

Renforcement des structures en bois à l'aide de polymère renforcé de fibres (PRF)

par

Maxime GERMAIN

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 12 AVRIL 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

© Tous droits réservés, Maxime Germain, 2021

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Amar Khaled, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Omar Chaallal, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Gabriel Lefebvre, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Georges El-Saikaly, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 31 MARS 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de recherche, Omar Chaallal et Amar Khaled, pour leurs précieux conseils et pour avoir été présents à toutes les étapes de ce mémoire et même avant. Ils ont su me convaincre à poursuivre vers les cycles supérieurs et ont été une source d'inspiration grandement appréciée.

Je remercie l'École de technologie supérieure (ÉTS) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour le soutien financier. Sans ces bourses, cette recherche n'aurait pas eu lieu.

Je tiens également à souligner l'implication remarquable de Jonathan Auger, technicien au laboratoire des structures lourdes. Son aide et ses idées sur le volet expérimental ont fait de ce projet un succès.

Enfin, je remercie profondément tous les membres de ma famille et mes amis qui m'ont appuyé tout au long de ce projet et qui ont su me motiver dans les moments plus difficiles. Une pensée pour toi qui fut à mes côtés tout au long de mon parcours.

Renforcement des structures en bois à l'aide de polymère renforcé de fibres (PRF)

Maxime GERMAIN

RÉSUMÉ

Depuis quelques années, l'utilisation du bois dans la construction de bâtiments et de ponts démontre une augmentation significative. Le bois d'ingénierie ne cesse d'évoluer et de permettre une utilisation beaucoup plus vaste qu'auparavant. Étant un matériau renouvelable et écoresponsable, le bois a tout intérêt à être davantage utilisé. Lorsqu'une structure déficiente nécessite un renforcement pour augmenter sa durée de vie ou sa capacité portante, plusieurs pensent à utiliser des techniques bien connues faisant appel à l'utilisation de l'acier ou du béton avec le bois; ou même un remplacement complet. Dans le cas des structures en bois, le renforcement à l'aide de matériaux composites en polymère renforcé de fibres (PRF) est rarement utilisé. Cette technique de renforcement a fait ses preuves pour le béton, mais présente des lacunes pour le bois. À ce titre, le projet de recherche présenté dans ce mémoire de maîtrise traite de cette problématique.

L'objectif de la présente étude est de développer des méthodes de réhabilitation et des modèles de calcul pour les structures en bois renforcées à l'aide de PRF. L'étude comprend un volet théorique et un volet expérimental. Le volet théorique vise à situer la présente étude par rapport aux recherches antérieures et à identifier les besoins en recherche. Le volet expérimental consiste à effectuer des essais de flexion et d'arrachement sur des spécimens en bois renforcés de PRF et d'en évaluer les avantages. Un total de 17 poutres ont été testés selon la méthode d'essais de flexion en quatre points et 12 spécimens ont été testés en arrachement. En flexion, trois configurations ont été étudiées à l'aide de lamelle ou de tissu de différentes largeurs. Les paramètres évalués et analysés sont le mode de rupture, le comportement Force-Déplacement, le comportement contraintes-déformations, et la relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre. En arrachement, trois longueurs d'ancrage (100 mm, 150 mm et 500 mm) ont été évaluées. Les paramètres évalués et analysés, en plus de ceux en flexion, sont la relation entre les déformations du PRF et la distance de l'extrémité chargée et la relation entre la contrainte d'adhérence et la distance de l'extrémité chargée.

Les résultats de l'étude montrent que le renforcement d'un élément en bois à l'aide de PRF augmente sa résistance de façon significative et modifie le mode de rupture; ce dernier passant de fragile à ductile. Globalement, l'utilisation de tissus offre de meilleurs résultats que l'utilisation de lamelles et ce autant pour le renforcement en flexion que pour l'arrachement, car il permet une répartition uniforme des contraintes et des déformations.

Mots-clés : renforcement, bois, polymère renforcé de fibres (PRF), flexion, adhérence

Strengthening of Wooden Structures with Fibre Reinforced Polymer (FRP)

Maxime GERMAIN

ABSTRACT

In recent years, the use of wood in the construction of buildings and bridges has shown a significant increase. Engineered wood continues to evolve and allow much more use than ever before. Being a renewable and eco-responsible material, wood has every interest in being used more. When a deficient structure requires strengthening to increase its lifespan or its load-bearing capacity, one may think of using the well-known techniques combining steel or concrete with wood, or even a complete replacement. But what about the use of fiber reinforced polymer (FRP) composite materials? This strengthening technique has been proven for concrete but present shortcomings for wood. Thus, this master's thesis deals with this particular subject.

The objective of the present study is to develop rehabilitation methods and design models for timber structures strengthening using FRP. The study includes theoretical and experimental components. The theoretical part aims to define the present study in relation to previous research and to identify research needs. The experimental part consists of preforming bending and pull-out tests on wood specimens strengthened with FRP and evaluating their benefits. A total of 17 beams were tested using the four-point bending test method and 12 specimens were tested for pull-out. In bending, three configurations were studied using laminates of fabrics of different widths. The parameters evaluated and analyzed are the failure mode, the force-displacement behaviour, the stress-strain behaviour, and the relation between the strains of the FRP and the distance from the centre of the beam. In pull-out, three anchor lengths (100 mm, 150 mm and 500 mm) were evaluated. The parameters evaluated and analyzed, in addition to those in bending, are the relation between the strains in the FRP and the distance from the loaded end, and the relation between the bond stress and the distance from the loaded end.

The results demonstrated that reinforcing a timber member with FRP significantly increases its strength and changes the failure mode from brittle to ductile. Overall, the fabric offers a better performance in both bending and pull-out, as it allows for even distribution of stresses and strains.

Keywords: reinforcement, wood, fibre reinforced polymer (FRP), flexural, bonding

TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte et problématique	1
1.2 Objectifs du projet de recherche	2
1.3 Méthodologie	3
1.4 Contributions et limites du projet	4
1.5 Organisation du mémoire.....	4
CHAPITRE 2 LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX	7
2.1 Le bois.....	7
2.1.1 Les essences et les qualités de bois au Canada	9
2.1.2 Propriétés physiques et mécaniques du bois	9
2.2 Les matériaux composites.....	14
2.2.1 Types de renforcement et propriétés.....	14
CHAPITRE 3 REVUE DE LA LITTÉRATURE	19
3.1 Renforcement en flexion.....	19
3.2 Adhérence et longueur d’ancrage	26
3.2.1 Relation contrainte d’adhérence-glissement	32
3.3 Modes de rupture	37
3.3.1 Modes de rupture en flexion	37
3.3.2 Modes de rupture en arrachement.....	38
3.4 Revue des codes et normes	39
3.5 Synthèse des recherches antérieures	40
3.6 Besoins en recherche.....	40
CHAPITRE 4 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	45
4.1 Objectifs du programme expérimental.....	45
4.2 Phases expérimentales	45
4.3 Descriptions des matériaux	47
4.3.1 Bois	47
4.3.2 Composite	47
4.3.3 Nomenclature des poutres.....	47
4.4 Description des montages et des équipements.....	48
4.4.1 Essais de flexion en quatre points.....	49
4.4.2 Essais d’arrachement	50
4.5 Étapes de fabrication.....	51
4.5.1 Préparation de la surface.....	52
4.5.2 Application du PRF.....	53
4.5.3 Instrumentation	54

CHAPITRE 5	ASPECTS THÉORIQUES	59
5.1	Résistance en flexion	59
5.1.1	Poutre non renforcée	60
5.1.2	Poutre renforcée de PRF	61
5.1.2.1	Lamelles collées en surface	61
5.1.2.2	Tissus collés en surface.....	64
5.1.2.3	Lamelles encastrées près de la surface.....	65
5.2	Résistance au cisaillement	66
5.3	Résistance à l'arrachement	67
CHAPITRE 6	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSE ET DISCUSSIONS....	71
6.1	Résultats et analyse des essais de flexion	71
6.1.1	Distribution des déformations sur la section transversale de la poutre.....	73
6.1.2	Modes de rupture	74
6.1.3	Capacité ultime	76
6.1.3.1	Comparaison par série.....	78
6.1.3.2	Conclusion partielle	80
6.1.4	Comportement Force-Déplacement.....	80
6.1.4.1	Comparaison par série.....	81
6.1.4.2	Conclusion partielle	83
6.1.5	Comportement contraintes-déformations.....	84
6.1.6	Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre	86
6.1.7	Discussions	90
6.2	Modèle de calcul pour la résistance à la flexion	90
6.3	Résultats et analyse des essais d'arrachement	93
6.3.1	Modes de rupture	93
6.3.2	Comportement Force-Déplacement et capacité ultime.....	97
6.3.2.1	Comparaison par série.....	98
6.3.2.2	Conclusion partielle	102
6.3.3	Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée	102
6.3.4	Relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée	107
6.3.5	Relation entre la contrainte d'adhérence et le glissement.....	112
6.3.6	Discussions	120
6.4	Comparaison avec les modèles de la littérature	121
CHAPITRE 7	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	123
7.1	Sommaire de l'étude	123
7.2	Conclusion	123
7.3	Recommandations pour des travaux futurs.....	124
ANNEXE I	PRÉPARATION DES MATÉRIAUX	127
ANNEXE II	CALCULS THÉORIQUES	133

ANNEXE III	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	143
ANNEXE IV	PHOTOGRAPHIES DES SPÉCIMENS TESTÉS.....	151
BIBLIOGRAPHIE.....		161

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Comparaison qualitative des composites en PRF15
Tableau 2.2	Propriétés typiques des résines polymères (matrice)16
Tableau 2.3	Propriétés typiques des composites unidirectionnels en PRF17
Tableau 3.1	Sommaire des recherches antérieures42
Tableau 4.1	Propriétés des composites en PRFC (fibres + matrice) utilisés48
Tableau 4.2	Nomenclature des spécimens48
Tableau 4.3	Aspects de préparation de surface à vérifier52
Tableau 4.4	Résumé de l'instrumentation57
Tableau 5.1	Propriétés des PRF61
Tableau 5.2	Augmentation du moment nominal et de l'inertie en fonction de la largeur de lamelle.....64
Tableau 5.3	Équivalences de largeur lamelle versus tissu.....64
Tableau 5.4	Augmentation du moment nominal et de l'inertie en fonction de la largeur de tissu65
Tableau 5.5	Longueur d'ancrage selon les normes canadiennes pour le béton.....67
Tableau 5.6	Modèles d'équations pour la longueur d'ancrage pour le bois68
Tableau 5.7	Longueur d'ancrage effective selon la configuration et le modèle.....69
Tableau 6.1	Valeurs expérimentales moyennes des forces et des déplacements ultimes72
Tableau 6.2	Modes de rupture des spécimens en flexion76
Tableau 6.3	Capacité ultime par série.....78
Tableau 6.4	Modes de rupture des spécimens en arrachement.....94
Tableau 6.5	Valeurs expérimentales des forces, des déplacements et des déformations ultimes.....98

Tableau 6.6	Emplacement des jauges à partir de l'extrémité chargée du PRF.....	103
Tableau 6.7	Longueurs d'ancrage effectives expérimentales versus théoriques.....	121

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	Cycle de vie des matériaux de construction.....8
Figure 2.2	Comparaison des émissions de GES8
Figure 2.3	Courbe contrainte-déformation du bois sollicité parallèlement au fil10
Figure 2.4	Structure microscopique d'un bois résineux.....11
Figure 2.5	Courbes contrainte-déformation typiques de certains composites en PRF16
Figure 2.6	Courbes contrainte-déformation typiques des fibres, matrices et PRF17
Figure 3.1	Configurations les plus courantes (EBR et NSMR)23
Figure 3.2	Exemple d'emplacement des jauges à partir de l'extrémité non chargée du PRF33
Figure 3.3	Comparaison des courbes adhérence-glissement moyennes.....35
Figure 3.4	Courbes des relations déformations-glissement et adhérence-glissement à l'interface entre les PRF et : a) acier, b) bois et c) béton36
Figure 3.5	Modes de rupture fréquents en flexion38
Figure 3.6	Modes de rupture fréquents en arrachement39
Figure 4.1	Phases expérimentales46
Figure 4.2	Schéma du banc d'essai pour la flexion en quatre points49
Figure 4.3	Diagrammes des efforts internes.....50
Figure 4.4	Schéma du banc d'essai pour l'arrachement.....51
Figure 4.5	Prescription des zones sans adhésif54
Figure 4.6	Installation du PRF pour la flexion et l'arrachement.....55
Figure 4.7	Exemple d'emplacement du LVDT et des jauges de déformation sur les poutres en flexion56

Figure 4.8	Exemple d'emplacement des jauges de déformation sur les spécimens en arrachement.....	56
Figure 5.1	(a) Section renforcée d'une lamelle; (b) Section transformée équivalente en bois.....	63
Figure 6.1	Distribution des déformations le long de la hauteur à mi-portée du spécimen	73
Figure 6.2	Modes de rupture répertoriés lors des essais de flexion	75
Figure 6.3	Courbes de comportement Force-Déplacement de la série 1.....	81
Figure 6.4	Courbes de comportement Force-Déplacement de la série 2.....	82
Figure 6.5	Courbes de comportement Force-Déplacement de la série 3.....	83
Figure 6.6	Courbes contraintes-déformations : a) Série 1, b) Série 2 et c) Série 3	85
Figure 6.7	Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-1L50-01.....	87
Figure 6.8	Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-1S72-02.....	87
Figure 6.9	Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre NSM-1L50-01	87
Figure 6.10	Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-2L50-02.....	88
Figure 6.11	Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-1S140-02.....	88
Figure 6.12	Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre NSM-2L50-02	88
Figure 6.13	Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-1L25-01.....	89
Figure 6.14	Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-1S36-01	89
Figure 6.15	Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre NSM-1L25-01	89

Figure 6.16	Poutre en bois renforcée en flexion à l'aide d'une lamelle collée en surface91
Figure 6.17	Mauvaise adhérence du spécimen F-AL500-1L17-0195
Figure 6.18	Modes de rupture répertoriés lors des essais d'arrachement96
Figure 6.19	Défauts de la cage observés durant les essais97
Figure 6.20	Courbes de comportement Force-Déplacement de la série A.....99
Figure 6.21	Courbes de comportement Force-Déplacement de la série B.....100
Figure 6.22	Courbes de comportement Force-Déplacement de la série C.....101
Figure 6.23	Exemple d'emplacement des jauges à partir de l'extrémité chargée du PRF103
Figure 6.24	Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL100-1S36-01104
Figure 6.25	Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL100-1L25-01.....105
Figure 6.26	Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL150-1S36-01105
Figure 6.27	Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL150-1L25-01.....105
Figure 6.28	Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1S25-01106
Figure 6.29	Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1S25-02.....106
Figure 6.30	Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1L17-01.....106
Figure 6.31	Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1L17-02.....107
Figure 6.32	Relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1S25-01110
Figure 6.33	Relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1S25-02.....110

Figure 6.34	Relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1L17-01.....	111
Figure 6.35	Relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1L17-02.....	111
Figure 6.36	Exemple d'emplacement des jauges à partir de l'extrémité non chargée du PRF	113
Figure 6.37	Adhérence-glissement du spécimen AL100-1S36-01	116
Figure 6.38	Adhérence-glissement du spécimen AL100-1L25-01	117
Figure 6.39	Adhérence-glissement du spécimen AL150-1S36-01	117
Figure 6.40	Adhérence-glissement du spécimen AL150-1L25-01	118
Figure 6.41	Adhérence-glissement du spécimen AL500-1S25-01	118
Figure 6.42	Adhérence-glissement du spécimen AL500-1S25-02	119
Figure 6.43	Adhérence-glissement du spécimen AL500-1L17-01	119
Figure 6.44	Adhérence-glissement du spécimen AL500-1L17-02	120

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse du cycle de vie
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNBC	Code national du bâtiment du Canada
CSA	Association canadienne de normalisation
EBR	Renforcement collé en surface ou <i>Externally Bonded Reinforcement</i> ou <i>Externally Bonded</i>
GES	Gaz à effet de serre
HNSM	Armature horizontale encastrée près de la surface ou <i>Horizontal Near-Surface Mounted Reinforcement</i> ou <i>Horizontal Near-Surface Mounted</i>
LVDT	Transducteur de déplacement à basse tension ou <i>Low Voltage Displacement Transducers</i>
MCA	Matériaux composites avancés
MOR	Module de résistance ou <i>Modulus of Rupture</i>
NLGA	Commission nationale de classification des sciages ou <i>National Lumber Grades Authority</i>
NSM	Armature encastrée près de la surface ou <i>Near-Surface Mounted Reinforcement</i> ou <i>Near-Surface Mounted</i>
PRF	Polymères renforcés de fibres
PRFA	Polymères renforcés de fibres d'aramide
PRFB	Polymères renforcés de fibres de basalte
PRFC	Polymères renforcés de fibres de carbone
PRFH	Polymères renforcés de fibres hybrides
PRFL	Polymères renforcés de fibres de lin
PRFV	Polymères renforcés de fibres de verre

VNSM Armature verticale encastrée près de la surface ou *Vertical Near-Surface Mounted Reinforcement* ou *Vertical Near-Surface Mounted*

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A_F	Aire de la section du PRF (mm ²)
A_n	Aire de la section transversale nette (mm ²)
b	Largeur de la section en bois (mm)
b_F	Largeur du PRF (mm)
C_w	Force de compression résultante procurée par le bois (kN)
d	Hauteur de la section en bois (mm)
E_F	Module d'élasticité du PRF (GPa)
E_w	Module d'élasticité du bois (GPa)
f_b	Résistance (contrainte) prévue en flexion du bois (MPa)
f_{Fu}	Résistance à la traction du PRF (GPa)
f_t	Résistance (contrainte) prévue en traction du bois (MPa)
f_v	Résistance (contrainte) prévue en cisaillement du bois (MPa)
f_{wc}	Résistance ultime à la compression du bois (GPa)
f_{wt}	Résistance ultime à la traction du bois (GPa)
I	Moment d'inertie (mm ⁴)
K_D	Coefficient de durée d'application de la charge
K_H	Coefficient de système de partage des charges
K_L	Coefficient de stabilité latérale
K_{Sb}	Coefficient de conditions d'utilisation de la flexion
K_{Sv}	Coefficient de conditions d'utilisation du cisaillement
K_T	Coefficient de traitement
K_{Zb}	Coefficient de dimensions de la flexion
K_{Zv}	Coefficient de dimensions du cisaillement
l_a	Longueur d'ancrage (mm)
L	Portée (mm)
M_n	Moment nominal (kNm)
M_r	Résistance pondérée au moment de flexion (kNm)
n	Coefficient d'équivalence
n_F	Nombre de couche de PRF
P	Force appliquée par le vérin ou force de chargement (kN)
P_u	Force ultime (kN)
s	Glissement ou déplacement relatif (mm)
s_i	Glissement ou déplacement relatif à l'emplacement i (mm)
S	Module de section (mm ³)

t_F	Épaisseur du PRF (mm)
T_F	Force de tension résultante procurée par le PRF (kN)
T_w	Force de tension résultante procurée par le bois (kN)
V_n	Cisaillement nominal (kN)
V_r	Résistance pondérée au cisaillement (kN)
$\bar{y}$	Distance de la fibre extrême à l'axe neutre (mm)
$\bar{y}_c$	Distance de la fibre la plus comprimée à l'axe neutre (mm)
$\bar{y}_t$	Distance de la fibre la plus tendue à l'axe neutre (mm)
Δ_u	Déplacement ultime (mm)
Δl_a	Distance entre deux jauges consécutives (mm)
ϵ	Déformation unitaire (mm/mm ou $\mu\epsilon$)
ϵ_F	Déformation en traction du PRF (mm/mm ou $\mu\epsilon$)
ϵ_{Fu}	Allongement à la rupture du PRF (%)
ϵ_i	Déformation unitaire de la jauge i (mm/mm ou $\mu\epsilon$)
ϵ_{wc}	Déformation en compression du bois (mm/mm ou $\mu\epsilon$)
ϵ_{wt}	Déformation en traction du bois (mm/mm ou $\mu\epsilon$)
$\mu\epsilon$	Microdéformations
ρ_F	Masse volumique du PRF (g/cm ³)
ρ_{PRF}	Taux de renforcement (%)
σ	Contrainte normale de flexion (MPa)
τ_i	Contrainte tangentielle d'adhérence moyenne à l'emplacement i (MPa)
ϕ	Coefficient de résistance

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte et problématique

Le renforcement des structures en bois des petits bâtiments résidentiels avec peu d'étages est relativement simple et ne requiert pas de calculs fastidieux de la part de l'ingénieur. Cependant, au cours des dernières années, plusieurs bâtiments multiétagés et structures en bois d'envergure ont été bâtis au Canada et dans le monde. Ceci a été facilité par l'avènement des nouvelles prescriptions des codes et notamment le Code national du bâtiment du Canada (CNBC). Par ailleurs, le Canada compte un patrimoine historique important de ponts couverts en bois. En 2019, le Québec dénombrait 85 ponts couverts authentiques toujours en place, selon le répertoire publié par Les ponts couverts au Québec (2019). Le renforcement de ces structures en bois n'est pas toujours évident et doit tenir compte de l'interférence avec l'aspect architectural qui doit être minimal. À cet égard, l'utilisation des matériaux composites en polymère renforcé de fibres (PRF) est une technologie de renforcement très prometteuse et déjà bien établie pour les structures en béton, par exemple. Le présent projet traite précisément du renforcement à l'aide de PRF de deux types de structures en bois : les bâtiments multi-étages et les ponts couverts.

Le bois est un matériau renouvelable facilement accessible et comportant de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer l'éco-responsabilité, la résistance au feu et la stabilité dimensionnelle. Il peut être utilisé sous sa forme brute, soit le bois d'œuvre, ou modifiée, soit le bois d'ingénierie, le bois lamellé-collé, le bois lamellé-cloué et le bois lamellé-croisé. En revanche, il comporte également certains défauts naturels pouvant légèrement diminuer ses capacités structurales, tels que les nœuds, les fentes et les gerces. Cet aspect doit être pris en compte lors du renforcement d'une structure en bois. C'est donc en combinant le bois avec des matériaux composites en PRF que l'on espère obtenir un rendement optimal.

Malgré qu'il existe une multitude de techniques de renforcement, tels que la combinaison acier-bois et béton-bois, la recherche proposée offrira une avancée importante pour le renforcement des structures en bois déficientes à l'aide de PRF. Elle permettra d'augmenter la durée de vie de ces ouvrages et ainsi de conserver une partie importante du patrimoine actuel. Par ailleurs, elle offrira une solution alternative à la démolition de certains ouvrages à caractère historique.

À la connaissance de l'auteur, aucun projet au Québec n'a fait l'objet d'un renforcement d'une structure en bois à l'aide de PRF. Ainsi, une étude sur le sujet est nécessaire afin d'en déterminer les avantages et les inconvénients. C'est pourquoi le présent mémoire porte sur ce type de renforcement.

1.2 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de ce mémoire consiste à développer des méthodes de réhabilitation et des modèles de calcul pour les structures en bois renforcées à l'aide de matériaux composites en polymère renforcé de fibres. Plus spécifiquement, et afin de répondre à cet objectif principal, les objectifs spécifiques suivants sont fixés :

1. Évaluer les gains en capacité en flexion d'éléments en bois déficients, renforcés à l'aide de PRF en comparaison aux mêmes éléments, mais non renforcés.
2. Évaluer la capacité d'adhérence entre le bois et le PRF pour ainsi déterminer la longueur d'ancrage effective.
3. Déterminer le matériau composite en PRF qui offre la meilleure capacité de renforcement et identifier les configurations optimales des matériaux composites (nombre de couches, dimensions minimales, orientation, emplacement, etc.).

4. Développer des modèles de calcul pour le renforcement des divers éléments structuraux en bois à l'aide de PRF.

1.3 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs principaux et spécifiques et pour répondre à la problématique de recherche, la méthodologie renferme :

1. Une revue documentaire des études existantes sur le renforcement des structures en bois à l'aide de matériaux composites en PRF. À cet égard, les éléments pertinents à la présente étude seront étudiés en profondeur et adaptés selon les objectifs ciblés. Ces éléments comprendront en particulier l'étude de la flexion, du cisaillement, de l'adhérence et de la longueur d'ancrage des éléments en bois.
2. Une revue des différentes essences de bois et des différents matériaux composites disponibles au Canada. À cet égard, les codes et normes applicables au Canada seront consultés parallèlement avec ceux d'autres pays.
3. Un programme expérimental défini en fonction des éléments retenus pour la présente étude, soit la flexion, l'adhérence et la longueur d'ancrage. Ce programme devra inclure les types de spécimens (dimensions, nombre), les types de PRF et la configuration à adopter.
4. Une analyse exhaustive des résultats expérimentaux en parallèle avec le développement de modèles de calcul qui seront dérivés sur la base des résultats expérimentaux. Ces modèles de calcul permettront de confirmer ou d'infirmer les modèles proposés dans la littérature.

1.4 Contributions et limites du projet

Ce mémoire a pour but de confirmer, d'infirmer ou de circonstancier les résultats obtenus lors de recherches antérieures sur le renforcement des éléments en bois à l'aide de matériaux composites. L'étude approfondie des types de PRF, de leurs largeurs et de leurs configurations est nécessaire à l'enrichissement de la littérature canadienne. L'application par rapport aux normes de calcul au Canada fait également partie des raisons pour lesquelles cette étude est proposée. Concernant les limites de ce projet de recherche, un choix a été fait d'utiliser des matériaux de dimensions gros bois d'œuvre, soit de type poutre. Ainsi, seules 20 poutres seront utilisées pour effectuer les essais de flexion et d'arrachement confondus. De plus, les essais seront produits sur des éléments neufs et dans un environnement contrôlant l'humidité et empêchant la dégradation par les rayons ultraviolets et les intempéries.

1.5 Organisation du mémoire

Le mémoire s'organise en sept (7) chapitres, incluant la présente introduction. Le chapitre 2 se veut un résumé condensé sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux utilisés pour ce projet, soit le bois et les matériaux composites.

Le chapitre 3 présente une revue exhaustive de la littérature. Il situe le renforcement des éléments en bois par rapport aux recherches antérieures et traite principalement de la flexion, de l'adhérence, de la longueur d'ancrage et des modes de rupture répertoriés. La revue des codes et des normes fait également partie intégrante de ce chapitre. Une synthèse des résultats antérieurs et des besoins en recherche sont également traités.

Le chapitre 4 consiste à l'élaboration d'une description détaillée du programme expérimental. Les différentes phases expérimentales entreprises sont indiquées et les différents matériaux utilisés sont décrits. Une description des montages et des équipements utilisés pour les essais de flexion et d'arrachement fait également partie de ce chapitre. Les étapes de fabrication des spécimens sont traitées pour chaque type de configuration de renforcement étudié.

Le chapitre 5 traite des aspects théoriques servant de base aux essais expérimentaux. La résistance en flexion pour les éléments non renforcés et les éléments renforcés de PRF est traitée. La résistance au cisaillement et à l'arrachement est également incluse dans ce chapitre.

Le chapitre 6 rassemble les résultats obtenus lors des essais de flexion et d'arrachement. Les résultats sont regroupés sous forme de séries d'essais afin d'effectuer des analyses comparatives. Une analyse exhaustive est effectuée pour chaque paramètre étudié. De ces paramètres, on retrouve, entre autres, les modes de rupture, la capacité ultime, le comportement Force-Déplacement, le comportement contraintes-déformations, la relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre, la relation entre les contraintes d'adhérence et la distance d'extrémité chargée et la relation entre la contrainte d'adhérence et le glissement. Des modèles de calcul, basés sur ceux de la littérature, font l'objet de comparaisons et de discussions.

Enfin, le chapitre 7 présente les conclusions découlant des recherches menées dans le cadre de ce mémoire. Des recommandations quant à la poursuite des travaux traitant du renforcement des structures en bois à l'aide de matériaux composites en PRF sont également suggérées.

CHAPITRE 2

LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

Ce chapitre présente les propriétés du bois et des matériaux composites à base de polymère renforcé de fibres (PRF). Les différentes essences et qualités de bois au Canada ainsi que les propriétés physiques et mécaniques du bois sont exposées. Les types de renforcement et les propriétés des matériaux composites sont également présentés.

2.1 Le bois

Le bois est sans aucun doute le matériau de construction le plus utilisé en Amérique du Nord. Par sa variété d'applications et son impact environnemental positif, il demeure le premier choix des constructeurs. Le bois étant un matériau renouvelable et durable, il offre un choix écoresponsable permettant de réduire l'empreinte environnementale des bâtiments. L'analyse du cycle de vie (ACV), qui considère l'ensemble des étapes allant de l'extraction à la fin de vie du produit, met en évidence l'impact écologique de chaque matériau. Pour le bois, par exemple, la figure 2.1 schématise les différentes étapes subies au cours de sa vie.

De plus, le bois est à la fois récepteur et émetteur (en très petites quantités) de gaz à effet de serre (GES). L'ACV, effectuée à l'aide du logiciel ATHENATM (Cecobois, 2012), permet de comparer le potentiel de réchauffement climatique global d'une poutre en bois lamellé-collé (BLC) de 10 m de portée supportant une surcharge d'utilisation non pondérée de 9,6 kN/m. Cette analyse permet d'observer que pour la fabrication du bois, les émissions de CO₂ (en kg équivalent) sont environ 6 fois moins élevées que pour le béton et 4 fois moins élevées que celles de l'acier (voir la figure 2.2).

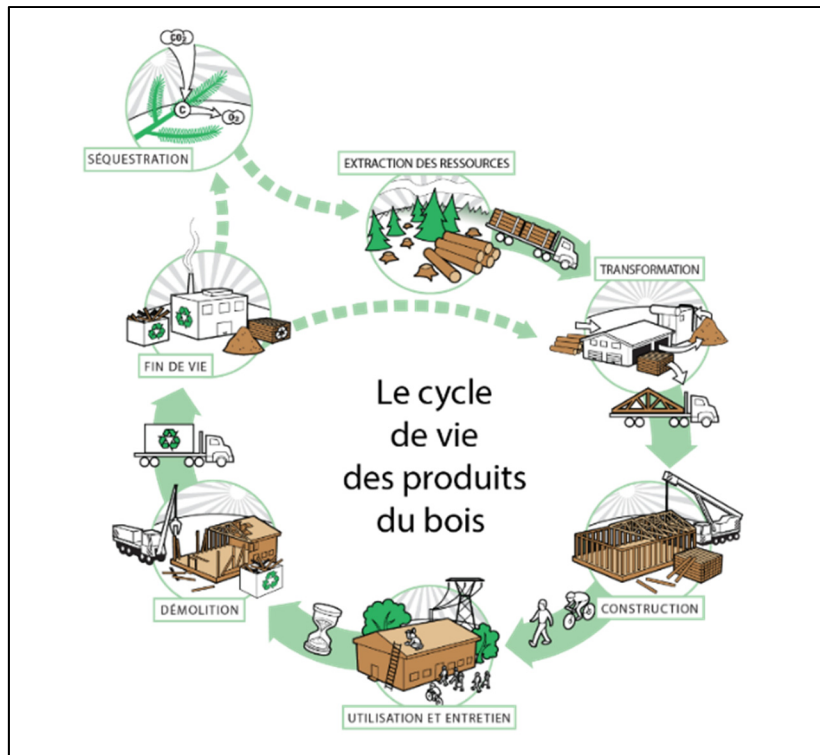


Figure 2.1 Cycle de vie des matériaux de construction
Tirée de Cecobois (2012)

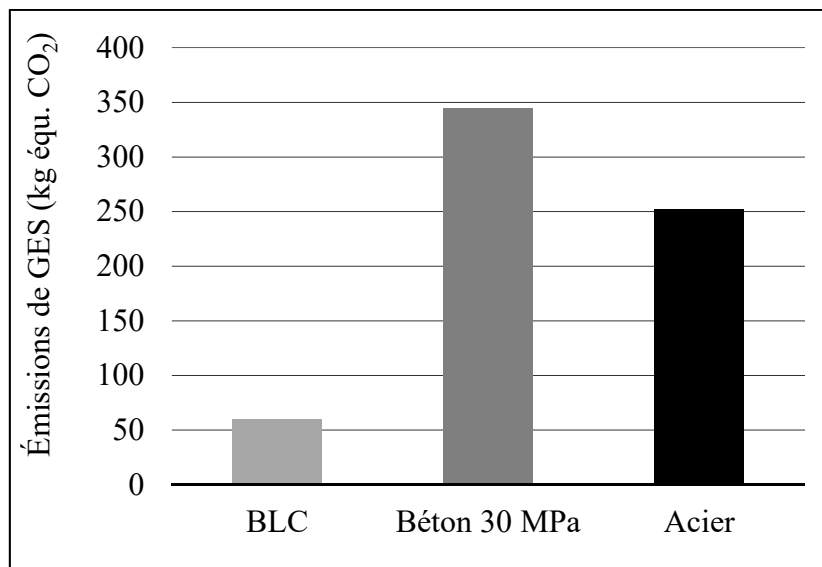


Figure 2.2 Comparaison des émissions de GES
Adaptée de Cecobois (2012)

2.1.1 Les essences et les qualités de bois au Canada

Au Canada, la Commission nationale de classification des sciages ou *National Lumber Grades Authority* (NLGA) régit la classification des éléments en bois. Déterminé à l'aide de plusieurs caractéristiques, telles que l'essence, l'apparence, les défauts, etc., chaque élément en bois d'œuvre est classé visuellement ou par machine selon sa désignation commerciale et sa classe de résistance principale. La NLGA définit 4 désignations commerciales : Douglas-Mélèze (D-M), Pruche-Sapin (P-S), Épinette-Pin-Sapin (E-P-S), Essences nordiques (Nor) et 5 classes de résistance principales : Structure Choisie (SS), No.1, No.2, No.3, Stud. Le classement visuel est établi en fonction des dimensions maximales des caractéristiques admissibles selon les règles de classement. À cet effet, les facteurs à prendre en compte sont, entre autres, l'emplacement et la dimension des nœuds et des fentes, l'inclinaison du fil, le gauchissement et les défauts de fabrication. Le classement mécanique du bois peut être effectué par contrainte mécanique (MSR) ou par résistance mécanique (MEL). Cette méthode de classement consiste à calculer le module d'élasticité de la section en effectuant des essais non destructifs sur des pièces de bois. Ensuite, une classe est assignée à chaque pièce en fonction des résultats obtenus en comparaison avec les valeurs établies par les règles de classement (CWC-2017, 2017; NLGA, 2017).

Outre le bois d'œuvre, il existe également le bois de charpente composite, comme le bois de placages stratifiés (LVL), le bois à copeaux parallèles (PSL) et le bois de long copeaux laminés (LSL). Il y a également le bois lamellé-collé (BLC) et récemment ajouté à la norme canadienne CSA-O86, le bois lamellé-croisé (CLT). Chacun d'eux comportent des caractéristiques propres, qui doivent être évaluées selon l'utilisation prévue.

2.1.2 Propriétés physiques et mécaniques du bois

Le bois possède des propriétés physiques et mécaniques particulières qui, lorsque bien maîtrisées par le concepteur, permettent d'offrir un vaste choix d'utilisation. Le bois est un matériau structural qui peut être utilisé seul, à l'état brut ou modifié, ou encore en combinaison avec d'autres matériaux de construction. Il est utilisé dans la construction d'une grande variété

d'ouvrages parmi lesquels on peut citer, entre autres, les bâtiments, les ponts, les arénas, les centres récréatifs et sportifs, etc.

Le comportement du bois dépend de la direction des sollicitations (parallèle au fil, perpendiculaire au fil, etc.). Lors d'une sollicitation parallèle au fil, le bois possède un comportement élasto-plastique. Celui-ci est linéaire en tension et bilinéaire en compression. La figure 2.3 montre le comportement élasto-plastique idéalisé du bois sollicité parallèlement au fil (Hoseinpour, Valluzzi, Garbin, & Panizza, 2018).

La figure 2.4 montre la structure microscopique d'un bois résineux, formé de cellules majoritairement longitudinales. Les cernes annuels varient d'un arbre à l'autre et sont formés de cellules plus étroites à l'été et plus aérées au printemps (Cecobois, 2012).

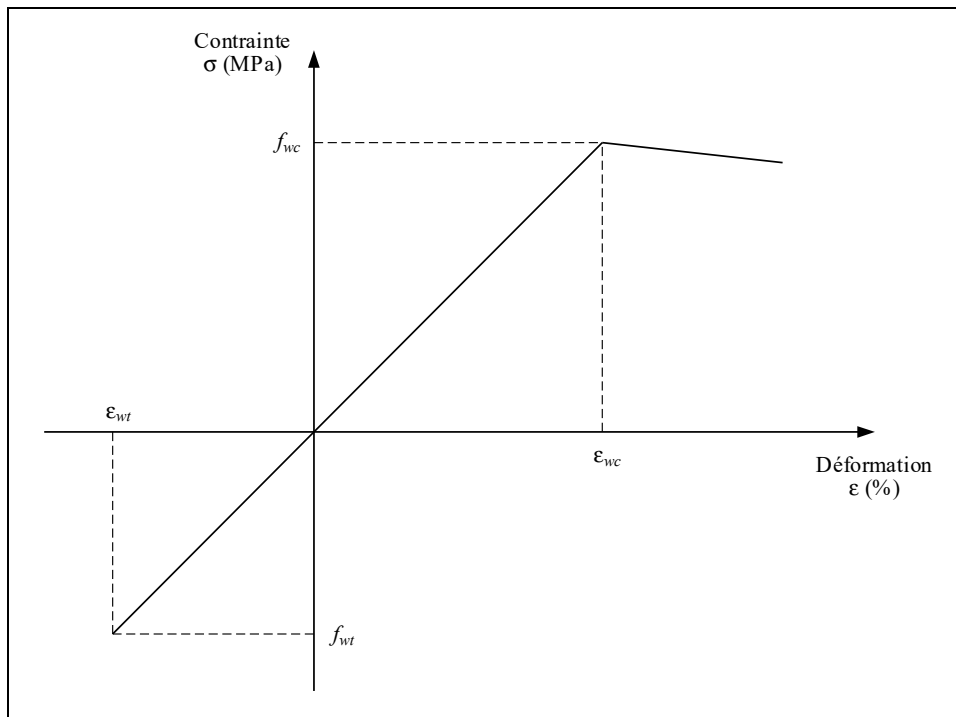


Figure 2.3 Courbe contrainte-déformation du bois sollicité parallèlement au fil

Le bois est constitué de cellulose (40% à 45%), d'hémicellulose (25% à 30%) et de lignine (25% à 35%). La cellulose est le composant principal des fibres dans la direction longitudinale,

tandis que la lignine est tridimensionnelle et sert à lier les fibres ensemble (cellulose et hémicellulose). De plus, la lignine est un polymère phénolique qui est connu pour son caractère hydrofuge, d'où son appellation de colle naturelle. L'hémicellulose est semblable à la cellulose, mais ses molécules sont différentes et beaucoup plus petites que ce dernier. Contrairement à la cellulose, l'hémicellulose n'est pas résistante aux attaques chimiques (Bodig & Jayne, 1993).

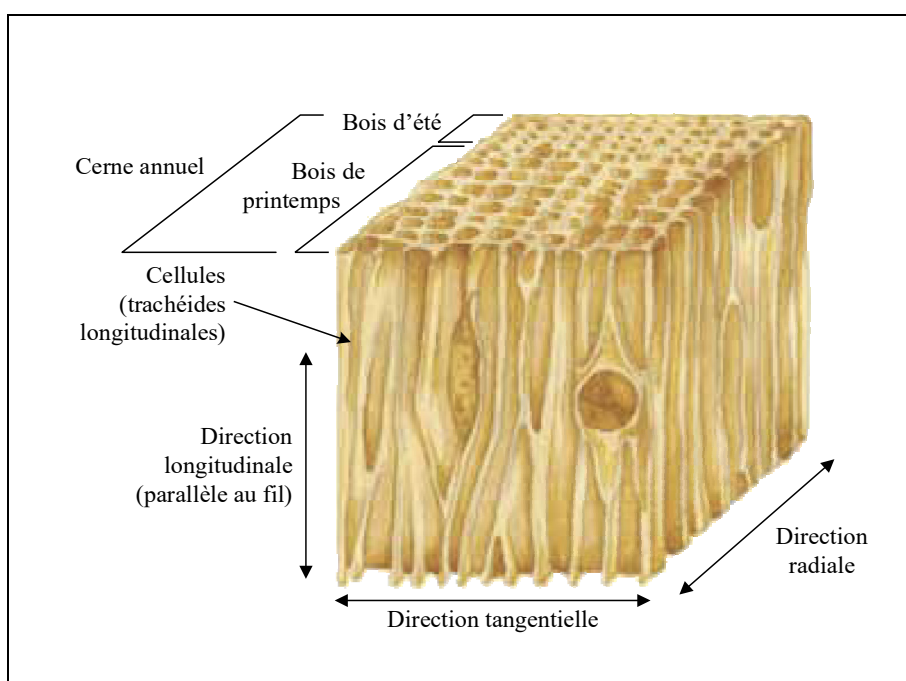


Figure 2.4 Structure microscopique d'un bois résineux
Tirée de Cecobois (2012)

De plus, le bois est un matériau anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés mécaniques varient en fonction de l'orientation des fibres (longitudinale, tangentielle et radiale) par rapport au chargement. Les modes de rupture seront alors différents selon l'orientation de l'élément et du type de chargement.

Effet de l'humidité

Une des caractéristiques très importante du bois est sa capacité à absorber l'humidité, soit l'hygroscopicité. En effet, le bois est un matériau extrêmement sensible aux variations

d'humidité qui le font changer de forme et peuvent mener à une détérioration par pourriture. Sous le point de saturation des fibres (PSF), approximativement 28%, la résistance de l'élément augmente lorsque sa teneur en humidité (TH) diminue. Jusqu'à l'atteinte du taux d'humidité d'équilibre, entre 9% et 15%, le bois est sujet à prendre de l'expansion (gonflement) ou à rétrécir (retrait). Au-delà du PSF ($TH > 28\%$), le changement de teneur en humidité n'aura aucun effet sur les dimensions du bois, contrairement à un $TH < 28\%$ qui causera un retrait proportionnel à la perte d'humidité. Ce retrait est plus important dans la direction tangentielle et radiale que dans la direction longitudinale. Il est donc très important de contrôler l'environnement de séchage pour ne pas causer de contraintes trop importantes dans l'élément. En effet, un retrait trop rapide, selon les dimensions des pièces, causerait des défauts prématurés (i.e., gauchissement, fentes) et affecterait sa résistance. Par conséquent, ce changement de comportement doit être pris en compte particulièrement pour la conception des assemblages (Cecobois, 2012; CWC-2018, 2018).

Défauts naturels

Contrairement à l'acier ou au béton, le bois est un matériau qui demande une analyse plus élaborée et qui comporte une limite quant à son utilisation dans le domaine de la construction, compte tenu de ses propriétés mécaniques variables. Cette limite d'utilisation peut être surpassée lorsque le bois seul est combiné à d'autres matériaux, tels que le béton, l'acier ou les PRF. Plusieurs défauts, tels que les nœuds, les fentes, les gerces, etc., affectent grandement la qualité du matériau. Par exemple, un nœud empêche la continuité des fibres dans la direction principale (longitudinale) diminuant la résistance de l'élément dans cette direction. Par ailleurs, l'emplacement, les dimensions et le nombre de nœuds influencent la qualité du matériau. Ces données sont prises en compte lors du classement du bois. Les fentes, qu'elles soient superficielles ou plus importantes, n'affectent généralement pas la résistance en tension du bois parallèlement au fil. Cependant, lors d'un chargement en compression, s'il y a présence de fentes importantes, la résistance sera affectée considérablement. D'autres défauts peuvent être présents à l'intérieur ou à l'extérieur du bois, causés par une attaque d'insectes, de végétaux ou de champignons; ou par une anomalie de formation (distorsion de l'anneau, entre-écorce,

broussins), mais n'affectent pas nécessairement la résistance de l'élément et dépend de l'étendue des défauts. (Bodig & Jayne, 1993; Cecobois, 2012).

Dégradation

La dégradation du bois est causée par les rayons ultraviolets (UV), l'humidité, les cycles de mouillage-séchage et les sels de déglacage. Le séchage différentiel entre le cœur et la surface de la pièce de bois est causé par une exposition directe aux rayons du soleil. Une exposition prolongée peut affecter grandement la structure du matériau et entraîner une dégradation prématurée. Ce phénomène est reconnaissable par une coloration grise en surface. Il n'est cependant pas grave s'il est contrôlé. Lorsque les pièces de bois sont installées à l'extérieur et sont exposées aux cycles de mouillage-séchage, le fendillement du bois cause des fissures (fentes) microscopiques et une dégradation des produits de finition en surface. L'apparition de fentes facilite la pénétration de l'eau à l'intérieur de la pièce accélérant la dégradation et favorisant le développement de pourriture. Une exposition aux sels de déglacage, dans le cas des ponts routiers en bois, n'affecte pas directement le bois, mais plutôt les attaches et les connecteurs, qui doivent être protégés en conséquence (Cecobois, 2012).

Il est important de différencier la moisissure de la pourriture. Ces deux phénomènes n'affectent pas le bois de la même façon. La moisissure, provoquée par le développement de spores de champignons, est superficielle et n'affecte pas la résistance du bois puisqu'elle n'est présente qu'en surface. Cependant, la pourriture se développe dans un milieu très humide et elle est causée par la présence de champignons qui dégradent la lignine, affectant grandement la résistance structurale de la pièce.

Finalement, le bois offre de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer la stabilité dimensionnelle, une résistance mécanique connue et uniforme et une résistance au feu.

2.2 Les matériaux composites

Que ce soit pour la réhabilitation des bâtiments ou des ponts construits en bois, il existe plusieurs méthodes efficaces ayant fait leurs preuves au fil des ans. De ces méthodes, il y a l'utilisation de l'acier ou de béton combiné au bois. Procurant une très grande capacité portante par rapport à ce dernier, l'acier et le béton permettent d'atteindre la résistance nécessaire. L'utilisation des matériaux composites en polymères renforcés de fibres est une troisième méthode, relativement récente et moins documentée, pour le renforcement et la réhabilitation des structures en bois.

2.2.1 Types de renforcement et propriétés

Depuis leur apparition sur le marché comme matériaux de renforcement des structures existantes, dans les années 1990, les composites en PRF offrent plusieurs avantages : ils sont parfaitement immunisés contre la corrosion et offrent un rapport résistance-poids très élevé. De plus, les PRF offrent des possibilités quasi-infinies quant à leur disponibilité variée et leur facilité de mise en place. Le renfort en PRF est constitué de fibres qui sont liées entre elles par une résine polymère (matrice). Il se présente sous forme de lamelles ou de tissus. Les lamelles, un composite extrudé par tirage, offrent l'avantage d'un meilleur contrôle de fabrication et de pose, mais ne peuvent être utilisées que sur une surface à plat. Les tissus, beaucoup plus flexibles, peuvent être utilisés sur presque toutes les surfaces (plate, ronde, ovale, etc.), mais sont généralement plus difficiles à installer.

Fibres

Les fibres sont l'élément principal du composite. Elles peuvent être unidirectionnelles (lamelles, tissus) ou bidirectionnelles (tissus) et possèdent des caractéristiques propres à chacune. Parmi les fibres les plus utilisées, il y a le carbone (PRFC), la verre (PRFV) et l'aramide (PRFA). D'autres types de fibres ont également été proposées dans la littérature, tels que le basalte (PRFB) et le lin (PRFL). Les fibres de carbone sont parmi les plus résistantes et les plus durables. Elles ont un très bon comportement à long terme et possèdent une très bonne résistance aux effets environnementaux (humidité, haute température, réactions alcalis-

granulats et acidité). Les fibres de carbone ont une résistance en tension 2 fois plus élevée que les fibres de verre, mais elles sont de 5 à 10 fois plus coûteuses (Chaallal, 2018). Le tableau 2.1 présente une comparaison qualitative de certains composites en PRF, tandis que la figure 2.5 montre les différentes courbes de contrainte-déformation des composites fréquemment utilisés en comparaison avec l'acier d'armature utilisé dans le béton.

Tableau 2.1 Comparaison qualitative des composites en PRF
Adapté de Chaallal (2018)

Critère	Composite en PRF			
	PRFC	PRFA	PRFL	PRFV
Résistance ultime en tension	Très bonne	Très bonne	Bonne	Très bonne
Module d'élasticité	Très bon	Bon	Adéquat	Adéquat
Masse volumique	Bonne (moyenne)	Excellente (la plus légère)	Bonne (moyenne)	Adéquate (la plus élevée)
Comportement à long terme	Très bon	Bon	Adéquat	Adéquat
Comportement en fatigue	Excellent	Bon	Adéquat	Adéquat
Résistance aux alcalis	Très bonne	Bonne	Adéquate	Adéquate

Outre la provenance et l'impact environnemental entre les fibres de verre et celles de lin, ces deux composites offrent les mêmes avantages quant aux critères énoncés au tableau précédent (B. Wang, Bachtiar, Yan, Kasal, & Fiore, 2019).

Matrices

La matrice est constituée soit d'une résine thermoplastique ou thermodurcissable. Compte tenu de leurs propriétés et leurs conditions d'utilisation, les résines époxydes thermodurcissables sont les plus utilisées et les plus disponibles sur le marché. Le tableau 2.2 présente quelques propriétés mécaniques des résines polymères thermoplastiques et thermodurcissables. Les résines (matrices) ont un comportement non linéaire, tel qu'illustré par leur courbe contrainte-déformation typique à la figure 2.6.

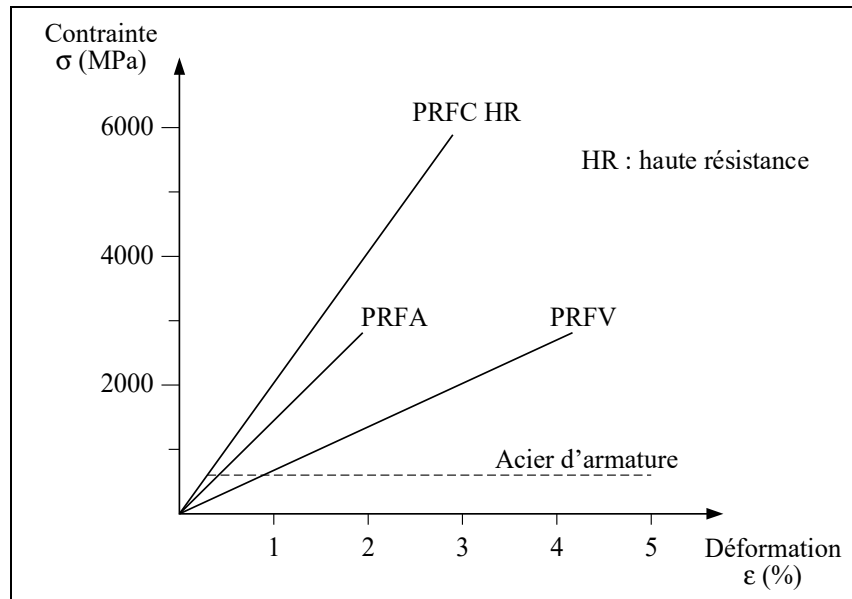


Figure 2.5 Courbes contrainte-déformation typiques
de certains composites en PRF
Adaptée de Chaallal (2018)

Tableau 2.2 Propriétés typiques des résines polymères (matrice)

Matrice	Masse volumique, ρ_m (g/cm ³)	Résistance en tension, f_{mu} (MPa)	Module d'élasticité, E_m (GPa)	Déformation à la rupture, ϵ_{mu} (%)
Résines thermoplastiques				
Polypropylène, PP	0,9	30	1,2	20 à 400
Polyamide, PA	1,1	70	2,0	200
Polyétheréthercétone, PEEK	1,3	90	4,0	50
Résines thermodurcissables				
Polyester	1,2	80	4,0	2,5
Époxyde	1,2	130	4,5	2,5
Vinylester	1,15	75	3,3	4,0
Phénolique	1,3	70	3,0	2,5

Le tableau 2.3 présente certaines propriétés typiques des composites unidirectionnels en PRF. Il est important de noter que ces valeurs sont à titre indicatif et peuvent varier d'un

manufacturier à l'autre. Ces propriétés sont généralement disponibles dans les fiches techniques du fabricant. À défaut, elles doivent être déterminées moyennant des essais en laboratoire selon les normes.

Tableau 2.3 Propriétés typiques des composites unidirectionnels en PRF

Composite	Masse volumique, ρ_F (g/cm ³)	Résistance ultime en tension, f_{Fu} (MPa)	Module d'élasticité, E_F (GPa)	Déformation ultime à la rupture, ϵ_{Fu} (%)
PRFC	1,5 à 1,6	1020 à 2080	100 à 140	1,0 à 1,5
PRFA	1,2 à 1,5	700 à 1720	48 à 68	2,0 à 3,0
PRFL	1,4 à 1,5	480 à 1500	15 à 40	1,2 à 1,6
PRFV	1,2 à 2,1	520 à 1400	20 à 40	1,5 à 3,0

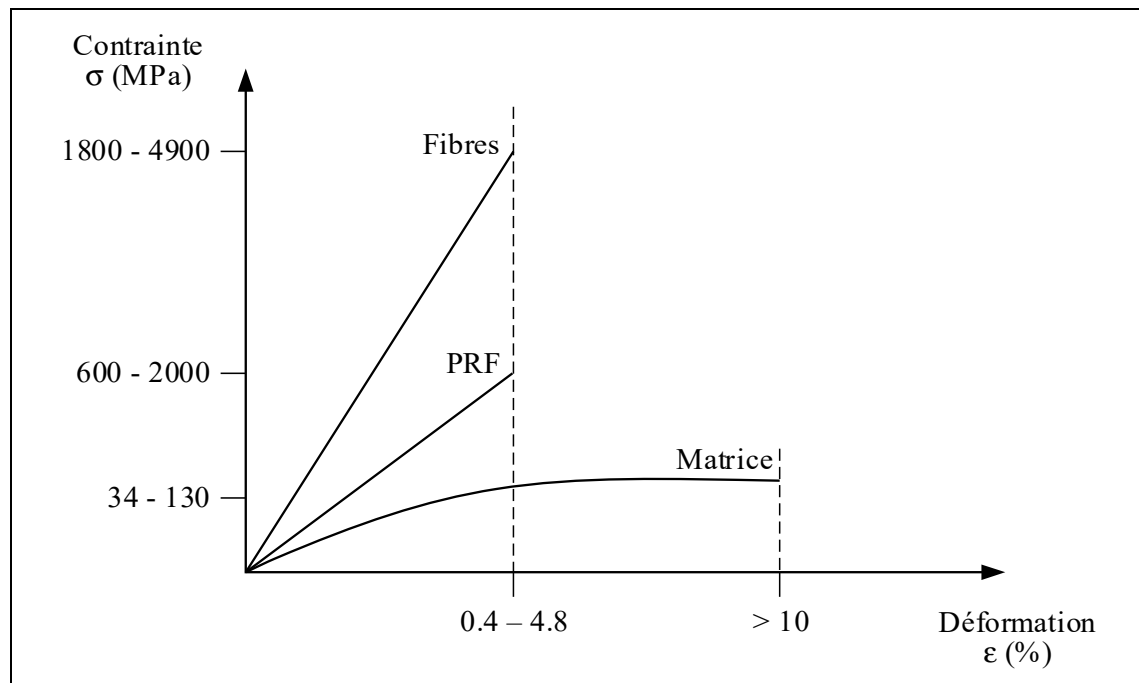


Figure 2.6 Courbes contrainte-déformation typiques des fibres, matrices et PRF
Adaptée de Chaallal (2018)

CHAPITRE 3

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Contrairement à l'acier ou le béton, le bois est un matériau difficilement contrôlable compte tenu de ses propriétés mécaniques variables. Plusieurs défauts, tels que les nœuds, les fentes, les gerces, etc., peuvent affecter de façon significative la qualité du matériau (Swedish Wood, 2016). Une attention particulière doit être portée quant au type de renforcement utilisé.

En raison des changements climatiques et de l'impact de nos choix sur ceux-ci, il devient primordial de considérer chaque facette du choix de matériau à utiliser pour la conception ou la réhabilitation d'un projet, notamment leur impact sur l'environnement. À cet égard, le bois, utilisé depuis de nombreuses années, représente un matériau de premier choix. Par sa qualité visuelle, ses domaines d'applications mixtes et sa capacité d'adaptation lorsque combiné à d'autres matériaux comportant des propriétés physiques et mécaniques différentes, il est idéal pour contrer les effets environnementaux néfastes.

Ce chapitre présente une revue de la littérature sur le renforcement des éléments structuraux en bois à l'aide de matériaux composites en PRF collés en surface ou encastré. Il fait état des connaissances acquises à ce jour et des points saillants tant au niveau de la recherche dans ce domaine que du point de vue des normes et codes. Le chapitre se décline en six volets comme suit : (i) Renforcement en flexion; (ii) Adhérence et longueur d'ancrage; (iii) Modes de rupture; (iv) Revue des codes et normes; (v) Synthèse des recherches antérieures et (vi) Besoins en recherche.

3.1 Renforcement en flexion

Lorsqu'il s'agit d'évaluer la résistance en flexion d'une poutre en bois, la majorité des expérimentations sont effectuées par un essai de flexion en quatre points ou en trois points, en fonction de la longueur des poutres. Cela permet d'évaluer la résistance, les déplacements et la rigidité de la poutre. Un premier spécimen est d'abord testé afin de définir les propriétés de

base à utiliser pour la comparaison des résultats. Par la suite, plusieurs poutres sont renforcées à l'aide de matériaux composites avancés (MCA), généralement en polymère (vinyle ou résine) renforcé de fibres de carbone (PRFC), de fibres de verre (PRFV) ou de fibres d'aramide (PRFA), selon différentes configurations. Parfois, la flexion seule est vérifiée et d'autres fois, la flexion et le cisaillement sont combinés.

La configuration à utiliser dépend alors du mode de rupture de la poutre. Celle-ci peut être sous forme d'un enrobage sur les quatre côtés, au-dessous seulement ou bien sous forme de U. Le renforcement, sous forme de tissu ou de lamelle, peut également être installé sur toute la longueur de la poutre ou sur une longueur définie plus petite, et ce, en configuration continue ou discontinue.

Le nombre de couches à appliquer est également important et se situe habituellement entre une et trois couches. Les recherches ont démontré que plus le nombre de couches est élevé, plus la résistance augmente. Cependant, elles ont également démontré qu'au-delà de trois couches, cette résistance tend plutôt à diminuer, alors un maximum de trois couches est à privilégier.

Une des premières recherches applicables au bois est attribuable à **Triantafillou et Plevris (1992)**. Les auteurs ont étudié les effets d'un renforcement externe sur les mécanismes de rupture, la rigidité et la ductilité. Les spécimens étudiés ont été soumis à une combinaison de charges de flexion et axiales à l'aide d'un modèle analytique et d'essais expérimentaux. Les auteurs notent que même un petit pourcentage de renforcement, de l'ordre de 1%, augmente la rigidité du spécimen d'environ 60%. Ils notent également que le mode de rupture devient ductile en compression suivi par une rupture du renfort puis du bois en tension.

Plusieurs modes de rupture ont été étudiés par **Johns et Lacroix (2000)**, dont la rupture en tension et à l'ancrage du matériau composite. Le premier mode est définitivement exclu puisque les matériaux composites sont beaucoup trop résistants et le bois atteindra la rupture en premier lieu. Pour le deuxième mode, le même principe que pour le calcul de l'ancrage des barres d'armature dans le béton a été utilisé (Lacroix, 1999). Les auteurs ont déterminé qu'il

est bénéfique et économique de poursuivre le composite jusqu'à la face de l'appui. De plus, cela implique de réduire au minimum une éventuelle rupture en tension et en cisaillement combinée ainsi qu'un risque de rupture en tension causé par les défauts naturels dans le bois aux endroits qui ne seraient pas renforcés (i.e., le composite n'est pas poursuivi au-delà de la zone d'ancrage).

Les auteurs ont utilisé trois différentes configurations de renforcement : 1) deux couches de PRFC du côté de la tension s'arrêtant au point d'ancrage calculé, 2) idem au premier, mais se poursuivant jusqu'à la face des appuis et 3) une couche en U se poursuivant jusqu'à la face des appuis. Pour la première configuration, une augmentation du moment résistant de 5% à 75%, suivant la résistance initiale du bois seul, a été observée. Le plus haut pourcentage (75%) est associé au renforcement des éléments les plus faibles et le plus bas (5%) est attribuable au renforcement des spécimens initialement plus forts. La deuxième configuration a permis d'atteindre un gain de résistance allant de 15% à 100 %, selon les mêmes constatations que pour la première configuration. Pour la dernière, une augmentation de la résistance de 30% à 90% a été observée.

En outre, les résultats ont démontré que le renforcement de pièces de bois ayant une faible résistance initiale, soit sans renforcement, était beaucoup plus bénéfique que pour les pièces ayant une meilleure résistance de base. Selon les auteurs, le renforcement réduit la variabilité de la résistance des spécimens. La raison est que la rupture en tension est retardée ou évitée par le renforcement en tension de la poutre. Cela a pour effet de limiter l'augmentation de la résistance pour une poutre plus résistante au départ. De plus, les valeurs expérimentales obtenues offrent une augmentation de la résistance bien plus élevée que les valeurs théoriques et celles de la norme CSA-O86.

La méthode de renforcement pour les ponts en bois existants développée par **Svecova et Eden (2004)** permet d'augmenter la capacité portante de 30% pour pouvoir supporter le poids des camions et d'offrir une méthode d'application évitant le retrait et le détournement de voie de circulation. Plusieurs poutres ont été testées en flexion, en cisaillement ou la combinaison des

deux, selon huit configurations de renforcement différentes comprenant des goujons et des barres en PRFV.

Les paramètres étudiés lors d'essais de flexion en quatre points sont la résistance ultime, le mode de rupture et le comportement Force-Déplacement. En comparant deux espacements de goujons différents, le premier égal à la hauteur de la poutre (300 mm) et le deuxième égal à la mi-hauteur (150 mm), les auteurs ont découvert qu'un écart du module de résistance infime ou *Modulus of Rupture* (MOR) existe entre les deux, par conséquent, le premier cas est à privilégier.

Du point de vue de la résistance, un renforcement combinant la flexion et le cisaillement offre de meilleures performances avec une augmentation moyenne du MOR égale au triple de celui d'un élément non renforcé. Également, ce double renforcement permet de réduire la variabilité inhérente de la résistance du bois. La majorité des poutres ont rompu en tension simple excepté celles doublement renforcées avec une longueur d'ancrage pleine portée, qui ont rompu en compression. Ce changement de mode de rupture est possible essentiellement grâce au renfort en flexion qui emmagasine les discontinuités et les défauts sur toute la longueur de la poutre. Aucune problématique quant à l'adhérence entre les deux matériaux n'a été détectée, excepté pour un cas où la barre de PRFV a cédé à l'emplacement de la rupture en tension du bois.

Une autre méthode, consistant à inciser le bois et à y insérer une tige rectangulaire en fibres de carbone extrudée a été examinée par **Johnsson, Blanksvärd, et Carolin (2006)**. Cette technique, communément appelée armature encastrée près de la surface ou *Near-Surface Mounted Reinforcement* (NSM ou NSMR), permet de dissimuler les tiges à l'intérieur du bois et de diminuer le risque de fendage dû aux mouvements causés par l'humidité.

Les auteurs ont évalué quatre configurations différentes : 1) sans renforcement, 2) avec un seul NSMR, 3) avec deux NSMR et 4) avec un seul NSMR, mais raccourci. Les résultats démontrent qu'un renforcement avec deux NSMR entraîne une augmentation de la rigidité d'environ 10% comparativement à aucun. De plus, la flèche à mi-portée à la rupture est

augmentée de 80%. La différence entre un seul et deux NSMR est minime, de l'ordre de 10%. Tous les spécimens renforcés de deux NSMR ont démontré une rupture ductile en compression à mi-portée sur la partie supérieure de la poutre. Une augmentation de la capacité de charge moyenne de 44% à 63% pour un renforcement à deux NSMR est démontrée comparativement à aucun renforcement.

Juvandes et Barbosa (2012) ont étudié les effets d'un renforcement d'éléments en bois avec des PRF par rapport à la liaison entre ces deux matériaux. L'étude expérimentale consistait en des essais d'arrachement et des essais de flexion en quatre points. Les essais d'arrachement ont pour objectif de déterminer la résistance maximale à l'arrachement des éléments renforcés de deux méthodes différentes. Pour ce faire, trois types de configurations différentes ont été explorés, soit 1) directement sur le bois seul, 2) le renforcement collé extérieurement ou *Externally Bonded Reinforcement* (EB ou EBR) et 2) le renforcement d'armature encastrée près de la surface (NSMR). La figure 3.1 montre les configurations les plus courantes explorées dans le cadre de cette étude.

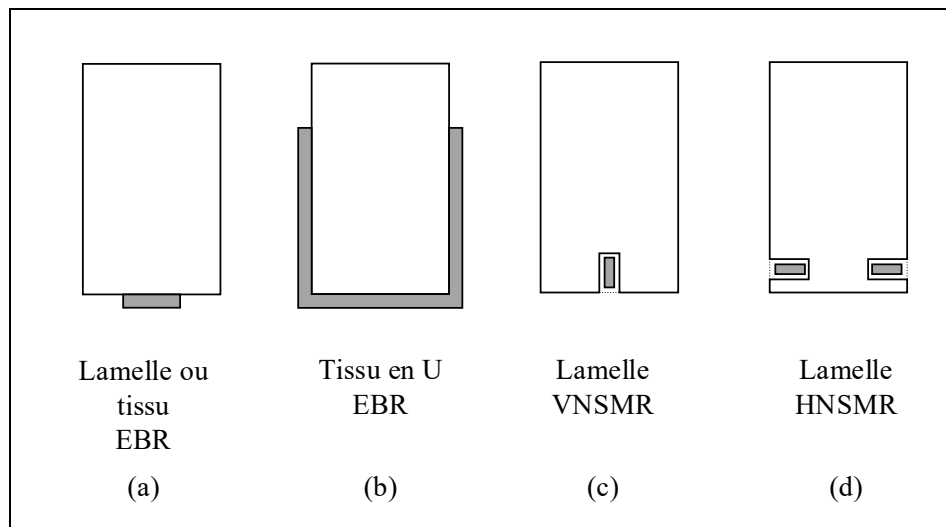


Figure 3.1 Configurations les plus courantes (EBR et NSMR)

Les auteurs utilisent des résultats provenant des mêmes essais faits avec le béton (Dimande, 2003; Sena Cruz, 2004; Travassos, 2005) pour fins de comparaison. La résistance à

l'arrachement perpendiculaire au fil du bois non renforcé et celles des éléments renforcés EBR, étant très près des résultats obtenus pour le béton, permettent de conclure que ces éléments ont de bonnes caractéristiques d'adhérence. Cependant, ils ont convenu que ce test n'était pas approprié pour le renforcement NSMR puisque la résistance est très faible.

La résistance à l'arrachement parallèle au fil du bois est déterminée à l'aide d'essais de flexion en quatre points. Trois configurations ont été étudiées, soit : 1) un renforcement EBR placé sous la poutre [figure 3.1 (a)], 2) un renforcement encastré horizontal (HNSM ou HNSMR) sur les côtés de la poutre [figure 3.1 (d)] et 3) un renforcement encastré vertical (VNSM ou VNSMR) sous la poutre [figure 3.1 (c)]. Les essais sont également faits avec trois longueurs d'ancrage différentes (20 mm, 40 mm et 60 mm). Les résultats ont démontré que la longueur d'ancrage effective est de 40 mm pour le EBR, 60 mm pour le HNSMR, et entre 40 mm et 50 mm pour le VNSMR. La différence entre le moment résistant à une longueur d'ancrage (40 mm ou 60 mm) et celui à une longueur d'ancrage de 20 mm double entre les éléments EBR et NSMR, ce qui indique que la technique NSMR bénéficie plus d'une augmentation de longueur d'ancrage. Une comparaison avec des essais semblables avec le béton a été effectuée et les conclusions démontrent une meilleure performance pour la technique NSMR que EBR. De plus, seulement un tiers de la longueur d'ancrage nécessaire pour le béton est requise pour le bois. Dans tous les cas, la technique VNSM est la plus efficace.

Les essais de flexion ont également permis de déterminer cinq modes de rupture différents, soit : 1) la rupture par déchirement des fibres du bois, 2) la rupture de l'adhésif sur la surface du bois, 3) la défaillance cohésive, 4) la rupture par déchirure du PRF dans la zone d'adhérence et 5) la rupture par déchirure du PRF hors zone adhésive. Les auteurs proposent l'utilisation des valeurs déterminées lors de leurs essais pour de futures recherches sur le renforcement du bois à l'aide de PRFC.

Le programme expérimental mené par Valluzzi, Nardon, Garbin, et Panizza (2016) et repris par **Hoseinpour et al. (2018)** consiste à tester des poutres renforcées de PRFC et de comparer leur résistance avec les mêmes spécimens non renforcés. Un essai de flexion en quatre points

a été réalisé sur dix poutres en bois d'œuvre pruche autrichien (*Picea abies*) suivant différentes configurations de renforcement. Les résultats ont démontré que la configuration optimale consiste en un renforcement d'une seule couche de PRFC, procurant une augmentation de la résistance de 46% comparativement à une section non renforcée. Deux autres configurations ont tout de même démontré des résultats remarquables : 1) trois couches de PRFL (résine époxy) procurent une augmentation de la résistance de 31%, tandis que 2) cinq couches de PRFL (résine vinyle) en procurent 24%.

Un seul mode de rupture a été mis en évidence lors des essais. On constate en premier lieu un effondrement de la poutre, suivi de la rupture du renforcement. Cette rupture, qualifiée de ductile, est très souvent causée par les défauts naturels présents dans le bois (i.e., nœuds), ne pouvant être contrôlés à son état initial. C'est pourquoi une attention particulière doit être portée à ces défauts lors du renforcement. De plus, aucun signe de décollement entre le bois et le composite n'a été observé avant la rupture.

Le modèle analytique élaboré par les auteurs est basé sur la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli et Timoshenko. Les propriétés mécaniques initiales du bois sont d'abord utilisées pour calibrer le modèle et remplacées par les valeurs ainsi calibrées. D'autres propriétés, telles que le coefficient de Poisson et le module d'élasticité ont également été calculés.

Les résultats ont démontré que la poutre non renforcée ne possède pas de comportement plastique en compression, alors que la rupture des poutres renforcées se produit après ce type de comportement. Enfin, l'utilisation d'un renforcement en PRFC, étant le plus résistant, modifie le mode de rupture qui passe de la rupture en flexion à la rupture en compression. Il a été noté que le renforcement n'est pas la raison de la rupture.

Plus récemment, **B. Wang et al. (2019)** ont comparé le comportement d'un renforcement à l'aide de fibres de lin (PRFL), de verre (PRFV) et de basalte (PRFB). Le lin, étant un matériau à base de plante, est bénéfique pour l'environnement et beaucoup moins dispendieux que le carbone, par exemple. Ce faible coût est également applicable aux fibres de verre et de basalte.

Cependant, ces trois types de fibres offrent une résistance moins élevée que le carbone et l'aramide.

Un autre point intéressant, les auteurs traitent d'un renforcement hybride (PRFH), c'est-à-dire la combinaison en couches successives de fibres de verre, de basalte et de lin. Les résultats obtenus et comparés avec un renforcement simple (i.e., PRFL seul) permettent de conclure que les deux types de renforcement possèdent des avantages similaires quant à la résistance maximale en flexion, au module d'élasticité et au déplacement maximal à mi-portée. En revanche, les auteurs recommandent d'évaluer davantage ce type de renfort afin d'obtenir des résultats plus concluants.

3.2 Adhérence et longueur d'ancrage

Afin d'obtenir des résultats optimaux quant au renforcement des structures en bois à l'aide de PRF, il est essentiel de prendre en compte l'adhérence entre les interfaces bois-résine et résine-PRF, sans quoi la délamination de ces interfaces pourrait causer une rupture prématurée des éléments renforcés en flexion. Les concepts sur l'adhérence font partie intégrante des discussions antérieures citées ci-après.

Vanerek, Benesova, Rovnanik, et Drochytka (2014) ont menés une enquête sur la durabilité du lien d'adhérence bois-PRF sur des spécimens exposés à des conditions environnementales extérieures ou extrêmes pendant une période déterminée, à savoir un vieillissement à long terme et accéléré. Les modules de traction du PRFV et du PRFC sont égaux à 26,1 GPa et 95,8 GPa, respectivement, et celui de l'adhésif utilisé est de 3,18 GPa. Les valeurs de résistance à la traction sont de 575 MPa et 986 MPa pour les PRF et de 72,4 MPa pour l'adhésif.

Chaque spécimen de bois d'épicéa est recouvert d'une seule couche de tissu d'environ 1,5 mm d'épaisseur et entreposé pour une cure de 30 jours. Pour le vieillissement à long terme, les assemblages bois-PRF sont exposés aux intempéries jusqu'à 40 mois, tandis que le

vieillissement accéléré suit les traitements de la norme EN 302-1, allant d'une exposition de deux heures à sept jours.

Les effets causés par la température et l'humidité relative sont les principaux paramètres étudiés. Basée sur le long terme, une exposition en deçà de 20 mois semble plus critique sur la résistance au cisaillement, avec une diminution d'environ 11%. Au-delà de ce délai, la résistance tend à se stabiliser. Seulement quatre spécimens ont subi une délamination partielle due à une accumulation d'eau causée par l'apparition de fissures à l'intérieur du PRF. Ces observations démontrent que la qualité et l'intégrité d'une bonne liaison dépendent de la présence de fissures dans le bois permettant ou non la pénétration d'humidité.

Les mêmes conclusions sont dressées quant au vieillissement accéléré. En raison de l'incapacité d'adaptation de l'époxy face aux changements de volume du bois, la résistance au cisaillement en traction s'en voit diminuée significativement. Toutefois, le bois retrouve ses propriétés après le séchage.

En outre, les observations montrent que la liaison en ligne avec le bois tardif offre une meilleure adhérence que sur le bois précoce, en raison de la quantité d'époxy pouvant y pénétrer. De plus, une exposition hygrothermique prolongée à de hautes températures et à une augmentation du taux d'humidité diminue notablement l'adhérence entre le bois et le PRF.

Corradi, Righetti, et Borri (2015) ont procédé à l'évaluation du comportement d'une poutre en bois renforcée de barres en PRFC à l'aide d'essais d'arrachement (*pull-out tests*). L'objectif de l'étude est de déterminer l'efficacité de la liaison entre les surfaces selon différentes longueurs d'ancrage. Le programme expérimental considère des longueurs d'ancrage variant de 150 mm à 300 mm, par bonds de 50 mm, pour un total de quatre longueurs différentes. Parmi les méthodes d'essai possibles, celle d'une poussée à double cisaillement est considérée. Celle-ci consiste à tirer sur les deux barres, préalablement insérées de chaque côté du spécimen, et à pousser sur le prisme en bois.

Les auteurs ont considéré un total de 24 spécimens, soit 12 en sapin (*Albies alba*) de dimensions 200 mm × 200 mm × 500 mm et 12 en bois de châtaigner (*Castanea sativa*) de dimensions 220 mm × 220 mm × 500 mm. Chaque prisme comporte une incision parallèle au fil du bois de 14 mm × 15 mm de chaque côté et une longueur entre 150 mm et 300 mm, selon la longueur d'ancrage étudiée. Afin de déterminer la qualité du bois, quatre poutres sont testées selon un essai de flexion en quatre points permettant d'obtenir la résistance à la flexion.

Tout d'abord, un apprêt en époxy est appliqué à l'intérieur de chaque incision. Ensuite, une barre en PRFC de 7,5 mm de diamètre, ayant une surface sablée au jet de sable, est insérée à l'intérieur de l'incision, qui est ensuite saturée d'époxy. Le temps de cure est de 15 jours à température ambiante.

Les principaux paramètres étudiés sont la charge maximale, la contrainte de liaison moyenne entre la barre et la résine et le mode de rupture. Des jauges de déformations sont installées directement sur la surface de la barre afin de déterminer la répartition des contraintes. Trois modes de rupture ont été répertoriés, soit : 1) la rupture en cisaillement du bois, 2) la rupture en traction de la barre et 3) la délamination à l'interface barre-époxy. Le dernier mode de rupture étant le plus fréquent pour les longueurs d'ancrage de 150 mm et 200 mm et le deuxième pour la longueur la plus élevée.

Les auteurs de l'étude concluent qu'une longueur d'ancrage d'environ 250 mm est suffisante pour obtenir une distribution des contraintes adéquate et que l'essence du bois affecte très peu les résultats. Ils recommandent également l'utilisation d'un renforcement plus uniforme, comme plusieurs petites barres mieux distribuées, ce qui permettrait de réduire les contraintes et les déformations dans le bois.

Une étude expérimentale a été effectuée par **Raftery et Rodd (2015)**. L'étude porte sur le renforcement de poutres en bois lamellé-collé de faible qualité à l'aide de lamelles en PRFV. Afin de rendre le processus de fabrication d'une poutre plus rentable, l'utilisation d'un seul adhésif, le phénol résorcinol formaldéhyde, a été étudié pour les interfaces bois-bois et

bois-PRF. Cet adhésif, habituellement utilisé pour des applications structurales sur le bois, démontre d'excellents résultats pour la liaison bois-PRF lors d'essais sur de petits échantillons.

Parmi les 21 poutres testées, 6 sont non renforcées (Phase A), 10 sont non renforcées avec l'ajout d'une lamelle sacrificielle (Phase B) et 5 sont renforcées avec l'ajout d'une lamelle sacrificielle (Phase C). Cette lamelle sert principalement à protéger le matériau composite contre les dommages environnants (i.e., le feu) et permet d'avoir un aspect architectural plus attrayant. Les dimensions brutes des poutres sont de 96×190 mm sans lamelle sacrificielle et de 96×215 avec cette dernière.

Les essais de flexion en quatre points ont démontré un changement dans le mode de rupture, passant de brutal à semi-ductile. On a noté aussi la présence d'une réserve de résistance même après la rupture de la lamelle sacrificielle. Une augmentation de la rigidité globale de 63% entre la Phase C et A et une augmentation de la capacité du moment ultime de 31,2% (Phase C-B) et 41,7% (Phase C-A) a également été démontrée. La comparaison des résultats expérimentaux avec un modèle par éléments finis prouve que le renforcement avec une lamelle de PRFV aide à une meilleure distribution des contraintes et ainsi à réduire les défauts dans le bois. Le modèle présente aussi des résultats plus conservateurs en termes de moment ultime (12%) et de rigidité (2%). En outre, selon les résultats de cette étude, l'utilisation d'un seul adhésif pour tout le processus offre une alternative beaucoup moins coûteuse à l'utilisation d'un adhésif époxyde différent pour l'interface bois-PRF.

Vahedian, Shrestha, et Crews (2017) ont étudié les paramètres critiques à prendre en compte lors de la détermination de la longueur d'ancrage effective. Cette recherche s'est effectuée sur 136 assemblages bois-PRFC collés en surface avec différentes largeurs (35 mm, 45 mm et 55 mm), différentes longueurs d'ancrage (50 mm à 250 mm) et différentes sections de bois. Le composite en carbone utilisé possède une résistance en tension et un module d'élasticité de 2487 MPa et 228,89 GPa, respectivement. La résistance en tension et le module d'élasticité de l'époxy sont de 30 MPa et 4,5 GPa, respectivement.

Les spécimens sont recouverts, sur un seul côté, d'une ou deux couches de tissu en PRFC qui est prolongé sur une distance de 300 mm pour permettre les essais d'arrachement. L'élément renforcé est inséré dans une cage métallique fixe et la partie libre est tirée à raison de 0,3 mm/min. Les principaux modes de rupture rapportés sont l'arrachement du bois (98%) et le décollement à l'interface bois-résine (75%).

En considérant une répartition uniforme de la contrainte de cisaillement, la longueur d'ancrage effective, L_e , est établie comme suit :

$$L_e = \alpha \times \beta \times \ln(E_f t_f) \times (f_{ut})^{0,25} \quad (3.1)$$

Avec

$$\beta = \frac{1,25 + \frac{b_f}{b_t}}{2 \times \left(2,5 - \frac{b_f}{b_t} \right)}$$

Où α est une constante égale à $4,5\pi$, E_f et t_f sont respectivement le module d'élasticité et l'épaisseur du PRF et f_{ut} est la résistance ultime en tension du bois. Le ratio de largeur FRP-bois, β , est fonction de la largeur b_f du PRF et de celle du bois b_t .

À noter que si la longueur d'ancrage effective est plus grande ou égale à la portée, alors L_e doit être égal à la portée L .

Les résultats ont démontré que la force de liaison interfaciale augmente proportionnellement avec la largeur du PRF et qu'un ratio largeur PRF/bois peu élevé augmente la concentration de contraintes de cisaillement menant à une distribution non uniforme. Cette découverte est en accord avec les études antérieures sur l'adhérence PRF-béton (Chen & Pan, 2006; T. Xu, He, Tang, Zhu, & Ranjith, 2015; Ye & Yao, 2008). Il est également noté qu'une longueur d'ancrage effective permet de conserver une force ultime presque constante. Par ailleurs, jusqu'à un

certain point, les contraintes sont presque nulles. Ceci permet de conclure qu'une longueur d'ancrage supérieure à la longueur effective n'est aucunement nécessaire.

Un modèle d'analyse de régression a aussi été développé afin de comparer les résultats théoriques et expérimentaux. L'analyse comparative a permis de vérifier la validité du modèle par l'achèvement d'une corrélation satisfaisante entre les résultats prédits et ceux obtenus expérimentalement. De toute évidence, rien n'indique que l'application du PRF sur une longueur plus grande que nécessaire, potentiellement sur toute la surface, offre un bénéfice quelconque.

Différentes techniques de renforcement permettant d'évaluer les performances interfaciales entre des lamelles en PRFC et du bois ancien ont été examinées par **Biscaia, Chastre, Cruz, et Viegas (2017)**. Plus particulièrement, la technique de collage en surface (EB) et encastrée (NSM) ont fait l'objet de comparaisons numériques et expérimentales. Pour la partie expérimentale, 20 essais de cisaillement simple (*single-lap shear*) sur des poutres d'un ancien bâtiment renforcées de lamelles de PRFC selon différentes longueurs d'ancrage (65 mm à 280 mm) ont été réalisés. La résistance moyenne en traction et le module d'élasticité des lamelles sont de 1638 MPa et 159 GPa, respectivement. L'époxy utilisée possède une résistance à la traction de 29 MPa et un module d'élasticité de 0,79 GPa.

Afin de déterminer la longueur d'ancrage effective, les auteurs se basent sur les propositions de Juvandes et Barbosa (2012) qui définissent l'équation suivante :

$$L_{t,ef} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{wpm,p}}} \quad (3.2)$$

Où c_2 est une constante de calibration égale à 10 (EB) et entre 7 et 10 (NSM) et $f_{wpm,p}$ est la résistance moyenne à la traction du bois perpendiculaire aux fibres. L'équation utilisée par Biscaia et al. (2017) demeure la même, où seule la constante c_2 devient 1,4 (EB) et entre 2,6 et 4,4 (NSM).

À l'instar de ces essais, une courbe de glissement interfaciale (*interfacial bond-slip*) mettant en relation le glissement en fonction de la contrainte d'adhérence est proposée. Une méthode de calibration de cette courbe est également développée afin de permettre la comparaison entre l'expérimental et le numérique. L'étude a démontré que les résultats numériques surestiment ceux expérimentaux. Cette différence dans les résultats est attribuable aux défauts naturels présents dans le bois. Finalement, la comparaison entre la technique EB et NSM prouve que cette dernière offre de meilleurs résultats, tant au niveau de la résistance que de la longueur d'ancrage effective. En effet, une longueur de 155 mm pour le NSM demeure plus efficace que 215 mm pour EB.

3.2.1 Relation contrainte d'adhérence-glissement

Biscaia, Chastre, Borba, Silva, et Cruz (2016) ont évalué les différents comportements sur l'adhérence entre des lamelles en polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) et trois matériaux différents, soit : a) acier, b) bois et c) béton. Les lamelles utilisées ont un module d'élasticité moyen de 158 GPa et une déformation moyenne à la rupture de 1,03%. En corrélation avec les résultats obtenus, nonobstant le type de spécimen, la déformation maximale ne dépasse jamais 50% de la déformation moyenne à la rupture du PRF. Les spécimens en bois atteignent les plus hautes déformations du PRF, suivi par le béton et l'acier.

Dans le but d'évaluer les contraintes tangentielles d'adhérence et les glissements tout au long de la longueur d'ancrage, les équations suivantes sont proposées :

$$\tau_i = E_F t_F \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = \frac{ds}{dx} \Rightarrow s = \int_0^{L_b} \varepsilon \, dx + s_0 \quad (3.4)$$

L'équation (3.3) permet de déterminer la contrainte d'adhérence, τ , à un endroit x (voir la figure 3.2), à partir de l'extrémité libre du PRF (extrémité non chargée), en fonction de la

différence de déformations entre deux jauges consécutives, $d\epsilon$, et de la distance entre ces deux jauges, dx .

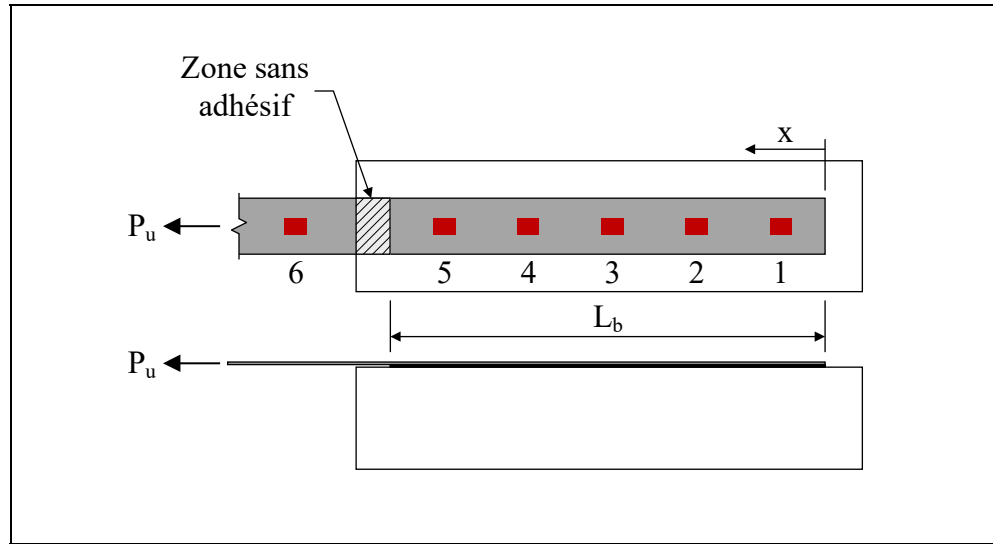


Figure 3.2 Exemple d'emplacement des jauges à partir de l'extrémité non chargée du PRF

L'équation (3.4) permet de calculer les déplacements relatifs, ou le glissement, s , entre le PRF et le bois. Cette équation assume que les déformations du bois sont négligeables comparativement aux déformations du PRF. Le glissement à l'extrémité libre ($x = 0$), s_0 , est considéré nul.

De plus, la force transmise au PRF peut être calculée par :

$$F = \epsilon_i E_F A_F \quad (3.5)$$

Où ϵ_i est la déformation des jauges collées à différents endroits le long de la longueur d'ancrage, L_b , et E_F et A_F sont respectivement le module d'élasticité et l'aire du PRF.

Afin d'évaluer la relation adhérence-glissement locale (ou contrainte d'adhérence-glissement local), les auteurs ont déterminé des modèles basés sur la littérature. Ainsi, la figure 3.4

présente les courbes des relations déformations-glissement et adhérence-glissement à l'interface entre les PRF et trois matériaux, soit : a) l'acier, b) le bois et c) le béton. Les secondes courbes sont déterminées en fonction des premières. Globalement, concernant les courbes d'adhérence-glissement, trois comportements sont observés : 1) bilinéaire (acier), 2) trilineaire (bois) et 3) non-linéaire (béton).

Pour l'acier, le comportement déformation-glissement est linéaire pour un glissement jusqu'à s_1 [voir la figure 3.4 a)]. Ce point correspond également à la contrainte d'adhérence maximale, τ_1 , de la courbe adhérence-glissement. Par la suite, le relâchement linéaire se produit jusqu'au glissement s_2 . Au-delà de ce glissement, la contrainte d'adhérence est nulle, correspondant au décollement du PRF.

Pour le bois, le comportement déformation-glissement est linéaire pour un glissement jusqu'à s_1 [voir la figure 3.4 b)]. Ce point correspond également à la contrainte d'adhérence maximale, τ_1 , de la courbe adhérence-glissement. Par la suite, le relâchement linéaire se produit jusqu'au glissement s_2 pour atteindre un plateau constant jusqu'au glissement s_3 , correspondant à la contrainte d'adhérence τ_2 . Au-delà de ce glissement, la contrainte d'adhérence est nulle, correspondant au décollement du PRF.

À cause des fissures dans le béton, son comportement adhérence-glissement est différent de celui des deux matériaux précédents. La forme non-linéaire de ce comportement peut être approximée par une courbe exponentielle [voir la figure 3.4 c)]. Ainsi, la contrainte d'adhérence maximale, $\tau_{\max}$, correspond au glissement maximal, $s_{\max}$. Lorsque le glissement ultime est atteint, la contrainte d'adhérence est nulle et correspond au décollement du PRF.

Les auteurs ont déterminé que la force de l'interface bois-PRF est supérieure aux autres interfaces et que cette même interface possède la longueur d'ancrage effective la plus longue.

Cela est dû au fait que le relâchement linéaire se fait plus lentement pour le bois que pour l'acier et le béton. De plus, les spécimens comportant une rigidité plus élevée, comme l'acier, auront une contrainte d'adhérence plus élevée, tandis que les spécimens plus déformables, comme le bois, auront un glissement plus élevé avant le décollement du PRF. La figure 3.3 montre la comparaison entre les courbes adhérence-glissement moyennes des trois matériaux étudiés par les auteurs.

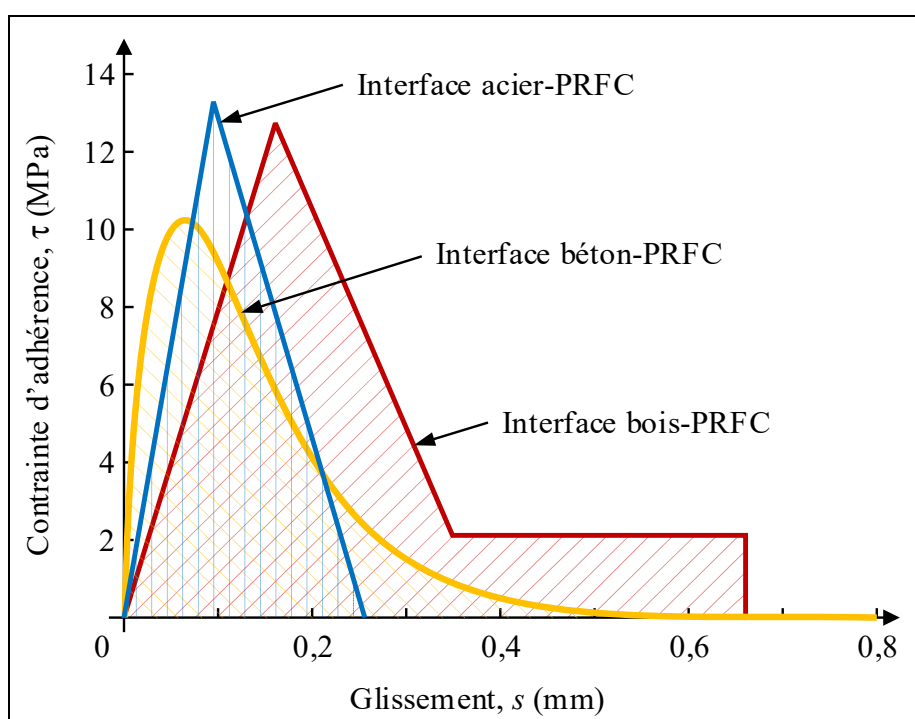


Figure 3.3 Comparaison des courbes adhérence-glissement moyennes
Adaptée de Biscaia et al. (2016)

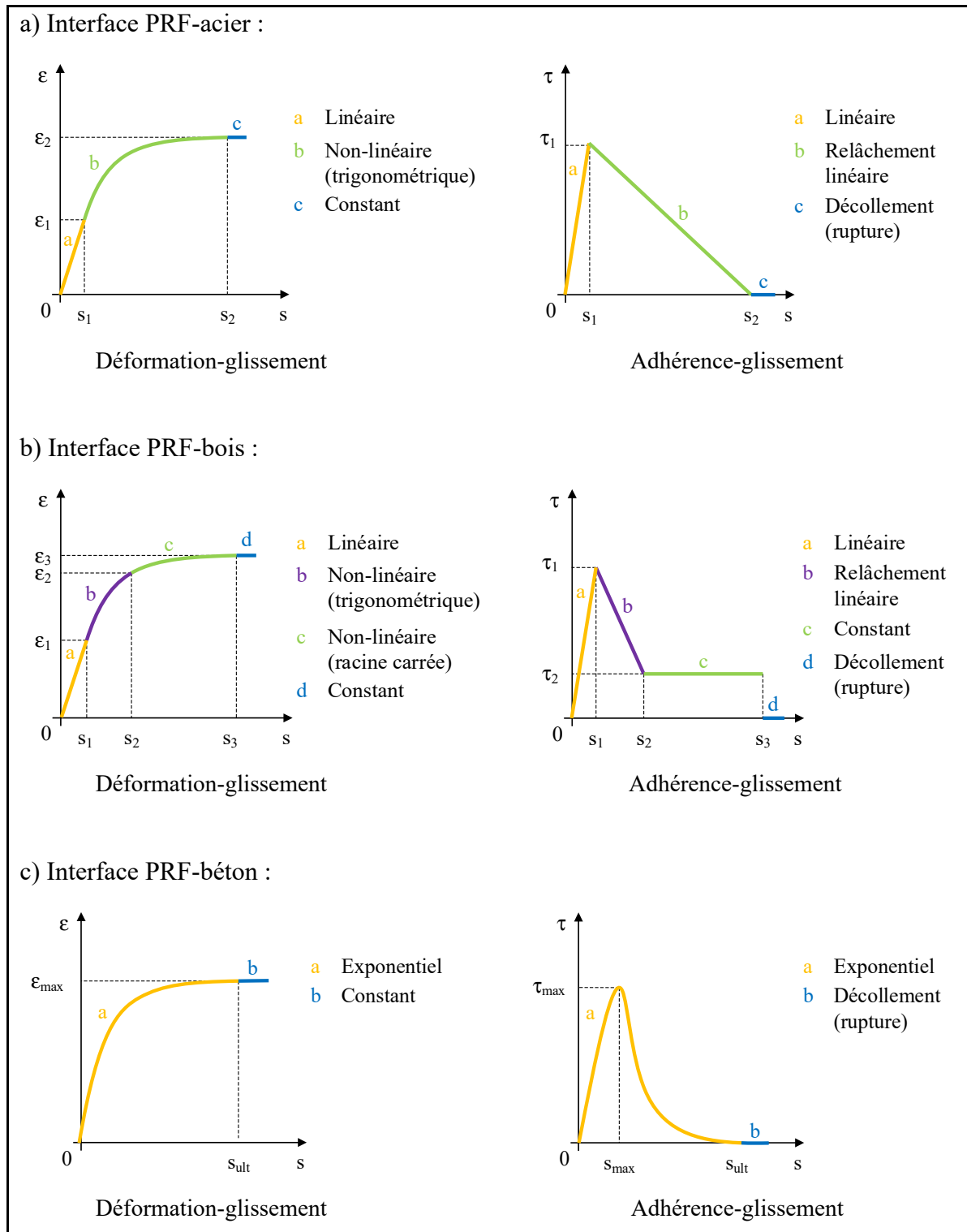


Figure 3.4 Courbes des relations déformations-glissement et adhérence-glissement à l'interface entre les PRF et : a) acier, b) bois et c) béton
Adaptée de Biscaia et al. (2016)

3.3 Modes de rupture

3.3.1 Modes de rupture en flexion

Parmi les modes de rupture possibles ayant fait l'objet de discussions dans les recherches antérieures et énumérées aux sections précédentes, il y en a six qui sont plus susceptibles de se produire lors d'un renforcement en flexion. Comme l'indique la figure 3.5, les six (6) modes de rupture en flexion sont :

1. Délamination, arrachement ou cisaillement du bois,
2. Décollement à l'interface bois-résine,
3. Délamination à l'intérieur de la résine,
4. Décollement à l'interface résine-PRF,
5. Rupture du PRF par traction (déchirement),
6. Rupture en compression du bois.

Pour une poutre non renforcée et selon sa résistance, la rupture en flexion (non montré à la figure 3.5) ou selon le mode 6 se produit toujours. Il est important de noter qu'une rupture en flexion pour un élément en bois pourrait être brutale, alors elle doit être évitée.

Pour des éléments renforcés en flexion, les modes de rupture les plus fréquents sont les modes 2, 3 et 4. Ces modes de ruptures peuvent se produire pour plusieurs raisons et sont principalement causés par une mauvaise adhérence. Une mauvaise préparation de surface ou un mauvais choix de résine peut être la cause d'une faible adhérence. La délamination du bois (mode 1) se produit souvent lorsqu'il y a présence de défauts dans le bois, tels un nœud ou une gerce. La rupture du PRF (mode 5) est extrêmement rare et se produit généralement après la rupture du bois.

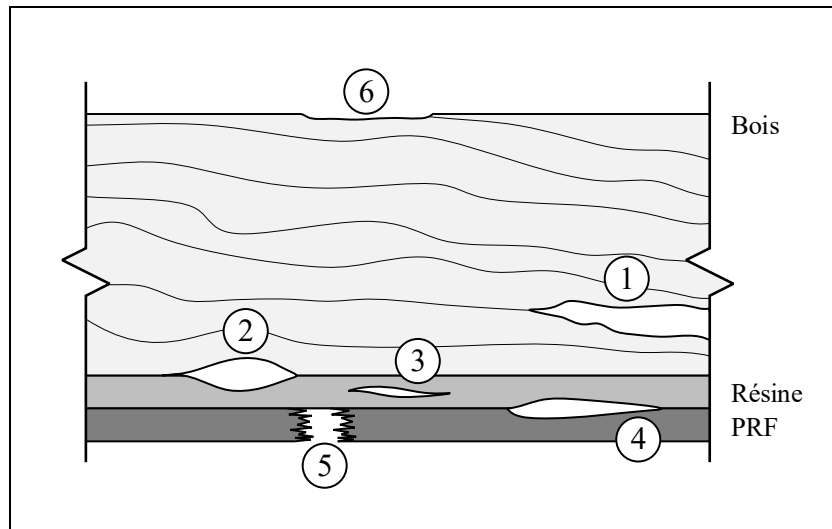


Figure 3.5 Modes de rupture fréquents en flexion

3.3.2 Modes de rupture en arrachement

Lors des essais d'arrachement, les cinq (5) modes de rupture fréquents indiqués à la figure 3.6 sont :

1. Rupture de la fibre du bois,
2. Délamination à l'intérieur de la résine,
3. Décollement à l'interface bois-résine,
4. Décollement à l'interface résine-PRF,
5. Rupture du PRF par traction (déchirement).

À moins d'un défaut dans le PRF, le mode de rupture 5 ne se produit jamais. En effet, la résistance à la traction du PRF est beaucoup plus grande que la résistance du lien d'adhérence entre le bois et le PRF. Ainsi, les modes 1 à 4 sont les plus fréquents. De plus, le mode 1 se produit généralement après les autres modes, soit à la rupture finale. Les modes de rupture 2, 3 et 4 se produisent au fur et à mesure que la force de traction exercée sur le PRF augmente.

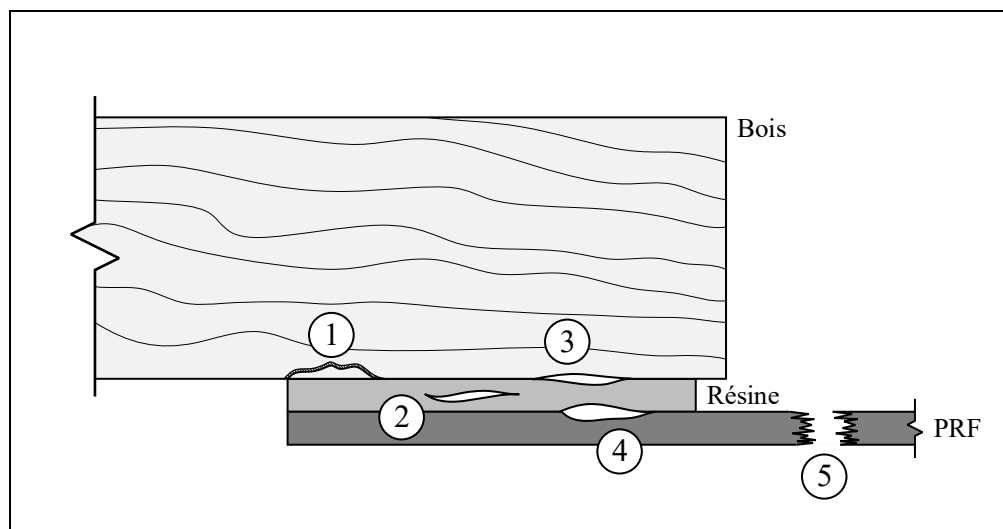


Figure 3.6 Modes de rupture fréquents en arrachement

3.4 Revue des codes et normes

La conception structurale, en plus d'exiger la participation d'un ingénieur, est régie par différentes normes nationales, provinciales ou territoriales, et municipales. Parmi celles applicables à la conception en bois, on y retrouve le Code national du bâtiment du Canada (CNBC), la CSA-O86 pour les bâtiments et la CSA-S6 pour les ponts.

Le CNBC comporte principalement le calcul des charges (permanente, surcharge d'utilisation, neige, vent, séisme) concernant les bâtiments de tout genre (résidentiel, commercial, etc.). La CSA-O86, quant à elle, « énonce les critères de calcul et d'évaluation des charpentes et des éléments de charpente en bois ou en matériaux dérivés du bois » (CSA-O86, 2014). Les prescriptions en rapport aux ponts sont indiquées dans la CSA-S6.

Concernant la présente recherche, aucune norme connue à ce jour n'offre de prescription pour le renforcement d'une structure en bois à l'aide de PRF. Cependant, les études antérieures conviennent que les exigences et règles utilisées pour le renforcement des structures en béton peuvent être utilisées et adaptées au besoin pour les structures en bois.

3.5 Synthèse des recherches antérieures

Sur la base de la revue de la littérature effectuée sur le comportement en flexion, l'adhérence, la longueur d'ancrage et les modes de rupture des poutres en bois renforcées à l'aide de PRF collés en surface ou encastrés, les points saillants suivants sont notés :

1. Selon les dimensions de l'élément à renforcer, un double renforcement (flexion et cisaillement) offre un meilleur contrôle et de meilleurs résultats quant à la résistance.
2. L'application d'un maximum de trois couches de tissus est recommandée pour un renforcement en flexion selon une configuration collée en surface (EB).
3. Le renforcement d'un élément en bois de faible résistance initiale bénéficie d'un meilleur gain qu'un élément de plus forte résistance.
4. Les équations pour le calcul de la longueur d'ancrage effective n'offrent aucune certitude quant à leur efficacité et ne font partie d'aucune norme connue à ce jour.
5. La prolongation du PRF au-delà de la longueur effective n'offre aucun bénéfice substantiel, mais permet de simplifier la méthodologie. En revanche, il est recommandé de laisser un espace raisonnable entre la fin du PRF et les appuis.
6. Les modes de rupture les plus fréquents sont l'écrasement du bois en zone de compression suivi par la délamination de la résine, le décollement à l'interface bois-résine et le décollement à l'interface résine-PRF.
7. À ce jour, aucune norme ne traite du renforcement des structures en bois à l'aide de PRF.

3.6 Besoins en recherche

À la suite de la consolidation des recherches antérieures pertinentes sur le présent sujet, il est possible de cerner les besoins en recherche. À l'instar du tableau 3.1, on constate que :

1. Seulement six études ont été menées sur l'optimisation des longueurs d'ancrage, incluant différentes longueurs et largeurs de PRF collés en surface ou encastrés dans le bois.
2. La majorité des recherches (84%) ont été effectuées avec l'utilisation de fibres de carbone (PRFC). Trois ont utilisé des fibres de lin (PRFL), cinq du basalte (PRFB), quatre de l'aramide (PRFA) et huit du verre (PRFV).
3. Très peu de recherches ont été menées sur le lien d'adhérence entre le bois et le PRF.

4. La majorité des essais de flexion ont été effectués sur des poutres rectangulaires en bois d'œuvre avec une configuration du PRF collée en surface.
5. Les différentes configurations, l'épaisseur et le nombre de couches de PRF sont les paramètres les plus analysés, contrairement au type d'adhésif utilisé, à la température et au taux d'humidité qui sont le moins analysés.
6. Une moyenne de 59 spécimens a été analysée par les chercheurs. Cependant, une moyenne de 15 à 20 spécimens est plus réaliste, selon la majorité des études, compte tenu des restrictions de temps pour les essais.

Malgré les quelques recherches antérieures citées précédemment, les connaissances dans le domaine du renforcement des structures en bois à l'aide de matériaux composites en PRF demeurent insuffisantes. Certes, l'industrie de la construction bénéficierait grandement d'un approfondissement de ce type de renforcement sur le plan économique et sur la rapidité d'exécution. Cependant, l'étude d'un tel renforcement nécessite des connaissances appropriées sur les nombreux types de PRF disponibles sur le marché, leurs dispositions, leurs disponibilités et leurs applications.

Ainsi, des recherches additionnelles sont nécessaires sur l'évaluation des capacités d'un renforcement en flexion sur des poutres en bois et sur l'efficacité d'une longueur d'ancrage effective. Ces recherches aideront à enrichir la littérature ainsi qu'à confirmer, infirmer ou circonstancier les résultats des études antérieures sur le sujet. Ceci peut être obtenu en se basant sur les paramètres d'importance déjà abordés et faisant état d'éléments de réponses et ceux nécessitant davantage de réflexions, tels que l'utilisation de spécimens en bois de catégorie poutre, la largeur du PRF, les différentes configurations des lamelles (EB, VNSM) et la longueur d'ancrage.

Tableau 3.1 Sommaire des recherches antérieures

Auteur	Année	Type de géométrie				Essais				Fibre				Système PRF						Paramètres analysés									
		Section rectangulaire	Section ronde	Bois d'œuvre	Bois lamellé-collé	LVL	Flexion	Cisaillement	Compression	Longueur d'ancrage	Adhérence	Carbon	Verre	Aramide	Basalte	Lin	EB - Tissu	EB - Lamelle	HNSM - Lamelle	HNSM - Barre	VNSM - Lamelle	VNSM - Barre	PRF - Configurations	PRF - Épaisseur ou couche	PRF - Largeur	PRF - Longueur d'ancrage	Adhésif - Type	Température	Taux d'humidité
Flexion																													
Triantafillou & Plevris	1992	x		x			x				x					x													
Johns & Lacroix	2000	x		x			x				x	x				x													
Svecova & Eden	2004	x		x			x	x				x							x						x				
Johnsson et al.	2006	x			x		x				x										x				x				
André & Kliger	2009	x		x	x		x				x						x				x								
André & Johnsson	2010	x			x		x					x					x												
Motlagh et al.	2012	x		x			x				x	x					x							x	x				
Raftery & Rodd	2015	x			x		x				x	x						x								x			
Glisovic et al.	2016	x			x		x				x						x	x			x								
Glisovic et al. (<i>modèle analytique</i>)	2017	x			x		x				x							x			x					x			
Hoseinpour et al.	2018	x		x			x				x					x													
Karastergiou et al.	2020	x		x			x				x						x							x					

Tableau 3.1 Sommaire des recherches antérieures (suite)

Auteur	Année	Type de géométrie				Essais				Fibre				Système PRF						Paramètres analysés									
		Section rectangulaire	Section ronde	Bois d'œuvre	Bois lamellé-collé	LVL	Flexion	Cisaillement	Compression	Longueur d'ancrage	Adhérence	Carbon	Verre	Aramide	Basalte	Lin	EB - Tissu	EB - Lamelle	HNSM - Lamelle	HNSM - Barre	VNSM - Lamelle	VNSM - Barre	PRF - Configurations	PRF - Épaisseur ou couche	PRF - Largeur	PRF – Longueur d'ancrage	Adhésif - Type	Température	Taux d'humidité
Cisaillement																													
Triantafillou	1997	21	x		x						x						x						x						
Dong et al.	2014	11	x		x						x		x				x						x						
Compression																													
André et al.	2013	36	x		x						x						x						x					x	
Zhu et al.	2013	14		x	x						x		x				x						x						
André et al.	2014	s/o	x		x						x						x						x					x	
Dong et al.	2015	6	x		x						x		x				x						x						
Dong et al.	2015	14	x		x						x		x				x						x						
Longueur d'ancrage et adhérence																													
Juvandes & Barbosa	2011	136	x		x						x	x	x				x						x						
Vanerek et al.	2014	540	x		x						x	x	x				x										x	x	
Corradi et al.	2015	24	x		x																								
Biscaia & al.	2017	20	x		x																								
Vahedian et al.	2017	48	x		x																								

CHAPITRE 4

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Ce chapitre est consacré à la description du programme expérimental. Il comporte une description des matériaux, des montages et des équipements utilisés pour les essais. Les étapes de fabrication et les instrumentations sont également indiquées.

4.1 Objectifs du programme expérimental

Le programme expérimental est principalement élaboré dans le but d'explorer le comportement en flexion des poutres en bois renforcées de matériaux composites. Les paramètres étudiés, contribuant à la rigidité et aux gains en résistance, sont :

- la largeur du PRF,
- la configuration du PRF,
- le type de PRF, et
- la longueur d'ancrage.

4.2 Phases expérimentales

Les essais expérimentaux sont de deux types : non destructif et destructif. Le premier type vise à déterminer les caractéristiques de base des matériaux en bois (physiques et mécaniques), tandis que le deuxième porte sur la détermination des états limites ultimes des spécimens (mécaniques). Ils se déclinent en six phases, présentées à la figure 4.1

La première phase (A), sous forme d'essais de flexion préliminaires, est conçue pour évaluer le déplacement ultime maximal à mi-portée et le module d'élasticité des spécimens en bois sans renforcement. Cette phase doit être effectuée avant tout autre essai afin de déterminer les propriétés de base du matériau. Dans ce contexte, les dimensions moyennes ($b \times d \times L$), l'emplacement et la quantité des défauts naturels et le taux d'humidité ont été déterminés. Par la suite, le module d'élasticité a été calculé selon la force exercée sur la poutre et le

déplacement maximal atteint à mi-portée. Un classement a par la suite été effectué pour faire des paires de deux poutres ayant un module d'élasticité similaire ($\leq 3\%$ d'écart).

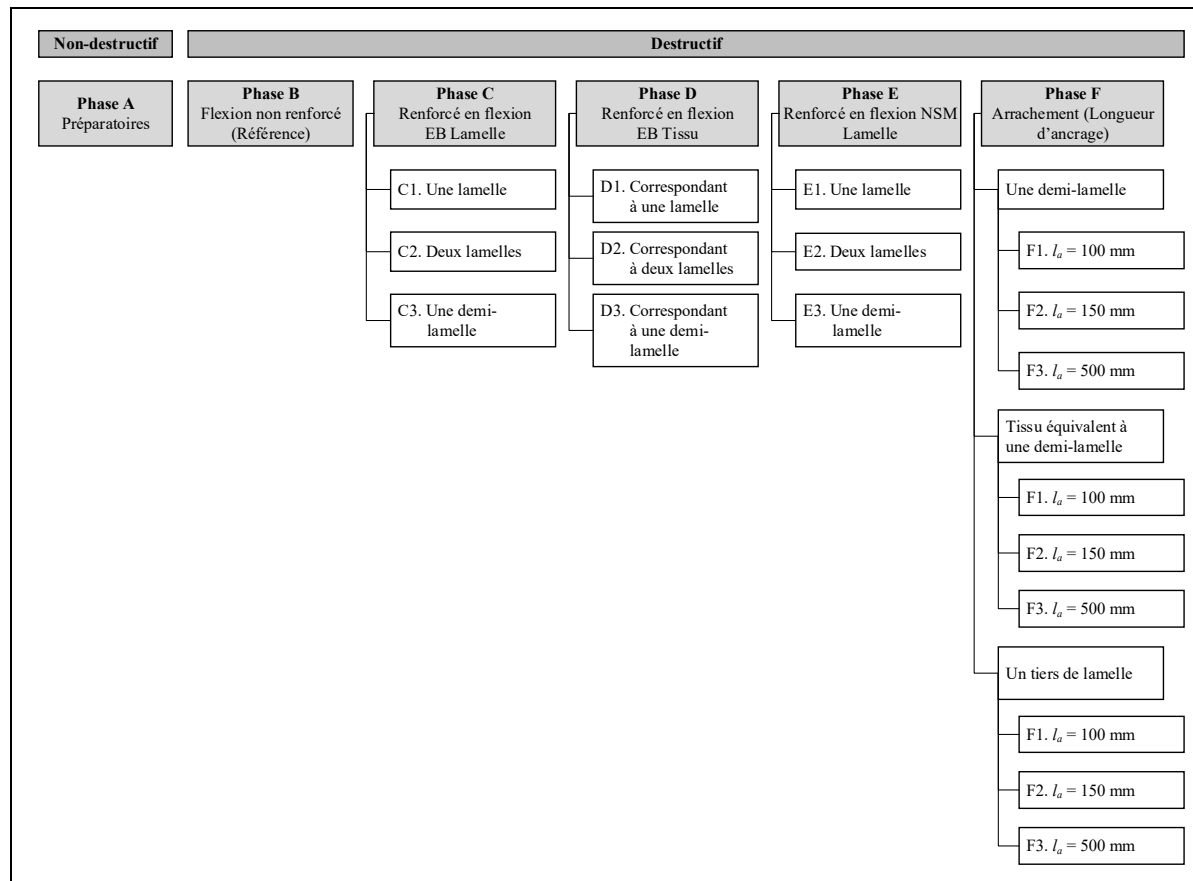


Figure 4.1 Phases expérimentales

Les quatre phases suivantes (B, C, D, E), faisant l'objet d'essais en flexion selon différentes configurations de renforcement, permettent de déterminer la résistance ultime en flexion, le déplacement ultime et le mode de rupture des spécimens.

La sixième et dernière phase (F), dédiée à des essais d'arrachement sous différentes configurations de renforcement en PRF et différentes longueurs d'ancrage, vise à caractériser la longueur de développement d'ancrage optimale requise. Ainsi, la force maximale, la contrainte d'adhérence et le mode de rupture seront évalués.

4.3 Descriptions des matériaux

4.3.1 Bois

Les poutres de bois d'œuvre de dimensions $140 \text{ mm} \times 240 \text{ mm} \times 3650 \text{ mm}$ ($b \times d \times L$) sont en sapin de Douglas de qualité No.1 (selon le fournisseur) et présentent un taux d'humidité entre 25% et 30%. Toutes les poutres sont rabotées sur les quatre faces afin d'offrir une surface plane et suffisamment rugueuse pour l'installation du composite en PRF collé en surface.

4.3.2 Composite

Afin d'éviter la répétition d'essais sur les propriétés des PRF déjà effectués par le passé, les résultats obtenus par les fiches techniques de Sika Canada sont directement utilisés et incorporés dans la présente recherche. Le tissu utilisé est le SikaWrap®-1400C, qui est imprégné de l'adhésif d'époxy Sikadur®-300, tandis que les lamelles en fibres de carbone sont des Sika® CarboDur® S512 collées en surface à l'aide de l'adhésif d'époxy Sikadur®-30, et ce conformément aux recommandations du fabricant. Pour la phase E, qui comporte l'insertion d'une lamelle à l'intérieur d'une rainure, l'utilisation de Sikadur®-300 a été privilégié pour son état liquide, permettant une meilleure uniformité de remplissage des rainures. Les propriétés combinées des composites en PRFC (fibres + matrice) sont présentées au tableau 4.1.

4.3.3 Nomenclature des poutres

Le tableau 4.2 montre la nomenclature utilisée pour nommer les spécimens. Le premier terme signifie le type d'essai : *Flexural Test* (FT) et *Bond Test* (BT). La lettre suivante correspond à la phase expérimentale. Le troisième terme correspond au type de renforcement : *Unstrengthened* (UN), *Externally Bonded* (EB), *Near-Surface Mounted* (NSM) et *Anchored Length* (AL). Le terme suivant (sauf pour les poutres non renforcées) indique le nombre, le type et la largeur du PRF : 1L50 = 1 lamelle de 50 mm de largeur, 1S72 = 1 tissu (*sheet*) de 72 mm de largeur, tandis que les dernières valeurs correspondent au numéro de la poutre.

Tableau 4.1 Propriétés des composites en PRFC (fibres + matrice) utilisés

Composite	Module d'élasticité, E_F (GPa)	Résistance ultime en tension, f_{Fu} (GPa)	Déformation ultime à la rupture, ε_{Fu} (%)	Masse volumique, ρ_F (g/cm ³)	Épaisseur, t_F (mm)	Largeur, b_F (mm)
Lamelle Sika® CarboDur® S512 avec Sikadur®-30	165	2,8	> 1,7	1,5	1,2	50
Lamelle Sika® CarboDur® S512 avec Sikadur®-300	165	2,8	> 1,7	1,5	1,2	50
Tissu SikaWrap®-1400C avec Sikadur®-300	115,7	1,8	1,25	1,77	1,3	—

Tableau 4.2 Nomenclature des spécimens

Description	Nom des spécimens
Flexion non renforcée	FT-B-UN-01
Flexion renforcée EB Lamelle	FT-C-EB-1L50-01
Flexion renforcée EB Tissu	FT-D-EB-1S72-01
Flexion renforcée NSM Lamelle	FT-E-NSM-1L50-01
Arrachement Lamelle	BT-F-AL100-1L25-01
Arrachement Tissu	BT-F-AL100-1S36-01

4.4 Description des montages et des équipements

Une description des montages et des équipements pour les essais de flexion en quatre points et les essais d'arrachement est présentée ci-dessous.

4.4.1 Essais de flexion en quatre points

Le banc d'essai de flexion en quatre points, soit deux appuis et deux charges appliquées aux tiers de la portée, a été utilisé (voir la figure 4.2). Ce choix est recommandé par les normes ASTM D198 et D4761 pour des essais de flexion sur des poutres de grandes dimensions, de longues portées et comportant une charge appliquée selon l'axe fort (sur la plus petite face). En effet, la poutre doit être simplement appuyée et doit supporter deux charges concentrées placées équidistantes l'une de l'autre et des points d'appui. Par cette configuration, à mi-portée, le moment sera maximal et le cisaillement sera nul. La figure 4.3 montre le chargement appliqué, le diagramme des efforts tranchants (DET) et le diagramme des moments fléchissants (DMF). Cet essai permettra de déterminer la capacité de flexion et de développer des valeurs de conception plus appropriées pour des essais de structure.

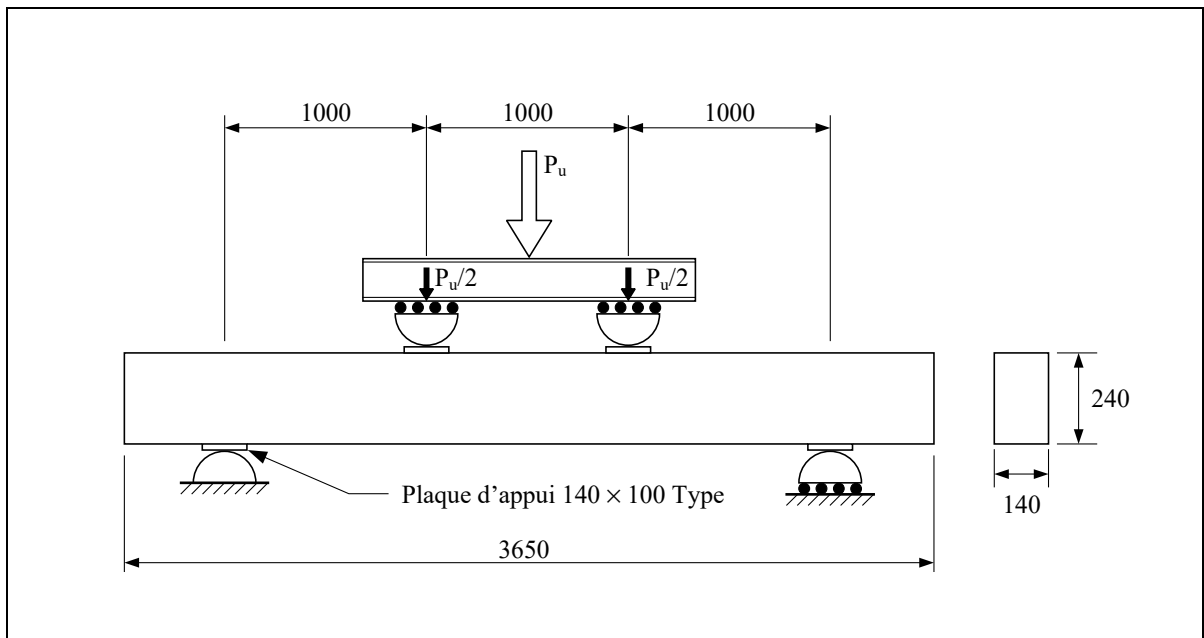


Figure 4.2 Schéma du banc d'essai pour la flexion en quatre points

De plus, selon la norme ASTM D4761, un support latéral est requis pour les spécimens ayant un rapport profondeur (d) sur largeur (b) supérieur ou égal à trois. Dans notre cas, aucun support latéral n'est requis pour les essais puisque ce rapport est égal à 1,71. Pour une

sollicitation en flexion, bien que cette norme propose d'utiliser un ratio L/d entre 17 et 21 pour déterminer la longueur de la portée (L), les recherches antérieures n'ont pas démontré qu'un ratio plus petit pouvait causer un comportement inadéquat et d'ailleurs, la norme précise qu'un ratio différent est permis. Dans le cas présent, pour une portée $L = 3000$ mm et une profondeur $d = 240$ mm, le ratio L/d est égal à 12,5.

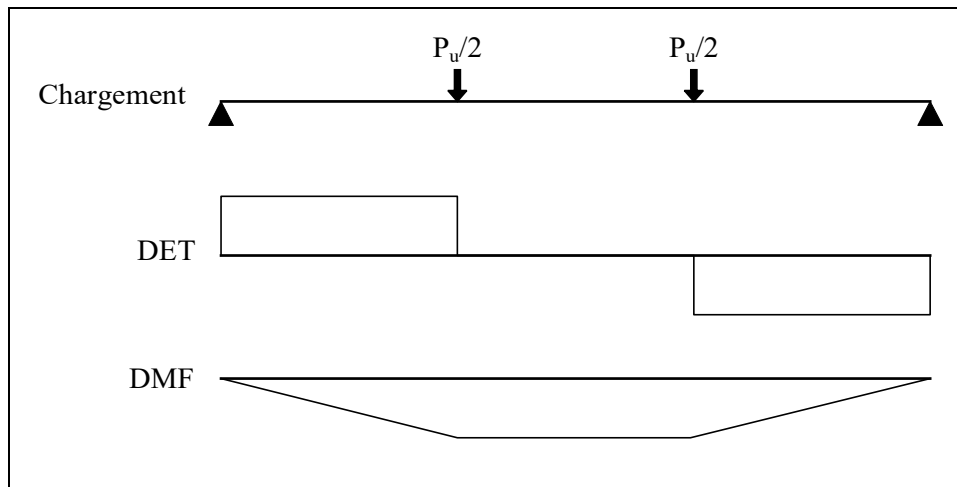


Figure 4.3 Diagrammes des efforts internes

L'entreposage et les essais ont eu lieu au laboratoire des structures lourdes de l'ÉTS, dans un environnement sec et contrôlé. La vitesse d'application de la charge, contrôlée par le déplacement, est de 4 mm/min, pour une durée entre 7 et 14 minutes. La charge a été appliquée par un vérin hydraulique d'une capacité totale de 1500 kN sur une poutre de transfert permettant de distribuer la charge en deux points ponctuels. Des plaques d'appui ont été insérées entre chaque point d'appui et la face supérieure de la poutre afin d'éviter l'écrasement de cette dernière durant l'essai.

4.4.2 Essais d'arrachement

Un système de cages en acier a été conçu spécialement pour les essais d'arrachement du projet, comme illustré à la figure 4.4. La petite cage (B) permet l'insertion d'un spécimen d'une hauteur de 279 mm tandis que la grande cage (A) peut accommoder une hauteur maximale de

530 mm. Les plaques centrales peuvent être interchangeables selon trois dimensions : 145 mm × 375 mm, 220 mm × 375 mm ou 295 mm × 360 mm; contrairement aux plaques d'extrémité qui ont des dimensions fixes. Une fois le spécimen renforcé inséré à l'intérieur des deux cages, une vitesse de chargement de 0,5 mm/min est appliquée selon le déplacement. La charge a été appliquée par un vérin hydraulique d'une capacité totale de 500 kN. Lors de ces essais, la charge maximale, le déplacement et le glissement sont analysés.

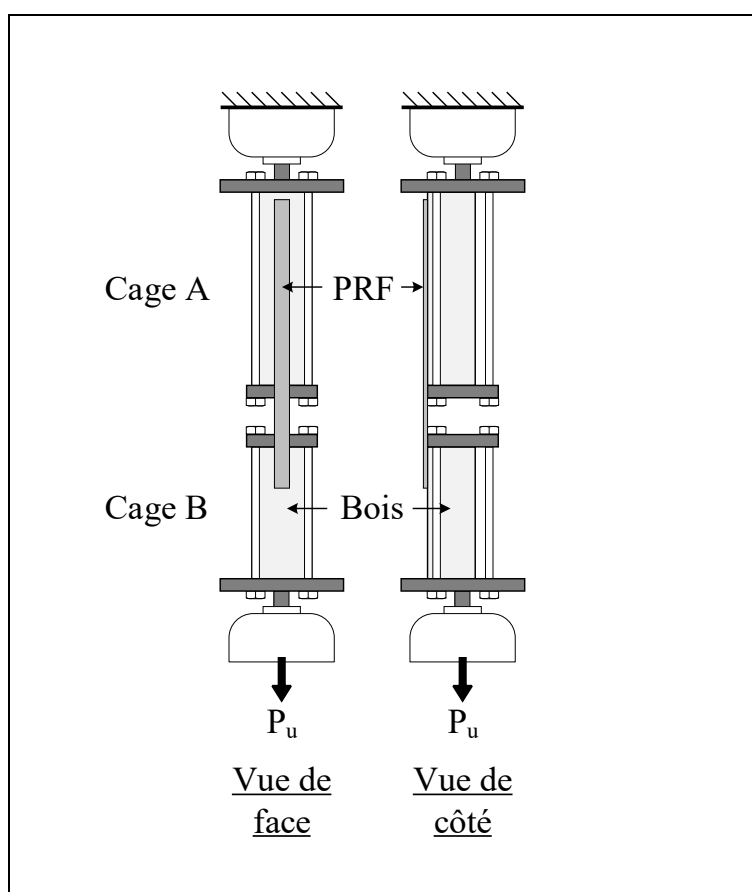


Figure 4.4 Schéma du banc d'essai pour l'arrachement

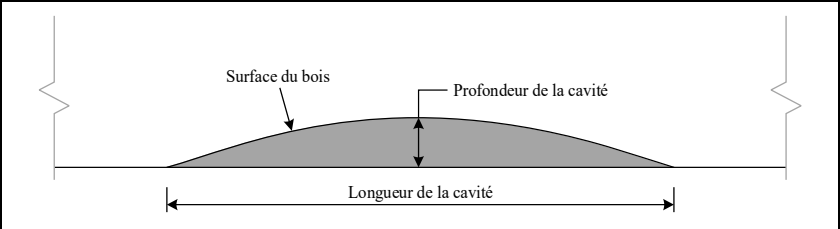
4.5 Étapes de fabrication

La section suivante présente les étapes de fabrication des spécimens comprenant la préparation de la surface, l'application du PRF en surface et encastrée, et l'instrumentation nécessaire à la collecte des données expérimentales.

4.5.1 Préparation de la surface

Pour une bonne adhérence entre le bois et le PRF, la surface du substrat et du matériau composite doit être bien préparée. Contrairement aux structures en béton, aucun Indice du profil de surface (IPS) n’est défini pour le bois. Cependant, certaines règles s’appliquent et doivent être respectées afin d’offrir une adhérence adéquate. Le tableau 4.3 présente les aspects importants devant être respectés.

Tableau 4.3 Aspects de préparation de surface à vérifier
Adapté de Chaallal (2018)

Éléments	Exigences normatives et recommandations		
Préservatif	Aucun agent préservatif ne doit être présent sur le bois		
Humidité	Humidité du bois : teneur en eau inférieure à 19% près des surfaces		
Rainures pour NSM	Rainures réalisées à l’aide de scies à bois circulaires Dimensions selon le type de NSM Rainures nettoyées (sans poussière)		
Propreté	Nettoyage à l’aspirateur pour enlever toute poussière (Bois) Nettoyage à l’acétone pour enlever toute particule (PRF)		
Planéité	Profondeur admissible des concavités selon l’article A16.1.4 (S6-14)		
			
	Type de renfort en PRF	Sur une longueur de 0,3 m	Sur une longueur de 2 m
	Lamelle $t_F \geq 1,0$ mm	4 mm	20 mm
	Lamelle $t_F < 1,0$ mm	2 mm	6 mm
	Tissu	2 mm	4 mm

4.5.2 Application du PRF

Les étapes d'application du renfort en PRF dépendent du type de renfort envisagé et des recommandations du fabricant. Ces étapes sont décrites ci-après pour les phases expérimentales C à F du projet. Les états finaux des spécimens renforcés sont montrés à la figure 4.6.

Lamelles EB (Phase C)

Les lamelles préfabriquées prémurées comprennent les phases d'installation suivantes :

1. Préparer la résine.
2. Appliquer l'adhésif sur la surface et sur la lamelle.
3. Installer la lamelle sur la surface.
4. Rouler la lamelle et enlever l'excès d'adhésif.
5. Laisser mûrir au moins 7 jours.

Tissu EB (Phase D)

Pour un tissu à densité élevée, comme celui utilisé dans le cadre de ce projet, il est impératif d'utiliser un procédé mouillé, qui consiste à imprégner le tissu de résine à l'aide d'un saturateur mécanique ou d'un rouleau manuellement. Les étapes d'installation sont :

1. Préparer la résine.
2. Imprégner le tissu de renfort.
3. Appliquer la couche de tissu sur le bois.
4. Chasser l'air emprisonné et s'assurer de l'alignement des fibres.
5. Ajouter de la résine après quelques heures afin d'assurer l'imprégnation.
6. Laisser mûrir au moins 48 heures.

Lamelles NSM (Phase E)

La technique NSM demande plus de travail et comprend les phases d'installation suivantes :

1. Préparer et nettoyer la rainure dans le bois.
2. Préparer la résine.
3. Remplir la rainure de résine au 2/3 ou au 3/4.

4. Insérer la lamelle dans la rainure.
5. Ajouter de la résine ou enlever l'excès.
6. Laisser mûrir au moins 7 jours.

Longueur d'ancrage (Phase F)

La méthode d'installation pour les essais sur les longueurs d'ancrage est la même que pour les lamelles EB ou le tissu EB, selon le cas. Cependant, il faut tenir compte des détails de la figure 4.5 relatifs aux zones sans adhésif.

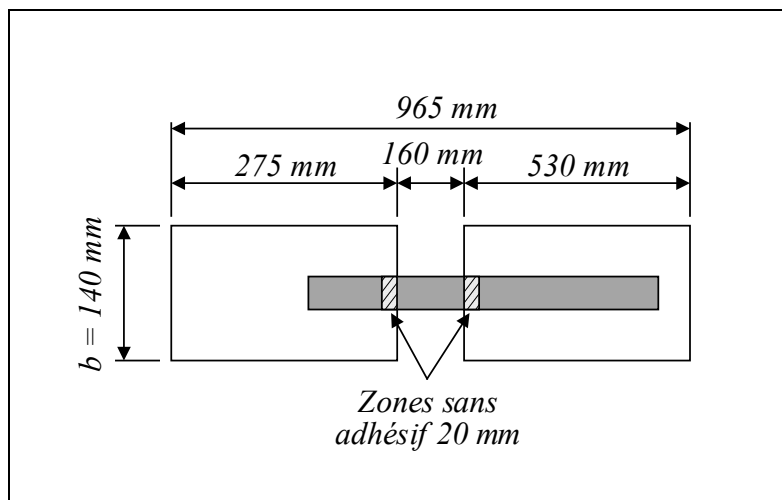


Figure 4.5 Prescription des zones sans adhésif

4.5.3 Instrumentation

Les paramètres évalués lors des essais sont le déplacement à mi-portée, la charge appliquée par le vérin, les déformations du bois et les déformations du PRF à différents endroits. Alors l'installation de transducteurs de déplacement à basse tension ou *Low Voltage Displacement Transducers* (LVDT) et de jauges de déformation est nécessaire. La charge appliquée par le vérin est mesurée par la cellule de force intégrée à ce dernier. Dépendamment de la phase expérimentale étudiée, les jauges doivent être placées selon une configuration particulière. Chaque phase ou sous-phase faisant l'objet de deux essais, un maximum de jauges sera installé sur la première poutre tandis qu'un minimum sera installé sur la seconde.

Pour le premier élément de la phase B, toutes les jauges sont installées à mi-portée et aux emplacements suivants : (J1) sous la poutre, (J2) sur le dessus de la poutre, (J3) sur la partie comprimée de la face latérale de la poutre et (J4) sur la partie tendue de la face latérale de la poutre. Pour le deuxième élément, seulement une jauge sera installée sous la poutre à mi-portée.

Pour les phases suivantes, l'emplacement du LVDT et des jauges de déformation suit le modèle général décrit aux figures 4.7 et 4.8. L'emplacement des instruments pour chaque phase est détaillé à l'annexe I.

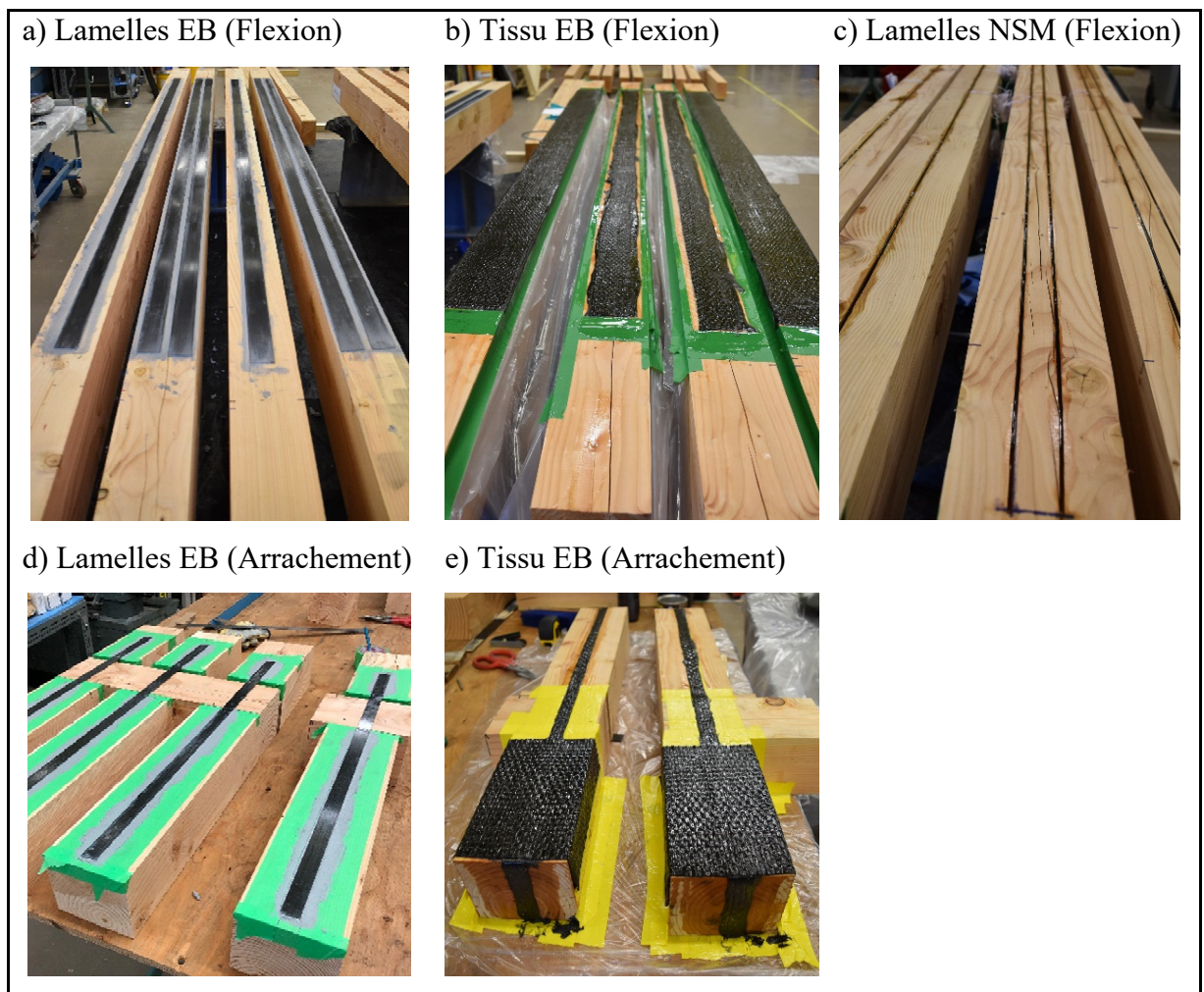


Figure 4.6 Installation du PRF pour la flexion et l'arrachement

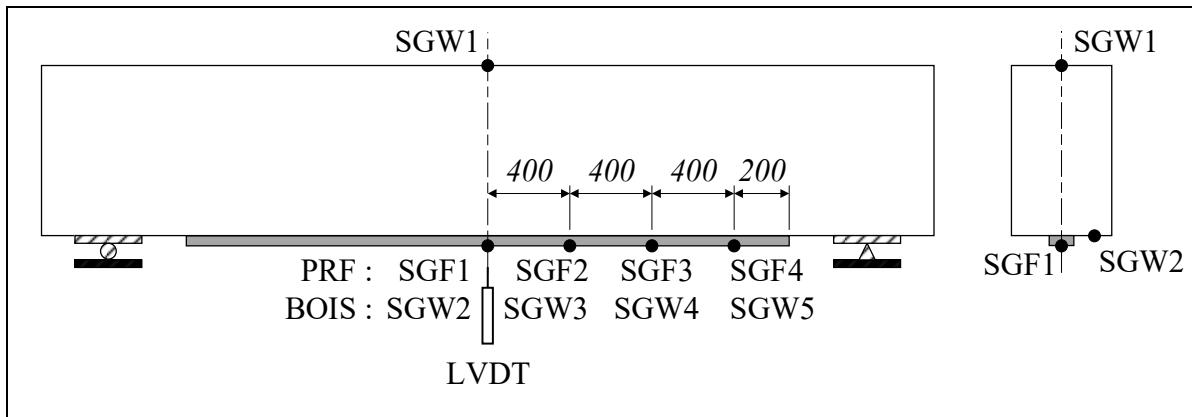


Figure 4.7 Exemple d'emplacement du LVDT et des jauges de déformation sur les poutres en flexion

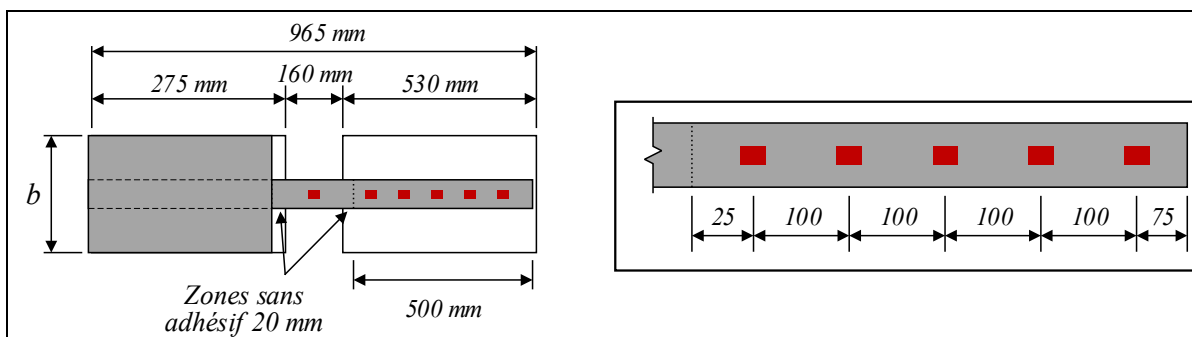


Figure 4.8 Exemple d'emplacement des jauges de déformation sur les spécimens en arrachement

Le tableau 4.4 présente un résumé de l'instrumentation utilisé. Les jauges de déformation proviennent du même fabricant et celles de mêmes longueurs, variant entre 5 mm et 30 mm, proviennent du même lot de fabrication. Ainsi, deux jauges de même longueur possèdent des facteurs de jauge identiques. Un LVDT, d'une longueur de 100 mm, a été privilégié.

Tableau 4.4 Résumé de l'instrumentation

Composante	Nom	Type de jauge	Fournisseur
Jauge de déformation sur le PRF (EB)	SGF1 à SGF4	KFG-30-120-C1-11L3M3R	Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd
Jauge de déformation sur le PRF (NSM)	SGN1 à SGN4	KFG-5-350-C1-11L15M3R	Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd
Jauge de déformation sur le bois	SGW1 à SGW5	KFG-30-120-C1-11L3M3R	Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd
Jauge de déformation pour l'arrachement	SGA1 à SGA4	KFGS-6-120-C1-11L3M3R	Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd
LVDT	LVDT	Linear displacement sensor HS50	Vishay Micro-Measurements

CHAPITRE 5

ASPECTS THÉORIQUES

Ce chapitre traite des divers aspects théoriques en relation avec le sujet traité. Ils ont été développés avant d'effectuer les essais expérimentaux pour prédire et comparer le comportement des spécimens durant les essais dont les résultats seront présentés au chapitre 6. Le chapitre est décliné sous trois volets comme suit : (i) Résistance en flexion, (ii) Résistance au cisaillement et (iii) Résistance à l'arrachement.

5.1 Résistance en flexion

Conformément aux exigences de la norme canadienne *CSA O86-14 : Règles de calcul des charpentes en bois*, la résistance pondérée au moment de flexion d'une section en bois de sciage est donnée par :

$$M_r = \phi f_b (K_D K_H K_{Sb} K_T) S K_{Zb} K_L \quad (5.1)$$

Dans l'équation (5.1), ϕ est le coefficient de résistance, f_b est la contrainte prévue en flexion, K_D est le coefficient de durée d'application de la charge, K_H est le coefficient de système de partage des charges, K_{Sb} est le coefficient de conditions d'utilisation, K_T est le coefficient de traitement, S est le module de section, K_{Zb} est le coefficient de dimensions et K_L est le coefficient de stabilité latérale.

L'équation (5.1) suppose que le matériau est linéaire élastique sur toute la longueur de la poutre, les sections droites restent droites après déformation, et la flexion se produit dans un seul plan qui coïncide avec l'axe principal de la section.

5.1.1 Poutre non renforcée

En fonction des éléments contrôlés par les essais en laboratoire et des informations fournies par le fabricant des poutres en bois livrées au laboratoire, les coefficients K_H , K_{Sb} , K_T et K_L sont égaux à 1,0. Considérant que la durée d'application des charges ne dépasse pas 7 jours, tel que spécifié par la norme CSA-O86, l'application de la charge est considérée de courte durée et le coefficient K_D est pris égal à 1,15. Pour un élément en bois de charpente classé visuellement et de dimensions 140 mm × 241 mm, le coefficient K_{Zb} est égal à 1,20. En incorporant les éléments ci-dessus dans l'équation (5.1), le moment nominal devient :

$$M_n = f_b S K_D K_{Zb} \quad (5.2)$$

Où le module de section, S , peut être déterminé par :

$$S = \frac{I}{\bar{y}} \quad (5.3)$$

Où I est le moment d'inertie et $\bar{y}$ est la distance de la fibre extrême à l'axe neutre.

En analysant une poutre en bois non renforcée de dimensions 140 mm × 241 mm en Douglas-Mélèze de qualité No.1, la contrainte prévue en flexion est égale à 15,8 MPa et le moment nominal est :

$$M_n = 15,8 \times \frac{140 \times 241^2}{6} \times 1,15 \times 1,20 = 29,56 \text{ kNm}$$

5.1.2 Poutre renforcée de PRF

Conformément aux exigences de la norme CSA-O86, l'équation (5.2) sera utilisée pour les calculs du moment résistant nominale en flexion d'une poutre renforcée à l'aide de PRF. Trois types de configuration sont considérés : (1) une lamelle collée en surface, (2) un tissu collé en surface et (3) une lamelle insérée dans une rainure pratiquée dans la poutre. Par ailleurs, quelques variantes seront aussi considérées pour chaque type de configurations, telles qu'une largeur différente et le nombre de lamelles. Ainsi, un seul exemple de calcul sera présenté pour chaque type. Les propriétés des PRF sont résumées dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 Propriétés des PRF

Matériau PRF	Résistance à la traction, f_{Fu} (GPa)	Module d'élasticité, E_F (GPa)	Allongement à la rupture, ϵ_{Fu} (%)	Épaisseur d'un pli, t_F (mm)	Largeur, b_F (mm)
Sika® CarboDur® S512 (Lamelle)	2,8	165	> 1,7	1,2	50
SikaWrap® 1400C (Tissu)	1,8	115,7	1,25	1,3	Variable

5.1.2.1 Lamelles collées en surface

Pour une poutre en bois de 140 mm × 241 mm renforcée d'une seule lamelle Sika® CarboDur® S512 de 50 mm de largeur collée sur le côté tendu de la poutre, il faut d'abord déterminer les propriétés de la section équivalente. Pour ce faire, il faut transformer la largeur du PRF en largeur équivalente en bois à l'aide du coefficient d'équivalence suivant :

$$n = \frac{E_F}{E_w} \quad (5.4)$$

Pour un module d'élasticité d'une lamelle $E_F = 165\,000$ MPa et un module d'élasticité du bois $E_w = 12\,000$ MPa, le coefficient d'équivalence n est égal à 13,75. La largeur équivalente de bois est alors égale à $13,75 \times 50 = 687,5$ mm.

La position de l'axe neutre par rapport à la fibre tendue de la section est déterminée par :

$$\bar{y}_t = \frac{\sum A_i \bar{y}_i}{\sum A_i} \quad (5.5)$$

$$\bar{y}_t = \frac{(140 \times 241 \times 121,7) + (687,5 \times 1,2 \times 0,6)}{(140 \times 241) + (687,5 \times 1,2)} = 118,81 \text{ mm}$$

Le moment d'inertie transformé de la section est calculé par :

$$I = \sum I_0 + \sum (A \bar{y}^2) = \sum \left[\frac{b_i h_i^3}{12} + A_i (\bar{y} - \bar{y}_i)^2 \right] \quad (5.6)$$

$$I = \frac{1}{12} \left[(140 \times 241^3) + (687,5 \times 1,2^3) \right] +$$

$$(140 \times 241) \times (118,81 - 121,7)^2 +$$

$$(687,5 \times 1,2) \times (118,81 - 0,6)^2$$

$$I = 175,11 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Sachant que les fibres les plus éloignées de l'axe neutre de la section sont les fibres comprimées, la distance entre l'axe neutre et les fibres comprimées les plus éloignées est égale à :

$$\bar{y}_c = (241 + 1,2) - 118,81 = 123,39 \text{ mm}$$

Le moment nominal maximum d'une poutre renforcée à l'aide d'une lamelle de 50 mm de largeur est obtenu, à l'aide de l'équation (5.2), soit :

$$M_n = 15,8 \times \frac{175,11 \times 10^6}{123,39} \times 1,15 \times 1,20 = 30,94 \text{ kNm}$$

Ainsi, pour un taux de renforcement, ρ_{PRF} , égal à l'aire du PRF sur l'aire totale de la section, soit 0,18%, on observe une augmentation du moment nominal et de l'inertie d'environ 5% et 7%, respectivement. Les calculs ont également été effectués pour une largeur de 25 mm et une largeur de 100 mm, correspondant à un renforcement à l'aide d'une demi-lamelle et de deux lamelles, respectivement. Le tableau 5.2 résume les augmentations du moment nominal et de l'inertie pour les trois largeurs de lamelle considérées. Malgré un rapport de renforcement proportionnel à l'augmentation de la largeur de lamelle, le moment nominal et l'inertie n'augmentent pas tout à fait proportionnellement. La figure 5.1 (a) montre la section renforcée d'une lamelle, tandis que la figure 5.1 (b) montre la section transformée équivalente en bois.

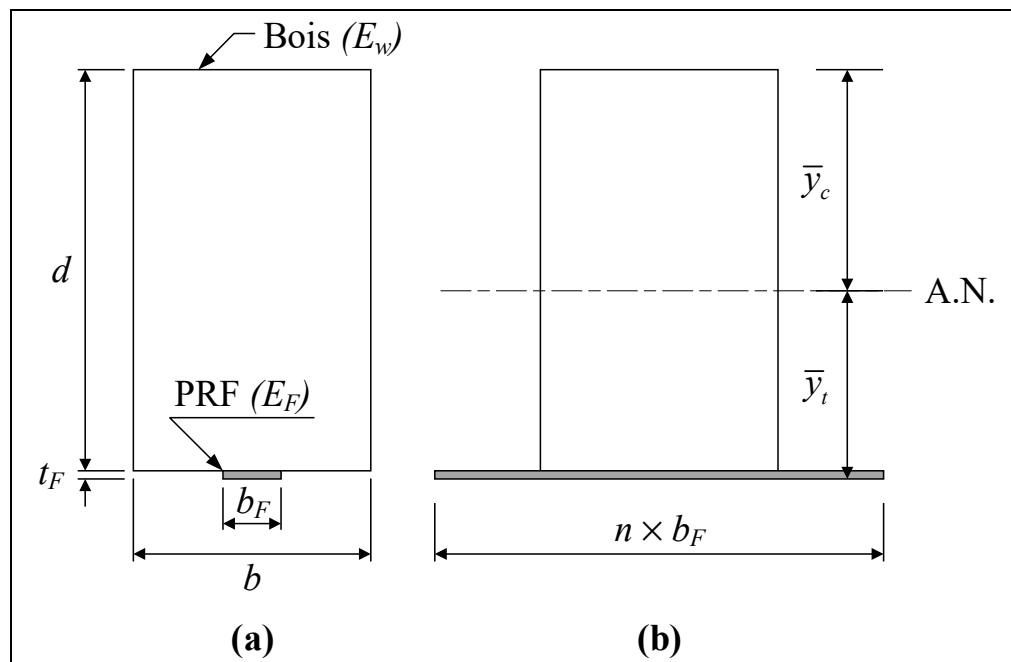


Figure 5.1 (a) Section renforcée d'une lamelle; (b) Section transformée équivalente en bois

Tableau 5.2 Augmentation du moment nominal et de l'inertie
en fonction de la largeur de lamelle

Largeur de lamelle, b_F (mm)	Taux de renforcement, ρ_{PRF} (%)	Augmentation du moment nominal, M_n (%)	Augmentation de l'inertie, I (%)
25	0,09	2,4	3,5
50	0,18	4,5	6,7
100	0,36	8,3	12,4

5.1.2.2 Tissus collés en surface

Pour des fins de comparaison dans le cadre de ce projet, un renforcement à l'aide de tissu en PRF équivalent au renforcement à l'aide d'une lamelle est considéré. Étant donné que les propriétés du tissu sont différentes de celles des lamelles, un calcul d'équivalence permettant de déterminer la largeur équivalente de tissu à utiliser est effectué. Ce calcul est présenté à l'annexe II, donnant une couche de tissu SikaWrap® 1400C d'une largeur de 72 mm comme équivalente à une lamelle de 50 mm de largeur. Le tableau 5.3 indique les équivalences des différentes largeurs de lamelles considérées dans cette étude.

Tableau 5.3 Équivalences de largeur lamelle versus tissu

Largeur de la lamelle (mm)	25	50	100
Largeur équivalente du tissu 1400C (mm)	36	72	140

Cependant, considérant que la préparation et l'installation du tissu sont beaucoup plus difficiles que pour une lamelle, les largeurs présentées au tableau 5.3 ne sont pas rigoureusement maintenues lors de l'installation. En effet, l'application du tissu sur la poutre en bois est délicate et lorsqu'on chasse l'air sous le tissu, à l'aide d'un rouleau rigide, le tissu a tendance à s'élargir si bien que la largeur préalablement coupée ne correspond plus tout à fait à la largeur réelle après installation. Une discussion sur ce sujet sera abordée au chapitre 6. Les

augmentations du moment nominal et de l'inertie pour les trois largeurs de tissus considérées sont présentées au tableau 5.4.

Tableau 5.4 Augmentation du moment nominal et de l'inertie en fonction de la largeur de tissu

Largeur de tissu, b_F (mm)	Taux de renforcement, ρ_{PRF} (%)	Augmentation du moment nominal, M_n (%)	Augmentation de l'inertie, I (%)
36	0,14	2,6	3,8
72	0,28	4,9	7,3
140	0,54	8,7	13,0

On note un écart inférieur à 10% entre les valeurs d'augmentation du moment nominal et de l'inertie entre le tissu et la lamelle. Cet écart devra être pris en compte lors de l'analyse des résultats comparant la lamelle et le tissu.

5.1.2.3 Lamelles encastrées près de la surface

Le renforcement à l'aide de lamelles insérées dans une rainure se calcule de la même façon que pour une lamelle collée en surface. Cependant, la largeur devient la hauteur de la lamelle et vice-versa. Bien que la lamelle soit insérée dans une rainure, de dimensions plus grandes, les calculs négligeront l'espace vide entre la lamelle et le bois. Toujours pour fins de comparaison, les mêmes largeurs de lamelles seront utilisées, soit 25 mm, 50 mm et 100 mm. Pour une lamelle de 50 mm de largeur, la largeur équivalente de bois est égale à $13,75 \times 1,2 = 16,5$ mm. La position de l'axe neutre par rapport à la fibre comprimée extrême de la section est $\bar{y}_c = 122,78$ mm et le moment d'inertie est égal à $170,82 \times 10^6 \text{ mm}^4$. Ainsi, le moment nominal pour une lamelle de 50 mm de largeur NSM vaut :

$$M_n = 15,8 \times \frac{170,82 \times 10^6}{122,78} \times (1,15 \times 1,20) = 30,33 \text{ kNm}$$

On remarque que cette valeur est légèrement inférieure à celle d'une lamelle collée en surface (30,94 kNm). Cette différence est attribuable, entre autres, au fait que la distance entre l'axe neutre et le centre de gravité de la lamelle est moindre, réduisant ainsi la valeur du moment nominal. Les calculs complets sont démontrés à l'annexe II.

5.2 Résistance au cisaillement

Bien que le cisaillement ne fasse pas l'objet de ce mémoire, une vérification de la résistance au cisaillement est effectuée afin de s'assurer d'une rupture en flexion. La résistance pondérée au cisaillement, conformément à la norme CSA-O86, est donnée par :

$$V_r = \phi f_v \frac{2A_n}{3} K_D K_H K_{Sv} K_T K_{Zv} \quad (5.7)$$

Où ϕ est le coefficient de résistance, f_v est la contrainte prévue en cisaillement, A_n est l'aire de la section transversale nette, K_D est le coefficient de durée d'application de la charge, K_H est le coefficient de système de partage des charges, K_{Sv} est le coefficient de conditions d'utilisation, K_T est le coefficient de traitement et K_{Zv} est le coefficient de dimensions.

En suivant le même principe que pour le moment nominal, le cisaillement nominal est égal à :

$$V_n = f_v \frac{2A_n}{3} K_D K_{Zv} \quad (5.8)$$

Lors des essais en flexion, il faudra s'assurer que l'effort tranchant maximal dû à la force appliquée au tiers de la portée soit inférieur ou à la limite égal au cisaillement nominal.

5.3 Résistance à l'arrachement

Comme spécifié au chapitre 3, aucun code ou norme ne traite du lien d'adhérence entre le PRF et le bois, plus particulièrement la longueur d'ancrage. Ainsi, les aspects théoriques de cette section seront basés sur les recherches antérieures traitant ce sujet. Des études antérieures effectuées sur le béton (Chen & Pan, 2006; T. Xu et al., 2015; Ye & Yao, 2008) ont démontré que la longueur minimale de développement d'ancrage du PRF est fonction du mode d'installation, soit EB ou NSM. Le tableau 5.5 résume les spécifications selon les normes canadiennes pour les bâtiments et pour les ponts construits en béton.

Tableau 5.5 Longueur d'ancrage selon les normes canadiennes pour le béton

Configuration du PRF	Longueur de développement d'ancrage	
	S806-12 (bâtiment)	S6-14 (ponts)
Collé en surface (EB)	$l_a = \sqrt{\frac{n_F E_F t_F}{\sqrt{f'_c}}} \geq 300 \text{ mm}$	$l_a = 0,5\sqrt{n_F E_F t_F} \geq 300 \text{ mm}$
Encastré (NSM)		$l_a = \frac{0,45k_1k_4}{d_{cs} + K_{tr}\frac{E_F}{E_s}} \left[\frac{f_F}{f_r} \right] A \geq 250 \text{ mm}$

Une description détaillée des équations données au tableau 5.5 peut être trouvée en consultant la norme respective. On remarque que pour un bâtiment conçu en béton, la longueur de développement d'ancrage est la même peu importe la configuration de PRF utilisée. Or, ce n'est pas nécessairement le cas pour le bois (Juvandes & Barbosa, 2012; Vahedian et al., 2017). L'analyse comparative du chapitre 6 sera basée sur les deux modèles et équations (tableau 5.6) proposés par Vahedian et al. (2017), Juvandes et Barbosa (2012) et Biscaia et al. (2017).

Tableau 5.6 Modèles d'équations pour la longueur d'ancrage pour le bois

Modèle proposé par	Équations
Vahedian et al. (2017)	$L_e = \alpha \times \beta \times \ln(E_F t_F) \times (f_t)^{0,25} \quad (5.9)$ $\alpha = 4.5\pi$ $\beta = \frac{1,25 + \frac{b_F}{b}}{2 \times \left(2,5 - \frac{b_F}{b}\right)}$
Juvandes et Barbosa (2012) et Biscaia et al. (2017)	$L_e = \sqrt{\frac{E_F t_F}{c_2 f_t}} \quad (5.10)$

Dans l'équation (5.9), la constante α est déterminée sur la base des résultats des essais expérimentaux. Ainsi, une comparaison sera effectuée en utilisant la même valeur. En analysant une poutre en bois renforcée de dimensions 140 mm × 241 mm en Douglas-Mélèze de qualité No.1, la contrainte prévue en traction, f_t , est égale à 7,0 MPa. La longueur d'ancrage effective pour une lamelle collée en surface de 50 mm de largeur, selon l'équation (5.9), est donc égale à :

$$L_e = 4,5\pi \times 0,375 \times \ln(165000 \times 1,2) \times (7,0)^{0,25} = 105 \text{ mm}$$

Avec

$$\beta = \frac{1,25 + \frac{50}{140}}{2 \times \left(2,5 - \frac{50}{140}\right)} = 0,375$$

L'équation (5.10) ressemble en tout point à celle de la norme CSA-S806 (2012) du tableau 5.5. En considérant que le nombre de couche, n_F , est inclus dans l'épaisseur, t_F , la seule différence se trouve dans la constante c_2 . Selon les auteurs Juvandes et Barbosa (2012), cette constante, déterminée expérimentalement, est égale à 7 pour une configuration HNSM et à 10 pour les

configurations EB et VNSM. Cependant, les auteurs Biscaia et al. (2017) proposent la même équation, mais avec une valeur de 1,4 pour la configuration EB et entre 2,6 et 4,4 pour NSM. Ainsi, compte tenu de cette disparité, une analyse comparative sera effectuée entre ces deux auteurs et nos propres valeurs. Selon l'équation (5.10), la longueur d'ancrage effective pour une lamelle collée en surface de n'importe quelle largeur est égale à :

$$L_e = \sqrt{\frac{165000 \times 1,2}{10 \times 7,0}} = 53 \text{ mm lorsque } c_2 = 10$$

$$L_e = \sqrt{\frac{165000 \times 1,2}{1,4 \times 7,0}} = 142 \text{ mm lorsque } c_2 = 1,4$$

Le tableau 5.7 présente les longueurs d'ancrage effectives selon la configuration et le modèle analysé. Les analyses du chapitre 6 seront basées sur ces résultats.

Tableau 5.7 Longueur d'ancrage effective selon la configuration et le modèle

Configuration du PRF	Longueur d'ancrage théorique (mm)		
	Vahedian et al. (2017)	Juvandes et Barbosa (2012)	Biscaia et al. (2017)
EB	105	53	142
VNSM	105	53	80 – 104

CHAPITRE 6

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSE ET DISCUSSIONS

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux, l'analyse et les discussions sur le sujet de la présente étude. L'analyse tentera de répondre aux objectifs de la recherche. L'analyse des résultats est divisée en deux volets : (i) la flexion (sections 6.1 et 6.2) et (ii) l'arrachement (sections 6.3 et 6.4).

6.1 Résultats et analyse des essais de flexion

Comme décrit au chapitre 4, les essais se sont déroulés en six phases expérimentales. Pour les essais de flexion, seules les phases B, C, D et E seront analysées. Étant donné qu'un des objectifs spécifiques de cette recherche est de comparer et d'identifier les types de configurations optimales des matériaux composites, les résultats seront principalement classés sous quatre séries :

- **série 0** – Spécimens non renforcés.
- **série 1** – Spécimens renforcés à l'aide d'une lamelle de 50 mm, d'un tissu de 72 mm ou d'une lamelle encastrée de 50 mm de largeur.
- **série 2** – Spécimens renforcés à l'aide de deux lamelles de 50 mm, d'un tissu de 140 mm ou de deux lamelles encastrées de 50 mm de largeur.
- **série 3** – Spécimens renforcés à l'aide d'une lamelle de 25 mm, d'un tissu de 36 mm ou d'une lamelle encastrée de 25 mm de largeur. À noter que cette série a été ajoutée pendant les essais dus aux observations qui seront décrites ultérieurement.

L'analyse tentera de déterminer quelle configuration offre le meilleur gain en capacité de renforcement entre la lamelle collée en surface, le tissu collé en surface ou la lamelle encastrée près de la surface. Pour ce faire, les paramètres suivants seront évalués et analysés : le mode de rupture, le comportement Force-Déplacement, le comportement contraintes-déformations et la relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre.

Dans un premier temps, les résultats expérimentaux sont analysés dans leur ensemble. Le tableau 6.1 présente les valeurs moyennes obtenues lors des essais de flexion en termes de force ultime, P_u , et de déplacement ultime à mi-portée, Δ_u . Le tableau global, incluant les résultats de tous les spécimens testés, est présenté à l'annexe III.

Dans tous les cas, on note une augmentation de la capacité ultime des spécimens renforcés par rapport au spécimen non renforcé. Cette augmentation varie entre 11%, correspondant au spécimen NSM-1L50, et 31%, correspondant aux spécimens NSM-1L25 et EB-1S36, avec une moyenne de 23%. La série 3, comprenant le plus petit taux de renforcement, ρ_{PRF} , obtient de meilleurs résultats que les séries 1 et 2. Quant au déplacement ultime, on note une augmentation moyenne de 12%. La valeur d'augmentation minimale de 6% correspond au spécimen NSM-1L50, tandis que la valeur d'augmentation maximale de 29% correspond au spécimen EB-1S140.

Tableau 6.1 Valeurs expérimentales moyennes des forces et des déplacements ultimes

Phase	Spécimen	Force ultime, P_u (kN)	Déplacement ultime, Δ_u (mm)
B	UN	77,16	36,23
C	EB-1L25	105,27	46,08
	EB-1L50	95,28	46,54
	EB-2L50	99,02	40,46
D	EB-1S36	112,12	44,14
	EB-1S72	95,73	37,46
	EB-1S140	108,46	51,24
E	NSM-1L25	112,47	34,99
	NSM-1L50	86,43	34,31
	NSM-2L50	95,94	40,58

6.1.1 Distribution des déformations sur la section transversale de la poutre

La figure 6.1 présente la distribution des déformations unitaires le long de la hauteur de la section située à mi-portée du spécimen non renforcé UN-01. La distribution des déformations unitaires est représentée sur sept courbes différentes correspondant à une fraction de la force ultime à la rupture de la poutre, P_u , variant de $0,25P_u$ à $1,0P_u$. On remarque que les courbes possèdent toutes la même distribution uniforme. En effet, la quasi-linéarité de cette distribution confirme que la poutre a un comportement linéaire-élastique jusqu'à sa rupture. De plus, les sept courbes passent par un point commun où les déformations sont nulles. Ce point commun correspond à l'axe neutre de la poutre.

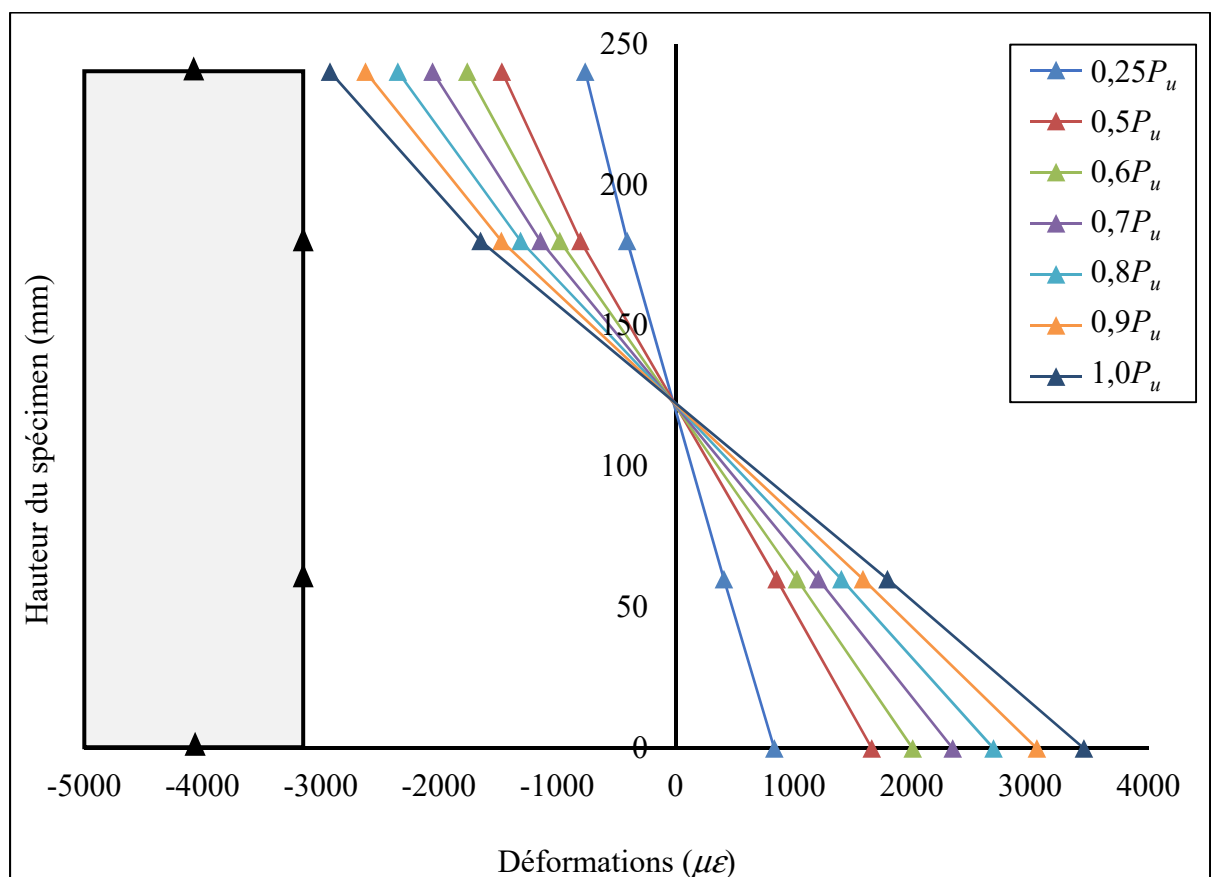


Figure 6.1 Distribution des déformations le long de la hauteur à mi-portée du spécimen

6.1.2 Modes de rupture

Lors des essais expérimentaux, six (6) modes de rupture ont été répertoriés, soit : (a) rupture par fendage du bois (TS = *Timber Splitting*), (b) rupture par écrasement du bois (TC = *Timber Crushing*), (c) rupture par délamination de l'adhésif (AD = *Adhesive Delamination*), (d) rupture par délamination du PRF (FD = *FRP Delamination*), (e) rupture du PRF (FR = *FRP Rupture*) et (f) rupture par décollement à l'interface bois-adhésif (FT = *Failure at timber-adhesive interface*). La figure 6.2 illustre les modes de rupture observés lors des essais de flexion, tandis que le tableau 6.2 précise les modes de rupture pour chaque spécimen. Comme attendu, la rupture par fendage du bois est la plus fréquente puisqu'elle s'est produite dans tous les cas sauf un. La rupture par écrasement du bois survient en deuxième position avec un taux d'occurrence de 47%. La rupture par délamination de l'adhésif, par délamination du PRF et par décollement à l'interface bois-adhésif se sont produits dans 12% des cas. Le mode de rupture le moins fréquent est la rupture du PRF qui ne s'est produite qu'une seule fois.

Dans certains cas, la présence de nœuds, de par leurs nombres ou leurs dimensions, a conditionné le mode de rupture. Par exemple, la rupture de la poutre EB-1S140-02 s'est produite directement sur le nœud tout près de l'appui, à l'endroit où le tissu s'arrête [voir la figure 6.2 (f)]. Cette rupture brutale, causée par le cisaillement longitudinal entre deux nœuds, a mené à la rupture prématurée de la poutre en flexion et à la compression des fibres supérieures à mi-portée. La poutre NSM-1L50-01 a subi le même type de rupture, causé par la présence d'un nœud situé directement sous la force appliquée. Ce nœud étant en zone de cisaillement et de flexion élevés a empêché ladite poutre d'atteindre sa pleine capacité en flexion. Cependant, étant donné que le nœud est situé à la même hauteur que le renforcement encastré de la lamelle, l'impact a été atténué. Ceci est attribuable au fait que la lamelle a tendance à reprendre les efforts en traction au niveau inférieur de la poutre.

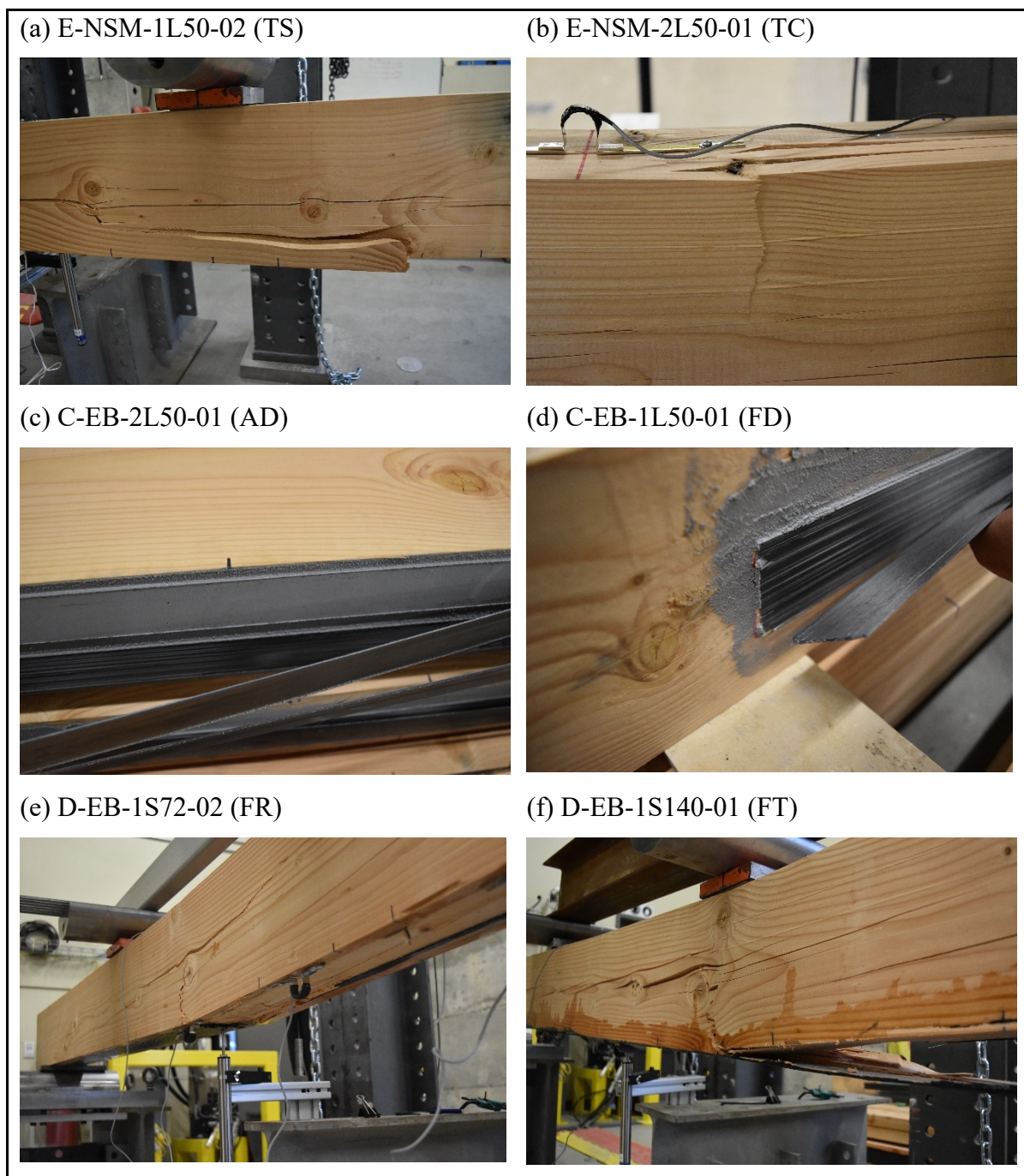


Figure 6.2 Modes de rupture répertoriés lors des essais de flexion

Tableau 6.2 Modes de rupture des spécimens en flexion

Phase	Spécimen	Modes de rupture
B	UN-01	TS
	UN-02	TS
C	EB-1L25-01	TS, AD
	EB-1L50-01	TS, FD
	EB-1L50-02	TS, TC
	EB-2L50-01	TS, TC, AD, FD
	EB-2L50-02	TS
D	EB-1S36-01	TS, TC
	EB-1S72-01	TS
	EB-1S72-02	TS, TC, FT, FR
	EB-1S140-01	TS, TC, FT
	EB-1S140-02	TS, TC
E	NSM-1L25-01	TS, TC
	NSM-1L50-01	TS
	NSM-1L50-02	TS
	NSM-2L50-01	TC
	NSM-2L50-02	TS

TS : rupture par fendage du bois

TC : rupture par écrasement du bois

AD : rupture par délamination de l'adhésif

FD : rupture par délamination du PRF

FR : rupture du PRF

FT : rupture par décollement à l'interface bois-adhésif

6.1.3 Capacité ultime

Cette section est consacrée à l'analyse, en termes de gains, de la capacité ultime des poutres en flexion. Le moment de flexion, la contrainte de flexion et le module d'élasticité seront traités. Le moment de flexion nominal expérimental est déterminé par l'équation suivante :

$$M_n = \frac{PL}{3} \quad (6.1)$$

Où P est la force appliquée par le vérin et L est la portée de la poutre. Dans le cas présent, la portée de la poutre est égale à 3 m et la force concentrée est égale à $P/2$ (voir la figure 4.2). Ainsi, l'équation (6.1) devient :

$$M_n = \frac{P}{2} \quad (6.2)$$

Afin de reproduire l'environnement des essais, le moment de flexion nominal théorique doit être multiplié par les coefficients de correction applicables K_D et K_{Zb} . Ainsi, les équations de la section 5.1.2 seront utilisées pour calculer les moments de flexion nominaux théoriques. La contrainte de flexion, f_b , en fonction du moment de flexion nominal, M_n , et du module de section transformée, S , est déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$f_b = \frac{M_n}{S} \quad (6.3)$$

Le tableau 6.3 présente la capacité ultime des poutres testées par série. On note que les valeurs expérimentales sont en moyenne supérieures de 31% aux valeurs théoriques du moment nominal maximum. Ceci indique que les valeurs théoriques demeurent très conservatrices, et ce même en tenant compte des coefficients de correction K_D et K_{Zb} . Il est important de noter que les modules d'élasticité ont été déterminés à l'aide des courbes expérimentales contraintes-déformations présentées à la section 6.1.5. En effet, chaque courbe comprend une portion élastique qui permet de déterminer les modules d'élasticité qui sont donnés par $E = \sigma/\epsilon$, où σ est la contrainte normale de flexion (MPa) et ϵ est la déformation unitaire (mm/mm). Les premières données des courbes sont négligées afin de ne pas tenir compte des déformations initiales lors du chargement de la poutre.

Tableau 6.3 Capacité ultime par série

Série	Spécimen	Moment nominal maximum, M_n (kNm)		Gain (%)	Contrainte de flexion, f_b (MPa)	Gain (%)	Module d'élasticité, E (MPa)	Gain (%)
		th [*]	ex [†]					
0	UN	29,56	38,58	-	28,47	-	12819	-
1	EB-1L50	30,94	47,64	24%	33,57	18%	20546	60%
	EB-1S72	31,07	47,86	24%	33,59	18%	16390	28%
	NSM-1L50	30,34	43,21	12%	31,06	9%	24547	91%
2	EB-2L50	32,21	49,51	28%	33,51	18%	22099	72%
	EB-1S140	32,37	54,23	41%	36,53	28%	20388	59%
	NSM-2L50	31,06	47,97	24%	33,67	18%	23179	81%
3	EB-1L25	30,26	52,64	36%	37,92	33%	17923	40%
	EB-1S36	30,33	56,06	45%	40,30	42%	25161	96%
	NSM-1L25	30,09	56,24	46%	40,75	43%	27789	117%

* th = valeur théorique

† ex = valeur expérimentale

6.1.3.1 Comparaison par série

Série 1

La première série d'essais comprend la poutre renforcée à l'aide d'une lamelle de 50 mm de largeur collée en surface (spécimen EB-1L50), la poutre renforcée à l'aide d'un tissu de 72 mm de largeur (équivalent à une lamelle de 50 mm) collé en surface (spécimen EB-1S72) et la poutre renforcée à l'aide d'une lamelle encastrée de 50 mm de largeur (spécimen NSM-1L50). Le spécimen NSM-1L50 a montré le gain le plus faible en termes de moment nominal (12%) et de contrainte de flexion (9%), mais le module d'élasticité le plus élevé (24 547 MPa). Ce petit gain est principalement dû au mode de rupture de la poutre, tel que mentionné à la section précédente. En effet, le fait que la poutre ait subi, au niveau de son axe neutre, un cisaillement longitudinal sur toute sa longueur, l'a empêché d'atteindre le

moment de flexion maximal qui aurait dû être beaucoup plus élevé compte tenu du renforcement appliqué.

Le renforcement en surface des deux spécimens EB-1L50 et EB-1S72 offre le même gain par rapport au moment nominal (24%) et à la contrainte de flexion (18%). En revanche, les modules d'élasticité sont très différents. Avec la lamelle, le gain est de 60%, tandis qu'avec le tissu, ce gain n'est que de 28%. En comparaison, les modules d'élasticité des poutres non renforcées, déterminés aux essais préliminaires, présentaient un écart d'à peine 3% entre ces deux mêmes poutres. Or, ces valeurs sont basées sur la moyenne entre les deux essais effectués sur chaque type de poutre. Ainsi, en utilisant la valeur maximale attribuée au spécimen EB-1S72-01, le gain augmente à 51%. Ce gain se rapproche des 60% obtenus avec la lamelle. Ces résultats montrent que, pour la série 1, l'utilisation d'une lamelle ou d'un tissu collé en surface offre sensiblement le même gain en capacité ultime.

Série 2

La deuxième série d'essais comprend la poutre renforcée à l'aide de deux lamelles de 50 mm de largeur collées en surface (spécimen EB-2L50), la poutre renforcée à l'aide d'un tissu de 140 mm de largeur (équivalent à deux lamelles de 50 mm) collé en surface (spécimen EB-1S140) et la poutre renforcée à l'aide de deux lamelles encastrées de 50 mm de largeur (spécimen NSM-2L50). Un gain important de 41% du moment nominal a été observé pour le spécimen EB-1S140. Ce gain est attribuable, entre autres, au fait que le tissu recouvre la largeur totale de la poutre et permet ainsi une meilleure distribution des contraintes en zone de traction. C'est également cette poutre qui offre le gain le plus élevé (28%) de la contrainte de flexion.

Les deux autres spécimens, EB-2L50 et NSM-2L50, offrent un gain du moment nominal de 28% et 24%, respectivement. L'augmentation de la contrainte de flexion est de 18% pour ces deux spécimens. Ainsi, pour la série 2, l'utilisation d'un tissu de 140 mm de largeur permet d'atteindre une plus grande capacité ultime, comparativement à l'utilisation de deux lamelles équivalentes.

Série 3

La troisième et dernière série d'essais a été ajoutée à la suite de l'analyse des résultats préliminaires des deux premières séries. Étant donné que la force ultime est demeurée stable pour les deux premières séries d'essais, il a été conclu qu'une augmentation de la largeur de PRF au-delà de 50 mm n'offre pas de gains significatifs. Pour cette raison, la largeur de la série 1 a été diminuée de moitié, soit 25 mm pour la lamelle et 36 mm pour le tissu. Dans ce cas-ci, un seul spécimen pour chaque type de renforcement (EB-1L25, EB-1L36, NSM-1L25) a été testée. Cette série d'essais est caractérisée par une configuration optimale en tous points. En effet, on remarque un gain maximal en termes de moment maximum et de contrainte de flexion. Cependant, il faut garder à l'esprit que ces trois spécimens possèdent les modules d'élasticité avant renforcement les plus élevés. Il y a un écart de 29% à 59% entre les modules d'élasticité de ces poutres et ceux de la série 0 (spécimens non renforcées). Alors, pour la série 3, l'utilisation d'une lamelle encastrée de 25 mm de largeur offre les meilleurs résultats, avec un gain du moment nominal de 46%.

6.1.3.2 Conclusion partielle

Du point de vue théorique, la poutre renforcée d'un tissu de 140 mm de largeur offre le gain le plus élevé pour ce qui est du moment nominal et de la contrainte de flexion. Les résultats expérimentaux démontrent que cette valeur maximale est plutôt obtenue par le renforcement à l'aide d'une lamelle encastrée de 25 mm de largeur. Ainsi, en ce qui a trait à la capacité ultime, un renforcement équivalent à une lamelle de 25 mm est plus optimal qu'avec des largeurs plus élevées. La comparaison des modules d'élasticité est exclue de l'analyse de la capacité ultime étant donné l'importance de la variation entre les spécimens.

6.1.4 Comportement Force-Déplacement

L'analyse du comportement Force-Déplacement sera effectuée par série, c'est-à-dire pour une même largeur de lamelle ou une largeur de tissu équivalente avec les trois configurations étudiées. Une conclusion partielle résumera les points saillants du comportement Force-Déplacement. Les courbes de chargement individuelles peuvent être consultées à l'annexe III.

6.1.4.1 Comparaison par série

Série 1

La figure 6.3 présente les courbes du déplacement à mi-portée en fonction de la force de chargement des spécimens non renforcés (UN-01 et UN-02) ainsi que des paires de poutres renforcées des trois configurations étudiées. Les résultats montrent une augmentation de la force maximale à la rupture par rapport au spécimen non renforcé pour tous les spécimens renforcés. La force maximale de 100,5 kN est atteinte par le spécimen EB-1L50-02. Le déplacement maximal de 48,9 mm est atteint par le même spécimen. Les spécimens EB-1S72-01, EB-1S72-02 et NSM-1L50-01 présentent une rupture brutale à l'atteinte de la force maximale. Les spécimens EB-1L50-01, EB-1L50-02 et NSM-1L50-02 reprennent, quant à eux, une certaine force après une première rupture du bois, grâce au PRF qui reprend la totalité des efforts de flexion. De plus, la courbe caractérisant le spécimen NSM-1L50-01 demeure quasi-linéaire avant la rupture. Tous les spécimens renforcés, à l'exception du spécimen EB-1L50-02, présentent le même comportement linéaire élastique, et ce, jusqu'à une force d'environ 51,5 kN.

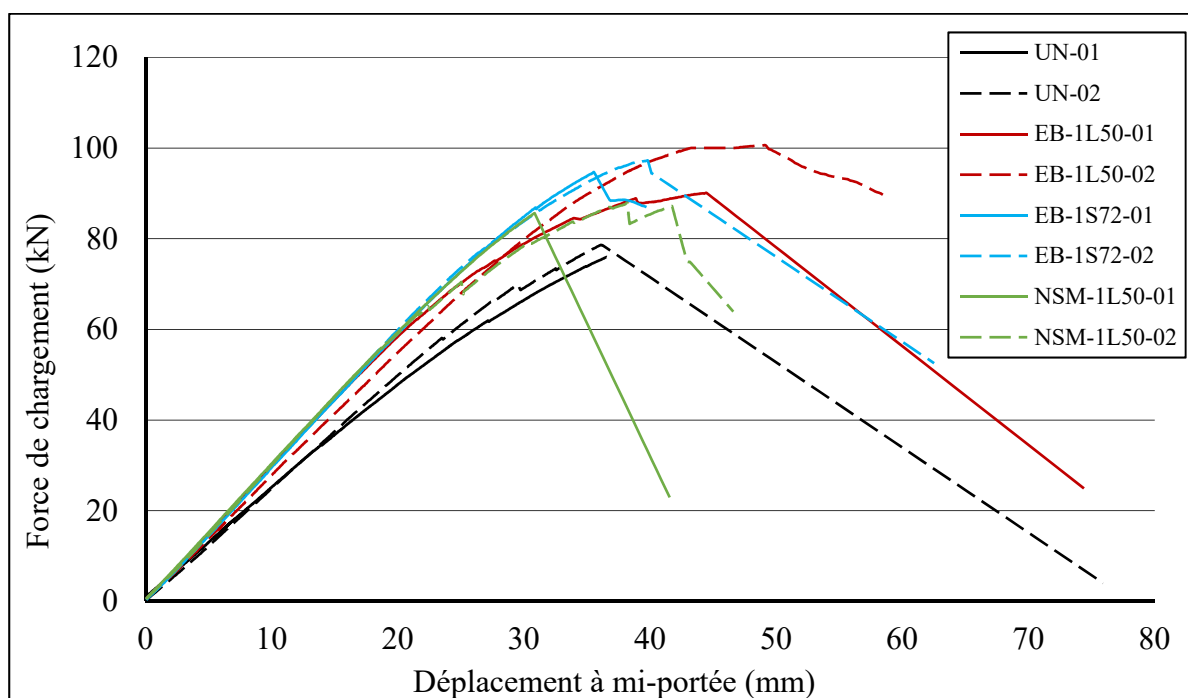


Figure 6.3 Courbes de comportement Force-Déplacement de la série 1

Série 2

Les courbes de comportement Force-Déplacement de la série 2 sont présentées à la figure 6.4. On remarque une augmentation significative de la force maximale à la rupture pour toutes les poutres. Les spécimens renforcés à l'aide de tissu (EB-1S140-01 et EB-1S140-02) atteignent les valeurs maximales de cette série avec une force ultime de 108,7 kN et un déplacement ultime de 57,8 mm. Comme on pouvait s'y attendre, la partie linéaire des courbes présente une pente plus élevée que pour la série 1. Ainsi, un déplacement moindre pour une force de chargement plus élevée indique que les poutres de la série 2 sont plus rigides que celles de la série 1.

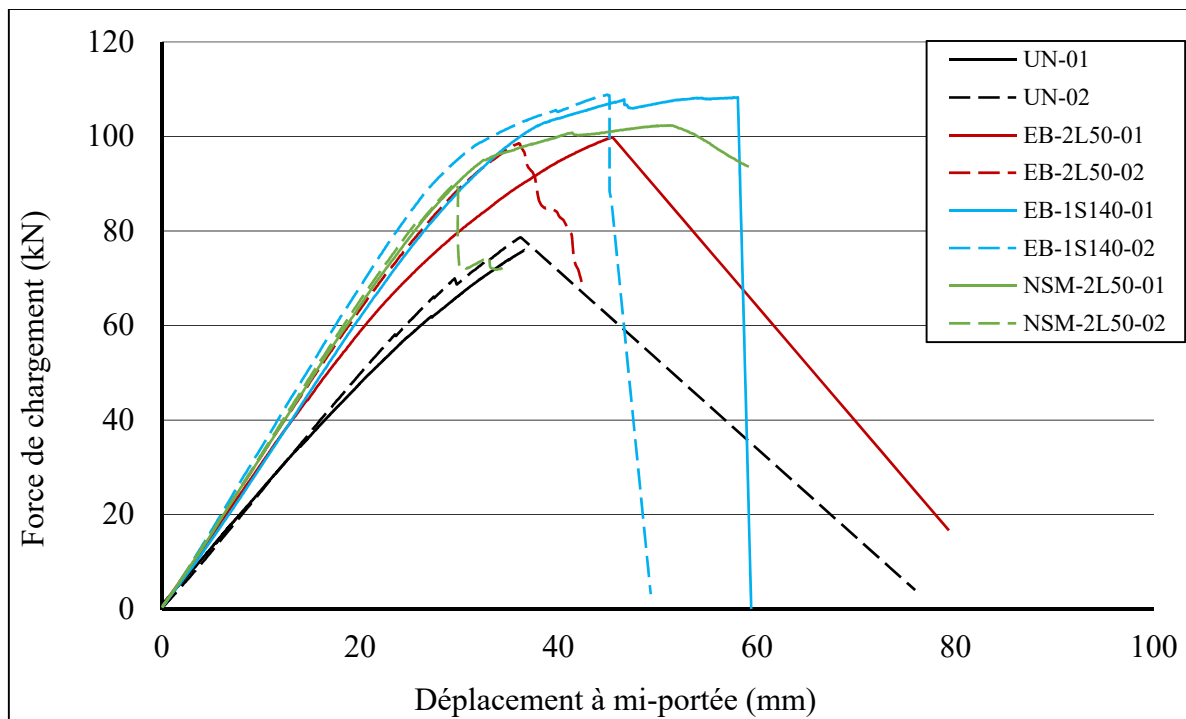


Figure 6.4 Courbes de comportement Force-Déplacement de la série 2

Série 3

La figure 6.5 présente les courbes de comportement Force-Déplacement des poutres de la série 3. La force maximale à la rupture de 112,5 kN a été atteinte par le spécimen NSM-1L25-01, tandis que le déplacement maximal de 46,1 mm a été atteint par le spécimen EB-1L25-01. Les trois spécimens renforcés présentent le même comportement élasto-plastique

avant la rupture. Les spécimens EB-1S36-01 et NSM-1L25-01 présentent le même comportement jusqu'à une force d'environ 30 kN. Les résultats de ces poutres sont quasi-identiques en termes de moment nominal et de contrainte de flexion.

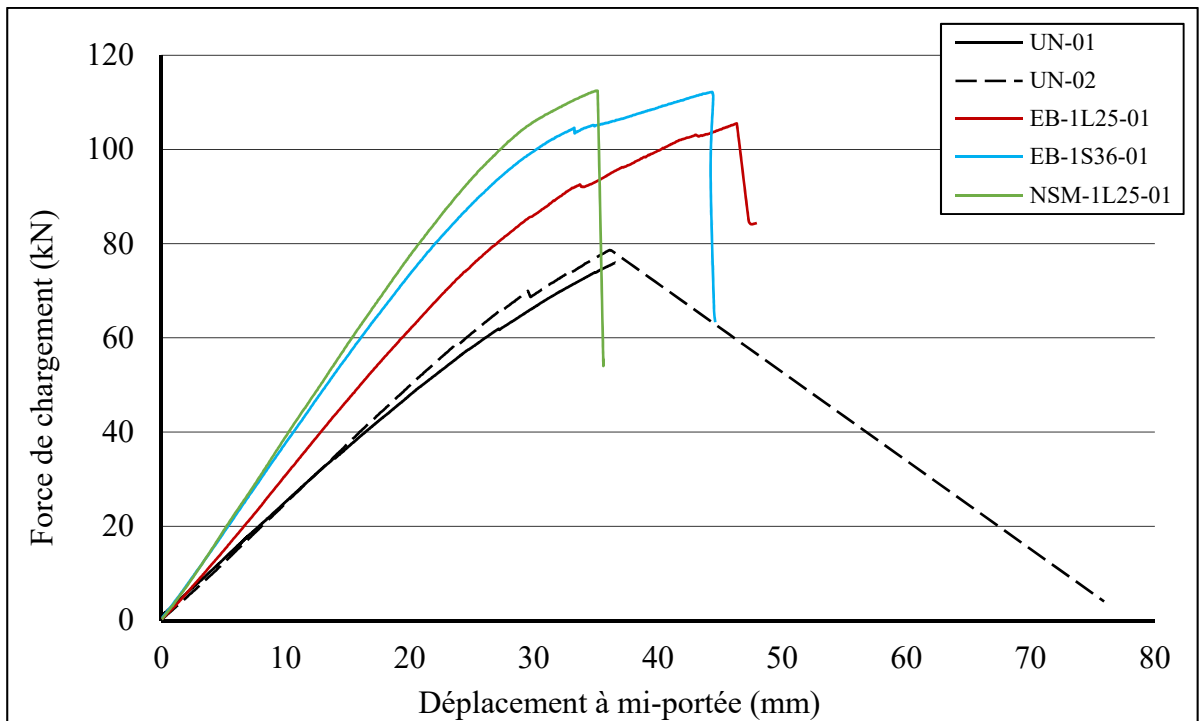


Figure 6.5 Courbes de comportement Force-Déplacement de la série 3

6.1.4.2 Conclusion partielle

L'analyse des courbes de comportement Force-Déplacement montre que la grande majorité des spécimens testés en flexion ont un comportement élasto-plastique. Certains demeurent quasi-linéaires jusqu'à l'atteinte du point de rupture, tandis que d'autres présentent une première baisse soudaine de la force, suivie d'une remontée jusqu'au point de rupture, appelée écoulement. Les résultats montrent aussi qu'un renforcement équivalent à une lamelle de 25 mm de largeur est plus optimal qu'avec des largeurs plus élevées.

6.1.5 Comportement contraintes-déformations

Les courbes des contraintes en fonction des déformations présentées à la figure 6.6 sont basées sur les lectures des jauges de déformation installées à mi-portée des poutres. Elles représentent les mêmes séries d'essais que les sections précédentes. On remarque d'abord que la contrainte maximale en flexion de 15,8 MPa proposée par la norme CSA-O86 est très conservatrice. En effet, les spécimens UN-01 et UN-02 atteignent une contrainte maximale de 56 MPa et 58 MPa, respectivement. La contrainte expérimentale des poutres non renforcées est environ 250% fois plus élevée que la contrainte théorique. Cependant, il est important de noter que les valeurs des résistances prévues proposées par la norme sont basées sur les données des essais « *in-grade* ». Cette méthode est décrite dans le CWC-1994 (1994). Au Canada, la valeur des résistances correspond au cinquième centile de la distribution des données obtenues lors des essais « *in-grade* ». Le nombre de spécimens testés lors de cette recherche ne permet pas de distribuer les données selon cette méthode. Ainsi, aucune analyse supplémentaire ne sera effectuée en ce sens.

Pour les spécimens de la série 1, on peut voir à la figure 6.6 a) que la contrainte maximale de 73 MPa, correspondant à $3300 \mu\epsilon$, est atteinte par la poutre EB-1L50-02. La déformation maximale de $10\,901 \mu\epsilon$ est attribuable à la poutre EB-1S72-02. Celle-ci atteint une contrainte maximale en flexion de 72 MPa. Les poutres NSM-1L50-01 et NSM-1L50-02 ont montré les contraintes les plus faibles, soit 62 MPa et 66 MPa, respectivement.

Les courbes contraintes-déformations de la série 2, présentées à la figure 6.6 b), montrent une distribution présentant peu d'écart entre chaque poutre. Cela permet de confirmer que les modules d'élasticité de ces poutres sont presque identiques. La contrainte maximale de 79 MPa, correspondant à $4976 \mu\epsilon$, est atteinte par la poutre EB-1S140-01. La poutre NSM-2L50-02 obtient la contrainte la plus faible, soit 66 MPa ($2944 \mu\epsilon$).

Les courbes, présentées à la figure 6.6 c), relatives aux poutres EB-1S36-01 et NSM-1L25-01, suivent le même tracé, mais avec une légère variation de pente. La deuxième, étant légèrement

plus abrupte que la première, indique par conséquent le module d'élasticité le plus élevé. Les deux poutres possèdent la même contrainte maximale de flexion de 82 MPa avec 3667 $\mu\epsilon$ pour la première et 3227 $\mu\epsilon$ pour la deuxième. La déformation maximale de 5726 $\mu\epsilon$ est attribuable à la poutre EB-1L25-01.

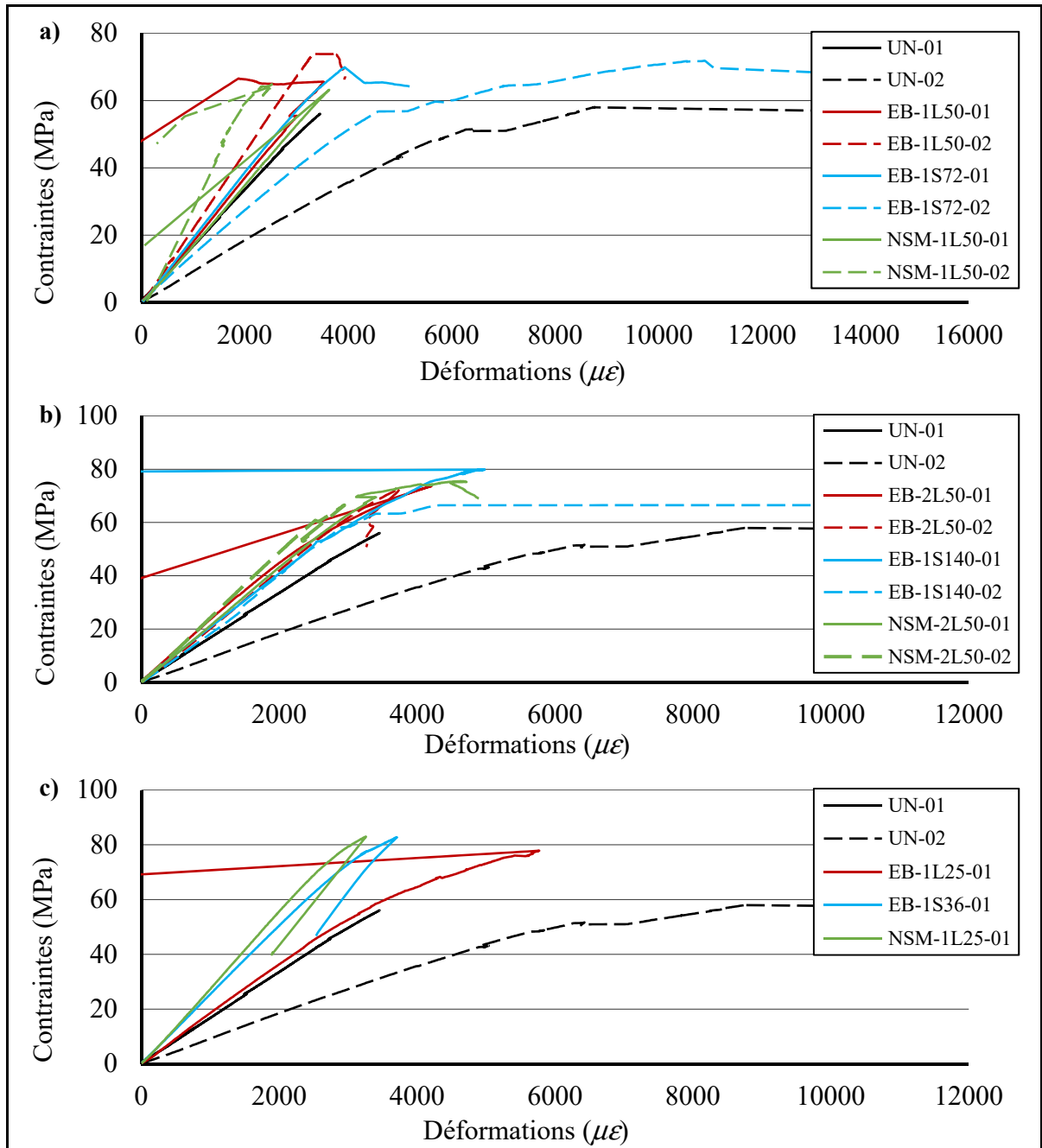


Figure 6.6 Courbes contraintes-déformations : a) Série 1, b) Série 2 et c) Série 3

6.1.6 Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre

La relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre est présentée aux figures 6.7 à 6.15 pour les poutres munies de jauges réparties sur sa demi-longueur. Chaque figure comporte sept courbes différentes correspondant à une fraction de la force ultime à la rupture de la poutre, P_u . Les fractions utilisées permettront d'évaluer les déformations le long du PRF selon les quatre emplacements des jauges : 0 mm (mi-portée), 400 mm, 800 mm et 1200 mm.

On remarque deux profils distincts de courbes. Le premier profil montre une distribution des déformations descendante linéairement vers l'extrémité de la poutre. Ce type de profil démontre que la distribution des contraintes demeure constante le long de la poutre. Cette tendance est illustrée aux figures 6.7 et 6.13. Le deuxième profil indique une augmentation des déformations entre les jauges 1 et 3. Cette augmentation est remarquée, comme l'indique la figure 6.9, lorsque la force appliquée est supérieure ou égale à 90% de la force ultime à la rupture. Un défaut d'adhérence ou la présence d'un nœud près de la jauge peut également expliquer le fait que les déformations soient plus élevées sur la jauge 2 que sur la jauge 1 (voir la figure 6.14).

Les très grandes déformations à mi-portée (0 mm) de la figure 6.11 s'expliquent par une rupture de la jauge à environ 83% de la force ultime. Cette explication est valable également pour la figure 6.8, mais avec une rupture de la jauge à environ 97% de la force ultime. De plus, la jauge 3 de la poutre EB-1S72-02 s'est avérée dysfonctionnelle.

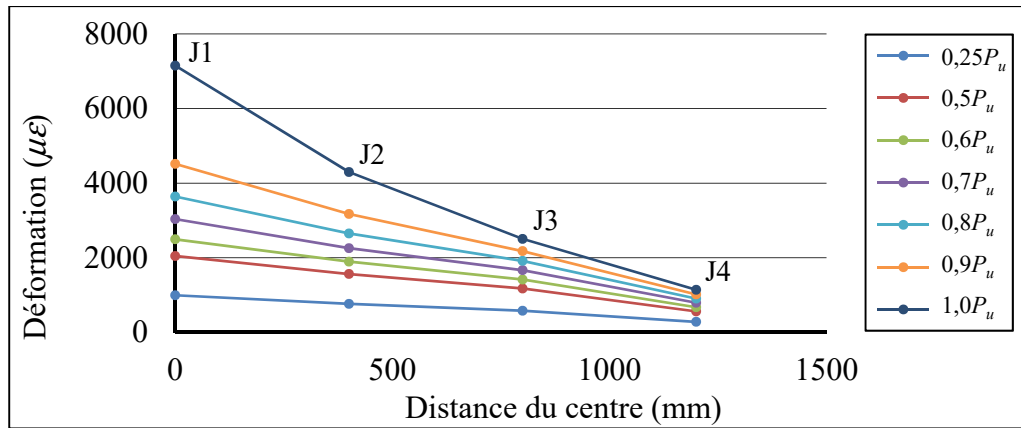


Figure 6.7 Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-1L50-01

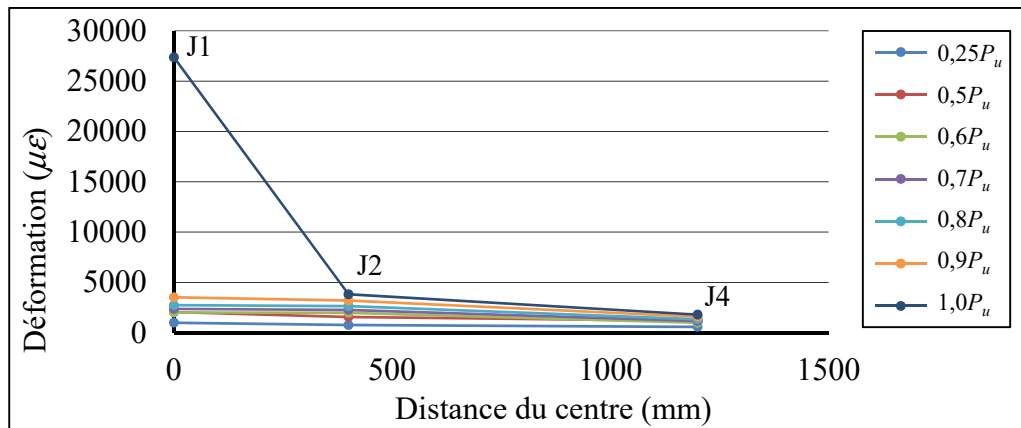


Figure 6.8 Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-1S72-02

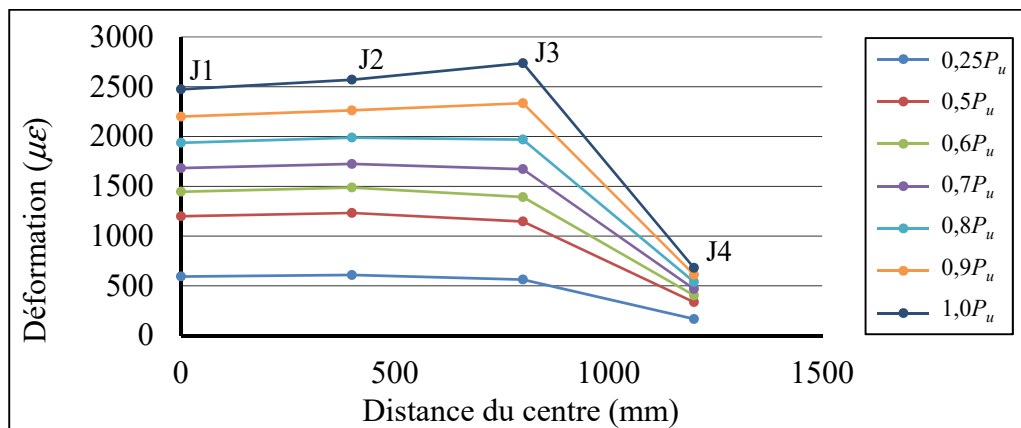


Figure 6.9 Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre NSM-1L50-01

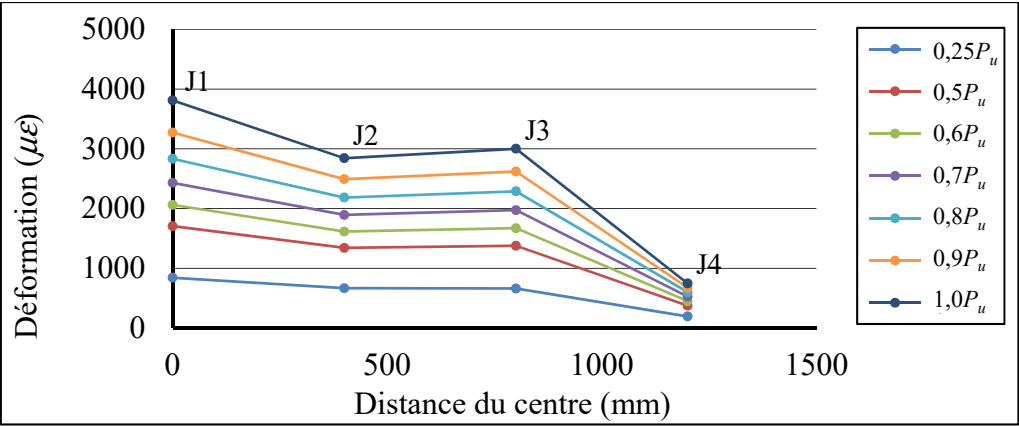


Figure 6.10 Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-2L50-02

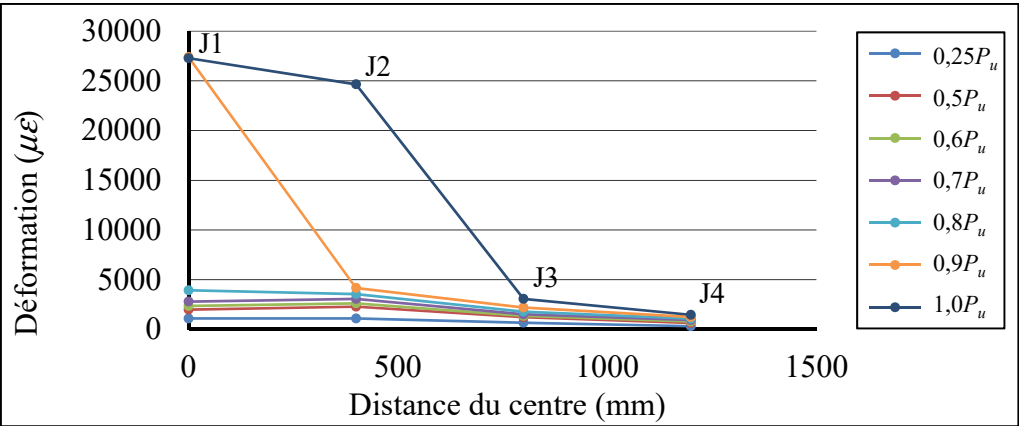


Figure 6.11 Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-1S140-02

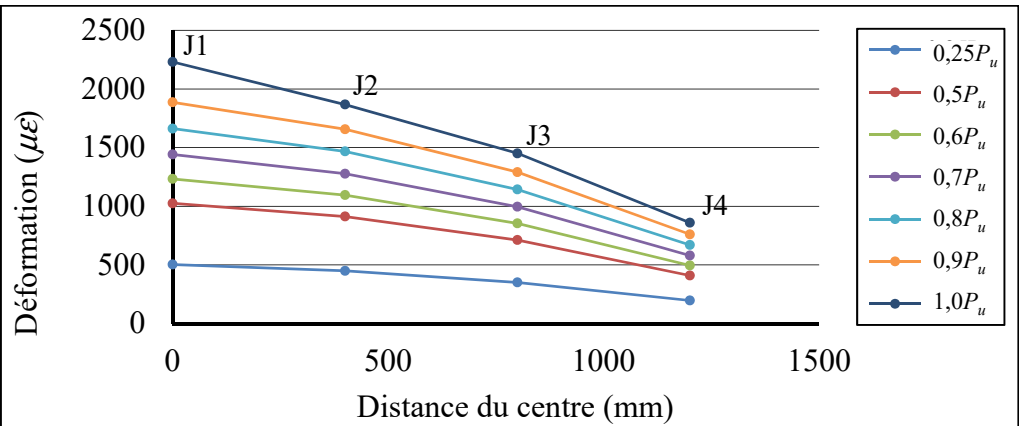


Figure 6.12 Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre NSM-2L50-02

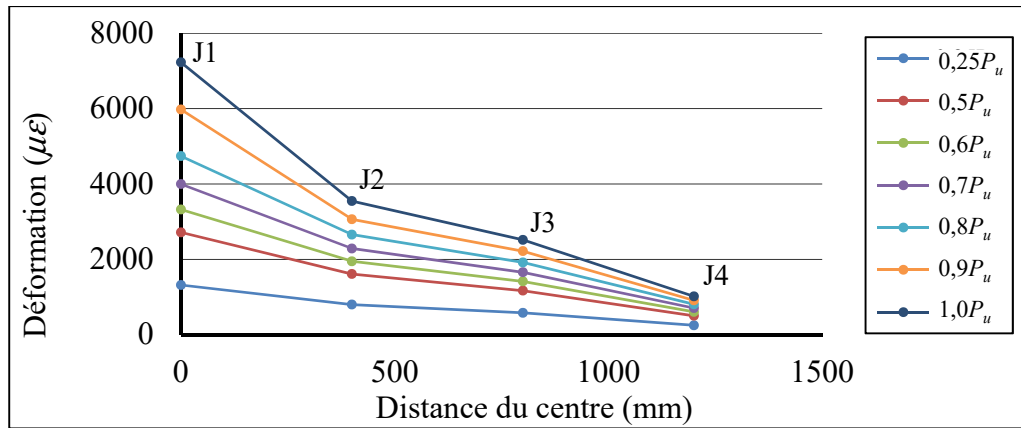


Figure 6.13 Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-1L25-01

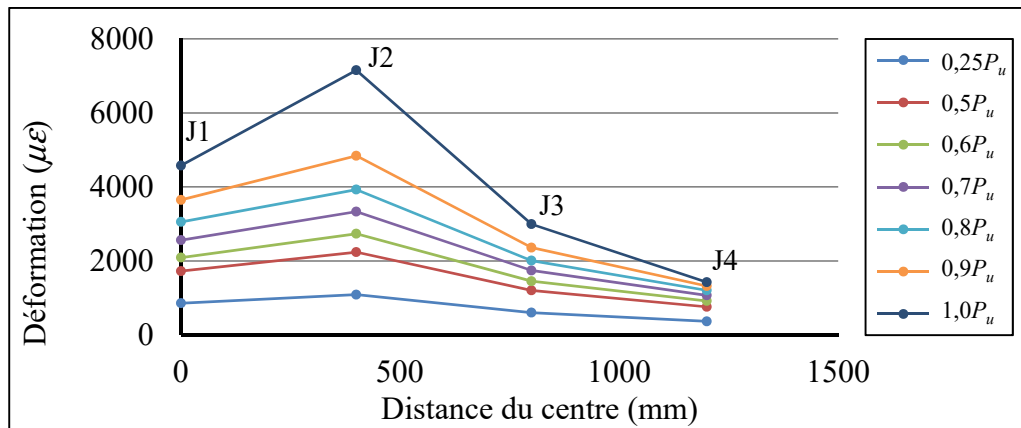


Figure 6.14 Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre EB-1S36-01

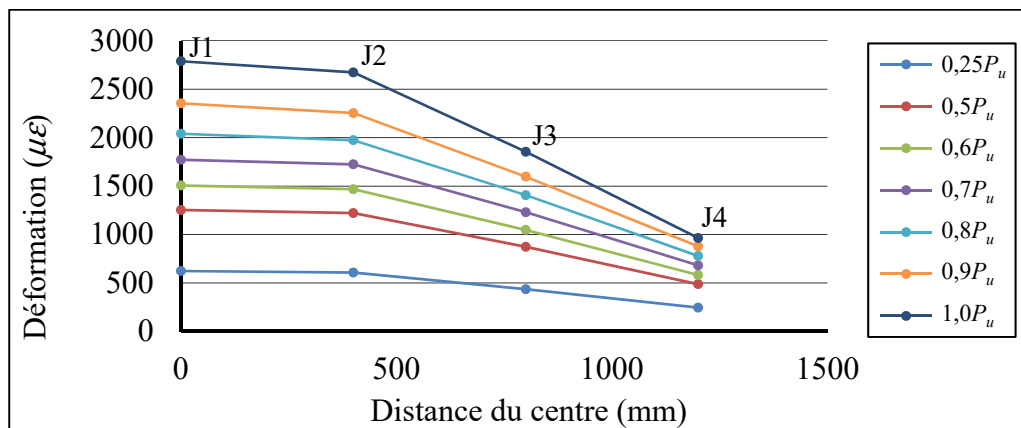


Figure 6.15 Relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre NSM-1L25-01

6.1.7 Discussions

Les différentes configurations de renforcement étudiées dans le cadre de cette recherche ont démontré un gain du moment nominal variant de 12% à 46%. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les largeurs optimales à utiliser pour chaque type de configuration. Par exemple, pour une lamelle collée en surface, une largeur maximale de 50 mm est plus efficace qu'une largeur plus élevée. En effet, les résultats obtenus montrent qu'une largeur plus grande n'offre aucun gain supplémentaire quant à la capacité ultime en flexion de la poutre. Dans le cas du renforcement à l'aide de tissu collé en surface, une largeur équivalente à celle de la poutre offre de meilleurs résultats, car cela permet une meilleure répartition des contraintes d'adhérence entre le PRF et le bois. Pour une lamelle encastrée près de la surface, la largeur optimale est de 25 mm.

De plus, l'analyse de la relation entre les déformations du PRF et la distance par rapport au centre de la poutre a démontré, dans la majorité des cas, une répartition uniforme des déformations. Le fait d'avoir déployé le PRF jusqu'à l'appui permet d'apprécier l'efficacité de la longueur d'ancrage de façon globale. L'objectif de l'étude, quant à la détermination de la longueur d'ancrage effective, sera adressé à la section 6.3 portant sur les essais d'arrachement.

Des trois configurations étudiées, le renforcement à l'aide de lamelle encastrée tend à offrir la configuration optimale. En effet, les spécimens renforcés d'une ou de plusieurs lamelles encastrées présentent le gain du moment nominal le plus élevé. Par ailleurs, l'utilisation de lamelles encastrées permettent également de dissimuler le matériau composite à l'intérieur de la poutre. Cependant, l'étude d'un plus grand nombre de spécimens permettrait d'obtenir une base de données suffisante afin de comparer le renforcement à l'aide de lamelles collées en surface, de tissus collés en surface et de lamelles encastrées de façon encore plus précise.

6.2 Modèle de calcul pour la résistance à la flexion

La résistance pondérée au moment de flexion, M_r , est fonction des forces internes dans les différentes composantes (voir la figure 6.16). Ces forces internes sont fonction des

déformations en compression du bois ε_{wc} , des déformations en traction du bois ε_{wt} et des déformations en traction du PRF ε_F . Les forces internes dépendent aussi de la profondeur de l'axe neutre $\bar{y}$. Ces déformations sont reliées entre elles par triangles semblables en considérant les hypothèses suivantes :

1. Les sections planes avant déformation restent planes après déformations.
2. L'adhérence entre le renfort en PRF et le bois est parfaite; le PRF subit donc la même déformation relative que le bois adjacent.

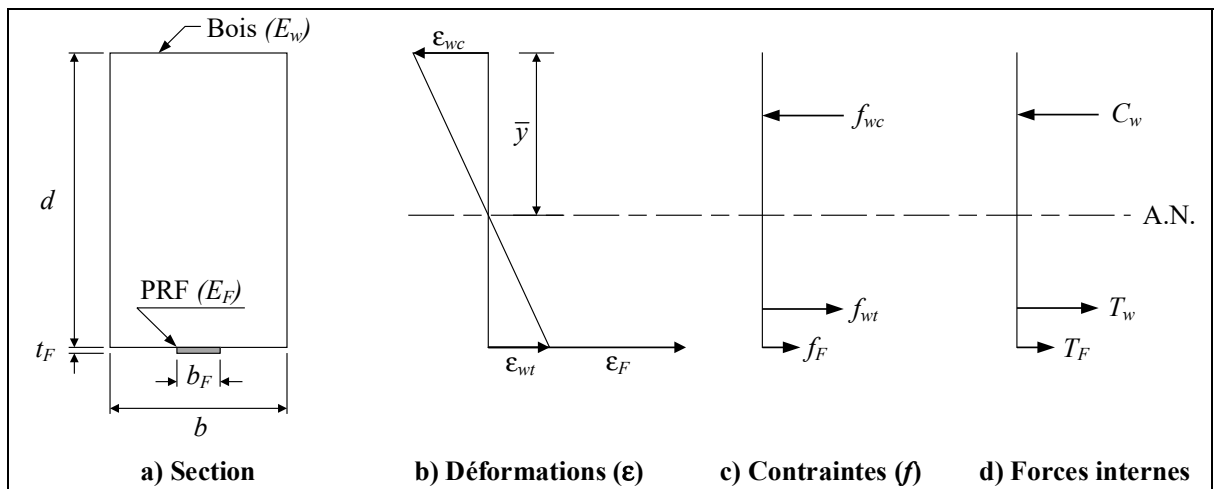


Figure 6.16 Poutre en bois renforcée en flexion à l'aide d'une lamelle collée en surface

Par rapport au point d'application de la force C_w , par exemple, le moment résistant, M_r , s'écrit :

$$M_r = T_w \left(\bar{y} - \frac{\bar{y}}{3} + \frac{2(d - \bar{y})}{3} \right) + T_F \left(d - \frac{\bar{y}}{3} + \frac{t_F}{2} \right) \quad (6.4)$$

Où T_w et T_F sont respectivement la force de tension résultante générée par le bois et la force de tension résultante générée par le renfort en PRF, d est la hauteur de la section de bois et t_F est l'épaisseur du PRF.

La position de l'axe neutre par rapport à la fibre comprimée extrême (voir la figure 6.16) pour une poutre renforcée à l'aide d'une lamelle collée en surface est calculée comme suit :

$$\bar{y} = \frac{bd^2 + n(2d + t_F) A_F}{2(bd + nA_F)} \quad (6.5)$$

Avec

$$n = \frac{E_F}{E_w} \quad (6.6)$$

Où b est la largeur de la poutre, A_F est l'aire du PRF, E_F est le module d'élasticité du PRF et E_w est le module d'élasticité du bois.

Les forces de tension résultantes pondérées du bois et du PRF sont déterminées à l'aide des équations suivantes :

$$T_w = \phi_w f_{wt} \frac{(d - \bar{y})b}{2} \quad (6.7)$$

$$T_F = \phi_F E_F \varepsilon_F A_F \quad (6.8)$$

Où ϕ_w et ϕ_F sont respectivement les coefficients de résistance du bois et du PRF, f_{wt} est la résistance maximale en traction du bois, ε_F est la déformation maximale du PRF et A_F est l'aire du PRF. Le coefficient de résistance du bois, ϕ_w , est égal à 0,9 pour la flexion, tandis que le coefficient de résistance du PRF, ϕ_F , est pris égal à 0,65 conformément à la norme S806-12.

Il est important de noter que la déformation maximale du PRF, ε_F , ne sera pas atteinte avant la rupture du bois en flexion. La valeur de ε_F est une fonction linéaire de ε_{wc} et peut être déterminée comme suit :

$$\varepsilon_F = \varepsilon_{wc} \left(\frac{d - \bar{y}}{\bar{y}} \right) \quad (6.9)$$

6.3 Résultats et analyse des essais d'arrachement

Les essais d'arrachement correspondent à la phase F du programme expérimental décrit au chapitre 4. Ces essais ont été effectués pour trois longueurs d'ancrage différentes et les résultats sont classés sous trois séries reliées à ces longueurs d'ancrages comme suit :

- **série A** – Longueur d'ancrage de 100 mm.
- **série B** – Longueur d'ancrage de 150 mm.
- **série C** – Longueur d'ancrage de 500 mm.

L'analyse tentera de déterminer quelles configurations offrent les meilleures performances en matière d'adhérence et quelle est la longueur d'ancrage effective de la lamelle et du tissu collés en surface. Pour ce faire, les paramètres suivants seront évalués et analysés : le mode de rupture, le comportement Force-Déplacement, la relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée, la relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée et la relation entre la contrainte d'adhérence et le glissement.

6.3.1 Modes de rupture

Lors des essais expérimentaux, cinq (5) modes de rupture ont été répertoriés, soit : (a) rupture de la fibre du bois (TF = *Timber Fibre-Tear Failure*), (b) rupture par délamination de l'adhésif (AD = *Adhesive Delamination*), (c) rupture par décollement à l'interface bois-adhésif (FT = *Failure at timber-adhesive interface*), (d) rupture par décollement à l'interface adhésif-PRF (FF = *Failure at FRP-adhesive interface*) et (e) rupture du PRF (FR = *FRP Rupture*). Le tableau 6.4 présente les modes de rupture pour chaque spécimen, tandis que la figure 6.18 illustre les modes de rupture observés lors des essais d'arrachement. Comme attendu, la rupture de la fibre du bois est la plus fréquente puisqu'elle s'est produite dans tous les cas. Cependant, la quantité de fibres de bois restante sur le PRF diffère d'un spécimen à l'autre, allant de 1 mm

à 6 mm. La rupture par décollement à l'interface bois-adhésif survient en deuxième avec 42% de taux d'occurrence. La rupture par délamination de l'adhésif et par décollement à l'interface adhésif-PRF se sont produits 25% du temps.

Tableau 6.4 Modes de rupture des spécimens en arrachement

Phase	Spécimen	Mode de rupture
F	AL100-1S36-01	FT, TF
	AL100-1S36-02	FT, TF
	AL100-1L25-01	FF, FT
	AL100-1L25-02	TF, FF
	AL150-1S36-01	FT, TF
	AL150-1S36-02	FT, TF
	AL150-1L25-01	FF, TF
	AL150-1L25-02	AD, TF
	AL500-1S25-01	TF-FR
	AL500-1S25-02	TF, FT
	AL500-1L17-01	AD, TF
	AL500-1L17-02	AD, TF

TF : rupture de la fibre du bois

AD : rupture par délamination de l'adhésif

FT : rupture par décollement à l'interface bois-adhésif

FF : rupture par décollement à l'interface adhésif-PRF

FR : rupture du PRF

Le mode de rupture des spécimens renforcés d'une lamelle est plus facile à repérer que ceux renforcés d'un tissu. En effet, l'adhésif de faible viscosité utilisé pour le tissu pénètre mieux les fibres du bois que l'adhésif pâteux des lamelles. Cette pénétration résulte en une meilleure adhérence entre le bois et le tissu. Les modes de rupture (b), (c) et (d) sont alors facilement confondus pour le tissu, puisqu'il n'y a pas de délamination claire de l'adhésif qui est transparent. Le mode de rupture le moins fréquent est la rupture du PRF qui ne s'est produite qu'une seule fois. Or, cette rupture s'est produite en même temps que le décollement complet du PRF. Ainsi, le spécimen F-AL500-1S25-01 présente un mode de rupture combiné.

Le spécimen F-AL500-1L17-01 présente une rupture prématurée causée par la mauvaise adhérence entre l'adhésif et le PRF, tel qu'illustré à la figure 6.17. Lors des essais, on remarque que les 100 premiers mm se décolle dès le début du chargement, causant par le fait même un décollement prématuré le long de la longueur d'ancrage. De plus, les cages utilisées pour les essais d'arrachement de la figure 4.4 comportent certains défauts. Les spécimens, n'étant retenus qu'en compression à leurs extrémités, subissent une certaine rotation, θ , par rapport à la verticale. La figure 6.19 illustre la rotation du spécimen à l'intérieur de la cage. La force exercée sur le PRF, F , se décline en deux composantes, F_1 et F_2 (hors plan), au niveau du spécimen en bois. Cela peut engendrer un décollement prématuré du PRF. Cependant, la rotation, de l'ordre de $0,5^\circ$, est relativement négligeable et n'influence donc pas les résultats de façon appréciable.



Figure 6.17 Mauvaise adhérence du spécimen F-AL500-1L17-01

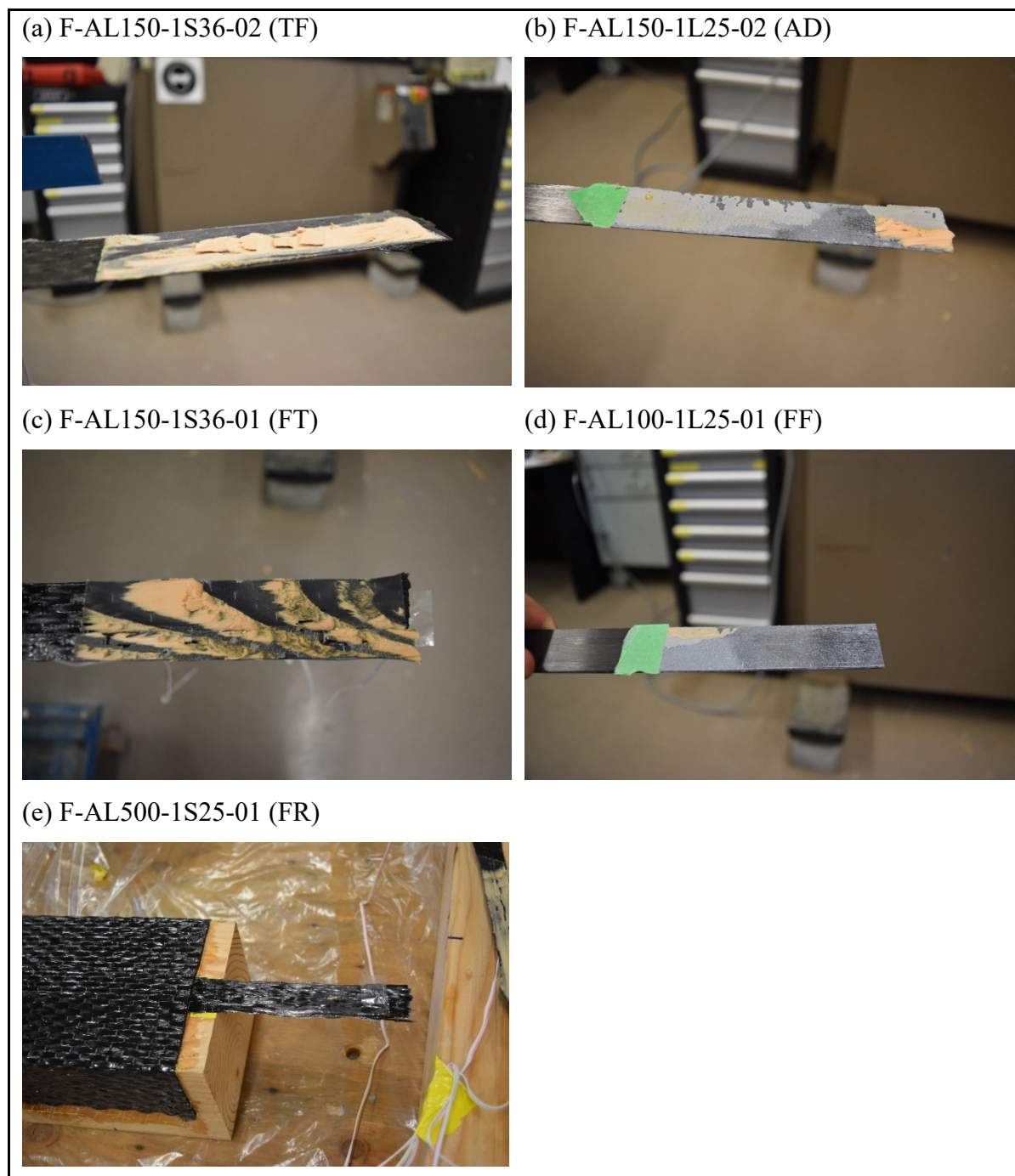


Figure 6.18 Modes de rupture répertoriés lors des essais d'arrachement

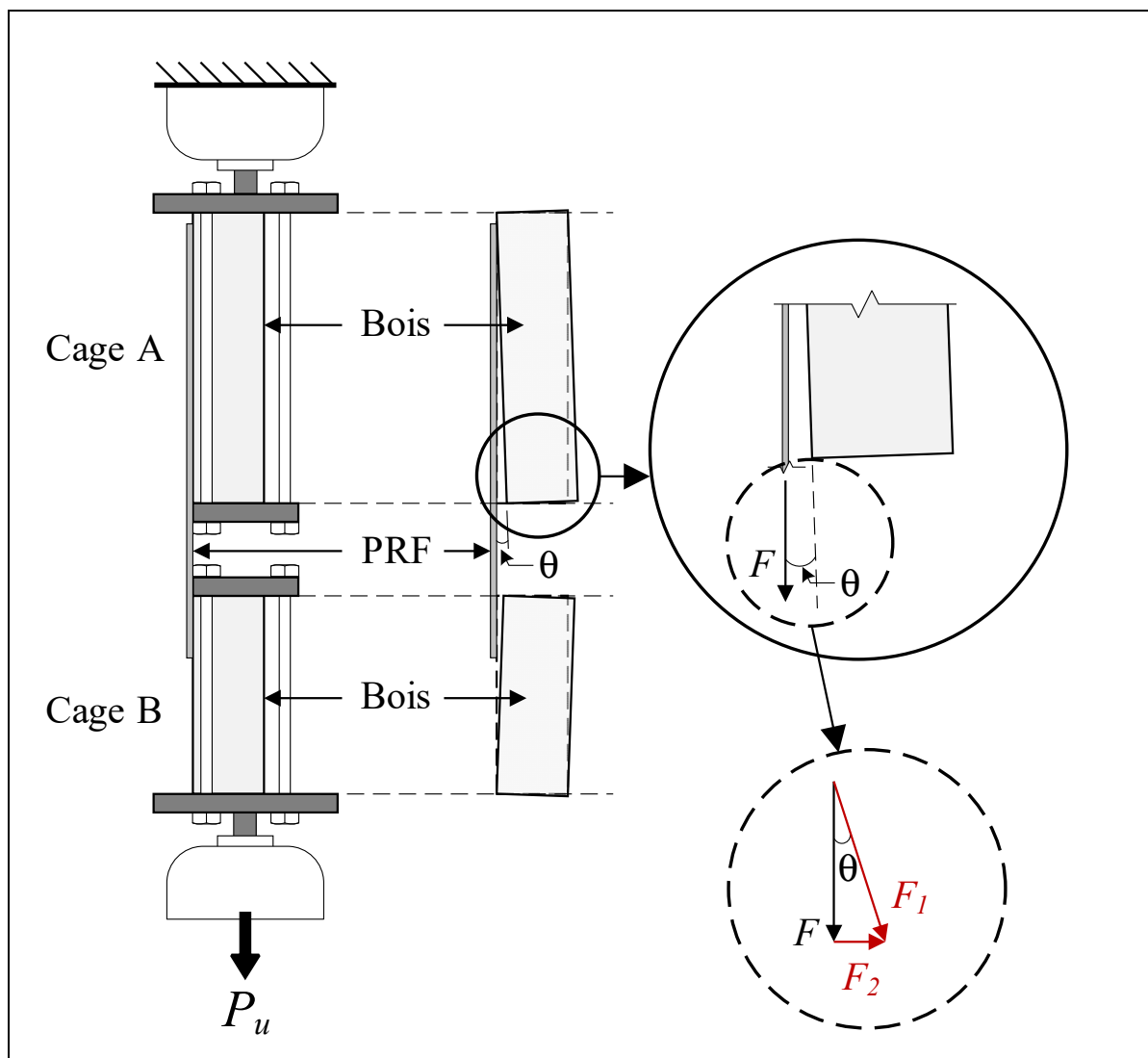


Figure 6.19 Défauts de la cage observés durant les essais

6.3.2 Comportement Force-Déplacement et capacité ultime

Cette section est consacrée à l'analyse du comportement Force-Déplacement et de la capacité ultime à l'arrachement des spécimens. L'analyse du comportement Force-Déplacement sera effectuée pour les trois séries déterminées précédemment, en termes de capacité ultime. Ainsi, une comparaison sera faite entre les trois longueurs d'ancrage testées. Une conclusion partielle résumera les points saillants. Le tableau 6.5 présente les valeurs expérimentales des forces, des déplacements et des déformations ultimes des spécimens testés par longueur d'ancrage.

Tableau 6.5 Valeurs expérimentales des forces, des déplacements et des déformations ultimes

Phase	Spécimen	Force ultime, P_u (kN)	Déplacement ultime, Δ_u (mm)	Déformation ultime ($\mu\epsilon$)
F	AL100-1S36-01	24,22	5,16	5361
	AL100-1S36-02	28,97	5,01	5490
	AL100-1L25-01	18,56	3,92	3498
	AL100-1L25-02	20,54	3,07	3954
	AL150-1S36-01	27,91	6,35	6080
	AL150-1S36-02	24,85	4,75	3748
	AL150-1L25-01	20,93	3,90	4102
	AL150-1L25-02	19,18	4,29	3614
	AL500-1S25-01	22,14	5,10	5527
	AL500-1S25-02	19,94	4,78	6244
	AL500-1L17-01	17,81	6,49	5440
	AL500-1L17-02	21,21	4,94	6022

6.3.2.1 Comparaison par série

Tout d'abord, en observant les courbes de comportement Force-Déplacement des trois séries, présentées aux figures 6.20 à 6.22, on remarque qu'elles ne sont pas lisses. En effet, les courbes montrent une instabilité de la force de traction appliquée sur le spécimen inférieur. Celle-ci a tendance à perdre en intensité en suivant un pas irrégulier de déplacement. Ce phénomène est causé par le déplacement du spécimen à l'intérieur de la cage, tel que précisé à la section 6.3.1. Chaque fois que le spécimen se déplace, la rotation entre le PRF et le bois augmente (voir la figure 6.19). Ainsi, la force de traction diminue légèrement pour augmenter ensuite.

Série A

La figure 6.20 présente les courbes du déplacement en fonction de la force de traction des spécimens avec une longueur d'ancrage de 100 mm. Des renforcements à l'aide d'une lamelle

de 25 mm de largeur (1L25) et d'un tissu de 36 mm de largeur (1S36) sont étudiés. En observant les différentes courbes, on remarque que le tissu atteint des forces de traction et des déplacements plus élevés que la lamelle. La force de traction maximale de 28,97 kN est atteinte par le spécimen AL100-1S36-02, tandis que le déplacement maximal de 5,16 mm est atteint par le spécimen AL100-1S36-01. Les courbes des spécimens renforcés à l'aide d'une lamelle sont plutôt linéaires élastiques avant la rupture, tandis que ceux renforcés à l'aide de tissu montrent un comportement plutôt élasto-plastique. La déformation maximale de $5490 \mu\epsilon$ est atteinte par le spécimen AL100-1S36-02.

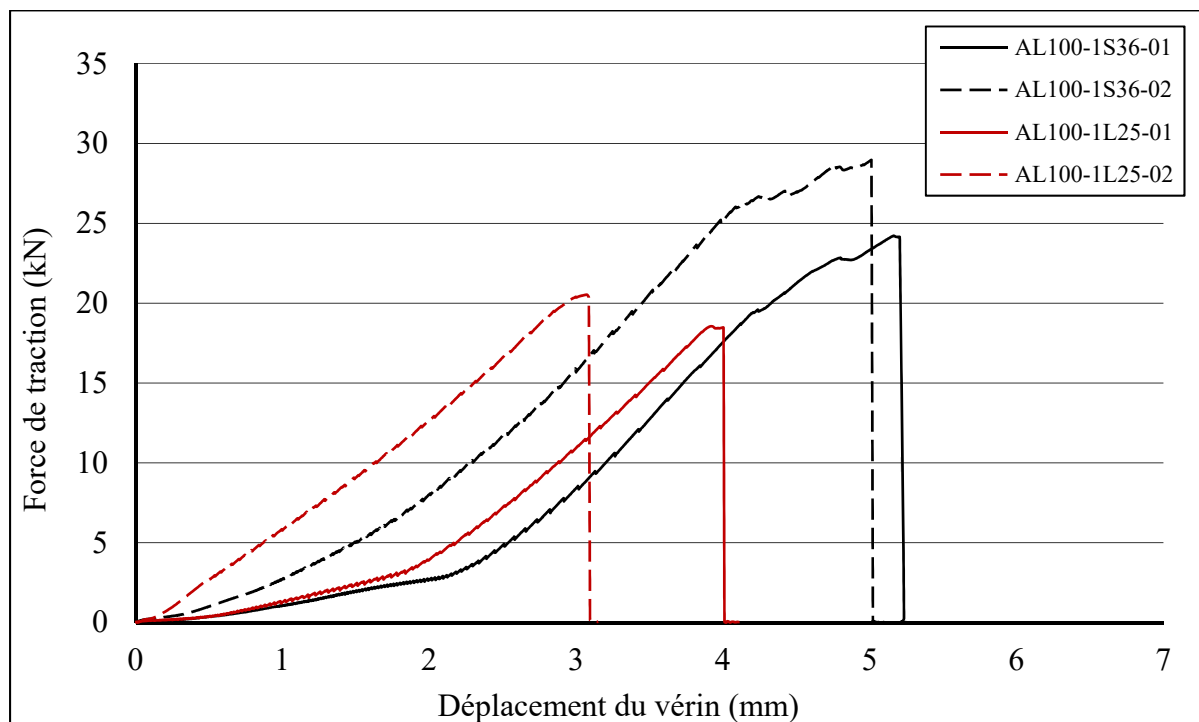


Figure 6.20 Courbes de comportement Force-Déplacement de la série A

Série B

Les courbes de comportement Force-Déplacement de la série B sont présentées à la figure 6.21. Des renforcements à l'aide d'une lamelle de 25 mm de largeur (1L25) et d'un tissu de 36 mm de largeur (1S36) sur une longueur d'ancrage de 150 mm sont étudiés. On remarque que les valeurs demeurent semblables à celles relatives à la longueur d'ancrage de 100 mm de la série A. Avec une force de traction maximale de 27,91 kN, un déplacement maximal de

6,35 mm et une déformation maximale de $6080 \mu\epsilon$ atteint par le spécimen AL150-1S36-01. Il n'y a donc pas d'augmentation significative de la force de traction entre une longueur d'ancrage de 100 mm et de 150 mm.

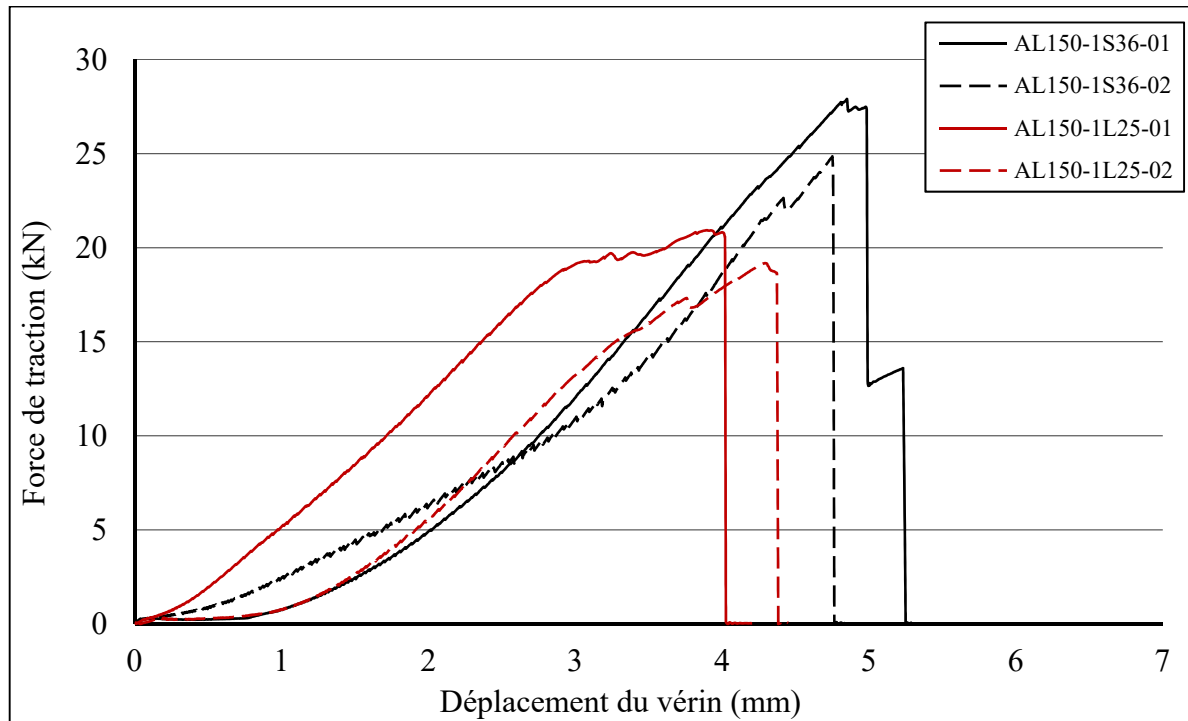


Figure 6.21 Courbes de comportement Force-Déplacement de la série B

Série C

La figure 6.22 présente les courbes du déplacement en fonction de la force de traction des spécimens avec une longueur d'ancrage de 500 mm. Des renforcements à l'aide d'un tissu de 25 mm de largeur (1S25) et d'une lamelle de 17 mm de largeur (1L17) sont étudiés. Cette série a été ajoutée à la suite de l'analyse des résultats préliminaires des deux premières séries. Étant donné que la force de traction maximale atteinte est en deçà de la force de traction maximale du PRF, la décision a été prise de diminuer la largeur du PRF et d'augmenter la longueur d'ancrage significativement. La force de traction maximale du tissu est calculée à 58,5 kN pour une largeur de 25 mm et celle de la lamelle est calculée à 57,1 kN pour une largeur de 17 mm. Or, lors des séries A et B, le résultat maximal obtenu est de 28,97 kN pour le tissu et de 20,93 kN pour la lamelle. Afin d'atteindre la force de traction maximale, il faut augmenter la

longueur d'ancrage à environ 303 mm pour un tissu de 25 mm de largeur et à environ 409 mm pour une lamelle de 17 mm de largeur. Ainsi, une longueur d'ancrage de 500 mm a été choisie afin de s'approcher de la rupture du PRF.

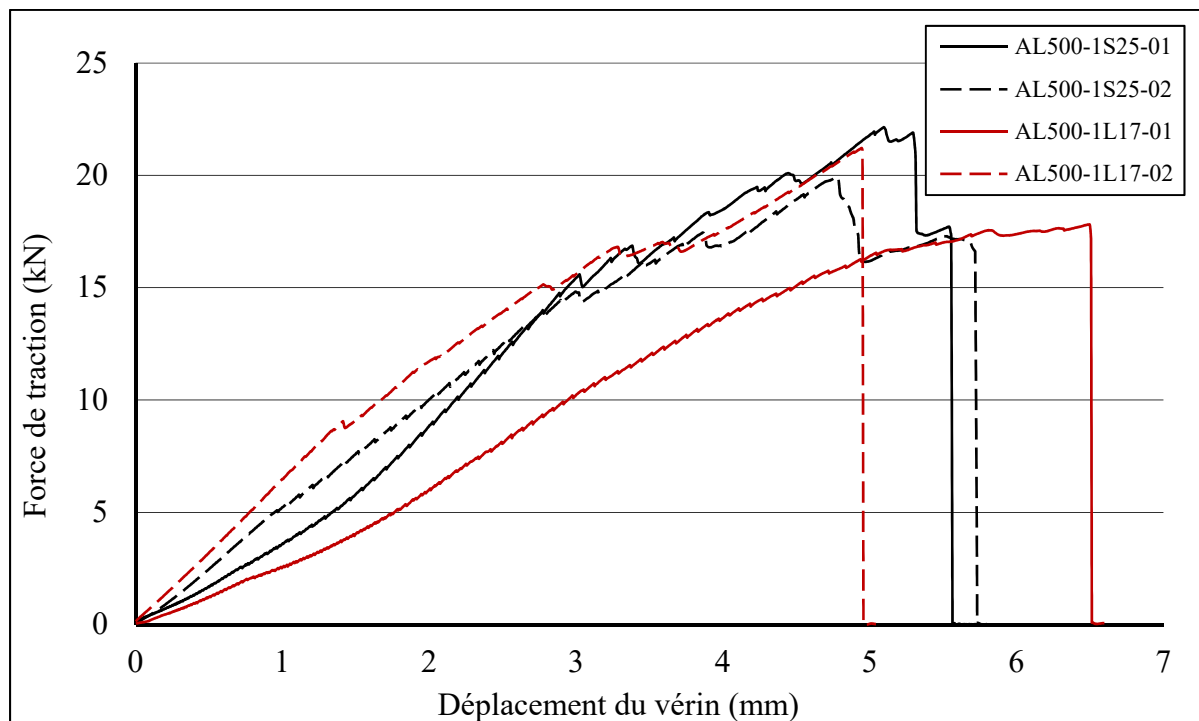


Figure 6.22 Courbes de comportement Force-Déplacement de la série C

La force de traction maximale de 22,14 kN est atteinte par le spécimen AL500-1S25-01. Le déplacement maximal de 6,49 mm est atteint par le spécimen AL500-1L17-01 et la déformation maximale de $6244 \mu\epsilon$ est atteinte par le spécimen AL500-1S25-02.

Malgré les calculs théoriques, les essais n'ont pas donné les résultats escomptés. Les résultats sont même en deçà de la moyenne des séries A et B. En ce qui a trait au comportement Force-Déplacement, il n'y a donc pas d'avantage à augmenter la longueur d'ancrage de 150 mm à 500 mm.

6.3.2.2 Conclusion partielle

Les résultats expérimentaux démontrent que le tissu offre une meilleure résistance à l'ancrage que la lamelle. En effet, la force de traction maximale atteinte par les spécimens renforcés à l'aide d'un tissu est en moyenne 25% plus élevée que celles des spécimens renforcés à l'aide d'une lamelle. Étant donné que la résistance à la traction du PRF est beaucoup plus élevée que la résistance du lien d'adhérence entre le bois et le PRF, il est peu probable que la rupture du PRF se produise.

6.3.3 Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée

La relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée est présentée aux figures 6.24 à 6.31 pour les spécimens munis de 4 à 6 jauges réparties sur la longueur d'ancrage. Chaque figure comporte six (6) courbes différentes correspondant à une fraction de la force ultime de traction, P_u . Les fractions utilisées permettront d'évaluer les déformations le long du PRF selon l'emplacement des jauges présenté au tableau 6.6 et selon l'exemple illustré à la figure 6.23. À noter que la jauge 1 est située au centre de la partie non ancrée, entre les deux blocs A et B des spécimens. Cependant, pour l'analyse, son emplacement sera rapporté au point initial de l'adhésif, soit à 0 mm de la longueur d'ancrage, marquant ainsi le point de départ de l'extrémité chargée.

Pour les longueurs d'ancrages les plus petites, 100 mm et 150 mm, on remarque un seul profil de courbe linéaire descendante vers l'extrémité non chargée. Ce profil représente une distribution des contraintes constante le long de la longueur d'ancrage. Cette tendance est illustrée aux figures 6.24 à 6.27. Seul le spécimen AL100-1S36-01 (figure 6.24) présente une légère augmentation des déformations lorsque la force de traction ultime ($1,0P_u$) est appliquée. Cette augmentation est due au fait qu'il n'y a plus d'adhérence sur le premier 25 mm, soit la distance entre l'extrémité chargée et la jauge 2. Cela implique que la jauge 2 mesure directement la force de traction exercée sur le PRF. La fissure, causée par le décollement au niveau de l'adhésif, continue de progresser jusqu'à ce que le lien d'adhérence soit complètement rompu. On remarque également que les six courbes tendent vers une valeur

minimale moyenne inférieure à $500 \mu\epsilon$. Cela confirme que les déformations sont presque nulles à l'extrémité non chargée des spécimens. Bien que les longueurs d'ancrage soient courtes, il est possible d'affirmer qu'il n'y aurait aucun bénéfice à les augmenter. Ainsi, le principe de la longueur d'ancrage effective est confirmé par les résultats obtenus lors de ces essais.

Tableau 6.6 Emplacement des jauges à partir de l'extrémité chargée du PRF

Longueur d'ancrage (mm)	Emplacement à partir de l'extrémité chargée du PRF (mm)					
	Jauge 1	Jauge 2	Jauge 3	Jauge 4	Jauge 5	Jauge 6
100	0	25	50	75	-	-
150	0	25	75	125	-	-
500	0	25	125	225	325	425

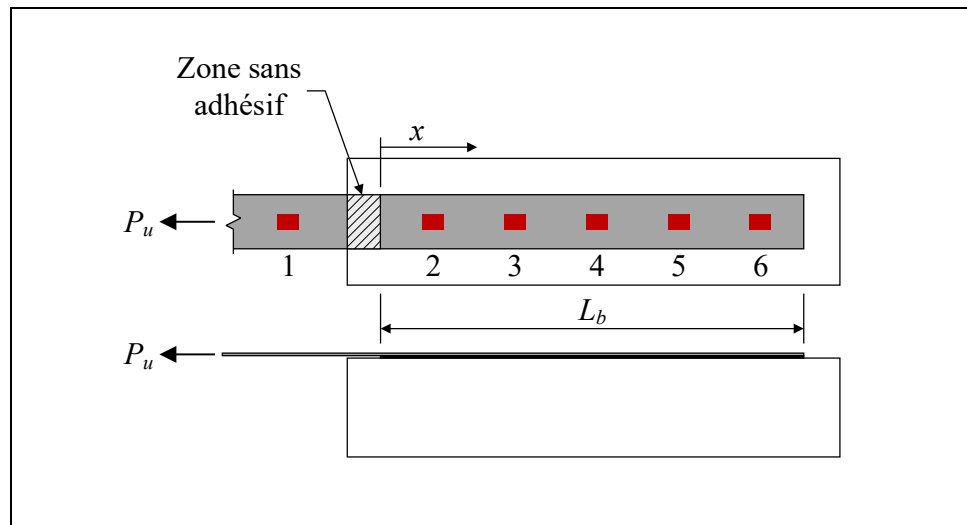


Figure 6.23 Exemple d'emplacement des jauges à partir de l'extrémité chargée du PRF

En considérant les figures 6.28 à 6.31, associées à une longueur d'ancrage de 500 mm, on observe la même tendance linéaire descendante que pour les longueurs plus petites. Cela est valable jusqu'à environ 80% de la force ultime pour un tissu de 25 mm de largeur et d'environ 50% pour une lamelle de 17 mm de largeur. Autrement, le profil des courbes devient bilinéaire avec une augmentation entre les jauges 1 et 3, dans certains cas.

Concernant le spécimen AL500-1L17-02, cette augmentation est causée par la délamination prématurée de l'adhésif. La force de traction est alors transférée rapidement de la jauge 1 à la jauge 3 pour ensuite se stabiliser et reprendre une descente linéaire vers une déformation minimale. Comme expliqué à la section 6.3.1, la mauvaise adhérence à l'extrémité chargée est la principale cause de ce profil de courbe bilinéaire.

Pour ce qui est du spécimen AL500-1L17-01, la même explication peut être invoquée. Seule la courbe correspondant à la force de traction ultime montre un comportement différent. En effet, la propagation de la fissure de l'adhésif est plus rapide à partir de 90% de la force ultime. Cela implique que l'adhérence est rompue jusqu'à la jauge 4 et c'est donc le PRF qui reprend entièrement la force de traction jusqu'à ce point. C'est pour cela que la courbe correspondant à $1,0P_u$ comporte un plateau quasi horizontal entre les jauges 2 et 4. Ce plateau est expliqué par le fait que le PRF se comporte linéairement lorsqu'une force de traction constante y est appliquée. Ainsi, il n'y a qu'une faible différence de déformations entre ces deux jauges consécutives.

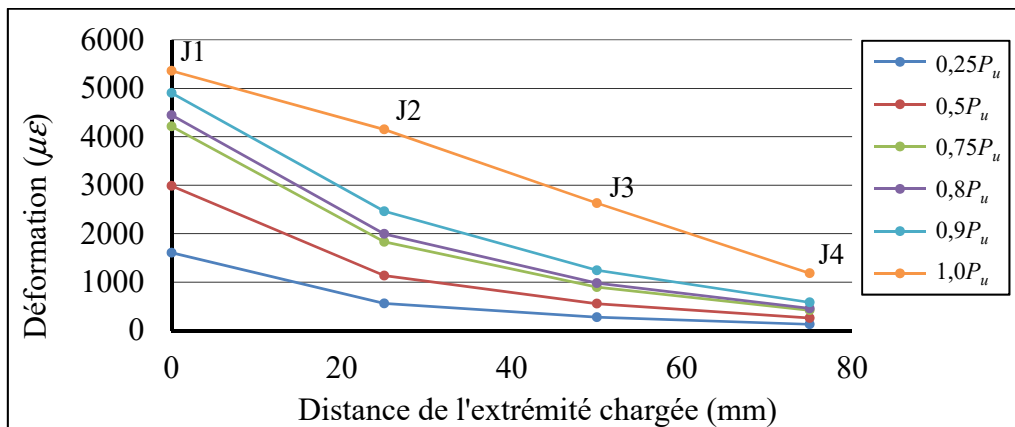


Figure 6.24 Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL100-1S36-01

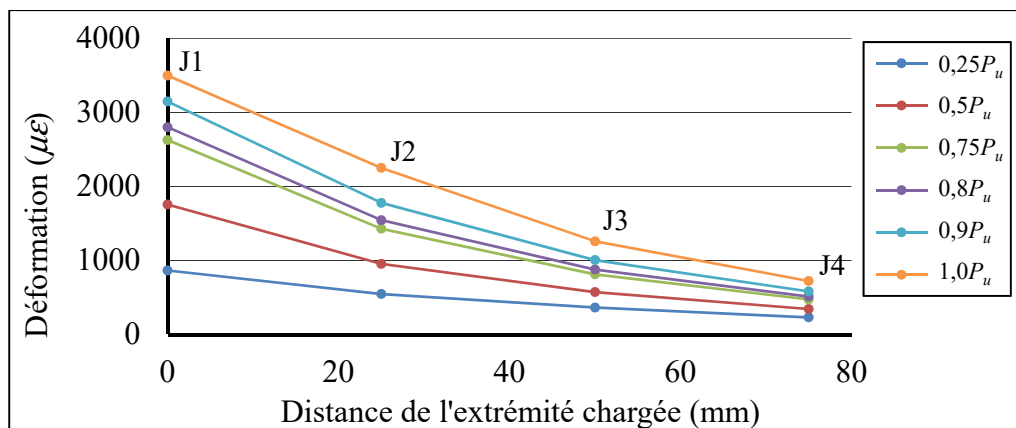


Figure 6.25 Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL100-1L25-01

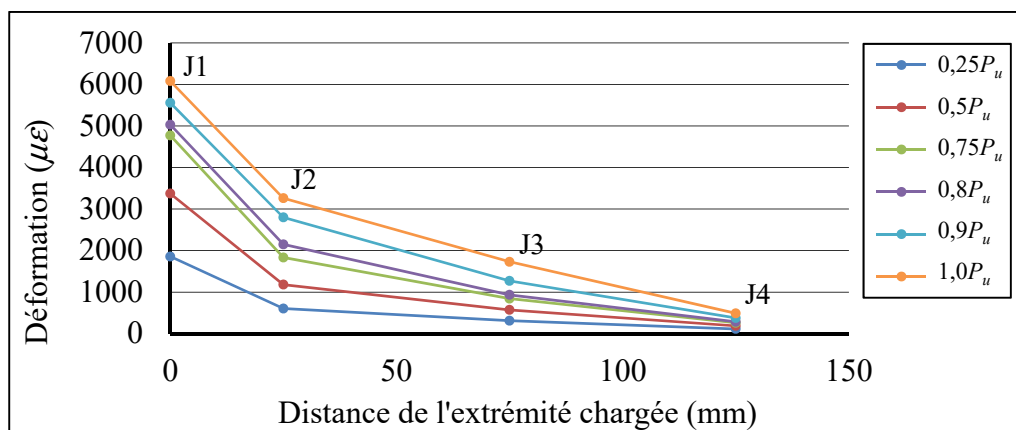


Figure 6.26 Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL150-1S36-01

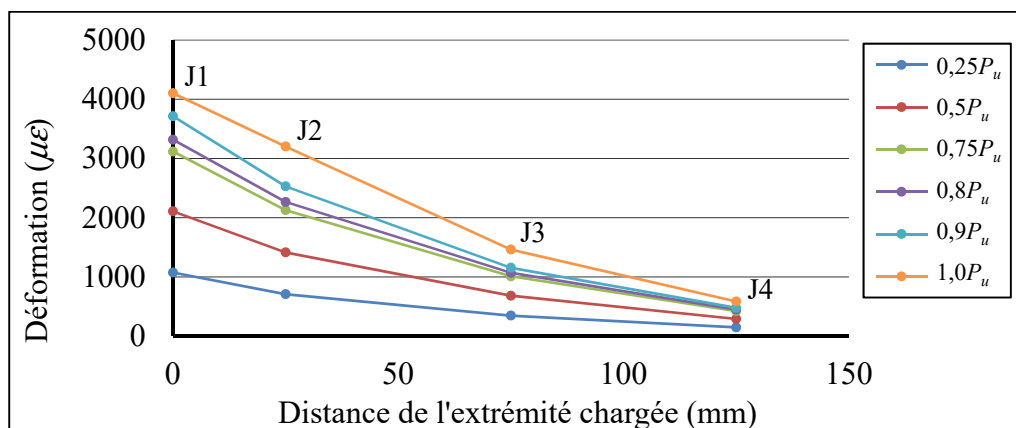


Figure 6.27 Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL150-1L25-01

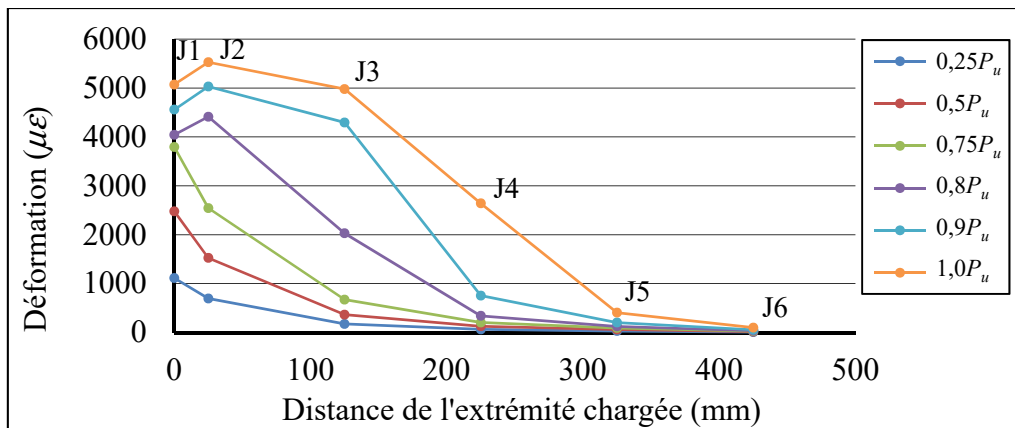


Figure 6.28 Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1S25-01

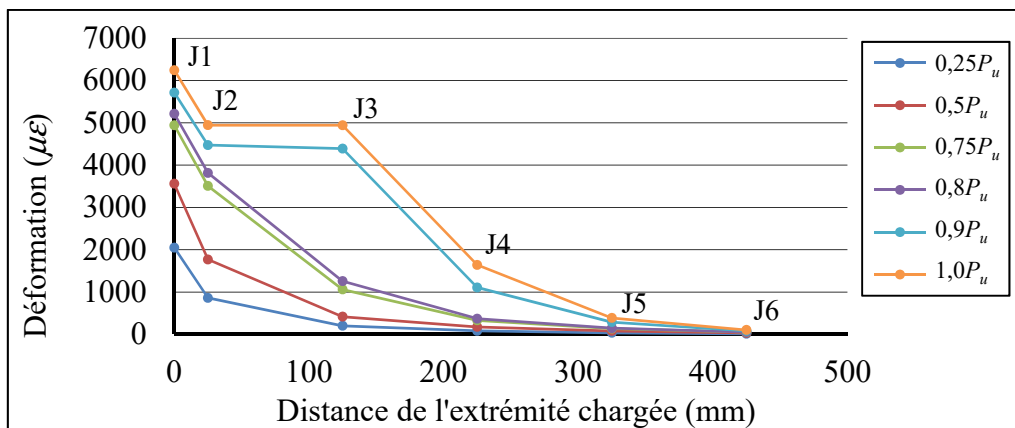


Figure 6.29 Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1S25-02

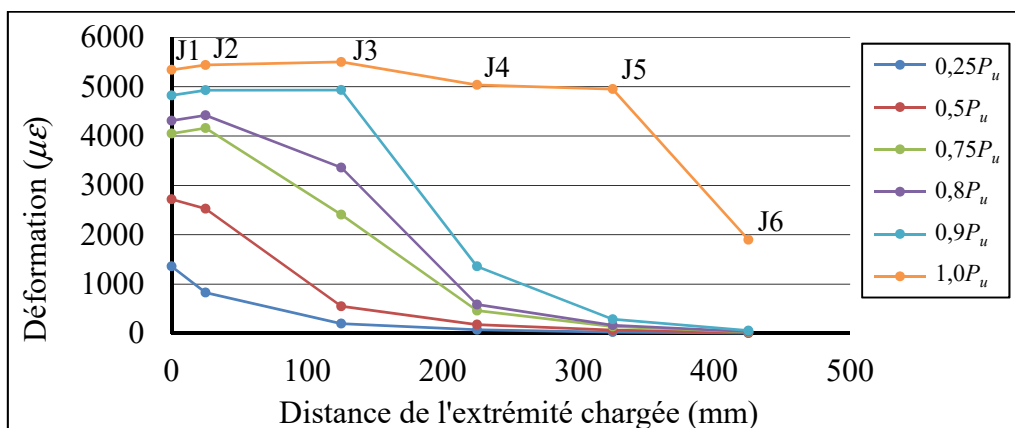


Figure 6.30 Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1L17-01

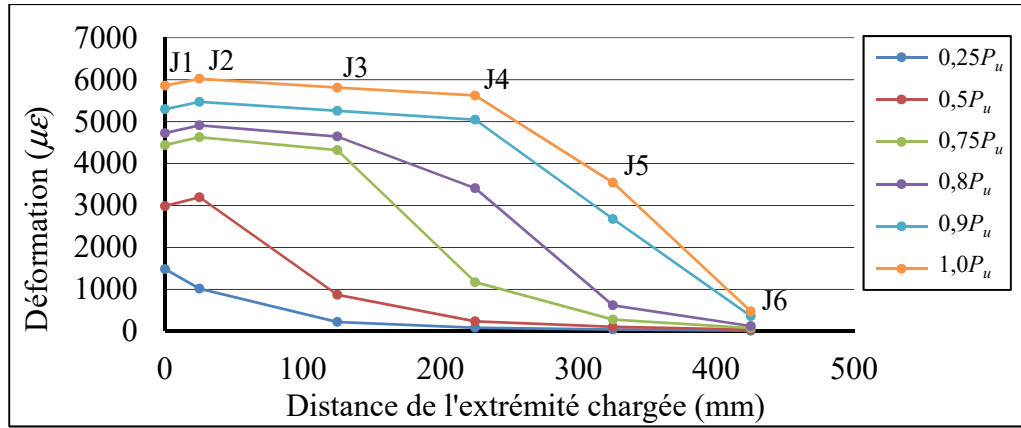


Figure 6.31 Relation entre les déformations du PRF et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1L17-02

6.3.4 Relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée

La relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée est utilisée pour étudier le comportement du lien d'adhérence entre le PRF et le bois le long de la longueur d'ancrage. Pour ce faire, les mêmes fractions de la force ultime utilisées à la section 6.3.3 sont considérées. Cependant, seuls les spécimens avec une longueur d'ancrage de 500 mm sont évalués. Ainsi, les figures 6.32 à 6.35 ont été tracées pour les spécimens munis de 6 jauges réparties sur la longueur d'ancrage.

La contrainte tangentielle d'adhérence moyenne (ou contrainte de cisaillement interlaminaire) de l'équation (3.3) le long de la longueur d'ancrage, en commençant par l'extrémité chargée devient :

$$\tau_i = \frac{E_F \times t_F \times (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{\Delta l_a} \quad (6.10)$$

Dans l'équation (6.10), ε_i est la déformation de la jauge i et Δl_a est la distance entre deux jauges consécutives; E_F et t_F sont respectivement l'épaisseur et le module d'élasticité du PRF. De façon générale, une augmentation de la contrainte d'adhérence dans la région adjacente signifie que la force y est transférée et que, par conséquent, la zone d'adhérence effective est

décalée le long de la longueur d'ancrage. Autrement, une diminution de la contrainte d'adhérence indique une rupture par décollement ou par délamination dans cette région, à l'emplacement de la jauge.

Par exemple, au niveau de la jauge 2 de la figure 6.32, on remarque une diminution constante dès le départ jusqu'à environ 78% de la force ultime. Cela indique qu'il y a décollement au niveau de la jauge 2 et qu'à partir de 78% de la force ultime, la force est transférée vers la jauge 3, d'où l'allure ascendante des courbes $0,8P_u$ à $1,0P_u$. Ensuite, la contrainte d'adhérence maximale pour $0,8P_u$ est presque atteinte à la jauge 3, indiquant le décollement imminent à cet endroit. La force est ainsi transférée vers la jauge 4 jusqu'à $0,9P_u$, puis vers la jauge 5 jusqu'à $1,0P_u$. Or, la contrainte maximale à $1,0P_u$ est atteinte entre les jauges 4 et 5, marquant la dernière courbe descendante. Cela indique que la rupture finale se produit à ce point. Ainsi, le dernier 225 mm se décolle en quelques secondes seulement. Une contrainte d'adhérence négative indique que la déformation de la jauge au point observé est supérieure à la déformation de la jauge au point précédent. Par conséquent, la contrainte d'adhérence négative de la jauge 2, à $0,8P_u$, signifie que la déformation au niveau de la jauge 2 est supérieure à la déformation de la jauge 1. Cela est attribuable à une distribution non uniforme des déformations sur le PRF.

La figure 6.33 indique sensiblement les mêmes informations que la figure 6.32, excepté que la diminution constante de la contrainte d'adhérence se produit jusqu'à environ 85% de la force ultime, indiquant un décollement au niveau des jauges 2 et 3. De plus, les courbes correspondant à 90% et 100% de la force ultime sont presque superposées, ce qui indique qu'il y a peu de décalage de la zone d'adhérence effective entre celles-ci. Étant donné que les courbes $0,9P_u$ et $1,0P_u$ sont ascendantes entre les jauges 3 et 4, la force est transférée vers la jauge 4. La contrainte d'adhérence maximale d'environ 5,0 MPa est atteinte à la jauge 4, marquant la dernière courbe descendante. Cela indique que la rupture finale se produit à ce point et que le dernier 275 mm se décolle en quelques secondes seulement.

Les figures 6.34 et 6.35 font référence aux spécimens renforcés à l'aide d'une lamelle. Contrairement aux spécimens renforcés à l'aide de tissu (voir les figures 6.32 et 6.33), les courbes sont plus dispersées. En effet, seule la force appliquée à 25% possède la caractéristique d'une diminution constante de la contrainte d'adhérence, indiquant une répartition constante le long de la longueur d'ancrage. Les contraintes d'adhérence maximales atteintes par ces deux spécimens sont relativement près de celles obtenues pour le tissu, soit de 7,1 MPa et de 6,2 MPa, respectivement. La figure 6.35 montre clairement le décalage de la zone d'adhérence effective en fonction de l'augmentation de la force appliquée. Par conséquent, plus la force augmente, plus la zone d'adhérence effective se déplace vers l'extrémité non chargée. Or, la contrainte maximale à $1,0P_u$ est atteinte juste avant la jauge 6, marquant la dernière courbe descendante. Cela indique que la rupture finale se produit à ce point. Ainsi, le dernier 80 mm se décolle en quelques secondes seulement.

La figure 6.34 possède les mêmes caractéristiques, excepté que la contrainte maximale pour les forces appliquées de 80% et 90% est atteinte à la même distance, soit à 225 mm. Cela est attribuable au fait que la zone d'adhérence effective est demeurée à cet endroit même avec l'augmentation de la force appliquée. Or, la contrainte maximale à $1,0P_u$ est atteinte juste après de la jauge 6, marquant la dernière courbe descendante. Cela indique que la rupture finale se produit à ce point. Ainsi, le dernier 50 mm se décolle en quelques secondes seulement.

De plus, on remarque que les contraintes d'adhérence des spécimens renforcés à l'aide d'une lamelle sont plus élevées que ceux renforcés à l'aide d'un tissu. Comparativement à la contrainte d'adhérence maximale moyenne atteinte, il y a une différence d'environ 30% entre les deux renforcements. Généralement, lors de la comparaison d'un même type de renforcement, la contrainte d'adhérence diminue avec l'augmentation du ratio de largeur PRF-bois (T. Xu et al., 2015; Ye & Yao, 2008). En ayant une largeur de lamelle ou de tissu plus grande, la force appliquée est répartie sur une plus grande surface et, par conséquent, la force d'adhérence interfaciale augmente.

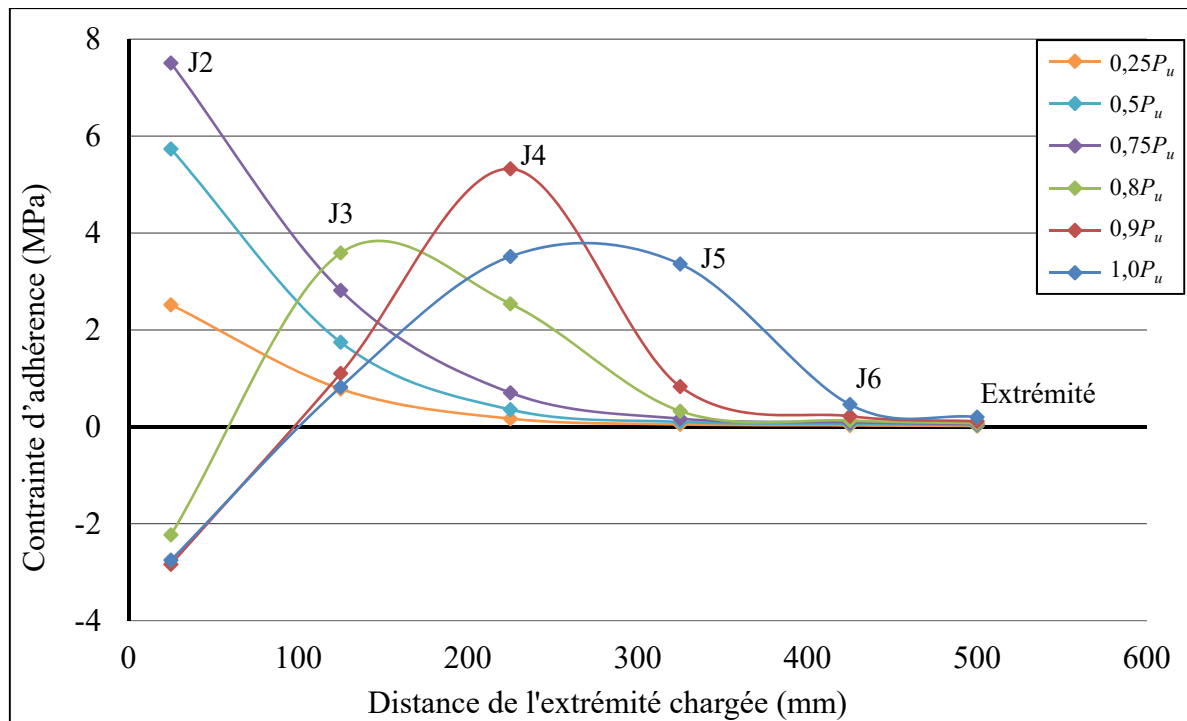


Figure 6.32 Relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1S25-01

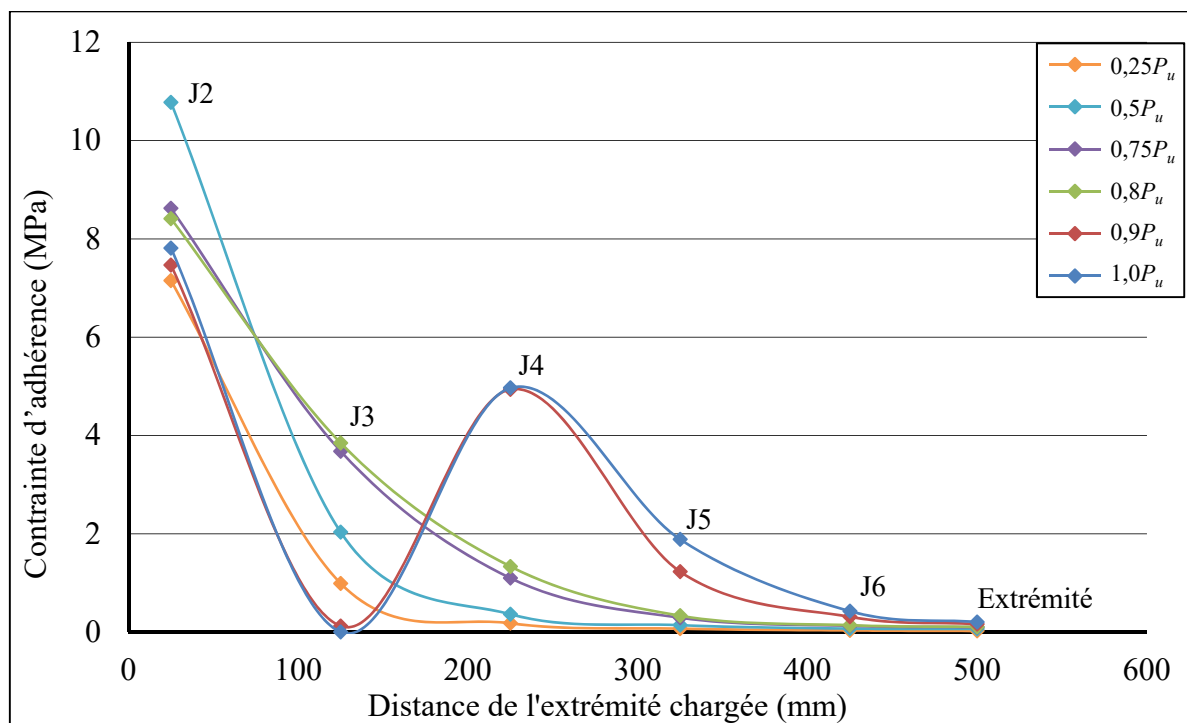


Figure 6.33 Relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1S25-02

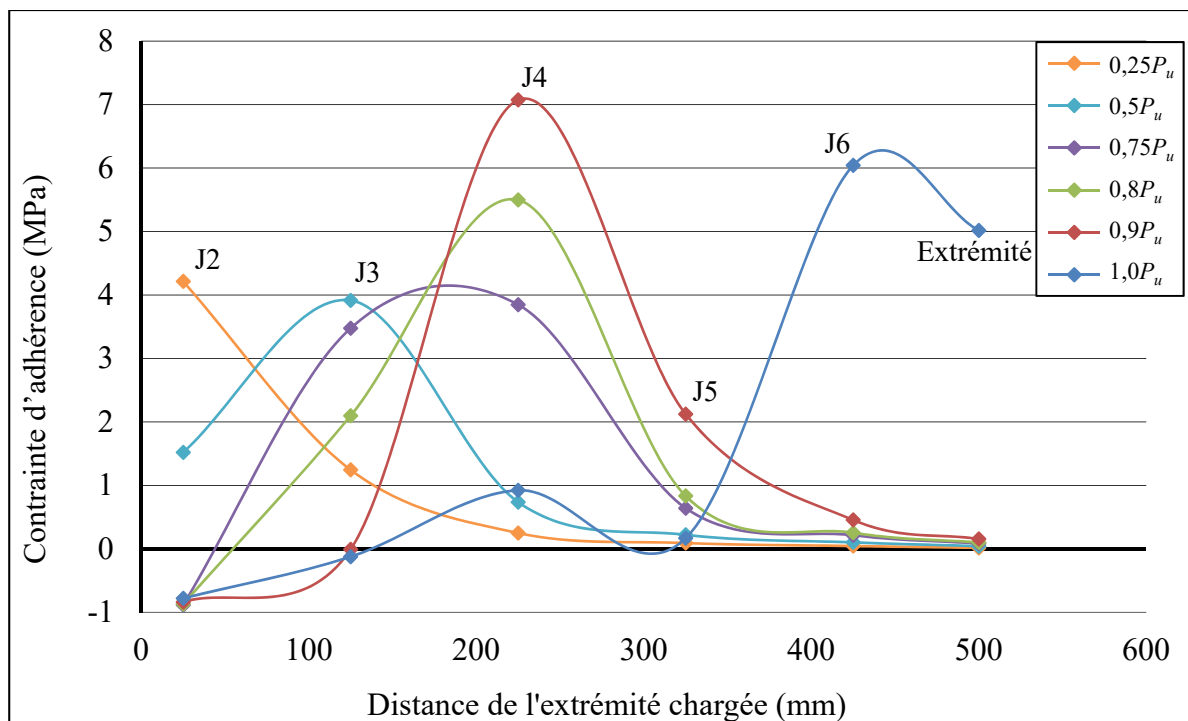


Figure 6.34 Relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1L17-01

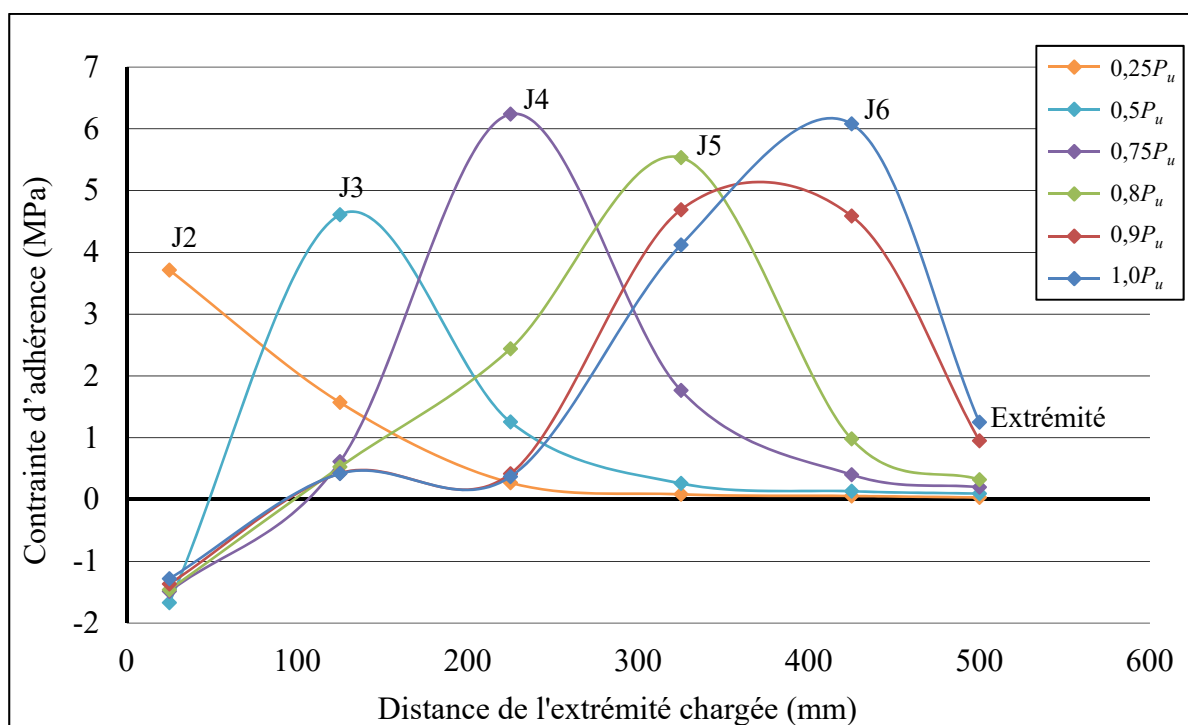


Figure 6.35 Relation entre la contrainte d'adhérence et la distance d'extrémité chargée du spécimen AL500-1L17-02

La comparaison d'un même type de renforcement ayant des largeurs différentes n'a pas été effectuée dans la présente étude. Étant donné que l'époxy utilisée pour la lamelle ou pour le tissu est différente et que les propriétés mécaniques de ces PRF sont également différentes, les conclusions citées précédemment ne s'appliquent pas. Dans le cas présent, le tissu d'une largeur de 25 mm atteint une contrainte d'adhérence inférieure à la lamelle d'une largeur de 17 mm.

6.3.5 Relation entre la contrainte d'adhérence et le glissement

Tout comme la relation précédente, la relation entre la contrainte tangentielle d'adhérence et le glissement est utilisée pour étudier le comportement du lien d'adhérence entre le PRF et le bois le long de la longueur d'ancrage. Cette relation permet également de déterminer l'emplacement le long de la longueur d'ancrage possédant la concentration de contrainte tangentielle d'adhérence la plus élevée.

Afin d'être cohérent avec les sections précédentes et de clarifier les valeurs utilisées, l'emplacement des jauges demeure au même endroit qu'à la figure 6.23. Cependant, les valeurs sont déterminées en commençant par l'extrémité non chargée jusqu'à l'extrémité chargée. La figure 6.36, montre un exemple d'emplacement des jauges à partir de l'extrémité non chargée du PRF pour une longueur d'ancrage de 500 mm. De plus, la jauge 1 est située au centre de la partie non ancrée, entre les deux blocs A et B des spécimens. Ainsi, pour l'analyse, son emplacement sera rapporté au point initial de la zone ancrée, à $x = L_b$.

En considérant que les déformations du bois sont très petites comparativement à celles du PRF et donc relativement négligeables, les équations (3.3) et (3.4), entre deux points (i) et ($i+1$), peuvent s'écrire :

$$\tau_i = \frac{E_F \times t_F \times (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1})}{\Delta l_a} \quad (6.11)$$

$$s_i = s_{i+1} + \left(\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{2} \times \Delta l_a \right) + (\varepsilon_{i+1} \times \Delta l_a) \quad (6.12)$$

Où $\Delta l_a = x_i - x_{i+1}$

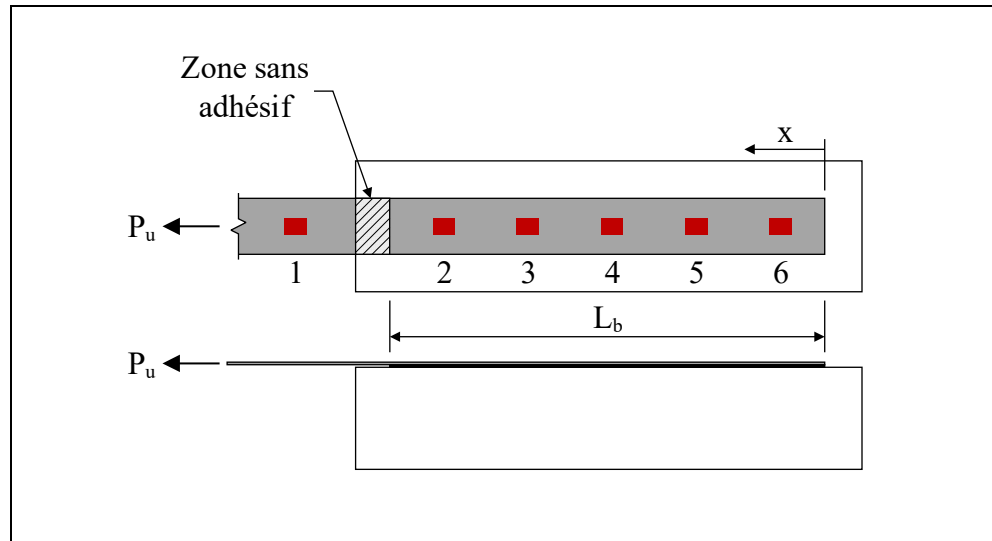


Figure 6.36 Exemple d'emplacement des jauges à partir de l'extrémité non chargée du PRF

Ainsi, à l'aide des équations (6.11) et (6.12), il est possible de calculer la contrainte tangentielle d'adhérence et le glissement local pour chaque jauge. L'utilisation de l'équation (6.11) requière d'abord la calibration du module d'élasticité du PRF, E_F . Celui-ci peut être déterminé à l'aide de l'équation (3.5) qui devient :

$$E_F = \frac{P_u}{\varepsilon_i A_F} \quad (6.13)$$

Dans l'équation (6.13), la valeur de P_u est prise égale à 30% de la force maximale appliquée par le vérin afin de s'assurer d'être dans la zone élastique des éléments de bois renforcés. La déformation du PRF, ε_i , déterminée à l'aide de la jauge 1 (zone non ancrée), est la déformation causée par la force P_u déterminée précédemment. L'aire du PRF, A_F , est égale à la largeur

multipliée par l'épaisseur du PRF. Par exemple, pour un tissu de 36 mm de largeur et de 1,3 mm d'épaisseur, le module d'élasticité est égal à :

$$E_F = \frac{7,27 \times 10^3}{0,0019 \times (36 \times 1,3)} = 81\,759 \text{ MPa}$$

Selon le tableau 5.1, le module d'élasticité du tissu est égal à 115 700 MPa. Il y a un écart de 42% entre le module calculé et celui proposé dans les fiches techniques du fabricant. En conséquence, la valeur calibrée de 81 759 MPa sera utilisée dans l'équation (6.11) pour ce type de renforcement.

Les calculs suivants prennent pour hypothèse que la contrainte et le glissement sont nuls à $x = 0$ mm. Par conséquent, pour une longueur d'ancrage de 100 mm, la contrainte tangentielle d'adhérence et le glissement à la jauge 1 sont égaux à :

$$\tau_4 = \frac{E_F \times t_F \times (\varepsilon_4 - \varepsilon_5)}{x_4 - x_5} = \frac{81\,759 \times 1,3 \times (0,0001551 - 0)}{25 - 0} = 0,66 \text{ MPa}$$

$$s_4 = s_5 + \left(\frac{\varepsilon_4 - \varepsilon_5}{2} \times (x_4 - x_5) \right) + (\varepsilon_5 \times (x_4 - x_5))$$

$$s_4 = 0 + \left(\frac{0,0001551 - 0}{2} \times (25 - 0) \right) + (0 \times (25 - 0)) = 0,002 \text{ mm}$$

Où ε_5 et x_5 correspondent à l'extrémité non chargée à $x = 0$ mm.

En poursuivant la même démarche pour les jauges 3, 2 et 1, on obtient la courbe adhérence-glissement (ou contrainte tangentielle d'adhérence-glissement) de la figure 6.37. Ces calculs ont été effectués pour tous les spécimens comportant une jauge et plus. Ainsi, les courbes adhérence-glissement sont présentées aux figures 6.37 à 6.44. Pour les longueurs d'ancrage les

plus courtes (100 mm et 150 mm), quatre jauges sont utilisées, tandis que pour la longueur d'ancrage de 500 mm, six jauges sont utilisées (voir le tableau 6.6 et la figure 6.23). La jauge 1 est positionnée à l'extrémité chargée du PRF et la jauge 4 ou 6, est positionnée à l'extrémité non chargée. Les jauges intermédiaires sont positionnées entre celles-ci à un intervalle régulier (voir le tableau-A I-1, Annexe I). Il est important de noter que les déformations des jauges augmentent en fonction de la force appliquée par le vérin et que par conséquent, la contrainte tangentielle d'adhérence et le glissement augmentent également.

On remarque que la majorité des spécimens étudiés se comportent selon les prédictions de la littérature présentées à la section 3.2.1. Il est possible d'observer les mêmes étapes, soit : (a) croissance linéaire, (b) relâchement linéaire, (c) constant et (d) décollement (rupture). Pour les longueurs d'ancrage de 100 mm et 150 mm (voir les figures 6.37 à 6.40), la jauge 1 correspond à la contrainte d'adhérence maximale, ce qui indique que l'emplacement subissant la plus forte concentration de contrainte se situe à l'extrémité chargée. De plus, ces courbes ne possèdent aucun plateau constant (étape (c)), ce qui indique que la longueur d'ancrage effective n'est pas atteinte.

Pour les spécimens renforcés d'une lamelle sur une longueur d'ancrage de 500 mm (voir les figures 6.43 et 6.44), la contrainte d'adhérence maximale est atteinte près de la jauge 4, qui se trouve au centre de la longueur d'ancrage totale, soit à 250 mm. Ces courbes montrent un comportement plus cohérent que celles des spécimens renforcés d'un tissu (voir les figures 6.41 et 6.42). En effet, la lamelle se comporte plus tri-linéairement que le tissu. On remarque également que la contrainte d'adhérence maximale tend à diminuer avec l'augmentation de la longueur d'ancrage. En moyenne, cette contrainte est égale à 7 MPa pour une longueur d'ancrage de 500 mm, comparativement à 12 MPa pour les longueurs d'ancrage de 100 mm et 150 mm.

Selon les figures 6.43 et 6.44, la contrainte d'adhérence maximale est atteinte à la même valeur de glissement de 0,307 mm. Pour les autres figures, les contraintes d'adhérence maximales

comportant la même longueur d'ancrage sont atteintes avec un écart de glissement d'environ 17%.

Les mêmes conclusions comparatives de la section précédente s'appliquent pour la relation adhérence-glissement. Cependant, dans ce cas-ci, on remarque que la longueur d'ancrage de 500 mm permet une meilleure compréhension du comportement adhérence-glissement que les longueurs de 100 mm et 150 mm.

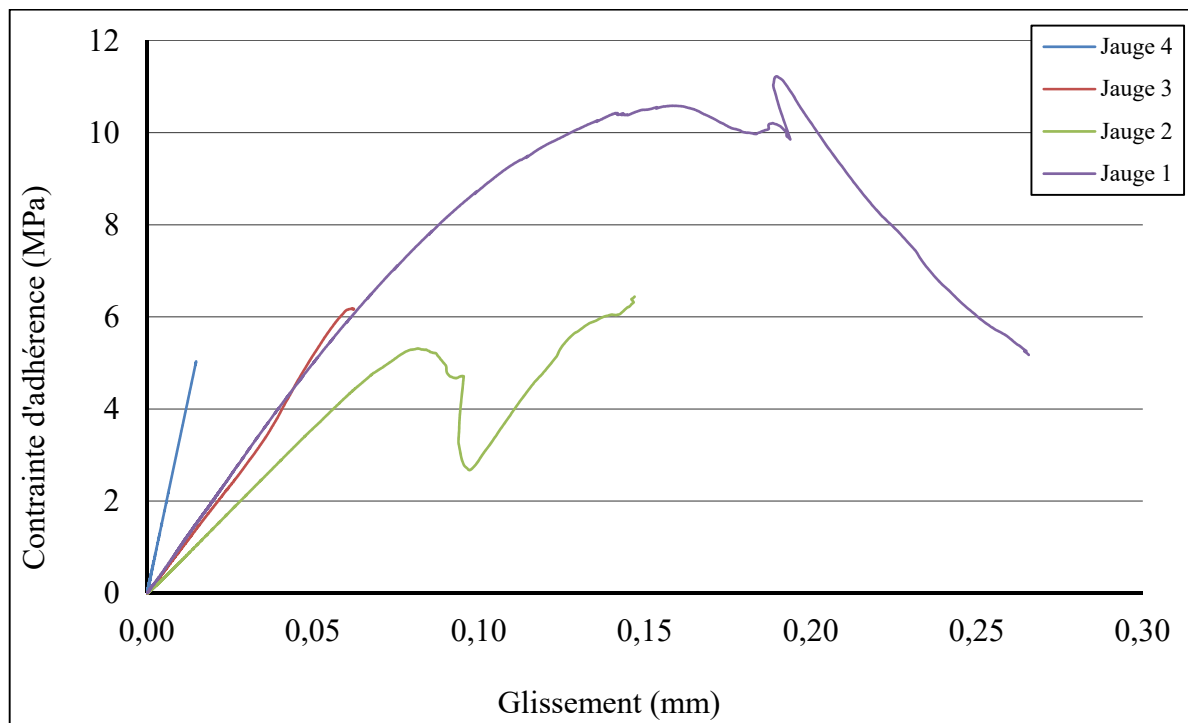


Figure 6.37 Adhérence-glissement du spécimen AL100-1S36-01

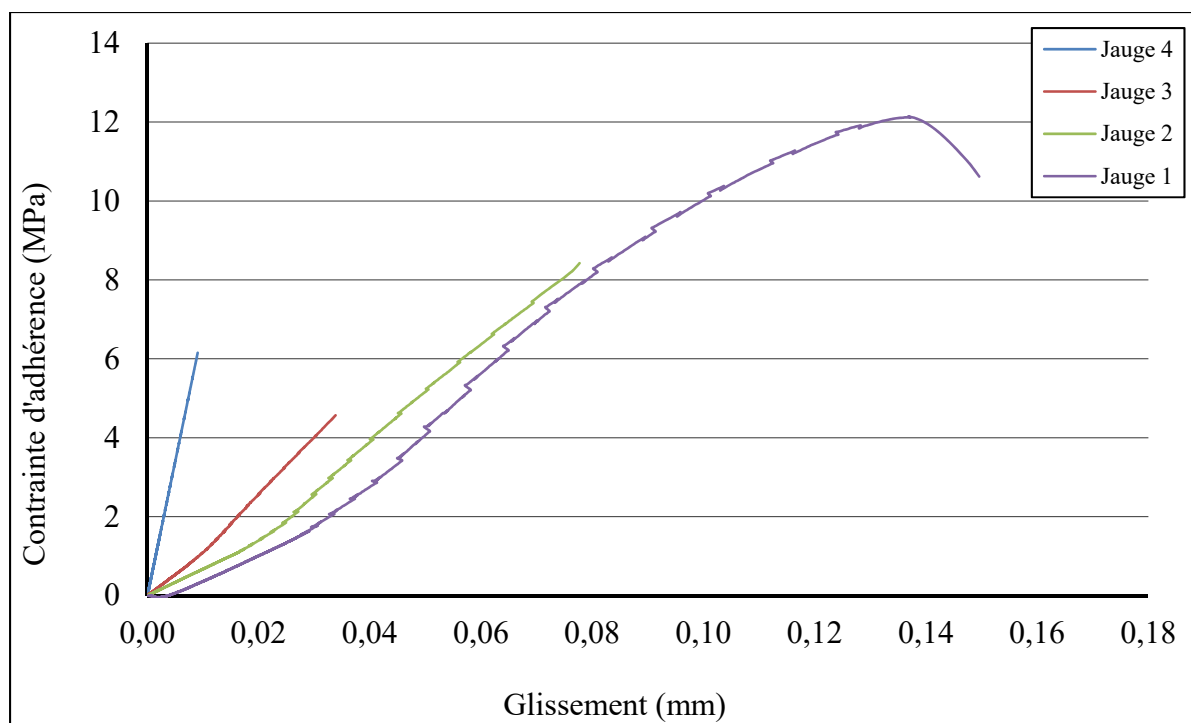


Figure 6.38 Adhérence-glissement du spécimen AL100-1L25-01

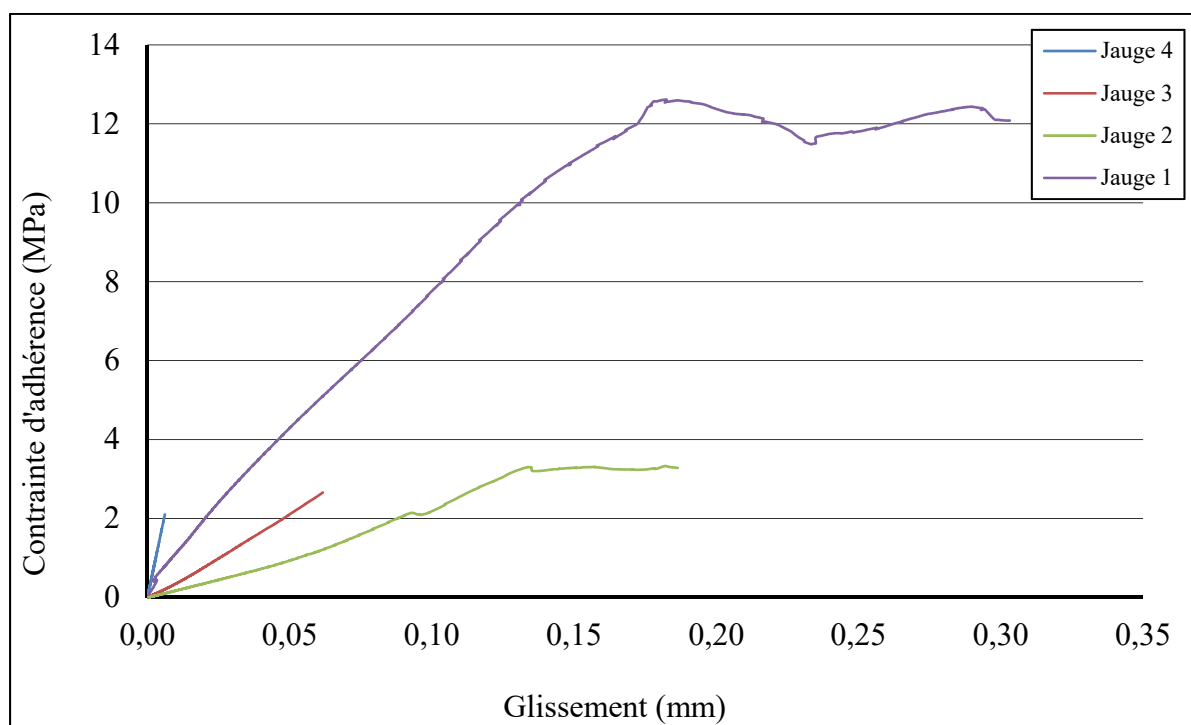


Figure 6.39 Adhérence-glissement du spécimen AL150-1S36-01

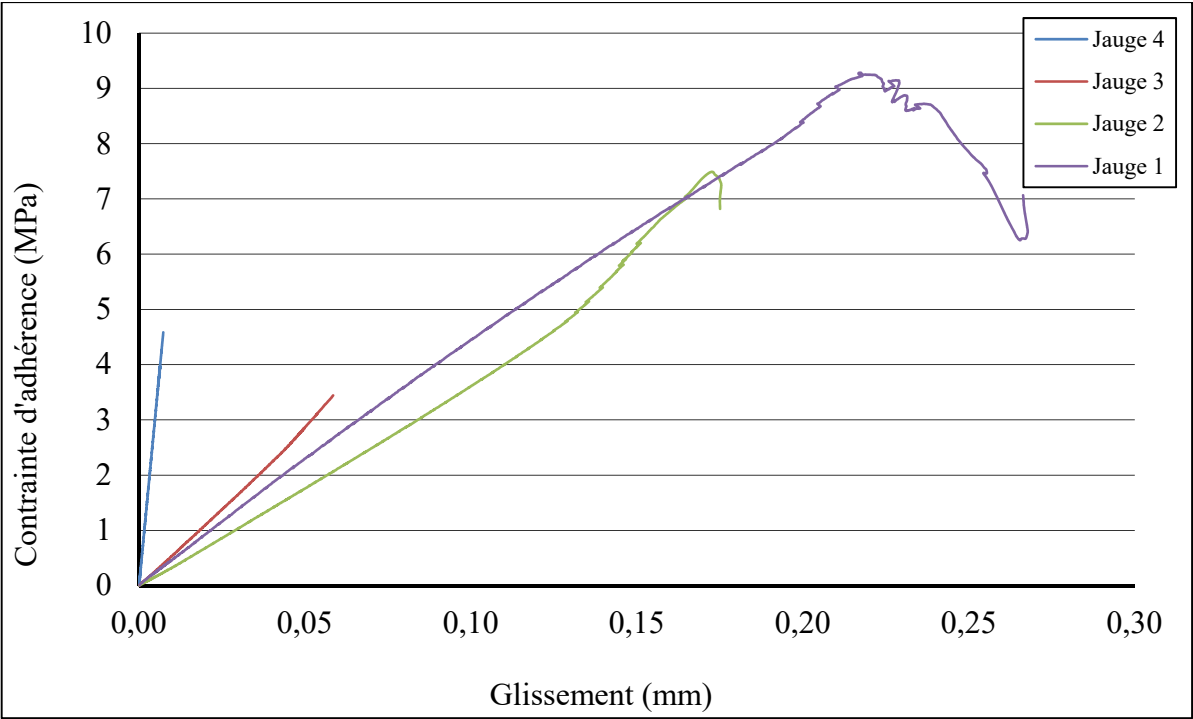


Figure 6.40 Adhérence-glissement du spécimen AL150-1L25-01

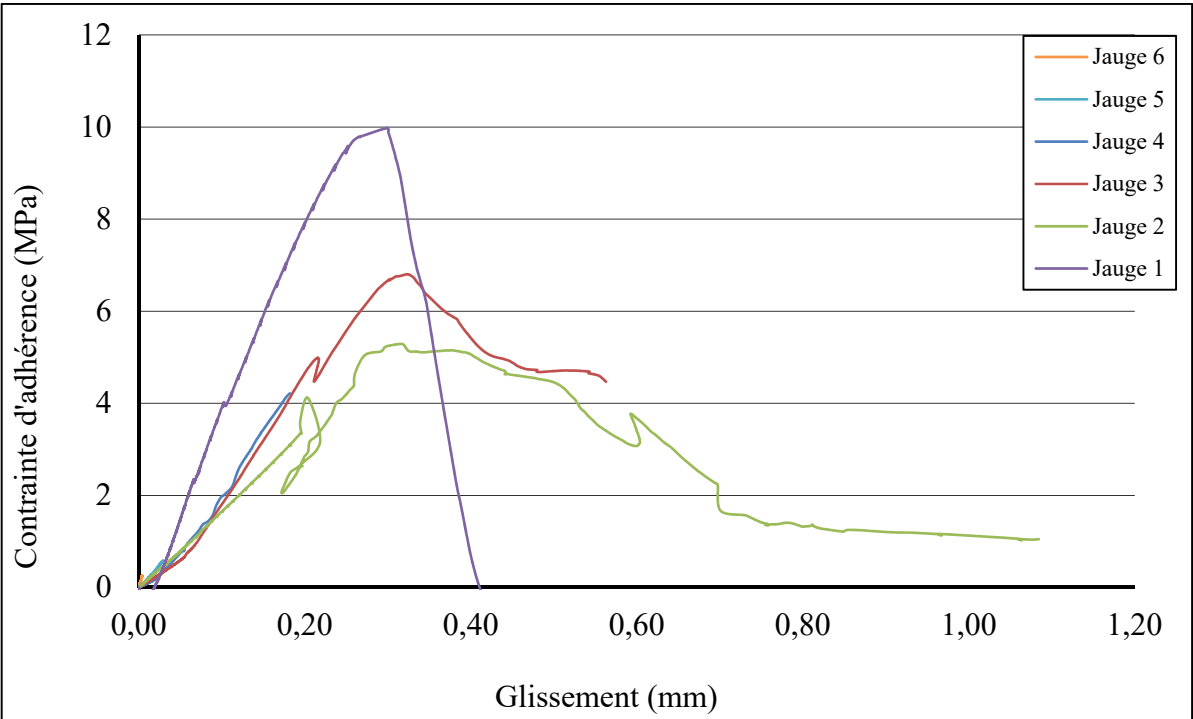


Figure 6.41 Adhérence-glissement du spécimen AL500-1S25-01

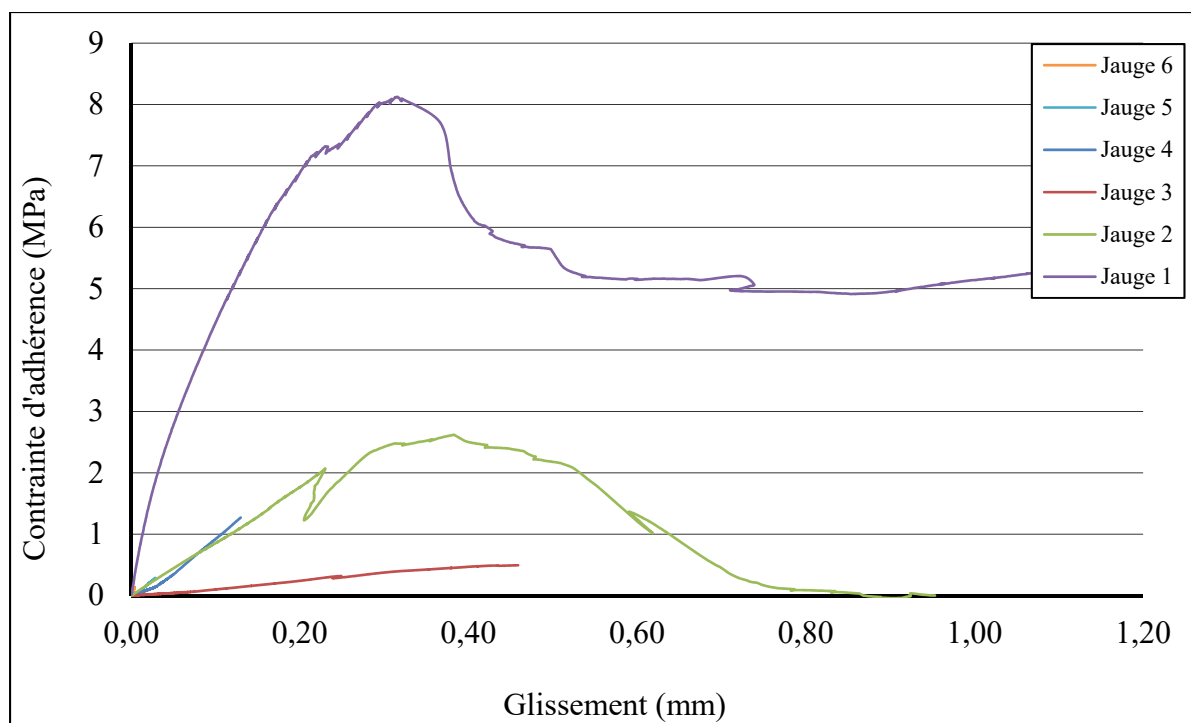


Figure 6.42 Adhérence-glissement du spécimen AL500-1S25-02

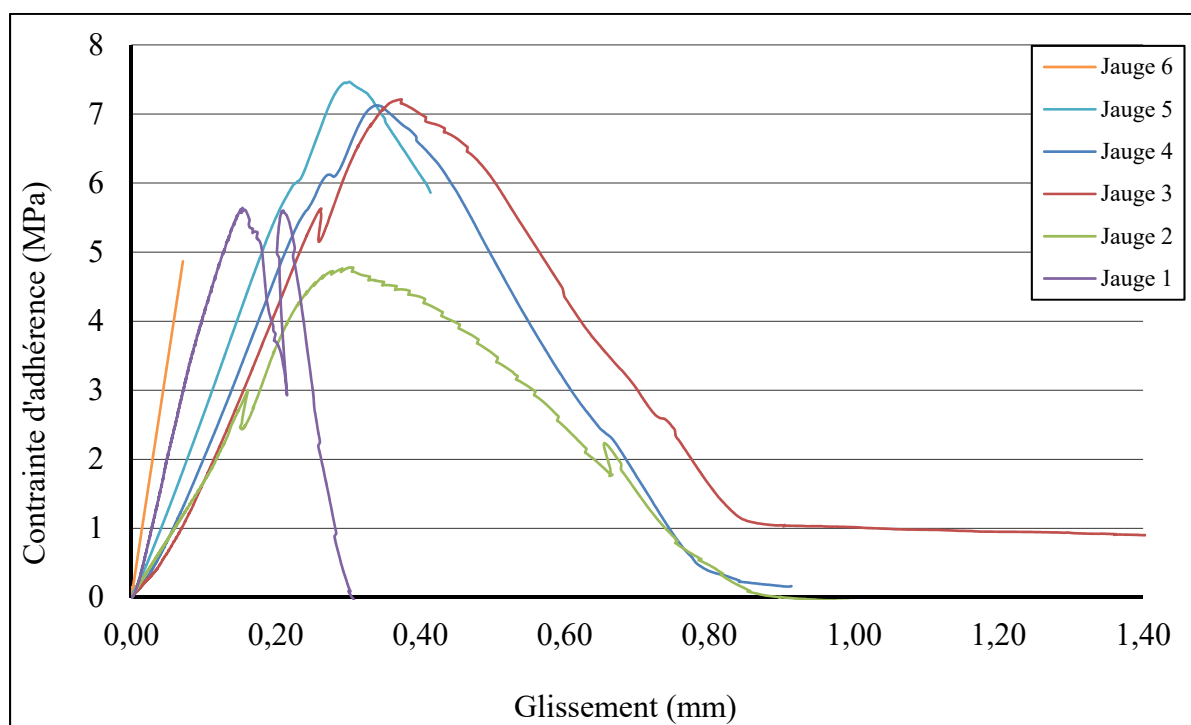


Figure 6.43 Adhérence-glissement du spécimen AL500-1L17-01

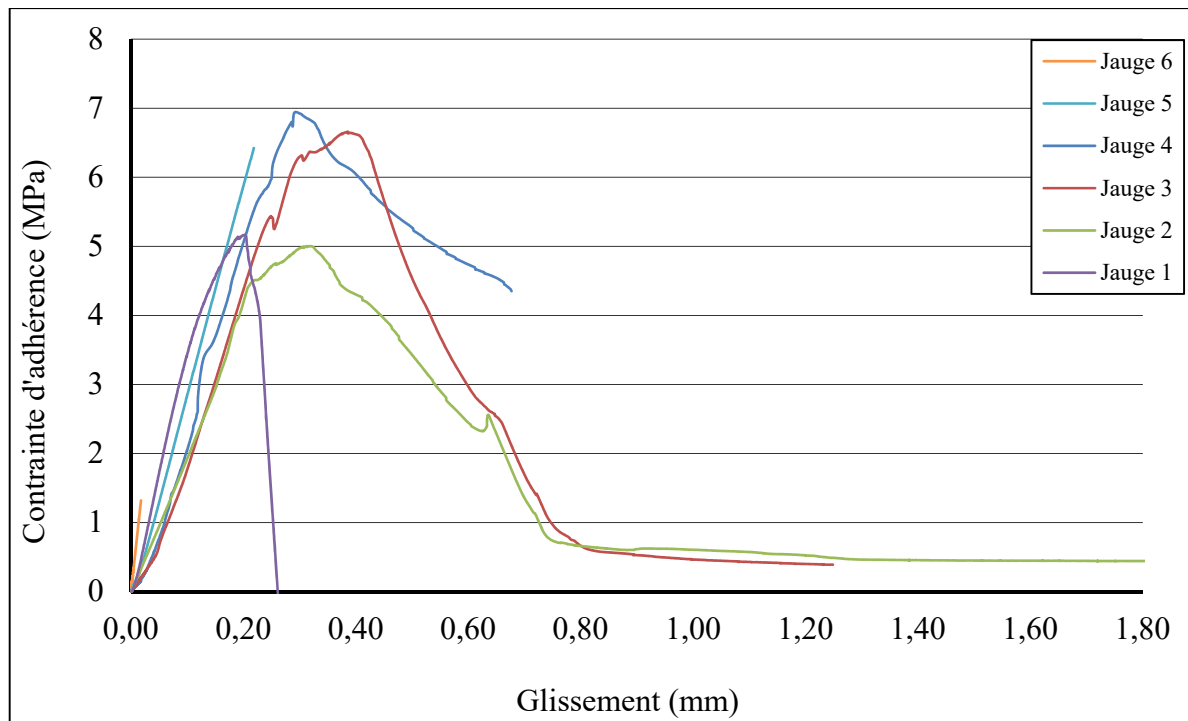


Figure 6.44 Adhérence-glissement du spécimen AL500-1L17-02

6.3.6 Discussions

Il est possible de conclure que le principe de la longueur d'ancrage effective est confirmé par les essais réalisés lors de ce projet de recherche. On note qu'à partir d'une certaine longueur, les déformations sont minimales et tendent vers une valeur nulle. La rotation causée par la cage d'essai, telle qu'expliquée à la section 6.3.1, est négligeable et, par conséquent, elle n'est pas prise en compte dans l'analyse. Ainsi, les conclusions sont les mêmes avec et sans rotation de la cage.

De plus, le tissu présente de meilleures performances d'adhérence que la lamelle équivalente. En effet, la répartition des contraintes d'adhérence le long de la longueur d'ancrage est plus uniforme et les contraintes maximales atteintes sont inférieures pour le tissu. Les spécimens renforcés à l'aide de tissu permettent d'atteindre des forces ultimes plus élevées que celles relatives aux spécimens renforcés d'une lamelle. Les déformations ultimes sont également plus élevées pour le tissu. Il est important de noter que la différence la plus importante remarquée

entre le tissu et la lamelle est la capacité d'étirement du PRF (fibres + matrice). Du point de vue expérimental, le tissu (fibres) et l'époxy (matrice) forment un élément solidaire. Cela implique que le glissement se produit à la surface du bois seulement. Par conséquent, les efforts de traction sont répartis uniformément sur cet élément. Il en est autrement pour la lamelle puisque le glissement se produit à deux endroits, soit à la surface du bois et à la surface du PRF. De plus, l'époxy à l'état liquide utilisée pour le tissu permet de pénétrer les fibres du bois et d'obtenir un lien d'adhérence plus homogène.

6.4 Comparaison avec les modèles de la littérature

Le tableau 6.7 montre la comparaison entre les longueurs d'ancrage effectives expérimentales et théoriques. On constate que les valeurs expérimentales augmentent en fonction de la longueur d'ancrage. L'étude d'un plus grand nombre de spécimens permettrait d'obtenir une base de données suffisante afin de déterminer les longueurs d'ancrage effectives de façon encore plus précise.

Tableau 6.7 Longueurs d'ancrage effectives expérimentales versus théoriques

Spécimen	Longueur d'ancrage effective (mm)		
	Expérimentale	Théorique selon Vahedian et al. (2017)	Théorique selon Biscaia et al. (2017)
AL100-1S36-01	95	92	124
AL100-1L25-01	100	86	142
AL150-1S36-01	145	92	124
AL150-1L25-01	155	86	142
AL500-1S25-01	225	84	124
AL500-1S25-02	225	84	124
AL500-1L17-01	200	81	142
AL500-1L17-02	200	81	142

CHAPITRE 7

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

7.1 Sommaire de l'étude

L'objectif du présent mémoire est de développer des méthodes de réhabilitation et des modèles de calcul pour les structures en bois renforcées à l'aide de PRF collés en surface ou encastrés près de la surface. Il s'agit spécifiquement d'évaluer le gain en résistance en flexion d'éléments en bois déficients, de déterminer le matériau composite offrant la meilleure capacité de renforcement, d'identifier les configurations optimales et de développer des modèles de calcul.

La réalisation de ces objectifs repose sur une revue exhaustive des propriétés des matériaux et de la littérature. Notamment sur le renforcement en flexion, l'adhérence, la longueur d'ancrage et les modes de rupture. Cette revue a permis d'identifier les besoins en recherche et de situer la présente étude par rapport aux recherches antérieures.

Par la suite, un programme expérimental complet a été conçu afin de produire des résultats expérimentaux servant à confirmer ou à infirmer les conclusions émises dans la littérature. Ce programme a permis de diviser les essais en phases comparables entre elles. En flexion, 17 poutres ont été testées selon la méthode d'essais de flexion en quatre points. Trois (3) configurations différentes, à l'aide de tissu ou de lamelle en PRFC, ont été évaluées. Au total, 12 spécimens ont été testés en arrachement selon différentes longueurs d'ancrage. Les aspects théoriques concernant les calculs de résistance en flexion, en cisaillement et à l'arrachement servent de base à l'analyse des résultats et aux discussions des sujets étudiés.

7.2 Conclusion

Les principaux éléments étudiés dans cette recherche sont le gain en résistance, le mode de rupture, le comportement Force-Déplacement et le comportement contraintes-déformations. La comparaison entre les trois (3) différentes configurations a démontré une augmentation de

la capacité ultime de toutes les poutres testées, en termes de moment nominal (12% à 46%), de contrainte de flexion (9% à 43%) et de module d'élasticité (28% à 117%). Le mode de rupture le plus fréquent est la rupture par fendage du bois suivie par l'écrasement du bois sous les points de chargement. Globalement, les poutres ont montré un comportement élasto-plastique avant la rupture et une répartition uniforme des déformations le long de la poutre.

La comparaison des différentes largeurs de PRF dans une même configuration permet de conclure que pour une lamelle collée en surface, une largeur de 50 mm est optimale, tandis que pour un tissu collé en surface, une largeur correspondante à celle de la poutre est préférable. Le gain est optimisé par une lamelle de 25 mm de largeur, lorsqu'encastée près de la surface. Les résultats des essais de flexion montrent que le renforcement à l'aide de lamelles encastées offre la configuration la plus optimale, en plus d'offrir la meilleure apparence esthétique.

En ce qui concerne les essais d'arrachement, le paramètre le plus important, permettant de déterminer la longueur d'ancrage effective, est l'adhérence. Le mode de rupture le plus fréquent est la rupture des fibres du bois. La comparaison entre le tissu et la lamelle, toutes largeurs confondues, permet de conclure que le tissu offre une meilleure résistance à l'ancrage, soit en moyenne 25% plus élevée que la lamelle. Les résultats permettent de confirmer le principe de la longueur d'ancrage effective, mais pas d'en déterminer la valeur avec certitude.

En conclusion, l'utilisation de lamelles offre de meilleurs résultats pour la flexion, alors que pour l'arrachement, l'utilisation de tissus est plus adéquate. De plus, l'utilisation de tissus permet d'avoir une répartition plus uniforme des contraintes et des déformations.

7.3 Recommandations pour des travaux futurs

Les résultats obtenus dans la présente recherche ont permis de mettre en évidence certains points pouvant faire l'objet de futures recherches. Parmi ceux-ci, on peut citer entre autres :

1. L'étude d'un nombre plus important de spécimens.
2. La procédure expérimentale devrait être revue afin de diminuer les erreurs causées par l'équipement d'essai.
3. L'utilisation d'un même type de renforcement (lamelle ou tissu) selon différentes largeurs devrait être évaluée afin de confirmer le lien entre le ratio de largeur PRF-bois et la diminution de la contrainte d'adhérence.
4. Une étude numérique par éléments finis devrait être effectuée afin de confirmer les résultats expérimentaux obtenus.

Plus spécifiquement, les points suivants devraient faire l'objet de nouveaux projets de recherche ciblés :

1. Étudier la longueur d'ancrage effective des éléments en bois renforcés à l'aide de PRF collés en surface. L'utilisation de spécimens grandeur nature est importante, ainsi que l'équipement utilisé pour les essais.
2. Développer des équations pour le calcul théorique de la longueur d'ancrage effective. Les recherches antérieures sont peu nombreuses et les modèles proposés diffèrent considérablement les uns des autres.

ANNEXE I

PRÉPARATION DES MATÉRIAUX

Tableau-A I-1 Emplacement des jauges de déformation

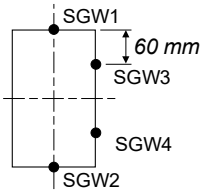
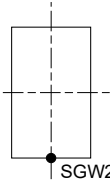
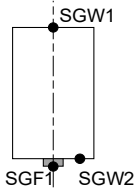
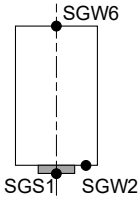
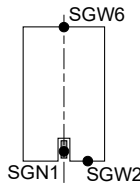
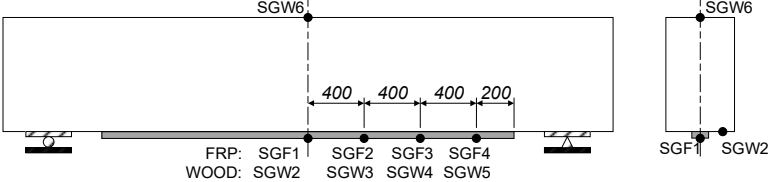
	Spécimen	Emplacement
Série 1	FT-B-UN-01	
	FT-B-UN-02	
	FT-C-EB-1L50-02	
	FT-D-EB-1S72-01	
	FT-E-NSM-1L50-02	
Série 2	FT-C-EB-1L50-01	

Tableau-A I-1 Emplacement des jauges de déformation (suite)

	Spécimen	Emplacement
Série 2	FT-D-EB-1S72-02	FRP: SGS1 SGS2 SGS3 SGS4 WOOD: SGW2 SGW3 SGW4 SGW5
	FT-E-NSM-1L50-01	FRP: SGN1 SGN2 SGN3 SGN4 WOOD: SGW2 SGW3 SGW4 SGW5 Mid-span
Série 3	FT-C-EB-2L50-01	
	FT-D-EB-1S140-01	
	FT-E-NSM-2L50-01	
Série 4	FT-C-EB-2L50-02	FRP: SGF1 SGF2 SGF3 SGF4 WOOD: SGW2 SGW3 SGW4 SGW5
	FT-D-EB-1S140-02	

Tableau-A I-1 Emplacement des jauges de déformation (suite)

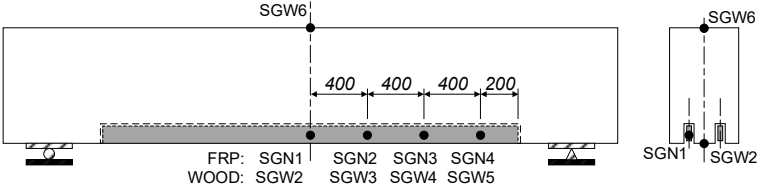
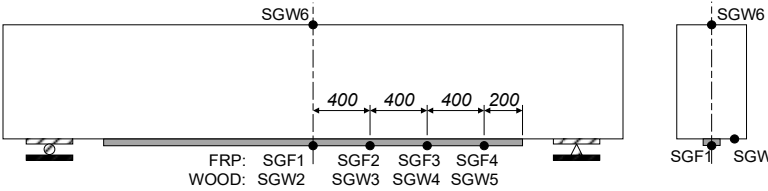
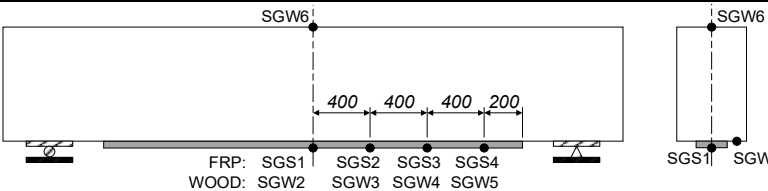
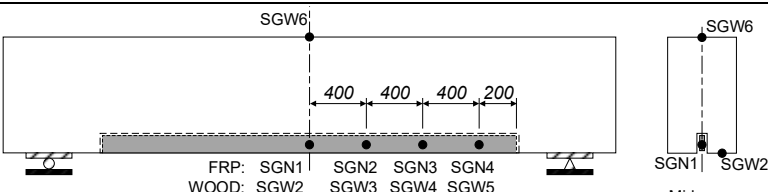
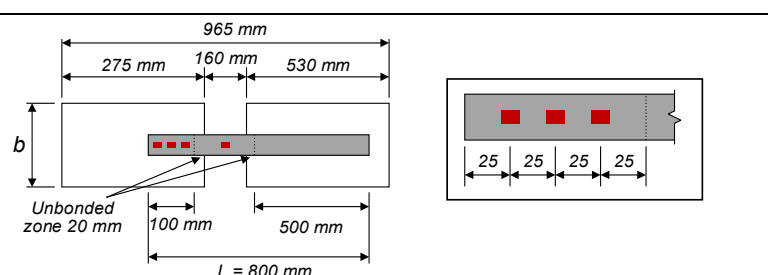
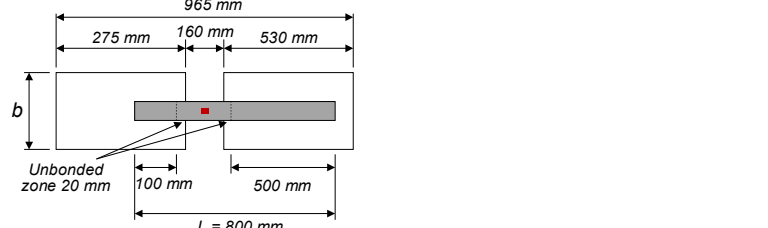
	Spécimen	Emplacement
Série 4	FT-E-NSM-2L50-02	 FRP: SGN1 SGN2 SGN3 SGN4 WOOD: SGW2 SGW3 SGW4 SGW5
	FT-C-EB-1L25-01	 FRP: SGF1 SGF2 SGF3 SGF4 WOOD: SGW2 SGW3 SGW4 SGW5
Série 5	FT-D-EB-1S36-01	 FRP: SGS1 SGS2 SGS3 SGS4 WOOD: SGW2 SGW3 SGW4 SGW5
	FT-E-NSM-1L25-01	 FRP: SGN1 SGN2 SGN3 SGN4 WOOD: SGW2 SGW3 SGW4 SGW5 Mid-span
Série 6	BT-F-AL100-1L25-01	 965 mm 275 mm 160 mm 530 mm b Unbonded zone 20 mm 100 mm 500 mm L = 800 mm
	BT-F-AL100-1L25-02	 965 mm 275 mm 160 mm 530 mm b Unbonded zone 20 mm 100 mm 500 mm L = 800 mm

Tableau-A I-1 Emplacement des jauges de déformation (suite)

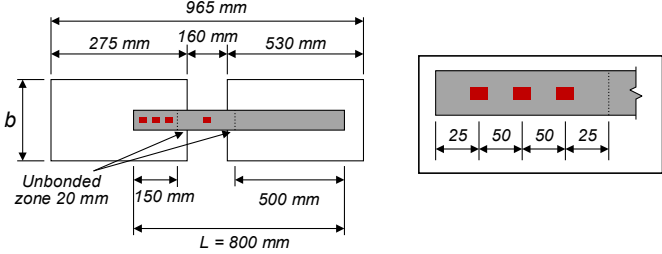
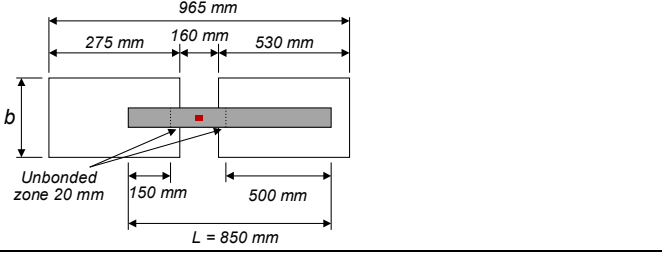
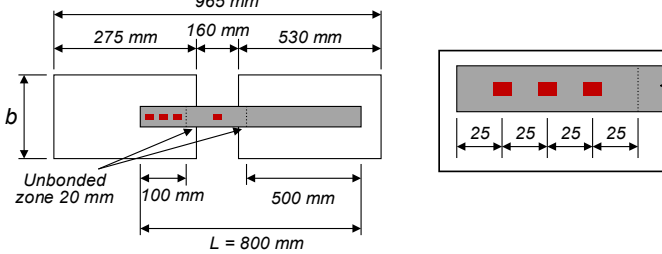
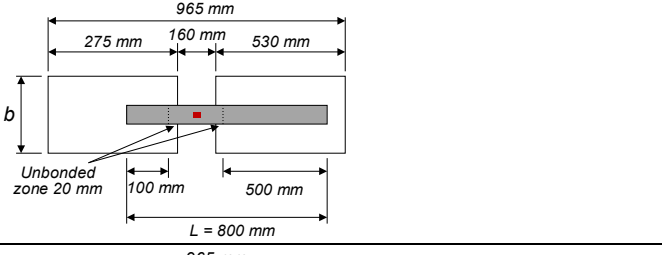
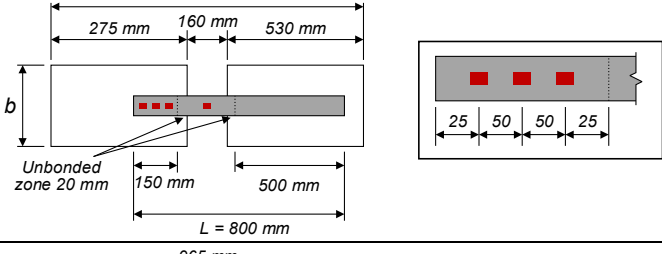
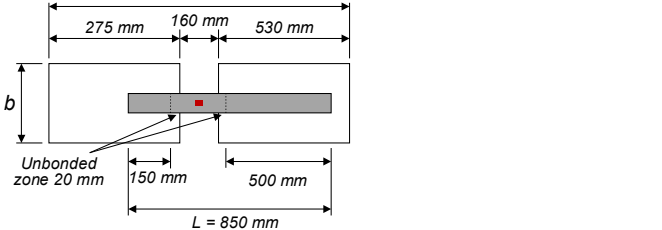
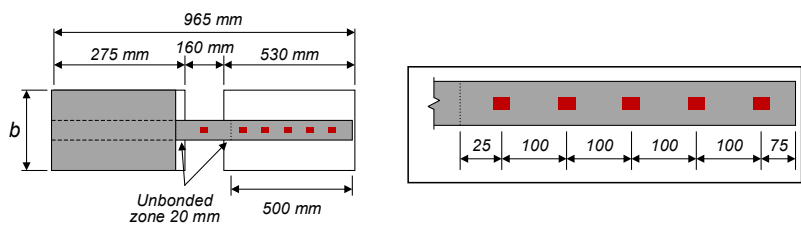
	Spécimen	Emplacement
Série 7	BT-F-AL150-1L25-01	
	BT-F-AL150-1L25-02	
	BT-F-AL100-1S36-01	
	BT-F-AL100-1S36-02	
	BT-F-AL150-1S36-01	
	BT-F-AL150-1S36-02	

Tableau-A I-1 Emplacement des jauges de déformation (suite)

	Spécimen	Emplacement
Série 7	BT-F-AL500-1L17-01	
	BT-F-AL500-1L17-02	
	BT-F-AL500-1S25-01	
	BT-F-AL500-1S25-02	

ANNEXE II

CALCULS THÉORIQUES

A. Calcul d'équivalence lamelle versus tissu (pour une lamelle de 50 mm de largeur)

A.1. Résistance nominale des lamelles Sika® CarboDur® S512

Module d'élasticité (E_F) = 165 GPa

Résistance à la traction (f_{Fu}) = 2,8 GPa

Allongement à la rupture (ϵ_F) = > 1,7 %

Épaisseur d'un pli (t_F) = 1,2 mm

Largeur (b_F) = 50 mm

$$A_F = t_F \times b_F = 1,2 \times 50 = 60 \text{ mm}^2$$

$$T_{n,\max}^{(\epsilon_F)} = A_F \times E_F \times \epsilon_F = 60 \times 165 \times 0,017 = 168,3 \text{ kN}$$

$$T_{n,\max}^{(f_{Fu})} = A_F \times f_{Fu} = 60 \times 2,8 = 168 \text{ kN}$$

A.2. Résistance équivalente du tissu SikaWrap®

SikaWrap® 1400C

Module d'élasticité (E_F) = 115,7 GPa

Résistance à la traction (f_{Fu}) = 1,8 GPa

Allongement à la rupture (ϵ_F) = 1,25 %

Épaisseur d'un pli (t_F) = 1,3 mm

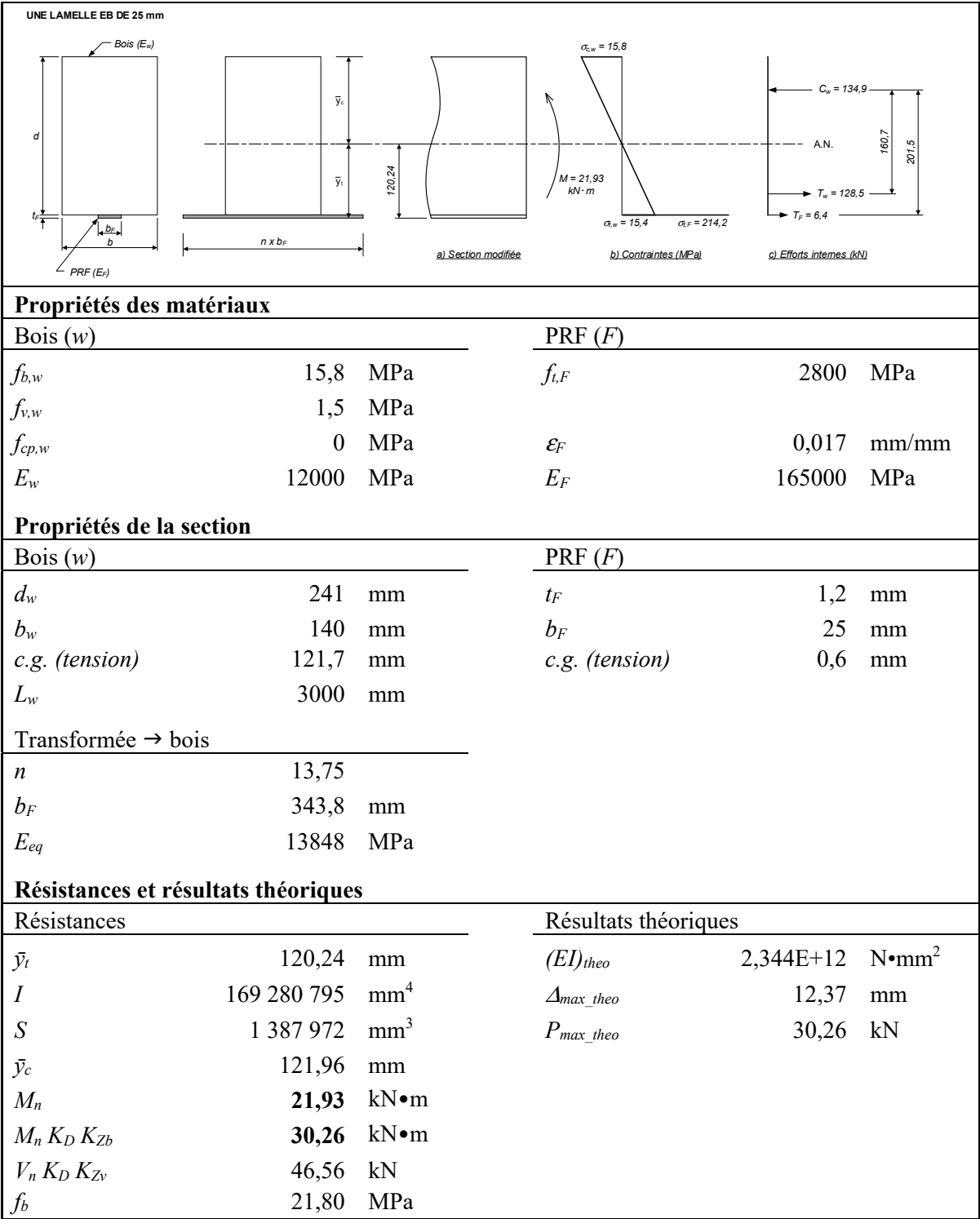
$$b_{F,\text{requis}}^{(\epsilon_F)} = \frac{T_{n,\max}^{(\epsilon_F)}}{t_F \times E_F \times \epsilon_F} = \frac{168,3}{1,3 \times 115,7 \times 0,0125} = 90 \text{ mm}$$

$$b_{F,\text{requis}}^{(f_{Fu})} = \frac{T_{n,\max}^{(f_{Fu})}}{t_F \times f_{Fu}} = \frac{168}{1,3 \times 1,8} = 72 \text{ mm}$$

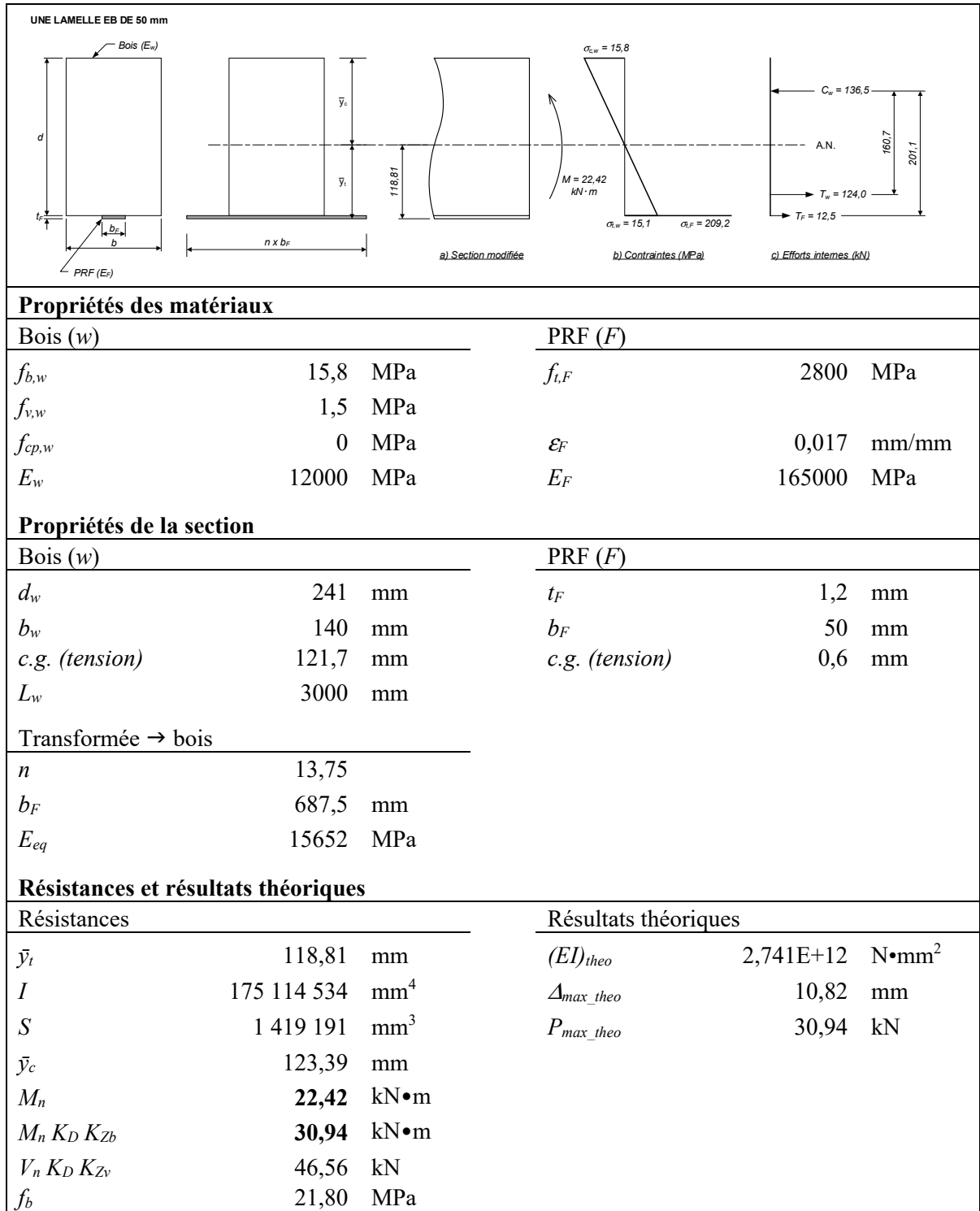
Utiliser la plus petite valeur, soit 72 mm de largeur pour le tissu.

B. Calculs des valeurs théoriques

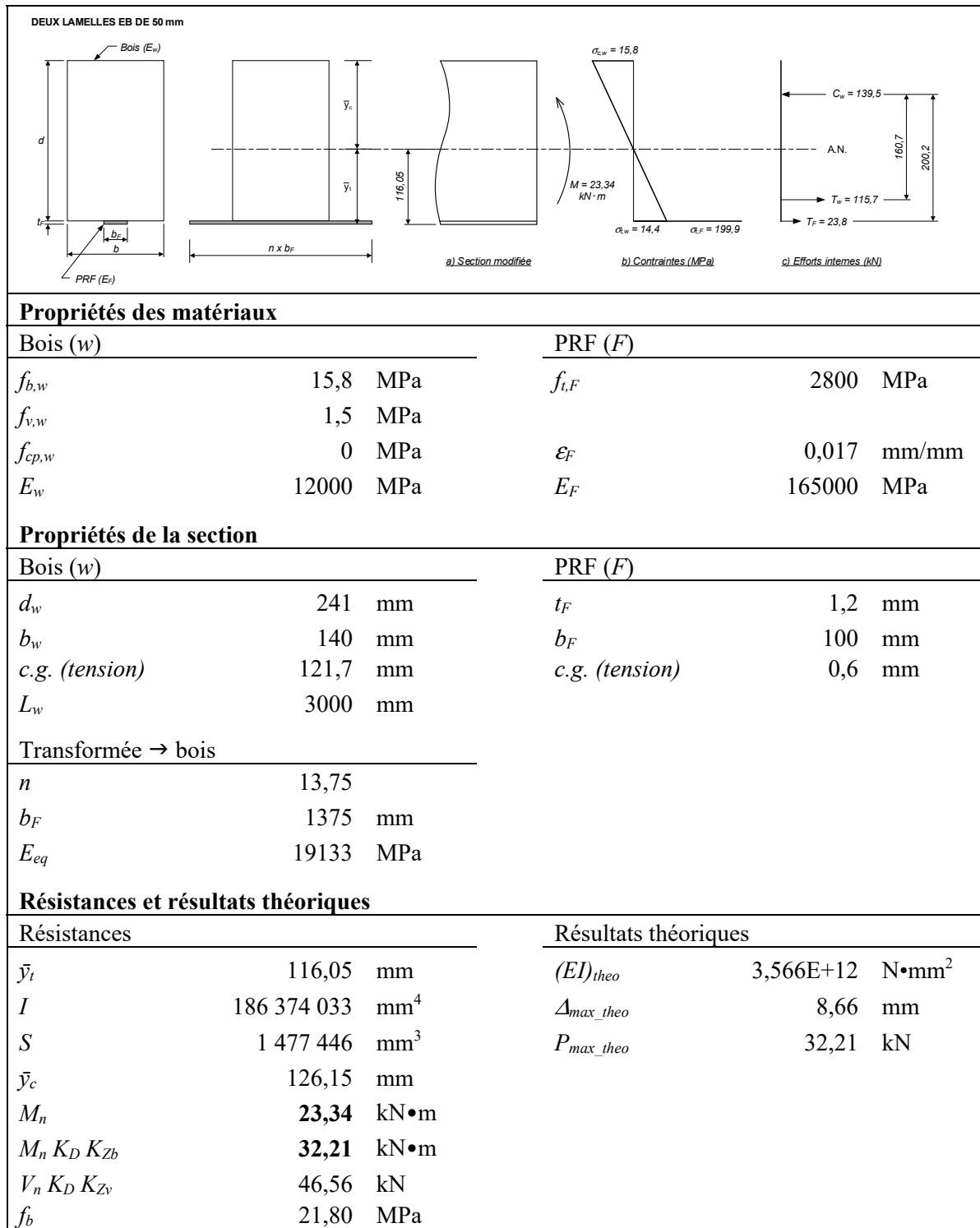
B.1. Une lamelle collée en surface de 25 mm de largeur



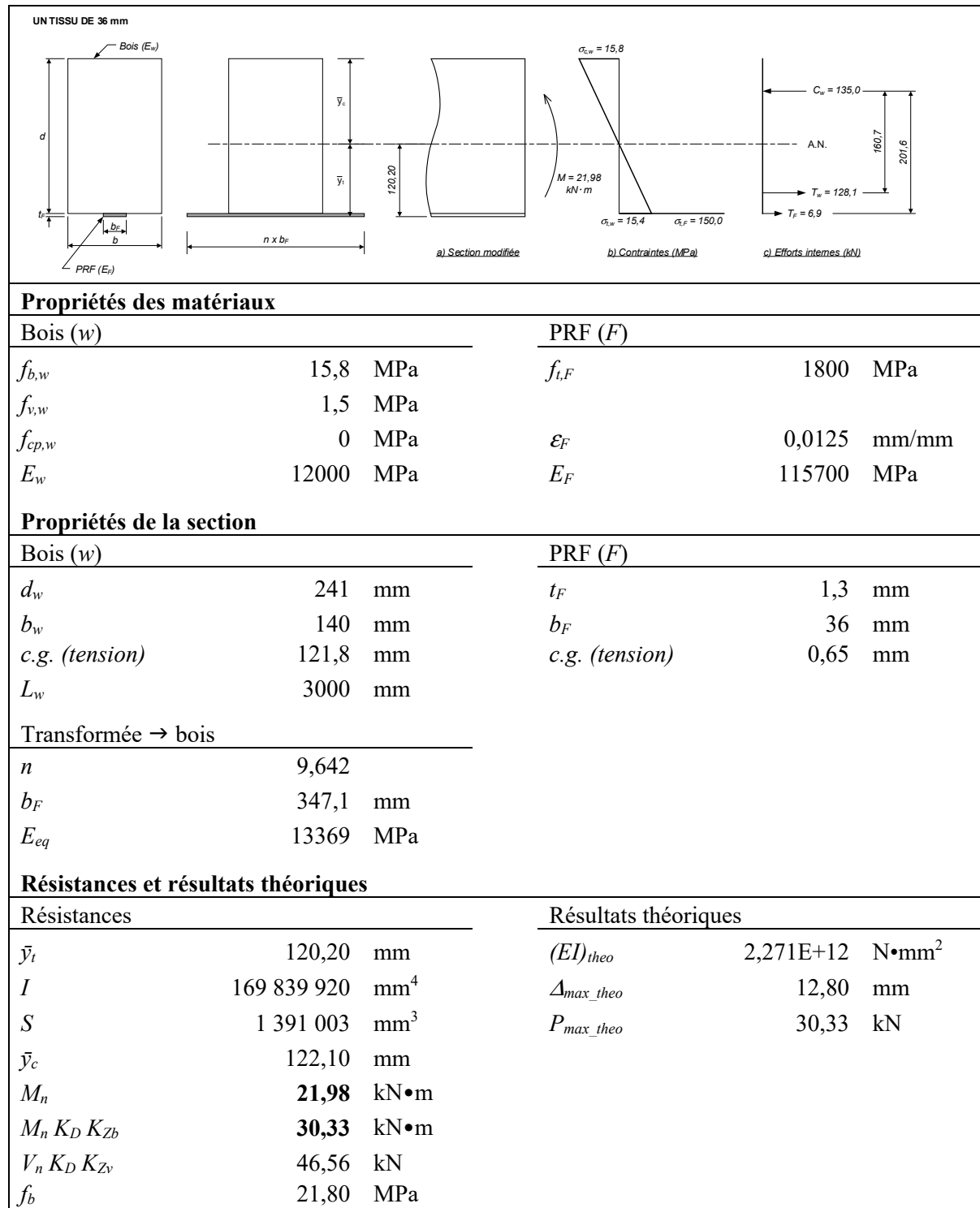
B.2. Une lamelle collée en surface de 50 mm de largeur



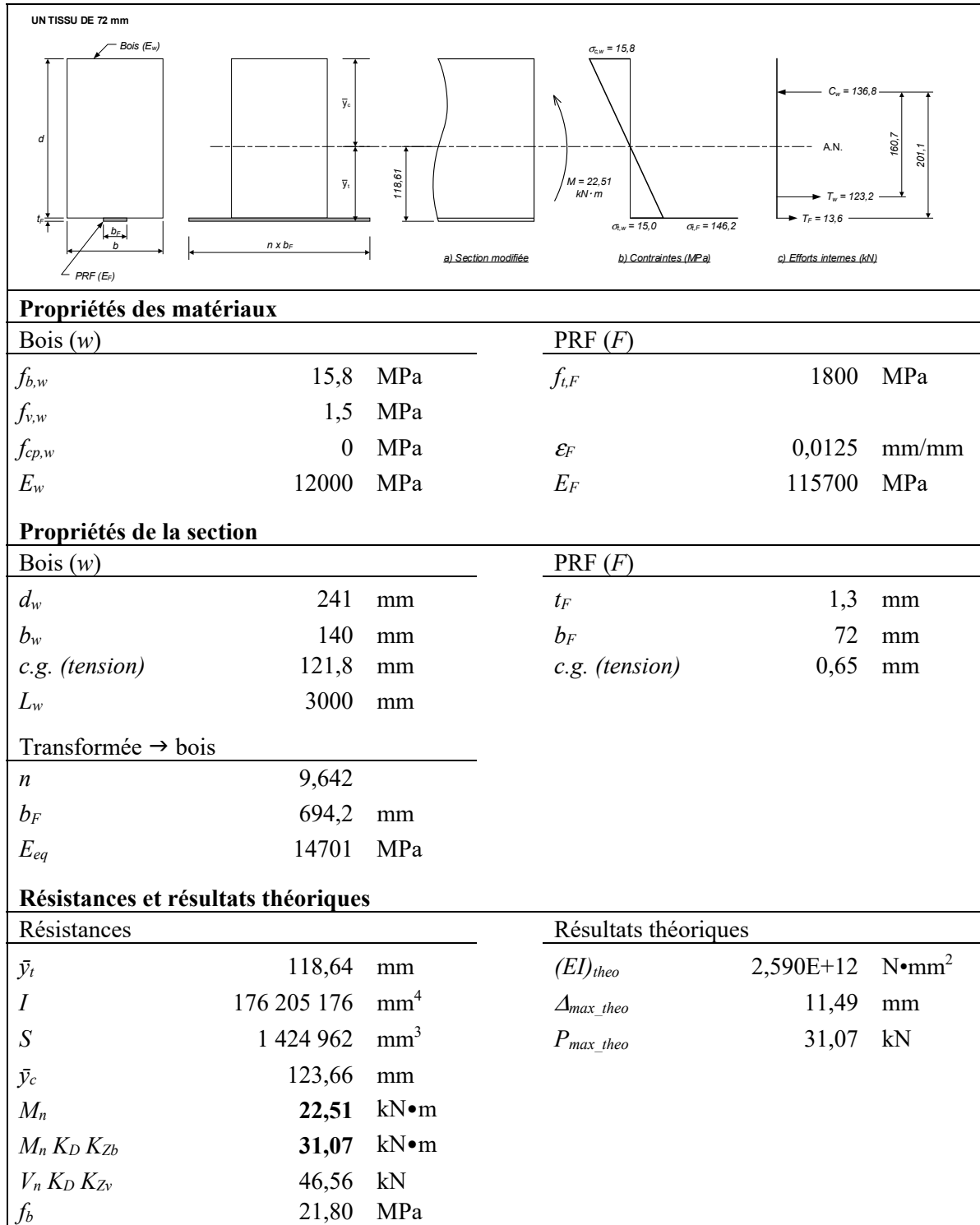
B.3. Deux lamelles collées en surface de 50 mm de largeur



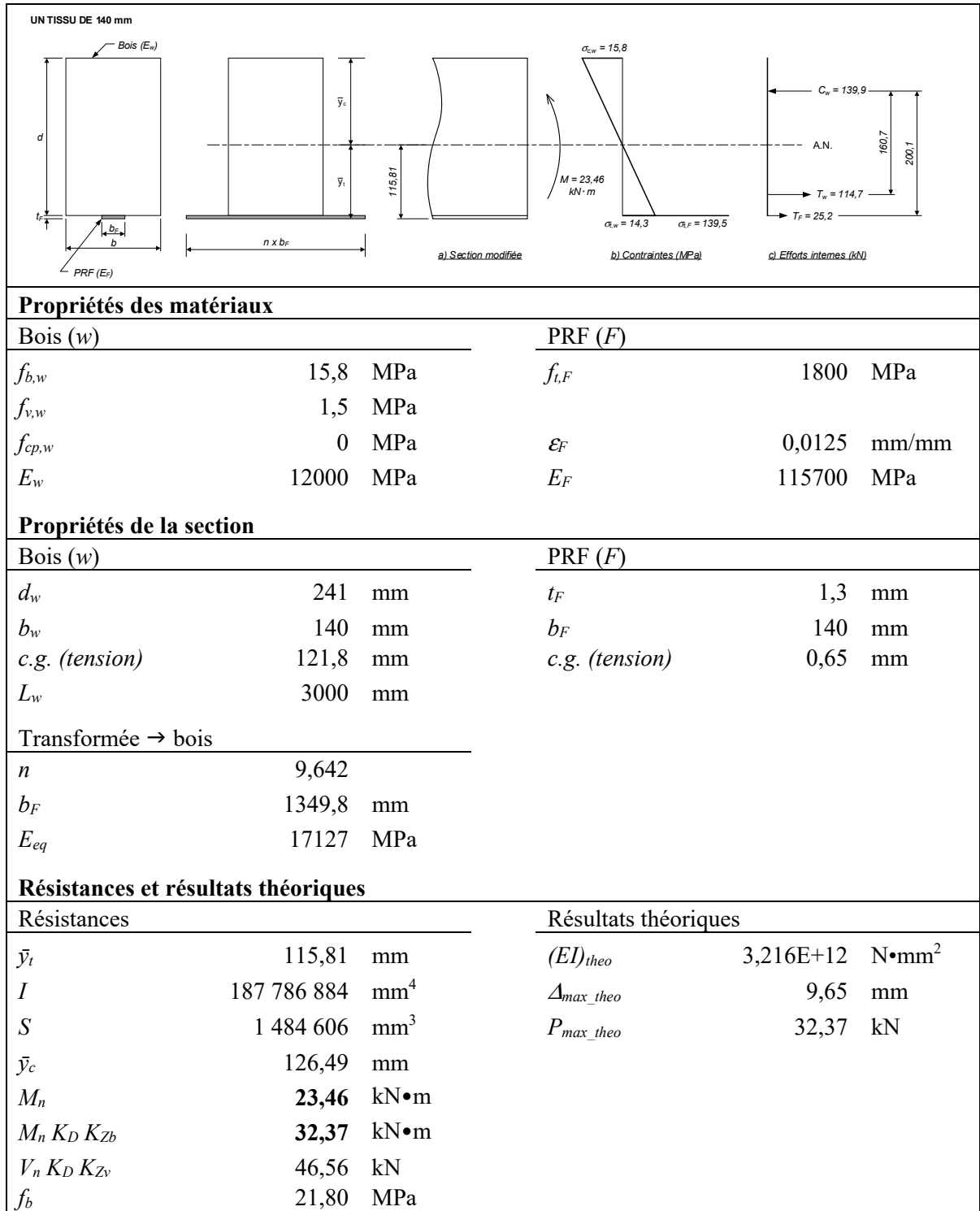
B.4. Tissu collé en surface de 36 mm de largeur



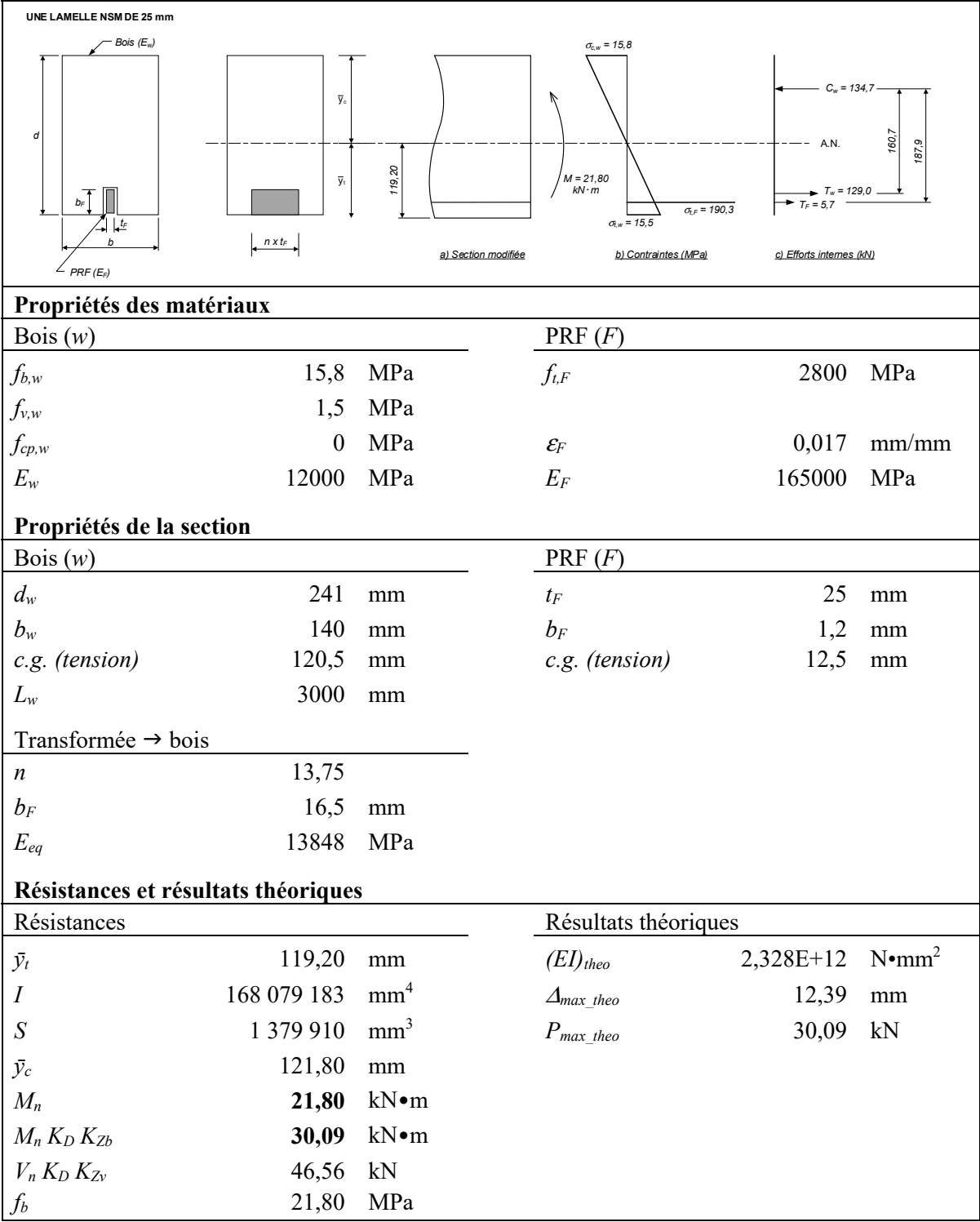
B.5. Tissu collé en surface de 72 mm de largeur



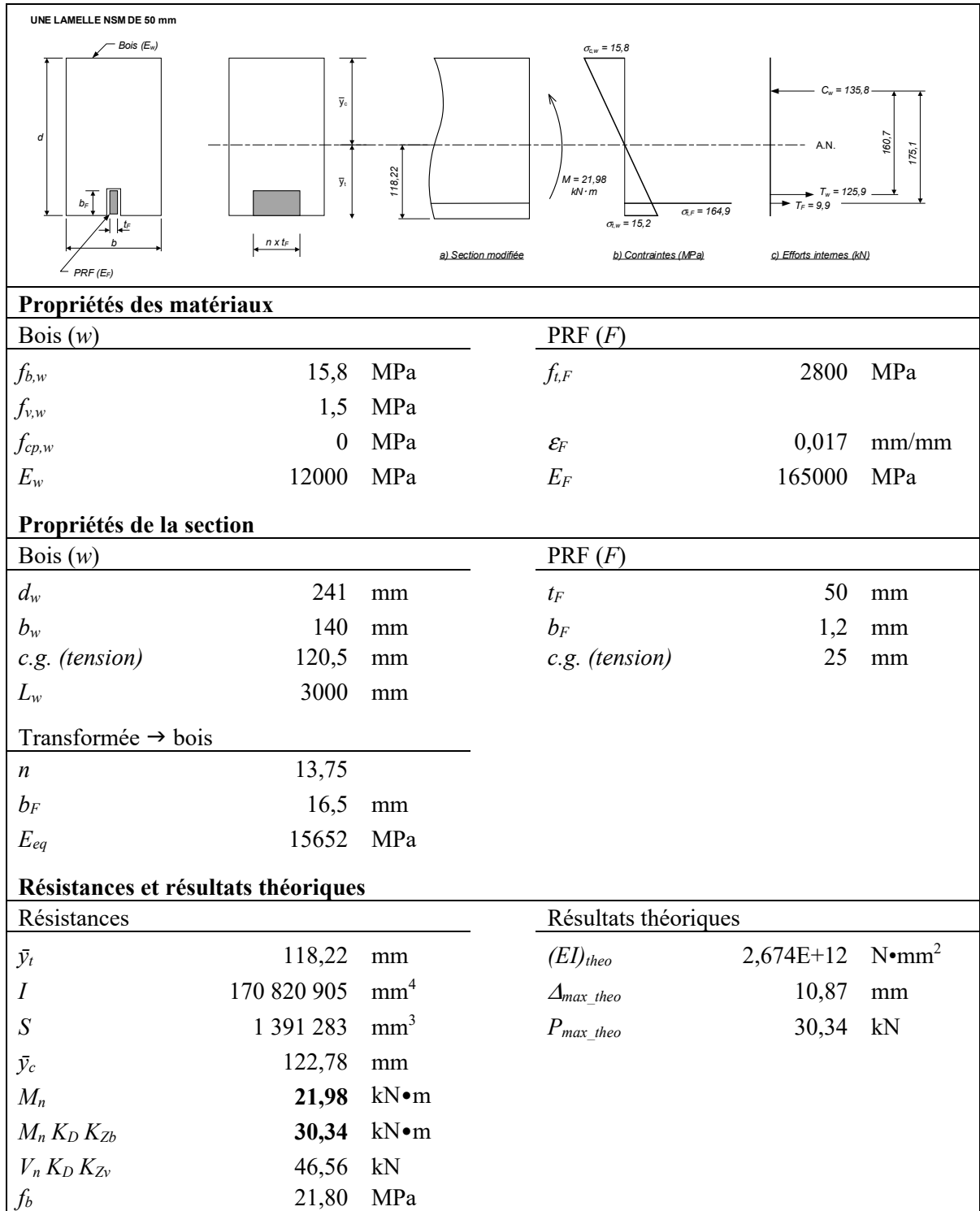
B.6. Tissu collé en surface de 140 mm de largeur



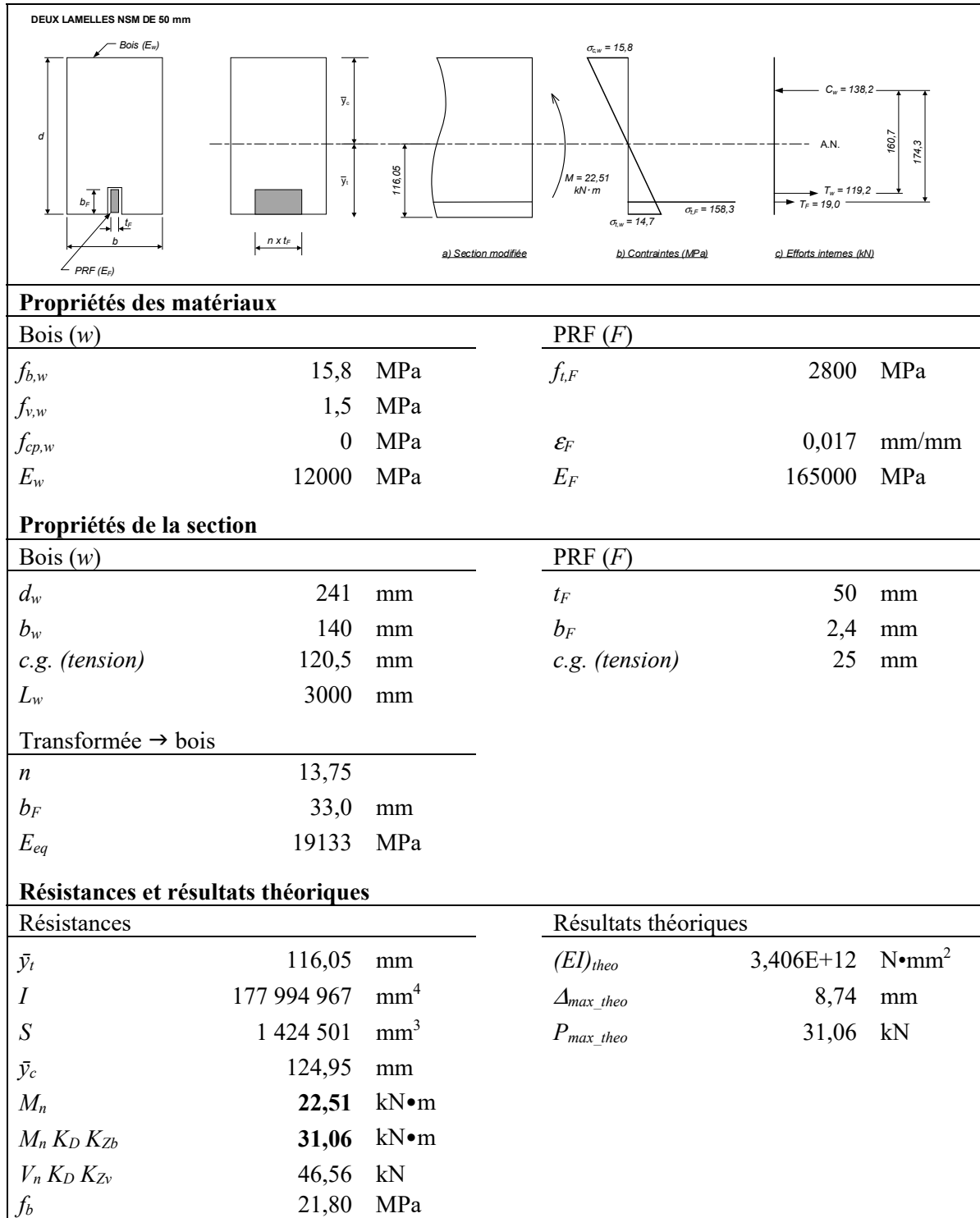
B.7. Une lamelle encastrée de 25 mm de largeur



B.8. Une lamelle encastree de 50 mm de largeur



B.9. Deux lamelles encastrées de 50 mm de largeur



ANNEXE III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

A. Tableau des résultats globaux de toutes les poutres

Tableau-A III-1 Résultats globaux de toutes les poutres

Phase	Série	No. Poutre	Charge ultime P_u , kN	Déplacement ultime Δ_u , mm	Moment maximum M_n , kNm		Résistance en flexion f_b , MPa	Module d'élasticité E , MPa		Modes de rupture
					th	ex		AVR	APR	
Flexion										
B	0	UN-01	75,95	36,56	29,56	37,98	28,02	7046	16675	TS
B	0	UN-02	78,37	35,90	29,56	39,19	28,91	7114	8963	TS
C	3	EB-1L25-01	105,27	46,08	30,26	52,64	37,92	9118	17923	TS, AD
C	1	EB-1L50-01	90,02	44,20	30,94	45,01	31,72	7479	18534	TS, FD
C	1	EB-1L50-02	100,53	48,88	30,94	50,27	35,42	7425	22558	TS, TC
C	2	EB-2L50-01	99,64	45,12	32,21	49,82	33,72	7526	22790	TS, TC, AD, FD
C	2	EB-2L50-02	98,39	35,80	32,21	49,20	33,30	7648	21407	TS
D	3	EB-1S36-01	112,12	44,14	30,33	56,06	40,30	10123	25161	TS, TC
D	1	EB-1S72-01	94,31	35,35	31,07	47,16	33,09	7649	19306	TS
D	1	EB-1S72-02	97,14	39,56	31,07	48,57	34,09	7727	13473	TS, TC, FT, FR
D	2	EB-1S140-01	108,18	57,77	32,37	54,09	36,43	7919	20316	TS, TC, FT
D	2	EB-1S140-02	108,73	44,70	32,37	54,37	36,62	8174	20460	TS, TC

Tableau-A III-1 Résultats globaux de toutes les poutres (suite)

Phase	Série	No. Poutre	Charge ultime P_u , kN	Déplacement ultime Δ_u , mm	Moment maximum M_n , kNm		Résistance en flexion f_b , MPa	Module d'élasticité E , MPa		Modes de rupture
					th	ex		AVR	APR	
Arrachement										
E	3	NSM-1L25-01	112,47	34,99	30,09	56,24	40,75	11225	27789	TS, TC
E	1	NSM-1L50-01	85,33	30,66	30,34	42,67	30,67	8235	17918	TS
E	1	NSM-1L50-02	87,52	37,96	30,34	43,76	31,45	8350	31176	TS
E	2	NSM-2L50-01	102,04	51,73	31,06	51,02	35,82	8691	21693	TC
E	2	NSM-2L50-02	89,83	29,43	31,06	44,92	31,53	8665	24664	TS

th : théorique
ex : expérimental
AVR : avant renforcement
APR : après renforcement

A. Courbes de chargement

B.1. Série 0

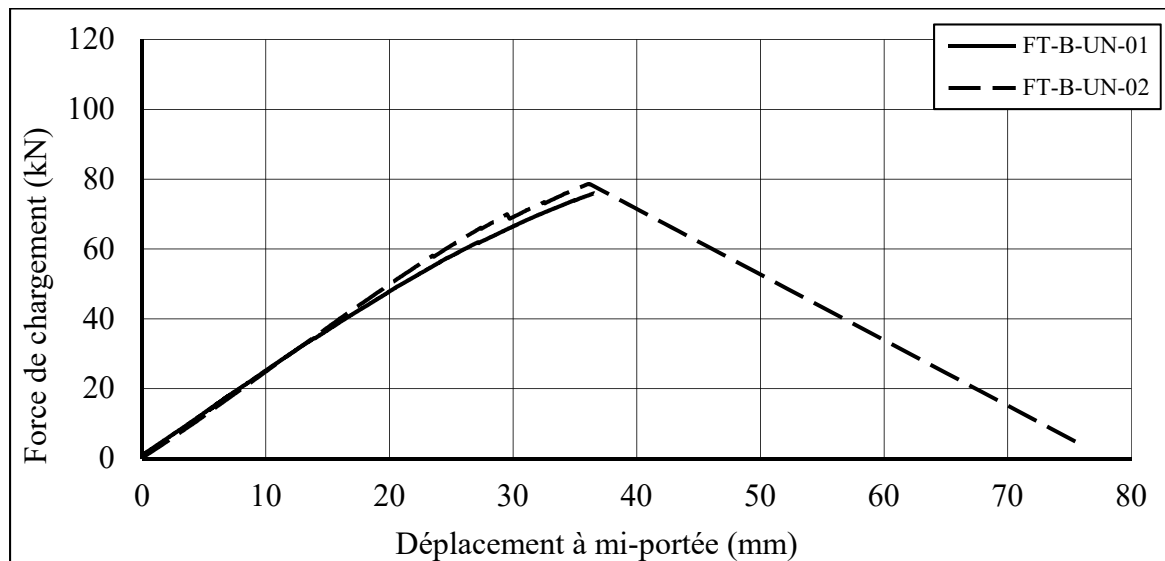


Figure-A III-1 Courbes de chargement des poutres FT-B-UN

B.2. Série 1

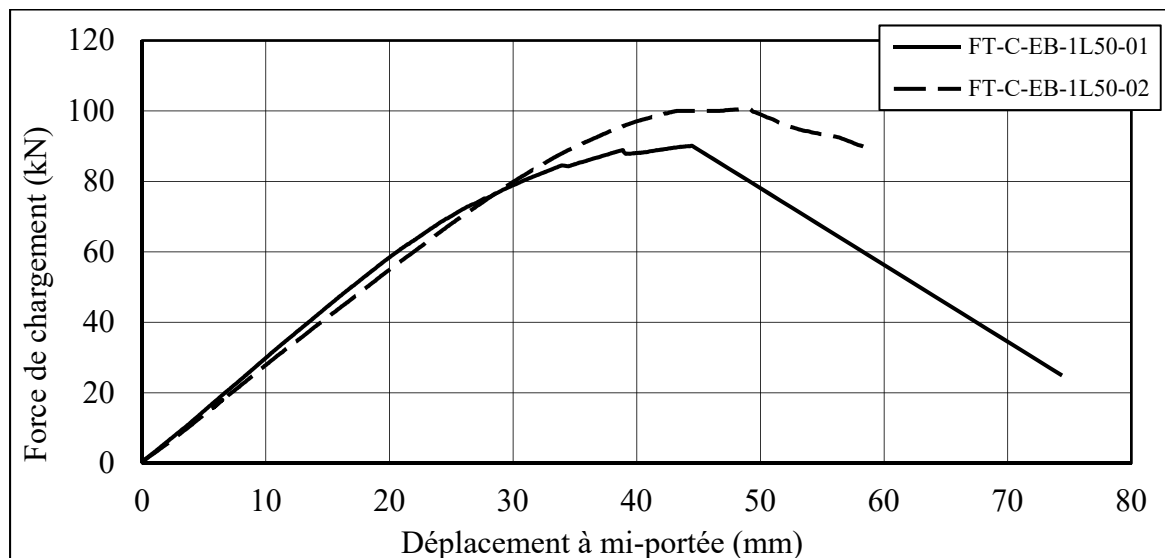


Figure-A III-2 Courbes de chargement des poutres FT-C-EB-1L50

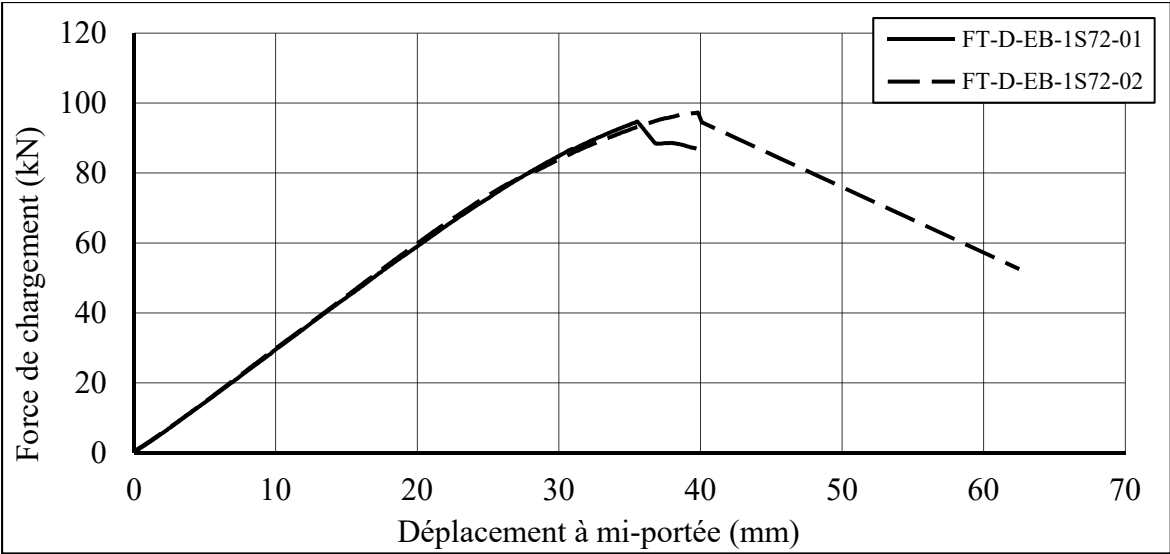


Figure-A III-3 Courbes de chargement des poutres FT-C-EB-1S72

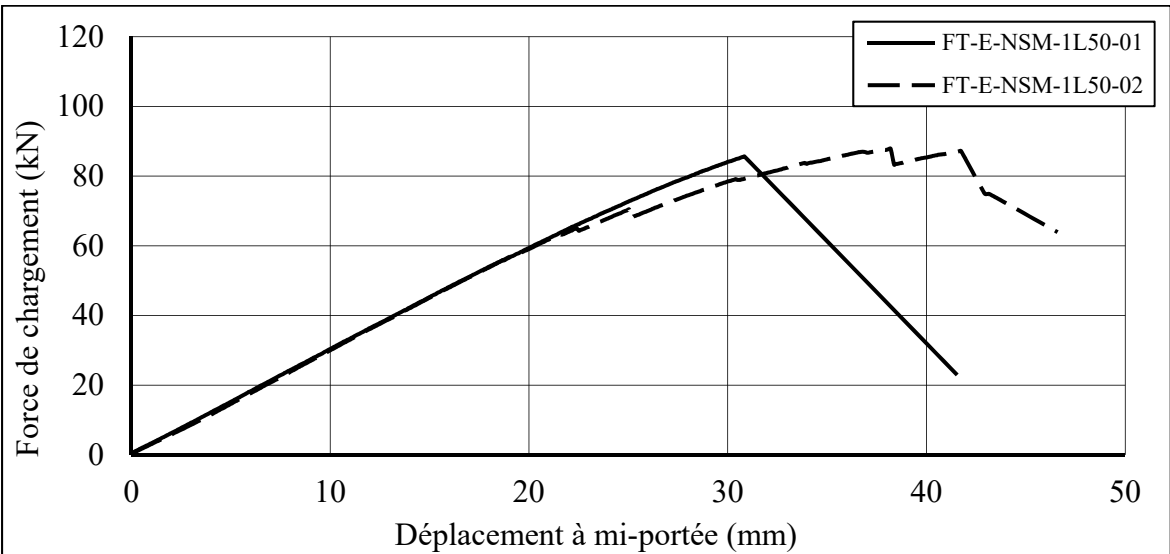


Figure-A III-4 Courbes de chargement des poutres FT-E-NSM-1L50

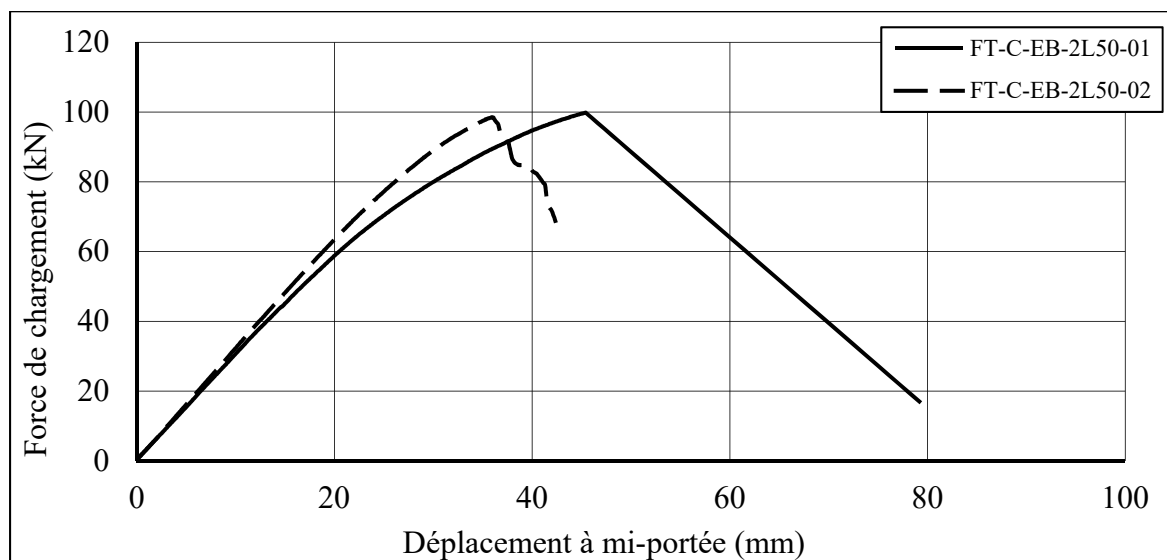
B.3. Série 2

Figure-A III-5 Courbes de chargement des poutres FT-C-EB-2L50

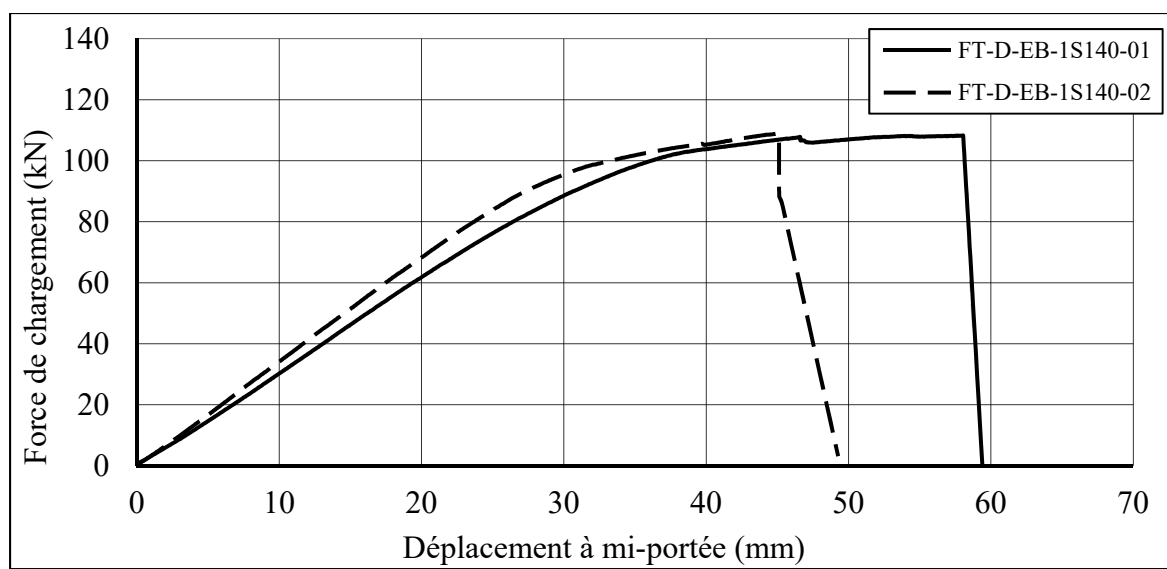


Figure-A III-6 Courbes de chargement des poutres FT-D-EB-1S140

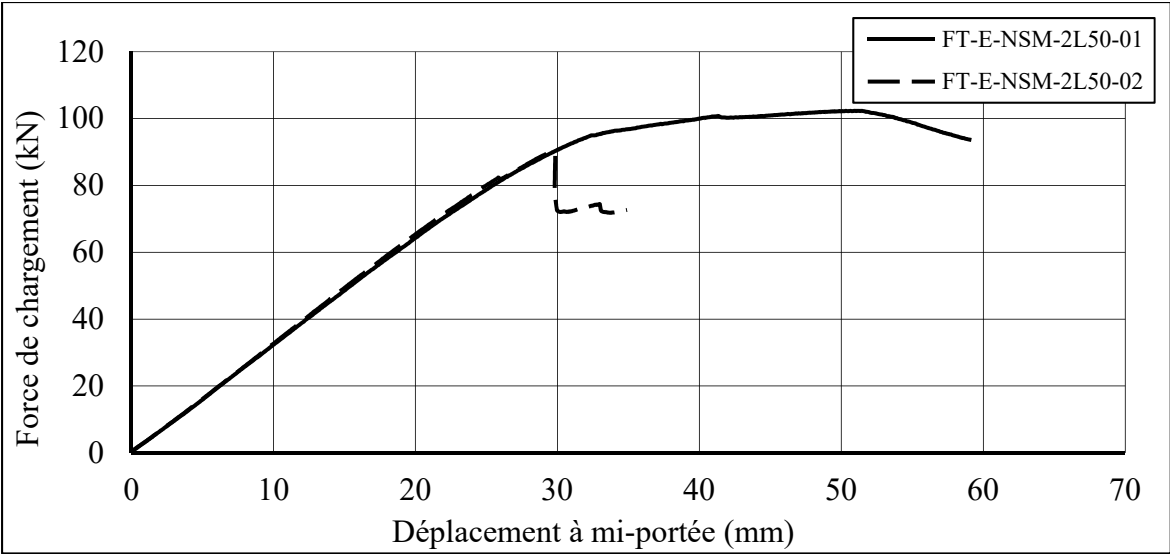


Figure-A III-7 Courbes de chargement des poutres FT-E-NSM-2L50

B.4. Série 3

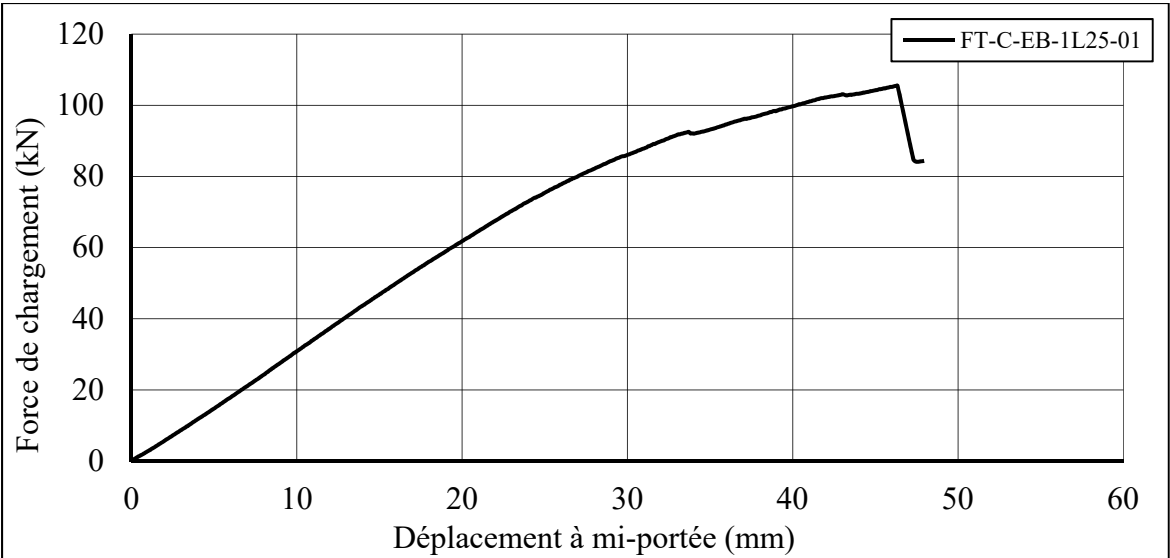


Figure-A III-8 Courbe de chargement de la poutre FT-C-EB-1L25

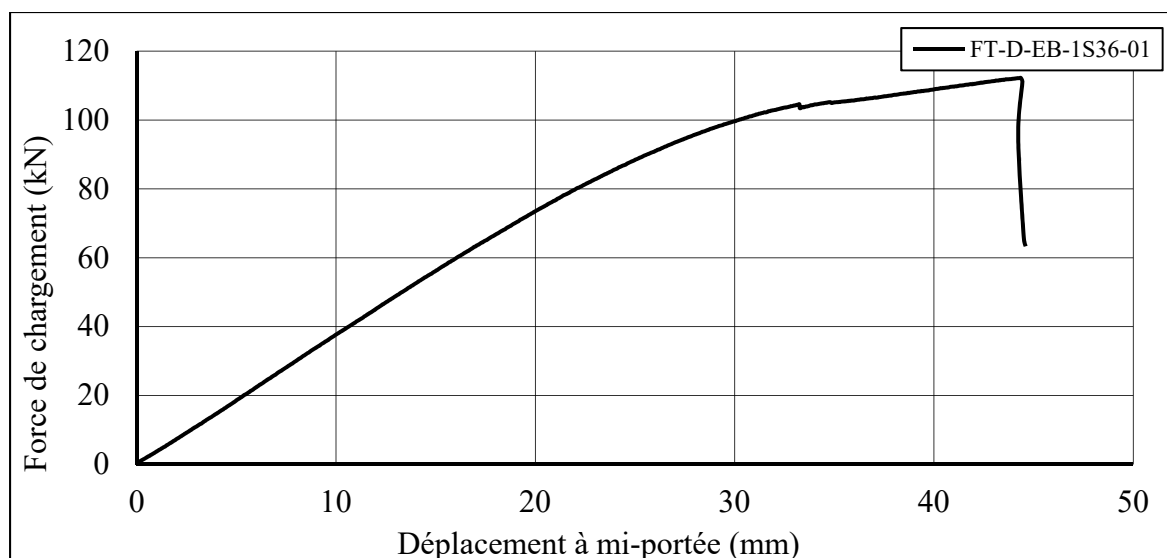


Figure-A III-9 Courbe de chargement de la poutre FT-D-EB-1S36

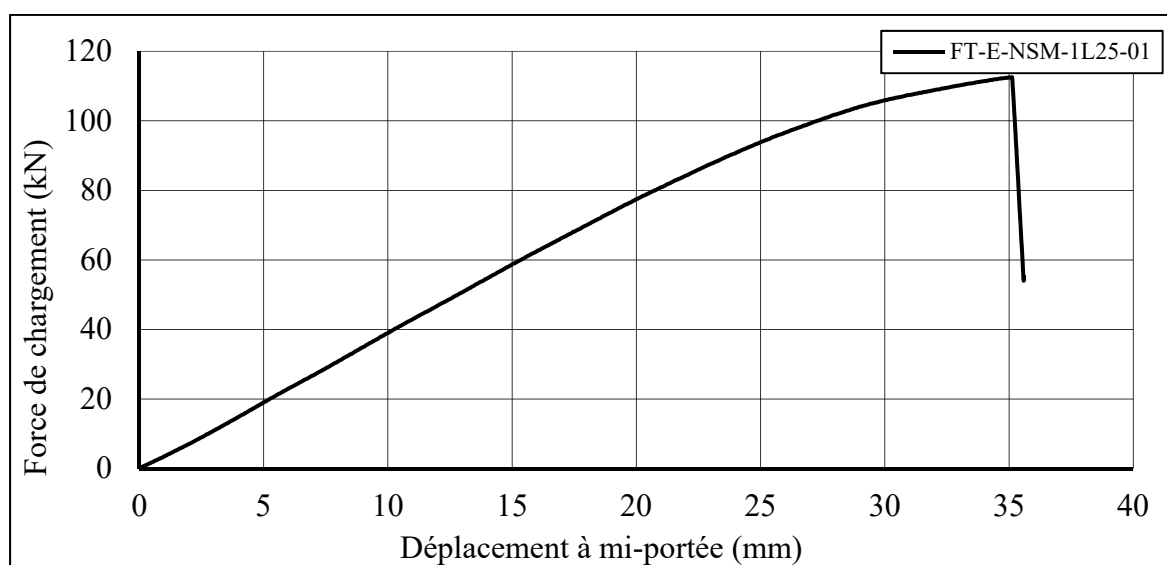


Figure-A III-10 Courbe de chargement de la poutre FT-E-NSM-1L25

ANNEXE IV

PHOTOGRAPHIES DES SPÉCIMENS TESTÉS

A. Spécimens testés en flexion (FT)



Figure-A IV-1 Spécimen B-UN-01



Figure-A IV-2 Spécimen B-UN-02



Figure-A IV-3 Spécimen C-EB-1L25-01



Figure-A IV-4 Spécimen C-EB-1L50-01

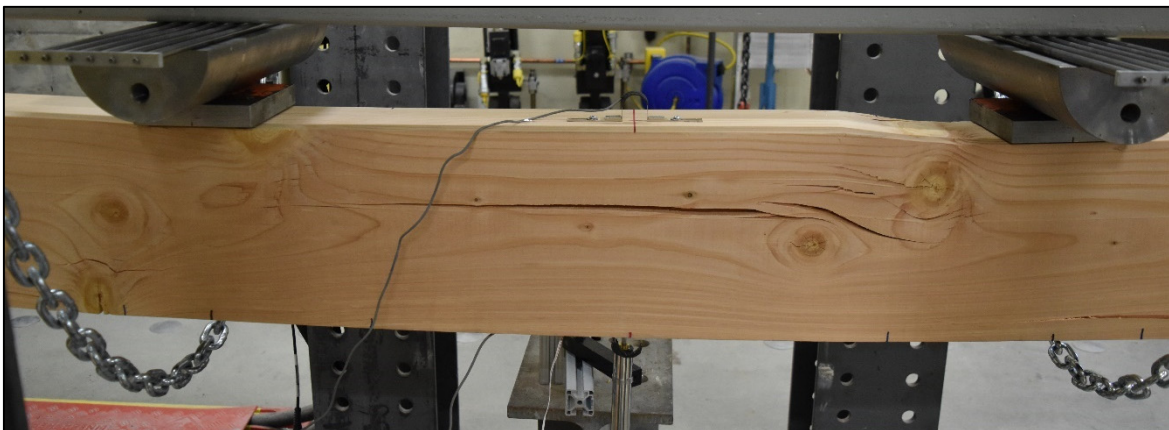


Figure-A IV-5 Spécimen C-EB-1L50-02



Figure-A IV-6 Spécimen C-EB-2L50-01



Figure-A IV-7 Spécimen C-EB-2L50-02



Figure-A IV-8 Spécimen D-EB-1S36-01

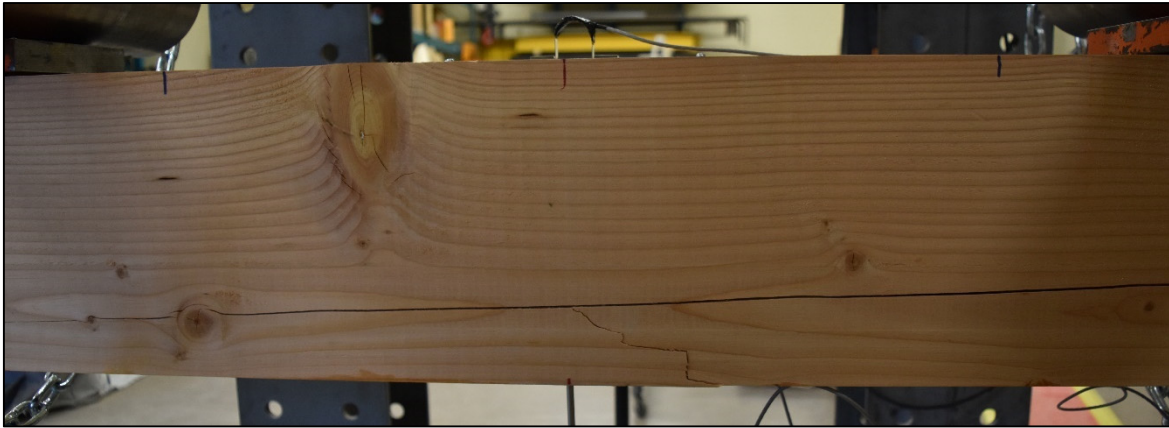


Figure-A IV-9 Spécimen D-EB-1S72-01

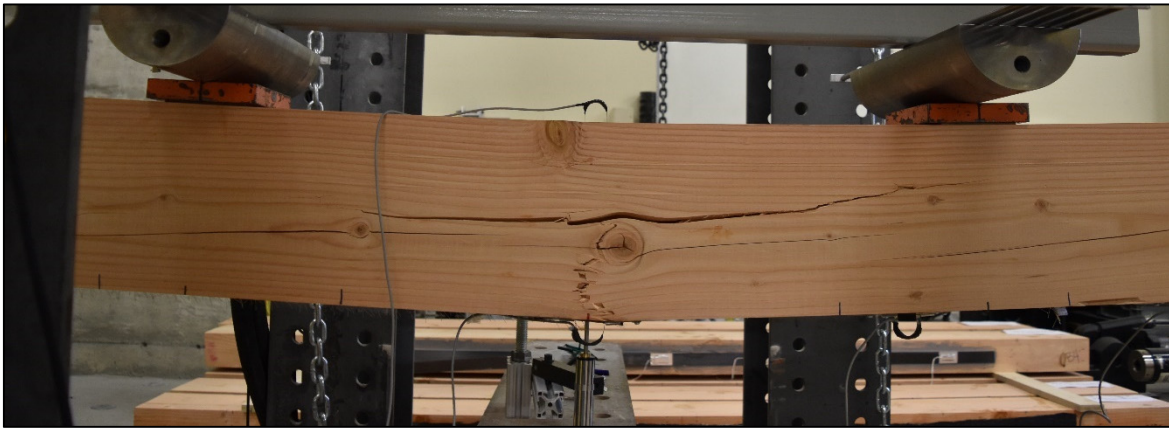


Figure-A IV-10 Spécimen D-EB-1S72-02

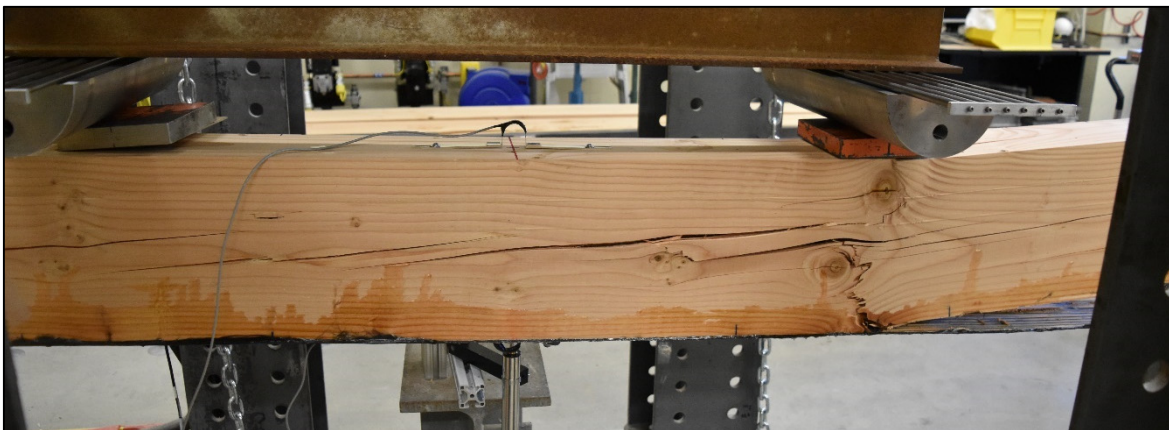


Figure-A IV-11 Spécimen D-EB-1S140-01



Figure-A IV-12 Spécimen D-EB-1S140-02



Figure-A IV-13 Spécimen E-NSM-1L25-01



Figure-A IV-14 Spécimen E-NSM-1L50-01



Figure-A IV-15 Spécimen E-NSM-1L50-02



Figure-A IV-16 Spécimen E-NSM-2L50-01



Figure-A IV-17 Spécimen E-NSM-2L50-02

B. Spécimens testés en arrachement (BT)

Figure-A IV-18 Spécimen AL100-1L25-01



Figure-A IV-19 Spécimen AL100-1L25-02



Figure-A IV-20 Spécimen AL100-1S36-01



Figure-A IV-21 Spécimen AL100-1S36-02



Figure-A IV-22 Spécimen AL150-1L25-01



Figure-A IV-23 Spécimen AL150-1L25-02



Figure-A IV-24 Spécimen AL150-1S36-01



Figure-A IV-25 Spécimen AL150-1S36-02



Figure-A IV-26 Spécimen AL500-1L17-01



Figure-A IV-27 Spécimen AL500-1L17-02



Figure-A IV-28 Spécimen AL500-1S25-01



Figure-A IV-29 Spécimen AL500-1S25-02

BIBLIOGRAPHIE

- André, A. (2011). *Benefits of strengthening timber with fibre-reinforced polymers* (Doctor of Philosophy Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden).
- André, A., & Johnsson, H. (2010). Flax Fiber-Reinforced Glued-Laminated Timber in Tension Perpendicular to the Grain: Experimental Study and Probabilistic Analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(9), 827-835.
- André, A., & Kliger, R. (2009). Strengthening of timber beams using FRP, with emphasis on compression strength : A state of the art review. Dans *APFIS 2009*.
- Biscaia, H. C., Chastre, C., Borba, I. S., Silva, C., & Cruz, D. (2016). Experimental Evaluation of Bonding between CFRP Laminates and Different Structural Materials. *Journal of Composites for Construction*, 20(3).
- Biscaia, H. C., Chastre, C., Cruz, D., & Viegas, A. (2017). Prediction of the interfacial performance of CFRP laminates and old timber bonded joints with different strengthening techniques. *Composites Part B: Engineering*, 108, 1-17.
- Biscaia, H. C., Cruz, D., & Chastre, C. (2016). Analysis of the debonding process of CFRP-to-timber interfaces. *Construction and Building Materials*, 113, 96-112.
- Bodig, J., & Jayne, B. A. (1993). *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Malabar, Florida: Krieger Publishing Compagny.
- Brandon, R., Ibach, R. E., & Frihart, C. R. (2005). Effects of Chemically Modified Wood on Bond Durability. Dans *Wood Adhesive 2005* (pp. 111-114). California: Forest Products Society.
- Burawska, I. (2015). FRP composites in enhancement of timber structures. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW*, (92), 55-59.
- Cecobois. (2012). *Guide de bonnes pratiques pour la construction commerciale en gros bois d'oeuvre ou d'ingénierie* (2 éd.). Cecobois.
- Chaallal, O. (2018). *Matériaux composites en PRF : Renforcement des structures existantes en béton armé*. Montréal: Presses de l'Université du Québec.
- Chen, J. F., & Pan, W. K. (2006). Three dimensional stress distribution in FRP-to-concrete bond test specimens. *Construction and Building Materials*, 20(1-2), 46-58.
- CNRC. (2015). *Code national du bâtiment - Canada 2015*. Ottawa: Conseil national de recherches Canada.

- Corradi, M., Righetti, L., & Borri, A. (2015). Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber. *Materials*, 8(7), 4034-4049.
- CSA-O86. (2014). *Règles de calcul des charpentes en bois*. Mississauga, Ont., Canada: Association canadienne de normalisation.
- CSA-S6. (2014). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Mississauga, Ont., Canada: Association canadienne de normalisation.
- CSA-S806. (2012). *Règles de calcul et de construction des structures de bâtiment contenant des polymères renforcés de fibres*. Mississauga, Ont., Canada: Association canadienne de normalisation.
- CWC-1994. (1994). *Canadian Lumber Properties*. Ottawa, Ontario: Canadian Wood Council.
- CWC-2017. (2017). *Wood Design Manual vol.1 & 2*. Ottawa, Ontario: Canadian Wood Council.
- CWC-2018. (2018). *Introduction to Wood Design: A learning guide to complement the Wood Design Manual*. Ottawa, Ontario: Canadian Wood Council.
- Davalos, J. F., Qiao, P., & Trimble, B. S. (2000). Fiber-Reinforced Composite and Wood Bonded Interfaces: Part 1. Durability and Shear Strength. *Journal of composites technology and research*, 22(4), 224-231.
- Dimande, A. O. (2003). *Interface Influence on the Flexural Strengthening of Concrete Structures with FRP Systems* (Master thesis, FEUP, Oporto, Portugal).
- El-Saikaly, G. (2015). *Évaluation du comportement en fatigue des poutres en béton armé renforcées à l'effort tranchant à l'aide de polymères renforcés de fibres* (These de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, Canada).
- EN 302-1-2013. (2013). *Adhesives for load-bearing timber structures - Test methods - Part 1: Determination of longitudinal tensile shear strength*. European Standards.
- Frihart, C. R. (2005). Are Epoxy-Wood Durable Enough? Dans *Wood Adhesive 2005* (pp. 241-246). California: Forest Products Society.
- Frihart, C. R., Yelle, D. J., & Ibach, R. E. (2015). Wood properties influence bond durability. Dans *Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Hardwood Processing* (pp. 78-84).

- Gand, A. K., Yeboah, D., Khorami, M., Olubanwo, A. O., & Lumor, R. (2018). Behaviour of strengthened timber beams using near surface mounted Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP) rebars. *Engineering Solid Mechanics*, 341-352.
- Gentry, T. R. (2011). Performance of Glued-Laminated Timbers with FRP Shear and Flexural Reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 861-870.
- Hoseinpour, H., Valluzzi, M. R., Garbin, E., & Panizza, M. (2018). Analytical investigation of timber beams strengthened with composite materials. *Construction and Building Materials*, 1242-1251.
- Johns, K. C., & Lacroix, S. (2000). Composite reinforcement of timber in bending. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, 899-906.
- Johnsson, H., Blanksvärd, T., & Carolin, A. (2006). Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. *Materials and Structures*, (40), 47-56.
- Juvandes, L. F. P., & Barbosa, R. M. T. (2012). Bond Analysis of Timber Structures Strengthened with FRP Systems. *Strain*, 48, 124-135.
- Karastergiou, S., Foti, D., Filippou, V., & Papadopoulos, A. (2020). Enhancement of bending strength properties of two wood species reinforced with two types of carbon fibre fabrics and two layouts. *International Wood Products Journal*, 11(2), 64-69.
- Lacroix, S. (1999). *Renforcement de poutres en bois scié avec des matériaux composites* (Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec).
- Les ponts couverts au Québec. (2019). Les ponts couverts du Québec, d'hier à aujourd'hui. Repéré le 26 octobre 2020
- Lu, W., Ling, Z., Geng, G., Liu, W., Yang, H., & Yue, K. (2015). Study on flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates. *Construction and Building Materials*, 91, 23-31.
- Motlagh, B., Gholipour, Y., & Ebrahimi, G. H. (2012). Experimental investigation on mechanical properties of old wood members reinforced with FRP composite. *Wood Research*, 285-296.
- NLGA. (2017). *Standard Grading Rules for Canadian Lumber*. Vancouver, British-Columbia: National Lumber Grades Authority.
- Raftery, G. M., Harte, A. M., & Rodd, P. D. (2009). Bond quality at the FRP - wood interface using wood-laminating adhesives. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29(2), 101-110.

- Raftery, G. M., & Rodd, P. D. (2015). FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. *Construction and Building Materials*, 91, 116-125.
- Schober, K.-U. (2017). *Strengthening of timber structures with FRPs Design guidelines for FRP damage and delamination* présentée à COST TU1207 EoA Conference - Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction, Budapest, Hungary.
- Schober, K.-U., Harte, A. M., Kliger, R., Jockwer, R., Xu, Q., & Chen, J.-F. (2015). FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*, 97, 106-118.
- Sena Cruz, J. M. (2004). *Strengthening of Concrete Structures with Near-Surface Mounted CFRP Laminate Strips* (PhD thesis, Engineering School of University of Minho, Guimarães, Portugal).
- Svecova, D., & Eden, R. J. (2004). Flexural and shear strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer bars - an experimental investigation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31, 45-55.
- Swedish Wood. (2016). *Design of timber structures Volume 1, Structural aspects of timber construction* (2 éd. Vol. 1). Stockholm: Swedish Wood.
- Travassos, N. A. C. (2005). *Caracterização do Comportamento da Ligação CFRP-betão* (Master thesis, Instituto Superior Técnico (IST), Lisbon, Portugal).
- Triantafyllou, T. C., & Plevris, N. (1992). FRP - Reinforced Wood as Structural Material. *Materials in Civil Engineering*, 300-317.
- Vahedian, A., Shrestha, R., & Crews, K. (2017). Effective bond length and bond behaviour of FRP externally bonded to timber. *Construction and Building Materials*, 151, 742-754.
- Vahedian, A., Shrestha, R., & Crews, K. (2018). Bond strength model for externally bonded FRP-to-timber interface. *Composite Structures*, 200, 328-339.
- Valluzzi, M. R., Nardon, F., Garbin, E., & Panizza, M. (2016). Multi-scale characterization of moisture and thermal cycle effects on composite-to-timber strengthening. *Construction and Building Materials*, 102, 1080-1083.
- Vanerek, J., Benesova, A., Rovnanik, P., & Drochytka, R. (2014). Evaluation of FRP/wood adhesively bonded exoposy joints on environmental exposures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(14-15), 1405-1417.
- Wang, B., Bachtar, E. V., Yan, L., Kasal, B., & Fiore, V. (2019). Flax, Basalt, E-Glass FRP and Their Hybrid FRP Strengthened Wood Beams: An Experimental Study. *Polymers*, 11(8).

- Wang, Z., Li, H., Lorenzo, R., Cordi, I., Corbi, O., & Fang, C. (2020). Review on bond properties between wood and fiber reinforced polymer. *Journal of Renewable Materials*, 8(8), 993-1018.
- Xu, Q., Chen, L., Harries, K. A., Zhang, F., Zhuolin, W., & Chen, X. (2017). Experimental study and numerical simulation of long-term behavior of timber beams strengthened with near surface mounted CFRP bars. *Materials and Structures*, 50.
- Xu, T., He, Z. J., Tang, C. A., Zhu, W. C., & Ranjith, P. G. (2015). Finite element analysis of width effect in interface debonding of FRP plate bonded to concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*, 93, 30-41.
- Ye, F., & Yao, J. (2008). A 3D Finite Element Study on The Effect of FRP Plate Width on Interfacial Stress between FRP and Concrete. *Bulletin of Science and Technology*, 24(6), 853-859.