



HAL
open science

Caractérisation expérimentale de poutres composites bois / béton

Yoann Debesse, Laurent Giesi

► **To cite this version:**

Yoann Debesse, Laurent Giesi. Caractérisation expérimentale de poutres composites bois / béton. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. hal-01866782

HAL Id: hal-01866782

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01866782>

Submitted on 3 Sep 2018

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

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



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'étude

Ingénieur 3^{ème} année

**CARACTERISATION EXPERIMENTALE DE
POUTRES COMPOSITES BOIS /BETON**

**DEBESSE Yoann
GIESI Laurent
2012 / 2013**

Enseignant responsable : OUDJENE Marc

AVANT PROPOS

Ce Projet de Fin d'Etudes nous a permis de découvrir un aspect de la construction bois que nous connaissions peu, à savoir l'association du bois et du béton. Nous nous sommes rendu compte que cette combinaison a des utilisations encore trop peu explorées mais prometteuses. Bien que plusieurs études expérimentales aient été réalisées [1] [7] , il reste encore un long chemin à faire pour pouvoir entièrement jouir de cette alliance et notamment en matière de modélisation numérique.

L'ensemble de notre Projet de Fin d'Etudes s'inscrit dans la continuité d'autres projets menés au LERMAB, entre autres, par M. Marc Oudjene. Nous avons eu la chance de nous pencher à la fois sur la théorie et la pratique avec des tests à grande échelle menés grâce à la dalle d'essais mécanique présente sur le campus fibre.

Deux objectifs de ce PFE peuvent être énoncés :

- l'évaluation de la précision de la méthode de calcul par l'Eurocode 5 [13] ;
- la validation de l'approche numérique développée au LERMAB [10] [11] .

Tout d'abord, nous tenons à remercier M. Marc Oudjene pour sa disponibilité. Ce projet, qui lui tient à cœur, s'est construit autour des différents conseils et explications qu'il nous a fournis. Le matériau béton nous étant peu familier, ses connaissances nous ont été précieuses.

Ensuite, merci aux différentes personnes du Crittbois qui nous ont aidés à réaliser les tests sur la dalle d'essais. Nous remercions tout particulièrement M. Stéphane Aubert qui s'occupait de la gestion de la dalle d'essais lors de nos tests.

Enfin, nous remercions tout le personnel de l'atelier qui était présent pour nous aider lors de la fabrication de nos différentes préparations expérimentales.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

AVANT PROPOS	2
SOMMAIRE	3
LISTE DES INDICES, SYMBOLES ET ABREVIATIONS	4
TABLE DES FIGURES, PHOTOS ET TABLEAUX	5
INTRODUCTION	7
- PARTIE 1 - GENERALITES SUR LES PLANCHERS BOIS/BETON	9
1.1. <i>Les planchers bois/béton</i>	9
1.1.1. Généralités.....	9
1.1.2. Quel but donner à ces planchers ?.....	10
1.2. <i>Les solutions existantes</i>	10
1.2.1. Plancher collaborant SBB® (construction neuve) [20].....	11
1.2.2. Le plancher collaborant par Sylvabat construction [17]	12
1.2.3. Le renforcement des planchers par Tecnarria® [18].....	13
1.2.4. Exemple de réalisation par le bureau d'études Plantier [19].....	13
1.2.5. La D-Dalle par CBS-CBT [23].....	14
1.2.6. Les connecteurs SFS [24].....	15
1.3. <i>Utilisations</i>	16
1.3.1. Avantages	16
1.3.2. Inconvénients.....	16
- PARTIE 2 - CARACTERISATION DE L'ASSEMBLAGE BOIS/BETON PAR VIS SFS	17
1.1. <i>Programme expérimental</i>	17
1.1.1. Caractérisation du béton	17
1.1.2. Caractérisation du bois	18
1.1.3. Confection des éprouvettes.....	18
1.2. <i>Résultats et analyse</i>	20
1.2.1. Analyse de la Norme NF EN 26891 [14].....	20
1.2.2. Tests des éprouvettes	23
1.2.3. Tests d'éprouvettes renforcées par plaques dentées.....	25
1.3. <i>Modèle éléments finis</i>	28
1.3.1. Principe.....	28
1.3.2. Résultats et discussions.....	29
- PARTIE 3 - TESTS DES POUTRES BOIS/BETON	31
1.1. <i>Programme expérimental</i>	31
1.1.1. Caractérisation des éléments.....	31
1.1.2. Pré-dimensionnement	31
1.1.3. Réalisation des poutres bois/Béton	33
1.1.4. Instrumentalisation	35
1.2. <i>Résultats et analyses</i>	36
1.2.1. Observations	36
1.2.2. Résultats expérimentaux.....	37
1.3. <i>Modèle éléments finis</i>	39
1.3.1. Contraintes dans la poutre.....	39
1.3.2. Efficacité de la liaison	41
CONCLUSION	44
BIBLIOGRAPHIE	46
OUVRAGES:	46
SITES INTERNET:	47
RESUME	48
ABSTRACT	49

**LISTE DES INDICES, SYMBOLES ET
ABREVIATIONS**

- a : distance entre le bord de la poutre et le premier appuis en flexion 4 points
 A_1 : aire de la section de la dalle en béton
 A_2 : aire de la section de la poutre en bois
 A_{eff} : aire effective de la section composite
 d : diamètre de l'organe de connexion
 D_c : flèches à l'effort considéré de la courbes $\gamma=1$ correspondante à un assemblage avec liaison parfaite
 D_i : flèches à l'effort considéré de la courbe de la méthode considérée
 D_n : flèches à l'effort considéré de la courbes $\gamma=0$ correspondante à un assemblage sans liaison
 E_{bois} : module d'élasticité du bois
 E_{cm} : module d'élasticité du béton
 E_{eff} : efficacité de la liaison
 EI_{eff} : rigidité effective de la section composite
 f_{cm} : résistance caractéristique du béton en compression
 F_{est} : charge maximale présumée
 F_{max} : charge maximale atteinte
 g_{max} : glissement relatif bois/béton maximum
 h_1 : hauteur de la dalle béton
 h_2 : hauteur de la poutre bois
 k : rigidité de la connexion
 K_{ser} : module de glissement
 K_u : valeur instantanée du module de glissement pour les états limites ultimes
 L : portée de la poutre composite
 n : coefficient d'équivalence de la section béton en bois
 P : effort exercé en flexion 4 points par le vérin
 $q_{ser, court}$: charge de service uniformément répartie, à court terme
 S : espacement des connecteurs
 Z_g : position de l'axe neutre de la poutre composite (mm)
 γ : glissement à l'interface bois/béton
 ρ_m : masse volumique du bois
 w_{max} : flèche maximale à mi-portée

**TABLE DES FIGURES, PHOTOS ET
TABLEAUX**

Figure 1 : Connecteur SBB type « tire-fond »	11
Figure 2 : Connecteur BASE	13
Figure 3 : Schéma de principe	13
Figure 4 : Coupe du plancher.....	14
Figure 5 : Diagramme de comparaison des deux méthodes par rapport au glissement bois/béton	15
Figure 6 : Vis SFS VB-7,5 100mm.....	18
Figure 7 : Descriptif de l'éprouvette	19
Figure 8 : Vue 3D.....	19
Figure 9 : Mode opératoire de chargement selon la norme EN26891 [14].....	21
Figure 10 : Courbe typique charge glissement selon la norme EN 26891 [14].....	21
Figure 11 : Courbes force-glissement	24
Figure 12 : Courbes force glissement des éprouvettes renforcées	26
Figure 13 : Courbes effort glissement : comparaison entre éprouvettes non renforcées et renforcées.....	27
Figure 14 : Comparaison des courbes force-glissement entre expérience/numérique	29
Figure 15 : Distribution des contraintes équivalentes pour différents niveaux de glissement: (a) 25%, (b) 50%, (c) 70%, (d) of 100%	30
Figure 16 : Descriptif de la poutre.....	33
Figure 17 : Dessin Cadwork de la poutre bois/béton	33
Figure 18 : Dispositif d'essai en flexion 4 points selon la norme EN408 [15]	35
Figure 19 : Courbes force glissement relatif.....	38
Figure 20 : Courbes force flèche	38
Figure 21 : Comparaisons courbes effort flèche MEF/Expériences	39
Figure 22 : Déformée et distribution des contraintes équivalentes dans la poutre composite sous une flèche de 80 mm.	40
Figure 23 : Comparaison des méthodes	41

TABLE DES FIGURES, PHOTOS ET TABLEAUX

<i>Photo 1 : Prédalle de bois munie de connecteurs avant pose du ferrailage et du béton</i>	<i>11</i>
<i>Photo 2 : Prédalle de bois munie de connecteurs avec ferrailage, bac acier et isolant.....</i>	<i>11</i>
<i>Photo 3 : Connecteurs métalliques types « tubes » lors de réhabilitations et constructions neuves</i>	<i>12</i>
<i>Photo 4 : Connecteurs fixés au plancher</i>	<i>13</i>
<i>Photo 5 : Pont réalisé en bois/béton</i>	<i>13</i>
<i>Photo 6 : Connecteurs fixés à la dalle.....</i>	<i>14</i>
<i>Photo 7 : Disposition préconisée des connecteurs SFS</i>	<i>15</i>
<i>Photo 8 : Mise en place du coffrage.....</i>	<i>20</i>
<i>Photo 9 : Béton coulé</i>	<i>20</i>
<i>Photo 10 : Les éprouvettes finies.....</i>	<i>20</i>
<i>Photo 11 : Matage du bois au niveau du connecteur.....</i>	<i>23</i>
<i>Photo 12 : Epreuve sur le banc d'essai</i>	<i>23</i>
<i>Photo 13 : Epreuve renforcé par plaques dentées.....</i>	<i>25</i>
<i>Photo 14 : Mise en place des vis.....</i>	<i>34</i>
<i>Photo 15 : Poutres et coffrages.....</i>	<i>34</i>
<i>Photo 16 : Coffrage et ferrailage.....</i>	<i>34</i>
<i>Photo 17 : Poutre en cours de bétonnage</i>	<i>34</i>
<i>Photo 18 : Instrumentalisation, flèche à mi-portée</i>	<i>35</i>
<i>Photo 19 : Instrumentalisation, déplacement relatif</i>	<i>35</i>
<i>Photo 20 : Avant essais</i>	<i>36</i>
<i>Photo 21 : En cours d'essais</i>	<i>36</i>
<i>Photo 22 : Rupture du bois en traction</i>	<i>36</i>
<i>Photo 23 : Fissuration du béton</i>	<i>36</i>
<i>Photo 24 : Déplacement relatif à la rupture.....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques du béton</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 2 : Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques du bois</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 3 : Caractéristiques de résistance des assemblages.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 4 : Résumé des résultats des éprouvettes renforcées.....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 5 : Valeurs caractéristiques des essais</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 6 : Comparaison des efficacités des modèles à 10 kN</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 7 : Comparaison des efficacités des modèles à 20 kN</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 8 : Comparaison des efficacités des modèles à 30 kN</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 9 : Comparaison des efficacités des modèles à 43,5 kN</i>	<i>42</i>

INTRODUCTION

Le domaine de la construction ne cesse de s'agrandir année après année. Aujourd'hui, par soucis environnemental, de performance ou juste d'innovation, l'idée des sections composites réalisées par combinaison de différents matériaux de construction se développe de plus en plus. En ce sens, le bois est très apprécié : matériau d'avenir et autorisant la mixité, il se révèle très prometteur de par l'aspect écologique qu'il représente.

Le développement des éléments constructifs utilisant la combinaison bois/béton, par connecteurs métalliques, est en plein essor. Les travaux menés ces dernières années [1] [2] , dans le cadre de poutres porteuses et de planchers composites bois/béton, ont permis de montrer l'intérêt et les multiples avantages de cette technologie par comparaison aux structures traditionnelles bois ou béton.

Cependant, très peu de travaux ont été menés sur les aspects de modélisation numérique afin de réduire les tests expérimentaux lors de la validation de nouveaux concepts. Notre Projet de Fin d'Etudes est le prolongement de travaux déjà menés par M. Marc Oudjene et les différents intervenants précédents. Il s'appuie donc sur un état de l'art acquis.

La méthode suggérée par l'Eurocode 5 [13] pour le calcul des sections composites bois/béton est basée sur une approche linéaire élastique, en considérant deux critères : l'état limite ultime et l'état limite de service. Elle repose sur le calcul des caractéristiques effectives de la section composite bois/béton, notamment la rigidité effective, dépendant du coefficient de glissement à l'interface bois/béton. Ce coefficient de glissement est calculé en fonction du module de glissement, K_{ser} , du connecteur utilisé. On distingue, généralement, deux possibilités pour obtenir le module de glissement, K_{ser} :

- par tests expérimentaux, de type cisaillement, réalisés selon la norme EN 26891 [14] ;
- par différentes formules empiriques suggérées dans la littérature (Eurocode 5 [13] , Ceccotti [8] , Turrini et Piazza [9]).

INTRODUCTION

Cependant, plusieurs études [3] [4] montrent que ces formules empiriques surestiment grandement le module de glissement, K_{ser} , conduisant ainsi à une surévaluation de la rigidité globale de la poutre composite et pénalisant les conditions d'aptitude au service.

Il est donc tout à fait pertinent de développer des modèles numériques, par éléments finis, prédictifs basés uniquement sur la connaissance des propriétés mécaniques des matériaux. Cette étude s'inscrit dans ce contexte : un modèle éléments finis original a été développé, au LERMAB, pour la simulation numérique des connections vissées [10] [11] . Notre PFE se focalise sur la partie expérimentale avec un double objectif :

- évaluer la méthode de calcul proposée par l'Eurocode 5,
- valider de manière expérimentale l'approche numérique développée.

- PARTIE 1 - GENERALITES SUR LES PLANCHERS BOIS/BETON

Tout d'abord, bien que notre étude soit focalisée sur la validation et la caractérisation d'assemblages bois/béton par vis SFS, nous allons nous intéresser à la finalité en soi du principe de ces poutres composites pour faire un plancher « complet ».

1.1. Les planchers bois/béton

1.1.1. Généralités

Un plancher « mixte bois/béton » ou aussi appelé « plancher collaborant » est un plancher constitué d'une dalle en béton liée mécaniquement par des organes de connexion à des poutres en bois.

Le principe d'un plancher mixte est de faire travailler le béton en compression et le bois en traction grâce à la mise en œuvre de connecteurs souvent de type métallique. De ce fait, on utilise au mieux les propriétés mécaniques de chaque matériau.

Un plancher mixte est composé généralement d'une structure porteuse en bois (poutre, panneau KLH ...), sur laquelle sont fixés des connecteurs métalliques de type vis. Ces organes servent de liaison entre le bois et le béton qui sera coulé au-dessus après avoir mis en place si nécessaire un système de coffrage. L'épaisseur de cette dalle béton varie souvent entre 6 et 12 cm.

Même si elle connaît un engouement certain ces dernières années, cette méthode n'est pas nouvelle. Deux grands matériaux se disputent l'association au béton depuis au moins 1 siècle : l'acier et le bois. Concernant le bois, il existe déjà des brevets datant du début du XIX^e siècle décrivant l'association d'une dalle béton et d'éléments en bois avec un système de connexion type clous.

Mais c'est seulement depuis la deuxième guerre mondiale qu'on parle vraiment de construction avec des poutres mixte bois/béton. Seulement, cette idée n'a que peu évolué jusqu'aux années 70 du fait des mentalités ou encore, par exemple, des problèmes d'humidité du bois, ce qui posait des soucis de pérennité. Depuis les années 80, il est donc possible de trouver des études et autres essais en bon nombre sur cette technique.

1.1.2. Quel but donner à ces planchers ?

Ces planchers trouvent autant leur place dans des bâtiments neufs qu'en rénovation. En effet, ce type de plancher est très intéressant dans la réhabilitation de structures anciennes. Cela permet d'augmenter notablement la rigidité et la résistance des planchers bois. Lorsqu'un plancher bois a beaucoup bougé avec le temps il est possible de le « redresser » grâce à l'ajout d'une dalle béton (d'épaisseur de 6 à 12 cm). De plus, l'augmentation de l'isolation acoustique ajoutée par cette adjonction est souvent un critère de choix pour cette technique.

Lors d'une rénovation d'un plancher en bois, il est nécessaire de faire des interventions de renforcement et de raidissement, car ces planchers ont été réalisés pour supporter de faibles charges. Bien souvent, les anciens planchers en bois présentent une déformée plus importante que la réglementation préconise aujourd'hui. Ainsi, il est nécessaire de bien dimensionner le ferrailage ajouté à la dalle béton, les connecteurs positionnés pour faire la liaison et bien d'autres renforcements éventuels.

Le plancher est aussi tout à fait exploitable dans la construction neuve. Il faudra bien dimensionner les poutres qui devront supporter plus qu'un simple plancher bois. Cela signifie donc des poutres de section plus importantes mais cela ne gâche pas forcément l'esthétisme apporté qui reste, bien souvent, un critère important. Cela reste un bon compromis entre le tout bois et le tout béton dans la construction. Cette mixité reprend un peu le meilleur des deux et cela permet d'impliquer, en douceur, le public réticent au bois.

1.2. Les solutions existantes

Il existe de nombreuses techniques déjà appliquées par les industriels. Cependant il n'y a pas de règles précises ni de normes spécifiques aux planchers bois / béton. Mais, malgré tout, des études et divers essais ont eu lieu prouvant l'efficacité et la validité du principe.

Ainsi voici une liste, non exhaustive, d'applications industrielles en ce qui concerne les planchers et structures bois/béton.

1.2.1. Plancher collaborant SBB® (construction neuve) [20]

Ces planchers sont effectués grâce aux connecteurs métalliques SBB brevetés (Figure 1). Ils se présentent sous forme de tire-fond :

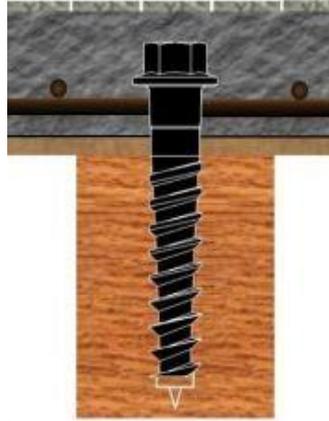


Figure 1 : Connecteur SBB type « tire-fond »

La dalle béton peut être coulée sur chantier directement sur une « prédalle » de bois (*Photo 1*). Cela permet un gain de temps et une simplification de la pose. De plus, le coffrage est ainsi directement obtenu.



Photo 1 : Prédalle de bois munie de connecteurs avant pose du ferrailage et du béton



Photo 2 : Prédalle de bois munie de connecteurs avec ferrailage, bac acier et isolant

Ce procédé fonctionne aussi lorsqu'on veut couler le béton sur les poutres bois. Dans ce cas des bacs aciers servent de coffrage (*Photo 2*). De l'isolant est ainsi rajouté entre le bac acier et le béton : ce procédé est, bien entendu, tout à fait applicable lors d'une réhabilitation.

1.2.2. Le plancher collaborant par Sylvabat construction [17]

Le principe reste le même que précédemment. Les poutres bois sont équipées de connecteurs métalliques. Des panneaux servent de coffrages. On rajoute le ferrailage, l'isolant et le film protecteur entre le bois et la dalle béton. La particularité réside dans les connecteurs métalliques. En effet, ceux-ci se présentent comme de simples tubes creux en acier (de diamètre 70 mm généralement) enfoncés au marteau dans des poutres préalablement fraisées (*Photo 3*).

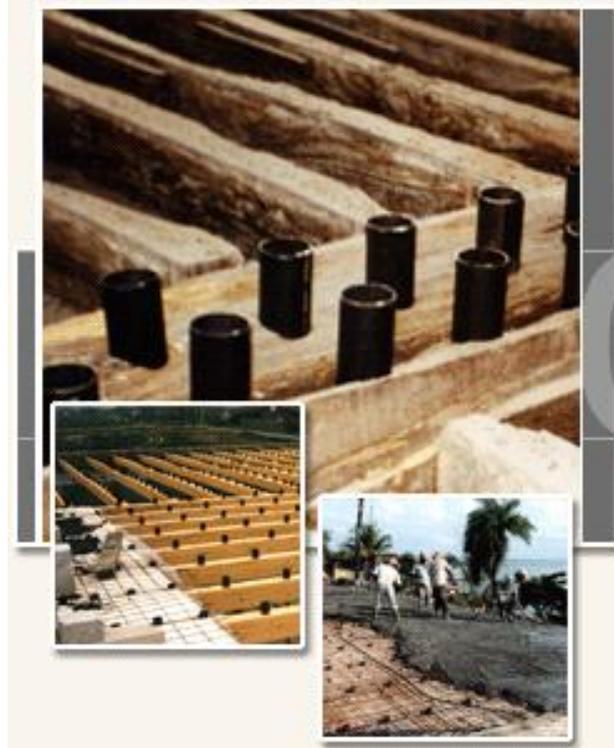


Photo 3 : Connecteurs métalliques types « tubes » lors de réhabilitations et constructions neuves

1.2.3. Le renforcement des planchers par Tecnaria® [18]

Le principe reste toujours le même. Nous ne nous attarderons que sur le connecteur utilisé. Il s'agit de connecteurs à ergot et crampons fixés par des vis à bois dans la poutre (Figure 2).

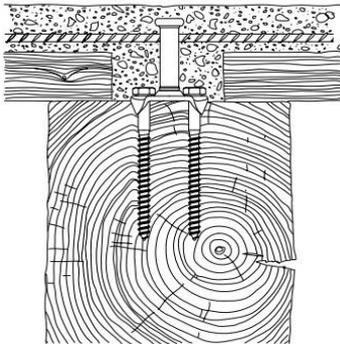


Figure 2 : Connecteur BASE



Photo 4 : Connecteurs fixés au plancher

Comme bien souvent, le constructeur fait en sorte qu'il y ait une surépaisseur au niveau de la poutre en réalisant un rainurage qui va permettre une meilleure reprise de l'effort tranchant rasant l'interface bois/béton (Photo 4).

1.2.4. Exemple de réalisation par le bureau d'études Plantier [19]

Le procédé utilisé par ce bureau d'études en 2004 a reçu un prix lors du concours Lumière de Lyon. Le but était de faire un pont en bois/béton (Photo 5) sans ajout d'aciers spéciaux. Le bureau d'études a procédé à plusieurs essais avant de s'arrêter sur un principe utilisant non seulement une mais deux poutres bois séparées par une partie béton et reprenant le tablier béton (Figure 3).

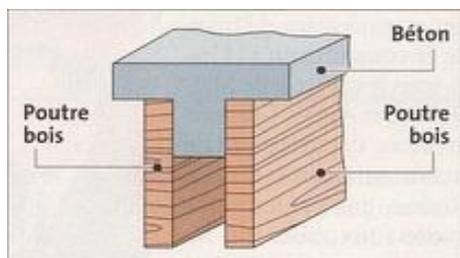


Figure 3 : Schéma de principe



Photo 5 : Pont réalisé en bois/béton

GENERALITES SUR LES PLANCHERS BOIS/BETON

Les deux poutres bois sont fixées avec le béton par un système d'entaille en forme tétraédrique. Le béton épouse la forme des poutres et se place bien dans les entailles, ce qui donne un assemblage d'une très bonne résistance. L'ajout de connecteurs est inutile dans ce cas et ainsi la mise en œuvre peut se révéler plus simple. La partie bois est préservée mais la technique est sans doute moins facile que la simple adjonction de ferrures métalliques.

1.2.5. La D-Dalle par CBS-CBT [23]

Il s'agit d'un principe intéressant car il autorise de grandes portées allant jusqu'à 18m. Le principe est simple, la partie bois est constituée de planches de résineux (possibilité d'utiliser du contrecollé) de 18 à 21 cm de largeur et d'épaisseur variable, vissées ensemble par un principe de décalage (*Figure 4*).

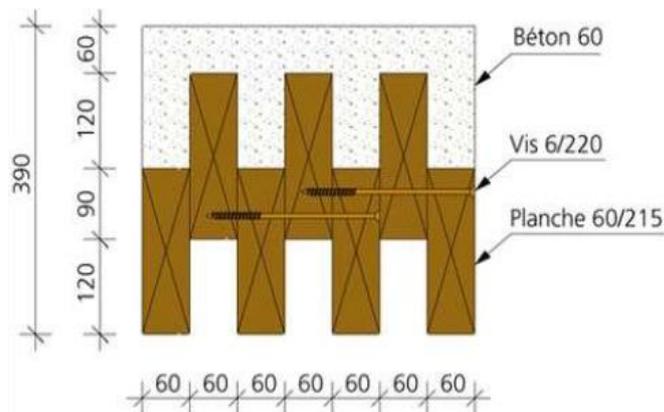


Figure 4 : Coupe du plancher

Elles sont de plus fixées par des connecteurs traversant toute la largeur du plancher (*Photo 6*). Le bois doit être scié transversalement pour pouvoir l'accueillir. Ensuite le béton peut être coulé directement puisque la prédalle bois joue le rôle de coffrage.



Photo 6 : Connecteurs fixés à la dalle

GENERALITES SUR LES PLANCHERS BOIS/BETON

Le béton utilisé est un béton à faible rapport eau/ciment afin de limiter la reprise d'humidité par le bois, cela évite l'installation d'un film séparant le bois du béton.

Outre ses capacités intéressantes en termes de portée, de résistance au feu ou encore de comportement sismique, l'avantage de ce principe réside aussi dans le rendu architectural. Il est ainsi possible de jouer sur l'épaisseur des planches, leur décalage ou encore sur les finitions afin d'avoir un plafond visible entièrement constitué de bois. Ce concept a reçu la médaille d'argent gros œuvre Bâtimat.

1.2.6. Les connecteurs SFS [24]

Comme nous l'avons vu, il existe plusieurs types de connecteurs. Qu'ils s'agissent de tire-fonds, de broches ou encore de vis, chacun remplit son rôle. Pour notre étude, comme nous l'avons déjà précisé précédemment, nous avons utilisé des connecteurs métalliques SFS de type vis. Voici quelques explications quant à leur mise en place.

Nous avons fait le choix dans notre étude de placer les connecteurs perpendiculairement à la poutre bois. Cependant le constructeur encourage une autre technique afin d'améliorer l'efficacité de l'assemblage (*Figure 5*), la technique consiste à croiser deux connecteurs enfoncés à 45° (*Photo 7*).

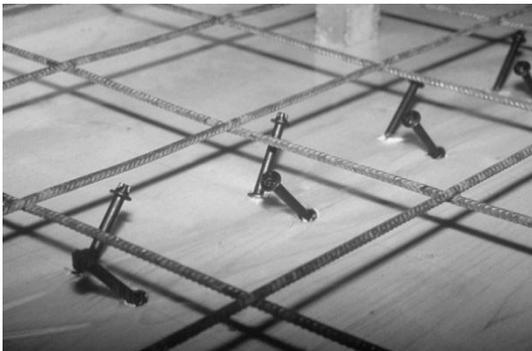


Photo 7 : Disposition préconisée des connecteurs SFS

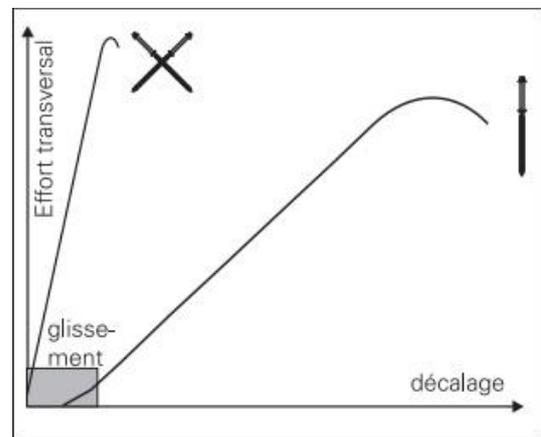


Figure 5 : Diagramme de comparaison des deux méthodes par rapport au glissement bois/béton

Cette disposition les sollicite autant en traction qu'en compression en plus du cisaillement, de ce fait elle procure à la liaison une meilleure rigidité. Grâce à cette technique, le système SFS réduit le glissement aux appuis entre la dalle et les poutres, et limite grandement le glissement initial (qui selon le constructeur rend les autres systèmes mixtes pratiquement inefficaces).

Ces différentes méthodes nous montrent bien que le domaine des poutres mixtes commence à se développer. Voyons maintenant les critères qui peuvent influencer le choix d'un tel complexe.

1.3. Utilisations

1.3.1. Avantages

Comme nous avons déjà pu le voir, la combinaison bois/béton présente de nombreux avantages, en voici une liste non exhaustive :

- Alléger la charge sur le bâtiment.
- Réduire les ponts thermiques.
- La rigidité du plancher est accrue, les déplacements étant moindres, il est plus facile de poser des éléments de revêtement fragile de type carrelage.
- Le béton peut apporter une nouvelle vie à une structure bois vieillissante.
- Le bois est aussi valorisé dans les constructions neuves car c'est un matériau vert.
- L'acoustique est meilleure (du fait de l'augmentation de la masse du plancher apportée par la dalle béton).
- Le confort est amélioré par rapport aux planchers bois par la réduction des vibrations.
- La dalle béton apporte au système mixte un meilleur comportement au feu en jouant le rôle de coupe-feu entre les étages.
- Le système mixte bois-béton permet d'obtenir une capacité portante plus élevée et une déformation plus faible qu'un plancher classique bois. Ce système permet ainsi d'opter pour de plus grandes portées.

1.3.2. Inconvénients

Cependant le plancher collaborant présente encore quelques défauts :

- Cette technique n'étant pas encore suffisamment développée, les coûts de sa mise en œuvre ont encore du mal à concurrencer ceux d'un plancher tout bois ou tout béton.
- La disposition des différents connecteurs est synonyme de supplément de temps si on ne dispose pas de matériel adapté et les fabricants s'y intéressant sont encore trop peu nombreux.

**- PARTIE 2 - CARACTERISATION DE
L'ASSEMBLAGE BOIS/BETON PAR VIS SFS**

On s'intéresse ici aux caractéristiques du comportement global des assemblages, à savoir les valeurs (K_{ser} , K_u , F_{max}), obtenues grâce à la courbe charge/déplacement.

1.1. Programme expérimental

Avant d'aller plus loin, nous devons d'abord nous concentrer sur les propriétés de chacun des deux matériaux que nous allons utiliser par la suite. Nous avons donc identifié les caractéristiques mécaniques des matériaux avec les procédures expérimentales appropriées.

1.1.1. Caractérisation du béton

Le béton utilisé pour nos éprouvettes a été obtenu en mélangeant des agrégats, du ciment ayant une résistance mécanique de 42,5 MPa et de l'eau. Pour obtenir les caractéristiques mécaniques du béton, des tests de compressions ont été réalisés sur 3 éprouvettes cylindriques normalisées de 160 mm de diamètre et 320 mm de haut. Le *Tableau 1* résume les résultats de ces tests ainsi que les résultats du module d'élasticité E_{cm} (1), calculé en fonction de la résistance caractéristique en compression selon la norme EN 1992-1-1: 2005 [12] ,

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (1)$$

D'après les tests, une valeur moyenne de la résistance à la compression de 30,1 MPa a été obtenue à l'âge de 28 jours. Cette valeur correspond à la classe de résistance C25/30 d'après la norme EN 1992-1-1:2005 [12] .

Test	ρ (kg/m ³)	F_{max} (kN)	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)
1	2318	600	29,9	30,558
2	2313	625	31,1	30,92
3	2355	590	29,4	30,403
Moyenne	2328,67	605,00	30,13	30,63

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques du béton

1.1.2. Caractérisation du bois

Le bois utilisé pour cette étude est du sapin avec une masse volumique à 12% d'humidité, d'environ 420 kg/m^3 .

Des tests de compression axiale et transversale ont été réalisés pour obtenir les résistances axiales et transversales du bois. Les éprouvettes testées ont une section de 10 mm par 10 mm et mesure 20 mm de haut. Elles ont été testées en compression grâce à une machine standard Instron à une vitesse de 5 mm/min. Pour chaque orientation, cinq éprouvettes ont été testées. Le module d'élasticité E_0 a été obtenu par un test de flexion quatre points, mené conformément à la norme EN 408 [15]. Pour les autres paramètres d'élasticité, ils ont été obtenus en utilisant avec la norme EN 338 [16]. Le *Tableau 2* donne la moyenne de chaque caractéristique.

$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$E_0 \text{ (Mpa)}$	$f_{c,0} \text{ (Mpa)}$	$f_{c,90} \text{ (Mpa)}$
420	11000	36,5	2,6

Tableau 2 : Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques du bois

1.1.3. Confection des éprouvettes

Pour caractériser l'assemblage, nous avons réalisé les éprouvettes décrites en *Figure 7* et *Figure 8*. Nous avons placé sur 2 faces parallèles d'un échantillon de bois lamellé-collé de classe GL24 une vis SFS VB-48-7,5 100 mm (*Figure 6*).

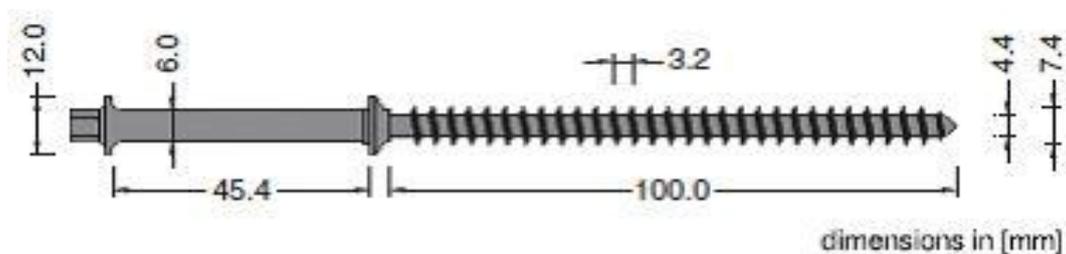


Figure 6 : Vis SFS VB-7,5 100mm

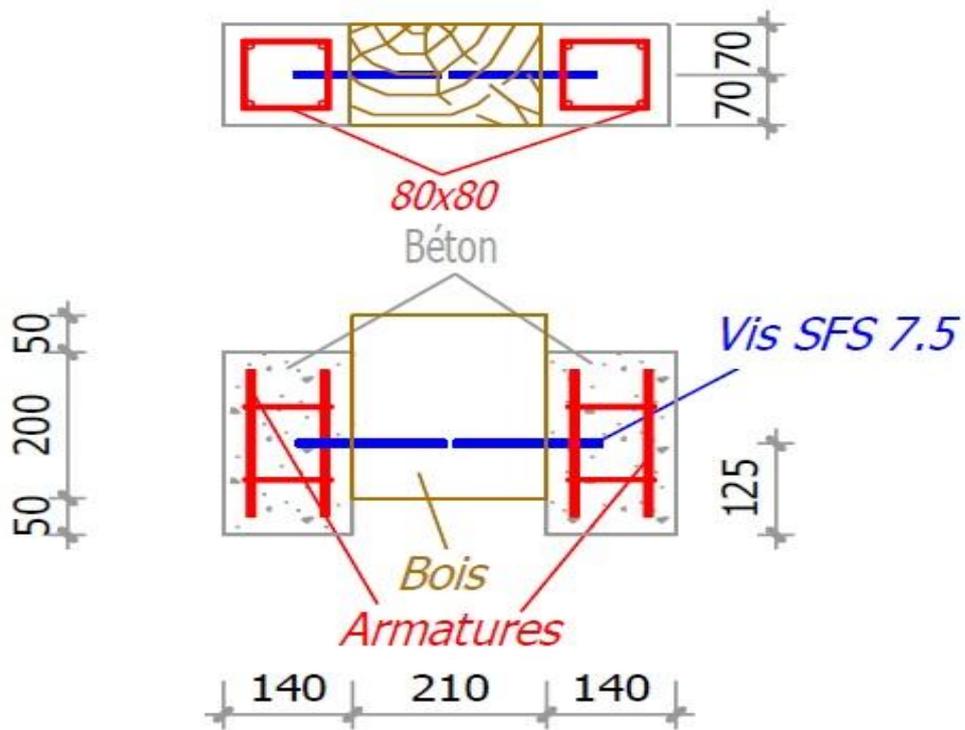


Figure 7 : Descriptif de l'éprouvette



Figure 8 : Vue 3D

CARACTERISATION DE L'ASSEMBLAGE BOIS/BETON PAR VIS SFS

Après avoir recouvert les faces qui vont être en contact avec le béton d'un film protecteur, nous avons coffré nos échantillons puis installé un ferrailage (*Photo 8*)

En effet, le ferrailage est nécessaire pour éviter que la rupture soit due aux contraintes internes que la vis apporte au béton.

Nous avons enfin pu de couler le béton (*Photo 9*).



Photo 8 : Mise en place du coffrage



Photo 9 : Béton coulé

Après 30 jours de durcissement du béton, le coffrage est retiré et des éprouvettes (*Photo 10*) prêtes à être testées ont été obtenues.



Photo 10 : Les éprouvettes finies

1.2. Résultats et analyse

1.2.1. Analyse de la Norme NF EN 26891 [14]

La norme EN 26891[14] , permet de définir la caractérisation d'éléments mécaniques de fixation pour les assemblages en structure bois.

N'ayant aucune norme caractérisant les assemblages de type bois/béton, nous allons nous appuyer sur cette norme.

CARACTERISATION DE L'ASSEMBLAGE BOIS/BETON PAR VIS SFS

Tous d'abord un test préliminaire jusqu'à la rupture est nécessaire pour obtenir la charge maximale présumée F_{est} . Cette force doit être corrigée en cas d'écart. Cette valeur va servir pour les essais suivants afin d'exécuter le mode opératoire décrit en Figure 9. On applique la charge d'abord jusqu'à $0,4F_{est}$ puis, après l'avoir maintenue pendant 30s, on ramène la charge à $0,1F_{est}$ et on la maintient pendant 30s. Enfin on l'augmente jusqu'à rupture ou jusqu'à avoir atteint un glissement de 15 mm.

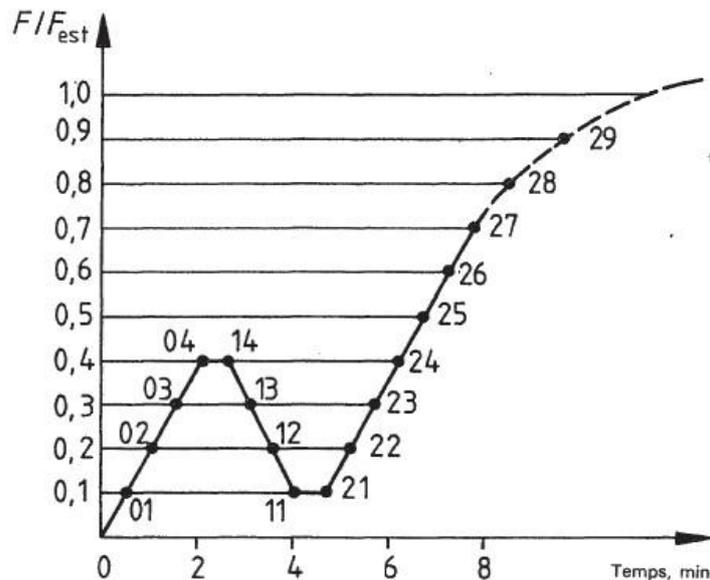


Figure 9 : Mode opératoire de chargement selon la norme EN26891 [14]

On relève alors l'évolution du glissement en fonction de la charge (Figure 10).

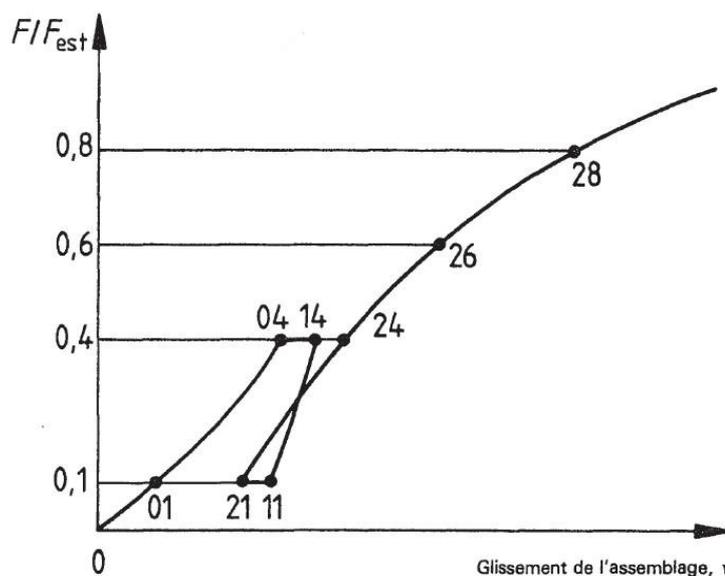


Figure 10 : Courbe typique charge glissement selon la norme EN 26891 [14]

CARACTERISATION DE L'ASSEMBLAGE BOIS/BETON PAR VIS SFS

La raideur d'assemblage, à l'état limite de service, K_{ser} , s'obtient de la courbe force-glissement, par la formule suivante :

$$K_{ser} = \frac{0.4 \times F_{max}}{\frac{4}{3} \times (v_{04} - v_{01})} \quad (2)$$

Concernant la valeur de la raideur à l'état limite ultime, K_u , elle s'obtient en exploitant la relation (2) dans laquelle on considère $0,7F_{max}$ au lieu de $0,4F_{max}$. L'Eurocode 5 [13] préconise de pré-multiplier la valeur de K_{ser} par $2/3$.

Ayant une différence importante entre F_{est} et F_{max} , nous avons fait les calculs avec la valeur F_{max} de chaque éprouvette. Et aussi avec la valeur de la force F_{max} considérée atteinte à un déplacement de 15mm, comme préconisé dans la norme.

En divisant par 2 on retombe sur la valeur de K_{ser} pour une vis.

Par ailleurs, la valeur de K_{ser} peut être obtenue par plusieurs formules empiriques.

L'Eurocode 5 [13] suggère, pour un assemblage bois/béton par vis et par plan de cisaillement la relation suivante :

$$K_{ser,EC5} = 2 \times \rho_{bois}^{1,5} \frac{d}{23} \quad (3)$$

Turrini et Piazza [9] proposent la relation :

$$K_{ser,Turrini} = 0,08 \times E_{bois} \times d \quad (4)$$

Ceccotti [8] propose :

$$K_{ser,Ceccotti} = 0,125 \times E_{bois} \times d \quad (5)$$

Où E est le module d'élasticité du bois, d le diamètre de la vis.

On prend pour ρ_m la masse volumique du bois 420 kg/m^3 , la vis SFS au niveau du plan de cisaillement présente un diamètre d de 5 mm, et le module d'élasticité E du bois est de 11 000 MPa.

Nos assemblages comportent deux connecteurs et par conséquent il faut multiplier les valeurs par deux.

D'où	$K_{ser,EC5}$	= 7,48 kN/mm	[13]
	$K_{ser,Turrini}$	= 8,8 kN/mm	[9]
	$K_{ser,Ceccotti}$	= 13,75 kN/mm	[8]

1.2.2. Tests des éprouvettes

✓ **Observations :**

Lors des tests des premières éprouvettes, on a pu remarquer que le mode de rupture des assemblages est la combinaison de deux modes de rupture à savoir par la flexion des vis (rotules plastiques) et par portance locale du bois (*Photo 11*).



Photo 11 : Matage du bois au niveau du connecteur

✓ **Relevés :**

Les éprouvettes ont été testées sur le banc d'essai Instron (*Photo 12*), nous avons pu tracer les courbes force déplacement de celles-ci.

Nous avons quatre éprouvettes, la première a servi de test préliminaire pour déterminer la valeur F_{est} , il nous en reste ainsi trois pour caractériser l'assemblage.



Photo 12 : Eprouvette sur le banc d'essai

CARACTERISATION DE L'ASSEMBLAGE BOIS/BETON PAR VIS SFS

La Figure 11 illustre les différentes courbes expérimentales force-déplacement.

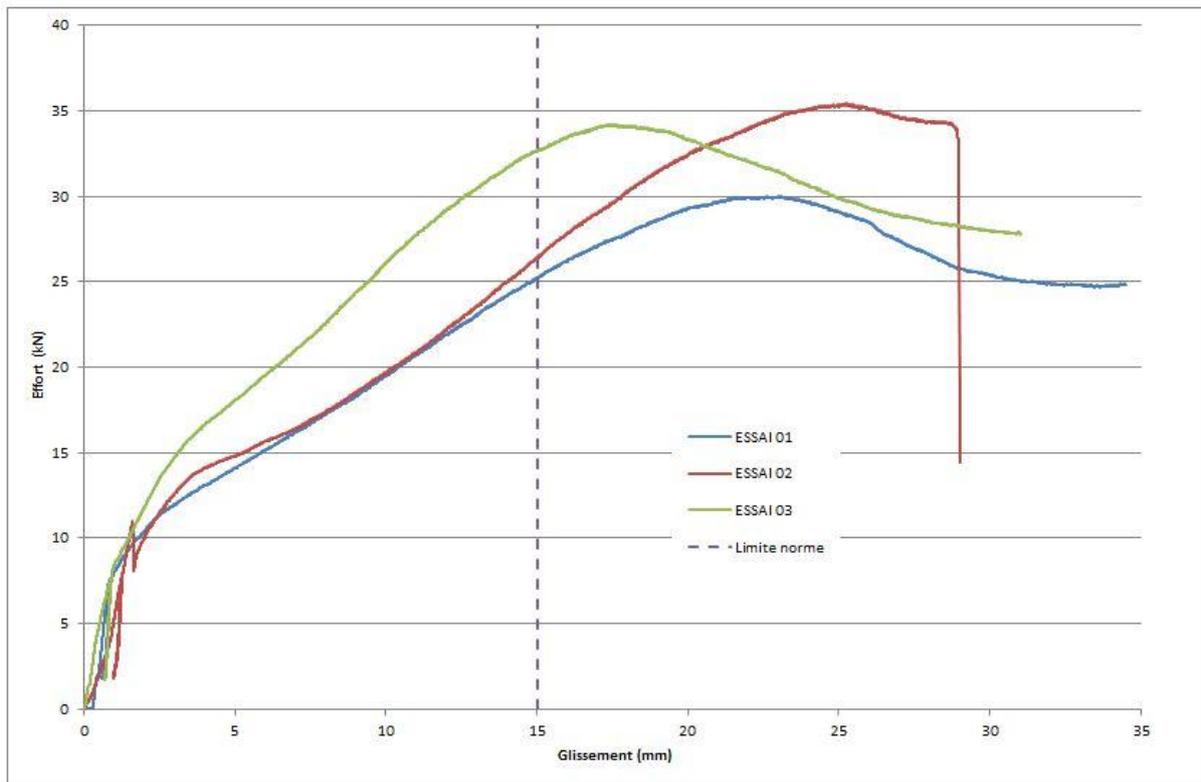


Figure 11 : Courbes force-glissement

En négligeant le glissement initial, on observe une première partie de la courbe linéaire jusqu'à un effort d'environ 10 kN au-delà de cette valeur, le comportement est non linéaire avec un écrouissage prononcé. Pour nos essais, on observe bien que la rupture survient après la limite (15 mm) imposée par la norme EN 26891 [14].

En exploitant les relations (2) à (5), nous obtenons les valeurs suivantes de K_{ser} et K_u . La force maximale F_{max} est obtenue directement dans les courbes force glissement (Tableau 3).

Test	F_{max} (kN)		K_u (kN/mm)		K_{ser} (kN/mm)		K_{ser} Eurocode 5	K_u	K_{ser}	K_u	K_{ser}	K_u
	Maximum	A 15 mm	Maximum	A 15 mm	Maximum	A 15 mm						
1	29,97	25,23	1,49	1,72	3,89	6,58	7,49	4,99	8,80	5,87	13,75	9,17
2	35,41	26,38	1,46	1,76	3,60	7,40						
3	34,19	32,63	2,25	2,32	5,73	6,16						
Moyenne	33,19	28,08	1,74	1,93	4,41	6,71						
Erreur de EC5 / Expérience			187,2%	158,0%	69,8%	11,5%						

Tableau 3 : Caractéristiques de résistance des assemblages

Les résultats de ce tableau permettent de remarquer la surestimation faite par les différentes formules empiriques que ce soit pour l'Eurocode 5, Turrini ou Ceccotti quant aux valeurs de K_{ser} et K_u . Dans la version actuelle de l'Eurocode 5, il n'y a aucune recommandation pour le calcul de la capacité portante de l'assemblage F_{max} . Certains auteurs [3] utilisent les modes de ruptures modifiés des assemblages bois/métal.

1.2.3. Tests d'éprouvettes renforcées par plaques dentées

Au vu des observations précédentes, nous avons décidé d'améliorer la portance locale du bois par l'ajout de plaques dentées que nous avons placées à l'interface bois béton (*Photo 13*). On renforce le bois en limitant la déformation locale et en répartissant l'effort sur une surface plus importante. L'ajout de la plaque dentée introduit aussi une adhérence supplémentaire avec le béton. Nous n'avons pas pu comparer nos valeurs à la théorie car celle-ci ne permet pas le calcul de liaisons avec renforcements.



Photo 13 : Eprouvette renforcé par plaques dentées

CARACTERISATION DE L'ASSEMBLAGE BOIS/BETON PAR VIS SFS

En appliquant le même protocole d'essai que précédemment, on obtient les courbes décrites en Figure 12.

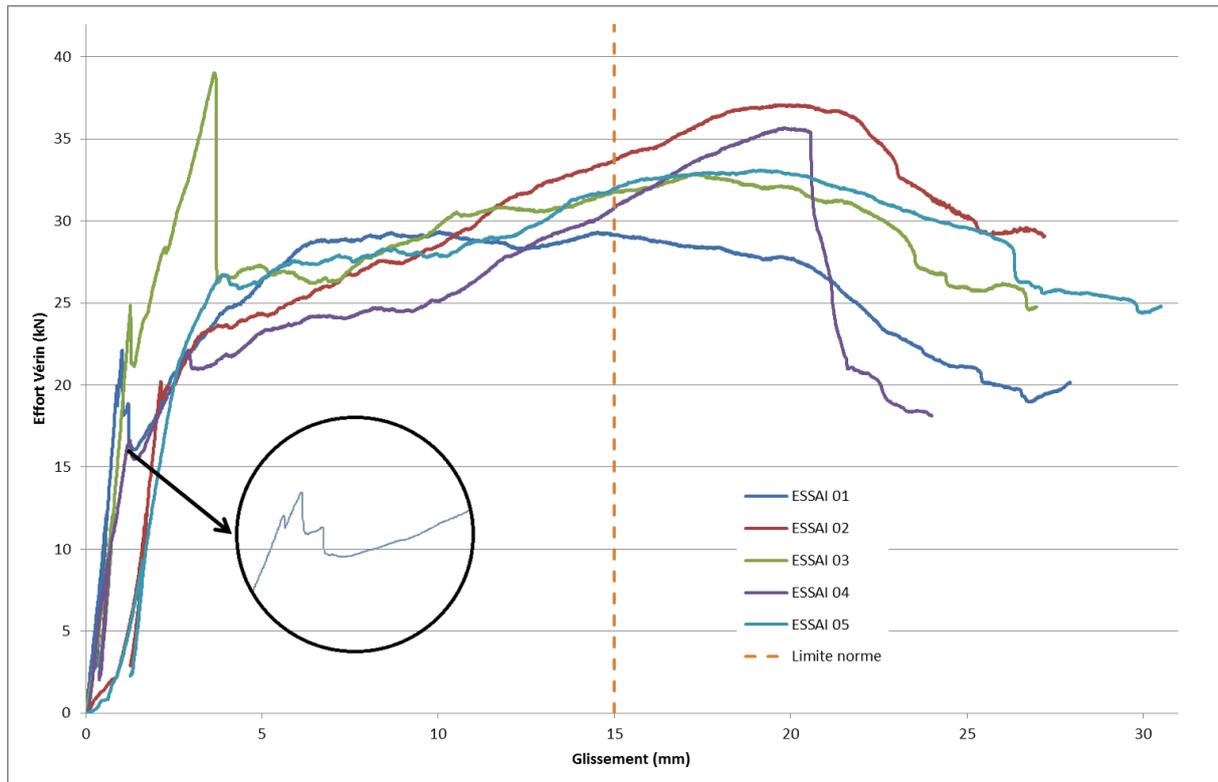


Figure 12 : Courbes force glissement des éprouvettes renforcées

Conformément à la norme NF EN 26891 [14], et l'Eurocode [13], nous obtenons les valeurs suivantes de K_{ser} et K_u , ainsi que la force maximale F_{max} (Tableau 4).

Test	F_{max} (kN)		K_u (kN/mm)		K_{ser} (kN/mm)	
	Maximum	A 15 mm	Maximum	A 15 mm	Maximum	A 15 mm
1	29,34	29,15	23,70	23,19	30,35	30,16
2	37,09	33,72	3,65	6,17	21,82	22,48
3	39,02	31,78	12,88	16,20	27,22	26,48
4	35,69	30,80	2,03	7,00	18,78	20,53
5	33,11	31,97	10,86	11,58	17,43	17,76
Moyenne	34,85	31,48	10,62	12,83	23,12	23,48
Ecart type	3,76	1,68	8,64	7,05	5,52	4,90

Tableau 4 : Résumé des résultats des éprouvettes renforcées

On constate une nette amélioration du K_{ser} (+250%) et du K_u (+185%).

CARACTERISATION DE L'ASSEMBLAGE BOIS/BETON PAR VIS SFS

Globalement on observe des courbes similaires à celles précédentes (Figure 13). Cependant, on notera une partie linéaire plus importante jusqu'à environ 20 kN, ainsi qu'un sursaut sur toutes les courbes à la fin de la partie linéaire. Ce qui peut être expliqué par la rupture d'adhérence entre le béton et la plaque dentée. Même si la force à la rupture de l'assemblage est quasiment la même, la capacité portante à 15 mm est meilleure que les éprouvettes non renforcées. Aussi la capacité à dissiper l'énergie est améliorée.

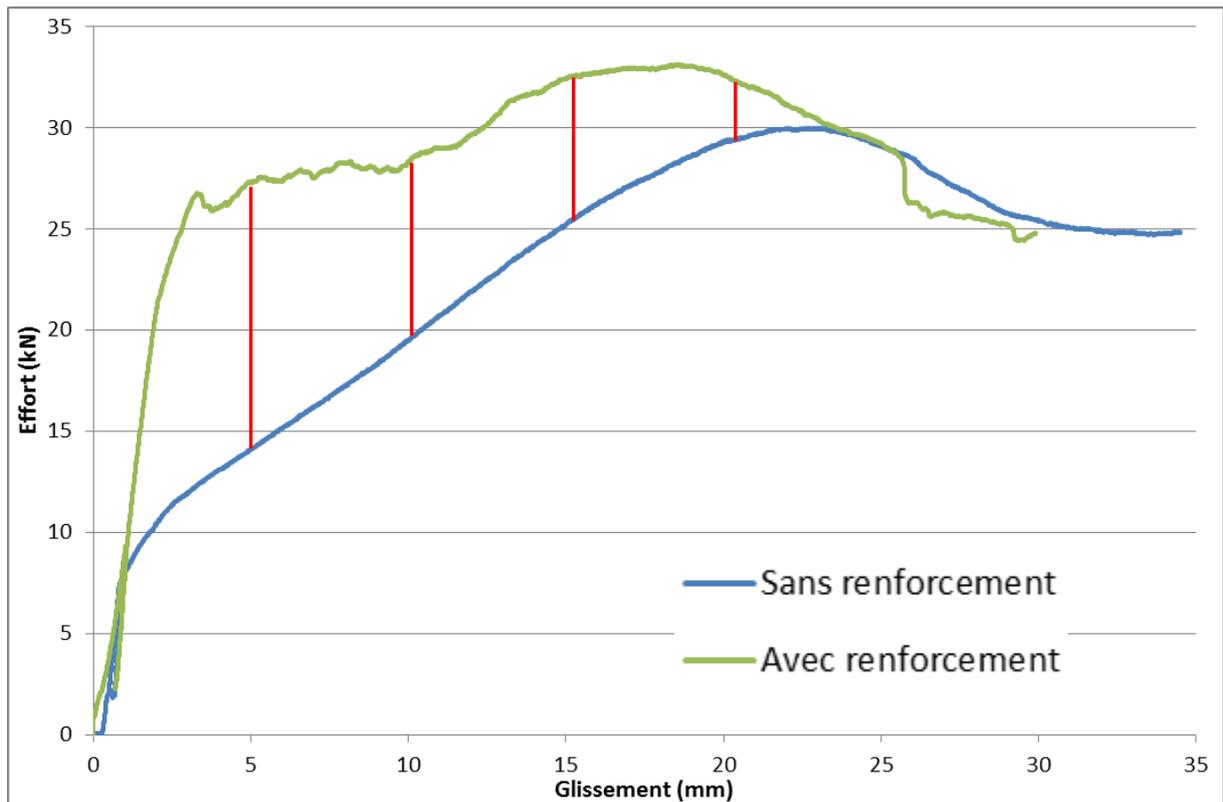


Figure 13 : Courbes effort glissement : comparaison entre éprouvettes non renforcées et renforcées

1.3. Modèle éléments finis

1.3.1. Principe

Comme dit précédemment, le but de ce PFE est de valider expérimentalement un modèle numérique par élément finis développé au LERMAB.

Le principal problème de la modélisation par élément finis, des vis, réside ici dans le fait de la différence de taille entre le connecteur (diamètre) et les deux parties qu'il assemble. D'où l'idée de l'équipe du LERMAB de développer des éléments finis spéciaux pour modéliser la vis sans avoir recours à la discrétisation 3D par éléments finis volumiques, tandis que les éléments assemblés (bois et béton) sont modélisés par des éléments finis volumiques, dans ABAQUS. La formulation du modèle éléments finis n'étant pas l'objectif de cette étude, le lecteur est invité à consulter les références [10] [11] pour plus de détails sur les aspects théoriques et numériques de la modélisation.

On présente les résultats en ce qui concerne les assemblages sans renforcement. Par ailleurs, des simulations numériques sont en cours pour introduire le renforcement par plaques dentées.

1.3.2. Résultats et discussions

La Figure 14 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par le modèle numérique.

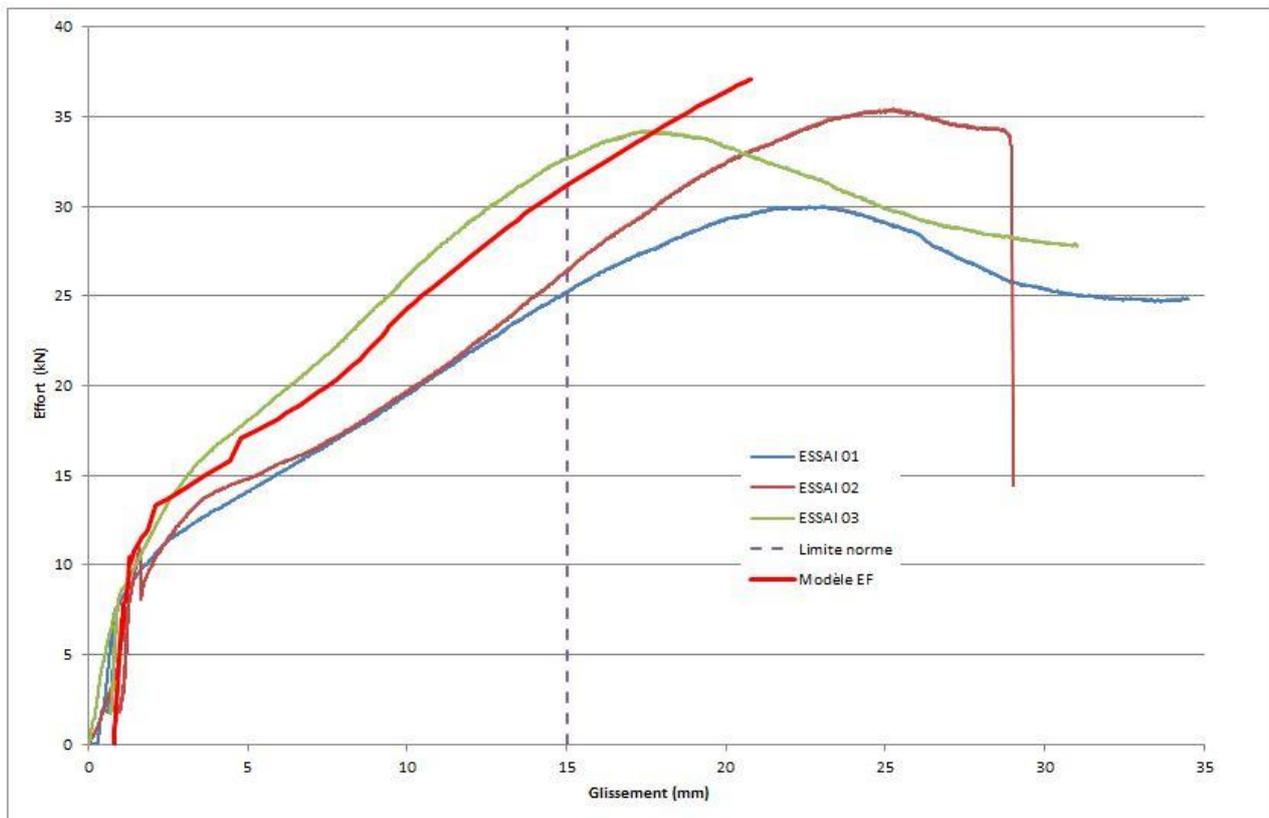


Figure 14 : Comparaison des courbes force-glissement entre expérience/numérique

On remarque que le modèle numérique prédit de manière fidèle le comportement non linéaire de l'assemblage, la courbe reste correcte jusqu'au déplacement minimum (15 mm) exigé par la norme EN 26891 [14]. La prédiction précise de la courbe force glissement nous permet d'obtenir la raideur et la capacité portante des assemblages avec une précision satisfaisante.

CARACTERISATION DE L'ASSEMBLAGE BOIS/BETON PAR VIS SFS

En plus du comportement global, le modèle numérique permet de prédire la distribution des contraintes et déformations engendrées par les vis. On peut le constater (Figure 15) par la localisation des contraintes équivalentes au voisinage des vis avec un maximum atteint dans le béton, pour différents niveaux de glissement (le glissement à 100% correspond à 20 mm).

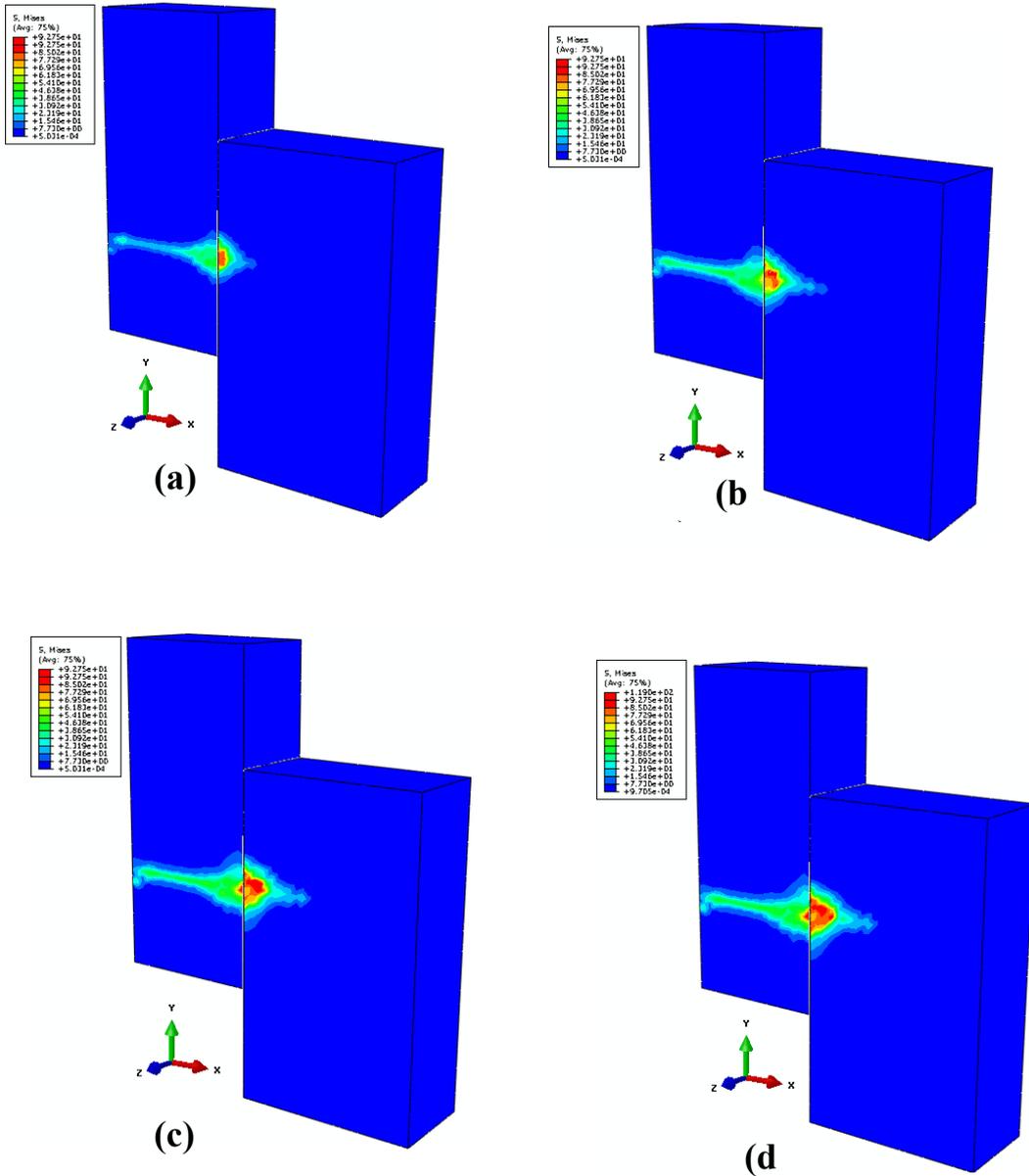


Figure 15 : Distribution des contraintes équivalentes pour différents niveaux de glissement: (a) 25%, (b) 50%, (c) 70%, (d) 100%

- PARTIE 3 - TESTS DES POUTRES BOIS/BETON

1.1. Programme expérimental

1.1.1. Caractérisation des éléments

Le béton employé pour les poutres est le même que celui utilisé pour les éprouvettes (- PARTIE 2 - 1.1.1).

Le bois employé pour les poutres est le même que celui utilisé pour les éprouvettes (- PARTIE 2 - 1.1.2).

Les vis SFS VB-48-7,5 165 ont les mêmes propriétés en cisaillement que les vis SFS VB-48-7,5 100 précédemment utilisées.

1.1.2. Pré-dimensionnement

Comme nous l'avons déjà dit précédemment, le but de cette association bois/béton est de combiner au mieux les propriétés de chaque matériau en les faisant travailler dans le domaine où ils sont les meilleurs. Ainsi on va chercher à faire travailler la partie béton en compression et la partie bois en traction. Cela implique donc de faire en sorte que l'axe neutre de la poutre mixte se situe à l'interface bois/béton.

On calcul d'abord le coefficient d'équivalence n qui permet de ramener pour notre section mixte, la section de béton en une section de bois équivalente :

$$n = \frac{E_{cm}}{E_{bois}} \quad (6)$$

On cherche ensuite à déterminer la position de l'axe neutre Z_g . L'idéal est que ce dernier soit à l'interface bois béton. Nous savons que la partie immergée des vis dans le béton est de 60mm.

Nous avons décidé de fixer la hauteur de la section béton à $h_1=70\text{mm}$ en vérifiant après calcul de Z_g que celle-ci se situe bien au plus proche de l'interface.

$$Z_g = \frac{1}{A_{eff}} \times \left(\gamma n A_1 \frac{h_1}{2} + A_2 \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right) \right) \quad (7)$$

Avec :

$$A_1 = b_1 h_1 \quad (8)$$

$$A_2 = b_2 h_2 \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 A_1 E_1 S}{k L^2}} \quad (10)$$

$$A_{eff} = \gamma n A_1 + A_2 \quad (11)$$

$$k = \frac{K_{ser}}{S} \quad (12)$$

$K_{ser}=3500 \text{ N/mm}$ est le module de glissement expérimental arrondi, sa valeur découle des essais précédents.

Tous calculs faits, nous obtenons la position de l'axe neutre Z_g à $72,8\text{mm}$ (*Figure 16*). Ainsi l'axe neutre se situe dans le bois cependant il est très proche de l'interface ($<5\text{mm}$).

Ensuite nous calculons la rigidité effective de flexion pour notre poutre sur deux appuis simples :

$$EI_{eff} = E_1 I_1 + \gamma E_1 A_1 a_1^2 + E_2 I_2 + E_2 A_2 a_2^2 \quad (13)$$

$$a_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_2 \quad (14)$$

$$a_2 = \frac{\gamma E_1 A_1 (h_1 + h_2)}{2\gamma E_1 A_1 + E_2 A_2} \quad (15)$$

Enfin, nous avons calculé la flèche maximale à mi-portée, à court terme :

$$w_{max} = \frac{5q_{ser,court}L^4}{384EI_{eff}} \quad \text{Pour une charge uniformément répartie} \quad (16)$$

$$w_{max} = \frac{aPL^2}{8EI_{eff}} \quad \text{Pour le chargement en flexion 4 points} \quad (17)$$

1.1.3. Réalisation des poutres bois/Béton

Après avoir réalisé les poutres nous allons pouvoir vérifier nos calculs expérimentalement. Les calculs précédents nous donnent la dimension et la position de chaque organe de la poutre bois/béton (*Figure 16 ; Figure 17*).

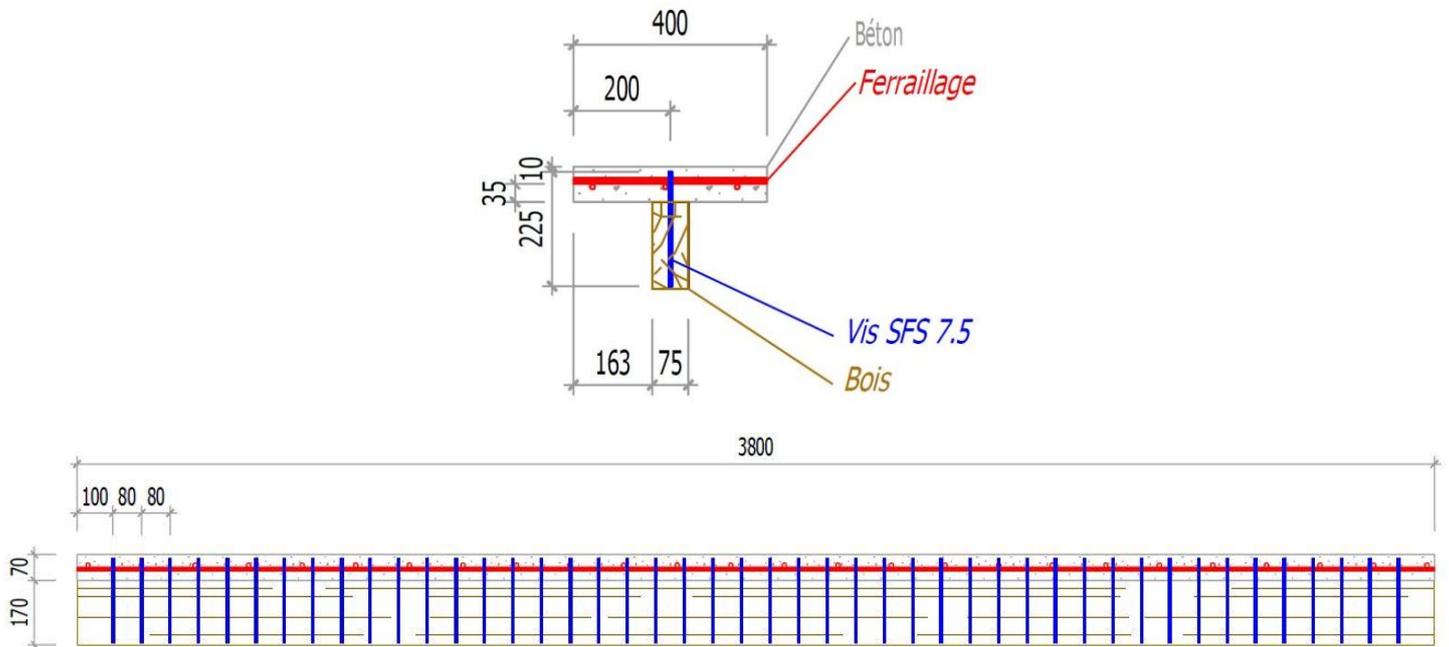


Figure 16 : Descriptif de la poutre



Figure 17 : Dessin Cadwork de la poutre bois/béton

Nous nous sommes donc lancés dans la confection de quatre poutres pour réaliser nos tests.

La première étape, et de loin la plus fastidieuse, fût de mettre en place les connecteurs sur les poutres (*Photo 14*). En effet, ne disposant pas du matériel adapté, nous avons utilisé une visseuse ordinaire, il n'a donc pas été aisé de mettre les vis parfaitement droites. Une fois les vis mises en place, nous avons recouvert la face de notre solive en bois en contact avec le béton d'un film plastique pour éviter la propagation de l'eau du béton dans le bois (*Photo 15*).



Photo 14 : Mise en place des vis



Photo 15 : Poutres et coffrages

Dans un second temps, nous avons mis en place dans les coffrages que nous avons préalablement réalisés le ferrailage nécessaire pour la dalle béton (*Photo 16*). Après avoir mis en place nos solives sur le coffrage, nous avons pu procéder au coulage du béton (*Photo 17*).



Photo 16 : Coffrage et ferrailage



Photo 17 : Poutre en cours de bétonnage

A la suite de 30 jours de séchage, nous avons pu décoffrer les poutres et les tester en flexion quatre points conformément à la norme EN 408 [15], selon le protocole d'essais décrit en *Figure 18*.

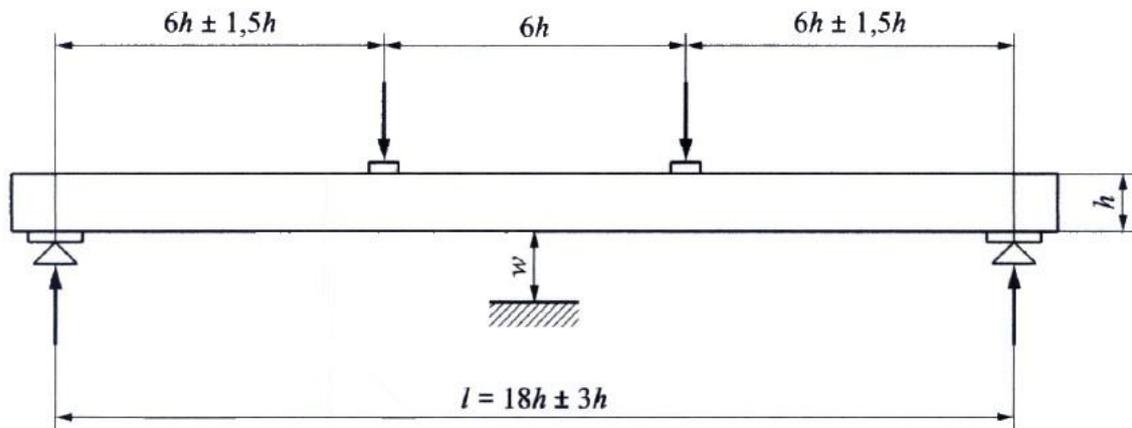


Figure 18 : Dispositif d'essai en flexion 4 points selon la norme EN408 [15]

1.1.4. Instrumentalisation

L'instrumentalisation a été réalisée dans le but de récupérer la flèche à mi-portée en fonction de l'effort du vérin et le glissement relatif entre la dalle de béton et la poutre en bois.

Nous avons mis en place deux capteurs, l'un pour mesurer la flèche à mi-portée (*Photo 18*), et l'autre pour mesurer le glissement relatif entre le bois et le béton (*Photo 19*).



Photo 18 : Instrumentalisation, flèche à mi-portée



Photo 19 : Instrumentalisation, déplacement relatif

1.2. Résultats et analyses

1.2.1. Observations

Une fois la poutre correctement placée (*Photo 20*), nous avons enfin pu effectuer le test de flexion quatre points et donc casser les poutres (*Photo 21*).



Photo 20 : Avant essais



Photo 21 : En cours d'essais

Les figures suivantes montrent les modes de rupture observés au cours des essais. Tout d'abord on constate sur toutes les poutres que la ruine de ces dernières est due à la rupture du bois en traction au niveau de la partie basse (*Photo 22*). Par ailleurs, quelques fissurations ont pu être constatées sur la dalle béton sur la partie inférieure au niveau des appuis linéaires (*Photo 23*).



Photo 22 : Rupture du bois en traction



Photo 23 : Fissuration du béton

Enfin, nous avons aussi constaté le glissement relatif bois/béton au niveau des appuis (*Photo 24*). Ce dernier est de l'ordre de quelques millimètres comme nous allons le voir dans les résultats qui suivent.

Glissement relatif
bois/béton (environ 5mm)



Photo 24 : Déplacement relatif à la rupture

1.2.2. Résultats expérimentaux

Au cours des tests que nous avons réalisés nous avons eu un problème avec l'une des poutres qui a cassé très rapidement. Cela est dû à un défaut dans le bois. De ce fait, comme on peut le voir sur la *Figure 20* qui représente la flèche à mi-portée en fonction de l'effort du vérin, le test 4 n'est pas représentatif du lot donc nous ne l'avons pas pris en compte dans l'analyse des résultats et ne l'avons pas représenté sur le graphique du glissement relatif bois/béton en fonction de l'effort du vérin (*Figure 19*).

Sur les différentes courbes, les tracés présentent des sursauts dans leur continuité. Ils sont essentiellement dus à la perte brutale de rigidité des matériaux et aux glissements latéraux des appuis.

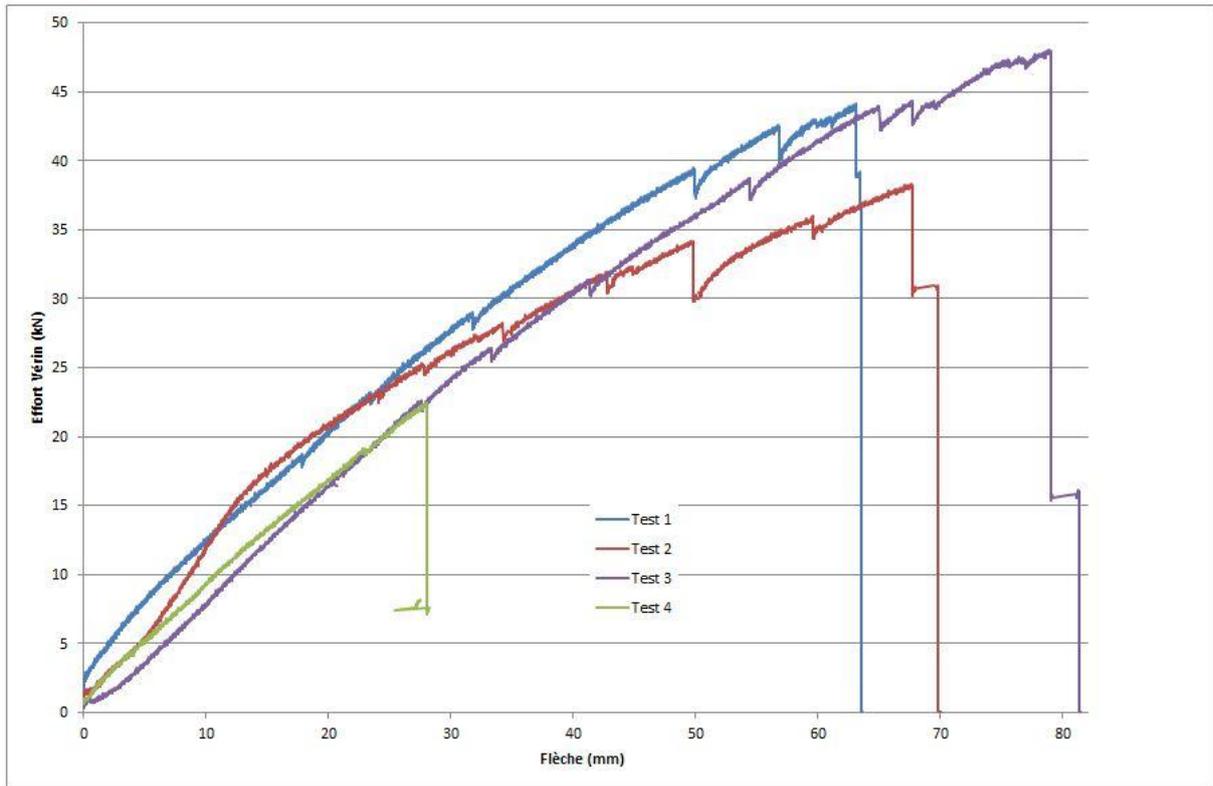


Figure 20 : Courbes force flèche

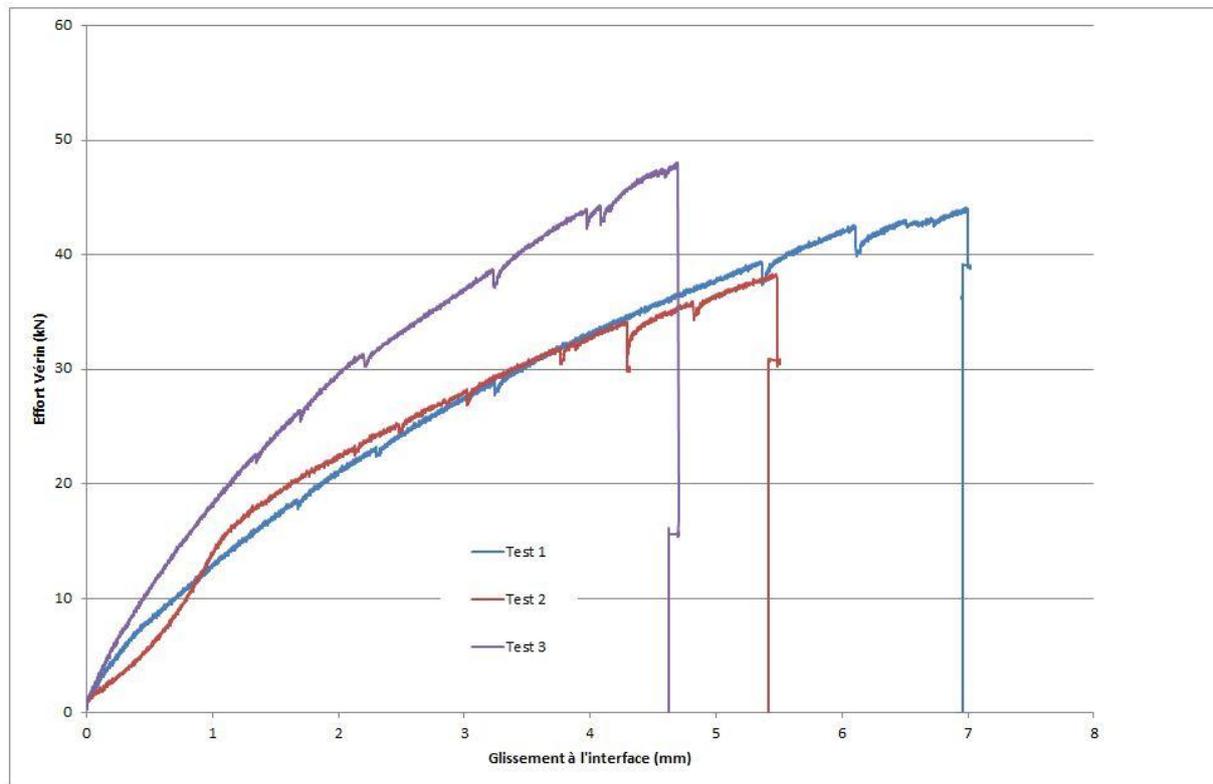


Figure 19 : Courbes force glissement relatif

On peut remarquer que les différentes courbes de nos essais présentent une certaine charge dès le départ des tests. Cela est dû à une pré-charge lors des manipulations avant de commencer le test (problème d'étalonnage).

D'après les deux figures précédentes, on en déduit les valeurs caractéristiques de chaque poutre ainsi que les moyennes en termes de flèche à mi-portée, de glissement relatif et de force maximale.

Test	F_{max} (kN)	W_{max} (mm)	G_{max} (mm)
1	44,10	63,04	6,99
2	38,33	67,59	5,48
3	48,06	78,77	4,69
4	22,45	28,01	1,07
Moyenne	43,50	69,80	5,72
Ecart type	4,89	8,09	1,17

Tableau 5 : Valeurs caractéristiques des essais

1.3. Modèle éléments finis

1.3.1. Contraintes dans la poutre

Le principe de modélisation des poutres est le même que celui évoqué précédemment. Le modèle éléments finis donne un résultat très correct au vu des expériences (Figure 21).

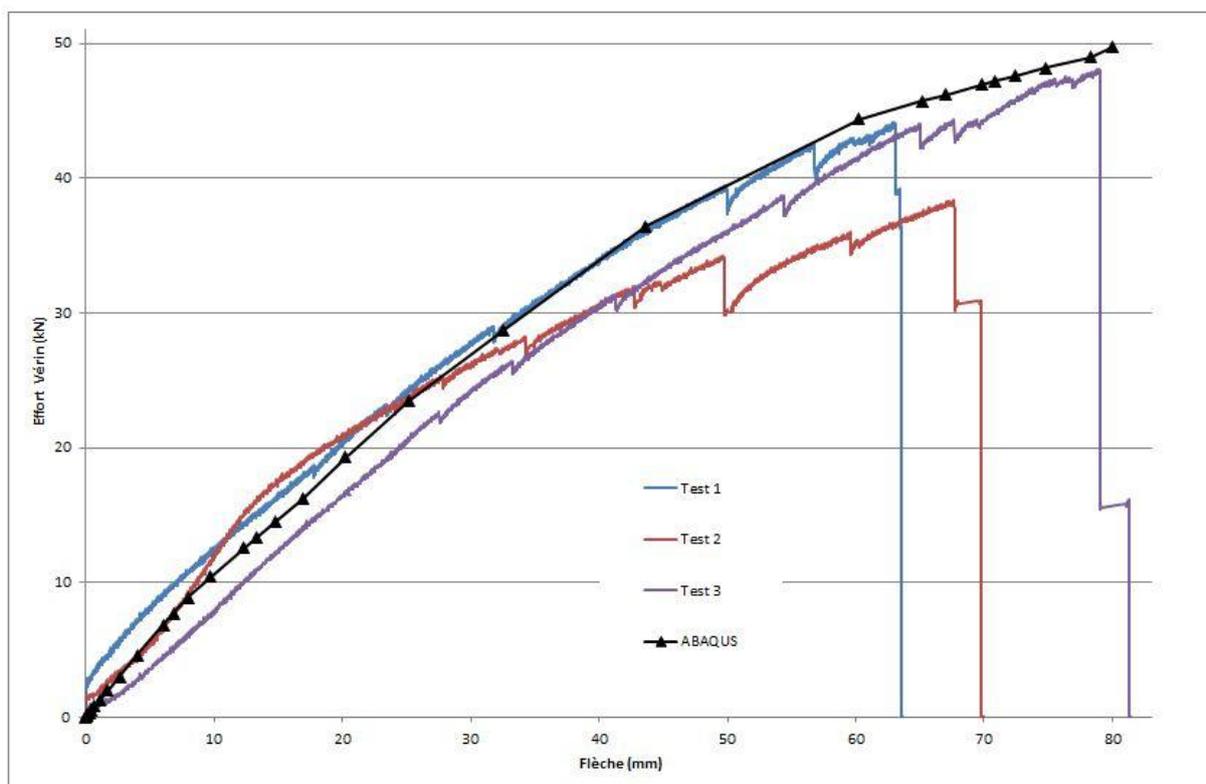


Figure 21 : Comparaisons courbes effort flèche MEF/Expériences

Il ne prend pas en compte la perte progressive de rigidité des matériaux. C'est pour cela que les courbes expérimentales ont une pente inférieure au cours du chargement alors que le modèle numérique garde sa tendance.

On observe sur la *Figure 22* la contrainte au niveau de l'implantation des connecteurs. Celle-ci diffère suivant la position des connecteurs le long de la poutre. Ce phénomène est dû au type de chargement employé (flexion quatre points) qui implique un effort tranchant nul entre les deux charges et donc une absence de cisaillement des connecteurs à ce niveau. L'effort tranchant dans le reste de la poutre est constant et implique donc le cisaillement des vis.

Concernant le glissement relatif bois/béton on retrouve une valeur cohérente avec les résultats expérimentaux.

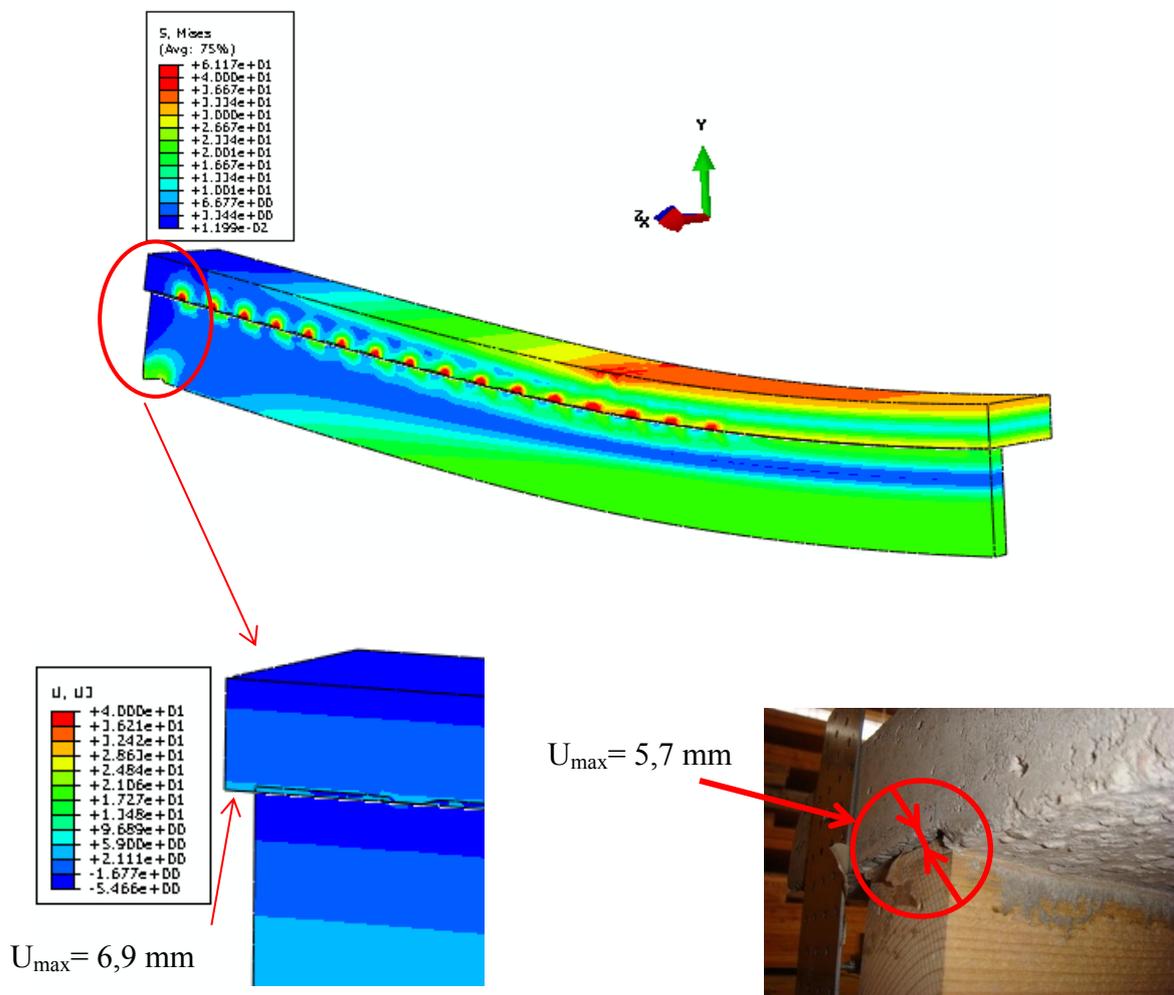


Figure 22 : Déformée et distribution des contraintes équivalentes dans la poutre composite sous une flèche de 80 mm.

1.3.2. Efficacité de la liaison

Nous avons enfin évalué et comparé les taux d'efficacité de la liaison obtenus à partir des courbes de la *Figure 23* et en exploitant les résultats de la relation (18). D'après la méthode dite gamma, le comportement de notre assemblage est borné entre deux valeurs limites : liaison parfaite ($\gamma=1$) et sans liaison ($\gamma=0$). La droite théorique « K_u exp » est issue de la valeur moyenne du K_u estimé en - PARTIE 2 - 1.2.2.

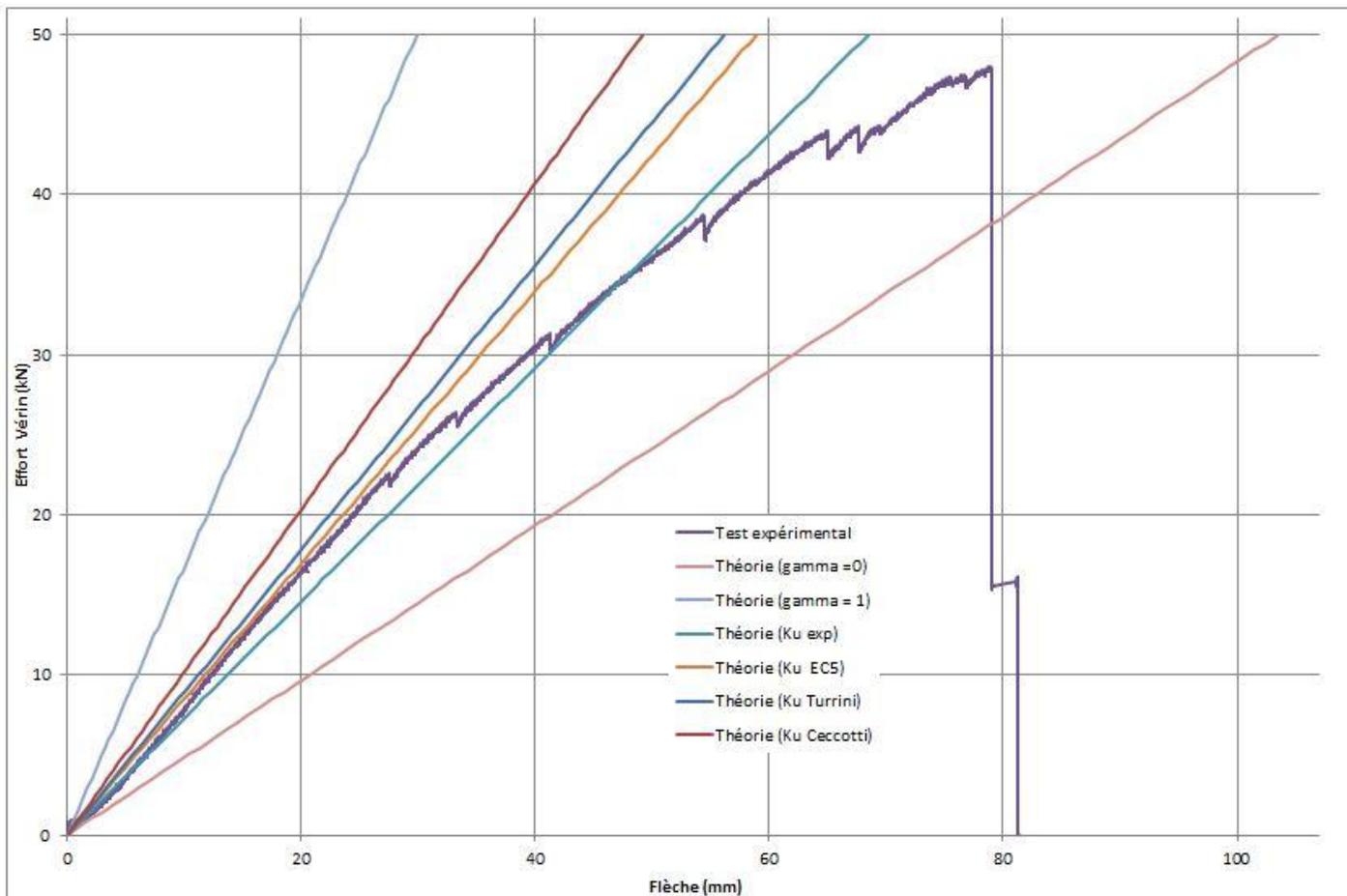


Figure 23 : Comparaison des méthodes

L'efficacité de la liaison est obtenue avec la relation suivante :

$$E_{eff} = \frac{D_n - D_i}{D_n - D_c} \times 100 \quad (18)$$

Avec les valeurs D_n , D_i et D_c correspondantes respectivement aux flèches à l'effort considéré des courbes $\gamma=0$, $\gamma=1$ et de la méthode.

Nous avons donc évalué l'efficacité de la liaison à différents efforts pour chaque modèle, et les avons comparées à l'efficacité de la moyenne des expériences.

Pour un effort appliqué de 10 kN (*Tableau 6*) : tous les modèles issus de formules empiriques sous-estiment l'efficacité de l'assemblage.

	Expérience	MEF	Th. (Ku exp.)	Th. (Ku EC5)	Th. (Ku Turrini)	Th. (Ku Ceccotti)
Eff	74,09%	77,63%	47,51%	60,57%	64,32%	73,80%
Erreur / Exp.	 	4,77%	-35,87%	-18,26%	-13,20%	-0,40%

Tableau 6 : Comparaison des efficacités des modèles à 10 kN

Pour un effort appliqué de 20 kN (*Tableau 7*) : les modèles découlant des formules de l'Eurocode et de Turrini se rapprochent de l'expérience mais sous-estiment encore l'assemblage. Le modèle Ceccotti quand à lui surestime l'efficacité de l'assemblage.

	Expérience	MEF	Th. (Ku exp.)	Th. (Ku EC5)	Th. (Ku Turrini)	Th. (Ku Ceccotti)
Eff	66,19%	68,99%	47,51%	60,57%	64,32%	73,80%
Erreur / Exp.	 	4,23%	-28,22%	-8,50%	-2,83%	11,49%

Tableau 7 : Comparaison des efficacités des modèles à 20 kN

Pour un effort appliqué de 30 kN (*Tableau 8*) : cette fois tous les modèles empiriques surestiment la liaison.

	Expérience	MEF	Th. (Ku exp.)	Th. (Ku EC5)	Th. (Ku Turrini)	Th. (Ku Ceccotti)
Eff	55,76%	56,17%	47,51%	60,57%	64,32%	73,80%
Erreur / Exp.	 	0,74%	-14,79%	8,62%	15,34%	32,34%

Tableau 8 : Comparaison des efficacités des modèles à 30 kN

Pour un effort à rupture moyen de 43,5 kN (*Tableau 9*) : le modèle éléments finis reste le plus proche de la valeur expérimentale. Les autres modèles surestiment d'environ 100% l'efficacité de la liaison.

	Expérience	MEF	Th. (Ku exp.)	Th. (Ku EC5)	Th. (Ku Turrini)	Th. (Ku Ceccotti)
Eff	31,58%	47,32%	47,51%	60,57%	64,32%	73,80%
Erreur / Exp.	 	49,84%	50,46%	91,80%	103,67%	133,69%

Tableau 9 : Comparaison des efficacités des modèles à 43,5 kN

Nous remarquons que la méthode par éléments finis reste la plus proche de la réalité. Elle ne surestime que de peu les résultats expérimentaux. Les autres méthodes théoriques surestiment grandement la rigidité globale de la poutre composite dans le domaine non linéaire (plus de 20 mm de flèche).

Dans la partie linéaire, on remarque que pour une flèche inférieure à la flèche admissible de 12 mm dans notre cas ($L/300$), les modèles empiriques ont tendance à sous-estimer l'efficacité de la liaison mais restent proche de l'efficacité réelle. Ces modèles surestiment donc la flèche, ce qui va dans le sens de la sécurité selon l'état limite de service.

Cependant comme nous l'avons vu en - PARTIE 2 - 1.2.2, elles surestiment la valeur du K_{ser} , et donc considèrent la liaison plus rigide ce qui implique des efforts admissibles plus importants et donc un surdimensionnement des sections.

CONCLUSION

Notre PFE se focalisait sur une approche expérimentale du problème des assemblages bois/béton avec un double objectif : évaluer la méthode de calcul proposée par l'Eurocode 5 et valider l'approche numérique développée au LERMAB.

La méthode gamma que l'on retrouve dans l'Eurocode 5 fournit une bonne estimation du comportement élastique des poutres composites sous réserve d'évaluer précisément le module de glissement du connecteur utilisé.

En ce qui concerne les dimensionnements existant pour ce type de liaison, nous remarquons qu'ils ne sont pas corrects dans ce domaine. Que ce soit avec la méthode de calcul de l'Eurocode ou avec les formules de Turrini ou Ceccotti, les valeurs prévisionnelles de résistance de l'assemblage bois/béton sont erronées. Le module de glissement calculé conduit à une surévaluation de la raideur globale des poutres, ce qui représente un surdimensionnement des sections. Cependant les flèches à l'état limite de service sont surestimées et conduisent donc au surdimensionnement. De plus, ces méthodes ne sont valables que dans le domaine linéaire.

Cette étude nous a permis de confirmer le modèle numérique pour l'assemblage de poutres bois/béton. En effet, la simulation numérique par éléments finis prédit un comportement avec une précision satisfaisante même dans le domaine non linéaire. C'est donc un outil de conception pertinent que l'on peut utiliser en amont du processus d'étude et de fabrication pour réduire les coûts, les délais, vérifier la faisabilité et optimiser les choix lors de la conception.

Comme le modèle éléments finis est prédictif, il est tout à fait pertinent de poursuivre les simulations numériques en vue d'optimiser la connexion. Cela revient à effectuer une étude paramétrique. On peut jouer sur le type de béton en faisant varier son module d'élasticité E_{cm} , sur le bois avec une classe de résistance différente, l'utilisation de lamellé-collé.... Il est aussi envisageable de faire varier le nombre de connecteurs, leurs espacement, inclinaison, ou encore d'envisager un renforcement par plaques dentées comme vu précédemment lors du test des éprouvettes.

CONCLUSION

Ainsi, le modèle éléments finis développé au LERMAB représente un atout prometteur pour ces structures mixtes. Il s'est révélé très efficace et pourrait servir de base pour une éventuelle mise à niveau des Eurocodes qui souffrent d'un manque en ce qui concerne les assemblages bois/béton...

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES:

- [1] *E. Lukaszewska, H. Johnsson, M. Fragiaco. Performance of connections for prefabricated timber-concrete composite floors. Materials and Structures (2008), 41:1533-1550.*
- [2] *B. L. Deam, M. Fragiaco, A. H. Buchanan. Connections for composite concrete slab and LVL flooring systems. Materials and Structures (2008), 41:495-507.*
- [3] *M. Taazount, S. Amziane, D. Molard, Tangential behaviour of nailed composite timber-concrete floor structures. Construction and Building Materials 40 (2013), 506-513.*
- [4] *J.M. Branco, P. J.S. Cruz, M. Piazza. Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections. Construction and Building Materials, 23:400--410, 2009.*
- [5] *K. Gurksnys, A. Kvedaras, S. Kavaliauskas. Behaviour evaluation of “sleeved” connectors in composite timber-concrete floors. Journal of Civil Engineering and Management XI (2005), n°4, 277-282.*
- [6] *E. P. Carvalho, E. V. M. Carrasco. Influence of test specimen on experimental characterization of timber-concrete composite joints. Construction and Building Materials, 24 (2010), pp. 1313-1322.*
- [7] *S. Lopes, L. Jorge, H. Cruz, Evaluation of non-linear behavior of timber-concrete composite structures using FE model. Materials and Structures (2012) 45:653–662.*
- [8] *A. Ceccotti. Timber-concrete composite structures, in: Timber engineering STEP 1, Blass HJ et al., editors, Lecture E13; 1995.*
- [9] *G. Turrini, M. Piazza. Una tecnica di recupero statico dei solai in legno. Revista tecnica. “Recuperare n° 5, 6, 7; 1983.*

BIBLIOGRAPHIE

- [10] *E.-M. Meghlat, M. Oudjene, H. Ait-Aider, J.-L. Batoz., A new approach to model nailed and screwed timber joints using the finite element method. Construction and Building Materials 41 (2013), 263-269.*
- [11] *M. Oudjene, E.-M. Meghlat, H. Ait-Aider, J.-L. Batoz, Non-linear finite element modelling of the structural behaviour of screwed timber-to-concrete composite connections. To be published in Composite and Structures (2013).*
- [12] *EN 1992-1-1: 2005 Eurocode 2 — Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings*
- [13] *EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5: design of timber structures – part 1.1: general rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (E).*
- [14] *EN 26891:1991. Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - general principles for the determination of strength and deformation characteristics. ISO 6891-1983 (E).*
- [15] *EN 408:2010. Timber Structures — Structural timber and glued laminated timber —Determination of some physical and mechanical properties (E).*
- [16] *EN 338:2009. Bois de structure – Classes de résistance*

SITES INTERNET:

- [17] *Les planchers mixtes par Sylvabat construction : Sylvabat, Une solution de renforcement de plancher : le plancher mixte bois-béton, Disponible sur : <http://www.sylvabat.fr/> (Page consultée le 5 octobre 2012).*
- [18] *Les connecteurs à ergot et crampons par Tecnaria : Tecnaria, Renforcement de planchers, Disponible sur : <http://www.renforcement-planchers.com/legno/posa.htm> (Page consultée le 5 octobre 2012).*
- [19] *Les poutres bois-béton du bureau d'études Plantier : Bureau d'Etudes PLANTIER, Poutres bois-béton, Disponible sur : <http://www.bureau-plantier.fr/annemasse/poutre-bois-beton> (Page consultée le 5 octobre 2012).*
- [20] *SBB®, Plancher collaborant SBB® en construction neuve, Disponible sur : <http://bois-beton.fr/sbbneuf.html> (Page consultée le 5 octobre 2012).*

BIBLIOGRAPHIE

- [21] *Bois.com, Plancher bois-béton : le succès de la mixité, Disponible sur : <http://www.bois.com/interieur/parquet-plancher/plancher-bois-beton> (Page consultée le 5 octobre 2012).*
- [22] *IdMaison, Le plancher mixte, Disponible sur : <http://plancher.ideesmaison.com/a-le-plancher-mixte> (Page consultée le 5 octobre 2012).*
- [23] *Présentation du concept D-Dalle, CBS-CBT, Disponible sur : http://www.cbs-cbt.com/New_site/FR/LoadDDFR.html (Page consultée le 8 octobre 2012)*
- [24] *Les vis SFS VB : SFS intec France, Connecteur pour plancher collaborant Bois-Béton Disponible sur : http://www.sfsintec.biz/internet/sfs04.nsf/PageID/Connecteur_VB (Page consultée le 8 octobre 2012).*

RESUME

Caractérisation expérimentale de poutres composites bois/béton

De nos jours, les éléments structuraux composites sont de plus en plus utilisés dans le secteur de la construction, aussi bien en rénovation qu'en construction neuve. Dans ce domaine, les éléments constructifs bois/béton par connecteurs métalliques sont en plein développement. Cette association prometteuse permet de combiner les propriétés de chacun des matériaux : la bonne résistance en compression pour le béton et celle en traction pour le bois.

Le but ultime est d'augmenter la résistance et la rigidité d'éléments soumis à la flexion telles que les poutres de planchers. Cependant, la procédure de dimensionnement actuelle, selon l'Eurocode 5, est basée sur la méthode dite « gamma », qui utilise la rigidité effective de la section composite dépendant du module de glissement à l'interface bois/béton. Cela n'étant pas adapté aux structures composites, il est tout à fait pertinent d'avoir recours à la simulation numérique par éléments finis. Dans ce cadre, un modèle éléments finis a été récemment développé au LERMAB.

Ainsi, ce rapport traite de la continuité de ces travaux auxquels des tests expérimentaux à échelle réelle viennent s'ajouter pour tenter de valider le modèle numérique. Dans un premier temps, pour caractériser les connecteurs métalliques de type vis SFS dans un assemblage bois/béton, des éprouvettes ont été réalisées puis testées selon la norme EN 26891. Les valeurs obtenues ont été comparées aux valeurs données par l'Eurocode 5. Ces données ont permis de pré-dimensionner des poutres composites bois/béton, de 3,8 m de long, qui ont ensuite été réalisées et testées en flexion 4 points selon la norme EN 408. Les relevés des forces, des flèches à mi-portée et des déplacements relatifs bois/béton ont permis de caractériser de façon expérimentale ce type de poutres composites. Grâce à ces tests, les résultats ont été comparés avec les prévisions du modèle éléments finis développé et ainsi il a été possible de conclure quant à sa validité.

Mots-clés : poutre composite, bois, béton, éléments finis, vis SFS, caractérisation expérimentale

ABSTRACT

Experimental characterization of wood/concrete composite beams

Composite materials are currently more and more used in building as well as in renovation or in new construction. In this field, the constructive elements based on the association of wood and concrete with metallic connectors are in full development. This promising association allows taking the good resistance of wood in traction and the efficiency of concrete in compression.

Our aim is to improve the bending capacity of constructive elements like floor beams. The present dimensioning method by the Eurocode 5 is nevertheless based on the “gamma” method which used effective rigidity of composite section depending on the interface shear modulus between wood and concrete. As this is not adapted to composite structures, it is relevant to use numerical simulation by finite elements. In this context the LERMAB developed recently a finite elements model.

This rapport is in the continuity of such previous works. To approve definitely the finite elements model, some new tests in real scale are realized. First screw SFS connectors are characterized for a wood/concrete assembly. Samples are made and destroyed according to the EN 26891 norm. The values obtained were compared to those derived by Eurocode 5. Dimensioning of composite beams is based on these values and allows to make some wood/concrete composite beams samples of 3.8 meters length. These beams are submitted to four points flexion tests according to the EN 408 norm. Strength, displacement between wood and concrete, and the bending at the half beam length are measured to characterize experimentally this type of composite beams. Results are compared to the numerical model to conclude about its validity.

Keywords: composite beam, wood, concrete, finite elements model, screw SFS, experimental characterization