



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

**Rapport de PROJET DE FIN
D'ETUDES
- ENSTIB 3 -**

**Renforcement des poutres en bois par un
tissu de fibres de carbone (CFRP)**

GUICHARD Florianne

MERCIER Bertrand

2012/2013

Professeur encadrant : Mourad KHELIFA

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier MM. M. KHELIFA et J.-F. BOCQUET, encadrant et co-encadrant de ce projet de fin d'études, pour leur disponibilité et leur aide précieuse. Un grand merci à M. KHELIFA qui nous a fourni les matériaux nécessaires aux expériences : le rouleau de fibres de carbone et la résine époxy.

Merci également à Robin FERON, Baptiste BOUCHARD et Quentin LE JANNOU pour nous avoir conseillé sur les résines époxy et pour nous en avoir fourni pour les expériences.

Enfin, nous tenons à remercier M. A. RENAUD pour nous avoir mis à disposition le bois pour la fabrication des éprouvettes et l'équipe du CrittBois pour nous avoir laissé utiliser leur matériel d'essai.

SOMMAIRE

Remerciements	2
Sommaire	3
Principales notations	5
INTRODUCTION	6
PARTIE 1 : OBJECTIFS D'UN RENFORCEMENT AVEC UN CFRP	7
1. Le renforcement par les CFRP	7
1.1. La composition des CFRP	7
1.2. Le composite	9
2. Effets attendus du renforcement	10
2.1. Le test en flexion	10
2.2. Les qualités requises d'un renforcement	11
3. Résultats expérimentaux de la littérature	13
4. Avantage du CFRP par rapport à d'autres systèmes	14
PARTIE 2 : PREPARATION DES EXPERIENCES.....	15
1. Calculs préliminaires.....	15
1.1. Calculs pour les éprouvettes témoins.....	15
1.2. Calculs pour les éprouvettes renforcées	18
2. Protocoles expérimentaux.....	23
2.1. Choix des essences et des renforcements étudiés	23
2.2. Préparation des éprouvettes	25
2.3. Protocole de chargement	26
2.3 Essais	27
2.4 Résultats fournis par le logiciel	27
PARTIE 3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX	28
1. Résultats : Modules d'Young	28
1.1. Méthode visuelle avec les graphiques Force/Déplacement.....	28
1.2. Méthode calculatoire.....	31
2. Contraintes de flexion et de cisaillement	33
2.1. Contraintes de flexion.....	33

2.2. Contraintes de cisaillement	34
3. Détermination de l'influence du joint de colle	35
3.1. Détermination du facteur de glissement réel.....	35
3.2. Contrainte de cisaillement dans le joint de collage	36
3.3. Interprétation des résultats obtenus.....	37
4. Améliorations possibles.....	39
5. Résultats avec la résine époxy béton	40
5.1. Module d'Young.....	40
5.2. Contraintes de flexion	41
5.3. Valeurs réelles du facteur de glissement.....	42
6. Comparaison des deux colles	43
6.1. Comparaison des contraintes de flexion	43
6.2. Comparaison des facteurs de glissement	44
PARTIE 4 : PROPOSITION D'UN MODELE NUMERIQUE.....	45
1. Hypothèses	45
2. Modèle témoin	45
3. Modèle renforcé	47
4. Remarques sur ce modèle	48
CONCLUSION	50
Bibliographie	51
Table des illustrations	52
Liste des graphiques.....	53
Liste des tableaux.....	54
Liste des équations.....	55
RESUME	56

PRINCIPALES NOTATIONS

L : longueur de l'éprouvette
h : hauteur de l'éprouvette ou du CFRP
b : base de l'éprouvette ou du CFRP
a : distance extrémité de l'éprouvette-point d'application de la force
A : section de l'éprouvette ou du CFRP
F : force appliquée
I : moment quadratique
E : module d'Young ou module d'élasticité longitudinale
(EI) : rigidité de flexion
 M_x : moment fléchissant
 M_{max} : moment maximal
 T_y : effort tranchant
 $\ddot{v}(x)$: dérivée seconde de la flèche
 $v(x)$: équation de la flèche en un point x
 σ : contrainte de flexion
n : coefficient d'équivalence
 γ : facteur de glissement
 z_G : position de l'axe neutre
e : distance axe neutre de l'éprouvette
renforcée-axe neutre du matériau seul
 τ : contrainte de cisaillement
V : effort tranchant
(ES) : rigidité statique
 X_{eff} : paramètre X donné pour la section effective
s : espacement des connecteurs
k : module de glissement de l'assemblage
u : déplacement de la traverse
 $b_{c,i}$: largeur de cisaillement du joint de colle
GF : renforcement de l'éprouvette sur toute la face inférieure
PF : renforcement de l'éprouvette sur la demi-face inférieure

INTRODUCTION

L'intérêt de la construction est de bâtir des structures qui doivent résister aux charges qui leur sont soumises afin de remplir une fonction (loger des personnes, permettre à des véhicules de franchir un cours d'eau,...) mais ces structures doivent également résister aux agressions de l'environnement et être durables dans le temps. L'objectif est que la structure garde un même niveau de performance le plus longtemps possible : capacité à répartir les charges, durabilité vis-à-vis du milieu extérieur, apparence esthétique... Si le niveau de performance baisse, il faut renforcer la structure : c'est le principe de la rénovation.

Dans la construction bois, une nouvelle technologie voit le jour afin d'augmenter la résistance des structures : ce sont les CFRP (Carbon Fibers Reinforced Polymers), des polymères renforcés par des fibres de carbone. L'intérêt de cette application est qu'elle peut s'utiliser aussi bien lors de la construction d'une structure que lors de sa rénovation. Cette technologie est d'ores et déjà utilisée dans les structures béton armé et précontraint ainsi que dans le domaine de l'aéronautique.

Ce projet a pour objectif de répondre à la question suivante : Dans quelle mesure le renforcement à l'aide d'un CFRP permet-il une amélioration de la résistance en flexion de poutres en bois ?

Pour répondre à cette problématique, des tests de flexion quatre points seront menés sur des éprouvettes présentant un renforcement à l'aide d'un CFRP, en s'inspirant de la norme NB 51-008.

Cette étude comportera tout d'abord une partie bibliographique recensant les travaux déjà effectués sur le sujet et les effets attendus de l'utilisation d'un CFRP. Une deuxième partie présentera l'approche calculatoire préalable à l'analyse des résultats obtenus qui fera l'objet de la troisième partie de ce rapport. Enfin une modélisation numérique grâce au logiciel ABAQUS sera proposée.

PARTIE 1 : OBJECTIFS D'UN RENFORCEMENT AVEC UN CFRP

Cette partie du projet recense quelques travaux effectués à ce jour sur l'étude du comportement des CFRP en association avec le bois. Une première partie présente le principe du renforcement à l'aide d'un CFRP. La deuxième partie détaille les effets attendus de ce renforcement lors du test de flexion quatre points. La troisième partie résume les résultats expérimentaux de la littérature et la dernière partie confronte cette méthode avec d'autres systèmes de renforcement couramment utilisés.

1. Le renforcement par les CFRP

1.1. La composition des CFRP

Les polymères renforcés par des fibres sont composés de deux matériaux : une matrice, généralement une résine, et des fibres.

1.1.1. Les fibres

Les fibres ont un diamètre compris entre 5 et 15 μ m. Dans le génie civil, elles peuvent être en carbone, verre ou aramide. Ces fibres ont une plus grande capacité de résistance à la traction que l'acier et elles ont un comportement élastique linéaire avant rupture. Les fibres de carbone sont les plus utilisées grâce à leur grande rigidité et résistance à la traction (cf. Tableau 1). Elles présentent un allongement à la rupture de 0,3 à 2,5%.

Caractéristiques	Acier	Fibre de carbone	Epicéa	Fibres utilisées dans les expériences
Masse volumique (kg.m ⁻³)	7800	1750-1950	450	1790
Module d'élasticité (GPa)	200-210	200-800	11	230
Résistance à la traction (MPa)	240-690	2500-6000	90	4800

Tableau 1: Caractéristiques physiques de l'acier, des fibres de carbone, de l'épicéa (CAROLIN, 2003) et des fibres utilisées pour les expériences (MAPEI, 2006)

Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau, ne s'oxydent pas, ne montrent pas de fluage ni de relaxation. Cependant elles conduisent l'électricité et peuvent se dégrader en contact avec l'acier. Un des inconvénients majeurs de leur utilisation est leur prix très onéreux (CAROLIN, 2003).

1.1.2. La matrice

La matrice a pour rôle de maintenir la cohésion entre les fibres, de les protéger de l'environnement extérieur et de transmettre les efforts entre elles. Dans le génie civil, les résines thermodurcissables comme les vinylesters ou les poly époxydes (appelées époxy par abus de langage) sont souvent utilisées. La résine époxy présente une résistance à la traction plus importante que les résines polyesters comme indiqué dans le Tableau 2.

	Polyester	Epoxy
Masse volumique (kg.m⁻³)	1000-1450	1100-1300
Résistance à la traction (MPa)	20-100	55-130
Module d'élasticité (GPa)	2,1-4,1	2,5-4,1
Allongement à la rupture (%)	1-6,5	1,5-9

Tableau 2 : Caractéristiques physiques des résines polyester et époxy (CAROLIN, 2003)

La résine époxy n'absorbe pas l'eau de façon significative (contrairement à d'autres polymères) mais elle peut être dégradée par les rayonnements UV (ce phénomène peut être bloqué avec des additifs). Le plus gros inconvénient est que cette résine est sensible aux fortes températures, il faut donc protéger le composite du feu lors de la conception des bâtiments si cette matrice est utilisée (CAROLIN, 2003).

Cette résine époxy n'est pas prête à l'emploi, il faut la mélanger à un durcisseur avant de l'appliquer. Une fois ce mélange réalisé, il doit être appliqué rapidement puisque l'ajout de durcisseur diminue considérablement le temps de vie en pot de la résine époxy (MAPEI, 2006).

1.2. Le composite

1.2.1. Propriétés du composite

Les propriétés mécaniques du composite dépendent de la matrice, des fibres utilisées, de leur répartition et de leur direction. Les composites contiennent généralement 30 à 60 % de fibres. Les fibres peuvent être disposées toutes dans le même sens ou selon un quadrillage particulier ; on parle alors de composite unidirectionnel ou multidirectionnel (CAROLIN, 2003). Dans les expériences, un tissu de fibres de carbone bidirectionnel également appelé maillage à 90° (MAPEI, 2006) sera utilisé.

Dans le cas d'un composite unidirectionnel, la résistance à la traction est plus grande dans la direction des fibres que dans la direction perpendiculaire. Il est donc primordial de placer le CFRP dans le sens adéquat.

1.2.2. Mise en place du composite

Sachant que les fibres de carbone ont une très bonne résistance à la traction, il faudra les positionner au niveau de la fibre tendue d'une poutre soumise à de la flexion (en rouge sur la Figure 1) (NGUYEN TRUNG, 2010).

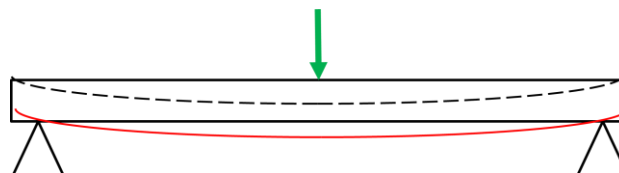


Figure 1 : Schéma de renforcement d'une poutre soumise à la flexion trois points

Des précautions d'usage sont à respecter lors de l'utilisation de la résine époxy. En effet, parmi ses composants peut se trouver du DGEBA, un dérivé du bisphénol A considéré comme perturbateur endocrinien par l'Organisation Mondiale de la Santé (World Health Organization, 2009). De plus, certains durcisseurs contenant des amines ou des anhydrides d'acides ont une action irritante et peuvent provoquer de l'eczéma.

Les mesures de prévention collective l'INRS préconisent d'utiliser des résines époxy de haut poids moléculaire (sans DGEBA) et des durcisseurs moins caustiques. De plus il est vivement conseillé de travailler dans un local pourvu d'un système d'aspiration et/ou de ventilation. Concernant la protection individuelle, le port d'un masque, lunettes de protection et gants spéciaux est vivement conseillée. Des gants « spécial époxy » de type 4 H® doivent être utilisés car la résine est capable de traverser tous les autres types de gants (INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité, 2002)

2. Effets attendus du renforcement

La plupart des tests effectués pour tester un matériau sont des tests en traction, compression et flexion. Ce paragraphe détermine les sollicitations auxquelles sont soumises les éprouvettes lors d'une flexion ainsi que les améliorations attendues d'un renforcement réussi avec CFRP.

2.1. Le test en flexion

Le test de flexion sollicite les fibres supérieures des éprouvettes en compression et les fibres inférieures de l'éprouvette en traction (cf. Figure 2). Cette contrainte de flexion est maximale sur les fibres externes de l'éprouvette. La fibre neutre, qui est la seule à ne pas subir de déformation ni de traction ou compression, est la plus sollicitée en cisaillement.

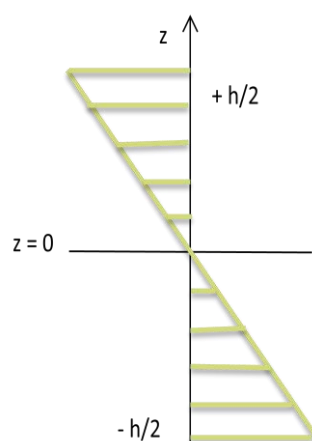


Figure 2 : Contrainte de flexion appliquée sur une éprouvette de section homogène

Lors de ces tests, la première déformation observée est celle du matage du bois. Il s'agit d'un écrasement localisé des fibres à cause de la pression occasionnée par la traverse du banc d'essai au contact de l'éprouvette, au niveau du point d'application de la force (cf. Figure 3). Le matage correspond à une déformation dans le domaine plastique des fibres. Il n'y a donc pas de rupture de l'éprouvette à cet endroit.

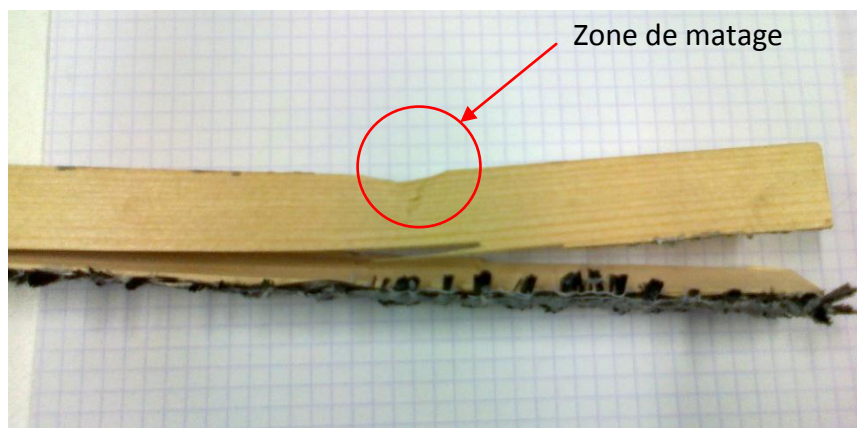


Figure 3 : Eprouvette observée après essai

Au cours de l'essai, les fibres inférieures et supérieures sont de plus en plus sollicitées respectivement en traction et en compression. Comme la valeur caractéristique de la résistance en traction axiale est plus faible que celle en compression axiale, il est attendu que l'éprouvette casse au niveau des fibres inférieures comme illustré sur la Figure 4.

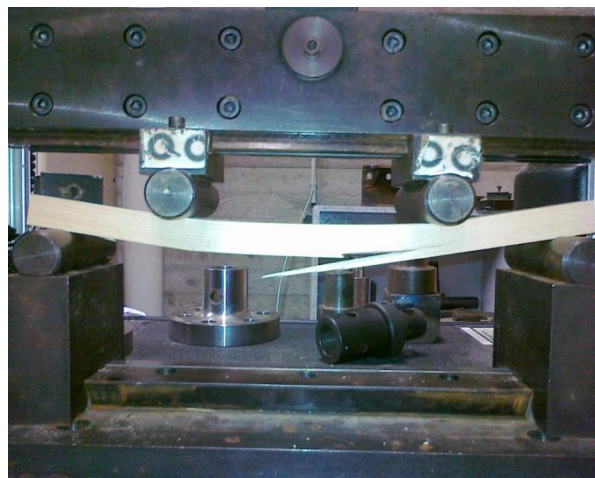
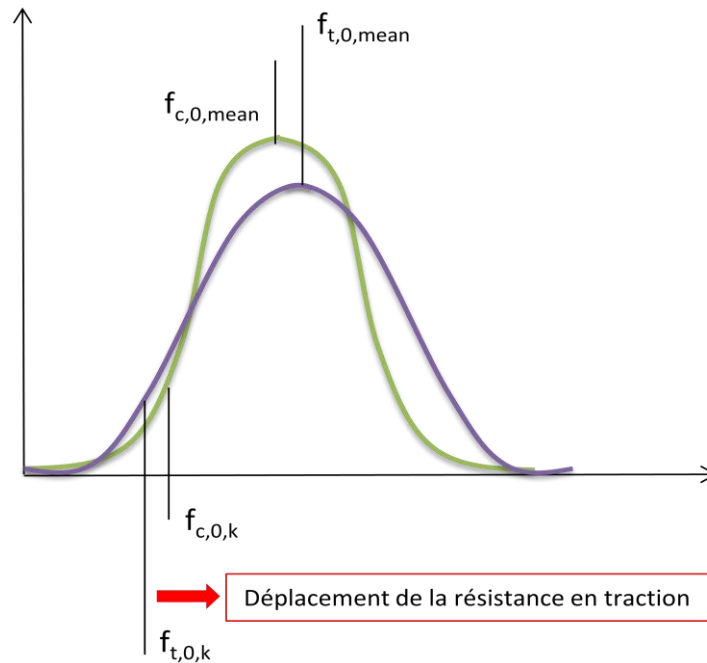


Figure 4 : Rupture d'une éprouvette témoin en flexion quatre points sur le banc d'essai

2.2. Les qualités requises d'un renforcement

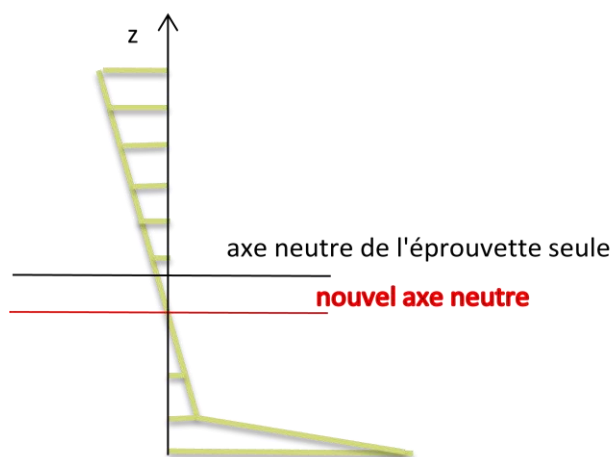
Un renforcement des fibres inférieures doit repousser leur résistance caractéristique en traction. Dans l'idéal, il faudrait que le renforcement repousse cette limite au-delà de la résistance caractéristique en compression des fibres supérieures (cf. Graphique 1). Ainsi, les fibres en compression cèderaient en premier et la rupture se ferait dans la partie supérieure de l'éprouvette.



Graphique 1: Principe de déplacement de la résistance en traction caractéristique

Dans le cas d'un renforcement efficace, au vu des caractéristiques de la fibre de carbone utilisée et en supposant un collage parfait, le diagramme de la contrainte en flexion devrait avoir l'allure présentée sur le Graphique 2.

L'ajout d'un CFRP permettrait d'augmenter la contrainte de flexion encaissable par la fibre tendue. Le CFRP reprendrait alors les efforts de traction auxquels sont soumises les fibres inférieures de l'éprouvette. Ainsi le CFRP permettrait de repousser la limite de la résistance en traction des fibres du bois.



Graphique 2: Diagramme des contraintes de flexion au sein d'une éprouvette renforcée

3. Résultats expérimentaux de la littérature

Des tests de flexion 3 points et de compression réalisés sur des éprouvettes de pin sylvestre et de sapin de dimensions 20x20x300 mm montrent que le renforcement avec un CFRP permet d'accroître le module d'élasticité longitudinale (module d'Young) ainsi que la contrainte maximale appliquée (cf. Tableau 3).

	Sapin	Sapin + CFRP	Ecart	Pin sylvestre	Pin sylvestre + CFRP	Ecart
Test de flexion 3 points 20x20x300 mm						
Module d'élasticité (MPa)	3885,2	5987,7	54,10%	4046,6	6036,7	49,20%
Contrainte maximale (MPa)	54,8	90,5	65,10%	59	76	28,80%
Test de compression						
Module d'Young (MPa)	5262,3	5080	-3,50%	7010,2	6876,1	-1,90%
Contrainte maximale (MPa)	23,9	39,8	66,50%	28,2	42,6	51,10%
Test de flexion 3 points 40x40x300 mm						
Module d'élasticité (MPa)	550	715	30,00%	447,7	748,2	67,12%
Contrainte maximale (MPa)	42,2	48,7	15,40%	40,5	47,5	17,28%
Test de compression						
Module d'Young (MPa)	6775,1	1838,4	-72,87%	5544,3	1571,8	-252,74%
Contrainte maximale (MPa)	38,3	41,2	7,57%	36,5	41,8	12,68%

Tableau 3 : Résultats de tests en flexion trois points et en compression (HALE, et al., 2010)

D'après ces résultats, le module d'Young pour les deux essences et pour les tests en flexion augmente d'environ 50%. Il est intéressant de noter qu'aucun lien entre la section et le renforcement ne se dégage d'après ces résultats. Ce n'est pas le cas pour les tests en

compression puisque les fibres de carbone ne peuvent pas reprendre les efforts de compression.

La variabilité des résultats obtenus pour les tests en compression peut être expliquée par la variabilité naturelle des essences de bois. Les fibres de carbone n'empêchent pas l'écrasement des fibres du bois dans l'axe longitudinal et sont donc inutiles dans ce cas précis.

Dans les deux tests, la contrainte maximale que l'on peut appliquer sur la pièce avant rupture augmente.

Ces résultats sont encourageants, néanmoins dans cette étude les éprouvettes ont été entièrement enveloppées d'un tissu de CFRP, ce qui n'est pas toujours applicable sur chantier, dans le cadre d'une rénovation par exemple. De plus, il a été démontré précédemment que le renforcement des fibres supérieures des éprouvettes, sollicitées en compression, est inutile avec un CFRP.

4. Avantage du CFRP par rapport à d'autres systèmes

D'autres systèmes de renforcement plus courant existent tels que des plaques métalliques (clouées ou vissées). Malgré leur manque d'esthétique, l'ajout de masse qu'ils apportent à la structure, ces systèmes ont fait leurs preuves et largement utilisés.

L'avantage des CFRP est leur utilisation discrète et leur mise en place sans rajout de masse particulier. Mais ce système est encore à l'état de recherche et peu applicable industriellement.

Des inconvénients non des moindres est leur prix ainsi que leur mise en place délicate et contraignante à cause de l'utilisation de résines corrosives.

PARTIE 2 : PREPARATION DES EXPERIENCES

Les éprouvettes renforcées seront testées en flexion quatre points, selon le schéma expérimental de la Figure 5. L'objectif est de déterminer le module d'Young des éprouvettes ainsi que la contrainte maximale de flexion à laquelle elles auront été soumises et de comparer les résultats obtenus avec des éprouvettes témoins non renforcées.

1. Calculs préliminaires

Avant de se lancer dans les expériences, il convient de faire quelques calculs préliminaires afin de pouvoir retrouver le module d'élasticité longitudinale et la contrainte de flexion appliquée avec les données qui seront fournies par le logiciel utilisé.

1.1. Calculs pour les éprouvettes témoins

1.1.1. Calcul de la contrainte de flexion

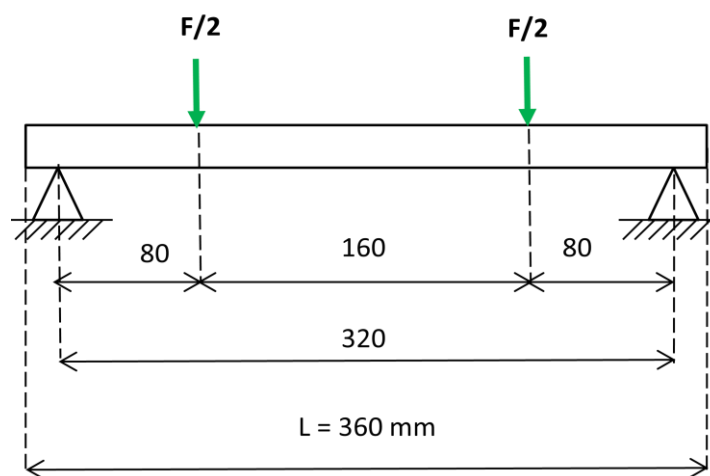


Figure 5 : Schéma de la disposition de l'éprouvette sur le banc d'essai, conformément à la norme B-51-006

D'après les principes de la Résistance Des Matériaux (RDM), les expressions du moment fléchissant et de l'effort tranchant le long de l'éprouvette se trouvent facilement (respectivement Équation 1 et Équation 2).

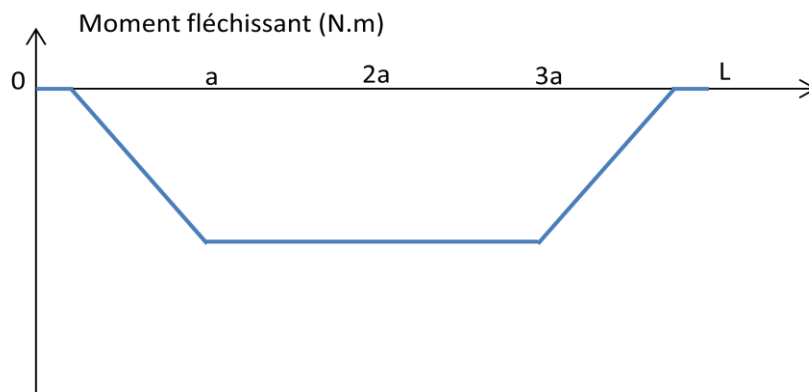
$$M_x = \left\{ -\frac{F}{2} \cdot x \right\}_{0 < x < a} + \left\{ -\frac{F}{2} \cdot a \right\}_{a < x < 3a} + \left\{ \frac{F}{2} (x - L) \right\}_{x > 3a}$$

Équation 1 : Moment fléchissant le long de l'éprouvette soumise à la flexion quatre points

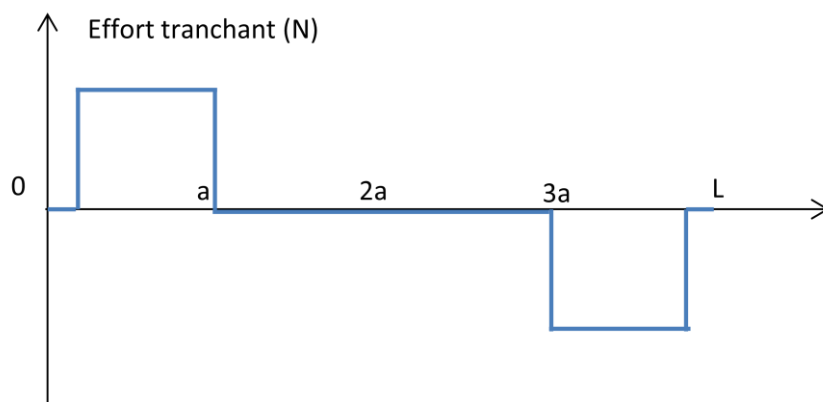
$$T_y = -\frac{M_x}{dx} = \left\{ \frac{F}{2} \right\}_{0 < x < a} + \{0\}_{a < x < 3a} + \left\{ -\frac{F}{2} \right\}_{x > 3a}$$

Équation 2 : Effort tranchant le long de l'éprouvette soumise à la flexion quatre points

Ces équations permettent de tracer les diagrammes du moment fléchissant et de l'effort tranchant (respectivement Graphique 3 et Graphique 4).



Graphique 3 : Diagramme du moment fléchissant pour la flexion quatre points



Graphique 4 : Diagramme de l'effort tranchant pour la flexion quatre points

Le moment maximal est atteint en $x = a$ et reste constant jusqu'à $x = 3a$. La valeur maximale du moment fléchissant est : $M_{max} = -\frac{F.a}{2}$

La contrainte maximale de flexion appliquée sur l'échantillon est donc : $\sigma = \frac{M}{I} \cdot y$
avec $y = \frac{h}{2}$ pour une section rectangulaire homogène :

$$\sigma_{max} = \frac{F.a}{2} \cdot \frac{12}{bh^3} \cdot \frac{h}{2} = \frac{3F.a}{bh^2}$$

Équation 3 : Contrainte de flexion maximale appliquée sur l'éprouvette

1.1.2. Conséquences sur le renforcement

A priori, la contrainte maximale est obtenue à l'endroit où le moment fléchissant est maximal. Aussi, le renforcement avec les CFRP pourrait s'effectuer uniquement entre les deux points d'application des forces. Cette théorie pourrait être intéressante dans le cadre de la rénovation des bâtiments et permettrait d'économiser de la matière (fibres de carbone et résine). C'est pourquoi plusieurs lots d'éprouvettes avec un renforcement au CFRP entre les points $x = a$ et $x = 3a$ seront testés.

1.1.3. Calcul de la contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement appliquée sur l'éprouvette s'écrit comme suit :

$$\tau_{max} = \frac{1,5.V}{b.h} = \frac{1,5 \times F/2}{b.h}$$

Équation 4 : Contrainte de cisaillement maximale appliquée sur l'éprouvette

Cette contrainte de cisaillement est maximale sur la fibre neutre.

1.1.4. Calcul du module d'Young

Après chaque essai, le logiciel renvoie F , la valeur de la force appliquée et $v(a)$, le déplacement de la traverse égal à la valeur de la flèche aux points d'application de la force. Les autres données sont $a = 80mm$, $L = 360mm$ et I le moment quadratique connu d'après la formule suivante : $I = \frac{b.h^3}{12}$ pour une section rectangulaire homogène.

Le module d'Young des éprouvettes peut se déduire de la formule suivante :

$$\ddot{v} = \frac{-M}{E.I}$$

La littérature de RDM fournit la valeur de la flèche aux points d'application des forces (COURBON, et al.) (cf. Équation 5).

$$v(a) = \frac{-F.a^2}{6.E.I} (3L - 4a) = v(3a)$$

Équation 5: Valeur de la flèche aux points d'application des forces dans le cadre d'une flexion quatre points

Le module d'Young peut donc être calculé à partir de l'Équation 6 :

$$E = \frac{F.a^2.(3L - 4a)}{6.v(a).I}$$

Équation 6 : Module d'Young expérimental déterminé à partir de l'Equation 4

1.2. Calculs pour les éprouvettes renforcées

Les éprouvettes renforcées sont composées de deux matériaux, le bois et le CFRP qui lui-même est composé d'une résine et des fibres de carbone. Les équations ci-dessus ne peuvent être utilisées telles quelles, la section mixte doit au préalable faire l'objet d'une caractérisation.

1.2.1. Caractéristiques de la section mixte

- facteur de glissement γ supposé égal à 1

Dans l'idéal les fibres de carbone sont solidaires à la fibre inférieure du bois de l'éprouvette : la liaison est considérée comme parfaite, sans glissement.

- coefficient d'équivalence : $n = \frac{E_{CFRP}}{E_{bois}}$

Le module d'Young du bois sera déterminé à l'aide du lot d'éprouvettes témoins. Le module d'élasticité des fibres de carbone est donné par le fabricant soit 230 000 MPa (MAPEI, 2006). Comme la liaison est considérée comme parfaite, le joint de colle n'altère pas les propriétés de la fibre de carbone appliquée sur le bois.

- aire effective des éprouvettes renforcées :

$$A_{eff} = n \cdot \gamma \cdot A_{CFRP} + A_{bois}$$

$$\text{avec } A_{CFRP} = 20 \times 1,5 = 30 \text{ mm}^2 \text{ et } A_{bois} = 20 \times 20 = 400 \text{ mm}^2$$

- Position de l'axe neutre :

$$z_G = \frac{1}{A_{eff}} \left[n \cdot \gamma \cdot A_{CFRP} \cdot \frac{h_{CFRP}}{2} + A_{bois} \left(h_{CFRP} + \frac{h_{bois}}{2} \right) \right]$$

$$\text{avec } h_{CFRP} = 1,5 \text{ mm et } h_{bois} = 20 \text{ mm}$$

- Distance axe neutre résultant/axes initiaux des matériaux :

$$e_{bois} = z_G - \frac{h_{bois}}{2}$$

$$e_{CFRP} = h_{bois} + \frac{h_{CFRP}}{2} - z_G$$

Équation 7 : Distance des axes neutres des matériaux à la nouvelle fibre neutre

Tous calculs faits, on obtient les distances du

Tableau 4.

	Distance axe neutre/bois (mm)	Distance axe neutre/CFRP (mm)
Epicea	-4,68	15,43
Pin sylvestre	-4,47	15,22
Douglas	-4,66	15,41

Tableau 4 : Distance du nouvel axe neutre par rapport aux axes neutres des deux matériaux seuls

Le nouvel axe neutre se situe dans le bois en dessous de l'axe neutre du bois seul comme schématisé sur la Figure 6.

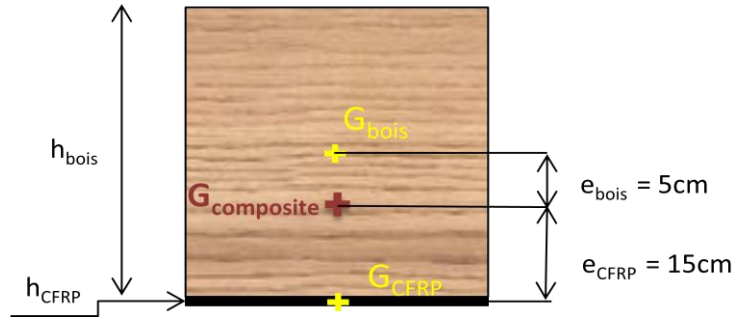


Figure 6 : Position du nouvel axe neutre au sein de l'éprouvette

NB : Dans la réalité, il est évident que le facteur de glissement n'est pas égal à 1 puisque la liaison n'est pas parfaite. On peut en déduire que le module d'Young donné par le fabricant n'est pas aussi important que celui donné par la fiche technique. *A fortiori* le décalage d'axe neutre n'est pas aussi important dans la réalité que dans le cas théorique.

1.2.2. Calcul expérimental de la rigidité effective

Connaissant les paramètres retournés par le logiciel et l'Instron 4467, la rigidité effective pourra être calculée à partir de l'Équation 8, qui est une version de l'Équation 6 adaptée à la section mixte.

$$(EI_{eff}) = \frac{F \cdot a^2 \cdot (3L - 4a)}{6 \cdot v(a)}$$

Équation 8 : Calcul expérimental de la rigidité effective

1.2.3. Calculs du module d'Young du CFRP

Une fois la section mixte caractérisée, le module d'Young peut être appréhendé en passant par les rigidités effectives selon deux méthodes différentes.

- Rigidité effective théorique (OUDJENE, 2012):

$$EI_{eff} = E_{CFRP} \cdot I_{CFRP} + \gamma \cdot E_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot a_{CFRP}^2 + E_{bois} \cdot I_{bois} + E_{bois} \cdot A_{bois} \cdot a_{bois}^2$$

$$\text{Avec : } a_{CFRP} = \frac{h_{CFRP} + h_{bois}}{2} - a_{bois} \text{ et : } a_{bois} = \frac{\gamma \cdot E_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot (h_{CFRP} + h_{bois})}{2 \cdot \gamma \cdot E_{CFRP} \cdot A_{CFRP} + E_{bois} \cdot A_{bois}}$$

Équation 9 : Rigidité effective de l'éprouvette renforcée en tenant compte du glissement

Les calculs théoriques montrent que le renfort à l'aide d'un CFRP augmenterait de 215% en moyenne la rigidité de flexion (cf. Tableau 5). Ce résultat reste à être mis à l'épreuve par l'expérience.

	Modules d'élasticité mesurés (MPa)	El témoins (N.mm ²)	El équivalent (N.mm ²)	Ecart
Epicéa	12766	1,70E+08	5,43E+08	219%
Pin sylvestre	13822	1,84E+08	5,75E+08	212%
Douglas	12877	1,72E+08	5,46E+08	218%

Tableau 5 : Rigidités de flexion théoriques obtenues après renforcement

➤ Rigidité effective expérimentale (SAUVIGNET, 2013):

Le calcul précédent prend en compte le facteur de glissement $\gamma = 1$, qui correspond à une liaison parfaite. Afin de se rapprocher le plus possible à la réalité et de s'affranchir de ce paramètre, le module d'Young des éprouvettes renforcées sera déterminé à partir du théorème de Huygens (cf. Équation 10).

$$(EI)_{eff} = E_{bois} \cdot I_{bois} + E_{bois} \cdot A_{bois} \cdot e_{bois}^2 + E_{CFRP} \cdot I_{CFRP} + E_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot e_{CFRP}^2$$

Équation 10 : Rigidité effective calculée avec le théorème de Huygens

Comme la section de la partie fibre est très faible, l'inertie propre du composite I_{CFRP} peut être négligée.

Le module d'Young de l'éprouvette est donc :

$$(EI)_{eff} = E_{bois} \cdot I_{bois} + E_{bois} \cdot A_{bois} \cdot e_{bois}^2 + E_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot e_{CFRP}^2$$

Équation 11 : Rigidité effective calculée avec le théorème de Huygens après simplification

Le module d'Young du composite CFRP devient :

$$E_{CFRP} = \frac{(EI_{eff\ exp}) - E_{bois} \cdot (I_{bois} + A_{bois} \cdot e_{bois}^2)}{A_{CFRP} \cdot e_{CFRP}^2}$$

Équation 12 : Module d'Young du CFRP calculé d'après le théorème de Huygens

NB : Ce calcul doit être pris avec précaution dans la mesure où, pour déterminer les distances e_{bois} et e_{CFRP} , le module d'Young de la fibre de carbone donné par le fabricant a été utilisé soit 230 000 MPa (en premier lieu pour définir n, le coefficient d'équivalence). De même le facteur de glissement intervient dans le calcul de la section effective A_{eff} . Cependant, ces paramètres interviennent moins que dans l'Équation 9.

1.2.4. Calculs des contraintes de flexion

Le moment fléchissant que doit reprendre l'éprouvette est toujours le même :

$$M_{max} = - \frac{F \cdot a}{2}$$

Cependant les caractéristiques géométriques ont changé et l'axe neutre a subi un décalage dont on doit tenir compte pour le calcul de la contrainte de flexion (SAUVIGNET, 2013).

- Calcul de la contrainte due au moment fléchissant :

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 \times E_i \times h_i \times M_{max}}{EI_{eff}} = \frac{0,25 \times E_i \times h_i \times F \times a}{EI_{eff}}$$

- Calcul de la contrainte due à la liaison :

$$\sigma_i = \frac{\gamma \times E_i \times e_i \times M_{max}}{EI_{eff}} = \frac{0,5 \times \gamma \times E_i \times e_i \times F \times a}{EI_{eff}}$$

- Contrainte résultante :

$$\sigma_{m,d,i} = \sigma_{m,i} + \sigma_i$$

Équation 13 : Contraintes de flexion au sein de l'éprouvette renforcée

Ces calculs sont à effectuer séparément pour le CFRP et pour le bois.

1.2.5. Calcul de la contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement maximale se calcule au niveau de la fibre neutre (SAUVIGNET, 2013) selon la formule suivante :

$$\tau_{max} = V \cdot \frac{(ES)_{0,eff}}{b_0 \cdot (EI)_{eff}} = \frac{F}{2} \cdot \frac{(E_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot e_{CFRP} + E_{bois} \cdot b_{bois} \cdot e_{bois} \cdot (z_G - h_{CFRP} - \frac{e_{bois}}{2}))}{b_0 \cdot (EI)_{eff}}$$

Équation 14 : Contrainte de cisaillement maximale au sein de l'éprouvette renforcée

2. Protocoles expérimentaux

Les essais de flexion quatre points réalisés ont été inspirés de la norme NB-51-008 : Essai de flexion statique. En effet, aucune norme pour le bois n'existe concernant les tests en flexion quatre points avec un matériau composite (cf. Figure 7).

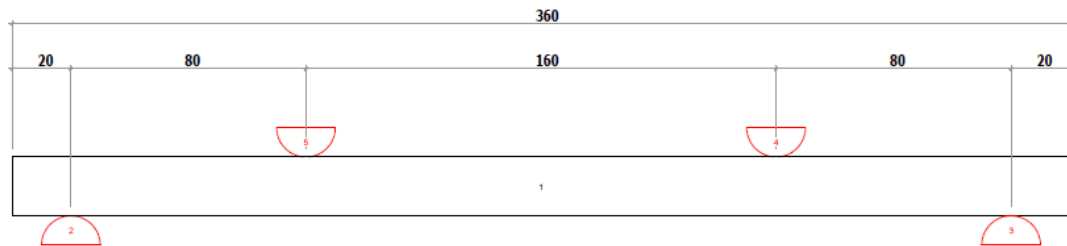


Figure 7 : Schéma de positionnement des éprouvettes sur le banc d'essai

2.1. Choix des essences et des renforcements étudiés

Les travaux ont été effectués sur trois essences de bois utilisées dans le domaine de la construction : l'Epicéa, le Pin sylvestre et le Douglas.

Pour chaque essence, trois schémas de renforcement d'éprouvettes seront étudiés. Deux types de résine époxy ont été utilisés : une résine pour béton et une résine pour bois. Chaque lot comprend dix éprouvettes. La résine pour béton a été la première mise à disposition pour les essais. Dans un souci d'obtenir des résultats rapidement, avant de pouvoir obtenir de la résine pour bois, elle a tout de même été utilisée pour deux schémas de renforcement.

1. Lot témoin sans renforcement

Dans ce lot, les échantillons ont juste été usinés et repérés afin de faciliter les différentes mesures à réaliser.

2. Lot 1 : renforcement sur la face inférieure uniquement entre $x=a$ et $x=3a$

Ce lot concerne la résine époxy pour bois (cf. Figure 8).

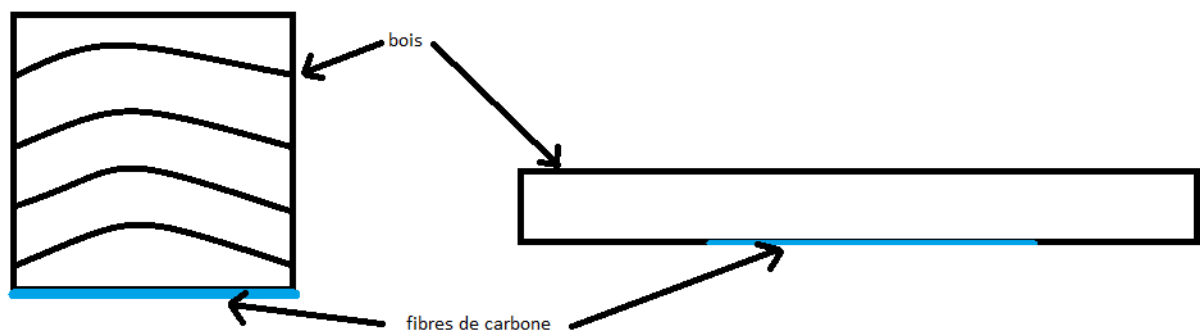


Figure 8 : Schéma de renforcement du lot 1

3. Lot 2 : renforcement sur la face inférieure uniquement sur toute la longueur

Ce lot a été préparé pour la résine époxy pour bois et pour la résine époxy pour béton (cf. Figure 9 et Figure 10).

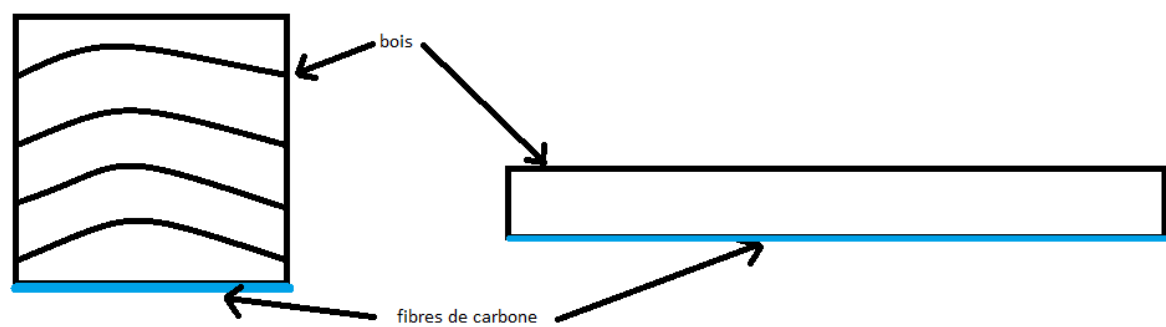


Figure 9: Schéma de renforcement du lot 2

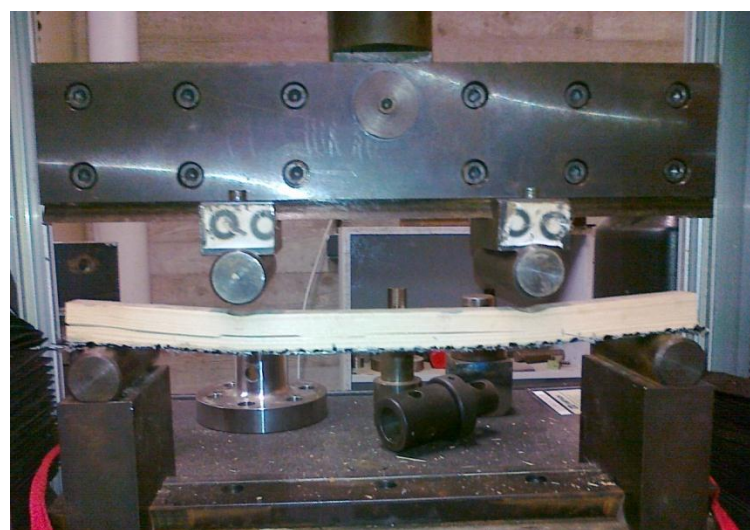


Figure 10: Illustration du renforcement du lot 2 lors d'un essai

4. Lot 3 : renforcement sur les faces inférieures et latérales sur toute la longueur

Ce lot a été préparé avec la résine béton (cf. Figure 11 et Figure 12).

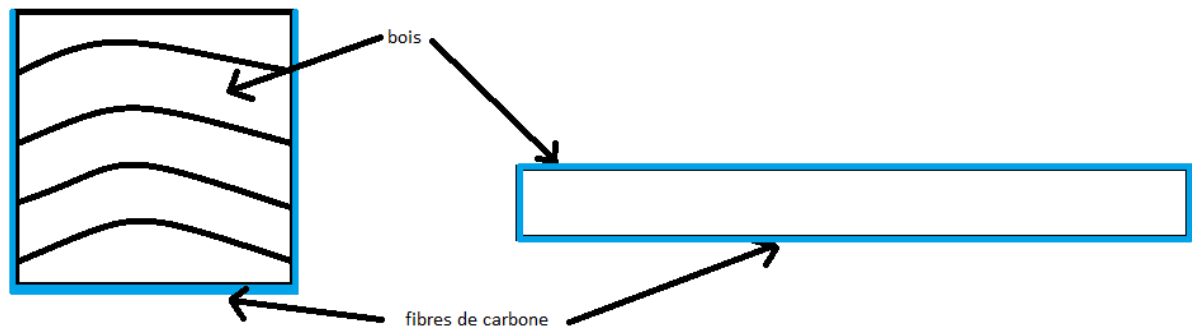


Figure 11: Schéma de renforcement du lot 3

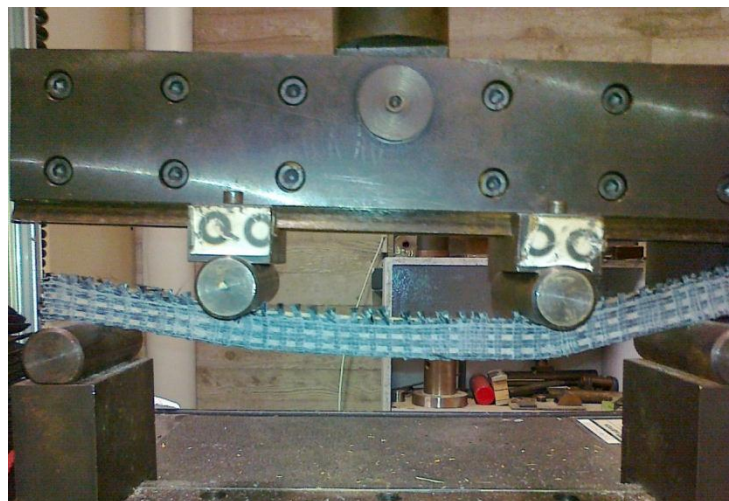


Figure 12: Illustration du renforcement du lot 3 lors d'un essai

2.2. Préparation des éprouvettes

La réalisation des éprouvettes a été effectuée à partir de plots provenant du parc à bois de l'école. Chacun des échantillons provient du même plateau donc il existe une certaine homogénéité entre les échantillons. Les impuretés ont pu être purgées (nœuds, poches de résine, flash).

Les éprouvettes ont été usinées afin d'obtenir les dimensions correspondantes à la norme NB 51-008, soit 20x20x360mm. Au total, cent cinquante éprouvettes ont été réalisées.

Deux méthodes d'encollage ont été retenues : une pour la résine pour béton et une autre pour la résine bois.

La résine époxy béton a été associée à un durcisseur à hauteur de 20%. Le temps de vie en pot étant assez réduit, il convenait de faire plusieurs mélanges en petite quantité. Mais l'application devait se faire très rapidement et il était plutôt difficile de respecter parfaitement le grammage recommandé par le fabricant. Néanmoins, l'application en deux couches (pré-encollage, dépôt des fibres et couche finale) a été respectée. Cette technique devait permettre l'imprégnation à cœur des fibres. Ce qui n'a pas toujours été constaté sur l'ensemble des échantillons.

Le temps de polymérisation et de stabilisation était d'une semaine dans des conditions de température et d'humidité de la salle d'essai (conformément à la notice d'utilisation).

Pour la résine époxy bois, suite à plusieurs conseils d'autres groupes utilisant également cette résine, le mode opératoire suivant a été observé. Une première couche d'encollage a été appliquée à chaud afin de faciliter la pénétration de la résine dans la partie bois. Ensuite un temps de polymérisation a été respecté (20min dans une étuve à 65°C). Cette opération nous a été conseillée dans le but de fabriquer un joint de colle le plus résistant possible en imprégnant de résine les fibres du bois avant l'application des fibres de carbone. L'étape suivante a consisté en l'application des fibres de carbone préalablement imbibées de résine (à chaud). Ici l'imprégnation à cœur des fibres semble plus facilement obtenue que pour la résine béton. Au moment de l'application, il faut poser les fibres de carbone de façon à les tendre le plus possible.

2.3. Protocole de chargement

Les différents appuis et les points d'application des forces sont présentés sur la Figure 7.

La norme NB 51-008 est un test destructif : les éprouvettes ont été sollicitées de façon continue (sans palier de chargement) jusqu'à rupture.

D'après la norme, l'essai devait durer 1min30s +/- 30s. Notre lot d'éprouvettes témoin a donc servi d'étalonnage afin de déterminer la vitesse de déplacement du banc. La vitesse retenue pour tester les éprouvettes témoins était de 12 mm/sec.

Afin que les tests des éprouvettes renforcées se situent dans le même intervalle de temps normé, la vitesse de déplacement de la traverse a été revue à la hausse : 15 mm/sec.

2.3 Essais

Les essais sont réalisés jusqu'à la rupture des éprouvettes (cf. Figure 13).

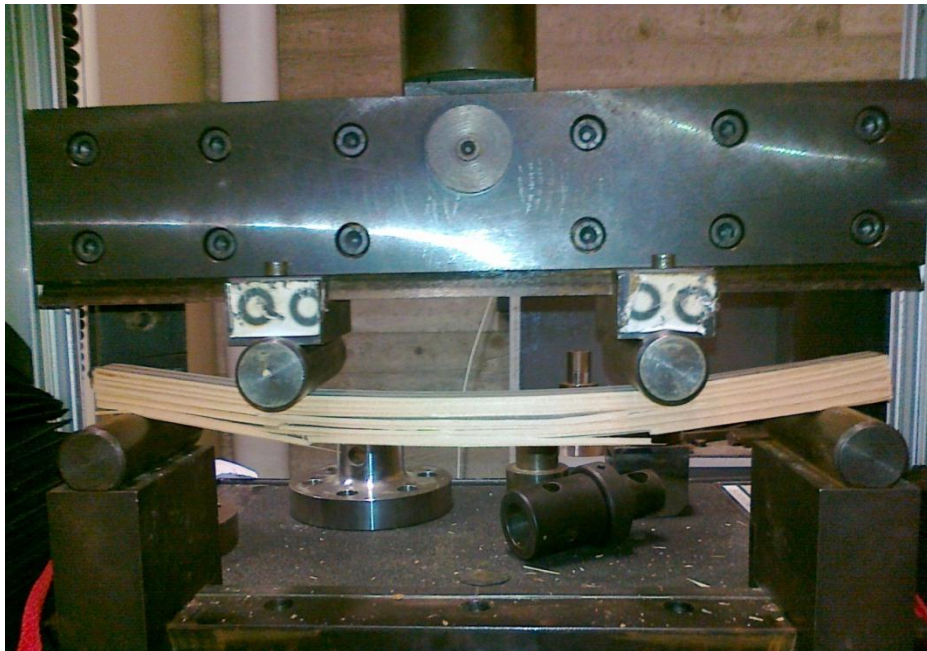


Figure 13 : Rupture d'une éprouvette de Douglas lors d'un essai

2.4 Résultats fournis par le logiciel

Pour chacun des tests, les valeurs des déplacements et des forces nous sont transmis. Suite à un traitement sous Excel, une interprétation des résultats devient possible.

PARTIE 3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

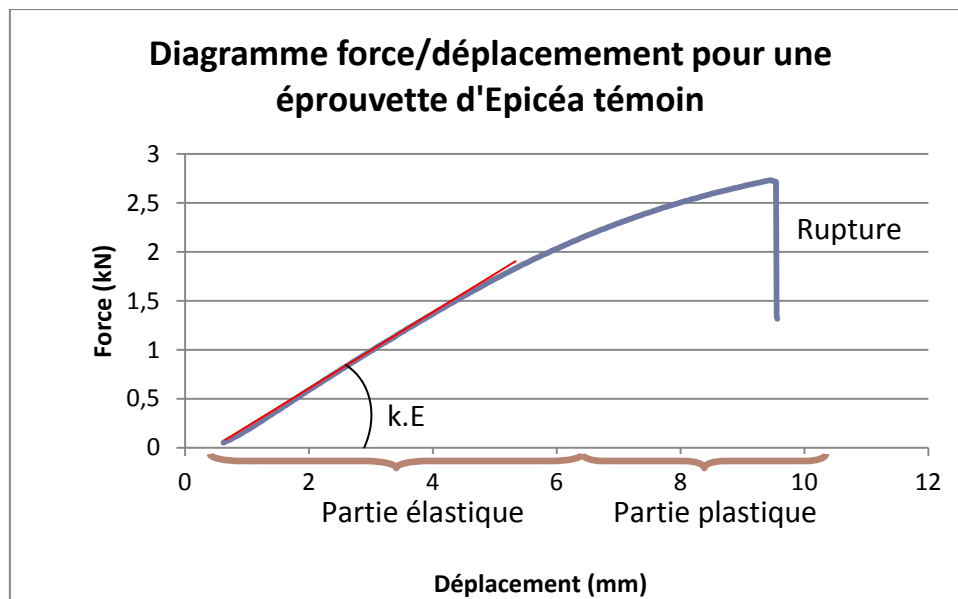
Cette partie du rapport présente les résultats des expériences menées ainsi que leurs interprétations et conclusions. Les résultats présentés sont principalement ceux obtenus avec le CFRP résine époxy bois/fibre de carbone. Les résultats obtenus avec la résine époxy pour béton seront exposés dans un paragraphe ultérieur au sein de cette partie.

1. Résultats : Modules d'Young

Deux méthodes seront utilisées pour déterminer le module d'Young des éprouvettes : une première visuelle à l'aide de graphiques et la seconde calculatoire.

1.1. Méthode visuelle avec les graphiques Force/Déplacement

Dans un premier temps, les résultats sont interprétés graphiquement à partir des courbes force/déplacement fournies par l'Instron 4467 lors des essais comme sur le Graphique 5.

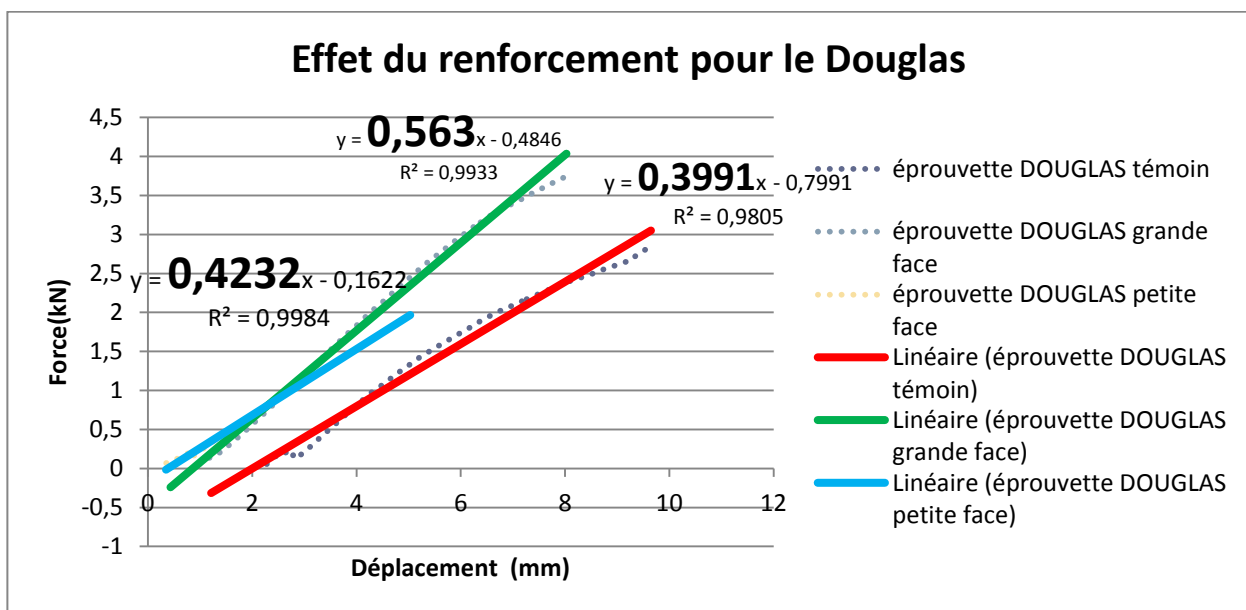


Graphique 5 : Diagramme force/déplacement typique obtenu après un essai

Le module d'Young se retrouve graphiquement dans la partie élastique de la courbe. En effet, dans cette partie, l'équation de la courbe est de la forme $F = k.E.u$ avec u le déplacement mesuré, F la force appliquée et k une constante.

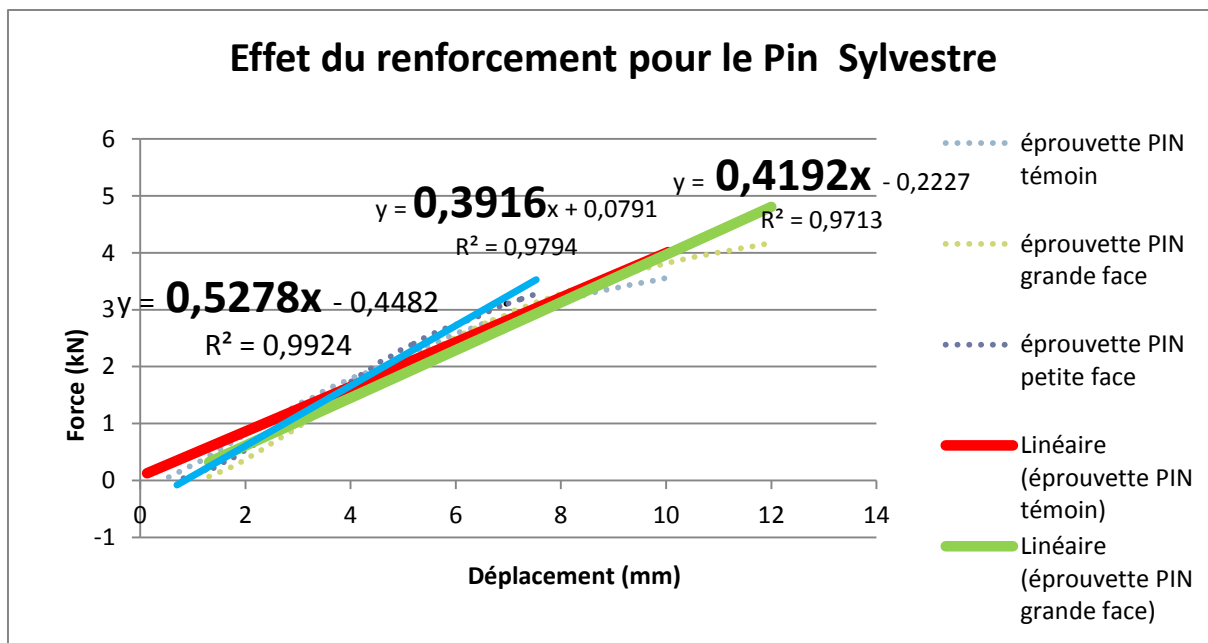
Ainsi pour évaluer qualitativement les effets du renforcement, il suffit d'étudier les pentes de la partie élastique des courbes entre elles. Une augmentation du module d'Young impliquerait une augmentation de la pente dans cette partie.

Pour chaque essence et chaque renforcement, une courbe moyenne a été obtenue pour la partie élastique uniquement, ces résultats sont représentés dans les graphiques ci-dessous. Des courbes de tendance ont permis de mettre en évidence les coefficients directeurs des droites.



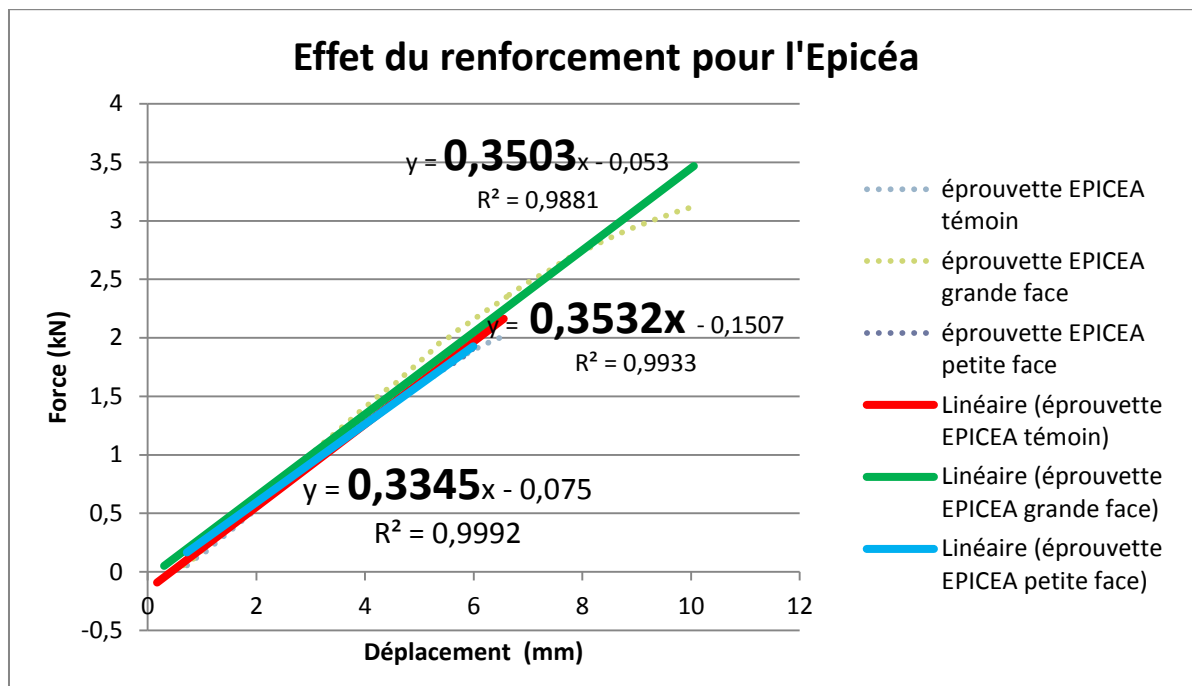
Graphique 6 : Courbes de tendance obtenues pour la partie élastique des éprouvettes de Douglas

Le Graphique 6 montre une augmentation du module d'Young plutôt efficace pour le Douglas. L'éprouvette renforcée sur toute sa face inférieure présente le module d'Young le plus élevé, +15% par rapport au témoin contre +5% pour l'éprouvette renforcée sur la moitié de sa face inférieure.



Graphique 7 : Courbes de tendance obtenues pour la partie élastique des éprouvettes de Pin sylvestre

Le Graphique 7 montre également une augmentation du module d'Young pour les éprouvettes de Pin sylvestre. Ici c'est l'éprouvette renforcée sur la moitié qui présente l'augmentation la plus importante +36% contre +8 % pour l'éprouvette renforcée sur toute la longueur.



Graphique 8 : Courbes de tendance obtenues pour la partie élastique des éprouvettes d'Epicéa

Le Graphique 8, contrairement aux graphiques précédents, montre non pas une augmentation mais une diminution de la valeur du module d'Young des éprouvettes renforcées par rapport aux éprouvettes témoins. Cela dit cette diminution est minime puisqu'elle atteint -0,8% pour les éprouvettes renforcées sur toute la longueur et -5% pour l'autre renforcement.

La méthode visuelle ne permet pas de conclure sur l'amélioration du module d'Young due au CFRP. Il est nécessaire de donner des valeurs précises du module d'Young des éprouvettes grâce à la méthode suivante.

1.2. Méthode calculatoire

Cette méthode repose sur les calculs préliminaires présentés dans la partie 2 de ce dossier.

L'interprétation des résultats obtenus par l'Instron 4467 concernant les éprouvettes témoins n'a pas posé de problème particulier. Les modules obtenus ont été calculés à l'aide de l'Équation 6 et correspondent aux ordres de grandeurs proposés dans la littérature pour ces essences (cf. Graphique 9).

Dans le cas des renforcements, l'interprétation des résultats a été plus délicate. En effet, la rigidité effective est aisée à retrouver grâce à l'Équation 8 mais pour retrouver le module d'Young de l'éprouvette renforcée, il faut diviser la quantité (EI) par l'inertie effective de la nouvelle section (à l'aide de l'Équation 15). Or en effectuant ce calcul, le module obtenu est inférieur à 1 000 MPa.

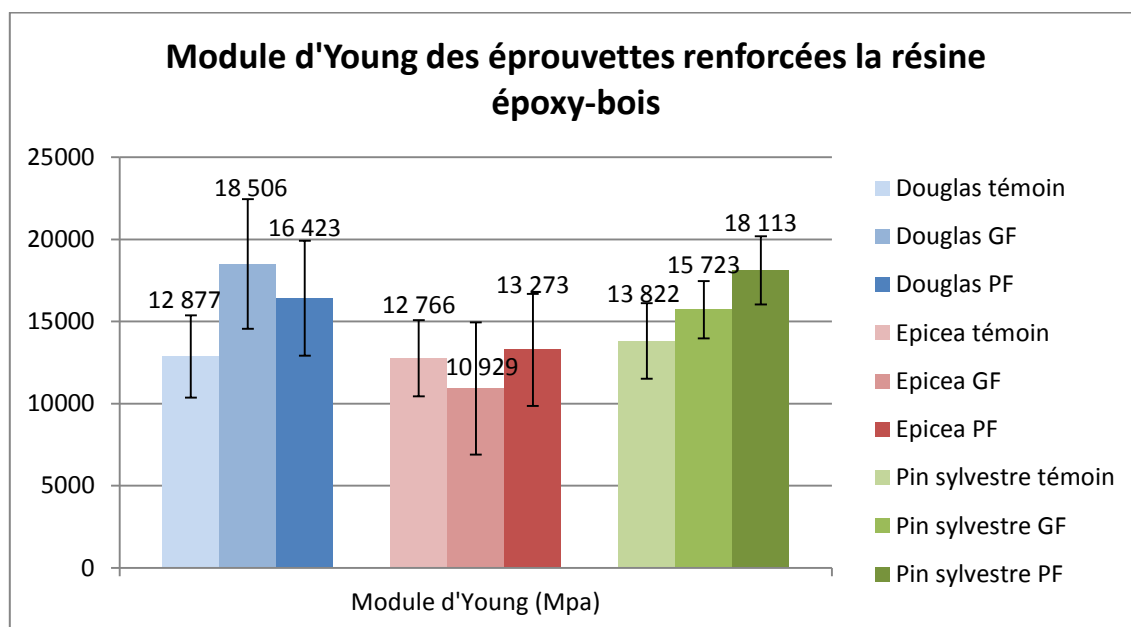
$$I_{eff} = I_{bois} + A_{bois} \cdot e_{bois}^2 + A_{CFRP} \cdot e_{CFRP}^2$$

Équation 15 : Inertie effective de l'éprouvette renforcée en négligeant l'inertie propre du CFRP

Aussi les résultats ci-dessous ont été obtenus en divisant la quantité (EI) par l'inertie du bois seule $I_{bois} = \frac{b \cdot h^3}{12}$. En effet, comme la section de CFRP ajoutée à l'éprouvette est minime et le décalage d'axe également (cf.

Tableau 4 et Figure 6), les termes comprenant les distances à l'axe neutre ont été négligés.

Cela dit, les comparaisons peuvent s'effectuer avec les rigidités de flexion, puisque pour chaque éprouvette, les rigidités sont divisées par la même quantité I_{bois} . Mais il est plus intuitif de comparer des modules d'élasticité.



Graphique 9 : Bilan des modules d'Young calculés avec la résine époxy bois

Modules d'Young (MPa)	Témoin	Renforcement	Renforcement
		PF	GF
Douglas	12877	27,5%	43,7%
Epicea	12766	4,0%	-14,4%
Pin sylvestre	13822	31,0%	13,8%

Tableau 6 : Valeurs de module d'Young obtenues après essai résine époxy bois

Le renforcement a été efficace sur les éprouvettes de Douglas et de Pin sylvestre mais peu significatif pour chacune des essences (les barres d'écart-type ont toujours un domaine en commun cf. Graphique 9). Les éprouvettes d'Epicea ne présentent aucune d'amélioration quant à l'application du CFRP.

Cette étude calculatoire est cohérente et confirme les résultats obtenus avec la méthode graphique. Aucun des deux schémas de renforcement ne se distingue quant à l'amélioration du module d'Young.

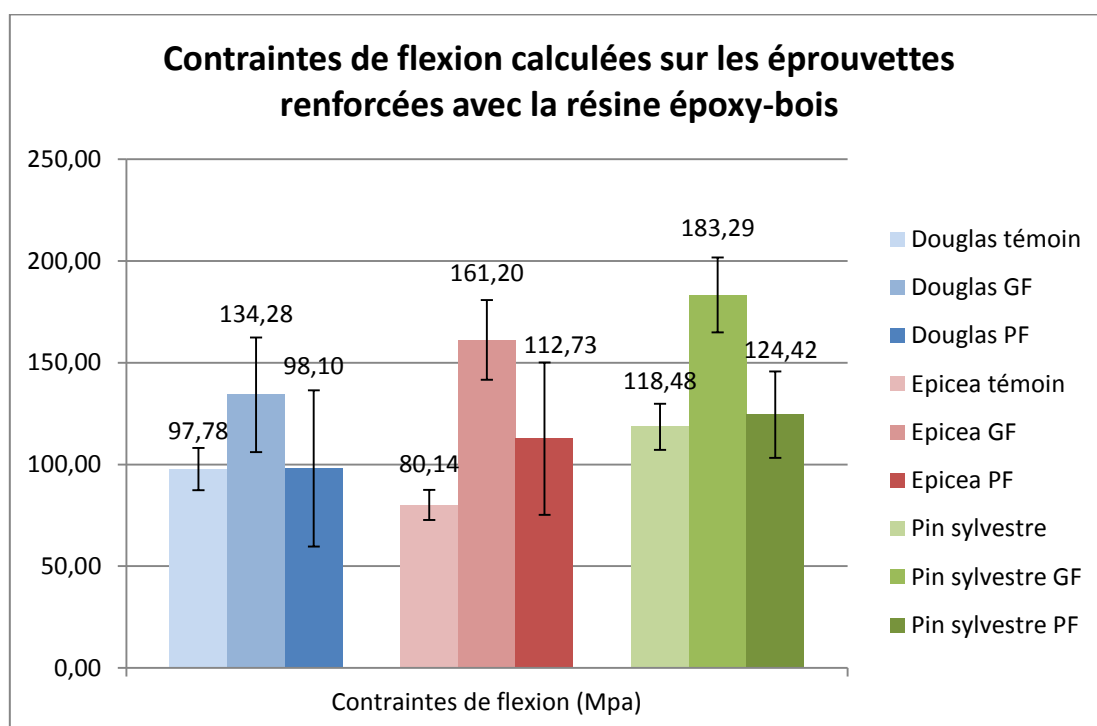
L'étude du renforcement ne peut se limiter qu'à l'étude du module d'Young, les contraintes de flexion et de cisaillement au sein de l'éprouvette sont également à prendre en compte.

2. Contraintes de flexion et de cisaillement

2.1. Contraintes de flexion

Pour les éprouvettes témoins, les calculs ont été faits grâce à l'Équation 3. Les calculs des contraintes de flexion pour les éprouvettes renforcées ont été effectués à l'aide de l'Équation 13.

NB : Le calcul de la contrainte de flexion au niveau de la liaison prend en compte le facteur de glissement et le décalage de l'axe neutre. Ce calcul est donc à relativiser, la contrainte calculée est surestimée par rapport à la contrainte réelle.



Graphique 10 : Contraintes de flexion maximales calculées pour les éprouvettes

En règle générale, seul le renforcement effectué sur toute la longueur permet une augmentation de la contrainte de flexion appliquée (cf. Graphique 10). Les écarts de la contrainte de flexion appliquée par rapport aux éprouvettes témoins sont présentés dans le Tableau 7.

Contraintes de flexion (MPa)	Témoins (MPa)	Renforcement PF (MPa)	Ecart	Renforcement GF (MPa)	Ecart
Douglas	97,78	98,10	0%	134,28	37%
Epicéa	80,14	112,73	41%	161,20	101%
Pin sylvestre	118,48	124,42	5%	183,29	55%

Tableau 7 : Contraintes de flexion appliquée sur les éprouvettes

L'application d'un CFRP sur toute la longueur tendue de l'éprouvette permet bien un renforcement. Le demi-renforcement par CFRP n'est pas aussi performant puisque le CFRP ne peut pas reprendre toute la contrainte de flexion maximale. En effet, il faudrait ancrer le CFRP en amont des points d'application des forces (où le moment est maximal cf. Graphique 3) afin d'être efficace sur toute la partie de l'éprouvette où la contrainte est maximale.

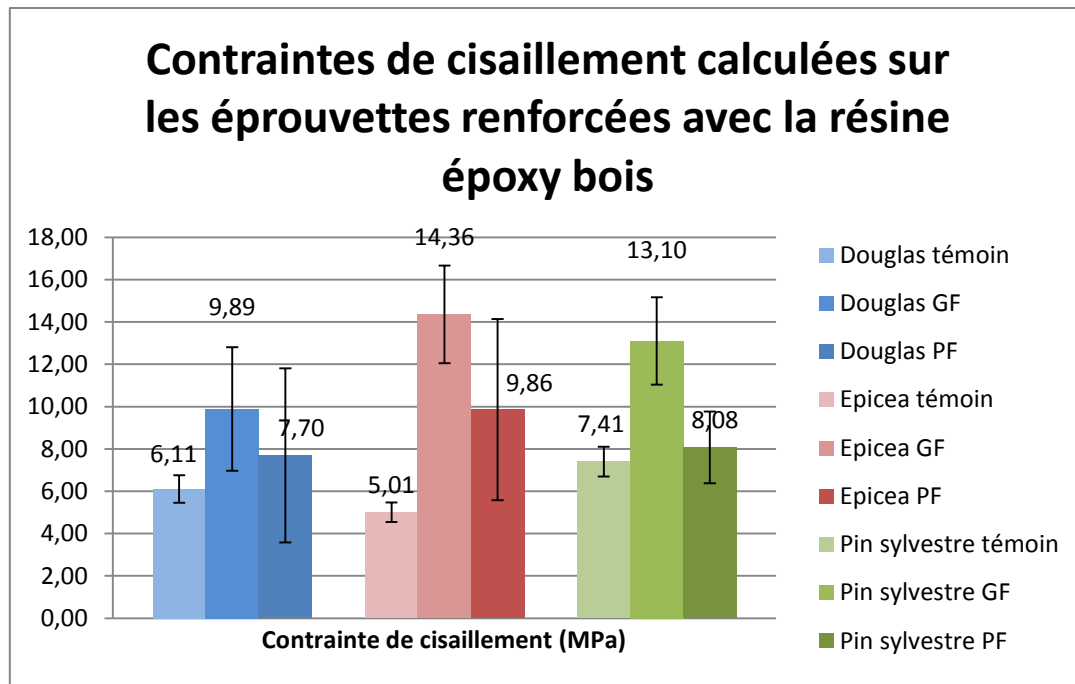
L'augmentation de la contrainte de flexion montre bien un renforcement puisque le seul paramètre variable qui pourrait expliquer cela est la force appliquée (cf. Équation 13). En effet, les caractéristiques (I et y) sont supposés constantes.

2.2. Contraintes de cisaillement

Pour les éprouvettes témoins, les calculs ont été faits grâce à l'Équation 4. Les calculs des contraintes de cisaillement pour les éprouvettes renforcées ont été effectués à l'aide de l'Équation 14.

De même que pour les contraintes de flexion, seul le renforcement sur toute la face inférieure des éprouvettes augmente de façon significative la contrainte de cisaillement appliquée sur les éprouvettes. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la force appliquée : si la contrainte de flexion augmente, il est logique que la contrainte de cisaillement augmente également.

Par contre, il est intéressant de déterminer les contraintes de cisaillement au niveau du joint de colle, car celui-ci est sollicité entre deux matériaux aux caractéristiques bien différentes.



Graphique 11: Contraintes de cisaillement calculées au sein de l'éprouvette

3. Détermination de l'influence du joint de colle

Au vu des résultats ci-dessus, il est évident que les hypothèses effectuées sur la liaison entre le CFRP et le bois ne sont pas corroborées par les expériences.

3.1. Détermination du facteur de glissement réel

3.1.1. Calculs du facteur de glissement

Il convient de déterminer le facteur de glissement à partir des valeurs de rigidités effectives expérimentales et à l'aide de l'Équation 9 est utilisée dans laquelle il est défini comme suit :

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{\text{bois}} \cdot A_{\text{bois}} \cdot s}{k \cdot L^2}}$$

Avec s l'espacement des connecteurs, non pris en compte dans le cas d'un assemblage collé.

Équation 16 : Définition du facteur de glissement

Grâce à l'Équation 16, le module de glissement de l'assemblage, ici du joint de colle, peut être retrouvé (cf. Tableau 8).

	Renforcement petites faces		Renforcement grandes faces	
	facteur de glissement γ	module de glissement k	facteur de glissement γ	module de glissement k
Douglas	0,06123	8,14	0,09809	13,58
Epicea	0,008184	1,02	0	-
Pin sylvestre	0,073204	10,59	0,031679	4,38

Tableau 8 : Valeurs des facteurs et modules de glissement d'après les valeurs expérimentales

Plus le facteur est proche de 0 et moins la liaison est efficace. Ici pour l'Epicea, le renforcement est quasi-inexistant, la fibre de carbone ne travaille pas.

3.1.2. Distances réelles par rapport à l'axe neutre

Par ailleurs, en reprenant ces valeurs de facteurs de glissement, les valeurs réelles du décalage de l'axe neutre sont trouvées à partir de l'Équation 7 (cf. Tableau 9):

	Renforcement petites faces		Renforcement grandes faces	
	Distance axe neutre/bois (mm)	Distance axe neutre/CFRP (mm)	Distance axe neutre/bois (mm)	Distance axe neutre/CFRP (mm)
Douglas	0,69	10,06	0,25	10,50
Epicea	1,38	9,37	1,50	9,25
Pin sylvestre	0,60	10,15	1,09	9,66

Tableau 9: Valeurs réelles du décalage de l'axe neutre des éprouvettes renforcées

Les valeurs réelles du décalage de l'axe neutre montrent que celui-ci ne se décale que très peu vers le bas (moins d'1 mm en moyenne). Ainsi, l'approximation faite en hypothèse du calcul du module d'Young des éprouvettes renforcées (cf. Équation 11) se trouve justifiée.

3.2. Contrainte de cisaillement dans le joint de collage

La contrainte de cisaillement au niveau du joint de colle peut être calculée grâce à l'Équation 17 (SAUVIGNET, 2013).

$$\tau_{colle} = V \cdot \frac{E_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot e_{CFRP}}{b_{c,CFRP} \cdot (EI)_{eff}} = \frac{F}{2} \cdot \frac{E_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot e_{CFRP}}{b_{c,CFRP} \cdot (EI)_{eff}}$$

Équation 17 : Contrainte de cisaillement au niveau du joint de colle

Contrainte de cisaillement (MPa)	Renforcement PF	Renforcement GF
Douglas	1,10	1,08
Epicea	1,86	2,78
Pin sylvestre	0,90	2,12

Tableau 10 : Valeurs de la contrainte de cisaillement au niveau du joint de colle

NB : La norme ASTM D1184-69 permet de vérifier la résistance au cisaillement des plans de collage grâce à un test de flexion trois points sur une éprouvette présentant un faible élanement. Ainsi la rupture est due uniquement aux contraintes de cisaillement (JODIN, 1999).

3.3. Interprétation des résultats obtenus

➤ Module d'Young

Dans le cas de l'Épicéa, le facteur de glissement est très proche de zéro, c'est-à-dire que la fibre de carbone n'est pas considérée comme solidaire du bois de l'éprouvette : le renforcement n'est pas effectif.

Ceci explique les valeurs du module d'Young obtenues d'après nos expériences (Tableau 6) : l'Épicéa présente une variation de 0% et de -14% respectivement pour les éprouvettes renforcées sur la demi-face et la grande longueur. Le résultat de 0% indique que le CFRP n'a pas été efficace et que seul le bois a travaillé, comme sur les éprouvettes témoins.

Le résultat de -14% ne peut pas s'expliquer par la variabilité de résistance au sein de l'essence, d'autant plus que les éprouvettes provenaient d'une même planche. Une explication de ce résultat pourrait être l'influence de la colle, qui rigidifie la face inférieure de l'éprouvette et la rend ainsi plus « cassante », ne pouvant pas contribuer à l'augmentation du module d'élasticité.

En ce qui concerne les deux autres essences étudiées, les valeurs de glissement sont de l'ordre du centième. Cet ordre de grandeur est suffisant pour obtenir une augmentation du module d'Young mais celle-ci n'est pas significative (cf. Graphique 9).

➤ Contraintes de flexion

Même pour les éprouvettes d'Epicéa, une augmentation de la contrainte de flexion a été calculée (cf. Tableau 7). Sachant que le module d'Young de l'éprouvette composite n'a pas pu contribuer à cela, il est possible que l'augmentation de la contrainte soit due exclusivement au joint de collage.

En effet, le joint de colle a pu rendre la fibre inférieure de l'éprouvette plus rigide, la rendant ainsi plus résistante à la traction. Cette contribution de la colle a un revers puisqu'en rigidifiant la fibre inférieure, elle la rend aussi plus cassante et plus sensible au cisaillement (dont les valeurs sont regroupées dans le tableau). Cette hypothèse peut expliquer les cassures obtenues après rupture au niveau de la fibre de carbone qui a été littéralement cisailée par les fibres du bois (cf. Figure 14).



Figure 14 : Illustration du cisaillement dans l'éprouvette

➤ Position de la colle sur les éprouvettes

Le fait que les éprouvettes renforcées sur toute sur face inférieure aient une plus grande résistance au cisaillement et à la flexion s'explique par la colle qui est présente sur toute la longueur et contribue ainsi à reprendre de façon homogène les efforts de traction auxquels la fibre inférieure du bois est soumise.

4. Améliorations possibles

Plusieurs améliorations du mode opératoire présenté ci-dessus peuvent être envisagées. En effet, une seule section a été utilisée conformément à la norme NB 51-008. Or cette norme ne concerne que la flexion quatre points d'une éprouvette en bois mais pas d'un composite. Ainsi pour un matériau composite les dimensions peuvent avoir un impact sur le renforcement. A la suite d'un essai totalement hors norme, une section de 10x100x700mm a été renforcée (cf. Figure 15 et Figure 16). Mais à travers des tests de flexion et une analyse qualitative, le renforcement de la pièce semble de meilleure qualité que ceux réalisés précédemment. De plus certains auteurs ont effectué des tests de résistance en flexion trois points sur des poutres de dimensions 40*40*300 (HALE, et al., 2010) mais aussi des poutres coniques (à base circulaire) de (363-305) x9140mm (LOPEZ-ANIDO, et al., 2003).



Figure 15 : Section hors norme renforcée



Figure 16 : Illustration test hors norme

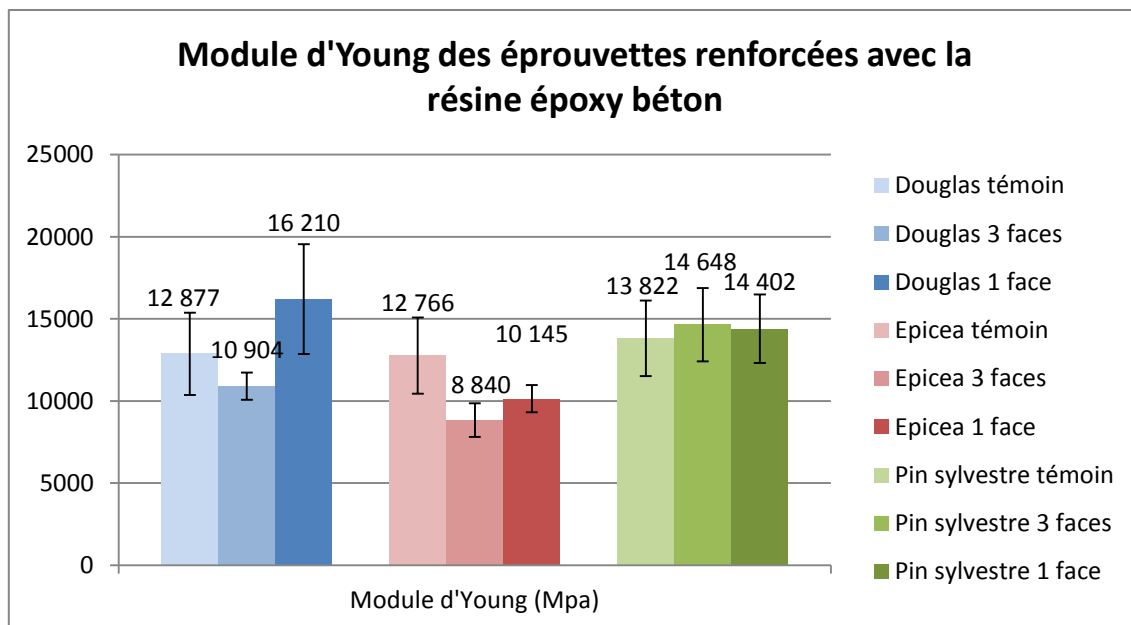
L'essence est aussi un facteur important de variabilité des essais. Le renforcement est majoritairement prévu pour la restauration de bâtiments anciens et les essences les plus utilisées autrefois en construction étaient le chêne et le châtaigner. Or ces essences comportent des thylles qui obstruent les pores des vaisseaux. Cette fonction permet la protection du bois contre l'humidité donc cela peut avoir un impact sur l'imprégnation du bois vis-à-vis de la résine. Ainsi on obtient des épaisseurs de films de colle très fines mais peut-être pas assez adhérentes au support. D'autre part, pour des films très fins, l'humidité de l'environnement a un impact sur la résine époxy (COGNARD, 2000).

Une autre possibilité d'amélioration concerne la matrice. Dans cette étude, la résine époxy était imposée pour ses caractéristiques et sa robustesse. Mais d'autres colles pourraient peut-être la remplacer. Plusieurs facteurs sont à prendre en compte, notamment la toxicité de certains des composants de la résine et /ou du durcisseur. De plus, son application à chaud et sa polymérisation peuvent avoir des conséquences sur les propriétés mécaniques du bois au niveau du joint de colle.

5. Résultats avec la résine époxy béton

5.1. Module d'Young

L'obtention des modules d'Young s'est effectuée de la même façon que pour la matrice précédemment étudiée. Les éprouvettes présentaient deux schémas de renforcement différents sur toute leur longueur : sur la face tendue uniquement ou sur la face tendue et les deux faces latérales de l'éprouvette (trois faces).



Graphique 12 : Bilan des modules d'Young avec la résine époxy béton

Modules d'Young (MPa)	Témoin	Renforcement 3 faces	Renforcement 1 face
Douglas	12877	-15,3%	25,9%
Epicea	12766	-30,8%	-20,5%
Pin sylvestre	13822	6,0%	4,2%

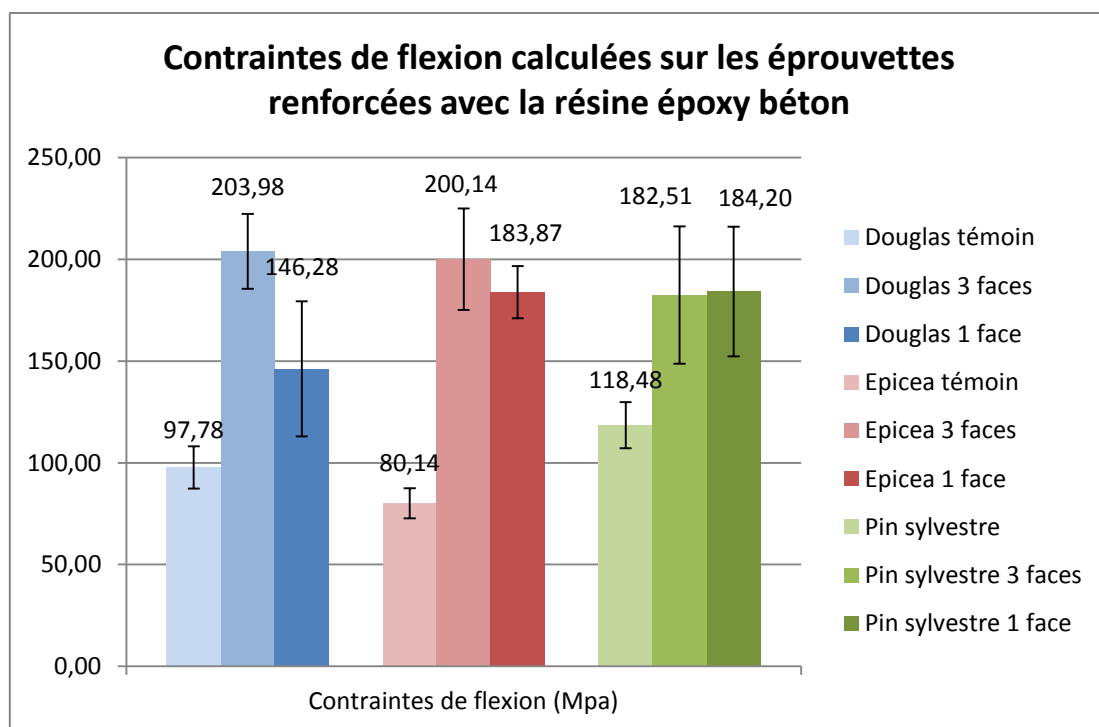
Tableau 11 : Valeurs de module d'Young obtenues après essai résine époxy béton

Avec cette matrice, le CFRP n'améliore pas et même diminue dans la plupart des cas le module d'Young des éprouvettes (cf. Graphique 12 et Tableau 11).

5.2. Contraintes de flexion

Les contraintes de flexion ont été obtenues de la même façon que pour les éprouvettes renforcées avec la résine époxy pour bois.

L'utilisation de cette résine béton permet une augmentation de la contrainte appliquée (cf. Graphique 13) par rapport à la résine bois. Les écarts de la contrainte de flexion appliquée sont présentés dans le Tableau 12.



Graphique 13 : Contraintes de flexion maximales calculées pour les éprouvettes avec résine béton

Contraintes de flexion (MPa)	Témoin	Renforcement 3 faces	Renforcement 1 face
Douglas	97,78	108,6%	49,6%
Epicéa	80,14	149,7%	129,4%
Pin sylvestre	118,48	54,0%	55,5%

Tableau 12 : Contraintes de flexion appliquée sur les éprouvettes avec résine béton

Le renforcement est efficace pour les deux schémas de renforcement sans distinction de performance de l'un par rapport à l'autre.

5.3. Valeurs réelles du facteur de glissement

Avec cette résine, les facteurs de glissement réels sont en en-deçà des valeurs obtenues pour les facteurs de glissement réels avec la résine époxy pour bois (cf. Tableau 13).

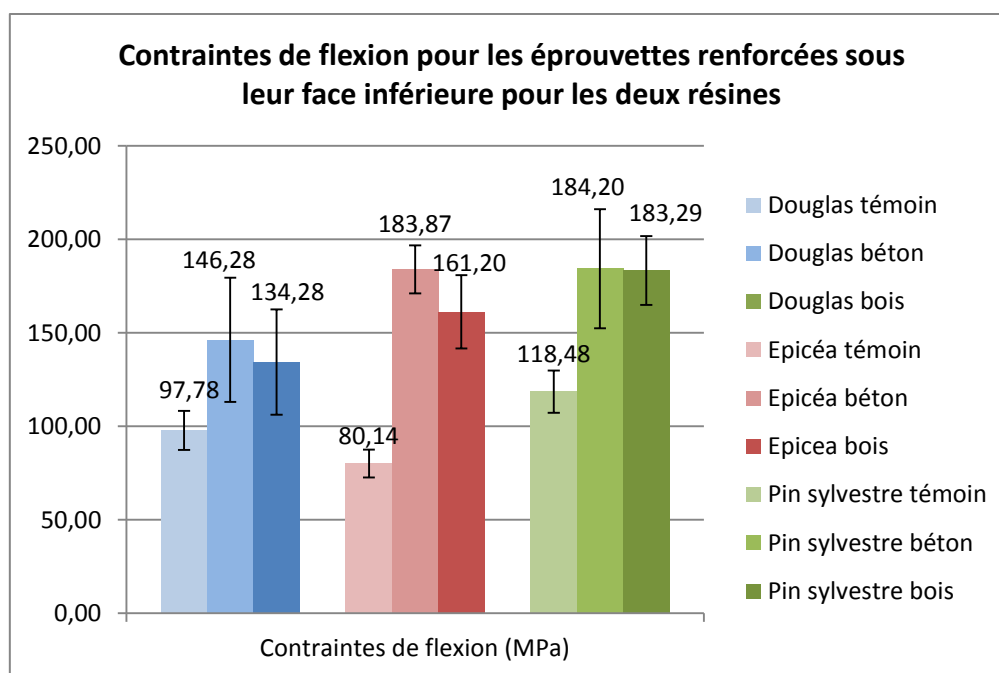
	Renforcement 1 face		Renforcement 3 faces	
	facteur de glissement γ	module de glissement k	facteur de glissement γ	module de glissement k
Epicéa	0	0,00	0	0,00
Pin sylvestre	0,095	14,07	0,0135	1,834
Douglas	0,0565	7,48	0	0,000

Tableau 13 : Valeurs des facteurs et modules de glissement d'après les valeurs expérimentales avec la résine pour béton

De même que les interprétations précédentes, ici le Douglas et l'Epicéa travaillent sans que la fibre de carbone n'intervienne, d'où un facteur de glissement proche de zéro.

6. Comparaison des deux colles

6.1. Comparaison des contraintes de flexion



Graphique 14 : Contraintes de flexion maximales calculées pour les éprouvettes pour les deux résines

Quel que soit le type de colle, une augmentation de la contrainte de flexion peut être observée par rapport aux éprouvettes témoins (cf. Graphique 14). Aucune conclusion d'efficacité de la colle ne peut être déterminée avec ces résultats.

6.2. Comparaison des facteurs de glissement

Une comparaison des facteurs de glissement est utile pour comparer le comportement des deux colles à l'interface (cf. Tableau 14).

	Renforcement Epoxy Béton		Renforcement Epoxy Bois	
	facteur de glissement γ	module de glissement k	facteur de glissement γ	module de glissement k
Epicéa	0	0,00	0	0,00
Pin sylvestre	0,095	14,07	0,031679	4,385
Douglas	0,0565	7,48	0,09809	13,579

Tableau 14 : Valeurs des facteurs et modules de glissement d'après les valeurs expérimentales avec les deux résines

Quel que soit le type de colle, l'adhérence du CFRP avec l'Epicéa ne s'est pas déroulée comme prévu : l'assemblage est inefficace. Sur le Pin sylvestre, la liaison est trois fois plus rigide avec la résine pour béton qu'avec celle pour bois. Et pourtant les contraintes de flexion appliquées sont similaires (cf. Graphique 14). Pour le Douglas, les résultats inverses s'observent : la liaison est deux fois plus rigide avec la résine pour bois qu'avec celle pour béton. Cependant les contraintes de flexion sont similaires.

Ainsi aucune conclusion ne peut être déduite de ces résultats en ce qui concerne l'influence du joint de colle.

Les phénomènes mis en jeu au niveau de cette liaison sont bien plus complexes qu'attendus et constituent le nerf de la guerre garantissant un renforcement efficace.

PARTIE 4 : PROPOSITION D'UN MODELE NUMERIQUE

Afin de valider et d'essayer de prévoir la rupture de la pièce, un modèle numérique a été conçu. La modélisation s'est faite sur Abaqus et ainsi a permis de vérifier les endroits sur la pièce les plus défavorables lors de la flexion quatre points.

1. Hypothèses

Les dimensions retenues sont les suivantes $20 \times 20 \times 360 \text{ mm}$. Les appuis sont fixés à 20 mm des extrémités de l'éprouvette. Les efforts appliqués sur les échantillons sont situés sur la partie supérieure à 100 mm des extrémités.

Afin de maîtriser la modélisation, ce n'est pas une force qui a été appliquée mais un déplacement qui a été imposé sur toute la largeur de l'éprouvette.

Les caractéristiques du matériau bois retenues sont les suivantes : 12 000 MPa pour le module d'Young et 0,4 pour le coefficient de Poisson. Pour la fibre de carbone, les caractéristiques retenues sont 230 000 MPa pour le module d'Young et 0,3 pour le coefficient de Poisson.

La principale hypothèse retenue est le non glissement des deux parties encollées, soit un contact parfait.

Des maillages T3 et Q4 ont été utilisés afin d'approcher la réalité sans surcharger considérablement les calculs.

2. Modèle témoin

La première modélisation sur le modèle témoin permet la vérification des zones les plus défavorables. Ainsi comme le montre la Figure 17, la zone la plus sollicitée est celle située entre les deux appuis. Mathématiquement, cette zone avait déjà été mise en évidence et avait retenu notre attention.

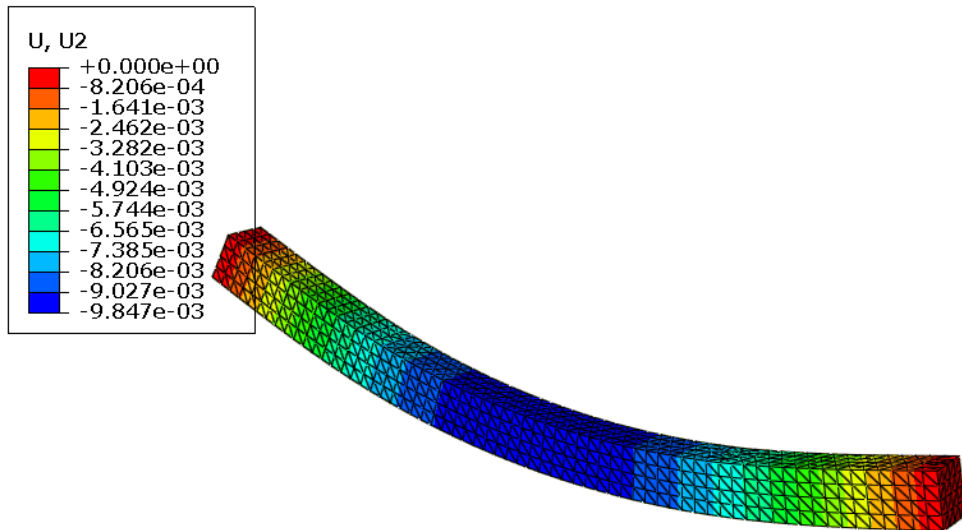


Figure 17 : Déplacements obtenus après modélisation d'une éprouvette témoin sur Abaqus

La déformée, conforme au modèle mathématique, permet de prévoir le comportement de l'éprouvette sous l'effet du chargement. Celle-ci se déforme de façon homogène et symétrique (dans l'hypothèse où le bois est assimilé à un matériau orthotrope). L'étude des symétries permettra par la suite la réduction de l'étude à la moitié de la pièce.

Maintenant, il convient d'analyser les contraintes exercées au sein de l'éprouvette. Grâce à celles-ci il est possible de localiser les zones à renforcer. La Figure 18 illustre la répartition des contraintes au sein de l'éprouvette. C'est entre les deux points d'application de la force que les contraintes sont les plus élevées. Il en ressort que la zone où le renforcement est à privilégier se situe bien entre les deux points.

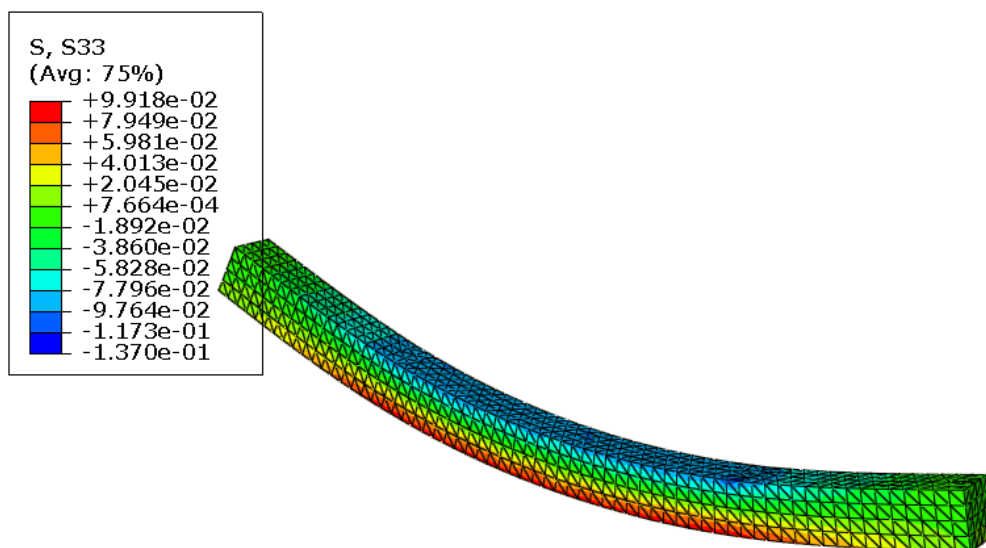


Figure 18 : Contraintes de flexion obtenues après modélisation d'une éprouvette témoin sur Abaqus

Un renforcement effectué uniquement entre les deux points d'applications des forces n'est cependant pas suffisant. En effet, il convient de renforcer un peu plus loin que les endroits où les moments sont maximaux. Il s'agit d'obtenir un bon ancrage de la fibre de carbone au-delà des endroits où elle sera sollicitée.

De cette analyse des contraintes résulte que le renforcement doit se faire au minimum au niveau de l'éprouvette où le moment est maximum. Mais afin de réaliser un renforcement cohérent il est préférable d'étendre le renforcement à toute la partie inférieure de l'éprouvette. C'est donc dans cette hypothèse que le modèle renforcé a été conçu.

3. Modèle renforcé

Cette modélisation numérique prend en compte la symétrie, ainsi seule la moitié de l'éprouvette a été représentée, avec un renforcement inférieur sur toute la longueur de la demi-pièce.

Comme le montre la Figure 19, la déformée est semblable à celle de l'éprouvette témoin. Les mêmes conditions de pression et de déplacement imposé ont été respectées. Il a juste été ajouté une « couche », un nouveau matériau modélisant l'ajout de fibre de carbone et de résine. Comme évoqué précédemment, aucun glissement n'est pris en compte entre le bois et les fibres.

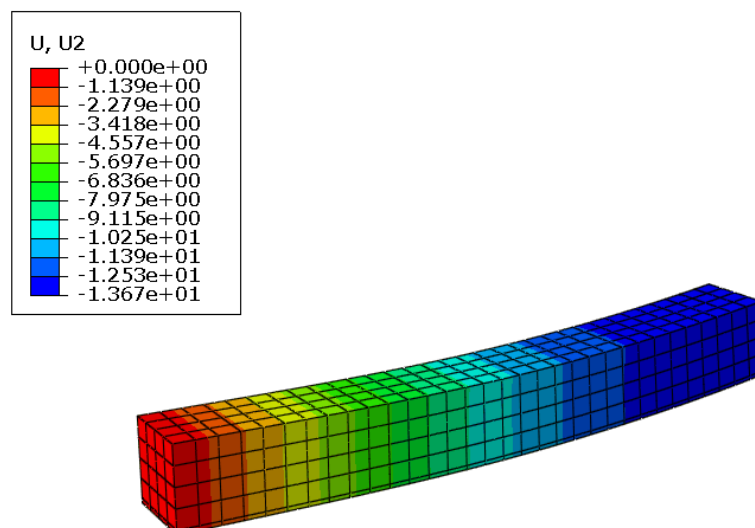


Figure 19 : Déplacements obtenus après modélisation d'une demi-éprouvette renforcée sur toute sa face inférieure sur le logiciel Abaqus

L'ajout de fibres n'entraîne pas de modification du comportement de la déformation de la barre mais diminue considérablement la valeur de la flèche.

L'analyse de la pièce soumise aux mêmes efforts que précédemment montre une modification de la répartition des contraintes de flexion au sein de l'éprouvette. La Figure 20 illustre le transfert et la continuité de la contrainte dans la partie inférieure. Les fibres de carbone reprennent les contraintes résultantes de la flexion dans le bois.

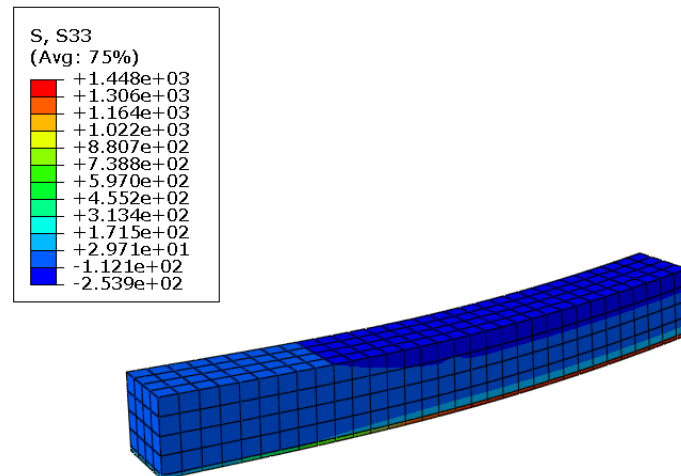


Figure 20 : Contraintes de flexion obtenues après modélisation d'une demi-éprouvette renforcée sur toute sa face inférieure sur le logiciel Abaqus

Cette reprise de contraintes est très importante : la couche de fibres permet d'augmenter la valeur de la contrainte et donc la force appliquée sur l'éprouvette. Dans ce cas, le renforcement se justifie et a une conséquence sur la résistance de la nouvelle pièce conçue.

4. Remarques sur ce modèle

La grande partie des efforts de flexion sont repris par les fibres de carbone (cf. Figure 20). L'hypothèse effectuée sur le joint de colle est très importante dans ce cas-ci : aucun glissement n'a été pris en compte.

Or la résine utilisée est de l'époxy dont la difficulté principale est d'arriver à avoir un taux de polymérisation de 100% (quasiment impossible). Cette hypothèse est donc un peu trop simplificatrice mais elle permet une approche correcte de la modélisation et permet d'appréhender le renforcement tel qu'il pourrait s'effectuer dans la réalité.

Deux théories s'affrontent concernant le comportement du joint de colle et son rôle dans la rupture.

La première, qui a été observée dans la modélisation ci-dessus, suppose que le joint de colle est parfait (CAMPILHO, et al., 2009) et que la rupture s'amorce dans le bois en dessous d'un point d'application de la force (cf. Figure 21).



Figure 21 : Illustration de la rupture de la fibre inférieure du bois au dessus du joint de colle

La seconde théorie considère que la rupture se fait au niveau du joint de colle (COGNARD, 2000). Or peu de ruptures de ce type ont été observées lors des essais. Le joint de colle de l'éprouvette représenté sur la Figure 22 a été complètement désolidarisé du support bois.



Figure 22: Illustration de la rupture du CFRP au niveau du joint de colle

La modélisation par éléments finis permet une bonne approche théorique de différents problèmes. Cependant dans le cas présent, de nombreux paramètres entrent en jeu, notamment les paramètres concernant le joint de colle, difficiles à appréhender de façon expérimentale.

CONCLUSION

Il était attendu que le renforcement à l'aide d'un composite résine époxy-fibre de carbone augmente la résistance des fibres inférieures de l'éprouvette. L'objectif était de repousser la limite de résistance en traction de ces fibres inférieures, voire dans le cas idéal de la faire passer au-delà de la limite de résistance en compression des fibres supérieures de l'éprouvette. Ainsi, une rupture en compression des fibres supérieures du bois aurait été visible.

Or les observations des expériences ont montré que les éprouvettes cédaient toujours en traction au niveau des fibres inférieures. Cela dit, la limite en traction a bel et bien été repoussée puisque les contraintes de flexion ont atteint en moyenne + 64% dans le meilleur des schémas de renforcement avec la résine époxy pour bois (éprouvettes renforcées sur toute leur face inférieure).

L'étude du comportement du joint de colle a permis de déterminer son rôle dans le renforcement. En effet, au vu des caractéristiques de la fibre de carbone et des résultats des éprouvettes, il est clair que la rupture des éprouvettes s'est produite bien avant que la fibre de carbone ait commencé à travailler. Dans tous les cas, la résistance conférée aux éprouvettes provenait non pas du composite résine/fibre de carbone mais bel et bien de la colle elle-même.

En définitive, pour qu'un renforcement avec un CFRP soit efficace, il faudrait étudier en amont les propriétés du bois utilisé en traction et compression axiales. De plus, il est nécessaire de maîtriser d'avantage les paramètres liés au collage du bois.

Les recherches sont encore en cours en ce qui concerne l'application de cette technologie sur le matériau bois mais peut être que dans un futur proche, cette solution sera homologuée et pourquoi pas fera l'objet d'un ATE.

BIBLIOGRAPHIE

CAMPILHO, R.D.S.G., DE MOURA, M.F.S.F. et BARRETO, A.M.J.P. 2009. *Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining.* Porto : ELSEVIER LTD, 2009.

CAROLIN, Anders. 2003. *Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements.* Lulea : Lulea University of Technology, 2003. p. 194, Thèse.

COGNARD, Jacques. 2000. *Science et technologie du collage.* Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000. p. 319. ISBN 2-88074-410-5.

COURBON, Jean et THEILLOUT, Jean-Noël. *Résistance des matériaux.* [PDF]

HALE, Gezer et BULENT, Aydemir. 2010. *The effect of the wrapped carbon fiber reinforced polymer material on fir and pine woods.* Elsevier Ltd. Elsevier : s.n., 2010. p. 4, Materials and Design.

INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité. 2002. Dermatoses professionnelles aux résines époxy. INRS. [En ligne] 2002. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.html?refINRS=TA%2066>. ISSN 0339-6517.

JODIN, Philippe. 1999. Essais normalisés. *French Journal of Timber Engineering.* Irabois, 1999, numéro spécial 1999.

LOPEZ-ANIDO, Roberto, MICHAEL, Antonis P. et SANDFORD, Thomas C. 2003. *Experimental characterization of FRP Composite-wood pile structural response by bending test.* MARINE STRUCTURES. Orono (USA) : ELSEVIER LTD, 2003.

MAPEI. 2006. MapeWrap C BI-AX. [Fiche technique]. 2006. p. 6.

NGUYEN TRUNG, Viet Anh. 2010. *Multi renforcement du bois lamellé-collé.* Paris : Ecole des Ponts, 2010. p. 180, Thèse Structures et Matériaux.

OUDJENE, Marc. 2012. Structures mixtes : application aux planchers bois/béton. Epinal : Enstib, 2012.

SAUVIGNET, Eric. 2013. Calcul des profils reconstitués assemblés mécaniquement. *plateforme-eurocode5.* [En ligne] 14 janvier 2013. [Citation : 11 février 2013.] www.plateforme-eurocode5.fr/documentation/file/7-poutre-assemblees-mecaniquement.

World Health Organization. 2009. BISPHENOL A (BPA) - Current state of knowledge. [En ligne] 27 Novembre 2009. [Citation : 14 Février 2013.] http://www.who.int/foodsafety/publications/fs_management/No_05_Bisphenol_A_Nov09_en.pdf.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Schéma de renforcement d'une poutre soumise à la flexion trois points.....	9
Figure 2 : Contrainte de flexion appliquée sur une éprouvette de section homogène.....	10
Figure 3 : Eprouvette observée après essai	11
Figure 4 : Rupture d'une éprouvette témoin en flexion quatre points sur le banc d'essai	11
Figure 5 : Schéma de la disposition de l'éprouvette sur le banc d'essai, conformément à la norme B-51-006	15
Figure 6 : Position du nouvel axe neutre au sein de l'éprouvette	20
Figure 7 : Schéma de positionnement des éprouvettes sur le banc d'essai	23
Figure 8 : Schéma de renforcement du lot 1.....	24
Figure 9: Schéma de renforcement du lot 2	24
Figure 10: Illustration du renforcement du lot 2 lors d'un essai.....	24
Figure 11: Schéma de renforcement du lot 3	25
Figure 12: Illustration du renforcement du lot 3 lors d'un essai.....	25
Figure 13 : Rupture d'une éprouvette de Douglas lors d'un essai	27
Figure 14 : Illustration du cisaillement dans l'éprouvette	38
Figure 15 : Section hors norme renforcée	39
Figure 16 : Illustration test hors norme	39
Figure 17 : Déplacements obtenus après modélisation d'une éprouvette témoin sur Abaqus	46
Figure 18 : Contraintes de flexion obtenues après modélisation d'une éprouvette témoin sur Abaqus.....	46
Figure 19 : Déplacements obtenus après modélisation d'une demi-éprouvette renforcée sur toute sa face inférieure sur le logiciel Abaqus	47
Figure 20 : Contraintes de flexion obtenues après modélisation d'une demi-éprouvette renforcée sur toute sa face inférieure sur le logiciel Abaqus	48
Figure 21 : Illustration de la rupture de la fibre inférieure du bois au dessus du joint de colle	49
Figure 22: Illustration de la rupture du CFRP au niveau du joint de colle	49

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1: Principe de déplacement de la résistance en traction caractéristique	12
Graphique 2: Diagramme des contraintes de flexion au sein d'une éprouvette renforcée	13
Graphique 3 : Diagramme du moment fléchissant pour la flexion quatre points	16
Graphique 4 : Diagramme de l'effort tranchant pour la flexion quatre points	16
Graphique 5 : Diagramme force/déplacement typique obtenu après un essai	28
Graphique 6 : Courbes de tendance obtenues pour la partie élastique des éprouvettes de Douglas	29
Graphique 7 : Courbes de tendance obtenues pour la partie élastique des éprouvettes de Pin sylvestre.....	30
Graphique 8 : Courbes de tendance obtenues pour la partie élastique des éprouvettes d'Epicéa	30
Graphique 9 : Bilan des modules d'Young calculés avec la résine époxy bois.....	32
Graphique 10 : Contraintes de flexion maximales calculées pour les éprouvettes.....	33
Graphique 11: Contraintes de cisaillement calculées au sein de l'éprouvette.....	35
Graphique 12 : Bilan des modules d'Young avec la résine époxy béton	41
Graphique 13 : Contraintes de flexion maximales calculées pour les éprouvettes avec résine béton	42
Graphique 14 : Contraintes de flexion maximales calculées pour les éprouvettes pour les deux résines.....	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques physiques de l'acier, des fibres de carbone, de l'épicéa (CAROLIN, 2003) et des fibres utilisées pour les expériences (MAPEI, 2006)	7
Tableau 2 : Caractéristiques physiques des résines polyester et époxy (CAROLIN, 2003).....	8
Tableau 3 : Résultats de tests en flexion trois points et en compression (HALE, et al., 2010)	13
Tableau 4 : Distance du nouvel axe neutre par rapport aux axes neutres des deux matériaux seuls.....	19
Tableau 5 : Rigidités de flexion théoriques obtenues après renforcement.....	21
Tableau 6 : Valeurs de module d'Young obtenues après essai résine époxy bois.....	32
Tableau 7 : Contraintes de flexion appliquée sur les éprouvettes	34
Tableau 8 : Valeurs des facteurs et modules de glissement d'après les valeurs expérimentales	36
Tableau 9: Valeurs réelles du décalage de l'axe neutre des éprouvettes renforcées	36
Tableau 10 : Valeurs de la contrainte de cisaillement au niveau du joint de colle.....	37
Tableau 11 : Valeurs de module d'Young obtenues après essai résine époxy béton.....	41
Tableau 12 : Contraintes de flexion appliquée sur les éprouvettes avec résine béton.....	42
Tableau 13 : Valeurs des facteurs et modules de glissement d'après les valeurs expérimentales avec la résine pour béton.....	43
Tableau 14 : Valeurs des facteurs et modules de glissement d'après les valeurs expérimentales avec les deux résines.....	44

LISTE DES EQUATIONS

Équation 1 : Moment fléchissant le long de l'éprouvette soumise à la flexion quatre points	16
Équation 2 : Effort tranchant le long de l'éprouvette soumise à la flexion quatre points	16
Équation 3 : Contrainte de flexion maximale appliquée sur l'éprouvette.....	17
Équation 4 : Contrainte de cisaillement maximale appliquée sur l'éprouvette	17
Équation 5: Valeur de la flèche aux points d'application des forces dans le cadre d'une flexion quatre points	18
Équation 6 : Module d'Young expérimental déterminé à partir de l'Equation 4	18
Équation 7 : Distance des axes neutres des matériaux à la nouvelle fibre neutre	19
Équation 8 : Calcul expérimental de la rigidité effective	20
Équation 9 : Rigidité effective de l'éprouvette renforcée en tenant compte du glissement ..	20
Équation 10 : Rigidité effective calculée avec le théorème de Huygens	21
Équation 11 : Rigidité effective calculée avec le théorème de Huygens après simplification	21
Équation 12 : Module d'Young du CFRP calculé d'après le théorème de Huygens	21
Équation 13 : Contraintes de flexion au sein de l'éprouvette renforcée.....	22
Équation 14 : Contrainte de cisaillement maximale au sein de l'éprouvette renforcée	22
Équation 15 : Inertie effective de l'éprouvette renforcée en négligeant l'inertie propre du CFRP	31
Équation 16 : Définition du facteur de glissement	35
Équation 17 : Contrainte de cisaillement au niveau du joint de colle	37

RESUME

Renforcement de poutres en bois avec des CFRP (Composite Fibers Reinforced Polymers)

A travers cette étude, nous voulons mettre en évidence l'impact du rajout d'un composite à base de fibres de carbone et de résine époxy sur le renforcement des poutres en bois.

Nous avons étudié plusieurs essences utilisées en construction (Epicéa, Pin sylvestre et Douglas) et avons testé ce renforcement grâce à la flexion quatre points (Norme NB 51-008) sur des éprouvettes normalisées. Plusieurs schémas de renforcement ont été étudiés chacun sur dix échantillons. Un seul type de carbone et deux types de résine époxy ont été utilisés.

Un modèle numérique du système bois-composite est également proposé.

Mots clefs : carbone, fibre, renforcement, époxy, flexion

ABSTRACT

Reinforcement of timber beams with CFRP (Composite Fibers Reinforced Polymers)

Trough this study, we highlight the impact of the addition of a composite carbon fiber and epoxy resin on the reinforcement of timber beams.

We studied several species used in construction (spruce, pine and douglas) and have tested this strengthening by the four-point bending test (NB Standard 51-008) on standard specimens. Several schemes have been studied to strengthen each ten samples. One type of carbon and two types of epoxy resins were used.

A numerical model of wood-composite system is also proposed.

Key words: carbon, fibers, reinforcement, epoxy, flexion.