
Évaluation du renforcement de poutres en bois par matériaux composites

La présence des défauts naturels dans le bois est une source de grandes variations des propriétés mécaniques. Depuis 40 ans, la possibilité de renforcement des poutres en bois lamellé-collé a été étudiée. Dans les premières expérimentations, les matériaux traditionnels, comme l'acier, sont utilisés pour des renforcements locaux (tiges boulonnées, assemblages avec plaques, etc.) [Larsen *et al.* (2000)]. Mais les recherches ont toutes le même objectif : améliorer la capacité du bois pour son application sur structures fortement sollicitées. Toutefois, la baisse de prix des fibres de synthèse telles que celles d'aramide, de verre ou de carbone, a permis d'utiliser les composites à matrice organique (Fiber Reinforced Polymer ou FRP) comme armature de renforcement. En comparant leur propriétés avec celles du métal, les avantages évidents sont la densité plus faible ($\rho_{\text{FRP}} < 0.25\rho_{\text{acier}}$) et la facilité de mise en œuvre.

Actuellement, s'il est nécessaire de maintenir et d'améliorer les anciennes structures en bois, la volonté du ministère de l'écologie de développer des ponts en bois, nous amène à développer également des recherches sur le renforcement pour structures neuves.

Le rôle fréquent des renforcements en FRP, aux propriétés mécaniques élevées, est de fournir des connexions locales au voisinage des défauts, i.e. du confinement vis-à-vis de la rupture locale, et d'arrêter l'ouverture des fissures. En outre, il permet d'utiliser le bois de grade inférieur ou de dimensions plus faibles. Nous proposons de faire une revue de la littérature sur ce sujet.

2.1. Introduction

La présence des défauts naturels dans le bois est une source de grandes variations des propriétés mécaniques. Depuis 40 ans, la possibilité de renforcement des poutres en bois lamellé-collé a été étudiée. Dans les premières expérimentations, les matériaux traditionnels, comme l'acier, sont utilisés pour des renforcements locaux (tiges boulonnées, assemblages avec plaques, etc.) [Larsen *et al.* (2000)]. Mais les recherches ont toutes le même objectif : améliorer la capacité du bois pour son application sur structures fortement sollicitées. Toutefois, la baisse de prix des fibres de synthèse telles que celles d'aramide, de verre ou de carbone, a permis d'utiliser les composites à matrice organique (Fiber Reinforced Polymer ou FRP) comme armature de renforcement. En comparant leur propriétés avec celles du métal, les avantages évidents sont la densité plus faible ($\rho_{FRP} < 0.25\rho_{acier}$) et la facilité de mise en œuvre.

Actuellement, s'il est nécessaire de maintenir et d'améliorer les anciennes structures en bois, la volonté du ministère de l'écologie de développer des ponts en bois, nous amène à développer également des recherches sur le renforcement pour structures neuves.

Le rôle fréquent des renforcements en FRP, aux propriétés mécaniques élevées, est de fournir des connexions locales au voisinage des défauts, i.e. du confinement vis-à-vis de la rupture locale, et d'arrêter l'ouverture des fissures. En outre, il permet d'utiliser le bois de grade inférieur ou de dimensions plus faibles. Nous proposons de faire une revue de la littérature sur ce sujet.

2.2. Revue de la littérature

Intéressons nous aux modes de ruptures de poutres en flexion. Les ruptures en flexion dans les poutres en BLC sont de type fragile. Elles sont en effet souvent localisées aux nœuds, aux défauts ou aux aboutages du côté de la traction. Elles ont donc besoin d'être renforcées de ce côté pour améliorer la résistance en traction. Le renforcement de poutres en BLC avec des couches FRP collées du côté de la tension est très répandu, ce qui se traduit par de nombreuses recherches (John et Lacroix, 2000); (Hernandez *et al.*, 2005) ; (Romani et Blaß, 2000 et 2001); (Fioralli *et al.*, 2003) ; (Borri *et al.*, 2005), etc. L'objectif global de ces études est souvent d'augmenter la rigidité, la résistance en flexion et la ductilité structurale, d'obtenir la rupture en mode de compression.

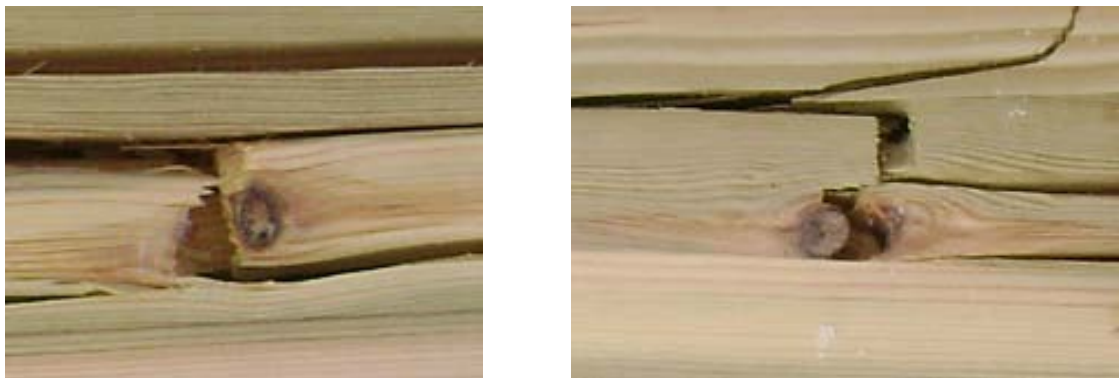


Figure 2.1. *Rupture en traction aux défauts du bois*

Quelques configurations typiques de renforcement en flexion sont présentées dans la figure ci-dessous Figure 2.2. Les dimensions (longueur, angle, épaisseur, etc.) de FRP ne sont pas quantitatives.

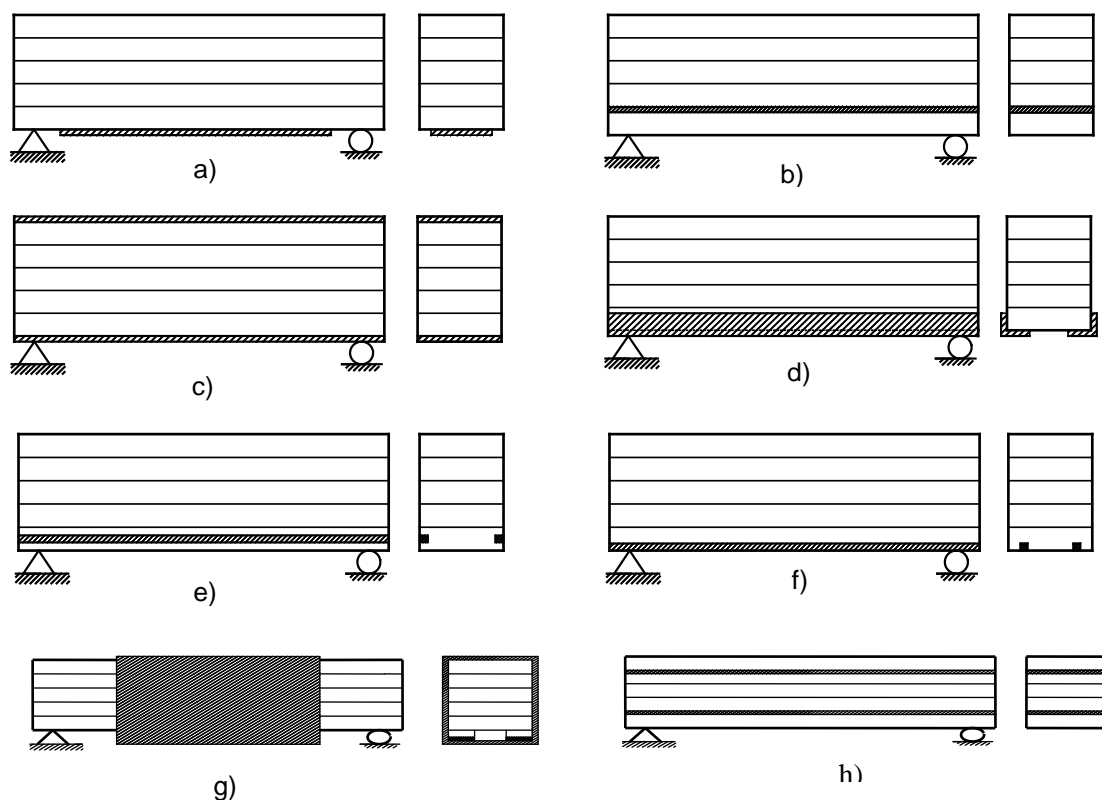


Figure 2.2. Quelques méthodes de renforcement par FRP en flexion de poutres en bois lamellé collé

Les renforcements de type (a)

Le renforcement se réalise par une couche de composite collée sur la dernière lamelle dans le côté de traction.

(J.Fiorelli, A.A Dias, 2003) ont réalisé un renforcement sur de petites éprouvettes par GFRP (glass fiber reinforced polymer) et CFRP (carbon fiber reinforced polymer). Ils ont étudié expérimentalement le comportement en compression du bois pour l'appliquer au comportement élasto-plastique en flexion. Ils ont observé des ruptures en compression, puis en traction ou cisaillement. L'augmentation de la résistance et de la rigidité est observée. L'influence des défauts est réduite.

Selon John et Lacroix, la rupture du bois en traction est fragile, aléatoire et difficile à prédire (John et Lacroix, 2000). Ils ont étudié les effets de la longueur des couches CFRP collées sur la face du bois en tension (sur toute la longueur ou sur une seule région). Ils ont indiqué une augmentation de résistance de 40% à 70% par rapport aux poutres non-renforcées. Une distribution plus étroite a également été observée, conduisant à une résistance plus élevée du cinquième centile. Les défaillances survenues en mode de compression indiquent un comportement ductile. Ils ont montré également l'intérêt de la longueur de renforcement ou de pratiquer du renforcement en U.

(Hernandez *et al.*, 1997) a étudié la résistance en flexion et la rigidité de poutres en bois lamellé collé de peuplier, renforcées par GFRP. Trois pourcentages en volume de renfort ont été ajoutés par le collage de deux couches GFRP sur la zone de tension. Les éprouvettes sont de petites tailles. L'auteur signale une augmentation de la résistance et de la rigidité en flexion. Signalons que des ruptures par délaminage des couches GFRP ont été observées.

(Blaß et Romani, 2000, 2001) ont trouvé une augmentation très grande de la résistance en flexion par le CFRP. Cependant, la rupture est toujours observée aux nœuds ou aux aboutages de toutes les éprouvettes dans les zones tendues. Fiorelli [Fiorelli *et al.*, 2003] a renforcé des poutres en Pin caribéen par le collage de FRP sur le côté de tension (GFRP 1% de volume, CFRP 0.4% en

volume). La rupture s'est produite en deux étapes : écrasement des fibres dans la zone comprimée et puis en cisaillement ou en traction. Le résultat donne la rupture ductile avec une augmentation de la raideur de 15% à 30%.

(Borri *et al.*, 2005) a collé des tissus en CFRP (époxy) de différentes densités dans la zone tendue. Certaines poutres ont été renforcées avec une pré-tension du renfort. Une augmentation de la capacité maximale et de la raideur par rapport aux poutres non-renforcées a été respectivement de 22,5% à 29,2% et de 40% à 60%. Les poutres ayant la pré-tension n'ont pas montré d'amélioration significative par rapport à celles non prétendues.

Il est à signaler que le renfort de type (a) a été adopté pour une expérimentation en vraie grandeur menée par le LCPC dans le cadre du WP3 (Figure 2.3), ponts du futur, du projet européen NR2C (New Roads Construction Concepts) (Ben Mekki *et al.*, 2007). Le tablier testé a une portée de 10 m pour une largeur de 2,5 m. 4 poutres en BLC de 60 cm par 24 cm sont renforcées sur leur face inférieure par 12 couches de tissu UD collées à l'époxy et traitées sous vide. La rupture s'est produite en traction du bois. Une délamination du carbone a été également observée. En l'absence de comparaison il est impossible de savoir quantitativement l'apport du seul renfort en carbone.



Figure 2.3. Pont mixte NR2C [Ben Mekki *et al.*, 2007]

Les renforcements de type (b)

Les poutres en bois lamellé collé sont toujours renforcées du côté tendu par des couches de FRP mises invisiblement entre les deux dernières couches de bois pour raisons de sécurité incendie et d'esthétique.

(Dagher *et al.*, 1996) a étudié le renforcement des poutres en pruche de l'Est (Eastern Hemlock / Tsuga canadien). Ce bois a été choisi car l'auteur pensait que le renforcement par FRP est plus efficace pour les bois de faibles propriétés mécaniques. Des poutres en bois lamellé collé de classement faible, médium et élevée sont alors renforcées par FRP en deux proportions en volume (1,1% et 3,1%). L'augmentation de la capacité en flexion a été remarquée dans tous les cas. Mais le taux d'amélioration le plus grand a été observé pour le bois de classe faible. Pour celles de classe supérieure, aucune amélioration significative n'a été obtenue.

(Galloway *et al.*, 1996) ont renforcé des poutres en BLC de pin maritime avec des tissus d'aramide sans ou avec prétension. Ils ont montré que la prétension ne donne pas d'augmentation significative de la résistance en flexion. La plupart des poutres se sont rompues aux nœuds ou aux joints (aboutages) du côté tendu. Le test de cisaillement d'interface bois-aramide montre que l'adhérence diminue lors de l'augmentation de précontrainte.

(Blaß et Romani, 2000 et 2001) ont collé des tissus d'AFRP (Aramide) et CFRP entre les deux dernières couches des poutres en BLC. Comme auparavant (rubrique a.), la plupart des ruptures s'est produite dans le bois, au dessus des couches renforcées, mais aussi en dessous et dans la zone de compression (rupture à la plupart des aboutages).

Les renforcements de type (c)

Les poutres en bois massif ou en BLC sont renforcées par des couches ou des tissus de FRP à la fois en zones comprimées et tendues. D'après Lopez-Anido (Lopez-Anido et Xu, 2002), ce type de renforcement permet d'augmenter la durabilité du bois en fournissant la protection contre l'environnement..

(Hernandez *et al.*, 1997) ont étudié la résistance et la rigidité en flexion des poutres en BLC de peuplier, renforcées par du GFRP avec un taux volumique de 3%. Le résultat sur des petites éprouvettes n'a pas de représentativité statistique significative, mais la résistance et la rigidité augmentent en moyenne. Toutefois, en comparant avec le type de renforcement dans (a.), cette augmentation est plus faible (13% moins). Les poutres testées se sont rompues en traction, et la délamination a été observée.

(Lopez-Anido et Xu, 2002) ont étudié, comme Dagher (Dagher *et al.* 1996), le renforcement des poutres en BLC de Picea de l'Est. Ils ont choisi le GFRP unidirectionnel et des tissus ($\pm 45^\circ$). Le renforcement unidirectionnel a montré une augmentation de la capacité de charge de 47% avec une ductilité significative. Le deuxième renforcement (tissus de $\pm 45^\circ$) n'améliore pas les propriétés en flexion, le mode de rupture est en traction du bois.

(Ogawa, 2000) a travaillé sur le renforcement de poutres de lamellé collé de cèdre japonais et de pin souple (mélèze), avec du CFRP entre 0.08% et 1.3% en volume de bois. Une résine phénolique a été utilisée pour améliorer la capacité en cisaillement interlaminaire bois-carbone et la résistance au feu. La capacité en flexion est grandement augmentée indépendamment du type de bois ou de la quantité de CFRP. Le coefficient de variation de la résistance diminue pour atteindre 6% à 8% comparée à celle de 10% à 25% pour le bois non renforcé.

Les renforcements de type (d)

Le renforcement par FRP se trouve aux angles de la dernière lamelle bois. Ce type de renforcement n'est pas fréquent. Il a été étudié par (Borri *et al.*, 2005) avec du CFRP. Une augmentation de la charge maximale de 55% et de la rigidité de 30.3% a été enregistrée. Le comportement de ce type de renforcement est similaire avec celui (a).

Les renforcements de type (e)

La technique NSM (Near Surface Mounted) a été appliquée sur les deux côtés de la dernière lamelle bois sollicitée en traction. Des rainures sont réalisées dans le bois afin de mettre en place les barres de FRP scellée avec de la résine (époxy).

(Gentile *et al.*, 2002) a étudié les effets de technique NSM sur les poutres en Douglas-fir (Pseudotsuga) de 30ans. Deux barres (de diamètre de 13mm) ont été introduites. Le taux de renfort en volume est de 0.42%. La propriété en flexion a été améliorée jusqu'à 46%. En outre, 60% des poutres se sont cassées en mode de compression. La charge de rupture a été bien prévue.

Les renforcements de type (f)

Le renforcement avec la technique NSM/FRP se trouve sur la face en tension de la poutre. On scelle des barres dans des rainures disposées sur la surface bois en injectant de la résine époxy.

[Borri *et al.*, 2005] a utilisé les barres CFRP de 7,5mm de diamètre avec deux dispositions :

- Une barre au milieu

- Deux barres placées symétriquement.

Dans tous les deux cas, l'augmentation de la charge maximale et de la rigidité est observée (respectivement 28,9% et 22% pour le premier cas, 55% et 25.5% dans le deuxième). La ductilité est plus faible que celle obtenue avec les renforcements type (a) et (d). Par contre, l'aspect esthétique est meilleur en utilisant ce type de renforcement.

(Gentile *et al.* 2002) a étudié les effets de la technique NSM avec les barres en GFRP/Epoxy pour le renforcement des poutres en Douglas-fir. Quatre barres (de diamètres de 13 et 10mm) sont introduites dans la zone en tension. Le taux volumique est respectivement de 0,42% et 0,26%. Le même phénomène que précédemment a été observé.

(Johnson *et al.*, 2005) a étudié de renforcement des poutres en épicéa avec les barres en CFRP (section rectangulaire de 10x10mm²) en utilisant de la résine époxy. Trois dispositions ont été choisies :

- Une barre CFRP disposée au centre de la dernière lamelle
- Deux barres CFRP mises symétriquement par rapport au centre de la dernière lamelle.
- Une barre courte CFRP disposée au centre de la dernière lamelle.

Toutes les poutres renforcées ont montré une augmentation des propriétés en flexion par rapport à la poutre référence. La capacité de charge moyenne est entre 44% et 63%. Le mode de rupture, alors ductile, est dans la partie en compression.

Les renforcements de type (g)

(Buelle *et al.*, 2005) a étudié ce type de renforcement. Ce type consiste à placer la partie CFRP au-dessous de la poutre (du côté de la tension) loin de l'axe neutre afin de maximiser la résistance de flexion. Le passage des couches CFRP a été réalisé sur des tasseaux en bois rapportés. Un autre tissu de carbone a ensuite été enroulé autour de la poutre. Une augmentation de la résistance en flexion de 69% a été obtenue comparativement à la poutre référence. La rupture est alors en mode de compression. Buelle signale une augmentation de rigidité de 18%.

Type de renfort	Augmentation rigidité	Augmentation résistance	Mode de rupture	Observations
(a)	faible ou jusqu'à 30 % selon auteurs	jusqu'à 70 %	Fragile et ductile selon auteurs	Ruptures en Compression traction délamination
(b)	-	Plus sensible pour les bois de résistance faible	Aux nœuds ou aboutages en zones de traction	-
(c)	-	Faible ou jusqu'à 47% selon auteurs. Tissus n'améliore pas la résistance	-	Diminution du coefficient de variation de la résistance
(d)	Augmentation de 30%	Augmentation jusqu'à 55 %	compression	-
(e)	-	Augmentation jusqu'à 46%	compression	-
(f)	-	-	-	Ductilité plus faible que (a) et (d)
(g)	Jusqu'à 18%	Jusqu'à 69%	-	-

Tableau 2.1. Synthèse des conclusions de la littérature sur l'efficacité du renforcement du bois

Les renforcements de type (h) :

Les renforcements sont bien entendu fortement améliorés avec des applications intégrant des lames de carbone entre les lamelles de bois, par exemple le carboglulam®, qui est développé par la société Epsilon Composite, en collaboration avec le CTBA (Figure 2.4). Le principe de conception repose sur des éléments de structure composés de bois lamellé-collé en partie centrale (âme) et d'un complexe bois/carbone sur chaque partie extérieure.



Figure 2.4. *Le Carboglulam® [CBTA, 2003]*

Une campagne d'essais a été menée sur des poutres en grandeur d'emploi en flexion 3 et 4 points. Les poutres, en pin sylvestre ou pin maritime traité CCA (classe 4) avec des lames de carbone de 1 cm d'épaisseur, avaient des dimensions de 15 m x 0,6 m x 0,1 m.

Compte tenu du prix des éléments de carbone pultrudé, le Carboglulam® ne se justifie pas dans toutes les solutions structurelles. Son emploi est pertinent sur des projets où de très hauts niveaux de performance sont requis. C'est un peu dans cet esprit que nous avons imaginé nos renforcements, mais avec des quantités de carbone moindre.

De la revue de la littérature sur le renforcement des poutres en BLC, il ressort que les études sont essentiellement expérimentales. La plupart des renforts sont en carbone, mais quelques uns sont en aramide. L'analyse de l'ensemble de ces données ne permet pas de définir un mode de renforcement plus performant qu'un autre. L'augmentation du taux de renfort augmente la rigidité, mais nous n'avons aucune information sur l'effet de cette augmentation sur la résistance. Quelques conclusions générales sont toutefois possibles :

- Le renfort a plus d'effets sur les bois de faible résistance que sur ceux de résistances élevés ;
- Les tissus sont moins performants que les plats UD ;
- Le coefficient de variation de la résistance diminue avec le renfort ;
- Des ruptures se sont déplacées de la traction vers la compression, rendant le processus ductile.

En résumé, l'efficacité du renforcement de FRP dans les poutres bois lamellé collé peut être qualitativement présentée sur la figure [Figure 2.5].

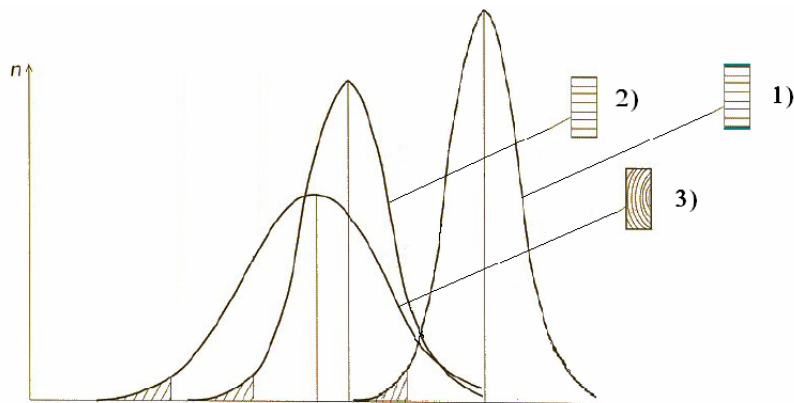


Figure 2.5. *Caractéristiques du bois (3), du bois lamellé collé (2) et du bois lamellé collé renforcé par FRP (1).*

Des questions importantes restent cependant ouvertes. Ainsi, beaucoup d'études sont effectuées sur des éléments de très faibles dimensions, ce qui a pour effet de diminuer la taille caractéristique des défauts. Ceci, en conséquence pourrait modifier les effets positifs du renfort. En d'autres termes, sur des éléments dont le volume élémentaire représentatif est atteint (VER), i.e. des lamelles de 30 à 40 mm d'épaisseur comme rencontré couramment dans le BLC, quel est l'effet quantitatif du renfort en flexion?

Dans un premier temps, cette étude se propose de rechercher un modèle permettant de prédire le comportement ultime du bois renforcé ou non en flexion. Ce modèle dans un second temps est confronté à des expérimentations sur différents bois. Nous tenterons ensuite à partir d'expérimentations sur des éléments en bois renforcés d'extraire des premières conclusions pour guider la suite de l'étude.

2.3. Première analyse mécanique du renforcement

En raison du comportement élastique linéaire fragile du bois en traction, il est classique d'utiliser le modèle linéaire de Timoshenko pour le calcul des éléments bois. C'est ce modèle qui va être utilisée dans la première partie. La non-linéarité du bois en compression sera introduite dans la seconde partie. Dans le chapitre 3 sera proposé un modèle plus complexe permettant de mieux prendre en compte les efforts aux interfaces.

2.3.1. Analyse linéaire

L'analyse linéaire est basée sur les hypothèses de Timoshenko pour laquelle la méthode de section équivalente est applicable. L'hypothèse la plus remarquable est celle des sections qui restent droites.

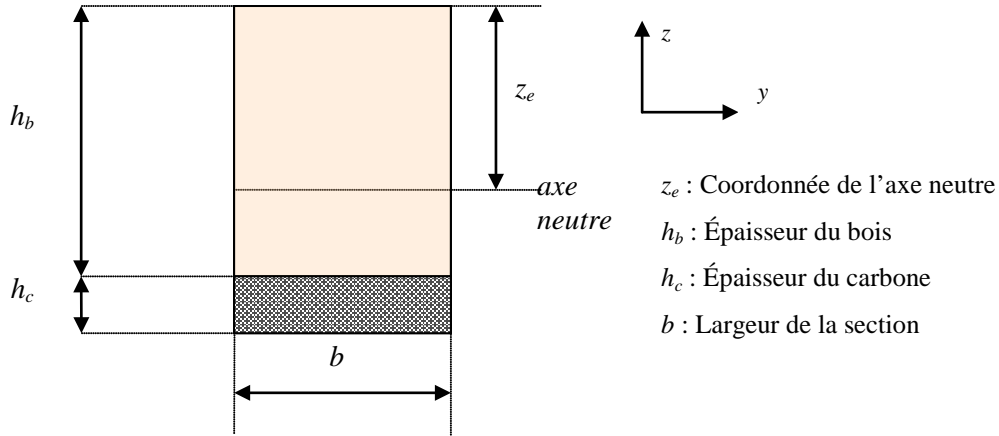


Figure 2.6. Section renforcée

Soit une section rectangulaire renforcée (Figure 2.6), nous déterminons classiquement la position de l'axe neutre :

$$z_e = \frac{\int_{\text{section}} E_i z ds}{\int_{\text{section}} E_i ds} = \frac{E_b z_b h_b + E_c z_c h_c}{E_b h_b + E_c h_c} \quad (2.1)$$

Rigidité en flexion :

$$(EI)_{eq} = E_b (I_b + A_b (z_b - z_e)^2) + E_c (I_c + A_c (z_c - z_e)^2) \quad (2.2)$$

où E_α , I_α , A_α , z_α sont respectivement module d'Young, le moment d'inertie, l'aire et la coordonnée verticale du centre de gravité de la section s'occupant le matériau α . ($\alpha=b$ pour le bois et $\alpha=c$ pour le composite).

La contrainte normale dans les bois est :

$$\sigma_{11}(x, z) = \frac{E_b M(x)}{(EI)_{eq}} z \quad (2.3)$$

et la contrainte en cisaillement :

$$\tau_{13}(x, z) = \frac{V(x) \cdot S(z) \cdot E_b}{b \cdot (EI)_{eq}} \quad (2.4)$$

La flèche maximale de la poutre en flexion 3 points sous charge P :

$$v = \frac{P \cdot l^3}{48(EI)_{eq}} \quad (2.5)$$

Où $M(x)$, $S(z)$, z , $V(x)$, b sont respectivement le moment fléchissant, le moment statique de la section, le bras de levier (position de la fibre par rapport à l'axe neutre) et l'effort tranchant.

L'analyse linéaire ne peut pas être appliquée au calcul de la capacité ultime des éléments bois à cause du comportement plastique/endommagé dans la zone de compression (Figure 2.7). L'existence d'un renfort rend encore plus important le recours à l'analyse non-linéaire.

2.3.2. Analyse bi-linéaire

Ainsi au moment de la rupture en traction, le bois en compression est souvent plastifié localement. De plus, le renfort en traction favorise la rupture dans la zone comprimée. Il est donc intéressant de disposer d'un modèle avec plasticité pour calculer les sections fléchies de bois ou de bois renforcé. Un tel modèle a été développé par [Buchanan, 2000]. Nous l'adaptions ici au bois renforcé en traction.

La (Figure 2.7) ci dessous donne la géométrie et les paramètres du problème. Notons h_{bois} , e , h_c , h_t, h_p , qui sont respectivement l'épaisseur du bois et du composite, l'épaisseur du bois en compression et en traction, et l'épaisseur du bois plastifié. $\sigma_c, \varepsilon_c, \sigma_t, \varepsilon_t$ sont la contrainte et la déformation en compression (indice c) et en traction (indice t). n est le rapport entre les modules d'Young du composite et du bois, se calcule par :

$$n = \frac{E_{cfrrp}}{E_b} \quad (2.6)$$

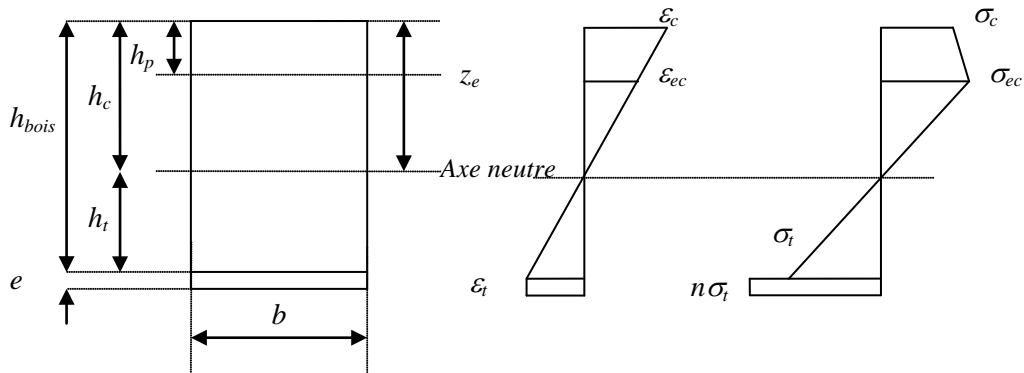


Figure 2.7. Schéma de calcul non-linéaire.

La relation contrainte-déformation du bois est traduite par la loi de Buchanan. Cette loi est caractérisée par un comportement élasto-plastique en compression et élastique fragile en traction, où m est la pente de la branche plastique. (Figure 2.8 et Figure 2.2)

$$m = \frac{\sigma_{uc} - \sigma_{ec}}{E_b(\varepsilon_{uc} - \varepsilon_{ec})} \quad (2.7)$$

Avec $\sigma_{uc}, \sigma_{ec}, \varepsilon_{uc}, \varepsilon_{ec}$ respectivement la contrainte ultime et la limite élastique, la déformation ultime et celle de la limite élastique. E_b est le module d'Young du bois, supposé constant.

Ces paramètres du modèle ($\varepsilon_{uc}, \varepsilon_t, \sigma_{uc}, \sigma_{ec}$) doivent être déterminés expérimentalement ce qui est très important pour la précision de l'analyse limite du comportement en flexion des poutres bois-CFRP. Considérant que la rupture n'est jamais atteinte dans le composite, le modèle couvre deux cas possibles de rupture, soit en compression lors de l'atteinte de la déformation ultime en compression, soit en traction pour la même raison.

L'hypothèse de conservation de la planéité de la section (Timoshenko et pas de glissement entre les fibres sur la section étudiée) est confirmée par des essais, nous donne en considérant que l'épaisseur de CFRP est mince devant l'épaisseur totale de section (déformation homogène du carbone) :

$$\frac{\varepsilon_c}{h_c} = \frac{\varepsilon_t}{h_t} = \frac{\varepsilon_{ec}}{h_c - h_p} \quad (2.8)$$

Avec le mode de rupture connu, la position de l'axe neutre, la hauteur de la zone plastifiée et le moment fléchissant à la rupture peuvent être déterminés.

En particulier, la loi de Buchanan peut être exprimée par :

$$\begin{cases} \sigma_c = E_b \cdot \varepsilon_c & \text{si } \varepsilon_c < \varepsilon_{ec} \\ \sigma_c = \sigma_{uc} - m \cdot E_b \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_{uc}) & \text{si } \varepsilon_c > \varepsilon_{ec} \\ \sigma_t = E_b \cdot \varepsilon_t & \text{contrainte traction dans le bois} \end{cases} \quad (2.9)$$

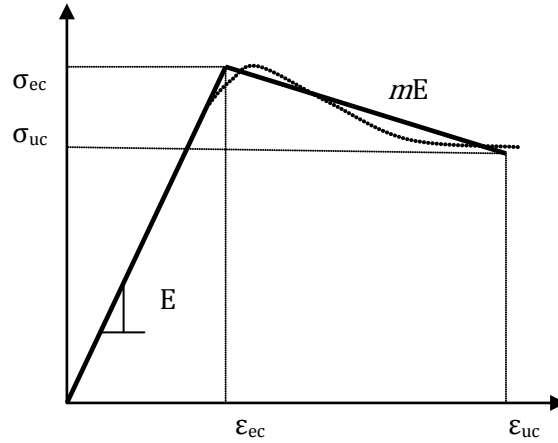


Figure 2.8. Comportement bi linéarisé du bois en compression [Buchanan, 2000]

L'équation (2.9) peut être modifiée si l'on souhaite tenir compte d'une éventuelle différence entre les modules du bois en compression et en traction. Dans la pratique cette différence est négligeable.

La contrainte en traction, supposée homogène, dans le composite est calculée par :

$$\sigma_{cfrp} = E_{cfrp} \cdot \varepsilon_t = n \cdot \sigma_t \quad (2.10)$$

où n est le coefficient d'équivalence

L'équilibre des forces donne :

$$(\sigma_c + \sigma_{ec})h_p + \sigma_{ec}(h_c - h_p) + h_t\sigma_t + 2n\sigma_t e = 0 \quad (2.11)$$

Lorsque la distribution de contrainte sur la section est déterminée, le moment fléchissant se calcule par :

$$\begin{aligned} M = & -\sigma_c h_p \left(h_c - \frac{h_p}{2} \right) - (\sigma_{ec} - \sigma_c) \frac{h_p}{2} \left(h_c - \frac{2}{3} h_p \right) - \sigma_{ec} \frac{(h_c - h_p)^2}{3} \\ & + \sigma_t \frac{h_t^2}{3} + n \cdot e \cdot \sigma_t \left(h_t + \frac{e}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Comme expliqué dans le paragraphe ci-dessus, en supposant la résistance du FRP infinie, il y a 2 possibilités de rupture. La première est en compression lors de l'atteinte de la limite de déformation plastique ultime, tandis que la deuxième est pour la limite en traction du bois. Un troisième mécanisme est toutefois observé lorsque la limite en cisaillement aux extrémités de la poutre est atteinte. En effet, même si les contraintes de cisaillement sont quasi nulles en zone courante à l'interface bois-carbone, les effets de bords aux appuis génèrent aux extrémités du cisaillement

facilitant le délaminage. Ce phénomène est modélisable par des approches plus complexes. Ce sera l'objet du chapitre 3.

Résolution pour une rupture en compression

La rupture en compression a lieu lorsque la plastification de la zone comprimée apparaît, c'est-à-dire lorsque ($\varepsilon_c = \varepsilon_{uc}$). La résolution des équations (2.6) à (2.12) nous donne la position de l'axe neutre, la hauteur plastique de zone comprimée et la contrainte en traction au moment de la rupture.

Résolution pour une rupture en traction

La rupture en traction du bois se produit lorsque la limite de déformation en traction ε_{ut} est atteinte. En remplaçant ε_t par ε_{ut} et σ_t par σ_{ut} dans les équations ci-dessus, on obtient la position de l'axe neutre, le moment maxi et la valeur maximale de σ_c .

Application du modèle pour prévoir la rupture du bois seul en flexion

Afin de statuer sur l'intérêt du renforcement en traction, la première vérification à faire est de prévoir le mode de rupture du bois seul, en flexion, à partir du modèle précédent. Il apparaît intéressant également de savoir pour quelles essences de bois le renforcement est potentiellement intéressant. Cela suppose la connaissance des grandeurs $\varepsilon_{ec}; \sigma_{uc}; \sigma_{ut}; \varepsilon_{uc}; \varepsilon_{ec}; E_b$, ou, si l'une des déformations n'est pas connue, le coefficient m défini précédemment. On trouve dans la littérature un ensemble de données comprenant, au minimum, la valeur des 3 contraintes ci-dessus, du module d'Young, et de la déformation ultime. Il nous a alors fallu fixer une valeur du coefficient m à partir des données complètes disponibles [Buchanan, 2000]. La valeur de m a été fixée à 0 ($\sigma_{uc} = \sigma_{ec}$) dans nos calculs. Pour compléter le calcul, nous avons fait varier ε_{uc} et ε_{ut} dans une fourchette correspondant à un coefficient de variation de 15%. Les résultats du calcul sont sur la Figure 2.9. Un point sur la figure est le résultat du calcul de la charge à rupture calculée avec le modèle élasto-plastique dans un essai de flexion 3 points pour les 2 mécanismes de rupture du bois, à savoir rupture en traction (abscisse) ou rupture en compression (ordonnée). On voit que plusieurs points sont sur une même verticale ou horizontale. Nous avons fait varier les propriétés du bois autour de la moyenne pour certains points se trouvant à proximité de la bissectrice. Le résultat est que nous observons que la plupart des essences de bois se rompent en traction lors d'un essai de flexion (pour des cisaillements faibles). Cette première conclusion justifie donc l'intérêt du renforcement du bois en traction.

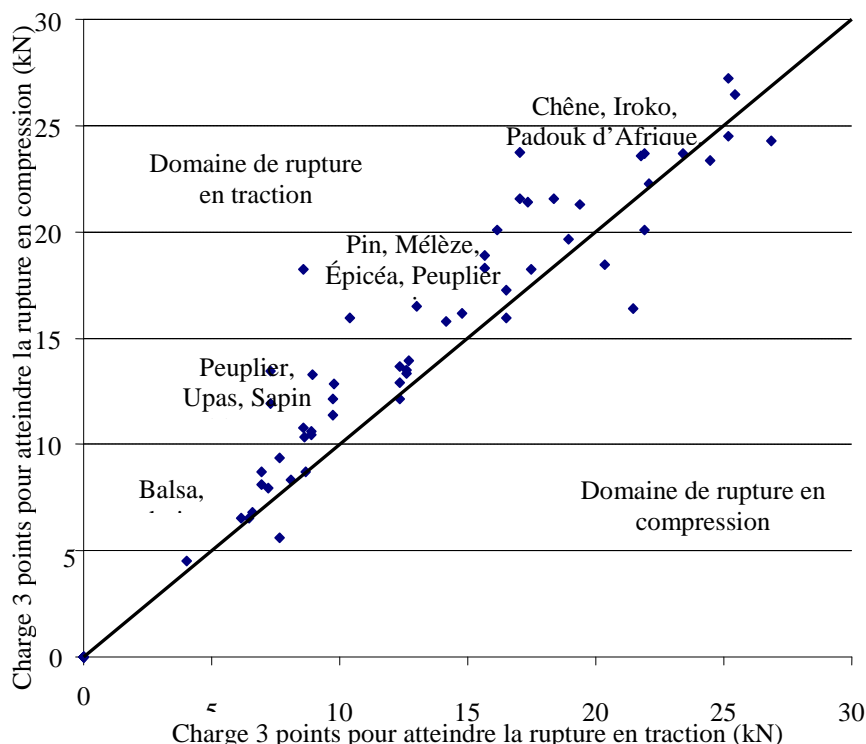


Figure 2.9. Simulation de la rupture des poutres en bois seul de différentes essences. Section 100x50 (mm²). Portée 1600 mm

Quelques remarques peuvent être d'ores et déjà faites concernant la possibilité d'optimiser le renforcement. Tout d'abord, nous remarquons que la position de l'axe neutre dans une poutre en bois renforcée descend lors de l'augmentation du module ou de la quantité de FRP, ce qui augmente la déformation en compression et facilite la rupture potentielle dans cette zone. Il est par conséquent théoriquement possible de déterminer la fraction optimale de FRP pour que la rupture ait lieu selon les deux modes en même temps. Ensuite, il est facile d'observer que la performance du FRP est reliée à la ductilité du bois. En effet, quand le bois présente une capacité élevée de plastification, sous l'effet du chargement croissant, la position de l'axe neutre descend et la force générée par le FRP tend à augmenter le moment ultime. Si, au contraire, le domaine plastique du bois n'est pas significatif, l'application du FRP ne sera pas aussi efficace. Enfin, la rupture analysée par ce schéma ne tient pas compte des défauts et de l'anisotropie du bois. Une approche statistique apparaît nécessaire pour améliorer la précision du dimensionnement du renforcement des éléments bois par FRP.

Pour approfondir ce sujet, il apparaît important d'étudier expérimentalement le domaine d'intérêt du renforcement du bois en flexion et d'obtenir un jeu de données suffisant pour analyser du point de vue statistique les résultats.

2.4. Expérimentation

Nous présentons maintenant les études expérimentales qui doivent permettre de trouver les domaines d'efficacité du renforcement du bois en traction. Les tests sur les poutres de bois non renforcées montrent que la plupart des ruptures se déroulent en mode de traction du bois, sans ou avec la zone comprimée plastifiée. Quelques essais de compression sont réalisés afin d'ajuster le modèle élasto-plastique. Étant donné la variation des propriétés du bois, les valeurs numériques du modèle

seront calées à chaque essai de flexion.

2.4.1. Dimensions des éprouvettes et propriétés des matériaux

Trente poutres ont été testées, parmi lesquelles 15 sont renforcées par une couche de composite en carbone UD pré-impregné, de module d'Young de 130GPa , de type aéronautique, d'épaisseur $0,5\text{mm}$, collée sur la face inférieure à l'aide d'une colle époxy de type Sikadur 330, les 15 autres étant non renforcées. Les essais sont de type flexion trois points. Les trente poutres sont en bois massif d'épicéa de $1,7\text{ m}$ de longueur et $0,05 \times 0,1\text{ m}^2$ de section. La portée est de $1,60\text{ m}$ (Figure 2.10).

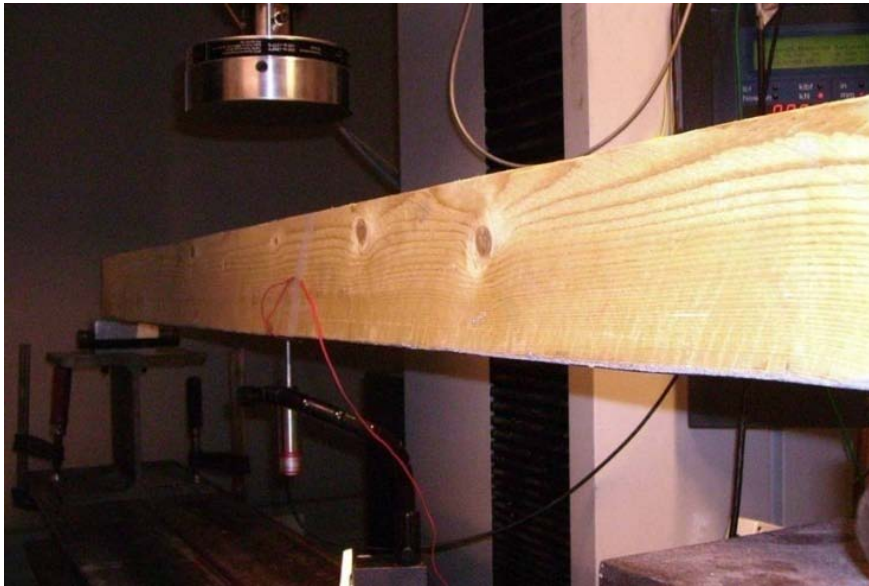


Figure 2.10. *Dispositif pour les essais en flexion 3 points.*

Les propriétés du bois sans défaut et du carbone sont mesurées avant essai. Les propriétés de la colle Sikadur 330 sont prises directement dans le guide du fabricant [Sika 2009, Notice Technique 9.97]. Le taux volumique de renforcement $\frac{V_{\text{carbone}}}{V_{\text{épreuve}}}$ pour les éprouvettes renforcées est de $0,5\%$.

2.4.2. Métrologie et procédure d'essai

Les essais en flexion ont été réalisés à l'Institut Navier, sur une machine d'essai électromécanique MTS 20/M d'une capacité de 100 kN . Les essais ont été pilotés en déplacement à l'aide du logiciel Autotrac à une vitesse de chargement de 1 mm/min et 3 mm/min pendant le déchargement. Le pilotage de l'essai est composé de trois phases principales (Figure 2.11). La première phase consiste en trois cycles de charge-décharge de 10% à 40% de la charge de rupture F_{Rup} (valeur déterminée par le pré-dimensionnement de la poutre). Elle permet de déterminer la raideur de la poutre. La deuxième phase est composée de trois cycles de charge-décharge allant de 10% à 70% de la charge de rupture. Cette phase permet de déterminer le comportement des poutres dans le domaine plastique et aussi la réversibilité. La dernière phase conduit la poutre à la rupture. Elle permet de déterminer le mode et la valeur de rupture (MOR).

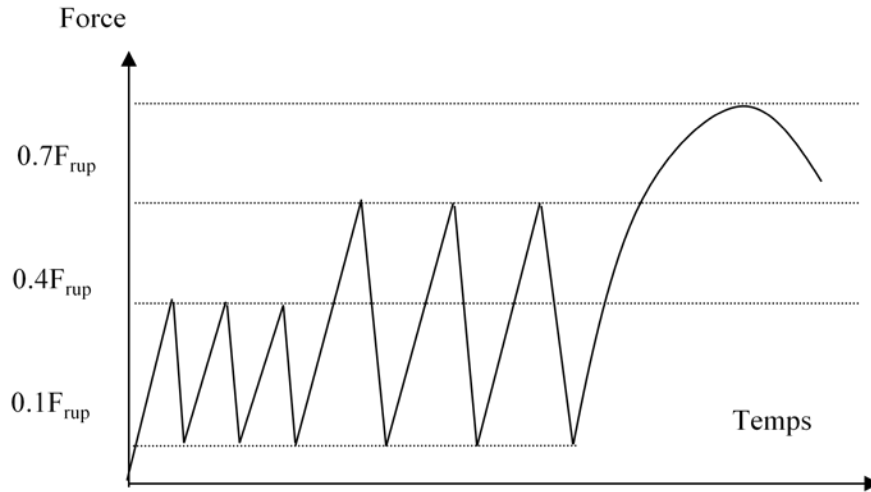


Figure 2.11. Le plan de chargement / déchargement

Trois capteurs de déplacement LVDT de 20 mm de course sont disposés pour mesurer la flèche et le tassement d'appui. Une jauge de déformation est disposée à mi-travée, permettant de déterminer la déformation puis l'effort dans le composite (Figure 2.10).

2.4.3. Résultats des essais

Méthode d'exploitation des résultats

La théorie statistique de la rupture fragile d'un matériau hétérogène a été proposée par Weibull [Weibull, 1951]. Elle nous semble adaptée au bois du fait du caractère fragile de la rupture en traction de ce matériau. Nous utilisons ici celle à deux paramètres pour le traitement des résultats de nos essais. La fonction de probabilité $F_X(x) = \mathbb{P}(X < x)$ suit une loi exponentielle de la forme:

$$F_X(x) = \mathbb{P}(X < x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\phi}\right)^k\right) \quad (2.13)$$

La valeur de la variable X pour le $a^{\text{ème}}$ centile se calcule par :

$$[X]_a = \phi \cdot \left(\ln \frac{1}{1-a}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.14)$$

Le but de ces essais est de calculer les déformations ultimes et la contrainte de traction dans le bois au moment de la rupture, à partir de l'analyse de la courbe effort-flèche par le modèle de Buchanan. La comparaison de ces grandeurs pour les 2 familles d'éprouvettes nous renseignera sur l'apport du renfort du point de vue quantitatif. La courbe expérimentale nous informe sur les efforts correspondant à la limite élastique du bois et la limite ultime de la poutre (Figure 2.15 et Figure 2.16). Pour chaque courbe, le domaine élastique est déterminé objectivement en maximisant la corrélation entre les données de force et celles de déplacement. La force maximale correspond à la force ultime car la partie plastique de courbe est croissante. Nous pouvons donc déterminer grâce aux courbes force-flèche la contrainte σ_{ec} et le moment ultime. Le coefficient m est identifié grâce aux résultats expérimentaux. Sur la 0, on voit qu'il y a au moins 3 méthodes pour fixer la courbe modèle en compression du bois. Nous avons arbitrairement choisi le modèle avec $m = 0$. En l'introduisant dans les équations (2.6) à (2.12), les paramètres $\sigma_t; \varepsilon_c; h_p; h_c; h_t$ au moment de la rupture sont déterminés. Cette valeur $m=0$ sera justifiée après analyse des résultats.

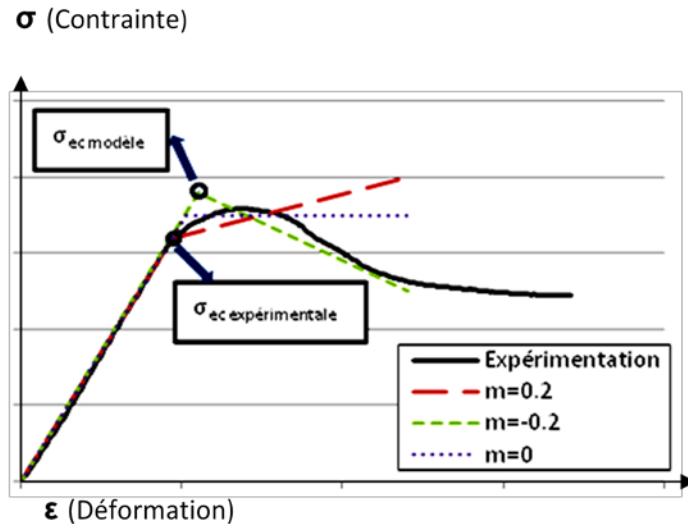


Figure 2.12. *Comportement typique de bois en compression*

Modes de rupture des poutres – examen des courbes obtenues

Les courbes de flexion (Figure 2.15 et Figure 2.16) représentant le comportement des poutres respectivement non renforcées et renforcées montrent toutes un domaine non linéaire avant l'atteinte de la force maximum, témoignant ainsi que la plastification du bois a eu lieu en compression. Certains auteurs estiment que le début de la plastification du bois correspond à la rupture. Ici, nous définissons la rupture comme la force maximale obtenue dans l'essai. Cette définition est proche de celle adoptée pour le béton armé, pour lequel on autorise la plastification du béton en compression dans le calcul des sollicitations ultimes.

Les observations permettent de distinguer deux modes de ruptures principaux des poutres. Tout d'abord, aucune rupture en traction du carbone n'a été observée. Le premier mode de rupture est en traction du bois. Ce mode a eu lieu pour toutes les 15 poutres non renforcées et pour quelques poutres renforcées. Cette rupture, brutale et fragile, s'initie au niveau des défauts du bois (nœuds, fissures...). Un exemple est dans la Figure 2.13 et Figure 2.14

Le deuxième mode de rupture se développe par plastification du bois en compression. Pour ce mode, la rupture se conclut en général par le décollement du carbone à l'extrémité de la poutre.

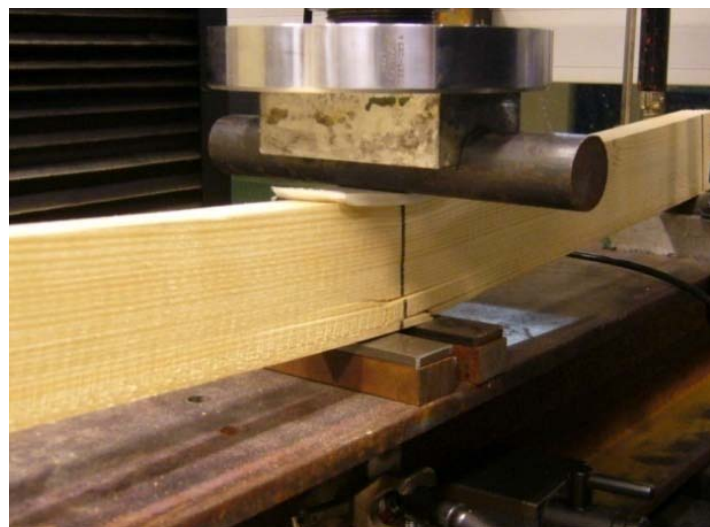


Figure 2.13. *Poutre non renforcée. Rupture en traction.*



Figure 2.14. *Poutre renforcée. Rupture en traction.*

La Figure 2.15 et Figure 2.16 montrent l'ensemble des courbes expérimentales obtenues sur les 30 poutres, le Tableau 2.2 récapitule les résultats. Les observations suivantes peuvent être faites :

- En présence de renforcement, le comportement est plus ductile. La flèche maximale est en moyenne plus importante. Une flèche maximale de 65 mm a été observée ;
- La raideur en flexion des poutres augmente conformément aux prévisions de la RdM. Le taux de renfort de 0,5% augmente la raideur en flexion de 16%.
- La moyenne des forces de rupture est augmentée en présence de renfort. La moyenne des charges ultimes est augmentée de près de 23% en présence du renforcement. Cependant les valeurs maximales sont quasiment identiques.
- Les contraintes maximales de traction dans le bois sont peu changées en présence de renforcement (Tableau 2.2). Nous constatons une augmentation moyenne de 7 % de la résistance théorique du bois pour les poutres renforcées.
- Le gain très visible concerne la réduction de la dispersion des résistances. Le coefficient de variation de la force maximale chute de 25% à 13% avec le renforcement.

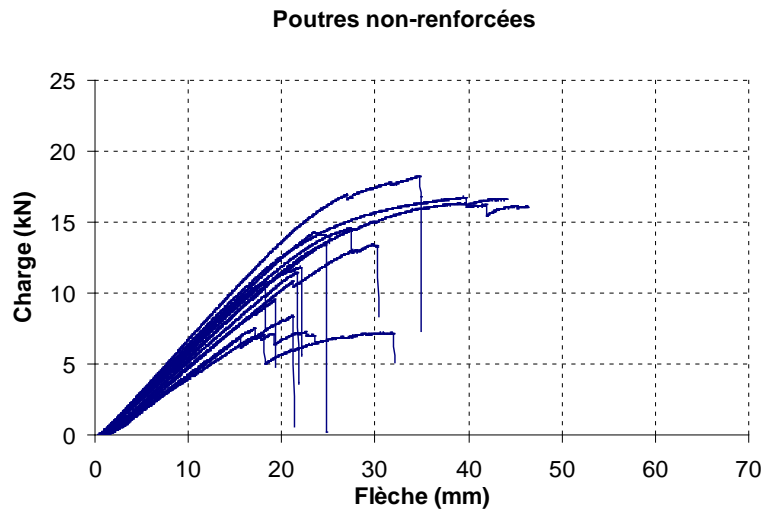


Figure 2.15. *Comportement en flexion pour les poutres non renforcées*

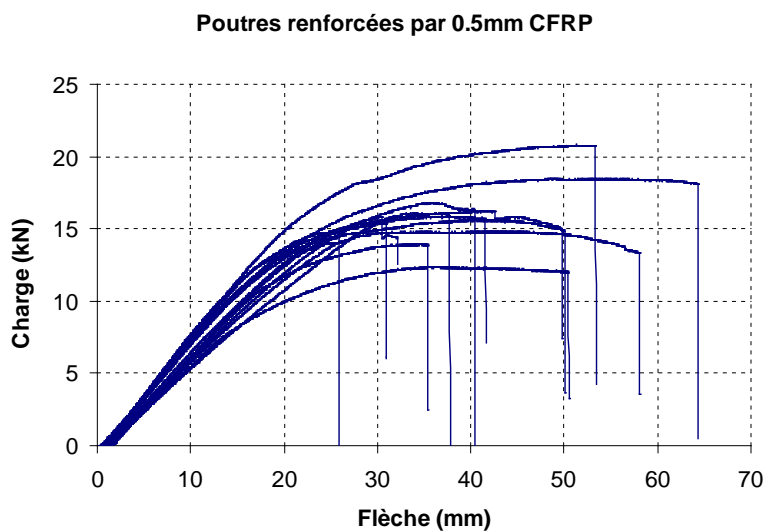


Figure 2.16. *Comportement en flexion pour les poutres renforcées.*

Poutres	Raideur en flexion (N/mm)		Capacité maximale (kN)		Contrainte max dans le bois en traction (MPa)		Flèche résiduelle (mm)	
	Moyenne	Coef. de variation	Moyenne	Coef. de variation	Moyenne	Coef. de variation	Moyenne	Coef. de variation
Avec renfort	691,02	9,8%	15,8	13,6%	83,9	14,4%	27,16	47%
Sans renfort	593,9	13,9%	12,8	24,8%	78,4	24%	6,08	72%
Gain (%)	16.35		23.44					

Tableau 2.2. *Récapitulatif des résultats d'essai. La contrainte maximale a été calculée par le modèle (équations 2.6 à 2.12) avec $m = 0$.*

Analyse plus détaillée des résultats

Nous allons dans cette partie comparer statistiquement quelques paramètres pour évaluer les domaines d'intérêt du renforcement. Ces paramètres sont donnés dans les Tableau 2.3 à Tableau 2.7.

Pour chaque comparaison, nous comparons le facteur de forme k et le facteur d'échelle ϕ de la loi Weibull. La valeur du cinquième centile sera également calculée et comparée. En effet, les normes de calcul des structures, et en particulier les Eurocodes, introduisent la notion de résistance caractéristique, laquelle représente le cinquième centile de la distribution. Les paramètres les plus intéressants sont la raideur en flexion, capacité maximale, ductilité (flèche résiduelle). Néanmoins, les autres paramètres, tels que la résistance en traction du bois, l'épaisseur du bois plastifié, sont également estimés.

Comparaison des raideurs en flexion trois points

Nous nous intéressons maintenant à la première phase qui est composée de trois cycles de chargement et déchargement. Dans cette phase, le rapport entre l'effort appliqué et la flèche correspondante est *quasi* linéaire. Il est déterminé en moyennant les deux derniers cycles de chargements dans la première phase de pilotage. Ce rapport s'appelant raideur en flexion simple (Figure 2.17) permet également de déterminer le module apparent du bois en flexion.

Nous observons un faible décalage de 16,4% entre les 2 populations d'éprouvettes. L'augmentation obtenue en présence de carbone correspond au 0,5% en volume de renfort. Ceci était prévisible car, nous nous intéressons spécialement au domaine des faibles taux de renforcement du bois. On peut noter également que la valeur de la raideur pour le cinquième centile augmente, quant à elle, de 28% (Tableau 2.3). Ceci est plus élevée que 16,4% (valeur moyennée).

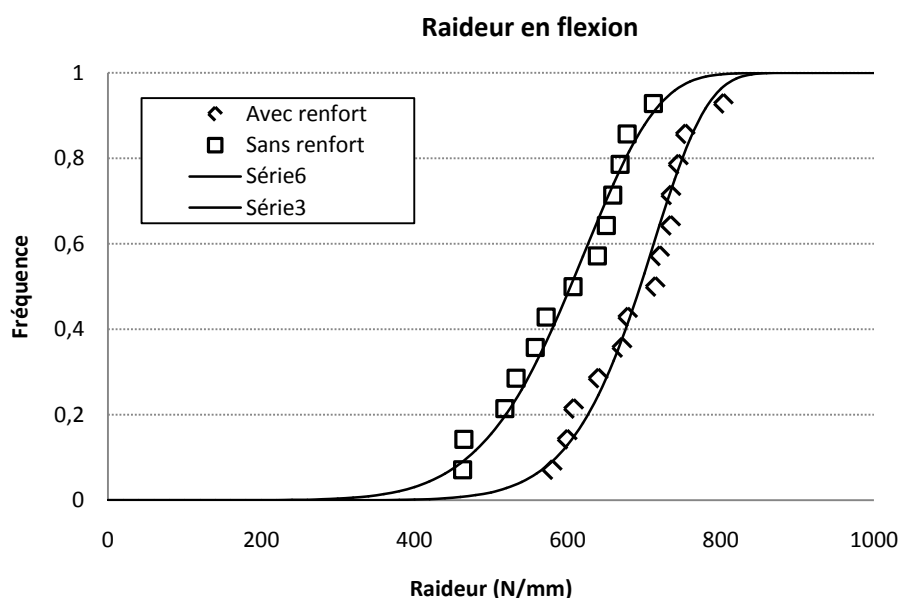


Figure 2.17. Comparaison des raideurs en flexion trois points

Paramètres Weibull	k	ϕ	$[X]_{5\%}$ (N/mm)
Poutres sans renfort	7,5	634	426,7
Poutres avec renfort	11	718	548,1

Tableau 2.3. Paramètres Weibull pour la raideur en flexion

Charge maximale et Module de Rupture (MOR)

Une première analyse un peu grossière consiste à comparer les modules de rupture des 2 populations. Par module de rupture des éléments bois, on entend la résistance maximale observée dans le bois avant la rupture totale en faisant l'hypothèse que le comportement de la poutre est élastique linéaire.

$$MOR = P \frac{l}{4} \cdot \frac{z}{I_{eq}} \quad (2.15)$$

où l la portée de la poutre

z le bras de levier maximal

I_{eq} l'inertie de la section en flexion.

P la charge maximale observée avant la rupture.

Cette définition est fréquemment utilisée dans l'ingénierie du bois comme un critère pour prédire la rupture. La valeur du module de rupture est égale à la résistance en traction ou compression maximale. Les résultats sont sur la Figure 2.18 et Tableau 2.4.

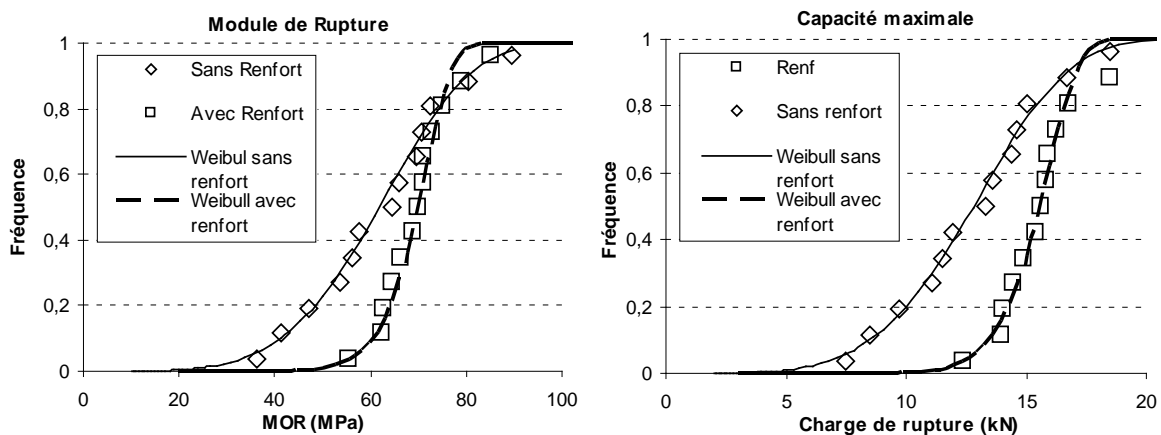


Figure 2.18. Module de rupture et capacité maximale des poutres en flexion trois points

Rappelons que nous utilisons dans cette étude la distribution de Weibull à deux paramètres, c'est-à-dire, nous acceptons que la valeur minimale des variables soit possiblement égale à 0. Ce n'est pas la meilleure approche mais elle nous permet plus facilement d'évaluer le renforcement. Pour les poutres renforcées, le facteur d'échelle augmente légèrement, tandis que le facteur de forme augmente énormément, ce qui fait presque doubler la valeur de cinquième pourcentile.

Paramètres Weibull	k	ϕ	$[X]_{5\%}$ (N)
Poutres sans renfort	4	14050	6686,4
Poutres avec renfort	12,5	16115	12706,8

Tableau 2.4. Paramètres statistiques de la distribution Weibull de la capacité maximale

Les valeurs moyennes des charges ultimes sont respectivement de 12,8kN et 15,8kN, c'est-à-dire peu différentes (23,4%). Les valeurs de k nous permettent de vérifier ici quantitativement que la distribution des résistances est bien plus serrée en présence du renforcement. Les poutres ayant défauts graves sont améliorées. Le rôle du renforcement est donc de lisser les défauts locaux du bois, autrement dit, de limiter les effets des concentrations de contrainte aux singularités en empêchant la

propagation des fissures. De plus, on voit dans le Tableau 2.4 et sur la forme de la courbe dans la Figure 2.18, que la valeur de la capacité pour le cinquième centile est augmentée 90%. Ceci est bien évidemment extrêmement intéressant pour le dimensionnement des poutres.

Contrainte maximale en traction dans le bois

Nous acceptons l'hypothèse que l'interface carbone – bois est parfaite et que l'épaisseur de carbone est négligeable devant celle du bois. Des jauges ont été collées sur la face inférieure de 2 poutres renforcées. Nous avons aussi déterminé la contrainte en traction et la déformation grâce au modèle non linéaire présenté au dessus. La comparaison des déformations expérimentales et théoriques au moment de la rupture sont donnés dans le Tableau 2.5. On observe les différences de 8% et 17% attribuable à la simplicité du modèle et à l'imprécision sur la mesure du module (le module local est ici calculé à partir de la courbe de flexion et du module apparent en supposant que le module de cisaillement est égal à 1/20^{ème} du module apparent).

Poutres renforcées	Force maximale (kN)	Déformation mesurée	Déformation calculée (modèle bilinéaire)
26	18,49	0.0090	0.0077
27	20,82	0.0081	0.0075

Tableau 2.5. Comparaison des déformations pour 2 corps d'épreuve

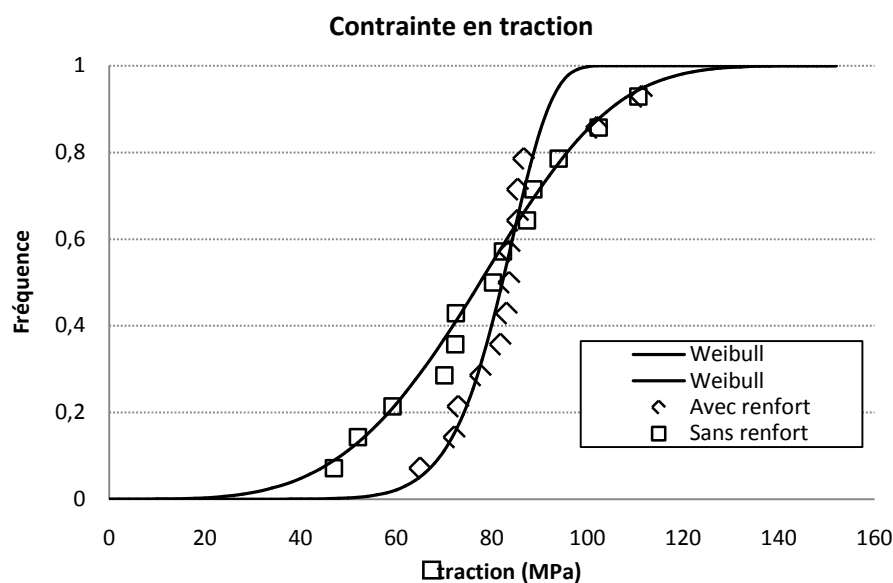


Figure 2.19. Contrainte maximale en traction du bois au moment de rupture

Paramètres Weibull	k	ϕ	$[X]_{5\%}(MPa)$
Poutres sans renfort	4	85	40,45
Poutres avec renfort	11	85	64,88

Tableau 2.6. Paramètres statistiques de la distribution Weibull de la contrainte maximale en traction dans le bois.

On voit la Figure 2.19, La moyenne des contraintes ultimes en traction dans le bois renforcé augmente de $5,5MPa$ soit un pourcentage de $7,06\%$. Les paramètres d'échelle ϕ dans les deux cas sont les mêmes, mais le facteur de forme dans le cas des poutres non renforcées est beaucoup moins grand. Cette observation est très importante, car, même si les valeurs extrêmes de résistance sont ici peu différentes, la distribution de ces résistances n'est pas sans conséquences pour le dimensionnement des structures.. Dans notre de cas, la valeur de la résistance pour le cinquième centile augmente de $40,45$ à $64,88 MPa$ quand on vient renforcer le bois en traction, ce qui représente une augmentation de 60% de la résistance caractéristique. Cette performance est probablement due à la capacité du renforcement à supporter des concentrations de contrainte au voisinage des défauts, autrement dit à limiter la propagation de fissures.

L'épaisseur (hauteur)de bois plastifié et déformation maximale de la fibre extrême comprimée

Nous nous intéressons ici au volume de bois qui a été endommagé en compression pendant l'essai. Sur la Figure 2.20, nous observons deux distributions de même forme mais d'amplitude différente, ce qui est donné par le paramètre d'échelle ϕ montre que le renforcement fait travailler le bois renforcé en compression beaucoup plus que celui sans renfort, puisque l'épaisseur plastifiée est beaucoup plus importante.

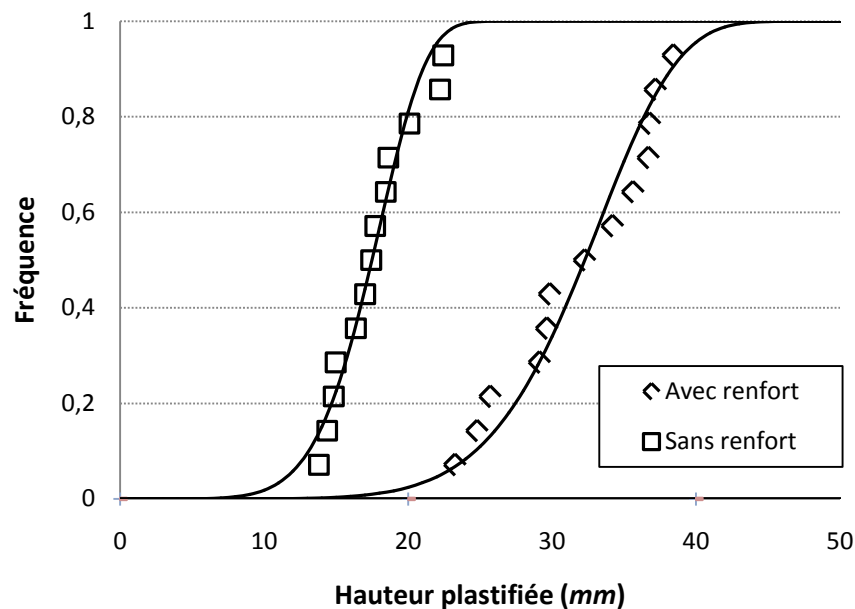


Figure 2.20. Épaisseur du bois plastifiée dans la section mi-travée

Paramètres Weibull	k	ϕ
Poutres sans renfort	7	19
Poutres avec renfort	7	34

Tableau 2.7. Paramètres statistiques de la distribution Weibull de l'épaisseur plastique

Le modèle élasto plastique est à examiner au vu de ces résultats. Nous avons précédemment évoqué la difficulté de fixer la valeur du coefficient m , lequel pilote la pente du comportement dans le domaine plastique (0). La déformation plastique en compression étant beaucoup plus importante pour les poutres renforcées, une modélisation avec $m < 0$ serait alors plus judicieuse, alors qu'en l'absence de renforcement, cette déformation beaucoup moins grande laisse supposer que le modèle avec $m > 0$

serait plus approprié. La comparaison des déformations ultimes en traction calculées par le modèle et mesurées par des jauges donne une différence d'environ 13%. Ces écarts ne sont pas entièrement dus à l'imprécision du modèle, mais aussi à celle de la valeur du module de déformation. Ils laissent penser cependant qu'un modèle reproduisant plus fidèlement le comportement plastique du bois en compression donnerait une meilleure précision.

2.5. Conclusion

Le but de cette partie est de connaître le domaine d'intérêt d'un renforcement du bois par un matériau composite tel que le CFRP en faible quantité. On vise ici l'amélioration du comportement à la rupture plus que l'augmentation de raideur. Les essais ainsi que leur analyse par un modèle élasto-plastique nous informent que le renforcement a pour effet d'augmenter les valeurs moyennes du module de rupture du bois, non pas en décalant l'ensemble des valeurs, mais en diminuant la dispersion expérimentale. On estime que le renforcement vient s'opposer à l'influence des défauts à la propagation des fissures de traction au voisinage des singularités du bois. C'est donc en lissant les défauts de traction du bois que le renforcement agit. Une conséquence est que la ductilité structurelle augmente, du fait que la zone plastifiée en compression a augmenté. En renforçant le bois en traction, le concepteur peut donc bénéficier d'une résistance caractéristique plus grande en flexion.

L'augmentation de la rigidité étant proportionnelle à la quantité du renfort, elle n'est pas significative ici. Cette conclusion introduit la question de l'optimisation du rapport rigidité / coût.

Les renforts utilisés dans cette étude sont en carbone. Nous pouvons nous interroger sur la possibilité d'utiliser d'autres matériaux que le carbone, par exemple la fibre de verre (GFRP) ou des composites à base de fibres naturelles (composite de lin par exemple). En fait, c'est la rigidité $Module \times \text{Épaisseur}$ qui intervient dans le problème, si bien que l'usage d'un composite différent du carbone devrait produire les mêmes résultats à la condition que les produits $Module \times \text{Épaisseur}$ soient identiques. Pour le GFRP par exemple E_{CFRP} / E_{GFRP} varie de 3,5 à 4, l'épaisseur de GFRP devrait donc théoriquement être augmentée d'autant.

Les questions qui émergent portent sur le changement d'échelle et l'insertion de poutres bois-composite dans une structure globale. Sur ce dernier point, dans le cas de tablier de pont, une dalle en béton sera connectée aux poutres. La rupture s'en trouvera donc modifiée, notamment, elle devrait être plus brutale, mais à une charge plus importante, car la rupture ne devrait plus se produire suivant le schéma de plastification du bois en compression. Par ailleurs, le changement d'échelle pose la question d'une possible rupture dans une zone tendue, mais suffisamment éloignée du renfort pour que ce dernier devienne inefficace. C'est en effet une conclusion que l'on peut tirer des essais de structure réalisés au LCPC dans le cadre du projet NR2C. Il existe de nombreux axes d'amélioration possible. Mais nous avons choisi à l'issue de cette étude préliminaire d'investiger le multi renforcement dans l'épaisseur de la partie tendue du bois.

C'est l'objet du prochain chapitre.