigma}_n$, $\bar{\sigma}_s$, $\bar{\sigma}_t$ sont les contraintes calculées selon la loi de traction-séparation sans endommagement.

La variable d'endommagement, D , pour une évolution linéaire est évaluée en fonction du déplacement de séparation effectif δ_m comme suit :

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (4.10)$$

Avec : $\delta_m = \sqrt{(\delta_n)^2 + (\delta_s)^2 + (\delta_t)^2}$.

δ_m^0 , δ_m^f sont les déplacements de séparation effectifs au moment de l'initiation de l'endommagement et à l'instant de la rupture complète, respectivement. δ_m^{max} représente le déplacement effectif maximal atteint durant l'histoire du chargement.

Quant au mode de rupture mixte, combinant mode I et mode II (figure 4.9), il obéit aux relations suivantes :

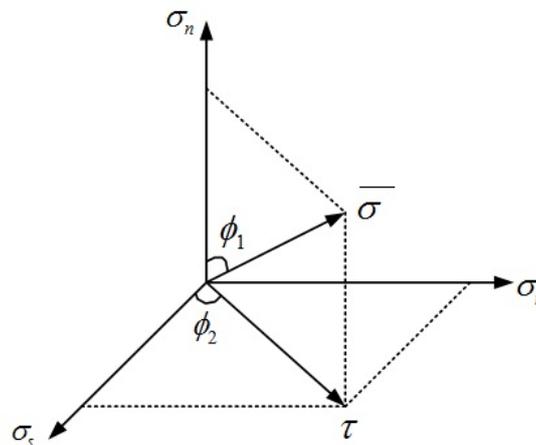


Figure 4.9 – Représentation du mode de rupture mixte [125].

$$\phi_1 = \left(\frac{2}{\Pi}\right) \tan^{-1}\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right) \quad (4.11)$$

$$\phi_2 = \left(\frac{2}{\Pi}\right) \tan^{-1}\left(\frac{\sigma_t}{\sigma_s}\right) \quad (4.12)$$

Avec : $\tau = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_t^2}$

4.3 Identification des paramètres matériaux

Dans cette partie, nous présentons l'identification de l'ensemble des paramètres des modèles de comportement utilisés pour la simulation numérique des poutres multi-couches, à savoir : le comportement élastique orthotrope, élasto-plastique anisotrope du hêtre ainsi que le comportement de traction-séparation modélisant les joints de colle.

L'identification consiste à trouver un jeu de paramètres du modèle numérique minimisant au mieux l'écart entre la réponse expérimentale et la réponse numérique. Pour ce faire, nous avons choisi d'effectuer l'identification sur la base des réponses (courbes) moyennes expérimentales. Ainsi, dans la procédure d'identification, les paramètres du modèle ont été définis comme variables d'optimisation et l'écart entre la courbe moyenne expérimentale et numérique comme fonction objectif (ou fonction coût) à minimiser.

4.3.1 Paramètres du Hêtre

Les paramètres du hêtre nécessaires pour alimenter la loi de comportement ont été identifiés sur la base des essais de flexion 4 points, décrits dans le Chapitre 3.

En ce qui concerne les paramètres d'élasticité orthotrope, seul le module d'élasticité longitudinal, E_L , est issu des tests expérimentaux. En effet, Afin de respecter les conditions de symétrie du tenseur d'élasticité, les autres paramètres (coefficients de Poisson, modules de cisaillement et modules d'élasticité dans les deux directions orthogonales) ont été extraits des données proposées dans le livre de Guitard [131]. En ce qui concerne les feuillus, les modules d'élasticité dans les trois directions d'orthotropie, obéissent aux relations suivantes : $E_L/E_R=8$ et $E_L/E_T=13,5$.

Pour la simulation numérique du test de flexion, un modèle éléments finis 2D a été adopté (figure 4.10). En raison de la symétrie, seule la moitié du modèle est discrétisée par l'élément fini triangulaire à 3 noeuds en contraintes planes, linéaire en déplacements. La taille globale du maillage est de 5 mm. Le calcul est réalisé en déplacement imposé jusqu'à rupture.

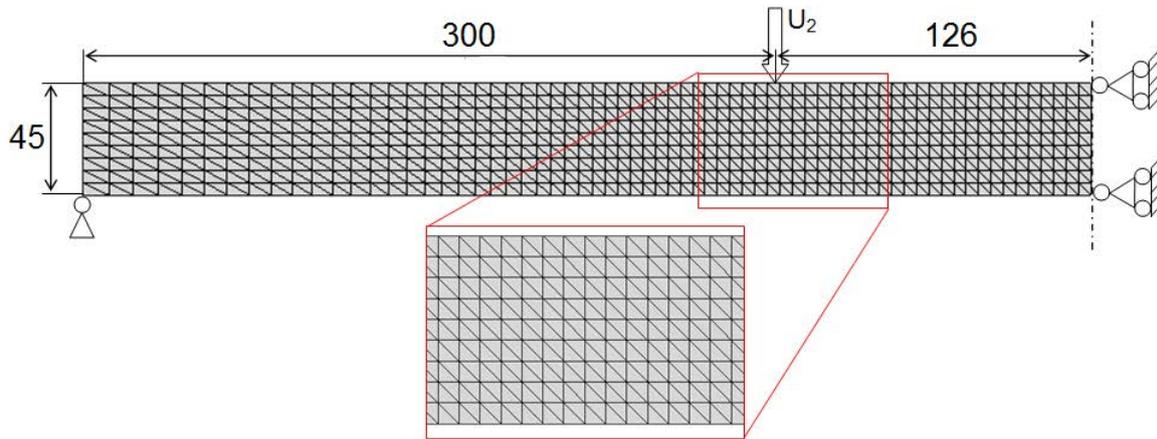


Figure 4.10 – Modèle éléments finis de la lame massive.

La figure 4.11 illustre la comparaison entre la courbe numérique force-flèche obtenue et les courbes expérimentales. On observe une bonne corrélation entre la simulation numérique et l'expérience. La force maximale numérique (18933 N) est légèrement supérieure à la moyenne expérimentale (18532 N). La flèche à rupture numérique (33,22 mm) est, en revanche, légèrement inférieure à la moyenne expérimentale (33,61 mm).

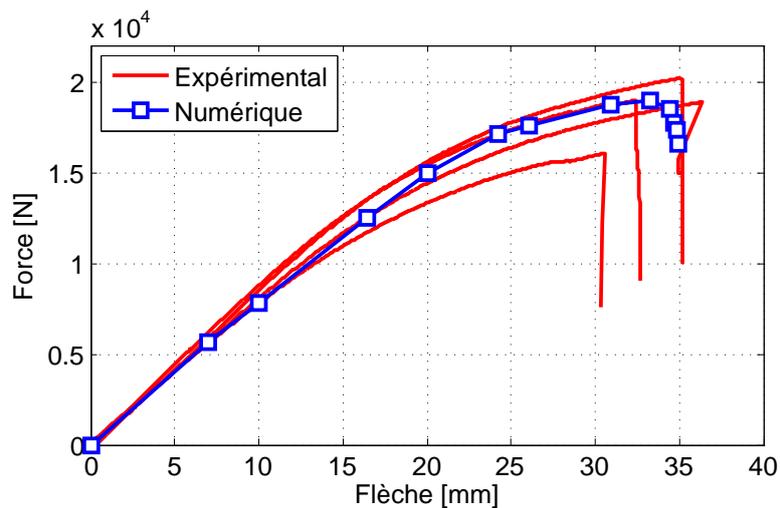


Figure 4.11 – Courbes force-flèche expérimentales et numérique.

Les paramètres du comportement élastique orthotrope du Hêtre sont résumés dans le tableau 4.1 et les paramètres du comportement non-linéaire sont donnés dans le tableau 4.2.

Propriétés élastiques	Valeurs
E_L (MPa)	14788
E_R (MPa)	1848
E_T (MPa)	1087
G_{LR} (MPa)	1260
G_{TL} (MPa)	971
G_{RT} (MPa)	366
ν_{RT}	0,67
ν_{LT}	0,46
ν_{LR}	0,39
ν_{TR}	0,38
ν_{RL}	0,048
ν_{TL}	0,033

Tableau 4.1 – Propriétés élastiques du Hêtre [4, 55].

Plasticité	σ_c (MPa)	Q (MPa)	b		
	30	110	5		
	F	G	H	N	L=M
	0,99	0,09	0,01	1,7	1,5
Rupture fragile	$f_{t,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{t,90}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)	f_v (MPa)
	175	55	1,5	6,5	5

Tableau 4.2 – Paramètres de plasticité avec rupture fragile.

4.3.2 Paramètres de la colle

Dans cette partie, les paramètres de la colle (MUF) ont été identifiés en mode I et en mode II. Le cas test DCB (Double Cantilever Beam), largement utilisé dans la littérature [127, 132–135], est adopté pour simuler le mode I (mode d'ouverture). Les paramètres du mode II ont été identifiés sur la base du test de cisaillement pur décrit dans le Chapitre 3, en ce qui concerne la résistance de la colle.

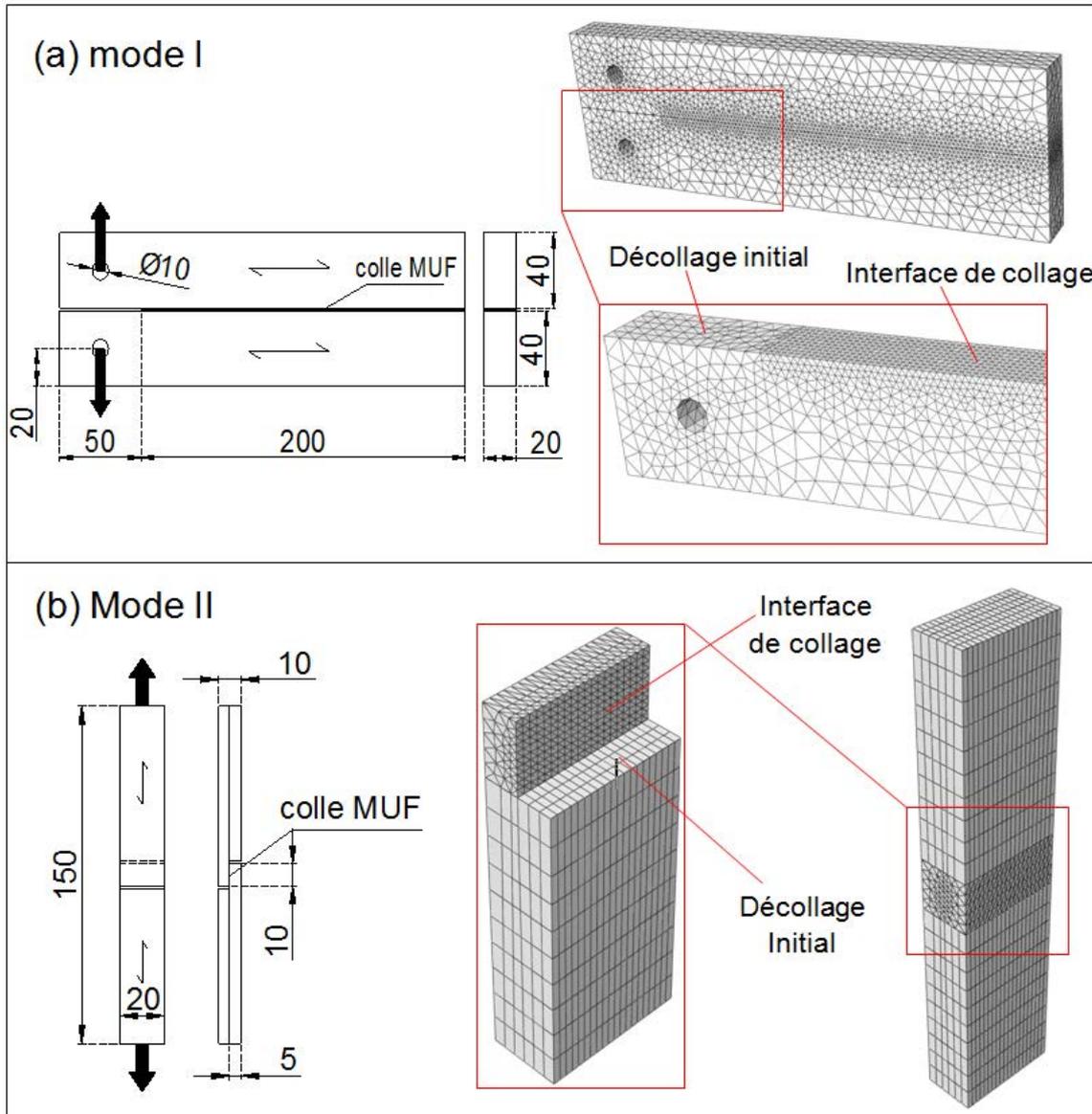


Figure 4.12 – Modèles éléments finis :(a) mode I, (b) mode II.

Un modèle éléments finis 3D est utilisé pour la simulation des deux modes précédents (figure 4.12). Les maillages ont été réalisés avec les éléments hexahédrique, à 8-noeuds, et tétraédrique, à 4 noeuds, linéaires en déplacements et à integration réduite (élément C3D8R, élément C3D4R d'Abaqus). Les surfaces collées ont été suffisamment discrétisées pour une meilleure précision des résultats.

La comparaison entre les réponses numériques et les réponses moyennes expérimentales est donnée en figure 4.13 et figure 4.14 pour le mode I et II, respectivement.

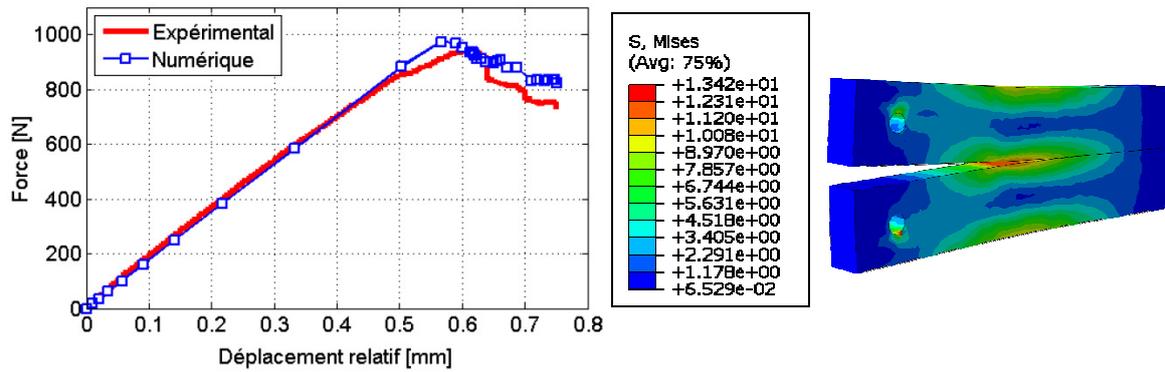


Figure 4.13 – Courbes force-separation expérimentale et numérique pour le mode I.

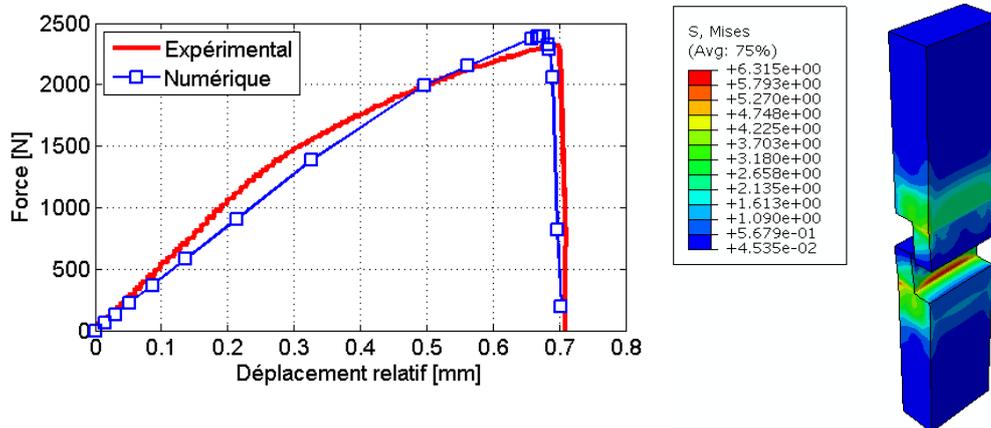


Figure 4.14 – Courbes force-glissement expérimentale et numérique pour le mode II.

On observe une bonne corrélation entre les réponses numériques et les réponses moyennes expérimentales tant en mode I qu'en mode II. L'ensemble des paramètres identifiés pour la colle MUF sont résumés dans le tableau 4.3, pour les deux modes I et II.

Mode I		
K_n (N/mm ² /mm)	σ_n^0 (N/mm ²)	δ_n^{max} (mm)
10	2.5	0.005
Mode II		
$K_t=K_s$ (N/mm ² /mm)	$\sigma_t^0 = \sigma_s^0$ (N/mm ²)	$\delta_t^{max} = \delta_s^{max}$ (mm)
32	12.5	0.00005

Tableau 4.3 – Paramètres du modèle cohésif pour les modes I et II.

4.4 Simulation du comportement des aboutages

Après avoir identifié les paramètres du hêtre et de la colle, nous avons choisi de simuler numériquement le comportement d'une lamelle aboutée avant de procéder à la simulation du comportement des poutres multi-couches.

D'un point de vue comportemental, l'aboutage représente un mode de rupture mixte combinant le mode I (mode d'ouverture) et le mode II (mode de cisaillement dans le plan) [136].

4.4.1 Modèle éléments finis

Un modèle éléments finis 2D a été utilisé pour la simulation du comportement de la lamelle aboutée. Le modèle est discrétisé par l'élément fini triangulaire, à 3 noeuds en contraintes planes. La taille globale du maillage est de 10 mm. Afin de prédire proprement l'endommagement de la colle, le maillage a été affiné (taille : 1 mm) au niveau de l'aboutage (figure 4.15). La simulation est réalisée en déplacement imposé jusqu'à rupture finale.

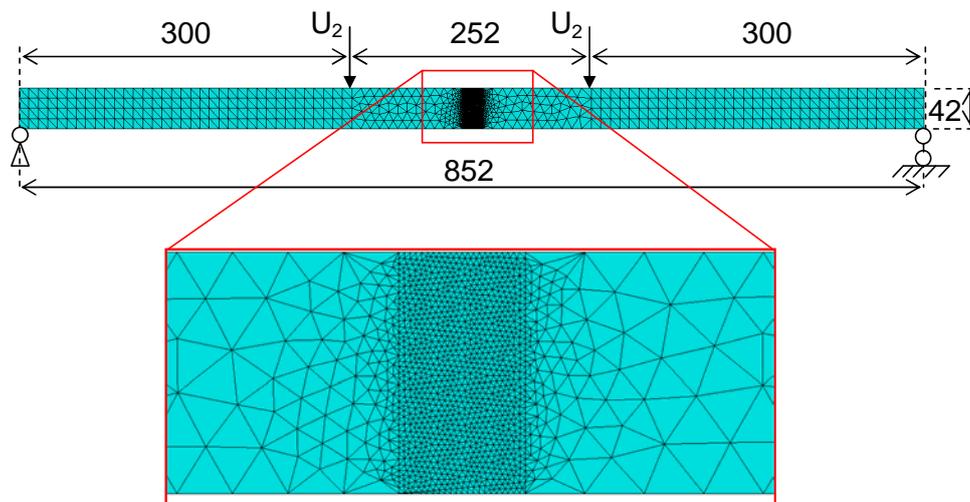


Figure 4.15 – modèle éléments finis 2D de la lame aboutée [4, 55].

4.4.2 Résultats et discussion

La figure 4.16 présente une comparaison entre les courbes force-flèche expérimentales et numérique. On observe une bonne corrélation entre l'expérience et la simulation numérique. La force maximale du modèle numérique (10405 N) est légèrement supérieure à la moyenne expérimentale (10275 N). La valeur numérique (20 mm) de la flèche à rupture est presque confondue avec la valeur moyenne expérimentale (22 mm). Le modèle cohésif est donc capable de prédire de manière satisfaisante le comportement mécanique de l'aboutage.

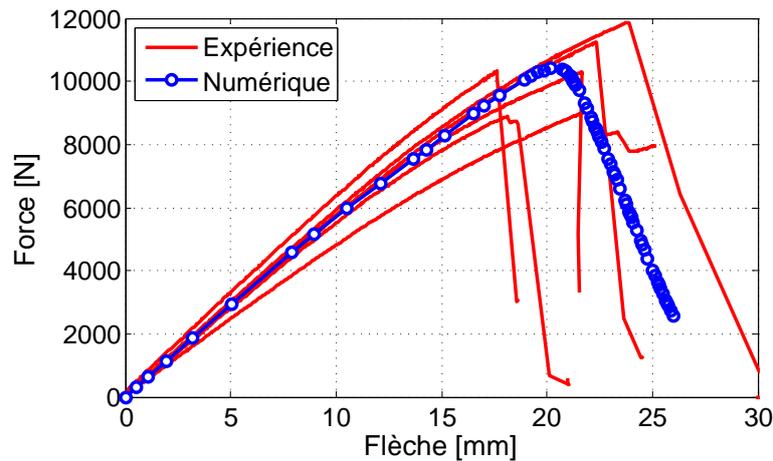


Figure 4.16 – Courbes force-flèche expérimentales et numérique de la lamelle aboutée [4, 55].

La figure 4.17 présente une comparaison du mode de rupture expérimental et du mode de rupture numérique. On remarque que le mode de rupture numérique est similaire à celui observé expérimentalement. De façon équivalente à l'observation expérimentale, la rupture est amorcée dans la dent inférieure de l'enture (fibre tendue de l'aboutage) et se propage ensuite de la fibre tendue vers la fibre comprimée, suivant le déplacement de l'axe neutre, jusqu'à ouverture complète de l'aboutage.

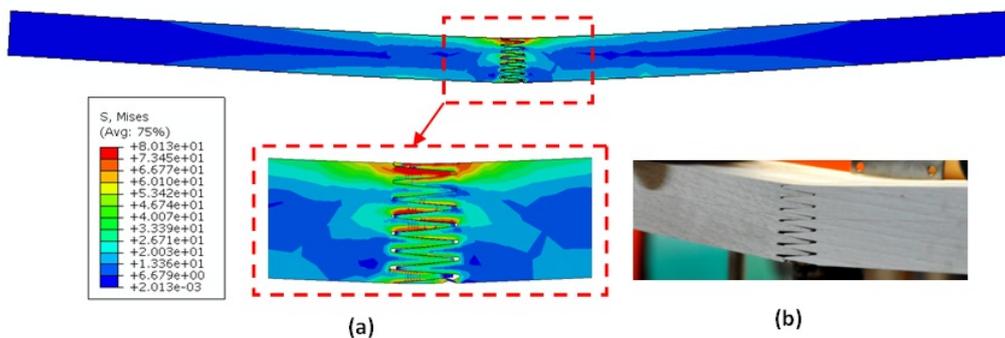


Figure 4.17 – Modes de rupture : (a) numérique, (b) expérimental [4, 55].

4.5 Simulation du comportement des poutres multi-couches

4.5.1 Poutres sans aboutage

Dans cette partie, nous présentons les résultats des simulations numériques concernant les poutres en bois reconstitué à 2 lames (DUO) et 3 lames (TRIO) sans aboutages.

4.5.1.1 Modèles éléments finis

Un modèle éléments finis 2D est utilisé pour reproduire le comportement des poutres DUO et TRIO sans aboutage en flexion 4 points. En raison de la symétrie, seule la moitié du modèle a été discrétisée (figure 4.18).

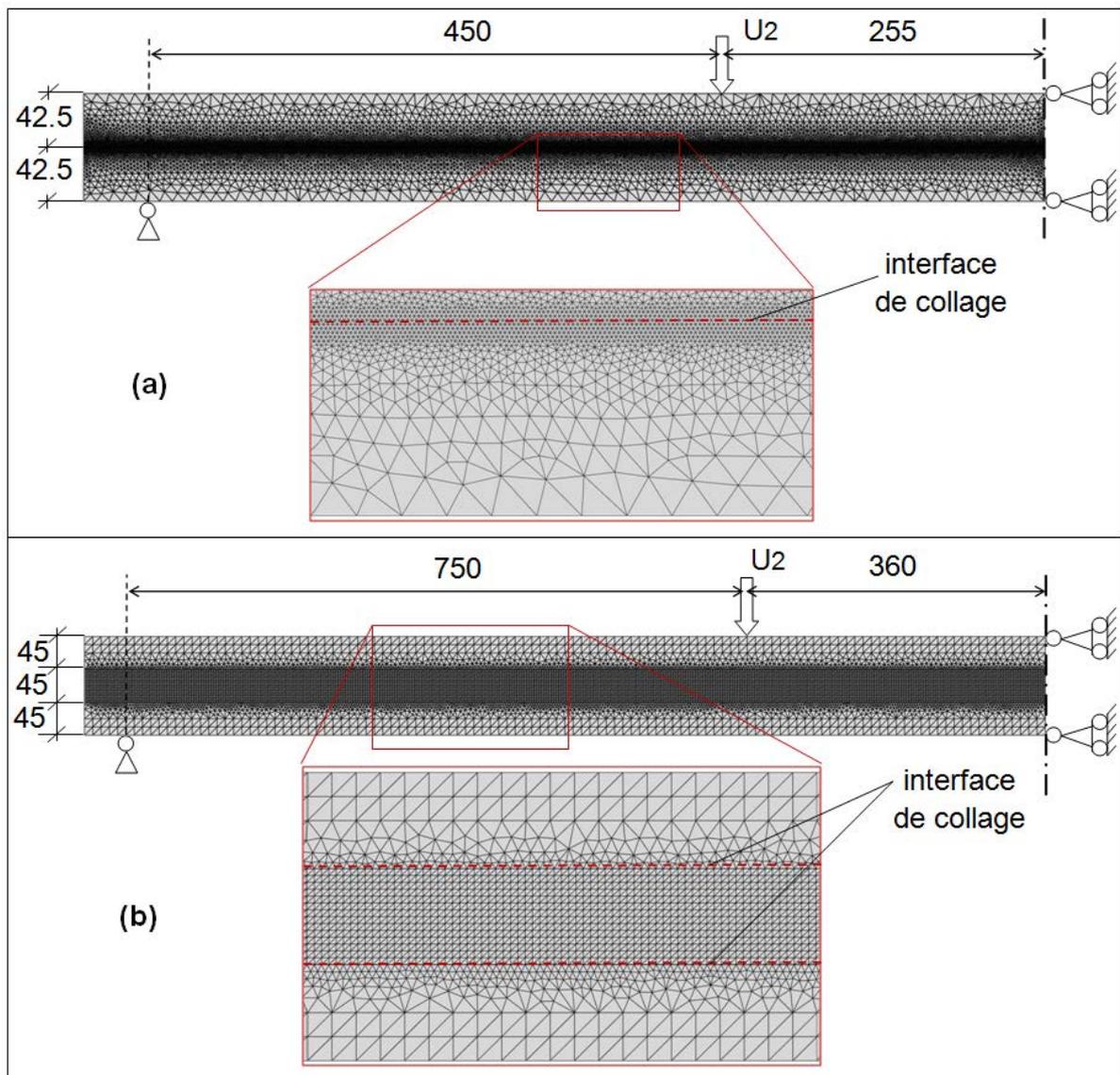


Figure 4.18 – Modèles éléments finis : (a) poutre DUO, (b) poutre TRIO.

Les modèles sont discrétisés par l'élément fini triangulaire à 3 noeuds, linéaire en déplacements, en contraintes planes (élément CPS3 d'Abaqus [125]). Les maillages ont été affinés au niveau des surfaces de collage pour une meilleure précision des calculs. Les simulations numériques sont réalisées par déplacement imposé jusqu'à rupture complète.

4.5.1.2 Résultats et discussion

La figure 4.19 illustre la comparaison des courbes force-flèche expérimentales et numériques concernant les poutres DUO et TRIO sans aboutages. On observe une assez bonne corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux. Les différents résultats en termes de forces maximales et de flèches à rupture sont résumés dans le tableau 4.4.

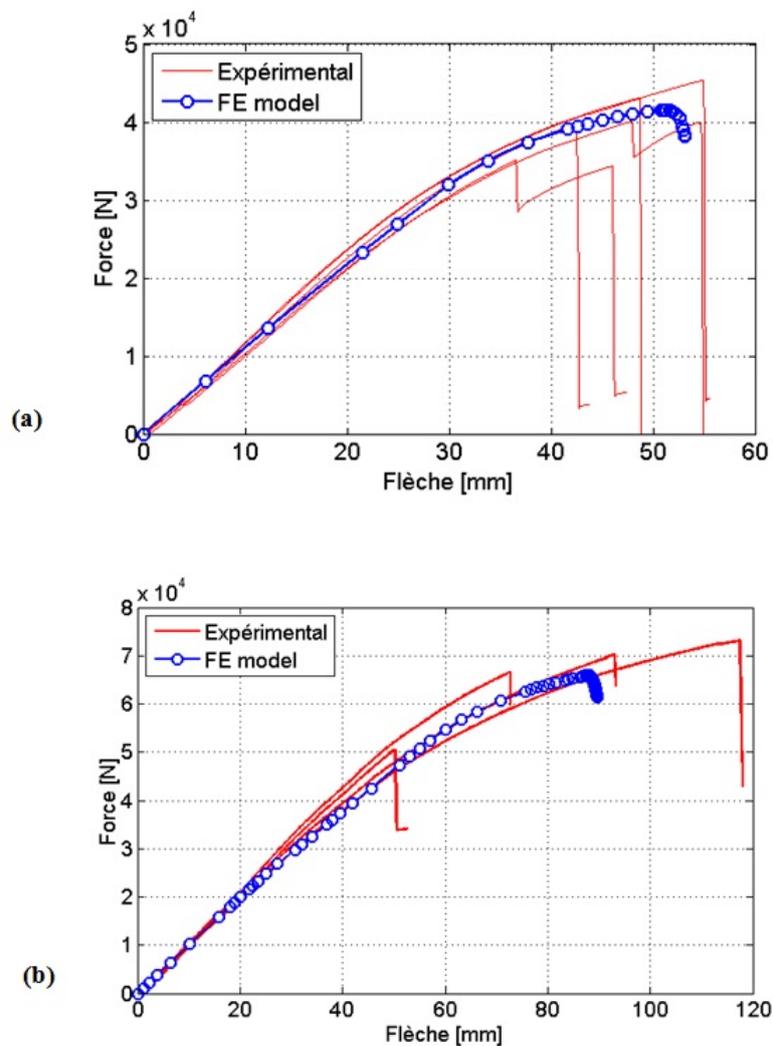


Figure 4.19 – Courbes force-flèche expérimentales et numérique (a) poutre DUO sans aboutage, (b) poutre TRIO sans aboutage.

		Expérimental	Numérique	Précision (%)
<i>DUO sans aboutage</i>	Force maximale (N)	40692±3880	41453	+1,9
	Flèche à rupture (mm)	52,7±7,9	51	-3,2
<i>TRIO sans aboutage</i>	Force maximale (N)	65145±10080	65957	+1,2
	Flèche à rupture (mm)	83,4±28,6	88	+5,5

Tableau 4.4 – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques.

4.5.2 Poutres avec aboutages

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulations des poutres multicouches, DUO et TRIO, avec aboutages.

4.5.2.1 Modèles éléments finis

De manière analogue, les modèles éléments finis sont présentés en figure 4.20 pour le DUO avec aboutage et pour le TRIO avec aboutages, respectivement.

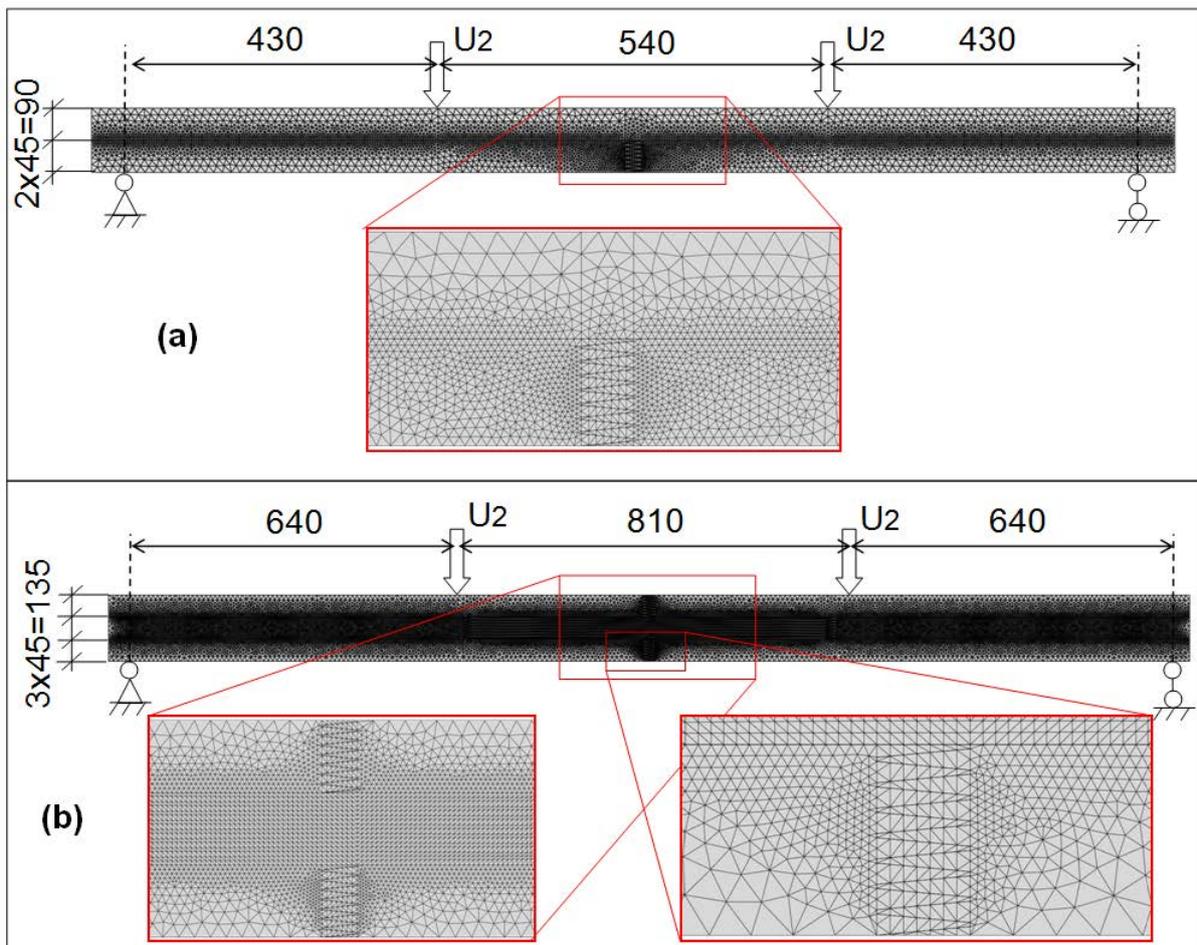


Figure 4.20 – Modèles éléments finis : (a) poutre DUO avec aboutage, (b) poutre TRIO avec aboutages.

4.5.2.2 Résultats et discussion

La figure 4.21 illustre la comparaison entre la réponse numérique et les réponses expérimentales en ce qui concerne les poutres DUO avec aboutage. La réponse numérique obtenue est représentative de la moyenne expérimentale. Les résultats sont résumés dans le tableau 4.5. On constate qu'il n'y a qu'un écart faible lors de comparaison de la force maximale et de la flèche à rupture du modèle numérique et de la moyenne expérimentale (2,3% de précision pour la force maximale et 7,7% pour la flèche à rupture).

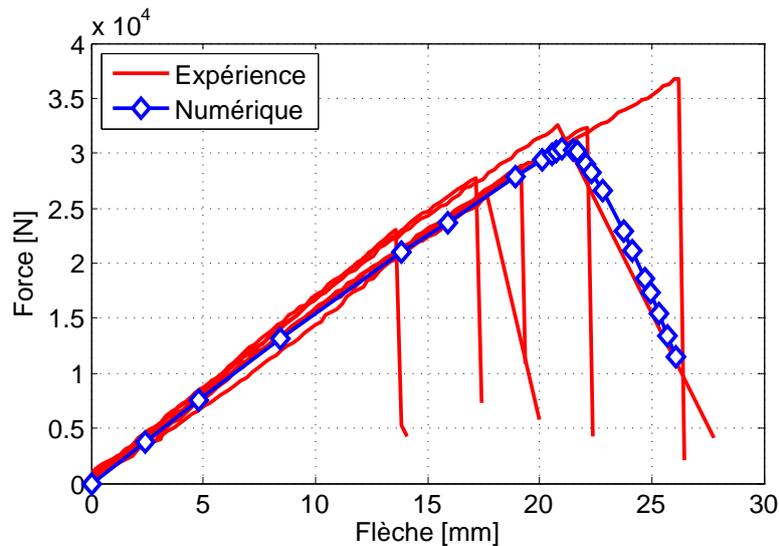


Figure 4.21 – Courbes force-flèche expérimentale et numérique des DUO avec aboutage [55].

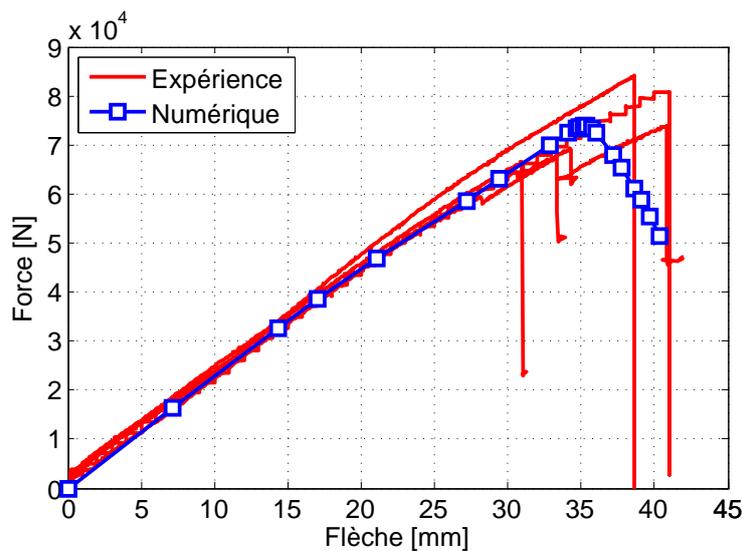


Figure 4.22 – Courbes force-flèche expérimentale et numérique des TRIO avec aboutages [55].

Les mêmes remarques et analyses peuvent être faites en ce qui concerne les poutres TRIO avec aboutage (figure 4.22).

On observe que la courbe numérique donne un point de rupture qui est très proche de la moyenne expérimentale (0,8% de précision pour la force maximale et 4,0% pour la flèche à rupture (tableau 4.5)). Les résultats des différentes simulations numériques sont résumés dans le tableau 4.5.

		Expérimental	Numérique	Précision (%)
<i>DUO avec aboutage</i>	Force maximale (N)	29622±4613	30384	+2,3
	Flèche à rupture (mm)	19,5±4,0	21,0	+7,7
<i>TRIO avec aboutage</i>	Force maximale (N)	74627±7878	74042	-0,8
	Flèche à rupture (mm)	36,9±4,6	35,4	-4,0

Tableau 4.5 – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques.

Par ailleurs, les prédictions numériques en ce qui concerne les modes de rupture des poutres DUO et TRIO ont été également comparées aux observations expérimentales (figures 4.23 et 4.24).

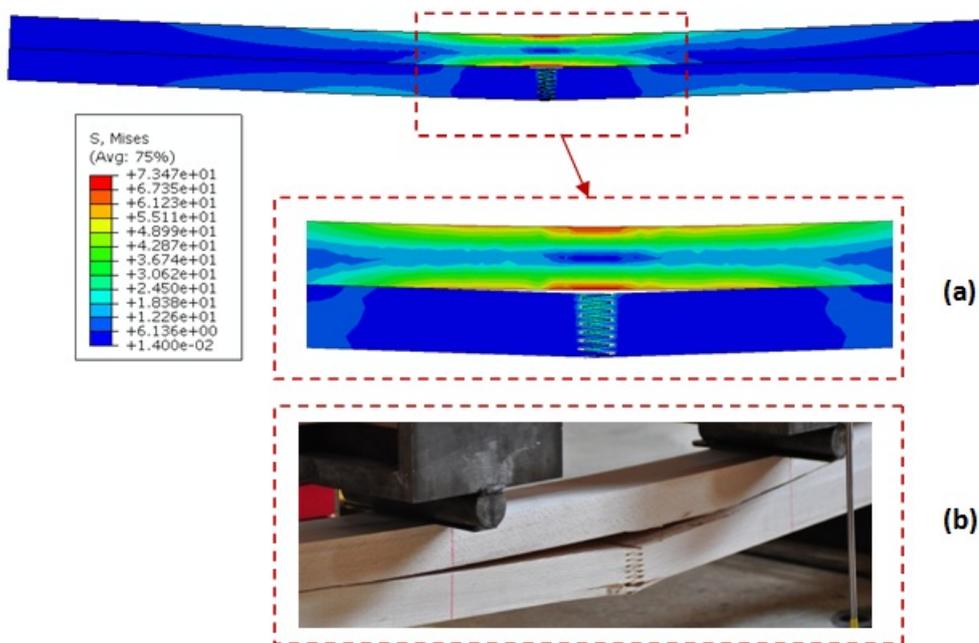


Figure 4.23 – Mode de rupture du DUO avec aboutage : (a) numérique, (b) expérience [55].

Nous pouvons observer que le mode de rupture du DUO et du TRIO prédit par la simulation numérique est cohérent avec l'observation expérimentale. La figure 4.23 (a) montre le mode de

rupture numérique du DUO. L'enture a rompu en premier, suivie d'une fissure du joint de colle à l'interface des lames, conduisant ainsi à la rupture complète de la poutre. Ceci a été observé de la même manière pour le test expérimental (figure 4.23 (b)).

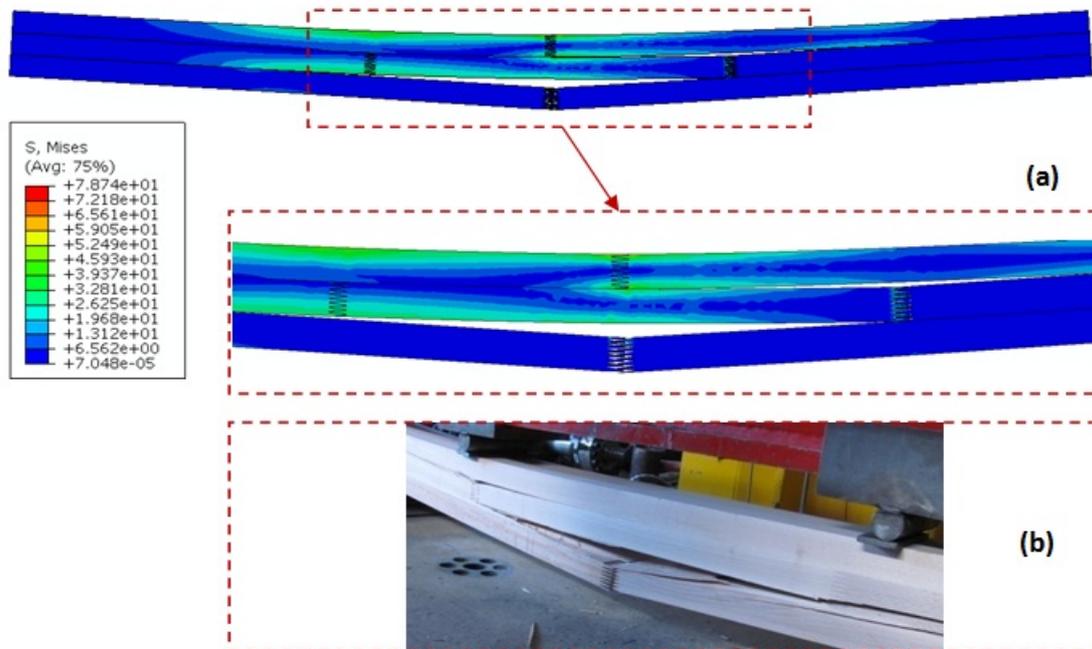


Figure 4.24 – Mode de rupture du TRIO avec aboutages : (a) numérique, (b) expérience [55].

Le mode de rupture du TRIO avec aboutage est présenté dans la figure 4.24. Il montre un mode de rupture similaire à celui des poutres DUO. Les premières ruptures s'amorcent souvent dans les entures. En fait, l'aboutage situé dans la zone de traction influence fortement la rupture globale du BMR. La rupture des entures est un facteur réducteur des poutres en BMR.

4.6 Etude paramétrique

Compte tenu des résultats expérimentaux obtenus dans le chapitre 3 et des résultats numériques de ce chapitre, il est clairement démontré que les aboutages par entures multiples sont des facteurs réducteurs des poutres en MBR, qu'il conviendrait d'améliorer. Par ailleurs, il est bien connu qu'un nombre important de paramètres influent sur la résistance des aboutages et donc sur la performance globale des poutres en bois reconstitué par collage. Ces paramètres sont liés à la qualité et la performance du joint de colle, à la classe de résistance du bois, la géométrie des aboutages, l'épaisseur des lamelles à assembler,...etc.

Dans cette partie, nous présentons les résultats d'une étude paramétrique en exploitant les

modèles de comportement validés précédemment. Nous allons nous intéresser à trois paramètres considérés comme influents : l'épaisseur des lamelles, l'élasticité (module d'élasticité) des lamelles et la géométrie des aboutages.

4.6.1 Influence de l'épaisseur

Afin d'étudier l'influence de l'épaisseur des lamelles sur le comportement global des poutres reconstituées, nous avons fait varier le nombre de lamelles dans une section carrée constante de 135 mm x 135 mm, selon le schéma de la figure 4.25, impliquant ainsi 4 épaisseurs : 67,5 mm ; 45 mm ; 33,75 mm et 27 mm.

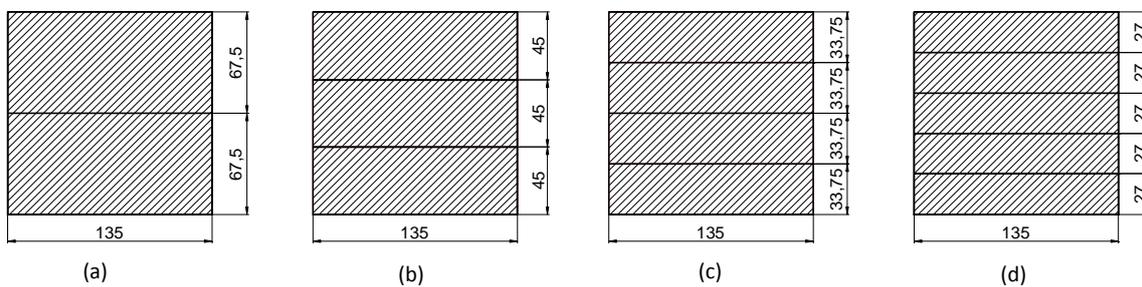


Figure 4.25 – Les différentes configurations des poutres : (a) 2 lames, (b) 3 lames, (c) 4 lames, (d) 5 lames [55].

Selon les résultats donnés en figure 4.26, il apparaît que plus l'épaisseur de la lamelle est petite, plus la résistance des poutres est élevée. Ce résultat est en cohérence avec les observations expérimentales réalisées dans [89] concernant l'influence de l'épaisseur des lamelles sur les tests de délamination. En effet, plus l'épaisseur de la lamelle est faible, moins il y a de la concentration de contraintes au niveau des joints de colle et des aboutages.

En pratique, avec une faible épaisseur des lamelles les risques de concentration de contraintes dans les joints de colle due aux retraits transverses du bois sont aussi réduits [89].

Les valeurs maximales de résistance en flexion sont de 73510 N, 74042 N, 76871 N, 77494 N pour le cas de 2 lames, 3 lames, 4 lames, et 5 lames, respectivement. Notons également une légère diminution du module d'élasticité lorsque le nombre de lames augmente.

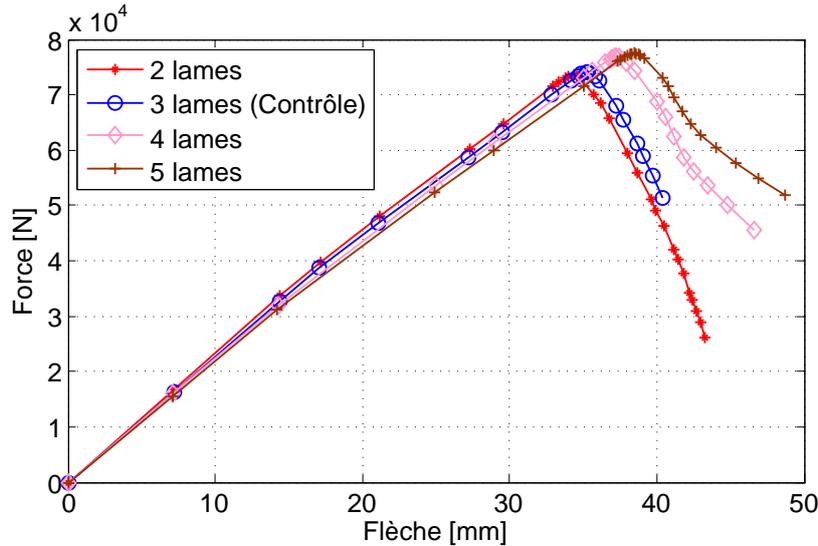


Figure 4.26 – Courbe force/flèche en fonction de l'épaisseur des lamelles [55].

4.6.2 Influence du module d'élasticité

Les performances globales des poutres en bois reconstitué par collage dépendent directement de la qualité du bois des planches constitutives. En pratique, il existe des poutres de qualité dite homogène et des poutres de qualité dite combinée. Dans le premier cas, la poutre est réalisée avec des planches de même classe (qualité), tandis que dans le deuxième cas, celle-ci est composée d'un panachage de qualités différentes, avec les meilleures qualités au niveau des faces extrêmes de la section, permettant des performances optimales en flexion.

Afin d'étudier l'influence de la qualité des planches sur le comportement global des poutres, nous avons choisi de faire varier le module d'élasticité des planches, en ce qui concerne la poutre DUO avec aboutage situé dans la lamelle tendue (lamelle inférieure), comme suit :

- Le module d'élasticité est uniforme dans les deux lamelles et prend les valeurs suivantes : $E_L=14788$ MPa, $E_L=12000$ MPa, $E_L=10000$ MPa (Cas 1) ;
- Le module d'élasticité de la lamelle supérieure est fixé à $E_L=14788$ MPa, tandis que le module d'élasticité de la lamelle inférieure est variable : $E_L=14788$ MPa, $E_L=12000$ MPa, $E_L=10000$ MPa (Cas 2).

Sur la figure 4.27, on peut remarquer que la variation uniforme du module d'élasticité n'a aucun effet sur la résistance du DUO. L'effet est, cependant, visible en terme de rigidité globale des poutres DUO.

A travers la figure 4.28, il apparaît évident que moins le module d'élasticité de la lamelle inférieure

est important, plus la résistance est améliorée. On note également une légère diminution de la raideur globale de la poutre mais, moins prononcée que dans le cas 1, c'est logique. Ceci peut être expliqué par le fait que dans le cas des planches ayant un module d'élasticité élevé le risque d'aboutage défailtant augmente, à cause de la concentration des contraintes au niveau de l'enture multiple.

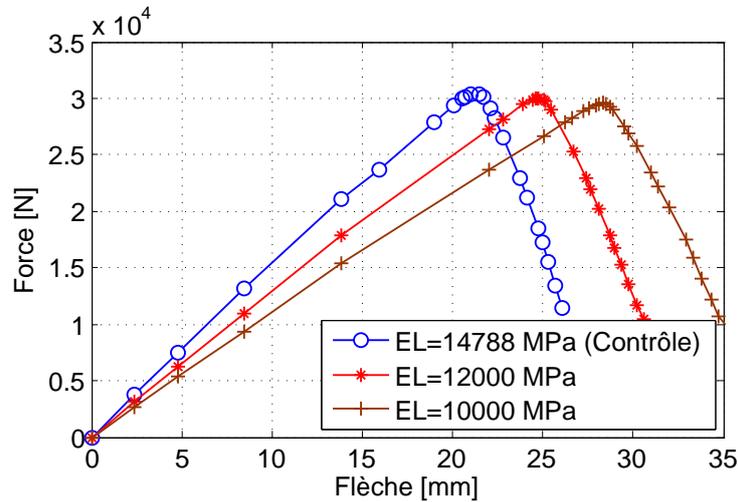


Figure 4.27 – Effet du module d'élasticité sur la performance mécanique des poutres DUO avec aboutage (Cas 1) [55].

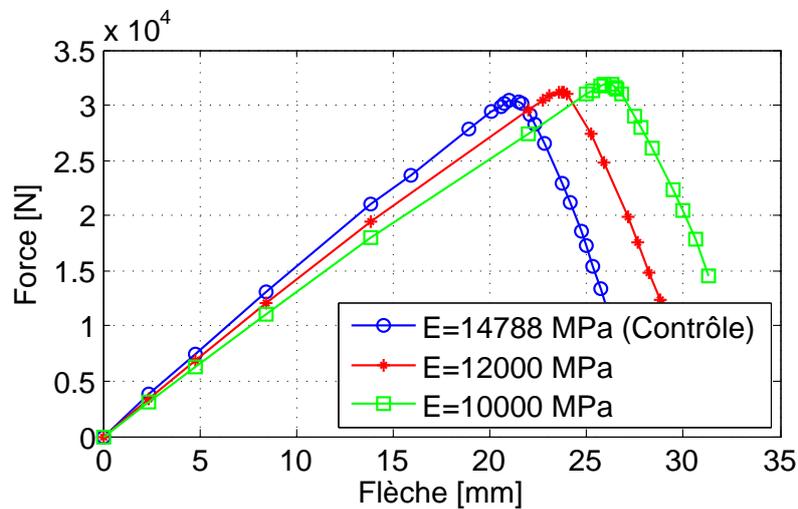


Figure 4.28 – Effet du module d'élasticité sur la performance mécanique des poutres DUO avec aboutage (Cas 2) [55].

4.6.3 Influence de la géométrie de l'aboutage

La géométrie de l'enture multiple (figure 4.29) est un élément essentiel de la résistance mécanique de l'aboutage. En effet, les paramètres géométriques (L , P , b_i) de l'enture multiple conditionnent

la surface de collage soumise à l'effort. Ainsi, la résistance d'un aboutage est fortement dépendante de l'angle du plan de collage par rapport à la direction de sollicitation.

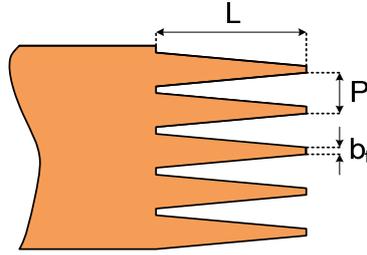


Figure 4.29 – Géométrie de l'enture multiple : L : longueur ; P : pas ; b_t : épaisseur de l'extrémité (la géométrie testée : $L=22$; $P=6$; $b_t=1$).

Rappelons que la norme EN 14080 [9] recommande les profils géométriques données dans le tableau 4.6.

Longueur (L : mm)	Pas (P : mm)	Epaisseur de l'extrémité (b_t : mm)
15	3.8	0.42
20	5.0	0.5
20	6.2	1.0
30	6.2	0.6

Tableau 4.6 – Géométries recommandées par la norme EN 14080 [9].

Cependant, ces limites réglementaires ne sont valables que pour des bois résineux, car elles sont basées exclusivement sur des résultats de tests expérimentaux effectués sur ces essences.

Ici, nous nous proposons d'étudier les effets des différents paramètres géométriques (L , P , b_t) sur la résistance en flexion d'une lamelle aboutée en hêtre. Pour ce faire, nous avons utilisé un plan d'expérience orthogonal $L_4(2^3)$ [137, 138] de type Taguchi (tableau 4.7).

Niveau	L (mm)	P (mm)	b_t (mm)
1	15	3.8	0.42
2	30	6.2	1.0

Tableau 4.7 – Paramètres géométriques et leurs niveaux.

Ce plan d'expérience possède 3 paramètres, à deux niveaux chacun, conduisant ainsi à quatre simulations numériques pour évaluer la réponse du système.

Les plans d'expérience de type Taguchi sont très largement utilisés dans plusieurs domaines, notamment en mécanique des structures [139–144]. Cette méthode permet d'étudier l'effet des paramètres d'un processus ou d'un système physique à moindre coût.

Pour des raisons de faisabilité, les paramètres géométriques sont bornés (tableau 4.7) par les valeurs minimales (niveau 1) et maximales (niveau 2), en accord avec la norme EN 14080 [9].

Ici, on s'intéresse à l'effet des paramètres (L, P, b_t) géométriques sur la résistance à la rupture (F_{max}) de la lamelle aboutée soumise à la flexion.

Pour évaluer la contribution de chaque paramètre sur la résistance des aboutages, l'effet moyen des paramètres doit être calculé par rapport à la valeur moyenne arithmétique de l'évaluation considérée [142]. Cette valeur moyenne arithmétique doit être estimée par l'équation (4.13).

$$\overline{F_{max}} = \frac{\sum_{n=1}^4 (F_{max})_n}{4} \quad (4.13)$$

Tout d'abord, la valeur moyenne arithmétique de chaque évaluation est estimée sur la base des variations des paramètres du niveau 1 à 2. Par exemple, la valeur moyenne arithmétique de la longueur de l'enture L , à son niveau k , est donnée par l'équation (4.14) :

$$\overline{F(L_k)} = \frac{\sum_{1 \leq i \leq r(L_k)} (F_i(L_k))}{r(L_k)} \quad (4.14)$$

Avec : $r(L_k)$ est le nombre d'évaluations associées au paramètre L à son niveau k .

Ensuite, l'effet moyen du paramètre L , à son niveau k , sur la réponse en flexion, F_{max} , est estimé par l'équation 4.15 :

$$a_k = \overline{F(L_k)} - \overline{F_{max}} \quad (4.15)$$

Les résultats des 4 simulations effectuées sont résumés dans dans le tableau 4.8.

N° d'expérience	L	P	b_t	F_{max}(N)
1	1	1	1	8682
2	1	2	2	6418
3	2	1	1	12203
4	2	2	1	11044

Tableau 4.8 – Résultats du plan d'expérience orthogonal $L_4(2^3)$.

En traçant les effets moyens des différents paramètres, à différents niveaux sur la figure 4.30, on constate que la force maximale en flexion est beaucoup influencée par la longueur de l'enture L , suivie du pas P . L'effet de l'extrémité de l'enture, b_t , est plus faible.

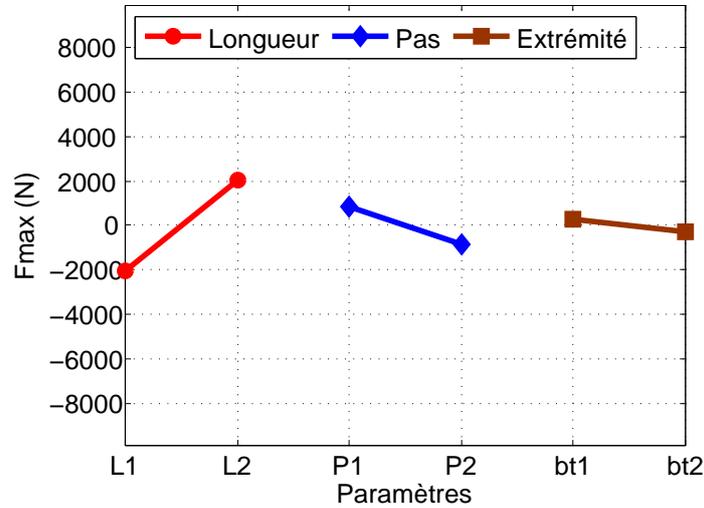


Figure 4.30 – Effet moyen des paramètres géométriques de l'aboutage.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations numériques de poutres en bois reconstitué par collage, en utilisant le code de calcul par éléments finis ABAQUS/standard [125]. La qualité des modèles numériques utilisés a été validée de manière expérimentale.

Dans un premier temps, une identification de l'ensemble des paramètres des modèles de comportement (bois et joint de colle) a été présentée. Les résultats de ces tests d'identification ont montré qu'en plus des paramètres matériaux, la qualité des maillages joue un rôle très important, en particulier en ce qui concerne le modèle cohésif pour la prédiction de la rupture des joints de colle.

Après l'étape d'identification, plusieurs essais de flexion 4 points, en considérant des poutres à deux et trois lamelles, avec ou sans aboutages ont été simulés avec succès. De point de vue qualitatif, les prédictions numériques sont en adéquation avec les résultats moyens expérimentaux, et ce pour tous les exemples traités.

Enfin, la simulation numérique a été également utilisée pour effectuer une étude paramétrique afin d'étudier l'influence de plusieurs paramètres, matériaux et géométriques, sur la résistance à la rupture des poutres multi-couches. Il en ressort de cette étude que :

- Le module d'élasticité des planches constitutives, lorsque celles-ci sont de qualité homogène, influence notablement la rigidité globale des poutres multi-couche et n'a aucun effet sur la résistance à la rupture ;
- En revanche, dans le cas d'une poutre multi-couche, de qualité combinée, la présence de lamelles rigides sur les faces extrêmes, ayant des aboutages à mi-portée, affaiblit la résistance à la rupture des poutres ;
- La résistance à la rupture des poutres est améliorée lorsque l'épaisseur des lamelles constitutives est faible ;
- La géométrie de l'enture multiple a une grande influence sur la résistance à la rupture des aboutages et donc sur la résistance globale des poutres.

Au delà des aspects d'adhésion et d'adhésif, la géométrie de l'enture a été identifiée comme une caractéristique intéressante et essentielle dans la résistance à la rupture des poutres multi-couches. Afin d'améliorer la résistance à la rupture des aboutages et donc des poutres multi-couches, nous nous proposons d'approfondir l'étude de la géométrie de l'enture à travers une procédure d'optimisation qui fera l'objet du chapitre suivant (Chapitre 5).

CHAPITRE 5

OPTIMISATION DE LA GÉOMÉTRIE DE L'ENTURE

5.1 Introduction

L'optimisation est un outil important en sciences appliquées et pour l'analyse des systèmes physiques [145]. Ainsi, dans le domaine de la mécanique des structures à comportement linéaire, l'optimisation a attiré l'attention d'un grand nombre de chercheurs, ainsi qu'en témoigne le grand nombre de livres et d'articles scientifiques publiés. Les travaux qui couvrent ce sujet étant très nombreux, nous nous sommes volontairement limités à une liste non exhaustive. Les premières recherches en optimisation de structures élastiques ont été menées par Schmit en 1960 [146]. Ces recherches concernent la résolution d'un problème d'optimisation de structures linéaires élastiques sous chargement variable avec limitations non linéaires d'inégalités, cela a permis également la compréhension des techniques de programmation mathématique.

En 1973, Zienkiewicz et Campbell [147] ont présenté une méthode utilisant la technique des éléments finis, permettant l'optimisation de forme de structures constituées de barres où les variables d'optimisation étaient les coordonnées des noeuds.

En 1984 et 1985, Bennett et Botkin [148, 149] ont présenté une méthode d'optimisation de forme de structures avec une description de la CAO ainsi qu'une technique de maillage adaptatif durant les cycles d'optimisation.

En 1987, Domaszewski et al. [150] ont présenté une technique pour l'optimisation de forme d'arches avec limitations sur le poids total.

Ce chapitre a pour objectif la formulation et la résolution du problème d'optimisation de la géométrie de l'enture multiple, en vue d'améliorer sa conception et pour augmenter la résistance des aboutages et donc des poutres.

Dans les chapitres précédents, nous avons constaté que l'aboutage par enture multiple est un paramètre réducteur en terme de résistance à la rupture des poutres multi-couches en bois reconstitué. Ce point de fragilité doit alors être pris en compte dans la fabrication des lamelles aboutées, et spécialement dans le cas des poutres multi-couches. Ceci permettra d'apporter des modifications sur la géométrie de l'enture pour augmenter la surface de collage et améliorer ainsi

la résistance des aboutages par entures multiples. Bien que les aspects d'adhésion et d'adhésifs soient très importants et jouent un rôle crucial dans la résistance mécanique de l'aboutage, ils ne sont pas traités dans cette étude.

Nous citerons tout d'abord les différentes classes d'optimisation, puis nous présenterons le problème général d'optimisation en mécanique des structures. Nous formulerons ensuite le problème d'optimisation de l'assemblage par entures multiples. Pour la résolution du problème d'optimisation, nous utiliserons la Méthode des Surfaces de Réponse (MSR), basée sur la technique des plans d'expériences, couplée avec un algorithme de minimisation, de type SQP, disponible dans Matlab.

5.2 Les différentes classes d'optimisation

Il existe trois grandes classes d'optimisation de forme de structures mécaniques. On distingue : le dimensionnement, l'optimisation topologique [145] et l'optimisation de forme.

- **Le dimensionnement** : ce sont toutes les méthodes de détermination des dimensions géométriques pour des classes de conception pré-définies, telles que l'épaisseur des coques, sections droites des éléments structuraux...etc.
- **L'optimisation topologique** : cette classe d'optimisation nécessite aussi bien des modifications topologiques que des modifications de forme et de dimensions. Les modifications topologiques concernent les éléments d'assemblages, ou bien la création ou la suppression de trous dans des milieux continus. Les éléments dans un assemblage peuvent être modifiés, on peut en ajouter, en enlever ou en déplacer dans le but d'obtenir une conception améliorée ;
- **L'optimisation de forme** : elle introduit des variables de conception qui permettent le mouvement des frontières (contours, bords,...etc.) dans une structure. A cause de sa difficulté relative par rapport au dimensionnement, les changements géométriques envisagés ont été historiquement limités [145, 149]. Cependant, elle a connu énormément de développement dans les industries aéronautique, navale, automobile, en contribuant à la réduction des coûts de fabrication tout en améliorant les outils de travail, la sécurité et le confort [145, 149, 150]. C'est dans cette classe d'optimisation que s'inscrit l'étude envisagée dans ce chapitre.

5.3 Problème général d'optimisation

En général, le but de l'optimisation consiste à trouver les variables de conception "réalisables" qui permettent d'optimiser (ou d'améliorer) au sens de minimiser ou de maximiser une ou plusieurs fonctions (contraintes, poids, énergie de déformation...), tout en respectant certaines contraintes ou limitations. Cette recherche de variables nécessite un grand nombre d'essais et de calculs.

Mathématiquement, le problème d'optimisation se présente comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(x), \quad x = \langle x_1, \dots, x_n \rangle^T \\ \text{avec } g_i(x) \leq 0 \\ \quad \quad g_j(x) = 0 \\ \text{et } \quad x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \end{array} \right. \quad (5.1)$$

Où f est la fonction objectif, x_i sont les variables de conception, g_i et g_j sont respectivement les fonctions limitations d'inégalité et les fonctions limitations d'égalité. x_{\min} et x_{\max} désignent les contraintes du domaine.

Une classification des problèmes d'optimisation peut être réalisée à partir de l'existence et du type de fonctions composant le problème. Le problème est-il avec ou sans limitations? Les fonctions objectifs ou contraintes sont-elles linéaires, quadratiques ou non linéaires en fonction des variables de conception? Cette classification offre l'avantage de pouvoir estimer la difficulté du problème à résoudre [151].

5.3.1 Fonction objectif

Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles, à partir des grandeurs à optimiser. Nous la nommerons fonction objectif. L'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction, quelle que soit sa définition. La solution dépendra donc de la pertinence de la "question" posée. La fonction f doit donc exprimer l'objectif de l'utilisateur sous forme d'une fonction mathématique à plusieurs variables x_1, \dots, x_n . Sa définition peut être simplement analytique, ou elle peut faire appel à un modèle numérique du système étudié.

5.3.2 Espace de recherche

Il est généralement nécessaire de définir un espace de recherche fini. Cette limitation de l'espace de recherche est faite de manière à ce que les intervalles de définition des variables soient naturellement limités, pour des raisons de faisabilité. Par exemple, les quantités telles que la densité ou le taux d'intérêt sur un prêt ne peuvent pas être négatifs. De plus, on a souvent une idée des ordres de grandeur des variables du problème.

5.3.3 Conditions d'optimalité

Avant de considérer les différents algorithmes d'optimisation, nous résumons brièvement les conditions qui permettent d'atteindre l'optimum désiré [145].

Si $f(x)$ est une fonction deux fois continûment différentiable de \mathbb{R}^n , une condition nécessaire pour que x^* soit un minimum local de f est :

- Le gradient $\{\nabla f(x^*)\} = \{0\}$ (x^* est un point stationnaire de la fonction $f(x)$)
- Le Hessien $\{\nabla^2 f(x^*)\} = \frac{\partial^2 f(x^*)}{\partial x_i \partial x_j}$ est une matrice définie semi-positive.

Le point x^* est aussi appelé minimum local fort de $f(x)$ si le Hessien est défini positif en x^* .

La définition d'un optimum global x^* d'une fonction $f(x)$ est :

$$f(x^*) \leq f(x) \quad \forall x \in \mathbb{R}^n, \quad x \neq x^* \quad (5.2)$$

En général, les problèmes d'optimisation avec contraintes sont beaucoup plus complexes. La présence d'une limitation géométrique sous forme d'une simple borne (figure 5.1) sur les valeurs permises pour les variables, fait que le minimum global peut prendre une valeur extrême (extremum). Il faut noter que certaines méthodes de traitement des limitations transforment le problème d'optimisation en un autre problème équivalent sans contraintes, mais avec une fonction objectif différente [152].

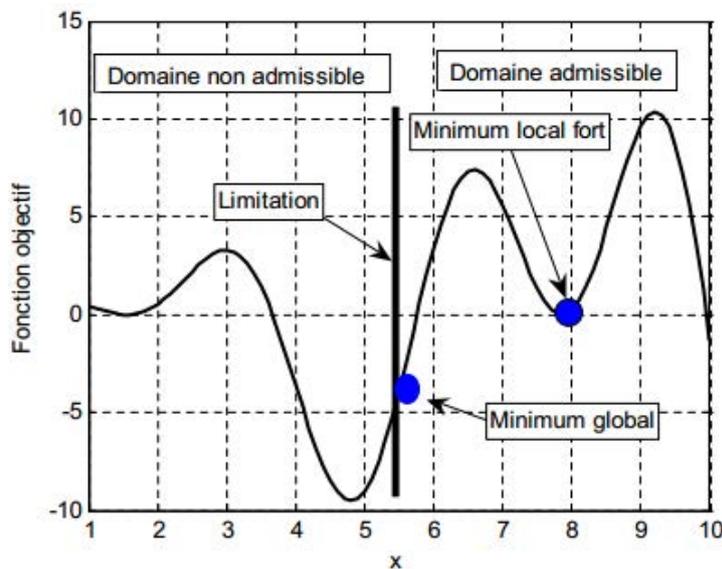


Figure 5.1 – Différents types de minima dans le cas unidimensionnel [152]

5.3.4 Normalisation

Pour améliorer la vitesse de convergence et éviter les difficultés numériques, il est préférable d'homogénéiser les quantités utilisées par l'algorithme d'optimisation (fonction objectif, limitations et variables de conception) en les rendant adimensionnelles et donc normalisées. La normalisation

des variables joue un rôle très important non seulement sur la convergence d'un algorithme d'optimisation mais aussi sur la qualité de la solution optimale. En effet, il s'agit d'une transformation linéaire des variables originales en un nouveau jeu de variables appelées variables transformées. Le choix de ces deux quantités peut se faire de manière à réaliser différents objectifs :

- Éviter les erreurs d'arrondis de la machine
- Remédier à l'instabilité de l'algorithme d'optimisation lorsqu'il existe des écarts trop importants entre les variables (exemple : $x_1 = 10^{-5}$, $x_2 = 10^{+4}$).

Ainsi, nous utilisons des variables centrées réduites, x_i^c . Centrées pour indiquer le changement d'origine du domaine et réduites pour signaler la modification de l'unité :

$$x_i^c = \frac{x_i^r - \bar{x}_i}{P_i^x} \quad (5.3)$$

$$P_i^x = \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{2} \quad (5.4)$$

Avec la moyenne arithmétique :

$$\bar{x}_i = \frac{x_i^{\max} + x_i^{\min}}{2} \quad (5.5)$$

x_i^{\min} et x_i^{\max} sont les limites inférieure et supérieure, respectivement, et x_i^r est la variable courante mesurée en unités habituelle. Ainsi la valeur de la variable $x_i^c \in [-1 \quad 1]$.

La valeur de la fonction limitation est également comprise entre -1 et +1. Elle est positive si la condition n'est pas respectée et négative dans le cas contraire :

$$g_i = \frac{g_i}{\max(|g_i|)} \quad (5.6)$$

La fonction objectif, par contre, est inférieure à 1 si la fonction diminue par rapport à sa valeur initiale f^0 et supérieure à 1 dans le cas contraire, avec $f^i \geq 0$. Ainsi la fonction objectif est normalisée comme suit :

$$f = \frac{f^i}{f^0} \quad (5.7)$$

5.4 Méthode des Surfaces de Réponse (MSR)

La méthode de surface de réponse (MSR) [153–156] consiste à construire une expression approchée \tilde{f} de la fonction coût à partir d'un nombre limité d'évaluations de la fonction réelle. En mécanique des structures, les problèmes d'optimisation impliquent souvent des fonctions objectifs et contraintes implicites par rapport aux variables d'optimisation. Ainsi, leurs évaluations nécessitent des calculs en éléments finis (ou par toute autre méthode), qui constituent l'étape la

plus coûteuse de la procédure d'optimisation. De ce fait, les méthodes les plus efficaces font appel aux concepts d'approximation. Elles remplacent le problème de conception initial par une série de problèmes approchés et explicites. L'approximation de la réponse est construite à partir des points d'évaluation choisis par l'utilisateur en fonction de la méthode d'approximation utilisée (diffuse [157], Krigage, splines,...) et/ou en fonction du plan d'expérience choisi. Le choix du plan d'expérience, les modes d'interpolation, ainsi que l'algorithme d'optimisation constituent les éléments déterminant de ces méthodes. La qualité de la solution obtenue est en grande partie fonction de ces paramètres.

Un des avantages de la méthode (MSR) est de définir par avance un nombre limité de points d'évaluation disposés selon un plan d'expérience [158–160], dans lequel toutes les variables pertinentes varient systématiquement. De plus, la démarche d'optimisation utilisant cette méthode est rapide puisque l'approximation est explicite. L'ensemble k_0 de points d'évaluation x^0 de départ est choisi en fonction des limitations du domaine de recherche en utilisant un plan d'expérience et la fonction \tilde{f}^0 est construite en utilisant une méthode d'approximation à partir de $f(x_i^0)$, $i = 1, \dots, n^0$. La minimisation de \tilde{f}^0 donne une première approximation du minimum de f . Pour minimiser \tilde{f}^0 on peut utiliser des méthodes faisant un grand nombre d'appels à la fonction, car l'évaluation fréquente de la fonction approchée ne pose pas de problème. Néanmoins, le nombre de simulations nécessaires à une bonne approximation reste généralement élevé pour un grand nombre de variables.

Dans le domaine de la mécanique des structures, la MSR a connu énormément de développement et de succès. Naceur et al. [161] ont utilisé la MSR basée sur l'approximation diffuse dans le cadre de l'optimisation des procédés de mise en forme des tôles minces. Ben Ayed et al. [162] ont aussi utilisé la méthode de surface de réponse avec un plan composite centré, pour l'optimisation des efforts de serre-flan dans le procédé d'emboutissage. Les méthodes des moindres carrés puis des moindres carrés mobiles sont utilisées pour approximer la valeur de fonction coût et contraintes. Une optimisation de la géométrie des outils (poinçon et matrice) dans le cadre du procédé d'assemblage de tôles minces (clinchage) a été également présentée par Oudjene et al. [163–165].

5.5 Procédure d'optimisation adoptée

Cette section présente l'algorithme d'optimisation et les différentes stratégies et méthodes choisies pour résoudre le problème d'optimisation de la géométrie de l'enture multiple. Nous présentons tout d'abord les différents plans d'expérience utilisés dans le cadre de cette étude, ensuite la méthode de Krigage utilisée pour construire la fonction approchée (fonction objectif). Finalement, nous présentons les stratégies adoptées, notamment pour éviter la convergence vers

l'optimum local. Pour minimiser la fonction approchée, nous utilisons le sous-programme d'optimisation Fmincon disponible dans Matlab basé sur les méthodes SQP qui sont, à ce jours, parmi les plus robustes et les plus efficaces pour la résolution des problèmes avec fonctions objectif et contraintes fortement non linéaires.

5.5.1 Plan composite

Un plan composite (figure 5.2) est constitué essentiellement de trois parties :

- un plan factoriel à deux niveaux par variable $n_f = 2^n(1, 2, 3, 4)$;
- deux points en étoile situés sur les axes de chaque variable $n_e = 2n(5, 6, 7, 8)$;
- un point situé au centre du domaine de recherche (9) ;

Le nombre total des points d'un plan composite est de $N_p = n_f + n_e + 1$. En fonction de la position des points en étoile, α , on distingue trois classes de plans composites :

- Plan central composite à faces centrées : $\alpha = 1$;
- Plan central composite intérieur $\alpha < 1$;
- Plan central composite extérieur $\alpha > 1$;

Avec : $\alpha = \left(\frac{n_f * (\sqrt{N_p} - \sqrt{n_f})^2}{4} \right)^{1/4}$

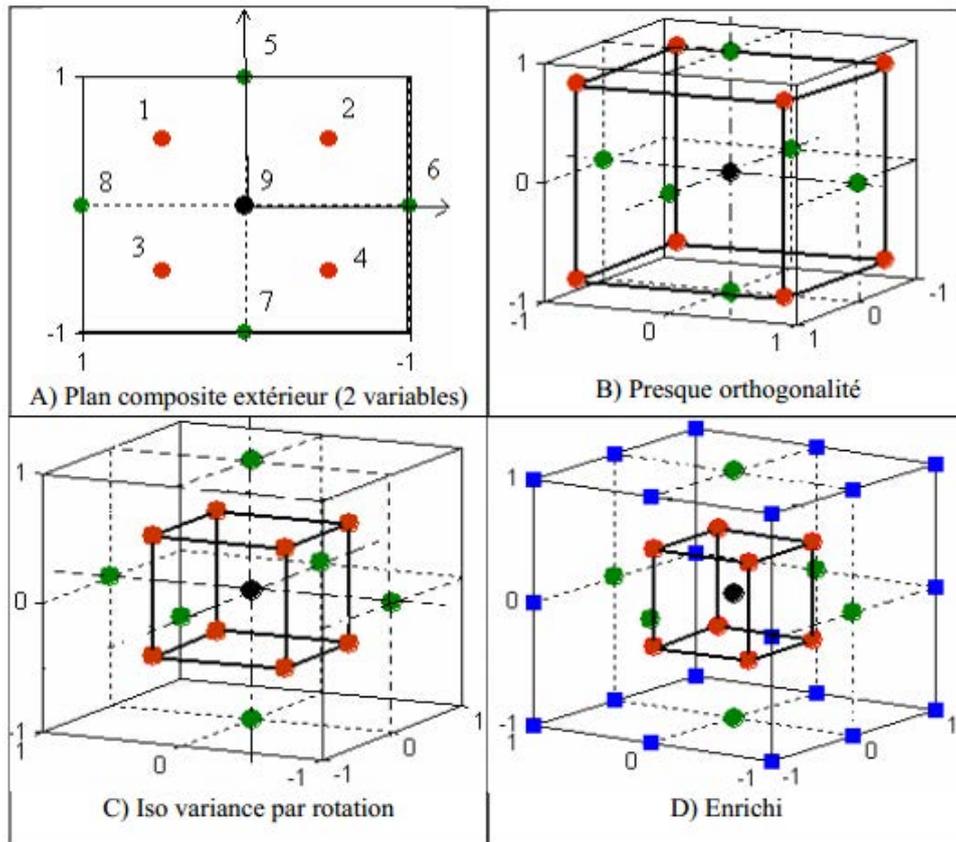


Figure 5.2 – Schéma d'un plan composite : (A) extérieur pour deux variables, (B) Presque orthogonalité pour 3 variables, (C) Iso variance par rotation, (D) Enrichi [152]

Un plan composite enrichi est constitué d'un plan composite extérieur plus un plan factoriel complet 3^n . Les points en étoile ainsi que le point central du plan composite extérieur sont les mêmes points du plan factoriel complet (les facettes et le point central) ce qui donne 35 points de calcul :

- un plan factoriel à deux niveaux par variable ;
- un plan factoriel complet (trois niveaux par variable 3^n).

L'intérêt des plans composites réside dans le fait qu'ils prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont inexplicables par un modèle du premier degré. En effet, ils se prêtent bien au déroulement séquentiel de l'étude du modèle mathématique. On effectue une première étude qui est basée sur une approximation de premier degré de la réponse, en utilisant un plan factoriel complet 2^n . Sinon on entreprend les points supplémentaires (points en étoile et point central) pour établir un modèle du second degré ou plus. Le nombre de niveaux d'un plan composite est de cinq par variable : le point central, les deux niveaux du plan factoriel et les deux niveaux des points en étoile.

Dans cette étude, nous avons considéré un plan composite en étoile iso-variance par rotation, avec $\alpha = N_p^{1/4}$.

5.5.2 Méthode d'approximation et d'interpolation

Il existe plusieurs méthodes d'approximation plus au moins différentes, notamment la méthode diffuse [166] et la méthode krigeage [167–169], utilisées dans le contexte de la méthode des surfaces de réponse. Dans cette étude nous avons fait le choix d'utiliser la méthode de krigeage pour interpoler et représenter une surface de réponse sous forme explicite.

L'interpolation krigeage présente une technique d'approximation pour interpoler une fonction complexe (courbes, surfaces...etc) [169, 170]. Le krigeage représente une combinaison d'un modèle global et un terme de départ qui peut être exprimé sous la forme de l'équation (5.8) :

$$J^*(x) = P^T(x)\beta + r^T(x)\alpha \quad (5.8)$$

Où : $J^*(x)$ est la fonction approchée inconnue, le premier terme de l'équation (5.8), $P^T(x)\beta$, représente la première approximation de la fonction à interpoler. Le deuxième terme, $r^T(x)\alpha$ représente la correction du premier terme permettant à la courbe (ou à la surface) de passer par tous les points d'interpolation.

Avec :

$$P^T(x) = [P_1(x), \dots, P_m(x)]^T \quad (5.9)$$

$$r^T(x) = \{M(x, x_1), \dots, M(x, x_{n_1})\} \quad (5.10)$$

Où :

$$M = \begin{bmatrix} M(x_1, x_1) & \dots & M(x_1, x_n) \\ \dots & \dots & \dots \\ M(x_n, x_1) & \dots & M(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Les coefficients de corrélation sont donnés comme suit :

$$M_{ij} = (|x_i - x_j|) \quad (5.12)$$

Les paramètres inconnus α et β sont calculés pour x variables indépendantes en fonction des n évaluations de la fonction comme suit :

$$\alpha = M^{-1}(J - P\beta) \quad (5.13)$$

$$\beta = (P^T M^{-1} P)^{-1} P^T M^{-1} J \quad (5.14)$$

En pratique, en général, on pondère les résultats de calcul pour tous les points du plan d'expérience pour donner plus de poids (ou d'influence) aux points de calcul se trouvant près du minimum. Cela se traduit par la modification de la diagonale de la matrice de corrélation $M(x)$ comme suit :

$$M = \begin{bmatrix} M(x_1, x_1) & \dots & M(x_1, x_n) \\ \dots & \dots & \dots \\ M(x_n, x_1) & \dots & M(x_n, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega(x - x_1) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \omega(x - x_n) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Où ω est la fonction poids, gaussienne, donnée par la relation [167] :

$$\omega_i(x) = \begin{cases} 1 - \frac{e^{-(d_i/c)^2} - e^{-(r_w/c)^2}}{1 - e^{-(r_w/c)^2}} & \text{if } d_i \leq r_w \\ 1 & \text{else } d_i > r_w \end{cases} \quad (5.16)$$

Cette fonction est positive et sa valeur décroît avec la distance $\|x - x_i\|$, et prend la valeur 0 hors de l'influence du domaine d .

Où $d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x^j - x_i^j)^2}$ est la distance entre le point x et les points voisins x_i , dans le domaine de rayon r_w . c représente le paramètre de dilatation (dans cette étude, c est supposé être égal à $r_w/4$).

5.6 Stratégie d'optimisation

La procédure d'optimisation est décrite dans la figure 5.3. Pour la résolution du problème, approché, d'optimisation, nous avons adopté un algorithme de type SQP. Cet algorithme a été couplé avec la méthodes de Krigeage.

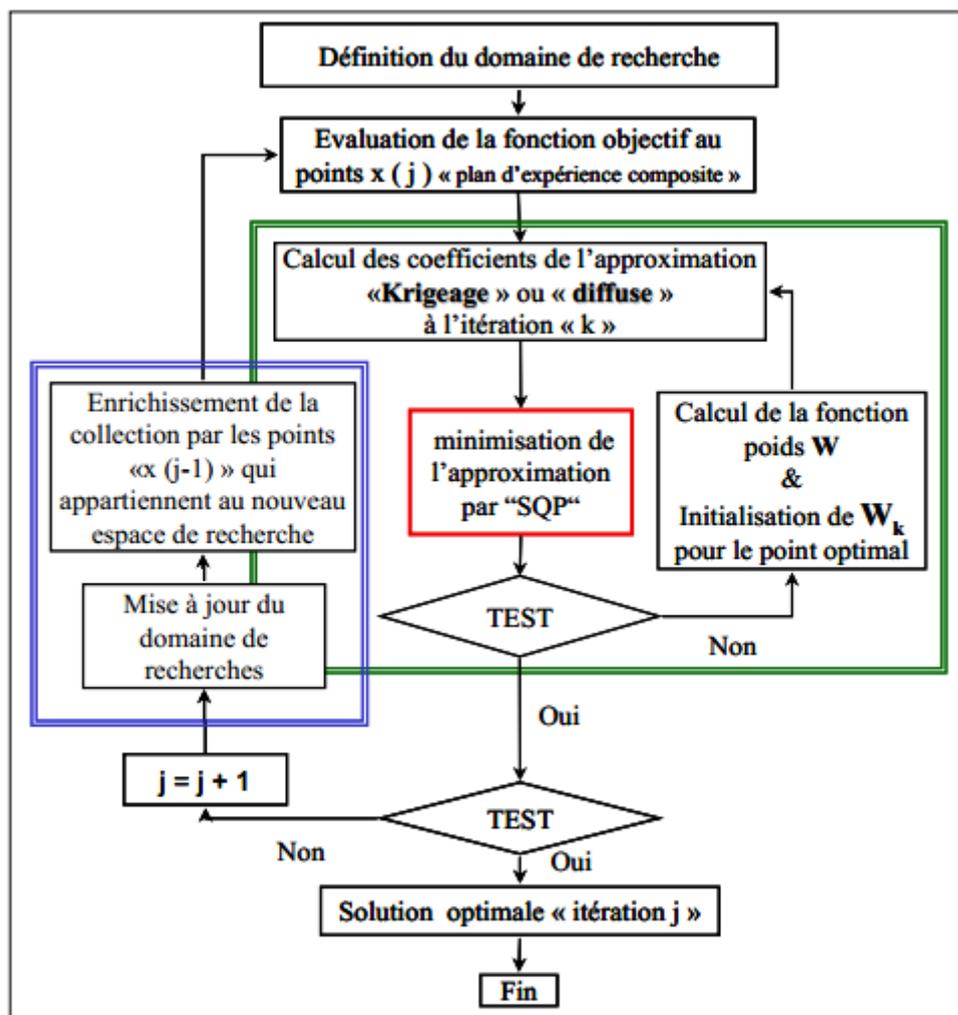


Figure 5.3 – Algorithme d'optimisation.

Etant donné que l'interpolation Krigeage passe par tous les points d'évaluation, ceci rend la fonction approchée fortement non linéaire (plusieurs minima locaux). Cette approche peut nous éloigner du minimum global de la fonction approchée, dans le cas où l'algorithme SQP converge

vers un optimum local, si le point de départ est éloigné. Nous allons étudier l'influence du point initial sur la convergence de l'algorithme d'optimisation, notamment l'algorithme SQP.

Il est important de noter que la convergence vers l'optimum global est conditionnée par le choix du point initial, nécessaire pour l'algorithme SQP, comme point de départ [152]. Pour cela, on utilise une procédure automatique qui permet de minimiser la fonction approchée par l'algorithme SQP à partir de chaque point du plan d'expérience comme point de départ. On prend ensuite la meilleure solution approchée parmi celles obtenues par les différentes optimisations. Puis une autre fonction approchée est construite en prenant en compte la fonction poids (W) qui permet de rendre l'approximation précise localement (centrée au tour du meilleur minimum). Puis, une autre minimisation est réalisée avec le point initial qui représente le meilleur optimum. Finalement, une autre évaluation exacte est réalisée pour obtenir la réponse réelle à l'itération d'optimisation.

Une stratégie adaptative de l'espace de recherche (ER) est adoptée pour permettre de localiser l'optimum global puis réactualiser l'espace de recherche en le diminuant par 1/3 (figure 5.4) afin d'accélérer la convergence. Un nouveau plan d'expérience est lancé automatiquement autour de l'optimum. Un enrichissement de l'interpolation est fait par la récupération des réponses déjà calculées qui se trouvent dans le nouveau espace de recherche.

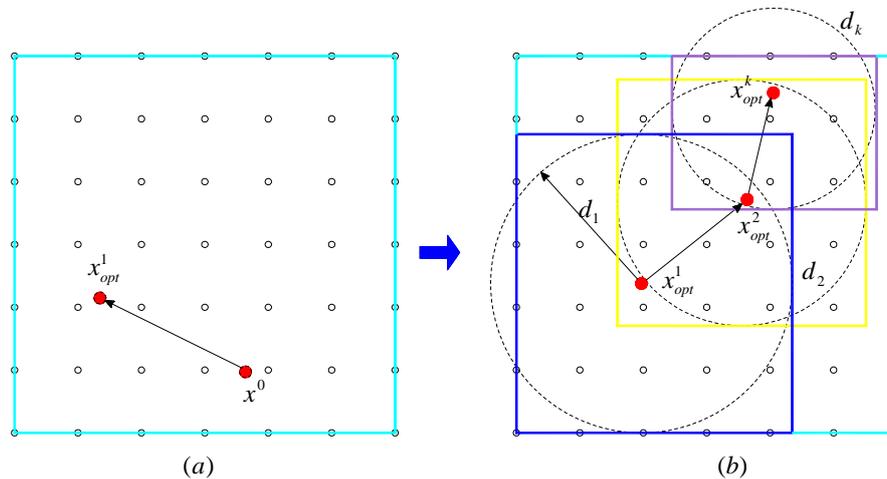


Figure 5.4 – Progression de l'espace de recherche pour le cas 2D, (a) approximation globale et (b) approximation locale [4, 163]

5.7 Application à l'enture multiple

5.7.1 Formulation du problème d'optimisation

Le problème d'optimisation consiste à rechercher les paramètres géométriques optimaux décrits dans le chapitre 3, de l'enture multiple qui donnerait une meilleure résistance mécanique à l'aboutage. La résistance de l'aboutage peut donc être représentée par la fonction J comme suit :

$$\begin{cases} \max J(x) \\ x^u \leq x \leq x^v \end{cases} \quad (5.17)$$

Où : $J(x)$ est la fonction objective, x^u, x^v sont les limites inférieures et supérieures de la variable x .

La résistance de l'aboutage correspond alors à la valeur maximale de la fonction objective (ou coût) $J(x)$. La fonction coût est définie comme la résistance en flexion F_{max} . Une fois normalisée, la fonction peut s'écrire sous la forme :

$$J = \frac{F_{max}}{F_{max}^0} \quad (5.18)$$

Où F_{max}^0 représente la force maximale flexion obtenue avec la géométrie initiale de l'enture multiple.

Dans cet étude, seulement les conditions aux limites de faisabilité ont été considérées. Ainsi, les variables d'optimisation (paramètres géométriques) sont bornés comme suit [4] :

$$\begin{cases} 15 = x_1^u \leq x_1 = L \leq x_1^v = 30 \\ 3.8 = x_2^u \leq x_2 = P \leq x_2^v = 6.2 \\ 0.42 = x_3^u \leq x_3 = b_t \leq x_3^v = 1.00 \end{cases} \quad (5.19)$$

Les limitations ont été choisies pour respecter les exigences des normes européennes, notamment la norme EN 14080 [9], en ce qui concerne la fabrication des aboutages. Il est important de signaler, par ailleurs que théoriquement la longueur de l'enture peut prendre des valeurs entre $10mm < L \leq 60mm$ [34].

5.7.2 Résultats et discussion

Les résultats d'optimisation sont résumés dans le tableau 5.1. Des simulations numériques ont été effectuées, en flexion 4 points sur la lamelle aboutée, avec la géométrie optimale de l'enture

multiple. Il apparaît que la résistance en flexion de la lamelle aboutée a augmenté de 10405 N à 13803 N, soit un gain de résistance d'environ 33%.

Paramètres	Min	Max	Initial	Optimal
L (mm)	15	30	22	30
P (mm)	3.8	6.8	6.0	3.8
b_t (mm)	0.42	1.0	1.0	0.72
F_{max} (N)			10405	13803

Tableau 5.1 – Paramètres géométriques des entures multiples : avant et après optimisation [4].

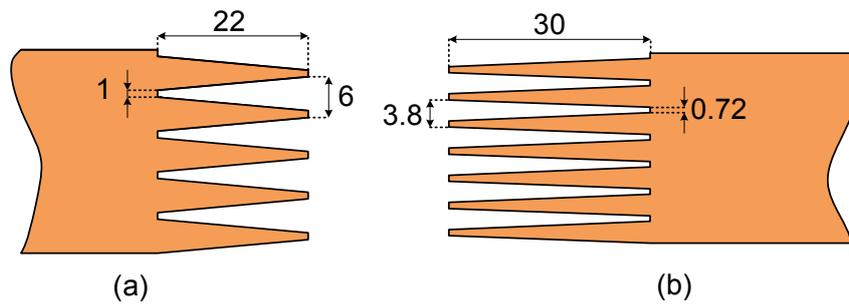


Figure 5.5 – Géométrie de l'enture : (a) Avant optimisation ; (b) Après optimisation [4].

La figure 5.6 montre la comparaison entre les courbes numériques force-flèche avant et après optimisation.

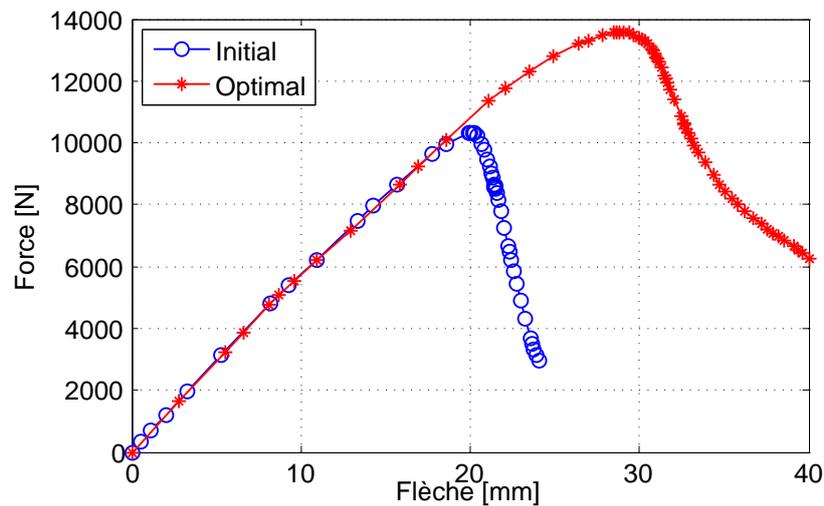


Figure 5.6 – Comparaison des courbes force/flèche avant et après optimisation [4].

L'augmentation de la résistance mécanique en flexion de l'aboutage peut s'expliquer par l'augmentation de la surface de collage (figure 5.5). En effet, d'après les résultats de l'optimisation

la longueur et le pas de l'enture (L et P) ont considérablement augmentée. Tandis que l'extrémité de l'enture (b_t) a diminué. En calculant la nouvelle surface de collage (optimale) avec les paramètres géométriques optimaux on obtient 53248 mm^2 soit une augmentation de 2,15 fois. On rappelle que la surface de collage avec les paramètres géométriques initiaux est de 24742 mm^2 .

De plus, avec la nouvelle géométrie (optimale) de l'enture le comportement en cisaillement de la colle prédomine comparé au comportement de la géométrie initiale où la traction était importante, puisque l'angle à diminuer de $5^\circ,19$ à $2^\circ,25$. Ceci est en cohérence avec l'augmentation de la résistance globale de l'aboutage vu que la colle est plus résistance en cisaillement qu'en traction.

Nous avons également exploité la géométrie optimisée de l'enture pour vérifier, numériquement, le gain de résistance des poutres multicouches avec aboutages. Ainsi, nous avons effectué des simulations numériques sur les poutres DUO et TRIO.

Les figures 5.7 et 5.8 présentent les courbes numériques force-flèche des poutres DUO et TRIO obtenues en considérant la géométrie optimale de l'enture multiple.

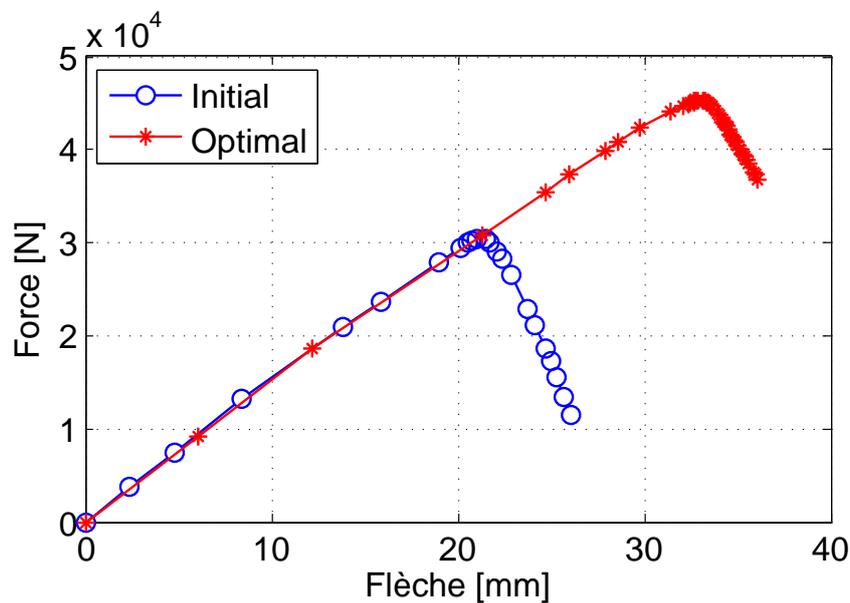


Figure 5.7 – Courbes force/flèche numériques de DUO en considérant la géométrie initiale et optimale de l'enture [55].

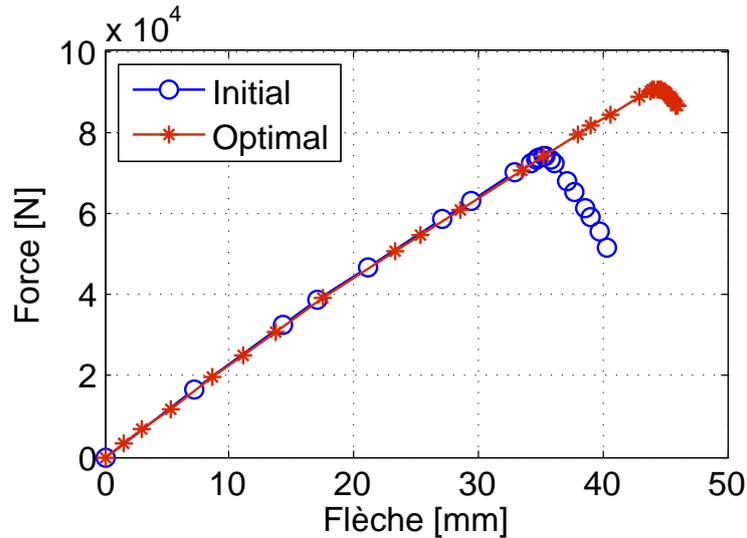


Figure 5.8 – Courbes force/flèche numériques de TRIO en considérant la géométrie initiale et optimale de l’enture..

Là aussi on observe une augmentation prononcée de la résistance mécanique. La résistance en flexion augmente de 30384 N à 45345 N et de 74042 N à 90434 N pour les poutres DUO et TRIO, respectivement. Aussi, la flèche à rupture augmente de 21,0 mm à 32,9 mm pour le DUO et de 35,4 mm à 44,5 mm pour le TRIO.

5.8 Conclusion

La géométrie de l’enture a été optimisée en utilisant la méthode des surfaces de réponse qui est basée sur l’interpolation de Krigeage et couplée avec un algorithme de minimisation dans Matlab, de type SQP.

Les paramètres de l’enture multiple L , P , b_t ont été définis comme variables d’optimisation. Ces paramètres ont été bornés afin de prendre en compte des limitations de faisabilité respectant les exigences de la norme européennes EN 14080 [9], en ce qui concerne la fabrication des entures multiples pour un aboutage structural.

La géométrie optimisée a permis d’augmenter la surface de collage de 2.15 fois par rapport à la géométrie initiale. Ce qui a permis d’augmenter d’environ 33% la résistance mécanique des aboutages en flexion. Les simulations numériques effectuées sur les poutres DUO et TRIO en considérant la géométrie optimisée de l’enture ont montré un gain de résistance important de 49% et 22%, respectivement.

Par ailleurs, il serait intéressant de reformuler le problème d'optimisation en repoussant les limites de faisabilité au delà de celles imposées par la norme européenne pour obtenir des entures plus longues et donc des aboutages plus résistants. Cela impliquerait des problèmes d'usinage, vu que le hêtre est un bois dur. Il faudrait dans ce cas envisager la vérification des conditions d'usinabilité de telles entures.

CHAPITRE 6

CONCLUSION GÉNÉRALE

6.1 Conclusion

L'objectif principal de cette thèse était d'étudier de manière expérimentale et numérique le comportement mécanique de poutres en bois massif reconstitué (BMR), fabriquées à partir d'une essence feuillue locale, le hêtre, dans le but général de le promouvoir et le valoriser en usage structural.

Ce mémoire dresse tout d'abord une revue de l'état de l'art sur la ressource feuillue française et sur le marché des produits structuraux reconstitués par collage, en particulier le bois massif reconstitué mais aussi sur les aspects normatifs. A partir du constat sur la demande grandissante des produits reconstitués par collage (BLC, BMR) dans le marché français de la construction et l'augmentation des importations, nous avons constaté que les essences feuillues locales, notamment le hêtre, peuvent présenter un grand intérêt en usage structural. En effet, le hêtre présente un potentiel important tant au niveau de la ressource française disponible que de ses performances mécaniques.

Afin de caractériser le comportement des poutres en BMR pour un usage structural, nous avons réalisé une campagne d'essais expérimentaux. Cette campagne d'essais inclut :

- la caractérisation des matériaux utilisés, à savoir le hêtre et les colles ;
- la caractérisation et la vérification des aboutages par entures multiples ;
- enfin, la caractérisation des poutres DUO et TRIO avec ou sans aboutages

Parallèlement, à cette partie expérimentale nous avons également réalisé des modélisations numériques, par éléments finis, en utilisant le code de calcul ABAQUS.

Sur le plan expérimental :

Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que :

- le hêtre utilisé dans cette étude est d'une bonne résistance mécanique et peut être classé, selon la norme EN 338 [6], dans la classe de résistance la plus élevée (D70), en ce qui concerne les feuillus ;
- les colles utilisées, à savoir la MUF et la PRF-Tanin satisfont les exigences de la norme EN 302-1 [7] pour l'usage structural et présentent des performances mécaniques équivalentes ;
- les essais mécaniques sur les aboutages par entures multiples ont montré que les exigences

de la norme NF B52-010 [1], en terme de résistance mécanique, étaient satisfaites, bien que l'aboutage apparait comme un facteur réducteur, en comparaison avec la résistance des lames massives ;

- il existe une corresspondance entre la résistance caractéristique des lames constitutives et des BMR DUO et TRIO sans aboutage ;
- la présence des aboutages par entures multiples dans les lamelles tendues des poutres DUO et TRIO, en flexion, réduit notablement la résistance globale des poutres, à cause de la rupture prématurée des aboutages ;
- Si on devait classer les poutres en BMR, en hêtre, en utilisant le classement normatif proposé pour les résineux (tableau 2.8), on leur attribuerait la classe de résistance la plus élevée, GT24.

Sur le plan modélisation numérique :

Nous avons développé des modèles éléments finis pour la simulation numérique du comportement des poutres en BMR. En ce qui concerne le comportement du bois, celui-ci est modélisé comme un matériau élastique orthotrope et élasto-plastique anisotrope. La loi de comportement est couplée à un critère de rupture fragile de type Hoffman, très utilisé pour les matériaux orthotropes, pour modéliser la différence des comportements en compression et en traction du bois. Les joints de colle, à l'interface des lamelles et au niveau des aboutages, ont été modélisés par une loi de comportement cohésive de type traction-séparation incluant un endommagement à évolution linéaire pour prédire la rupture progressive de la colle. L'ensemble des paramètres du modèle ont été identifiés sur la base de tests expérimentaux appropriés.

Afin de valider les modèles numériques proposés, les résultats ont été comparés à l'expérience. Une fois les modèles numériques validés de manière expérimentale, une étude paramétrique, en utilisant les plans d'expérience de type Taguchi, a été menée afin d'étudier l'influence de plusieurs paramètres sur la résistance mécanique des aboutages. Il en ressort de cette étude paramétrique que la géométrie de l'enture est essentielle dans la fiabilité des joints aboutés et joue un rôle crucial dans leur résistance mécanique.

Ainsi, nous avons proposé dans le chapitre 5 une formulation du problème d'optimisation de la géométrie de l'enture, visant à améliorer la résistance mécanique des aboutages. Trois paramètres, définissant la géométrie de l'enture, à savoir la longueur L , le pas p et l'extrémité b_t ont été définis comme variables d'optimisation. Des contraintes de faisabilité géométrique respectant les exigences de la norme EN 14080 [9] ont été également considérées. Les outils d'optimisation sont basés principalement sur la méthode des surfaces de réponse et des plans d'expérience couplés avec un algorithme de minimisation de type SQP. Les résultats d'optimisation, obtenus dans

le cadre des lamelles aboutées en flexion, ont montré une nette augmentation de la surface de collage conduisant ainsi à l'amélioration de résistance mécanique de l'aboutage (33% de gain de résistance). Des simulations complémentaires ont été également réalisées en utilisant la géométrie de l'enture optimale dans le contexte des poutres DUO TRIO et les résultats numériques obtenus indiquent une augmentation de la résistance en flexion des poutres de 49% et de 22% pour les DUO et TRIO, respectivement.

6.2 Perspectives

Le travail accompli dans cette thèse est bien entendu améliorable sur plusieurs points :

1- Sur le plan expérimental :

- Approfondir l'étude de l'adhésion hêtre/colle pour mieux maîtriser le collage du hêtre,
- Evaluer et tester des solutions de renforcement (fibre de carbone, cables avec ou sans précontraintes...etc) pour améliorer la capacité portante des poutres qui se trouve réduite à cause de la faiblesse des aboutages,

2- Sur le plan modélisation numérique :

- Evaluer par simulation numérique les difficultés que pourrait poser l'usinage des entures longues dans le contexte des bois durs comme le hêtre (usinabilité du hêtre, interaction bois/outil de coupe, effort de coupe...etc),
- Reformuler le problème d'optimisation en repoussant les limites géométriques au delà des exigences des normes européennes actuelles,
- Evaluer le comportement des poutres en BMR sous l'effet des variations cycliques d'humidité et de température,
- Etudier le comportement différé (fluage) des poutres BMR, notamment les joints de colle.

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Surfaces boisées, volumes sur pied et productions courantes des essences dominantes [14].	9
2.2	Solde des échanges en valeur de la filière bois en 2006 [15].	10
2.3	Structure du commerce mondial des produits forestiers en moyenne 2006-2008	11
2.4	Propriétés physiques des essences dominantes ; (*) à l'humidité H=12% [23].	15
2.5	Propriétés mécaniques des essences dominantes [24].	15
2.6	Classes de résistance du bois massif [6].	16
2.7	Propriétés mécaniques et physiques du hêtre.	16
2.8	Les différentes classes de résistance des BLC et BMR [1, 9].	21
2.9	Exigences sur la résistance des aboutages des poutres BMR (dont les classes mécaniques sont notées GTxx).	22
2.10	Valeurs de longueur d'enture recommandées par divers auteurs [9, 52, 53].	28
2.11	Valeurs recommandées du profil de l'aboutage [9].	29
3.1	Composition des colles MUF [87] et PRF à base de tanin [49], (unité : gramme).	38
3.2	Valeurs de résistance caractéristiques des lamelles massives.	45
3.3	Valeurs de résistance caractéristiques calculées selon l'EN 338 [6].	46
3.4	Valeurs caractéristiques du hêtre déterminées par tests.	47
3.5	Comparaison des caractéristiques de résistance et de rigidité des deux lots de hêtre.	47
3.6	Valeurs caractéristiques du joint de colle MUF en traction.	50
3.7	Valeurs caractéristiques du joint de colle MUF en cisaillement.	51
3.8	Valeurs caractéristiques du joint de colle Honeymoon PRF-tanin en cisaillement.	51
3.9	Valeurs caractéristiques des différentes configurations de lames aboutées.	56
3.10	Valeurs caractéristiques des poutres multicouches sans aboutage [55].	61
3.11	Valeurs caractéristiques des poutres multi-couches avec aboutages [55].	65
3.12	Récapitulation des essais sur les poutres BMR.	68
3.13	Récapitulation des essais sur les lamelles individuelles.	69
3.14	Récapitulation des essais complémentaires sur le bois massif.	69
3.15	Récapitulation des essais sur les colles utilisées.	70
4.1	Propriétés élastiques du Hêtre [4, 55].	85
4.2	Paramètres de plasticité avec rupture fragile.	85
4.3	Paramètres du modèle cohésif pour les modes I et II.	88
4.4	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques.	92
4.5	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques.	94
4.6	Géométries recommandées par la norme EN 14080 [9].	99
4.7	Paramètres géométriques et leurs niveaux.	99
4.8	Résultats du plan d'expérience orthogonal $L_4(2^3)$	100
5.1	Paramètres géométriques des entures multiples : avant et après optimisation [4].	115

LISTE DES FIGURES

1.1 Exemples de poutres en Bois Massif Reconstitué (BMR).	1
1.2 Charpente réalisée en BMR.	2
1.3 Aboutage par entures multiples.	2
2.1 Surface et taux de boisement du territoire français [12].	7
2.2 Proportion de volume de bois sur pied de feuillus et résineux [12].	8
2.3 Répartition des Feuillus/Résineux en France [15].	9
2.4 Evolution du prix du bois de hêtre et du bois de chêne [21].	12
2.5 Evolution du prix des bois résineux [21].	13
2.6 (a) Forêt du hêtre; (b) feuilles et grains du hêtre; (c) une coupe transversale.	13
2.7 Importance des surfaces boisées de hêtre par rapport aux surfaces boisées dans les départements [21].	14
2.8 Géométrie de l'aboutage [27].	17
2.9 Bois massifs aboutés.	18
2.10 Poutres en bois lamellé-collé droites (a) et courbes (b).	18
2.11 Poutres en Bois Massif Reconstitué (BMR).	19
2.12 Poutre en lamibois	19
2.13 Aboutage par entures multiples fabriqué en enlevant les noeuds naturels	20
2.14 Les principaux défauts du retrait transversal du bois [31–33].	21
2.15 Etapes principales de fabrication des poutres en bois reconstitué par collage.	23
2.16 Profil d'une enture multiple : l_j : longueur, p : pas, b_t : extrémité de l'enture, α : pente, l_t : jeu au fond de l'enture, b : hauteur, t : largeur [9].	23
2.17 Usinage de l'enture multiple.	24
2.18 Rabotage des lamelles.	24
2.19 (a) application de colle, (b) assemblage des lamelles, (c) pressage.	25
2.20 Les produits finis.	25
2.21 Effet de l'épaisseur de l'extrémité de l'enture sur la résistance mécanique en traction longitudinale du bois abouté [54].	29
2.22 Types de joint, A : joint horizontal; B : joint vertical [26].	30
2.23 Types de configuration des joints A : Sans épaulement, B : Mâle-femelle, C : Inversé [57].	31
2.24 Effet de l'avance par dent et de la vitesse de coupe sur la résistance des aboutages en traction de l'érule à sucre.	32
2.25 Distance minimale d'un noeud par rapport à la base des entures multiples selon la norme EN 14080 [9].	33
3.1 Plots et avivés de hêtre	39
3.2 (a) : Machine pour l'aboutage (b) Géométrie (unité en <i>mm</i>), (c) aboutage visible sur le chant, (d) aboutage visible sur la face.	39
3.3 Résistance en flexion des aboutages en fonction de la pression de serrage.	40

3.4	Valeurs préconisées par le fabricant Weinig.	40
3.5	(a) Pressage de l'aboutage, (b) lamelles aboutées après pressage.	41
3.6	Poutres multicouches fabriquées, (a) DUO, (b) TRIO.	42
3.7	Dispositif du test de flexion 4 points selon la norme EN 408 [5]	43
3.8	Courbe force-flèche dans la plage des déplacements élastiques.	43
3.9	Lame massive en flexion 4 point selon la norme EN 408 [5].	44
3.10	Courbes expérimentales force-flèche des lamelles massives en flexion 4 points.	44
3.11	Tests complémentaires de caractérisation du hêtre selon l'EN 408 [5]; (*) : Le test de traction axiale est basé sur le test de Kufner [92, 93].	48
3.12	Schématisation de l'essai de traction du joint de colle.	49
3.13	Courbes expérimentales force-déplacement de la colle MUF en traction.	49
3.14	Test de cisaillement : (a) Géométrie des éprouvettes [7], (b) Dispositif de l'essai.	50
3.15	Courbes expérimentales force/déplacement de la colle MUF en cisaillement.	51
3.16	Différentes configurations des lamelles aboutées.	52
3.17	Dispositif de l'essai de flexion des lamelles aboutées.	52
3.18	Les différentes configurations des lamelles testées en flexion 4 points.	53
3.19	Courbes expérimentales force-flèche de l'aboutage A1 (réalisé avec la MUF).	54
3.20	Comparaison des modules d'élasticité des lamelles aboutées.	54
3.21	Comparaison des résistances des lamelles aboutées.	55
3.22	Modes de rupture des différentes configurations des lames aboutées	56
3.23	Différentes configurations des poutres multicouches sans aboutage	57
3.24	Modes de rupture en flexion à plat des poutres DUO sans aboutage (type A).	57
3.25	Modes de rupture en flexion à plat des poutres TRIO sans aboutage (type C).	58
3.26	Modes de rupture en flexion sur chant des poutres DUO sans aboutage (type B).	58
3.27	Courbes expérimentales force-flèche : (a) Poutres DUO (type A), (b) Poutres DUO (type B), (c) Poutres TRIO (type C).	59
3.28	Comparaison du module d'élasticité en flexion des poutres sans aboutage.	60
3.29	Comparaison de la résistance en flexion des poutres sans aboutage.	60
3.30	Différentes configurations des poutres multi-couches avec aboutages	62
3.31	Courbes expérimentales force-flèche des poutres avec aboutages : (a) Poutres DUO avec aboutage supérieur (type D), (b) Poutres DUO avec aboutage inférieur (type E), (c) Poutres TRIO avec aboutages inférieurs (type F).	63
3.32	Mode de rupture typique des poutres DUO avec aboutage inférieur (type E).	64
3.33	Modes de rupture typiques des poutres TRIO avec aboutage inférieur (type F).	64
3.34	Mode de rupture typique des poutres DUO avec aboutage supérieur (type D).	65
3.35	Comparaison du module d'élasticité des poutres avec aboutages.	66
3.36	Comparaison de la résistance en flexion des poutres multi-couches avec aboutages.	67
3.37	Comparaison de la résistance en flexion des poutres DUO avec aboutage fabriquées avec la colle MUF et la colle Honeymoon.	67
4.1	Coupe transversale d'un tronc d'arbre [94]	74

4.2	(a) : Coupes longitudinale et transversale, (b) : Axe local définissant les directions d'orthotropie [98]	75
4.3	Courbes typiques contrainte-déformation du bois	75
4.4	Modes de rupture en compression longitudinale [95, 99].	76
4.5	Mécanismes de rupture des trachéides du bois dans les sens tangentiel et radial [95]	76
4.6	Les différents modes de rupture d'un joint de colle [122, 123]	79
4.7	Présentation schématique des modes de rupture des joints collés selon Cognard [124]	80
4.8	Comportement élastique linéaire de traction-séparation [125].	81
4.9	Représentation du mode de rupture mixte [125].	82
4.10	Modèle éléments finis de la lame massive.	84
4.11	Courbes force-flèche expérimentales et numérique.	84
4.12	Modèles éléments finis :(a) mode I, (b) mode II.	86
4.13	Courbes force-separation expérimentale et numérique pour le mode I.	87
4.14	Courbes force-glissement expérimentale et numérique pour le mode II.	87
4.15	modèle éléments finis 2D de la lame aboutée [4, 55].	88
4.16	Courbes force-flèche expérimentales et numérique de la lamelle aboutée [4, 55].	89
4.17	Modes de rupture : (a) numérique, (b) expérimental [4, 55].	89
4.18	Modèles éléments finis : (a) poutre DUO, (b) poutre TRIO.	90
4.19	Courbes force-flèche expérimentales et numérique (a) poutre DUO sans aboutage, (b) poutre TRIO sans aboutage.	91
4.20	Modèles éléments finis : (a) poutre DUO avec aboutage, (b) poutre TRIO avec aboutages.	92
4.21	Courbes force-flèche expérimentale et numérique des DUO avec aboutage [55].	93
4.22	Courbes force-flèche expérimentale et numérique des TRIO avec aboutages [55].	93
4.23	Mode de rupture du DUO avec aboutage : (a) numérique, (b)expérience [55].	94
4.24	Mode de rupture du TRIO avec aboutages : (a) numérique, (b)expérience [55].	95
4.25	Les différentes configurations des poutres : (a) 2 lames, (b) 3 lames, (c) 4 lames, (d) 5 lames [55].	96
4.26	Courbe force/flèche en fonction de l'épaisseur des lamelles [55].	97
4.27	Effet du module d'élasticité sur la performance mécanique des poutres DUO avec aboutage (Cas 1) [55].	98
4.28	Effet du module d'élasticité sur la performance mécanique des poutres DUO avec aboutage (Cas 2) [55].	98
4.29	Géométrie de l'enture multiple : L : longueur ; P : pas ; b_t : épaisseur de l'extrémité (la géométrie testée : L=22 ; P=6 ; $b_t=1$).	99
4.30	Effet moyen des paramètres géométriques de l'aboutage.	101
5.1	Différents types de minima dans le cas unidimensionnel [152]	106
5.2	Schéma d'un plan composite : (A) extérieur pour deux variables, (B) Presque orthogonalité pour 3 variables, (C) Iso variance par rotation, (D)Enrichi [152]	109
5.3	Algorithme d'optimisation.	112

5.4	Progression de l'espace de recherche pour le cas 2D, (a) approximation globale et (b) approximation locale [4, 163]	113
5.5	Géométrie de l'enture : (a) Avant optimisation ; (b) Après optimisation [4].	115
5.6	Comparaison des courbes force/flèche avant et après optimisation [4].	115
5.7	Courbes force/flèche numériques de DUO en considérant la géométrie initiale et optimale de l'enture [55].	116
5.8	Courbes force/flèche numériques de TRIO en considérant la géométrie initiale et optimale de l'enture.. . . .	117

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NORME, *NF B 52-010, Bois de Structure- Bois massif reconstitué (BMR)*. Editée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 2006.
- [2] C. FAYE, « Bois massif reconstitué : une voie de valorisation pour le douglas et le sapin-épicéa en usage structurel ». <http://www.fcba.fr/sites/default/files/bmr.pdf>, 2012.
- [3] D. BOURREAU, Y. AIMENE, J. BEAUCHÊNE et B. THIBAUT, « Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods », *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 71, p. 653–662, 2013.
- [4] V. D. TRAN, M. OUDJENE et P. J. MÉAUSOONE, « FE analysis and geometrical optimization of timber beech finger-joint under bending test », *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 52, p. 40–47, 2014.
- [5] NORME, *NF EN 408, Structure en bois, Bois de structure et bois lamellé- collé. Détermination de certaines propriétés physiques et mécanique*. Editée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 2010.
- [6] NORME, *NF EN 338 : Bois de structure, Classes de résistance*. Editée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 2009.
- [7] NORME, *NF EN 302-1 : Adhésifs pour structures portantes en bois, Méthode d'essai, partie 1 : Détermination de la résistance du joint au cisaillement en traction longitudinale*. Editée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 2004.
- [8] NORME, *NF EN 302-3 : Adhésifs pour structures portantes en bois, Méthode d'essai, partie 3 : Détermination de l'influence de l'attaque d'acide des fibres de bois, résultant de traitement cycliques de température et d'humidité sur la résistance à la traction transversale*. Editée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 2004.
- [9] NORME, *EN 14080 : Timber Structures- glued laminated timber and glued solid timber- requirements*. CEN-BNBA-AFNOR, 2012.
- [10] FAO, « Situation des forêts du monde ». <http://www.fao.org/docrep/013/i2000f/i2000f01.pdf>, 2011.
- [11] EUROSTAT. <http://www.epp.eurostat.ec.europa.eu>, 2011.
- [12] IFN. <http://www.planetoscope.com/forets/1198-nombre-d-arbres-plantes-en-france.html>.
- [13] J. PUECH, « Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois », rap. tech., avril 2009.
- [14] CRPF-FOGEFOR, « Principales caractéristiques de la forêt française ». http://www.crfp-limousin.com/sources/files/FOGEFOR/economi_foret_france.pdf, 2011.

- [15] CRPF-FOGEFOR, « La filière forêt-bois française : marchés et perspectives ». http://www.crfp-limousin.com/sources/files/FOGEFOR/economi_filiere_bois.pdf, 2011.
- [16] SESSI-FCBA, « Le bois en chiffres », rap. tech., Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie, 2008.
- [17] SESSI, « Le bois en chiffres », rap. tech., Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie, 2006.
- [18] CIRAD-CTBA, « Le projet bing ». <http://www.gipeblor.com/donnees/cms/pdf/TELECHARGEMENT/4-descriptif-machine-de-classement-des-bois-bing.pdf>.
- [19] C. FAYE, « Valorisation en usage structural des essences de bois français douglas et du sapin/épicéa au travers du développement du bois massif reconstitué BMR », rap. tech., Institut Technologique FCBA, 2010.
- [20] APIB, « Structurer les filières bois energie et bois construction en limousin », rap. tech., 2005.
- [21] REVUE, « Forêt et entreprise, n° 152, produire des plaquettes forestières - animaux/nature », 2003.
- [22] CAPDECISION, « Etude sur les potentialités de développement du hêtre ». <http://www.foretsetboisdelest.com/Docs%20en%20lignes/Documents%20blogs/ETUDE%20HETRE.pdf>.
- [23] CIRAD, « Tropix 7 ». <http://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/FR/Temperees/HETRE.pdf>, 1998.
- [24] J. SELL et F. KROPF, *Propriétés et caractéristiques des essences de bois*. No. 93, Lignum, Suisse : Le Monte, 1990.
- [25] NORME, *EN 1995-1-1/A1, Eurocode 5- Design of timber structures- Part 1-1 : General- common rules and rules for buildings*. 2008.
- [26] R. W. JOKERST, « Finger-jointed wood products », research paper FPL 382, Forest Products Laboratory, 1981.
- [27] M. L. SELBO, « End and corner joint construction », *In : Adhesive bonding of wood, Technical bulletin N°1512. USDA. Forest Serv., Washington, DC*, p. 49-55, 1975.
- [28] CTBA, *Étude technico- économique de l'aboutage. Série III. Travail mécanique du bois- usinage- fabrication des matériaux dérivés du bois*. No. Cahier N°92, 1973.
- [29] CTBA, « Bois lamellé- collés (BLC) ; bois massifs reconstitués (BMR) », *Assemblages Bois et dérivés Conception système*, vol. 1, p. 1-4, 2007.
- [30] G. DILL-LANGER et S. AICHER, *Glulam Composed of Glued Laminated Veneer Lumber Made of Beech Wood : Superior Performance in Compression Loading, Materials and Joints in Timber Structures*. RILEM, 2014. Volume 9, p. 603-613.

- [31] S. ORMARSSON, O. DAHLBLOM et H. PETERSSON, « A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation part 1 : Theory. wood science and technology », vol. 32, p. 325–334, October 1998.
- [32] M. MOUTEE, *Modélisation du Comportement mécanique du bois au cours du séchage*. Thèse doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 2006.
- [33] V. BUCUR, *Delamination in Wood, Wood products and Wood-Based Composites*. Springer, 2011.
- [34] J. NATTERER, J. L. SANDOZ et M. REY, *Construction en Bois : Matériau, technologie et dimensionnement*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2004.
- [35] NORME, *NF EN 385 : Aboutages à entures multiples dans les bois de construction, Exigences de performance et exigences minimales de fabrication*. Editée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 2002.
- [36] NORME, *NF EN 301 : Adhésifs de nature phénolique et aminoplaste, pour structures portantes en bois- Classification et exigences de performance*. Editée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 2011.
- [37] G. ELBEZ et D. BENTZ, *Le collage du bois*. Paris : CTBA, 1991. 215p.
- [38] D. O. CHANS, J. E. CIMADEVILLA et E. M. GUTIÉRREZ, « Glued joints in hardwood timber », *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 28, p. 457–463, 2008.
- [39] G. DAVIS, « The performance of adhesive systems for structural timbers », *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 17, p. 247–255, 1997.
- [40] J. D. LEEUW et J. LEUFEUVRE, « Recommandations relatives au choix des colles à froid destinées à la fabrication des charpentes », *Centre Technique du Bois, Leufeuvre*, 1964.
- [41] C. J. METTEM, J. A. GORDON et B. BEDDING, *Structural Timber Composites*. TRADA, 1996.
- [42] H. B. MANBECK, J. J. JANOWIAK, P. R. BLANKENHORN, P. LABOSKY, R. C. MOODY et R. HERNANDEZ, « Efficient hardwood glued-laminated beams », *in International Wood Engineering Conference*, vol. 1, p. 283–290, 1996.
- [43] J. L. COFFIN, J. GUISCAFRE et C. SALES, « Etude de la pression de serrage et de son influence sur les paramètres de collage dans la fabrication d'éléments reconstitués en bois tropicaux », *Centre Technique Forestier Tropical : Nogent-sur-Marne*, p. 32, 1981.
- [44] J. GUISCAFRE et C. SALES, « Etude de l'aptitude au collage du bois d'azobé (*lophita alata*) à partir de résine résorcine-formaldéhyde », *Centre Technique Forestier Tropical : Nogent-sur-Marne*, p. 23, 1980.
- [45] P. J. R. LABOSKY, P. R. BLANKENHORN, J. J. JANOWIAK et H. B. MANBECK, « Bond strength of resorcinolic adhesives on northeastern hardwoods », *Forest Products Journal*, vol. 43, no. 2, p. 19–22, 1993.

- [46] A. PIZZI, D.-d.-T. ROSSOUW, W. E. KNUFFEL et M. SINGMIN, « "honeymoon" phenolic and tannin-based fast setting adhesive systems for exterior grade fingerjoints », *Holzforschung Holzverwertung*, vol. 32, no. 6, p. 140–152, 1980.
- [47] D. GORNIK, R. HEMINGWAY et V. TISLER, « Tannin-based cold-setting adhesives for face lamination of wood », *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 58, no. 1/2, p. 23–30, 2000.
- [48] A. PIZZI et AL., « "honeymoon" fast-setting adhesives for timber laminating », *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 41, no. 2, p. 61–63, 1983.
- [49] V. D. TRAN, M. OUDJENE, P. J. MÉAUSOONE, A. PIZZI, M. GAUTIER et K. ROY, « Experimental study of multi-layered beams made of beech timber glued with different adhesives », World Conference on Timber Engineering (WCTE), Quebec city, Canada, August 2014.
- [50] D. B. RICHARDS et F. E. GOODRICK, « Tensile strength of scarf joints in southern pine », *Forest Products Journal*, 1959.
- [51] K. MORKVED, « Production, marketing and use of finger-jointed sawnwood : an overview », in *Proceedings of Production, Marketing and use of finger-jointed sawnwood*, 1982.
- [52] J. G. SUNLEY, « The structural use of finger-jointing », in *Proceedings of Production, Marketing and use of finger-jointed sawnwood*, 1980.
- [53] E. RAKNES, « The influence of production conditions of the strength of finger-joints », in *Proceedings of Production, Marketing and use of finger-jointed sawnwood*, 1982.
- [54] M. L. SELBO, « Effect of joint geometry on tensile strength of finger joints », *Forest Products Journal*, vol. 13, no. 9, p. 390–400, 1963.
- [55] V. D. TRAN, M. OUDJENE et P. J. MÉAUSOONE, « Experimental and numerical analyses of the structural response of adhesively reconstituted beech timber beams », *Composite Structures*, vol. 119, p. 206–217, 2015.
- [56] M. D. STRICKLER, « Finger-jointed dimension lumber- past, present and future », *Forest Products Journal*, vol. 30, no. 9, p. 51–56, 1980.
- [57] B. A. CECILIA, *Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire*. Thèse doctorat, Université Laval, Québec, 2003.
- [58] P. R. FISETTE et W. W. RICE, « An analysis of structural finger-joints made from two northeastern species », *Forest Products Journal*, vol. 39, no. 9, p. 40–44, 1988.
- [59] J. AYARKWA, Y. HIRASHIMA et Y. SASAKI, « Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of finger-jointed tropical african hardwoods », *Forest Products Journal*, vol. 50, no. 11/12, p. 53–63, 2000.
- [60] T. SELLERS, J. R. MCSWEEN et W. T. NEARN, « Gluing of eastern hardwoods : A review, general technical report SO-71 », *US Department of Agriculture, Forest Serv, Forest Service, New Orleans, LA*, vol. 67, p. p30, 1988.

- [61] C. DAGENAIS, *Aboutage de l'érable à sucre pour la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux*. Thèse doctorat, Université Laval, Québec, 2007. Thèse de doctorat.
- [62] J. E. REEB, J. J. KARCHESY, J. R. FOSTER et R. L. KRAHMER, « Finger-joint quality after 4,6 and 32 hours of knife wear : Preliminary results », *Forest Products Journal*, vol. 48, no. 7, p. 33, 1998.
- [63] K. EGNER et H. KOLB, « Geleimte träger und binder aus buchenholz », *Bauen mit Holz*, vol. 68, no. 4, p. 147–154, 1966.
- [64] H. KOLB, « Biegeversuche und prüfung des brandverhaltens an trägern aus verleimten buchenschäl-furnieren », *Holz Roh- Werkst*, vol. 26, p. 277–283, 1968.
- [65] E. GEHRI, « Möglichkeiten des einsetzes von buchenholz für tragkonstruktionen », *Schweizer Bau-wirtsch*, vol. 56, p. 17–21, 1980.
- [66] E. GEHRI, « High performance jointing techniques-state of art and development », *Holz Roh-Werkst*, vol. 43, p. 83–88, 1985.
- [67] M. FRESE et H. J. BLASS, « Characteristic bending strength of beech glulam », *Materials and Structures*, vol. 40, p. 3–13, 2006.
- [68] S. AICHER et D. OHNESORGE, « Shear strength of glued laminated timber made from european beech timber », *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 69, p. 143–154, 2011.
- [69] S. AICHER et L. HÖFFLIN, « Delamination properties and shear strength of glued beech wood laminations with red heartwood », *Holz. Roh. Werkst*, vol. 64, p. 125–136, 2007.
- [70] F. COLLING, *Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflussgrößen*. Thèse doctorat, University of Karlsruhe, Germany, 1990.
- [71] S. AICHER et W. KLÖCK, « Spannungsberechnungen zur optimierung von keilzinkenprofilen für brettschichtholz-lamellen », *Bauen mit Holz*, vol. 92, no. 5, p. 356–362, 1990.
- [72] S. AICHER et W. KLÖCK, « Finger joint analysis and optimization by elastic, nonlinear and fracture mechanics finite element computations », Proceedings 1991 International Timber Engineering Conference, London, UK, 1991.
- [73] H. R. MILNER et E. YEOH, « Finite element analysis of glued timber finger joints », *ASCE Journal of structural engineering*, vol. 117, no. 3, p. 755–766, 1991.
- [74] H. WERNERSSON, *Fracture characterization of wood adhesive joints*. Thèse doctorat, Lund University, Division of Structural Mechanics, Lund, Sweden, 1994.
- [75] E. SERRANO, *Finger-joint for laminated beams. Experimental and numerical studies of mechanical behaviour*. Thèse doctorat, Lund University, Division of Structural Mechanics, Lund, Sweden, 1997.
- [76] E. SERRANO et P. J. GUSTAFSSON, « Influence of bondline brittleness and defects on the strength of timber finger-joints », *International Journal of Adhesion & Adhesives*, no. 19, p. 9–17, 1999.

- [77] M. SCHMIDT et A. THÖNNIBEN, « Relevant wood characteristics for gluind beech and ash with regard to discoloration », *Eur. J. Wood Prod.*, no. 70, p. 319–325, 2012.
- [78] C. FRAZIER et J. NI, « On the occurrence of network interpenetration in the wood-isocyanate adhesive interphase. », *Int. J. Adhes. Adhes.*, no. 18, p. 81–87, 1998.
- [79] M. SERNEK et J. RESNIK, « Penetration of a liquid urea-formaldehyde adhesive into beech wood. », *Wood Fiber Sci.*, no. 31, p. 41–48, 1999.
- [80] C. BUCKLEY et C. PHANOPOULOS, « Examination of the penetration of polymeric methylene di-phenyl-di-isocyanate (pmdi) into wood structure using chemical state state x-ray microscopy. », *Holzforschung*, no. 56, p. 215–222, 2002.
- [81] W. GINDL et E. DESSIPRI, « Using UV microscopy to study diffusion of melamine-urea-formaldehyde resin in cell walls of spruce wood. », *Holzforschung*, no. 56, p. 103–107, 2002.
- [82] M. J. SMITH et H. DAI, « Wood thermoplastic adhesive interface - method of characterization and results. », *Int. J. Adhes. Adhes.*, no. 22, p. 197–204, 2002.
- [83] B. M. COLLETT, « A review of surface and interfacial adhesion in wood science and related fields. », *Wood Sci. Technol.*, no. 6, p. 1–42, 1972.
- [84] W. C. WAKE, *Adhesion and formulation of adhesives*. Applied Science Publishers, 2 sub éd., 1982.
- [85] A. PIZZI et F. A. CAMERON, « Fast-set adhesives for glulam », *Forest Products Journal*, vol. 34, no. 9, p. 61–68, 1984.
- [86] R. E. KREIBICH, « High speed adhesives for the wood gluing industry », *Adhesives Age*, vol. 17, p. 26–33, 1974.
- [87] DYNEA, « Technical data sheet for prefer 4535 laminating », rap. tech., Wood and Specialty Adhesives DYNEA, 2007.
- [88] NORME, *NF B51-004, Bois- Détermination de l'humidité*. Editée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 2010.
- [89] D. BOURREAU, *Etude de faisabilité de lamellé-collé endémique en Guyane Française*. Thèse doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, 2011.
- [90] NORME, *NF EN 384 : Bois de structure, Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*. Editée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 2010.
- [91] NORME, *NF B52-001-2, Règles d'utilisation du bois dans la construction Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus, Partie 2 : Méthode alternative pour le bois massif entrant dans la fabrication de bois lamellé collé BLC et de bois massif reconstitué BMR*. Editée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 2011.

- [92] M. KUFNER, « Über die spannungsverteilung in hölzernen zugs täben », *Holz als. Roh und Werkstoff*, vol. 8, p. 300–305.
- [93] KOLLMANN et CÔTÉ, *Principles of wood sciences and technology*, vol. 1. Berlin Heidelberg Newyork Tokyo : Springer-Verlage, 1985.
- [94] SOURCE. http://www.assistancescolaire.com/enseignant/elementaire/ressources/base-documentaire-en-sciences/la-structure-du-bois-1_w402i01.
- [95] L. J. GIBSON et A. M. F., *Cellular solids*. Cambridge : Cambridge University Press, 2nd éd., 1997.
- [96] J. M. DINWOODIE, *Timber : Its nature and behaviour*. Taylor & Francis, second éd., 2000.
- [97] P. NIEMZ, *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. DRW-Verlag Weinbrenner,. Leinfelden- Echterdingen, 1993.
- [98] F. MIRIANON, S. FORTINO et T. TORATTI, *A method to model wood by using ABAQUS finite element software. Part 1 : Constitutive model and computational details*. VTT Publication 687, 2008.
- [99] A. REITERER et S. E. STANZL-TSCHEGG, « Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain », *Mech. Mat.*, vol. 33, p. 705–715, 2001.
- [100] M. BARISKA et L. J. KUCERA, « On the fracture morphology in wood-part 2 : Macroscopical deformations upon ultimate axial compression in wood », *Wood. Sci. Technol.*, vol. 19, p. 19–34, 1985.
- [101] J. BODIG, « Stress-strain relationship for wood in transverse compression », *J Mater*, vol. 1, no. 3, p. 645–666, 1966.
- [102] G. R. DEBAISE, A. W. PORTER et R. E. PENTONEY, « Morphological and mechanics of wood fracture », *Materials Research Standards*, vol. 6, no. 10, p. 493–499, 1966.
- [103] K. E. EASTERLING, R. HARRYSSON, L. J. GIBSON et M. F. ASHBY, « On the mechanics of balsa and other woods », *Proc. R. Soc. A.*, vol. 383, p. 31–41, 1982.
- [104] M. GONG et I. SMITH, « Failure of softwood under static compression parallel to grain », *J. Inst. Wood. Sci.*, vol. 15, no. 4, p. 204–21, 2000.
- [105] U. MULLER, *Effects of wood macro- and micro-structure on selected mechanical properties*. Thèse doctorat, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, 2003.
- [106] J. S. POULSEN, P. M. MORAN, C. F. SHIH et E. BYSKOV, « Kink band formation and band broadening in lear wood under compressive loading », *Mech. Mater*, vol. 26, p. 67–77, 1997.
- [107] I. SMITH et S. VASIC, « Fracture behavior of softwood », *Mech. Mater*, vol. 35, p. 803–815, 2003.
- [108] T. TABARSA et Y. CHUI, « Stress strain response of wood under radial compression. part I : Test method and influences of cellular properties », *Wood Fiber Sci.*, vol. 33, no. 2, p. 223–232, 2001.

- [109] R. HILL, *A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals*. London Proc, 1948.
- [110] C. O'LOINSIGH, M. OUDJENE, E. SHOTTON, A. PIZZI et P. FANNING, « Mechanical behaviour and 3D stress analysis of multi-layered wooden beams made with welded-though wood dowels », *Composite Structures*, vol. 94, p. 313–321, 2012.
- [111] M. OUDJENE et M. KHELIFA, « Finite element modelling of wooden structures at large deformation and brittle failure prediction », *Materials and Design*, vol. 30, p. 4081–4087, 2009.
- [112] A. M. P. G. DIAS, J. W. Van de KUILEN, S. LOPES et H. CRUZ., « A non-linear 3D FEM model to simulate timber-concrete joints », *Advances in Engineering Software*, vol. 38, p. 522–530, 2007.
- [113] D. M. MOSES et H. G. L. PRION, « Stress and failure analysis of wood composites : a new model », *Composites : Part B*, vol. 35, p. 251–261, 2004.
- [114] M. BICKERDICKE et P. QUENNEVILLE, « Predicting the row shear failure mode in parallel-to-grain bolted connections », in *9th World Conference of Timber Engineering, WCTE*, (Portland, Oregon), 2006.
- [115] M. PATTON-MALLORY, S. M. CRAMER, F. W. SMITH et P. J. PELLICANE, « Nonlinear material models for analysis of bolted wood connections », *Journal of Structural Engineering- ASCE*, vol. 123, no. 8, p. 1063–70, 1997.
- [116] P. MACKENZIE-HELNWEIN, H. W. MÜLLNER, J. EBERHARDSTEINER et H. A. MANG, « Analysis of layered wooden shells using an orthotropic elasto-plastic model for multiaxial loading of clear spruce wood », *Comput. Methods in Appl. Mech. and Eng.*, vol. 194, p. 2661–85, 2005.
- [117] L. BENABOU, « Finite strain analysis of wood species under compressive failure due to kinking », *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, p. 408–419, 2012.
- [118] J. SCHMIDT et M. KALISKE, « Models for numerical failure analysis of wooden structures », *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 2, p. 571–579, 2009.
- [119] P. MACKENZIE-HELNWEIN, J. EBERHARDSTEINER et H. A. MANG, « A multisurface plasticity model for clear wood and its application to the finite element analysis of structural details », *Comput. Mech.*, vol. 31, p. 204–218, 2003.
- [120] B. STAMM, J. NATTERER et P. NAVI, « Joining wood by friction welding », *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 63, no. 5, p. 313–320, 2005.
- [121] T. H. T. NGUYEN, *Modèle d'endommagement des assemblages collés : identification et application à la description d'un essai de vieillissement accéléré*. Thèse doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.
- [122] G. R. IRWIN, « Analysis of stresses and strains near the end of crack transversing a plate », *Journal of Applied Mechanics*, vol. 24, p. 361–364, 1957.

- [123] A. A. GRIFFITH, *The phenomenon of rupture and flow in solids*, vol. 221. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1920.
- [124] J. COGNARD, « Science et technologie du collage », *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, 2000.
- [125] *ABAQUS theory manual*. Providence, Rhode Island, USA : Dassault Systèmes Simulia Corp., 2008.
- [126] P. P. CAMANHO et C. G. DAVILA, « Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials », *NASA/TM-2002-211737*, p. 1–37, 2002.
- [127] M. L. BENZEGGAGH et M. KENANE, « Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus », *Composites Science and Technology*, vol. 56, p. 439–449, 1996.
- [128] T. ANDERSSON et A. BIEL, « On the effective constitutive properties of a thin adhesive layer loaded in peel », *Int. J. Fract.*, vol. 141, p. 227–46, 2006.
- [129] Q. D. YANG, M. D. THOULESS et S. M. WARD, « Numerical simulation of adhesively-bonded beams failing with extensive plastic deformation », *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 47, p. 1337–53, 1999.
- [130] J. P. M. GONÇALVES, M. F. S. F. DE MOURA et A. G. MAGALHAES, « Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints », *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 26, p. 479–86, 2003.
- [131] D. GUITARD, *Mécanique du matériau bois et composites*. Cepadues-Editions, Toulouse, France, 1987.
- [132] S. FORTINO et AL., « A simple approach for FEM simulation of mode I cohesive crack growth in glued laminated timber under short-term loading », *Journal of Structural Mechanics*, vol. 45, no. 1, p. 1–20, 2012.
- [133] M. F. S. F. DE MOURA et AL., « Mixed-mode (I+II) fracture characterization of wood bonded joints », *Construction and Building Materials*, vol. 25, p. 1956–1962, 2011.
- [134] H. YOSHIHARA et A. SATOH, « Shear and crack tip deformation correction for the double cantilever beam and three-point end-notched flexure specimens for mode I and mode II fracture toughness measurement of wood », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 76, p. 335–346, 2009.
- [135] H. YOSHIHARA et T. KAWAMURA, « Mode I fracture toughness estimation of wood by DCB test », *Composites*, vol. 37, no. Part A, p. 2105–2113, 2006.
- [136] J. SJODIN, *Steel-to-timber dowel joints-influence of moisture induced stresses*. Licentiate thesis, Växjö University, 2008.
- [137] A. JACQUES, *Pratique industrielle de la méthode Taguchi : les plans d'expériences*. AFNOR, 1995.
- [138] P. SCHIMMERLING, J. C. SISSON et A. ZADI, *Pratique des plans d'expériences Techniques et Documentations*. Fiche N° LMP98-26c, Lavoisier TEC & DOC, 1998.

- [139] A. JACQUES, « Pratique industrielle de la méthode taguchi : Les plans d'expériences », *AFNOR-ISBN*, vol. 2-12, p. 465008-4, 1995.
- [140] V. HAMEL, J. M. ROELANDT, J. N. GACEL et F. SCHMIT, « Finite element modeling of clinch forming with automatic remeshing », *Mater. Des.*, vol. 77, p. 185-200, 2000.
- [141] J. P. VARIS, « The suitability for round clinching tools for high strength structural steel », *Thin-Walled Structures*, vol. 40, p. 225-38, 2002.
- [142] M. OUDJENE et L. BEN-AYED, « On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the taguchi method », *Engineering Structures*, vol. 30, p. 1782-1788, 2008.
- [143] V. HAMEL, *Contribution à l'étude de l'assemblage par clinchage : Aspects numériques et expérimentaux*. Thèse doctorat, Université de Technology de Compiègne, Compiègne, France, 1998.
- [144] P. VIJIAN et V. P. ARUNACHALAM, « Optimization of squeeze cast parameters of LM 6 aluminium alloy for surface roughness using taguchi method », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 180, p. 161-6, 2006.
- [145] H. NACEUR, *Contribution à l'optimisation de forme de structures minces en présence de non linéarités géométriques et matérielles*. Thèse doctorat, Université de Compiègne, Compiègne, FRANCE, 1998.
- [146] L. A. SCHMIT, « Structural design by systematic synthesis », in *Proc. of the Second ASCE Conference on Electronic Computation*, p. 105-122, 1960.
- [147] O. C. ZIENKIEWICZ et J. S. CAMPBELL, « Shape optimization and sequential linear programming », *Optimum structural design*, p. 109-126, 1973.
- [148] K. P. BENNETTE et J. A. BLUE, « Optimal decision trees », *RPI Math report No. 214*, 1984.
- [149] J. A. BENNETTE et M. E. BOTKIN, « Structural shape optimization adaptive mesh refinement », *AIAA J.*, vol. 23, p. 458-464, 1985.
- [150] M. DOMASZEWSKI et E. M. SAMP-STANISLAWSKA, « Optimal shakedown design of frames by linear programming », *Computers & structures*, vol. 21, no. 3, p. 379-385, 1985.
- [151] A. DELAMEZIERE, H. NACEUR, P. BREITKOPF, C. KNOPF-LENOIR, J. L. BATOZ et P. VILLON, « Structural shape optimization adaptive mesh refinement », *Mécanique & Industries*, vol. 3, p. 93-98, 2002.
- [152] N. LEBEAL, *Optimisation de la tête d'extrusion pour la fabrication de pièces thermoplastiques*. Thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine- INPL Nancy, 2007.
- [153] R. H. MYERS et D. C. MONTGOMERY, *Response surface methodology, Process and product optimization using designed experiments*. USA : Wileyinterscience publication, second éd., 2002.

- [154] J. SIENZ, S. J. BATES et J. F. T. PITTMAN, « Flow restrictor design for extrusion slit dies for a range of materials : Simulation and comparison of optimization techniques », *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 44, p. 430–453, 2006.
- [155] M. H. A. BONTÉ, A. H. Van den BOOGAARD et J. HUÉTINK, « Metamodeling techniques for the optimisation of metal forming processes », p. 155–158, In Proceedings of ESAFORM, Cluj-Napoca, Romania, 2005.
- [156] R. BAHLOUL, S. B. ELÉCHI, P. D. SANTO et A. POTIRON, « Optimisation of l-bending process : a comparison between response surface, moving least squares and evolution strategies methods », p. 120–131, In Proceedings of APOMAT, Morschach, Switzerland, 2005.
- [157] G. E. FASSHAUER, « Toward approximate moving least squares approximation with irregularly spaced centers », *Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering*, vol. 193, p. 1231–1243, 2004.
- [158] J. GOUPY, *Plans d'expérience pour surface de réponse*. Dunod, Paris, 1999.
- [159] J. LEE et P. HAJELA, « Application of classifier systems in improving response surface based approximations for design optimization », *Computers and Structures*, vol. 79, p. 333–344, 2001.
- [160] D. C. MONTGOMERY, *Design and analysis of experiments*. INC, USA : John wiley & Sons, 2005.
- [161] H. NACEUR, S. B. ELECHI, C. KNOPF-LENOIR et J. L. BATOZ, « Response surface methodology for the design of sheet metal forming parameters to control springback effects using the inverse approach », in *Materials Processing and Design : Modeling, Simulation and Applications, NUMIFORM'04, OSU*, (Columbus, Ohio, USA), p. 1991–1996, 2004.
- [162] L. BEN-AYED, A. DELAMÉZIÈRE, J. BATOZ et C. KNOPF-LENOIR, « Optimization of the blankholder force distribution with application to the stamping of a car front door panel (numisheet'99) », in *6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes, NUMISHEET'05, Detroit*, (Michigan, USA), p. 15–19, 2005.
- [163] M. OUDJENE, L. BEN-AYED, A. DELAMÉZIÈRE et J. L. BATOZ, « Shape optimization of clinching tools using the response surface methodology with moving least-square approximation », *journal of materials processing technology*, vol. 209, p. 289–296, 2009.
- [164] M. OUDJENE, L. BEN-AYED et J. L. BATOZ, « Geometrical optimization of clinch forming process using the response surface method », in *AIP Conference Proceedings*, vol. 908, p. 531–536, 2007. Part : 1-2.
- [165] N. LEBAL, M. OUDJENE et S. ROTH, « The optimal design of sheet metal forming processes : Application to the clinching of thin sheets », *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 43, no. 2, p. 110–116, 2012.
- [166] H. NACEUR, S. SHIRI, D. COUTELLIER et J. L. BATOZ, « On the modeling and design of composite multilayered structures using solid-shell finite element model », *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 70-71, p. 1–14, 2013.

- [167] N. LEBEAL, F. SCHMIDT et S. PUISSANT, « Rheological parameters identification using in situ experimental data of a flat die extrusion », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164, p. 1524–1529, 2005.
- [168] N. LEBEAL, M. OUDJENE et S. ROTH, « The optimal design of sheet metal forming processes : Application to the clinching of thin sheets », *Int. J. of Computer Applications in Technology*, vol. 43, no. 2, p. 110–116, 2012.
- [169] N. LEBEAL, F. SCHMIDT et S. PUISSANT, « Design and optimization of three dimensional extrusion dies, using constraint optimization algorithm », *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 45, p. 333–340, 2009.
- [170] H. LI, Q. X. WANG et K. Y. LAM, « Development of a novel meshless local kriging (lokringing) method for structural dynamic analysis », *Structural Safety*, vol. 27, p. 133–151, 2005.