

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Civil

Laboratoire: LaMoMS, Université Mouloud Mammeri de
Tizi-Ouzou

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Génie Civil

Option : Modélisation et Calcul non Linéaire

Présenté par :

ARAB Bahia

Sujet :

**« COMPORTEMENT NON LINEAIRE DES
CONNEXIONS A L'INTERFACE BOIS/BETON
DES PLANCHERS MIXTES »**

Devant le jury composé de :

AIT TAHAR Kamal

Professeur UMMTO

Président

AIT AIDER Hacène

Professeur UMMTO

Rapporteur

DAHMANI Lahlou

Professeur UMMTO

Examineur

KACHI Mohand Said

Professeur UMMTO

Examineur

Présenté le : 17 /04 /2013

Remerciements

Tout d'abord je remercie avant tous, Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, et la volonté pour atteindre mon objectif.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon promoteur le Professeur AIT AIDER HACENE, pour sa disponibilité permanente, ses orientations, son savoir, sa modestie et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail.

Je voudrais aussi remercier vivement Mr M MEGHLAT, pour ces encouragements, sa gentillesse, son aide durant la période de réalisation de ce mémoire.

Je tiens à exprimer particulièrement mes vifs remerciements à Mr M OUDJENE du Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), de l'Université de Lorraine, France ; pour ses précieux conseils, son savoir, sa documentation et son orientation.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce travail. Et de l'enrichir par leurs propositions.

Je souhaite exprimer, de tout mon cœur, toute mon affection et ma reconnaissance à ma mère, mes frères et sœurs, toute ma famille, mes chers amis et collègues pour leur soutien constant qui m'a permis d'en arriver là.

Enfin, ma gratitude va à mon mari Dr AISSAT Abdelaziz pour la patience, l'amour et le bonheur qu'il m'a apporté.

SOMMAIRE

Désignation et Titre	Page
INTRODUCTION	01
1. Généralités	02
2. Domaine d'utilisation	02
2.1 Réhabilitation	02
2.2 Neuf	03
2.3 Comparaison	04
3. La mission	05
4. Problématique	05
CHAPITRE I : Connaissances actuelles sur les planchers en bois / béton	06
I.1. Historique des planchers mixtes	07
I.1-1 Sa description succincte	07
I.1-2 Son principe	07
I.1-3 Sa naissance	07
I.1-4 Méthodes de calculs et essai	07
I.1-5 Types de connecteurs	08
I.1-6 Développements récents	08
I.1-7 Quelques projets de référence	08
I.2 Les matériaux	09
I.2-1 Le béton	09
I.2.1-1 Généralités	09
I.2.1-2 Propriétés mécaniques	10
I.2.1-3 Propriétés physiques	11
I.2.1-4 Phénomènes physiques	11
I.2-2 Les aciers	12
I.2.2-1 Caractéristiques mécaniques	12
I.2-3 Le bois	12
I.2.3-1 Son origine est l'arbre	13
I.2.3-2 Une structure alvéolaire	14
I.2.3-3 Constitution du bois	16
I.2.3-4 Classement	18
I.2.3-5 Propriétés physiques	19
I.2.3-6 Propriétés mécaniques	20
I.2.3-7 Phénomènes physiques	23
I.2-4 Bois de construction	26
I.2.4-1 Le bois rond	27
I.2.4-2 Le bois scié	27
I.2.4-3 Le bois lamellé collé	27
I.2.4-4 Les familles de panneaux	28
I.2.4.4-1 Les contre-plaqués	28
I.2.4.4-2 Les panneaux de bois lamifiés+parralam	29
I.2.4.4-3 Les panneaux de fibres et de particules	30
I.3 Avantages et inconvénients des planchers mixtes	30

CHAPITRE II : Etude des connexions des planchers en bois/béton	33
II.1 Systèmes de connexion et planchers mixtes	34
II.2 Connexion par collage	35
II.3 Les connecteurs	37
II.3-1 L'importance des connecteurs	37
II.3-2 différents types de connecteur	37
II.3.2-1 Connexion locale	37
II.3.2-2 Connexion continue	42
II.3.2-3 Lewis – Rappel	44
II.3.2-4 Lignadal	44
II.3.2-5 D – Dalle	44
II-4 Etude comparative des connecteurs	45
II-5 Exemple	46
II.5-1 réhabilitation	46
II.5-2 Neuf	49
II.5-3 La réalisation du premier pont bois-béton en Allemagne 2008	50
II.5-4 La réalisation des bâtiments à plusieurs étages et les gratte-ciel	51
CHAPITRE III : Comportement expérimental des connexions	52
III.1 Etudes expérimentales	53
III.2 Performances mécaniques des planchers mixtes en bois-béton	53
III.2 Performances mécaniques des planchers mixtes en bois-béton	53
III.3 Caractérisation des systèmes de connexion	53
III.3-1 La rigidité	54
III.3-2 Résistance au cisaillement	55
III.3-3 Ductilité	55
III.4 Le comportement expérimental des connexions	55
III.4-1 Connexion par collage	56
III.4-2 Connexion par connecteurs	60
III.4.2-1 Connexion locale	63
III.4.2-2 connexion continus	74
CHAPITRE IV : Modélisation du comportement non linéaire des connexions	81
IV.1 Introduction	82
IV.2 Expérimentale sur la connexion	82
IV. 2-1 Essai de cisaillement	82
IV. 2-2 Essai en flexion	83
IV. 2-3 Essai de fatigue	83
IV.3 Effet apporté par la connexion bois béton (action composite)	83
IV.4 Les étapes des travaux réalisés	87
IV.4 -1 Calcul sous EXCEL (Partie 1)	88
IV.4 -1-1 Appuis	88
IV.4 -1-2 Comportement, traction compression	88
IV.4 -1-3 Méthode de calcul simplifiée pour le calcul des planchers	89
IV .4-2 Modélisation avec ABAQUS (Partie 2)	94
IV .4-2-1 Introduction	94
IV .4-2-2 Simulation numérique	94
IV .4-2-3 A propos d'ABAQUS	95
IV .4-2-4 Travaux par simulation numérique pour les planchers bois béton	95
IV .4-2-5 Méthodologie (le premier modèle avec 7 connecteurs)	96

IV .4-2-6 Présentation des résultats obtenus par ABAQUS et interprétations	102
IV .4-2-7 Représentation des différents diagrammes obtenus par ABAQUS	113
IV-5 Comparaison et discussion des différents résultats	116
<i>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</i>	119
CONCLUSION GENERALE	120
PERSPECTIVES	121
LISTE DES SYMBOLES	122
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	123

LISTE DES FIGURES

Désignation	Titre	Page
CHAPITRE I		
Fig I-1	<i>Planchers mixte bois /béton</i>	02
Fig I-2	<i>Transformation d'une ancienne usine en logements de luxe en Allemagne....</i>	03
Fig I-3	<i>Ecole nouvelle à Wädenswil en Suisse 1997</i>	04
Fig I-4	<i>Schéma de principe d'un plancher mixte en bois-béton</i>	05
Fig I-5	<i>Structure à plancher mixte</i>	07
Fig I-6	<i>Collège CALIPSO à Montreuil-Bellay –Vue de l'entrée (structure mixte bois-béton)</i>	09
Fig I-7	<i>Vue en perspective, école de LANDRY</i>	09
Fig I-8	<i>Comparaison des caractéristiques des matériaux bois, acier et béton armé</i>	13
Fig I-9	<i>Epicéa</i>	14
Fig I-10	<i>Pin de douglas</i>	14
Fig I-11	<i>Pin sylvestre</i>	14
Fig I-12	<i>Mélèze d'Europe</i>	14
Fig I-13(a)	<i>Caractéristiques d'anisotropie du bois</i>	15
Fig I-13(b)	<i>Coupes et axes dans un tronc</i>	15
Fig I-14(a)	<i>Comparaison entre les modules d'élasticité du bois dans ses trois directions d'orthotropie</i>	15
Fig I-14 (b)	<i>Caractéristiques élastiques de certains bois résineux (1) et feuillus (2) de Navi et al, 2005</i>	16
Fig I-15	<i>Schématisation de la paroi cellulaire de trachéide, d'après Dinwoodie 1981</i>	17
Fig I-16	<i>L'influence d'hygroscopie d'après Natterer et al. 2000</i>	18
Fig I-17	<i>Différences de largeur de cerne</i>	19
Fig I-18-a	<i>Lois typique de comportement du bois de Setra, 2006</i>	21
Fig I-18-b	<i>Loi de Hooke généralisée aux trois axes (r; t; l)</i>	22
Fig I-18-c	<i>Effets de la densité sur les propriétés mécaniques du bois</i>	23
Fig I-19	<i>Déformations de retrait des planches</i>	25
Fig I-20	<i>fissures radiales de retrait</i>	25
Fig I-21	<i>Gorges de décharge</i>	27
Fig I-22	<i>Bois rond scié sur deux faces</i>	27
Fig I-23	<i>Poteaux à base de bois ronds</i>	27
Fig I-24	<i>Principe d'une poutre en lamellé-collé</i>	28
Fig I-25	<i>Principe de fabrication du contre-plaqué</i>	29
Fig I-26	<i>Principe de fabrication du lamibois</i>	29
Fig I-27	<i>Principe de fabrication du parralam</i>	30
Fig I-28	<i>Principe de fabrication de l'OSB</i>	30
CHAPITRE II		
Fig II-1	<i>Le procédé de connexion Lignadal(a), Connecteur Natterer (b)</i>	34

Fig II-2	<i>Connexion par collage</i>	35
Fig II-3	<i>Serre-joint</i>	36
Fig II-4.a	<i>Ponçuses pour la préparation des surfaces de collage</i>	36
Fig II-4.b	<i>Mise en place du collage</i>	36
Fig II-5	<i>Connecteur tube</i>	37
Fig II-6	<i>Connecteur tige</i>	37
Fig II-7	<i>Connecteur Cosylva</i>	38
Fig II-8	<i>Présentation schématique d'un plancher avec Connecteur Cosylva</i>	38
Fig II-9	<i>Vue d'une mise en œuvre des connecteurs SBB</i>	39
Fig II-10	<i>Mise en œuvre en construction neuve</i>	39
Fig II-11	<i>Mise en œuvre en réhabilitation (connecteur en contact direct avec la poutre principale et sur les solives secondaires)</i>	39
Fig II-12	<i>Outillage pour la pose des connecteurs</i>	40
Fig II-13	<i>Connecteur base</i>	40
Fig II-14	<i>Connecteur maxi</i>	41
Fig II-15	<i>Pose connecteur tecnaria</i>	41
Fig II-16	<i>Dimension d'un connecteur SFS VB</i>	42
Fig II-17	<i>Exemple de mise en œuvre de ce système</i>	42
Fig II-18	<i>Système de connexion Timco</i>	42
Fig II-19	<i>Les Connecteurs continus</i>	43
Fig II-20	<i>Vue d'un plancher</i>	44
Fig II-21	<i>Vue en 3D du système Lignadal</i>	44
Fig II-22	<i>Coupe et aperçu d'un essai du système</i>	45
Fig II-23	<i>Poutres bois et connecteurs</i>	49
Fig II-24	<i>Coffrage et coulage du béton</i>	49
Fig II-25	<i>Système mixte en phase d'exploitation</i>	50
Fig II-26	<i>vue du pont</i>	50
Fig II-27	<i>Montage des poutres en bois lamellé collé et leurs mises en place</i>	50
Fig II-28	<i>Le pont en phase de réalisation ainsi que à la fin des travaux</i>	51
Fig II-29	<i>La ville de SHANGHAI</i>	51
CHAPITRE III		
Fig III-1	<i>Exemples de différents systèmes de liaisons bois-béton</i>	55
Fig III-2	<i>Schéma de pilotage des essais en flexion</i>	56
Fig III-3	<i>Disposition des capteurs</i>	56
Fig. III-4	<i>Rupture par arrachement du bois</i>	57
Fig III-5	<i>Rupture des poutres</i>	57
Fig III-6	<i>Rupture de la poutre en bois</i>	57
Fig III-7	<i>Rupture cohésive en cisaillement dans le bois</i>	58
Fig III-8	<i>Rupture adhésive de l'interface colle-béton</i>	58
Fig III-9	<i>Les types de rupture</i>	59
Fig III-10	<i>Les déplacements relatifs entre le bois et le béton</i>	60
Fig III-11	<i>Détermination des performances mécaniques en laboratoire</i>	60
Fig III-12	<i>Dispositif d'essai de cisaillement sur échantillon</i>	61
Fig III-13	<i>Courbe typique lors d'un essai de cisaillement</i>	61
Fig III-14	<i>Influence des connecteurs</i>	62
Fig III-15	<i>Rupture au niveau de la chape</i>	62
Fig III-16	<i>Rupture au niveau de la poutre en bois.</i>	62
Fig III-17	<i>Evolution du chargement durant l'essai de fluage</i>	63

Fig III-18	<i>Essais de fluage sur les poutres en bois-béton</i>	63
Fig III-19	<i>Les caractéristiques des connecteurs testés</i>	64
Fig III-20	<i>Courbe force –glissement pour les essais réalisés</i>	64
Fig III-21	<i>Résultats obtenus après essai de destruction sur quelques spécimens</i>	65
Fig III-22	<i>Eclatement du béton et la courbe force-déplacement</i>	66
Fig III-23	<i>Le principe d'essai</i>	66
Fig III-24	<i>Rupture de la couche de béton</i>	66
Fig III-25	<i>Rupture de la poutre en bois</i>	67
Fig III-26	<i>Essai de flexion quatre points</i>	67
Fig III-27	<i>Diagramme force-flèche à mi travée</i>	67
Fig III-28	<i>Connecteur Hilti utilisé dans l'essai</i>	68
Fig III-29	<i>Les poutres pour les essais réalisées</i>	68
Fig III-30	<i>Fissuration dans toutes les directions du bois et béton</i>	69
Fig III-31	<i>Les trois types de connecteurs</i>	69
Fig III-32	<i>Courbe de charge-glisement pour les trois connecteurs</i>	70
Fig III-33	<i>Le connecteur « shear crown » et son mode de rupture</i>	70
Fig III-34	<i>Cycle de charge</i>	71
Fig III-35	<i>Détail du transducteur linéaire pour le relevé du fluage</i>	72
Fig III-36	<i>Détail des coffrages, des connecteurs et du treillis métallique d'armature</i>	72
Fig III-37	<i>Pose du béton</i>	72
Fig III-38	<i>Configuration de l'éprouvette à la fin de l'essai</i>	72
Fig III-39	<i>Fluage des connecteurs à la fin de l'essai</i>	72
Fig III-40	<i>Courbe charge /déplacement obtenue par les essais</i>	73
Fig III-41	<i>Configuration d'essai et le résultat de calcul du coefficient</i>	73
Fig III-42	<i>Rupture en traction du bois et du béton</i>	74
Fig III-43	<i>Le modèle réel et le modèle simulé avec ANSYS</i>	74
Fig III-44	<i>La courbe charge-glisement obtenu par l'essai</i>	75
Fig III-45	<i>Diagramme charge-glisement pour les différents types de connexion</i>	75
Fig III-46	<i>Effet de la ductilité sur le glissement de la section mixte</i>	76
Fig III-47	<i>Effet de la ductilité sur le glissement de la section mixte</i>	76
Fig III-48	<i>Les connecteurs avec crochets</i>	76
Fig III-49	<i>Diagramme force glissement pour les deux types de spécimens</i>	77
Fig III-50	<i>Les différents modes de rupture</i>	77
Fig III-51	<i>Les diagrammes des trois matériaux</i>	78
Fig III-52	<i>Les spécimens d'essai</i>	78
Fig III-53	<i>Le diagramme obtenu pour les deux spécimens</i>	78
Fig III-54	<i>La comparaison faite pour les résultats du module de glissement</i>	79
Fig III-55	<i>La section utilisée lors de l'essai</i>	79
Fig III-56	<i>Exemple d'un plancher préfabriqué en bois-béton utilisé en ALLEMAGNE</i>	80
CHAPITRE IV		
Fig IV-1.a	<i>Essais de cisaillement et le dispositif géométrique</i>	82
Fig IV-1.b	<i>Le dispositif de poutre et l'exemple du comportement de l'interface</i>	83
Fig IV-2	<i>Représentation schématique du rôle joué par des connecteurs dans une poutre simple</i>	83
Fig IV-3	<i>Effets des actions composites</i>	84
Fig IV-4	<i>Le rôle des connecteurs [5]</i>	84

Fig IV-5	<i>Etat de contraintes sans connecteur et avec connecteur dans une poutre mixte en bois-béton [4]</i>	85
Fig IV-6	<i>Mise en évidence du cisaillement dans une poutre en flexion</i>	85
Fig IV-7	<i>Mise en évidence du glissement observé sur un bilame en flexion [54]</i>	86
Fig IV-8	<i>Courbe force – déplacement [9]</i>	86
Fig IV-9	<i>Schéma de la poutre chargée uniformément</i>	87
Fig IV-10	<i>Comportement mécanique du bois [56]</i>	89
Fig IV-11	<i>Organigramme de calcul d'un plancher mixte bois-béton Suivant EC5</i>	90
Fig IV-12	<i>Courbe force-glissement pour une poutre de portée de 4m</i>	91
Fig IV-13	<i>Coube force-glissement pour une poutre de 1m</i>	91
Fig IV-14	<i>Coube contrainte-glissement pour une poutre de 1m(pour le béton inf)</i>	92
Fig IV-15	<i>Courbe contrainte –glissement pour la poutre de 1m(au niveau de l'interface)</i>	92
Fig IV-16	<i>Courbe chargement –contrainte pour la poutre de 1m(au niveau de l'interface)</i>	93
Fig IV-17	<i>Contraintes normales (1=béton, 2=bois</i>	93
Fig IV-18	<i>La section mixte et les contraintes normales obtenues</i>	94
Fig IV-19	<i>Maillage d'une section en bois béton par collage avec ABAQUS</i>	96
Fig IV-20	<i>Les modules part et property</i>	97
Fig IV-21	<i>Le module assembly</i>	98
Fig IV-22	<i>Le module Interaction</i>	99
Fig IV-23	<i>Le module load</i>	99
Fig IV-24	<i>Le module mesh (maillage adoptés lors de la simulation numérique)</i>	100
Fig IV-25	<i>Le deuxième modèle de poutre</i>	101
Fig IV-26	<i>Comparaison des contraintes dans le connecteur</i>	102
Fig IV-27	<i>Les contraintes maximales au niveau du connecteur de rive</i>	103
Fig IV-28	<i>Localisation des contraintes maximales dans les différentes sections</i>	105
Fig IV-29	<i>Propagation des déformations dans les poutres et les connecteurs</i>	106
Fig IV-30	<i>Les contraintes maximales au niveau du connecteur de rive</i>	106
Fig IV-31	<i>Localisation des déformations maximales dans les différentes sections</i>	108
Fig IV-32	<i>Propagation des déplacements dans les poutres et les connecteurs</i>	110
Fig IV-33	<i>Les déplacements maximaux au niveau du connecteur de rive</i>	111
Fig IV-34	<i>Localisation des déplacements maximaux dans les différentes sections</i>	113
Fig IV-35	<i>Emplacement du nœud étudié</i>	113
Fig IV-36	<i>Développement des contraintes dans les deux modèles</i>	114
Fig IV-37	<i>Développement des déformations dans les deux modèles</i>	114
Fig IV-38	<i>Développement des déplacements dans les deux modèles</i>	115
Fig IV-39	<i>Diagramme contrainte déformation</i>	115
Fig IV-40	<i>Diagramme contrainte-glissement selon EC5 et ABAQUS</i>	116
Fig IV-41	<i>Comparaison des Diagrammes contrainte-glissement</i>	117
TABLEAUX		
Tableau I-1	<i>Nombre de permis de bâtir (2001-2008)</i>	04
Tableau I-2	<i>Quelques valeurs caractéristiques</i>	26
Tableau I-3	<i>Effet environnemental des matériaux de construction</i>	31
Tableau II-1	<i>Tableaux comparatifs de trois systèmes de dalles mixtes</i>	45
Tableau IV-1	<i>Tableau des unités correspond à ABAQUS</i>	96

RESUME

Les planchers mixtes trouvent une application privilégiée en Bâtiment, notamment en réhabilitation de planchers bois. Composés de poutres en bois et d'une dalle en béton, ils permettent de faire travailler le bois en traction et le béton en compression. Les connecteurs, quant à eux travaillent au cisaillement. Ces connecteurs sont caractérisés par un module de glissement qui joue un rôle primordial dans la rigidité du système.

Ces planchers ont fait l'objet de nombreuses innovations. Il existe donc plusieurs systèmes de dalles mixtes et de connexions (tubes cylindriques, vis, lattes en bois, cornières en métal..) dont l'avis technique prévaut en l'absence de normes spécifiques.

En cohérence avec leur temps, les maîtres d'ouvrages sont de plus en plus nombreux à s'intéresser au développement durable et à la protection de l'environnement, ce qui les conduit à réutiliser une des plus anciennes techniques de construction : le bois et ses innovations, notamment apportées par les planchers mixtes en construction neuve.

Enfin, ce travail a pour objectif d'analyser le comportement des structures mixtes bois-béton. Une analyse qui regroupe l'ensemble des problématiques abordées et permet d'apporter au moins une réponse aux effets induits par l'interaction semi-rigide des deux matériaux caractérisés par des propriétés très distinctes. La procédure adoptée consiste à confronter la méthode de calcul analytique selon **EC5** à une modélisation numérique à l'aide du logiciel ABAQUS et ensuite à un résultat d'essai expérimental réalisé.

Mots clés :

Planchers mixtes bois-béton / Connecteurs / Glissement / Développement /Modélisation/ Eurocode 5

Abstract

The wood-concrete composite floor systems are usually used in Building construction, especially in rehabilitation of wood floors. In these floors, the concrete slab work in compression and the wood beams work in traction. The connectors generally work in shear, except for floors with notches. In that case, the connectors work in traction and the notches balance the shear stresses. The connexion systems are characterized by a creep modulus that plays an essential part in the rigidity of the system.

Up to now, the wood-concrete composite floors have been the subject of many innovations. Thus, several composite slabs and connexion systems exist (metal cylinder, screw, wood lath, metal angle...) and the technical evaluation documents are used while there is no specific standard.

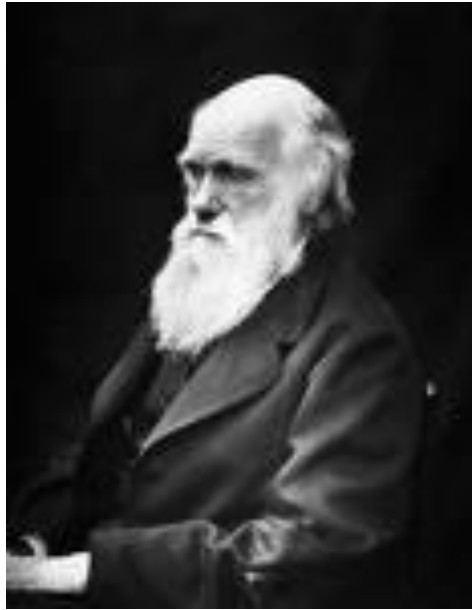
Nowadays, clients are more and more to think about sustained development and environment, which lead to develop again one of the oldest construction ways: the wood construction and these innovations, especially the composite floors in new building.

Lastly, this work aims to analyze the behavior of the mixed structures wood-concrete. An analysis which gathers the whole of the problems approached and makes it possible to bring at least a response to the effects induced by the semi-rigid interaction of two materials characterized by very distinct properties. The adopted procedure consists in confronting the method of calculation analytical according to EC5 with a numerical modeling using software ABAQUS and then with an experimental test result carried out.

Key words:

Wood-concrete composite floors / Connectors / Slip / Development / Modeling / Eurocode 5

Charles Darwin / 1809-1882



"Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements."

-
- **De l'arbre au bois** : une usine de production de matière première et d'énergie qui préserve l'environnement,
ENSTIB: Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois en France.

- **Du matériau aux propriétés recherchées dans l'acte de construire.**
 - **Spécificités architecturales du bois dans la construction.**
 - **Le bois vis-à-vis des autres matériaux.**
 - **Le bois et l'eau:** amis dans l'arbre, ennemis et parfois complices dans le bois.
-
- **Durabilité des bois et préservation :** une méthodologie de conception indispensable.
 - **Singularités, variabilité, classement :** vers un matériau de construction comme les autres, mais finalement différent...

INTRODUCTION

Introduction générale

1. Généralités

La mixité des matériaux dans les constructions est au cœur des problématiques de développement durable et d'amélioration des performances énergétiques des bâtiments. C'est dans ce contexte qu'architectes et ingénieurs proposent de plus en plus des systèmes structurels mixtes où bois et béton se côtoient afin de tirer la meilleur parti de chaque matériau selon ses qualités esthétiques, structurelles ou encore thermiques [1].

Dans les pays nordiques comme la Finlande, la Norvège et la Suède, la culture de la construction bois est très bien développée du fait de l'importance de la superficie des forêts et du développement de la filière bois. Cependant en France, ce type de structure est peu connu même si son utilisation commence à se démocratiser.



Fig I-1: Planchers mixte bois /béton [2].

2. Domaine d'utilisation

2.1 Réhabilitation

Ce type de plancher est très utilisé dans la réhabilitation de structures anciennes [3], du fait de la possibilité d'augmenter notablement la rigidité et la résistance des planchers bois. Cette augmentation est obtenue par la mise en œuvre d'une dalle de béton de 8 à 10 cm de hauteur et de connecteurs qui rigidifient la structure et permettent une bonne isolation acoustique.

Lors d'une réhabilitation d'un plancher en bois, il est nécessaire de faire des interventions de renforcement et de raidissement, car ils ont été réalisés pour supporter de faibles charges. Souvent, les anciens planchers en bois présentent une déformée plus importante que la réglementation préconise aujourd'hui.

En rénovation, après stricte vérification des murs et fondations, le plancher mixte permet de :

- Conserver la structure bois apparente en sous face de plancher
- Renforcer les planchers et le solivage en place
- De reprendre plus de charges que le plancher original qui n'est pas adapté au besoin actuel

- Cacher gaines et tuyauterie dans la dalle
- Poser un carrelage dans les pièces d'eau



Fig I-2 : Transformation d'une ancienne usine en logements de luxe en Allemagne

2.2 Neuf

Dans la construction neuve, ces planchers permettent de réduire les poids totaux de la structure. Le principe est simple, il s'agit de coupler une structure de poutre en bois avec une fine dalle en béton. Cette technique permet d'obtenir un plancher très résistant et rigide tout en gardant l'aspect esthétique du bois.

Donc pour satisfaire la réglementation en vigueur, il est nécessaire d'utiliser des poutres avec des sections importantes pour que le plancher soit assez résistant et rigide. Dans un souci de cout et d'esthétisme, il peut être judicieux d'avoir recours au plancher mixte bois - béton. Comparé à une dalle en béton arme, le plancher collaborant permet de réduire :

- La charge d'un bâtiment
- L'épaisseur des séparations horizontales
- Les ponts thermiques

L'alliance entre le bois et le béton possède une grande force, grâce au bois l'aspect esthétique d'un plancher bois est conserve et le béton apporte sa grande résistance a la compression ce qui permet une rigidité importance et une déformée limitée.

En outre, la mise en œuvre d'un plancher mixte est une action qui :

- valorise les ressources forestières
- limite les émissions de CO₂
- incite à l'usage du bois en construction neuve



Fig I-3: Ecole nouvelle à Wädenswil en Suisse 1997

2.3 Comparaison

Le tableau 1 représente les résultats comparatifs de la construction neuve et rénovation donnés par un institut national de statistiques en Belgique [4].

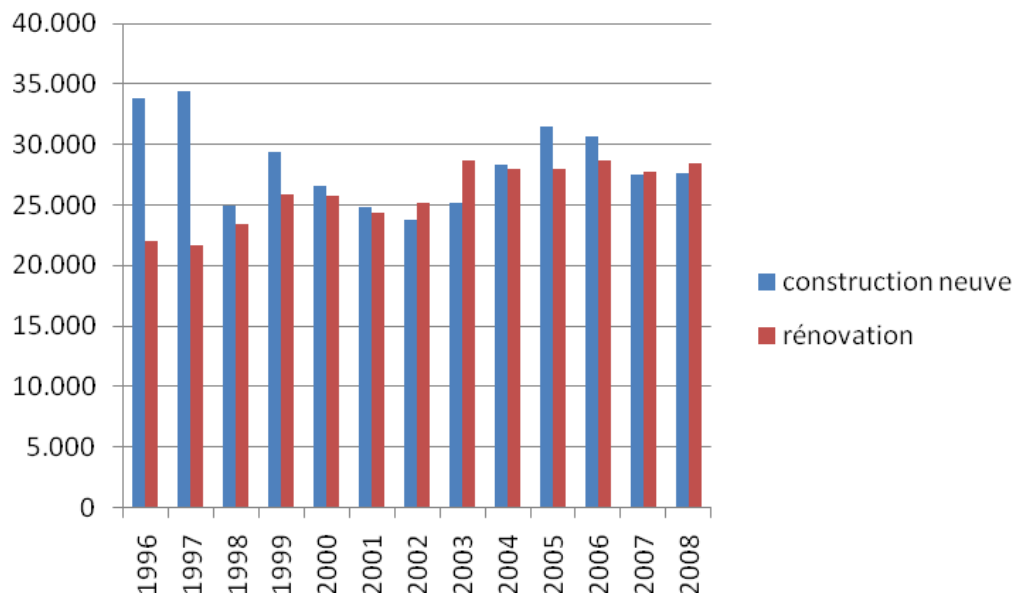


Tableau I-1 : Nombre de permis de bâtir (2001-2008)

3. La mission

Le projet porte sur le l'étude des planchers mixtes bois-béton, ces objectifs sont multiples : Dans un premier temps, il s'agit d'élaborer une synthèse générale regroupant toutes les connaissances actuelles sur les planchers mixtes ainsi que les différentes caractéristiques des principaux matériaux constituant le système, on va rappeler également les avantages et inconvénients du mixte et détailler les apports du projet. Une présentation du fonctionnement d'une dalle mixte et des différents systèmes existants, en toute simplicité l'étude des connexions de ces planchers Bois /Béton fera l'objet du chapitre 2.

Puis, la deuxième étape est de présenter le comportement expérimental des connexions de ces planchers, les différents essais réalisés ainsi que leurs résultats vont être abordés au chapitre 3.

A ce stade, on passe au chapitre 4 qui va être consacré à la modélisation du comportement non linéaire de ces connexions, Une confrontation entre les résultats numériques et analytiques d'une part, et les résultats expérimentaux d'autre part, donne une première réponse à la problématique liée au dimensionnement des structures mixtes bois-béton.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous faisons le point sur l'outil élaboré et sur les principaux résultats concernant le comportement des planchers et proposer quelques perspectives.

4. Problématique

Pour réaliser les connexions bois/béton, on a recours à des organes métalliques qu'il faut modéliser. Leur modélisation tridimensionnelle reste à ce jour très onéreuse. Il est donc intéressant de les modéliser par des éléments finis en considérant la poutre membrane/flexion avec un cisaillement transversal. Le développement de ce nouvel élément fini de poutre sans degré de liberté de rotation, compatible avec les éléments finis volumiques est donc indispensable.

L'enjeu principal de l'étude réside dans la connaissance des différents paramètres impliqués dans la modélisation et le calcul, on étudiera une section en T composée de bois, béton et de connecteur à titre d'exemple, on analysera les différentes incohérences auxquelles elle est sujette ainsi que le comportement de l'interface bois /béton.

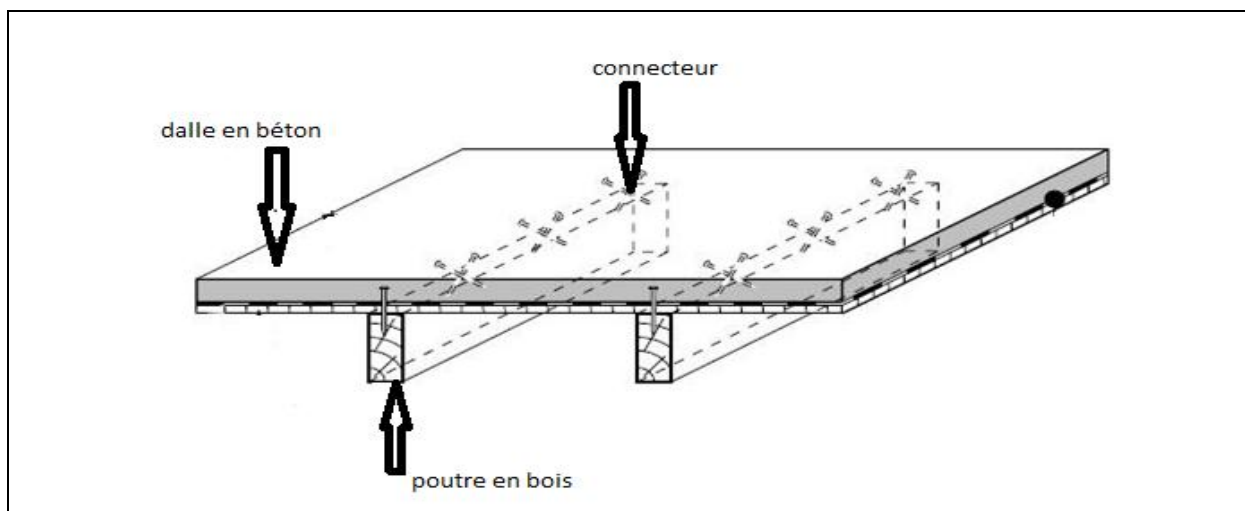


Fig I-4 : Schéma de principe d'un plancher mixte en bois-béton

CHAPITRE I

*Connaissances actuelles sur les
planchers en bois/béton.*

I-1. Historique des planchers mixtes

I.1-1 Sa description succincte

Plancher mixte bois-béton associant des poutres en bois à une dalle de béton armé coulée en place. Cette dalle de béton est connectée aux poutres en bois au moyen des connexions existantes.

I.1-2 Son principe

Le principe d'un plancher mixte est de faire travailler en compression le béton et le bois en traction grâce à la mise en œuvre de connecteurs. Ainsi, on utilise au mieux les propriétés mécaniques de chaque matériau c'est-à-dire une forte résistance à la compression pour le béton et une bonne résistance à la traction pour le bois.



Fig I-5 : Structure à plancher mixte [5]

I.1-3 Sa naissance

Les structures mixtes bois-béton se sont développées entre les deux guerres mondiales, lorsque le monde de la construction a souffert d'un manque d'acier, nécessaire au renforcement du béton. Les premières constructions apparaissent dans les années 40. Mais Pincus (1969,1970) précise que l'utilisation de poutres mixtes bois-béton a été suggérée pour la première fois par Seiler en 1933. Il fut d'ailleurs l'auteur d'un ouvrage sur l'utilisation de résine époxy permettant d'assurer la connexion entre les deux matériaux. Les essais de flexion réalisés ont révélé que la destruction du système apparaissait par ruine du béton au cisaillement ou du bois en traction mais pas par ruine de la résine. Pincus soulève également les problèmes de comportement du système au long terme, de l'humidité de mise en œuvre du bois et des charges accidentelles (impact).

Depuis, les systèmes mixtes ont fait l'objet d'études, de thèses et de nombreux essais, on parle de 10000m² de planchers bois, rénovés à l'aide de cette technique en République socialiste tchécoslovaque dès les années 60, mais également de ponts mixtes construits en Nouvelle Zélande [62] et aux Etats Unis à partir des années 70.

I.1-4 Méthodes de calculs et essai

La première publication en matière de rénovation de planchers bois par l'ajout d'une dalle béton était de Godycki et al (1984). Elle présentait une méthode de calcul élastique linéaire prenant en compte le glissement des connecteurs, de même que le fluage, par réduction du module d'élasticité du béton. Des milliers de m² de planchers mixtes ont été construits en Pologne grâce à sa méthode (1981).

Girhammar (1984) trouva une relation entre la charge appliquée et le glissement. Il détermina les caractéristiques des connecteurs et proposa une méthode de calcul linéaire pour des éléments soumis à la fois à des forces normales et à des moments de flexion, mais également une disposition optimale des connecteurs.

Küng (1987) étudia l'influence de la qualité du béton (normal ou allégé), de l'épaisseur de la dalle, de l'âge des poutres en bois utilisées, du type de chargement et de la répartition des connecteurs sur la qualité du système mixte. Il mit au point une méthode de calcul élastique linéaire qui autorise un glissement entre le béton et le bois.

Natterer et Hoeft (1987) utilisèrent les équations différentielles pour développer leur méthode de calcul linéaire.

Enfin Timmerman et Meierhofer (1994) proposèrent une méthode de calculs basée sur les éléments finis.

I.1-5 Types de connecteurs

L'histoire montre que les connecteurs classiquement utilisés pour lier deux éléments en bois ont été utilisés dans les premières constructions mixtes bois-béton. Du fait de leur faible module de glissement, ils ont été progressivement remplacés par des connecteurs spécifiques.

Spirig (SFS Provis AG, 1985) développa des vis à double tête. Le corps de la vis est ancré dans le bois jusqu'à la première tête de vis, le reste de la vis est ensuite noyé dans la dalle béton. Ce type de connecteur fut testé par Meierhofer et al en 1994.

En 1989, Stevanovic utilisa des clous pour connecter la dalle béton aux poutres bois dans le cadre de rénovation. Puis, Natterer (1990, 1991) mit au point une connexion permettant de palier au problème du glissement. Il utilisa un système d'entailles combinées à des connecteurs HILTI précontraints avant la prise du béton.

Enfin, d'autres systèmes de connexion furent inventés par Werner (1992), Ceccotti (1995) et Gerber et al (1993).

I.1-6 Développements récents

La construction mixte bois-béton connaît encore jusqu'à maintenant de nombreuses innovations.

En 1992, Erler utilisa un béton de polymères. La résine constituait alors une connexion rigide par adhérence au bois, en réglant le problème du glissement. Il réalisa des essais de cisaillement sur ce système, à court et long terme.

Plus récemment, en 1998, Rajcic proposa une connexion rigide pour une dalle en béton allégé. Elle fut constituée d'une plaque de métal d'1mm d'épaisseur collée dans la poutre bois sur toute sa longueur. Il réalisa des essais de chargements cycliques permettant de déterminer la résistance de la liaison.

L'influence des isolants sur la performance acoustique des planchers mixtes bois-béton fut testée par Sipari en 1998. Il a montré que les planchers mixtes présentaient, de part l'augmentation de leur masse, des performances acoustiques meilleures que les planchers bois mais aussi une amélioration du confort par réduction des vibrations.

Quant au comportement au feu des planchers mixtes bois-béton, il fut étudié la même année par Fontana et Frangi. Ils procédèrent à des essais de cisaillement. Ces tests ont notamment révélé une perte de résistance, après 30 minutes d'exposition, pouvant atteindre 58% selon la profondeur du connecteur dans le bois.

I.1-7 Quelques projets de référence d'après [2].

1-Collège A.Malraux de SENONES (88), entreprise SIMONIN, Architectes J.M. GREMILLET / E.FALK / C.ZOMENO, chantier privé, contrôleur technique VERITAS Laxou.

Essence : sapin LC GL28 - construction neuve : 4 000 connecteurs posés.

2- Musée des Beaux Arts à ANGERS (49), entreprise PERRAULT Frères, chantier public, contrôleur technique SOCOTEC Angers.

Essence : chêne - réhabilitation : 1 600 connecteurs posés

3- Château de DURTAL (49), entreprise SARPA, Architecte M. MESTER de PARAJD ACMH, chantier privé classé MH.

Essence : chêne - réhabilitation : 1 225 connecteurs posés.

4-Château de la Reine Blanche, rue des Gobelins à PARIS (75), entreprise CCR, Architecte M.JOULIE / D.HERTENBERGER / J.VITRY, chantier OGIC classé MH, contrôleur technique SOCOTEC Paris.

Essence : chêne - réhabilitation : 950 connecteurs posés.



Fig I-6 : Collège CALIPSO à Montreuil-Bellay –Vue de l’entrée (structure mixte bois-béton) [5].



Fig I-7 : Vue en perspective, école de LANDRY [6].

I.2 Les matériaux

I.2-1 Le béton

I.2.1-1 Généralités

Le béton est un matériau de construction composite homogène, constitué de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant (ciment) qui durcit en présence d’eau. A ces composants s’ajoutent des adjuvants qui améliorent sensiblement les performances du matériau (plastifiants, accélérateurs et retardateurs de prise, entraîneurs d’air, hydrofuges de masses).

Les progrès techniques accomplis au cours des dernières années ont abouti à une grande diversification des bétons. Diversité qui permet aujourd'hui de disposer du béton le mieux adapté à chaque condition de chantier, catégorie d'ouvrage ou produit.

Les bétons courants restent cependant les plus utilisés. Ils présentent une masse volumique de 2003 kg/m³ environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.

I.2.1-2 Propriétés mécaniques

A) Propriétés de rigidité

En compression comme en traction, la déformation longitudinale est accompagnée d'une déformation transversale.

Le module de déformation longitudinale instantanée E est défini par le rapport de la contrainte unitaire sur la déformation unitaire. Quant au coefficient de Poisson, il représente le rapport entre sa déformation axiale et sa déformation transversale.

B) Module d'Young

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}} \text{ (MPa)} \quad \text{(instantané)} \quad [7]$$

$$E_{vj} = 3700 \sqrt[3]{f_{cj}} \text{ (MPa)} \quad \text{(Différé)}$$

C) Coefficient de poisson [7]: C'est le rapport entre la déformation relative transversale et la déformation relative longitudinale, il est pris égal :

➤ $\nu=0$ (à l'ELU) pour le calcul des sollicitations.

➤ $\nu=0,2$ (à l'ELS) pour le calcul des déformations.

D) Propriétés de résistance :

La résistance du béton aux efforts de compression et de traction varie en fonction de la nature du ciment employé, de son dosage, des granulats et de la quantité d'eau ainsi que du soin apporté à la mise en œuvre et des contrôles auxquels il est soumis.

Malgré cette diversité, il reste clair que le béton présente des résistances à la compression élevées et des résistances faibles en traction (en pratique, elles sont négligées). C'est pourquoi il est associé à des armatures en acier dans les zones tendues.

Pour le béton frais :

La résistance à la compression peut atteindre **0,3 à 0,4 MPa** tandis que celle en traction dépasse rarement **1/100e** de ces valeurs, soit 0,004 MPa.

Pour le béton durci :

La caractéristique essentielle du béton durci est la résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours) : f_{c28} .

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, le béton se comporte comme un matériau fragile.

Comme résumé :

Béton frais :

$$R_c = 0,3 \text{ à } 0,4 \text{ MPa}$$

$$R_t = 0,004 \text{ Mpa}$$

Béton durci : (courant)

$$R_c = 30 \text{ à } 60 \text{ Mpa, ductile en compression}$$

$$R_t = 3 \text{ à } 5 \text{ Mpa, fragile en traction}$$

$$\text{Rapport : } \frac{R_c}{R_t} = 13$$

I. 2.1-3 Propriétés physiques

Le béton offre une solution efficace à la protection contre les bruits, une conductivité thermique moyenne et un comportement au feu caractérisé par affaiblissement des résistances à la compression et à la traction du béton. A 600°C le béton perd 45 % de sa résistance en compression et 100% de sa résistance en traction. A 200°C, son module d'élasticité, quant à lui, est divisé par 2. [6]

I.2.1-4 Phénomènes physiques

La déformation est également une des caractéristiques importantes du béton car elle joue un grand rôle aussi bien pour la stabilité que pour la durabilité des ouvrages. Le choix judicieux des matériaux, une mise en œuvre correcte et l'adoption de dispositions constructives appropriées jouent un rôle essentiel.

A) Le retrait :

Sur une éprouvette en béton exposée à l'air, une diminution de longueur d'environ 1mm/m peut être observée pendant son durcissement.

Quatre phénomènes interviennent dans cette variation de volume :

a- Le ressuage : apparition d'une pellicule d'eau claire à la surface du béton frais et tassements du volume sous l'effet de la pesanteur.

b- Retrait plastique (après le ressuage, pendant un temps limité): retrait par dessiccation pendant la prise. Au fur et à mesure que l'eau capillaire s'évapore, les forces de mouillage et de tension superficielle augmentent et deviennent capables de fissurer le béton pour obtenir le rapprochement nécessaire des grains.

c- Contraction thermique caractéristique de la prise du béton, puis retour à la température initiale. On observe une expansion puis une contraction qu'il convient de prendre en compte pour éviter des risques de fissuration.

d- L'auto dessiccation : le phénomène de prise s'accompagne d'une dessiccation du béton sans départ de l'eau vers l'extérieur. Apparaissent des vides dans lesquels des forces capillaires vont se développer et provoquer un phénomène semblable au retrait plastique. Elle n'est sensible que pour les bétons à hautes performances.

B) Dilatation thermique :

Sous l'effet d'une variation de température, le béton va se contracter (diminution de température), ou se dilater (augmentation de température).

Le béton est caractérisé par un coefficient de dilatation thermique évalué à 1×10^{-5} , (idem acier). Il correspond à l'allongement par unité de longueur sous l'effet d'une augmentation de température de 1°C.

C) Le fluage :

Sous l'action d'une charge de longue durée, le béton va se déformer de façon différée par réorganisation interne de sa structure. Plus précisément, le béton se comporte comme un matériau viscoélastique. La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente (différée) qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le fluage. Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de fluage sont effectués et au bout de six mois, 80%. Enfin, le fluage est pratiquement complet au bout de 3 ans.

D) Durabilité, protection, entretien

La dégradation par des agressions d'origine chimique apparaît quand l'agent a pu pénétrer, les solutions sont donc axées sur la constitution d'une barrière à l'aide de produits bouches pores, oléophobes ou filmogènes.

La protection des ouvrages des agressions d'origine climatique (gel/dégel) se fait en évitant le ruissellement, l'infiltration de l'eau (gouttes d'eau, couvertines...) et les remontées d'eau (revêtement d'étanchéité).

I.2.2 Les aciers :

Leur rôle est de reprendre les efforts de tractions qui ne peuvent pas être repris par le béton. Ils sont caractérisés par leur limite élastique et leur module d'élasticité.

I.2.2-1 Caractéristiques mécaniques

En générales les aciers utilisés sont de deux types :

- ❖ acier à haute adhérence : FeE400
- ❖ treillis soudés formés par l'assemblage des barres tréfilées soudées(FeE520)

Fe étant la limite élastique dans les armatures.

A) Module d'élasticité :

$$E_s = 2.10^5 \text{ [N/mm}^2 = \text{MPa]}$$

B) Protections des armatures :

Dans le but d'avoir un bétonnage correct et prémunir les armatures des effets intempéries et des agents agressifs, on doit veiller à ce que l'enrobage C des armatures soit conforme aux prescriptions suivantes :

C ≥ 5 cm : pour les éléments exposés à la mer, aux embruns ou aux brouillards salins ainsi que pour les éléments exposés aux atmosphères très agressives.

C ≥ 3 cm : pour les éléments situés au contact d'un liquide (réservoir, tuyaux, canalisations).

C ≥ 1 cm : pour les parois situées dans des locaux non exposés aux condensations.

I.2.3 Le bois

Les structures en bois ont fait l'objet d'un nombre plus restreint d'études. Ceci peut s'expliquer en partie par la démarche empirique adoptée par les anciens règlements (CB71, guide du LC) ne permettant pas un raisonnement rigoureux. Pour des structures faisant intervenir de nombreux paramètres (type de panneau, différence d'essence des montants, assemblages). L'arrivée de l'**Eurocode 5[8]** et l'apparition des méthodes semi-probabilistes pour l'étude des structures en bois ont permis de développer des démarches plus rigoureuses pour l'étude des différents éléments des structures en bois et ainsi améliorer de manière significative les connaissances sur le matériau pour son utilisation en structure.

Le bois est une ressource naturelle qui est largement disponible dans le monde et il possède plusieurs avantages environnementaux et structuraux.

Du côté environnemental, le bois est d'abord un lieu de fixation du dioxyde de carbone à travers un processus biologique de stockage de matière ligno-cellulosique au sein de l'arbre. Pendant la croissance d'un arbre, 1 tonne du bois absorbe 1,6 tonne de gaz carbonique, émet 1,1 tonne d'oxygène et fixe 0,5 tonne de carbone. En termes d'analyse du cycle de vie (ACV), plusieurs facteurs en faveur du bois ont été constatés :

- Le bois est un matériau renouvelable ;
- Le bois est un matériau durable à condition d'une bonne conception et d'un bon entretien ;
- Le bois permet de diminuer l'impact climatique des structures.

Du côté structural, le bois présente un net avantage par rapport aux autres matériaux [9] lorsque l'on considère le rapport entre performances mécaniques et densité (Fig I-8). En outre, avec l'apparition des matériaux dérivés du bois comme les lamellés collés, les contrecollés, les panneaux, il est possible de construire des ouvrages dont l'esthétique, la légèreté et la durabilité sont assurés.



	Acier S355	Béton B30	Bois lamellé collé GL28
Propriétés de résistance (MPa)			
Flexion	270	18	12,3
Traction axiale	270	2,4	8,6
Traction perpendiculaire	270	2,4	0,2
Compression axiale	270	18	12,3
Compression perpendiculaire	270	18	2,4
Cisaillement	213	1,8	1,3
Propriétés de rigidité (MPa)			
Module axial moyen	210 000	11 500	12 600
Module transversal moyen	210 000	11 500	1 020
Module de cisaillement moyen	8 100	4 800	790

Fig I-8 : Comparaison des caractéristiques des matériaux bois, acier et béton armé [6]

I.2.3-1 Son origine est l'arbre

Par son origine végétale, le bois est un matériau hétérogène, dont les caractéristiques dépendent des essences, voire de l'arbre dont il est issu.

On distingue deux grands groupes d'arbres :

- Les conifères, appelés aussi résineux, sont les plus anciens dans l'évolution, leur structure est plus simple.
- Les feuillus, plus récents et de structure plus complexe.

En Europe on trouve les conifères suivants : [10]

- **L'épicéa** (92%), appelé aussi sapin blanc.
- **Le sapin de Douglas**, ou simplement Douglas, ou Oregon pine en anglais, originaire d'Amérique du Nord. Les premiers sujets plantés dans ces régions atteignent aujourd'hui 50 mètres. Produit un bois très dur, lourd et durable. Sa production est en augmentation en Wallonie, à cause de la qualité du bois qu'il produit et parce qu'il pousse très vite quand il est jeune (1 m par an).
- **Le pin sylvestre**, appelé aussi sapin rouge. Cette essence ne produit pas un bois de qualité intrinsèquement meilleure que l'épicéa mais, provenant souvent du Nord de l'Europe, son exploitation est organisée de manière telle qu'il arrive sur le marché à un taux d'humidité bien contrôlé, inférieur à 18%, ce qui le fait préférer pour la construction.
- **Le mélèze** (2%), bois très dense, de couleur rouge saumon, qui pousse deux fois plus vite que l'épicéa.



Fig I-9: Epicéa



Fig I-10 : Pin de douglas



Fig I-11 : Pin sylvestre



Fig I-12 : Mélèze d'Europe

I.2.3-2 Une structure alvéolaire :

La structure alvéolaire du bois (Fig I-13) lui confère un caractère :

-hétérogène

-anisotrope (considéré comme orthotrope) : Le matériau bois est défini à partir des trois directions naturelles de croissance [6]. Ces trois directions sont considérées comme orthogonales entre elles, ce qui explique qu'on parle parfois d'orthotropie cylindrique du bois.

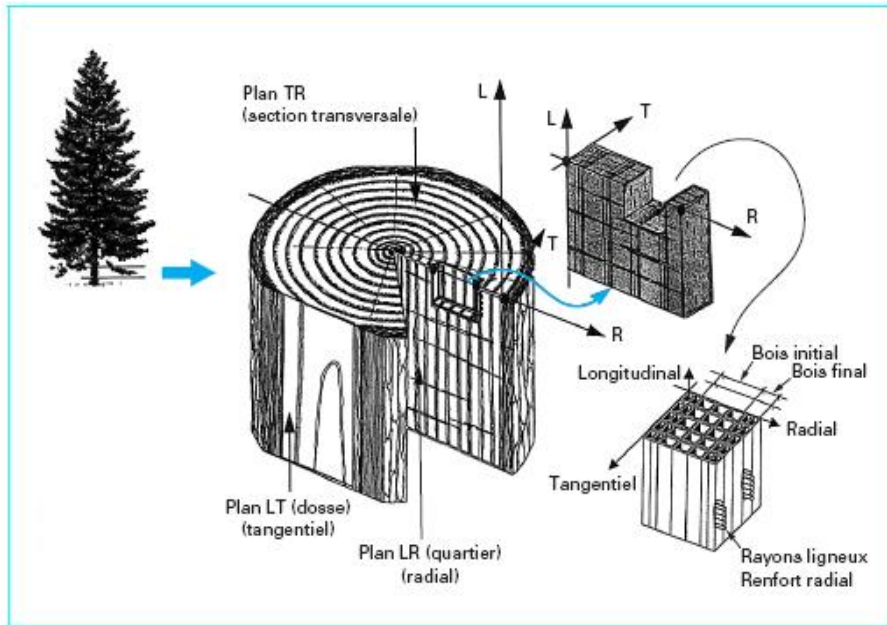


Fig I-13.a: Caractéristiques d'anisotropie du bois

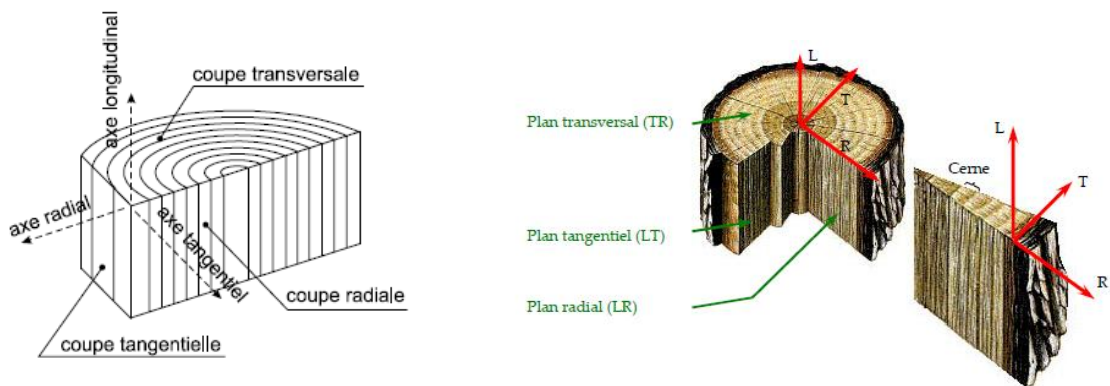


Fig I-13.b : Coupes et axes dans un tronc [10] et [11]

Finalement nous avons : 3 axes principaux donc 3 modules d'élasticité E , 3 modules de cisaillement G , 6 coefficients de poisson ν .

Caractéristique	Feuillus	Résineux
Module longitudinal (MPa)	14400	13100
Module radial (MPa)	1810	1000
Module tangentiel (MPa)	1030	636

Fig I-14.a : Comparaison entre les modules d'élasticité du bois dans ses trois directions d'orthotropie [11]

Constantes	Epicéa (1) (<i>pieca sitchensis</i>)	Douglas (1) (<i>pseudotsuga menziesii</i>)	Sapin (1) (<i>abies</i>)	Peuplier (2) (<i>populus alba</i>)	Chêne rouge (2) (<i>quercus rubra</i>)	Hêtre (2) (<i>fagus silvatica</i>)
Teneur en eau [%]	12	12	13	14	12	11
Densité [g/cm ³]	0,36	0,59	0,31	0,4	0,6	0,74
E_t [N/mm ²]	10700	16550	8020	6830	14800	14000
E_r [N/mm ²]	649	1300	816	1190	1500	2280
E_t [N/mm ²]	348	900	304	493	828	1160
G_{rt} [N/mm ²]	533	1200	558	1000	967	1640
G_{rt} [N/mm ²]	41	80	48	200	398	470
G_{rt} [N/mm ²]	438	929	461	900	695	1080
ν_{rt}	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,07
ν_{rr}	0,3	0,41	0,25	0,37	0,33	0,36
ν_{tt}	0,4	0,38	0,33	0,45	0,69	0,52

Fig I-14. b: Caractéristiques élastiques de certains bois résineux (1) et feuillus (2) de Navi et al, 2005 [9]

I.2.3-3 Constitution du bois

Au niveau microscopique, **le bois est formé d'un tissu poreux**. En fait, il est constitué en grande partie d'air. C'est ce qui lui donne une faible conductivité thermique et lui confère la faculté d'absorber ou de rejeter de l'humidité vers l'atmosphère dans laquelle il baigne.

Ce tissu est constitué de substances et de cavités cellulaires s'orientant de manière à former des fibres. Les fibres constituent environ 50 % du matériau. Elles sont constituées de cellulose, très hydrophile. La matrice enserrant et "collant" ces fibres est constituée en parts égales d'hémicellulose et de lignine. L'hémicellulose est un sucre et c'est lui qui attire la plupart des insectes (seules les termites peuvent digérer la cellulose).

A) La macrostructure du bois

Le bois possède une structure cellulaire orientée principalement selon la direction de l'axe de l'arbre. La croissance de l'arbre d'une manière circulaire par la formation de cellules allongées reflète la nature anisotrope du bois. On distingue trois directions privilégiées (Fig I-13):

- Une longitudinale **L**, suivant l'axe de l'arbre ;
- Une radiale **R**, perpendiculaire aux cernes de croissance ;
- Une tangentielle **T**, perpendiculaire aux deux précédentes directions.

L'échelle d'observation macroscopique ne fait intervenir que des volumes élémentaires suffisamment grands par rapport à la microstructure cellulaire, ce qui permet de formuler l'hypothèse de continuité du milieu. La caractérisation physique de ce matériau est rendue difficile par la présence d'irrégularités locales et d'une hétérogénéité induite par les différentes phases de croissance.

B) La microstructure

A cette échelle, le bois est assimilé à un squelette polymérique composé de cellules constituant des fibres. Les cellules longitudinales, appelées trachéides, constituent 90% de la structure cellulaire. L'épaisseur de leurs parois cellulaires change en fonction de la période de croissance, mais le rapport longueur-épaisseur reste assez important de l'ordre de 1/100.

D'autres types de cellules appelées parenchymes ou rayons ligneux sont disposées transversalement. L'arrangement des cellules ménage une grande portion de vides plus ou moins remplis d'eau, ce qui

explique la porosité élevée du bois. Cet aspect se traduit par la densité du matériau qui constitue un facteur déterminant au niveau de ses caractéristiques mécaniques et thermo-hydriques.

C) Ultrastructure et composition chimique

L'observation à l'échelle du micron permet une description détaillée des différentes couches de la paroi cellulaire et intercellulaire. La paroi cellulaire est composée d'une paroi primaire entourée par la lamelle mitoyenne et d'une paroi secondaire interne composée de trois couches *S1*, *S2*, et *S3* (Fig I-15). La couche *S2* est la plus épaisse. Elle peut atteindre 85% de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire. Les principales composantes chimiques de la paroi cellulaire sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Les chaînes de molécules cellulosiques, entourées d'hémicellulose et incrustées dans la lignine, constituent des microfibrilles en forme de spirales croisées. Les microfibrilles sont les unités structurales de la paroi cellulaire. Dans les couches *S1* et *S3*, l'angle d'inclinaison de ces microfibrilles varie entre 50° et 90° par rapport à l'axe de la cellule, alors que dans la couche *S2*, l'inclinaison est inférieure à 30°. L'importante épaisseur de la couche *S2* et la faible inclinaison de ses microfibrilles reflètent son rôle déterminant dans la réponse mécanique du bois.

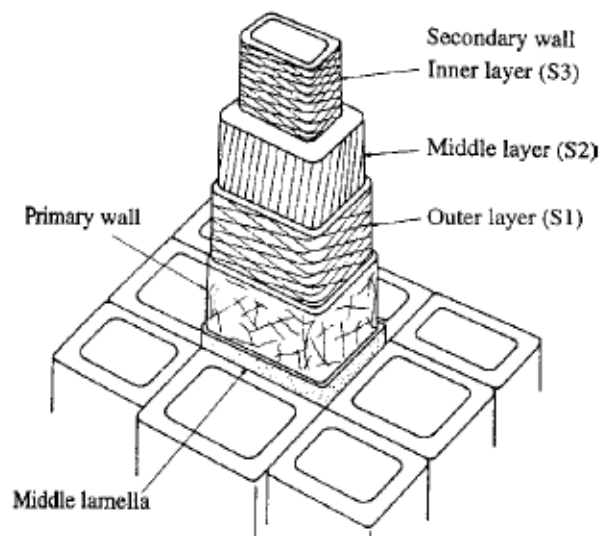


Fig I-15 : Schématisation de la paroi cellulaire de trachéide, d'après Dinwoodie1981 [12]

Les travaux expérimentaux menés par Cowdrey et Preston (1966) montrent que la rigidité d'un bois initial en épicéa augmente de 6 fois quand l'angle d'inclinaison des microfibrilles passe de 40° à 10°. Walker et Butterfield (1996) retrouvent cette même constatation avec du bois initial en pin. D'autre part, plusieurs travaux (Harris et Meylan 1965) soulignent l'impact de la structure anatomique et de l'orientation des microfibrilles sur les phénomènes d'hygroexpansion.

D) Hygroscopicité du bois

La température et l'humidité de l'air modifient la structure hygroscopique du bois entraînant ainsi des phénomènes de retrait-gonflement dont les ordres de grandeurs varient selon la direction :

Retrait T fort : ~ 10%

Retrait L : ~ 0%

Retrait R : ~ 5%

Le bois a tendance à se stabiliser à une humidité d'équilibre, dite équilibre hygroscopique. Sous climat tempéré, les taux d'humidité d'équilibre sont :

- pour les bois en extérieur : 13 % en été, 19% en hiver
- pour les bois en intérieur : 12-13% en été, 7% en hiver

Il est donc indispensable de sécher le bois avant usinage et utilisation en construction mais aussi de réaliser la mise en œuvre au plus près de son humidité d'équilibre.

- pour les bois en extérieur : Il convient donc que son taux d'humidité de mise en œuvre soit d'environ 15-16%
- pour les bois en intérieur : Il convient donc que son taux d'humidité de mise en œuvre soit d'environ 10%.

Le séchage peut être naturel ou artificiel. Il faut, dans les deux cas, veiller à ce que la vitesse d'évaporation de l'eau ne soit pas trop élevée.

L'hygroscopie joue un rôle important sur les performances mécaniques du bois. Des essais sur petites éprouvettes et pour différentes essences de bois ont permis d'observer l'évolution du module d'élasticité (Fig.I-16(a)) et de la résistance à la rupture (Fig. I-16(b)).

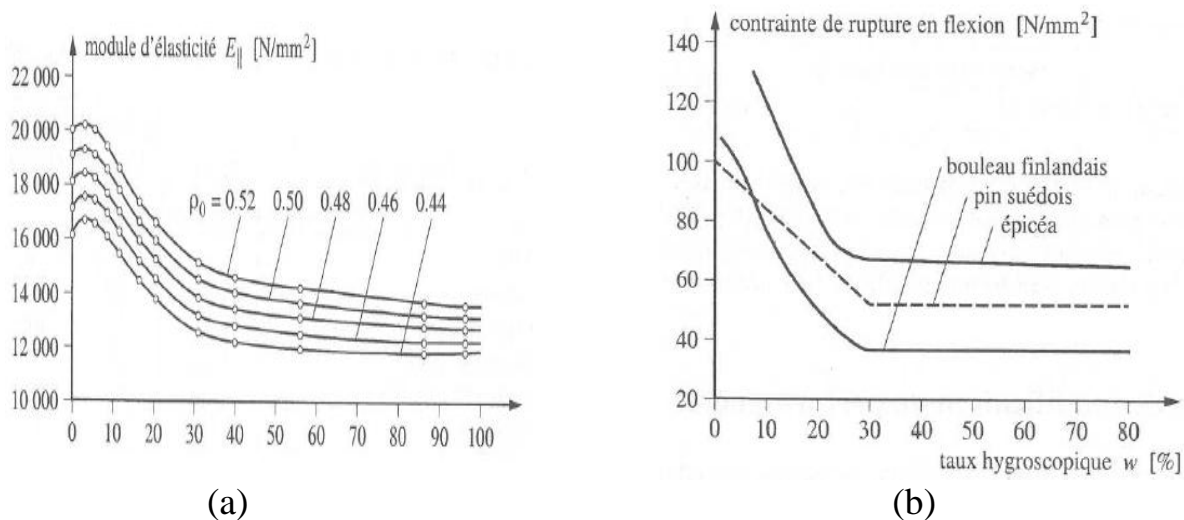


Fig I-16 : L'influence d'hygroscopie d'après Natterer et al. 2000 [9]

I.2.3-4 Classement

Le bois est un matériau naturel. Il existe donc une très grande variabilité qui nécessite un classement. Cette variabilité est visible à plusieurs niveaux :

- entre différents arbres
- entre différentes essences de bois (variabilité interspécifique)
- au sein d'une même essence (variabilité intra-spécifique)

Les bois de structure sont répartis en classe de résistance :

- C : les résineux et le peuplier
- D : les feuillus
- GL : le lamellé collé
 - GL ()h pour bois lamellé collé homogène
 - GL ()c pour bois lamellé collé panaché

Le nombre qui suit la classe de résistance indique la résistance caractéristique en flexion (en MPa) et on a, en général :

- C18 : charpente traditionnelle
- C24 : fermettes industrialisées, lamellé collé normal
- C30 : (haute résistance), lamellé collé extrêmement trié et de haute technicité

➤ Le classement visuel :

Le classement est basé sur un examen visuel des pièces. Les observations portent essentiellement sur l'un ou l'autre des paramètres suivants, le plus souvent en combinaison: les nœuds (nombre,

diamètre, parfois position), la pente du fil, les fentes, le bois de réaction, les attaques d'insectes ou de champignons, les déformations géométriques, les endommagements mécaniques et la largeur des cernes d'accroissement, (voir Fig I-17), des cernes plus serrés étant signe d'une densité, et donc d'une résistance, plus élevée. Du fait que ces méthodes ont été développées séparément un peu partout dans le monde, chacune en fonction des besoins locaux, il existe une grande diversité de méthodes, de nombres de classes et de limites de classe.



Fig I-17 : Différences de largeur de cerne

Les avantages de ce type de classement sont sa rapidité, environ de 2 à 4 secondes par pièce en scierie, et un investissement nul. De plus, dans une structure existante, il est toujours possible d'estimer la résistance sur base d'appréciations visuelles.

Au niveau des inconvénients, il faut bien constater que ces méthodes ne sont pas très discriminantes, car elles se basent sur un nombre limité de caractéristiques et n'ont pas accès à des grandeurs qui sont fortement corrélées à la résistance, ni très objectives, car chaque décision de classement revient à un individu.

I.2.3-5 Propriétés physiques

A) Conductivité thermique :

Le bois, matériau cellulosique est un faible conducteur thermique étant donné qu'il dispose de très peu d'éléments libres et qu'il est très poreux. Il est donc souvent utilisé comme matériau d'isolation ou coupe feu, avec les produits dérivés du bois.

Cependant, la conductivité thermique est plus élevée selon l'axe longitudinal étant donné la continuité de matière et plus faible sur les axes transversaux étant donné la porosité. Enfin, elle est proportionnelle à la densité du bois et à son taux hygroscopique. Ex :

Pour la chêne : 0,21 W/mK

Pour le hêtre : 0,17 W/mK

Pour le sapin, l'épicéa : parallèle aux fibres, 0,24 W/mK

et perpendiculaire aux fibres : 0,15 W/mK

B) Propriétés acoustiques :

Le bois étant lui-même un matériau de base pour de nombreux produits d'insonorisation, les constructions en bois ont en général un bon comportement acoustique. Pour les sons aériens, l'amélioration peut être apportée par une paroi en plaques de bois aggloméré. Ex :

Pour 10 mm : Isolement 18dB

Pour 30 mm : Isolement 25dB

Pour limiter les bruits d'impact, des solutions simples intervenant sur le revêtement du sol, existent. Ex : linoleum de liège 3,5mm : amélioration 15dB

C) Comportement au feu :

La dilatation thermique ne joue aucun rôle dans le comportement du bois au feu.

La résistance au feu correspond au temps pendant lequel le bois peut jouer son rôle de structure.

Les constructions en bois font preuve d'une bien meilleure résistance au feu que celle à laquelle nous pourrions nous attendre de la part d'un matériau combustible.

Le principe fondamental de cette grande résistance au feu, sur lequel repose la mise en équation du phénomène, est le fait que la combustion périphérique de l'extérieur vers l'intérieur d'une section de bois, c'est à dire sa destruction, se réalise à vitesse assez faible et quasi constante : 0,6 à 0,7 mm par minute, soit environ 1 cm par quart d'heure et par face.

Les causes essentielles en sont la faible conductivité thermique du bois et la protection supplémentaire contre la chaleur apportée par la couche périphérique de charbon de bois, très isolant, qui se forme et se développe pendant tout le processus de combustion

Ces propriétés permettent au noyau de bois encore intact de rester à des températures si faibles que sa résistance ne s'en trouve en rien altérée.

Exemple :

Poutre lamellé-collé de 16 cm de large et de 40 cm de haut. Etat de la section transversale :

Avant le début de l'essai

Température ambiante



Après 30 mn

880°C



Après 60 mn

1000°C



Enfin en cas d'incendie, la couche de béton empêche la propagation du feu et elle est étanche à l'eau d'extinction.

Des études ont été portées sur le comportement de ce matériau vis-à-vis du feu pour estimer sa résistivité pour des épaisseurs différentes du bois tel été les travaux de [13].

I.2.3-6 Propriétés mécaniques

La résistance mécanique du bois dépend des paramètres suivants :

- Son essence

- Direction de sollicitation par rapport aux fibres (anisotropie)
- Humidité (hygroscopie)
- Mode de sollicitation (traction, compression, . . .).

A) Résistance à la compression

Comme pour toutes les propriétés mécaniques, la dispersion des résultats obtenus est importante (30 à 40%), même entre échantillons d'un même lot. Cela s'explique par le fait que les différentes couches de bois ont été formées à des années d'écart, dans des conditions climatiques différentes. L'influence des défauts locaux, comme les nœuds, joue également un rôle important.

Les résistances mécaniques sont maximums pour les bois anhydres. Quand l'humidité croît, elles diminuent linéairement jusqu'au point de saturation à raison de 4% par pour-cent d'humidité pour la compression. C'est pourquoi les résistances caractéristiques sont toujours données pour une valeur de référence du degré d'humidité, soit 15% ou, suivant l'**Eurocode 5 [8]**, l'humidité d'équilibre obtenue pour une température de 20°C et une humidité relative de l'air de 65%.

La résistance à la compression est très différente suivant qu'il s'agira de compression parallèle ou perpendiculaire aux fibres. Le mode de ruine est d'ailleurs fondamentalement différent : écrasement des fibres si l'effort leur est perpendiculaire, décollement des fibres puis flambement individuel de celles-ci si l'effort leur est parallèle.

B) Résistance à la traction

La résistance ultime en traction axiale du bois parfait vaut 2 à 3 fois la résistance en compression dans le sens des fibres car celles-ci ne tendent ni à s'écarter ni à flamber individuellement. En pratique, cependant, il est difficile de tirer parti de la pleine résistance en traction, à cause des défauts locaux et des difficultés d'assemblage.

La résistance à la traction transversale est une des rares propriétés mécaniques qui n'est pas liée à la densité du matériau car elle ne dépend pas de la qualité des fibres. La rupture se produit par décollement entre fibres ce qui la rapproche plus d'une rupture par clivage. Sa valeur ne vaut guère plus de 5% de la résistance à la compression.

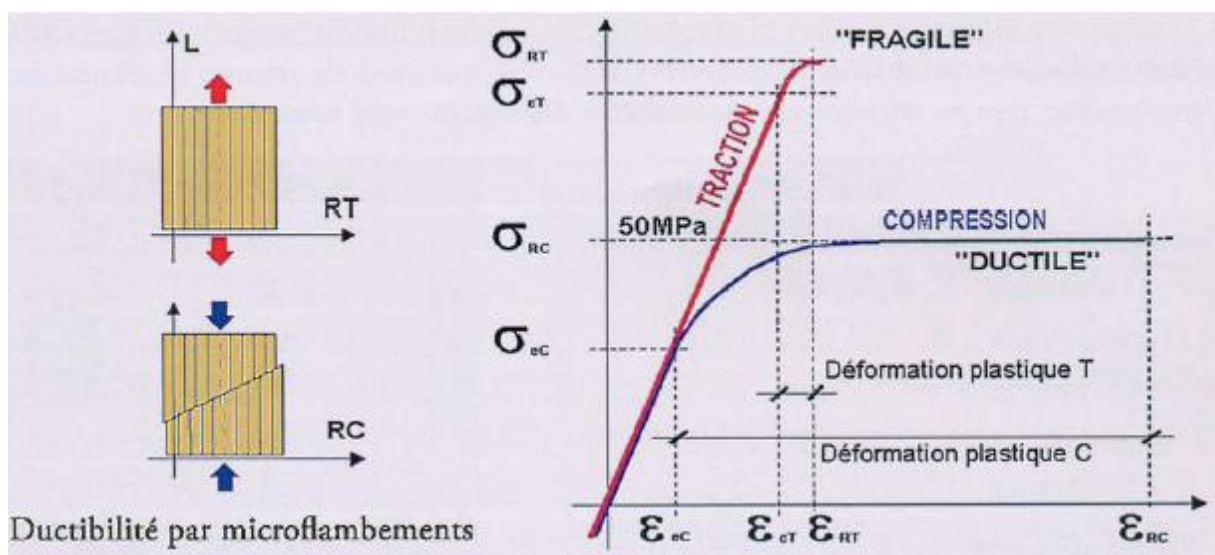


Fig1-18-a : Lois typique de comportement du bois de Setra, 2006 [9]

C) Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement a une grande importance pratique pour l'étude des assemblages et de la résistance à l'effort tranchant des pièces fléchies. Elle varie largement avec la direction de l'effort par rapport aux fibres mais, en pratique, on ne considère que le cisaillement longitudinal qui est susceptible d'amener la rupture par fendage parallèlement aux fibres. Le principe de réciprocité des contraintes tangentielles indique que ces plans sont les plus critiques. Elle vaut environ 10% de la résistance à la compression.

D) Résistance aux chocs

En général très bonne, sauf pour les espèces très résineuses qu'il faut éviter, entre autres, pour des planchers de service et des passerelles où peuvent circuler des ouvriers.

E) Coefficients d'élasticité

A cause de l'anisotropie, il faut distinguer différents modules d'élasticité et différents coefficients de Poisson. On peut retenir comme ordre de grandeur

- 12 000 MPa pour le module longitudinal
- 1 200 MPa pour le module radial
- 6 000 MPa pour le module tangentiel
- $\nu_{90,0} = 0.45$ à 0.50
- $\nu_{0,90} = 0.02$ à 0.08

Les deux dernières lignes relatives au coefficient de Poisson traduisent le fait qu'une compression longitudinale entraîne un fort gonflement latéral (presque incompressible, $\nu = 0.50$) tandis qu'une compression transversale n'a que peu d'influence sur l'allongement longitudinal.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_l \\ \epsilon_r \\ \epsilon_t \\ \gamma_{rt} \\ \gamma_{lt} \\ \gamma_{lr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_l} & -\frac{\nu_{rl}}{E_r} & -\frac{\nu_{tl}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_l} & \frac{1}{E_r} & -\frac{\nu_{tr}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_l} & -\frac{\nu_{rt}}{E_r} & \frac{1}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{rt}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{lt}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_l \\ \sigma_r \\ \sigma_t \\ \tau_{rt} \\ \tau_{lt} \\ \tau_{lr} \end{bmatrix}$$

Fig I-18b : La loi de Hooke généralisée aux trois axes (r; t; l) [9]

Ou :

- ϵ_l, ϵ_r et ϵ_t : sont les déformations selon les trois axes.
- γ_{rt}, γ_{lt} et γ_{lr} : sont les distorsions selon les trois plans.
- E_r, E_t et E_l : sont les modules de Young selon les trois axes.
- G_{rt}, G_{lt} et G_{lr} : sont les modules de cisaillement selon les trois plans.
- $\nu_{rl}, \nu_{lr}, \nu_{rt}, \nu_{tr}, \nu_{tl}$ et ν_{lt} : sont les coefficients de poisson.
- σ_l, σ_r et σ_t : sont les contraintes normales selon les trois axes.
- τ_{rt}, τ_{lt} et τ_{lr} : sont les contraintes de cisaillement selon les trois plans

Pour un matériau orthotrope, la matrice de souplesse est symétrique, c'est-à-dire :

$$\frac{\nu_{rt}}{E_r} = \frac{\nu_{tr}}{E_t} \quad , \quad \frac{\nu_{rl}}{E_r} = \frac{\nu_{lr}}{E_l} \quad \text{et} \quad \frac{\nu_{tl}}{E_t} = \frac{\nu_{lt}}{E_l}$$

Donc, les propriétés élastiques de chaque essence du bois sont totalement définies par 9 paramètres E_r , E_t , E_b , G_{rl} , G_{lt} , G_{rb} , ν_{rl} , ν_{tr} , et ν_{tl} . Il faut noter que ces caractéristiques sont fonction de la teneur en eau et de la densité du bois et sont différentes pour chaque essence. La (Fig I-118-c) donne les valeurs indicatives des constantes élastiques de certaines essences.

Module	Valeur des modules (MPa) en fonction de la densité d	
	Feuillus à $H = 12\%$ $0,1 < d < 1,2$ (1)	Résineux à $H = 12\%$ $0,3 < d < 0,6$ (1)
E_L	$= 14\,400 (d / 0,65)^{1,03}$	$= 13\,100 + 41\,700 (d - 0,45)$
E_R	$= 1\,810 (d / 0,65)^{1,3}$	$= 1\,000 + 2\,370 (d - 0,45)$
E_T	$= 1\,030 (d / 0,65)^{1,74}$	$= 636 + 1\,910 (d - 0,45)$
G_{TL}	$= 971 (d / 0,65)^{1,26}$	$= 745 + 989 (d - 0,45)$
G_{LR}	$= 1\,260 (d / 0,65)^{1,14}$	$= 861 + 2\,080 (d - 0,45)$
G_{RT}	$= 366 (d / 0,65)^{1,74}$	$= 83,6 + 228 (d - 0,45)$

(1) Plage de validité des modèles.

Fig I-18-c : Effets de la densité sur les propriétés mécaniques du bois [6]

F) Résistance aux agressions chimiques

Elle est bonne, en tout cas meilleure que celle du béton et, surtout, que celle de l'acier. Attention au contact bois métal qui donne lieu à des taches de coloration pour certaines essences, le chêne notamment. Il faut alors galvaniser les pièces d'assemblage à chaud, voire utiliser de l'acier inoxydable.

I.2.3-7 Phénomènes physiques

A) L'eau dans le bois

L'eau existe dans le bois sous trois formes (Kollmann et Côté 1984 ; Siau 1971):

- L'eau de constitution faisant partie de la composition moléculaire du matériau
- L'eau liée adsorbée par les chaînes celluliques de la paroi cellulaire
- L'eau libre retenue dans les cavités cellulaires par des forces capillaires

La teneur en eau w du bois base sèche est définie par le poids de l'eau contenue dans un échantillon représentatif divisé par son poids à l'état anhydre. La quantité d'eau maximale adsorbée par les parois cellulaires définit le point de saturation des fibres, ce qui correspond à une teneur en eau aux alentours de 30% [12].

$$W = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse de matière anhydre}} \quad (\text{en } \%)$$

Lors du séchage du bois, l'eau libre disparaît des cavités cellulaires jusqu'à ce que la limite de saturation des fibres de bois soit atteinte. Au dessous de cette limite, l'équilibre hydrique s'établit en fonction de l'humidité relative et de la température de l'air.

B) L'humidité relative

Cette propriété mérite d'être citée en premier lieu car presque toutes les autres propriétés en dépendent. C'est pourquoi il est essentiel de rapporter ces propriétés à un degré d'humidité de

référence, par exemple 15% souvent retenu anciennement. L'**Eurocode 5 [8]** considère en fait comme situation de référence l'état d'équilibre atteint à une température de 20°C et une humidité relative de l'air de 65%, ce qui correspondrait plutôt à une humidité du bois de 12%.

-Il ne faut pas confondre l'humidité relative du bois, appelée parfois simplement "humidité", avec son humidité d'équilibre qui est l'humidité à laquelle le bois ne perd ni ne reprend d'eau à l'air ambiant. L'humidité d'équilibre du bois dépend bien entendu de l'humidité relative et de la température de l'air.

Il est important de savoir quelle est l'humidité du bois avant sa mise en œuvre par rapport à ce que pourra être son humidité d'équilibre, état vers lequel il va tendre progressivement. Il existe des appareils permettant de mesurer l'humidité du bois sur chantier sur base de la résistivité électrique du bois. Ces appareils donnent des valeurs moins précises que les mesures en laboratoire. On ne saurait cependant trop insister sur l'importance fondamentale de cet outil pour l'architecte. Son utilisation permet un contrôle de l'humidité, c'est-à-dire un contrôle de la qualité du matériau, qui peut éviter des désagréments importants. Au-delà des valeurs quantitatives qu'elle fournit, l'utilisation de cet appareil signifie que l'architecte garde bien à l'esprit toute la problématique de l'humidité dans le bois.

C) Retrait

Les dimensions du bois varient en fonction de son humidité. On peut observer un retrait ou un gonflement suivant le sens de la variation d'humidité. Les bois denses et durs ont généralement un retrait plus fort que les bois légers et tendres.

L'anisotropie se manifeste fortement dans le phénomène de retrait : les variations de longueur sont beaucoup plus faibles dans le sens des fibres que dans les deux autres sens et le retrait tangentiel est de l'ordre du double ou du triple du retrait radial.

On peut retenir les valeurs suivantes comme coefficient de retrait linéaire par pour-cent d'humidité du bois :

Sens axial 1×10^{-4}

Sens radial 20×10^{-4}

Sens tangentiel $40 \text{ à } 60 \times 10^{-4}$

On note toutefois que les dimensions ne varient plus lorsque l'humidité du bois atteint et dépasse 30% parce que, au-delà, l'eau additionnelle ne s'intègre plus aux parois des cellules mais remplit simplement les cavités disponibles.

On peut ainsi calculer que si des planches de 2 mètres de long et de 9 cm de large sont livrées avec un taux d'humidité supérieur de 5% du poids sec à ce que sera son humidité d'équilibre, chaque planche va se raccourcir de 1 mm mais, plus important, sa largeur peut diminuer de 2 mm si elle a été sciée sur dosse. C'est ce qui explique que les planchers en bois sont en général posés initialement avec le minimum de clous, puis resserrés et cloués définitivement après une période de 1 à 2 ans pendant laquelle le matériau a pu évoluer vers son humidité d'équilibre.

A l'inverse, des éléments de parquet trop bien séchés et mis en place dans un local assez humide peuvent avoir tendance à se dilater, ce qui peut générer des efforts suffisants pour cisailer les maçonneries contre lesquelles ils viennent en butée.

Les déformations transversales du bois peuvent évidemment jouer un rôle fondamental dans le comportement de certains assemblages et il y a lieu d'en tenir compte.

La différence de retrait entre sens radial et sens transversal explique pourquoi les planches sciées sur dosse peuvent se déformer plus que les planches sciées sur quartier, voir Fig I-19.

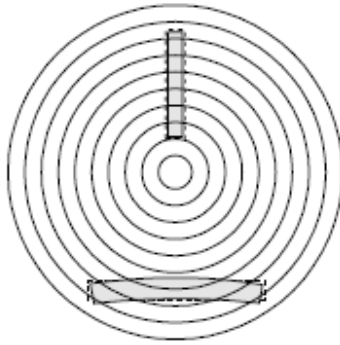


Fig I-19 : Déformations de retrait des planches

Cette différence est aussi à l'origine des importantes fissures longitudinales que l'on observe dans les bois ronds et dans les poutres massives, voir Fig I-20



Fig I-20 : Fissures radiales de retrait

D) Dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique du bois est de l'ordre de 5×10^{-6} dans le sens axial et de 50×10^{-6} perpendiculairement aux fibres. Pour une variation de température de 20°C , on obtient une variation relative de longueur de 1×10^{-4} et une variation transversale de 10×10^{-4} , valeurs qui seraient obtenues ou même dépassées pour une variation d'humidité de 1%. Comme, en plus, les variations thermiques sont généralement de sens contraire au retrait, on n'en tient habituellement pas compte. Lorsque le bois est combiné à d'autres matériaux pour former des éléments mixtes, bois – acier par exemple, il peut alors devenir nécessaire de tenir compte des coefficients de dilatation thermique différents.

E) Masse volumique

La masse volumique réelle du matériau bois (c'est-à-dire des parois cellulaires) est pratiquement la même pour toutes les espèces et vaut environ $1\,500\text{ kg/m}^3$. Cependant, la masse volumique apparente varie fortement d'une espèce à l'autre, depuis moins de 200 kg/m^3 pour le balsa jusqu'à plus de $1\,000\text{ kg/m}^3$

kg/m³ pour l'ébène. Cela explique évidemment la corrélation observée entre la masse volumique et les propriétés mécaniques.

Les résineux les plus employés dans la construction ont une masse volumique comprise entre 400 et 550 kg/m³, tandis que les feuillus sont un peu plus lourds, entre 600 et 700 kg/m³. Cela reste malgré tout très léger comparé au béton armé, 2 500 kg/m³, ou à l'acier, 7 850 kg/m³. Le tableau I-2 reprend quelques valeurs moyennes pour certaines espèces importantes.

Espèce	Masse volumique
	Kg/m³
Epicéa	450
Pin sylvestre	550
Chêne	750

Tableau I-2 : Quelques valeurs caractéristiques [10]

La masse volumique varie, au sein d'une même espèce, d'un lot à l'autre, ce qui constitue un moyen efficace de contrôle non destructif puisque les caractéristiques de résistance sont meilleures lorsque la masse volumique est plus importante.

La masse volumique varie également, au sein d'un même lot, avec l'humidité relative.

I.2.4 Bois de construction

I. 2.4-1 Le bois rond

La forme la plus simple du bois dans la construction est le bois rond. Il est constitué directement à partir de troncs ou de branches rectilignes dont on a enlevé l'écorce et que l'on a façonnés pour obtenir une forme cylindrique. Il revêt une certaine importance économique pour le producteur qui y trouve une manière de valoriser les bois d'éclaircie, de section trop faible pour être débités en bois scié.

Le bois rond est utilisé dans un grand nombre de structures très diverses, surtout extérieures : les poteaux téléphoniques ou électriques, les jeux d'enfants, les murs antibruit ou de soutènement, les ponts et les tours. Des habitations en rondins et madriers constituaient le type de construction traditionnelle à certaines époques.

Le bois rond est celui qui requiert le moins d'opération mécanique pour son élaboration. Comme un nombre minimum de fibres sont coupées lors du façonnage, il présente moins de variabilité dans ses propriétés de résistance. La forme circulaire convient particulièrement bien pour la reprise des sollicitations axiales. C'est aussi celle qui présente la plus faible surface spécifique exposée aux attaques extérieures.

Cette forme est par contre moins appropriée pour la reprise des efforts de flexion. Les assemblages sont en général plus difficiles qu'avec d'autres formes car on ne dispose pas de surface plane. Le bois rond est particulièrement sensible aux effets de la différence entre retrait tangentiel et retrait radial qui se manifestent sous la forme de fentes longitudinales (voir Fig I-20).

Au prix de quelques opérations assez simples, il est possible d'obtenir un produit un peu plus élaboré. On peut par exemple pratiquer des gorges de décharges qui réduisent l'apparition des fentes longitudinales, (voir Fig I-21).

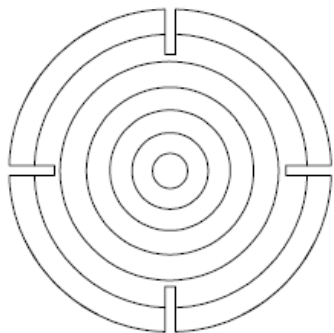


Fig I-21 : Gorges de décharge

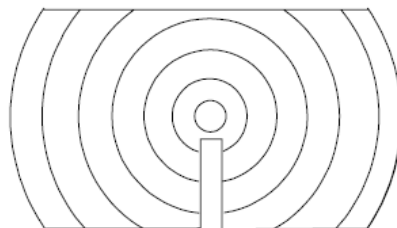


Fig I-22 : Bois rond scié sur deux faces

On peut aussi conserver des bois légèrement coniques en sciant deux faces, voir Fig I-22, ce qui facilite en outre les assemblages.

Des sections plus importantes sciées en bois trois-quarts ronds ou d'un quart ronds se prêtent bien à la constitution de poteaux, voir Figure I-23.

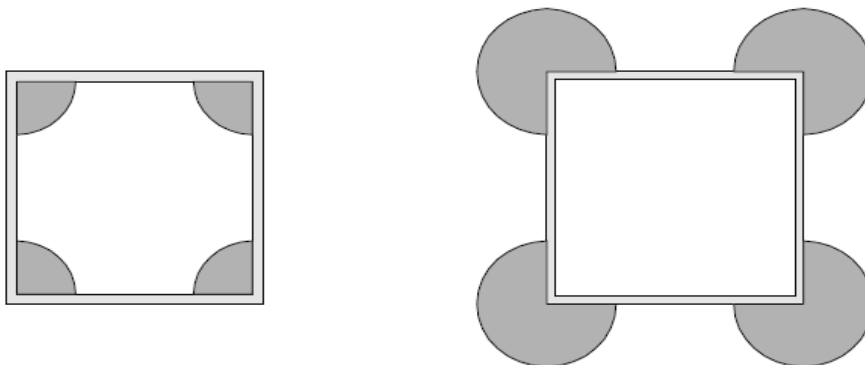


Fig I-23 : Poteaux à base de bois ronds

Les possibilités sont très variées. Des bois ronds sciés à cœur refendu, c'est-à-dire en demi-ronds, se prêtent bien à l'utilisation en tant que moise. Les ronds sciés sur deux faces peuvent constituer un plancher en bois massif lorsqu'ils sont disposés côte à côte. La face supérieure demande cependant une finition supplémentaire. Celle-ci peut être réalisée par une chape de béton, ce qui offre la possibilité de constituer une dalle mixte bois-béton.

I.2.4-2 Le bois scié

La section en bois scié est l'une des plus utilisées en construction bois. Les formes les plus courantes sont carrées, pour servir de poteau, et rectangulaires, pour servir de poutre. Les gorges de décharge permettent l'utilisation de fortes sections comprenant du bois de cœur. A cause de la dimension des grumes* disponibles actuellement, la longueur est en général limitée à quelque 6, grand maximum 8 mètres. Il existe un certain nombre de sections standards disponibles facilement sur le marché. Il est aussi possible de commander des sections particulières, dites "sur liste", mais le coût en est souvent plus élevé et, comme les pièces que l'on reçoit sont fraîchement sciées, elles n'ont que le degré de séchage de la grume dont elles ont été tirées; il n'y a pas eu de séchage complémentaires des pièces sciées.

I.2.4-3 Le bois lamellé collé

Les éléments en bois lamellé-collé, que nous désignerons par BLC, permettent de s'affranchir des limites de dimension imposées par la taille des grumes disponibles. Les dimensions maximales

réalisables sont en fait fonction du transport depuis l'usine vers le site d'utilisation. Des poutres droites de 60 m. de longueur ont déjà été réalisées. La hauteur peut atteindre jusqu'à 2.5 m, et la largeur doit au moins être égale à 1/10 de la hauteur pour ne pas présenter un trop grand risque de déversement. Cette technique présente également le grand avantage de fournir un produit dont la variabilité est plus faible que celle du bois de base qui forme la section reconstituée, grâce à une dispersion et une homogénéisation des défauts locaux.

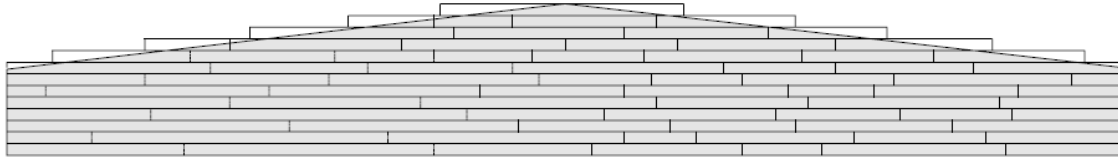


Fig I-24 : Principe d'une poutre en lamellé-collé

I.2.4-4 Les familles de panneaux

La réalisation de panneaux peut-être considérée, dans son principe, comme une extension du BLC. Alors que les éléments en BLC sont linéaires, de type poutre, les panneaux s'étendent sur deux dimensions principales ; ils sont de type plaque. Le principe de la constitution d'éléments de grande dimension à partir d'éléments plus petits est ici poussé encore plus loin car les dimensions des constituants sont de l'ordre du millimètre. Il existe une très grande variété de panneaux par leurs qualités, types, épaisseurs..., ce qui offre un grand nombre de possibilités d'utilisation mais oblige également à faire le bon choix de panneaux en fonction de l'usage particulier.

La stabilité dimensionnelle des panneaux est en général meilleure que celle du bois massif. Certains types de panneaux sont même particulièrement stables. Si l'épaisseur n'est pas trop importante, il est possible de cintrer le panneau pour répondre à certaines contraintes architecturales. La mise en œuvre de panneaux peut se faire par du personnel peu qualifié et permet malgré tout de réaliser rapidement des structures légères et soignées. La souplesse de leur mise en œuvre permet de réorganiser aisément des espaces jugés peu attractifs ou dont on veut modifier l'affectation : division de pièces trop grandes, rabaissement de plafond trop haut, etc. En raison des bonnes caractéristiques thermiques du bois, les panneaux conviennent bien pour les habitations où ils contribuent à réduire les déperditions calorifiques.

La durabilité des panneaux dépend de la durabilité naturelle de l'essence qui forme le matériau de base et il faut veiller à éviter les situations de forte humidité permanente. Pratiquement tous les panneaux ont tendance à absorber l'humidité de manière relativement importante.

I.2.4.4-1 Les contre-plaqués

La division des gros défauts en défauts plus petits est particulièrement bien réalisée dans la fabrication du contre-plaqué. Les billes de bois sont déroulées en placage de 1 à 5 mm d'épaisseur qui sont séchés et dont on empile et colle ensuite plusieurs couches sous pression, en prenant soin d'orienter perpendiculairement le fil du bois d'une couche à l'autre, voir Fig I-25. Le nombre de plis est en général impair. En Belgique, un contre-plaqué qui comporte au moins 5 plis et dont l'épaisseur dépasse 12 mm est appelé multiplis ou *multiplis*. Un panneau à 3 plis est appelé triplex.

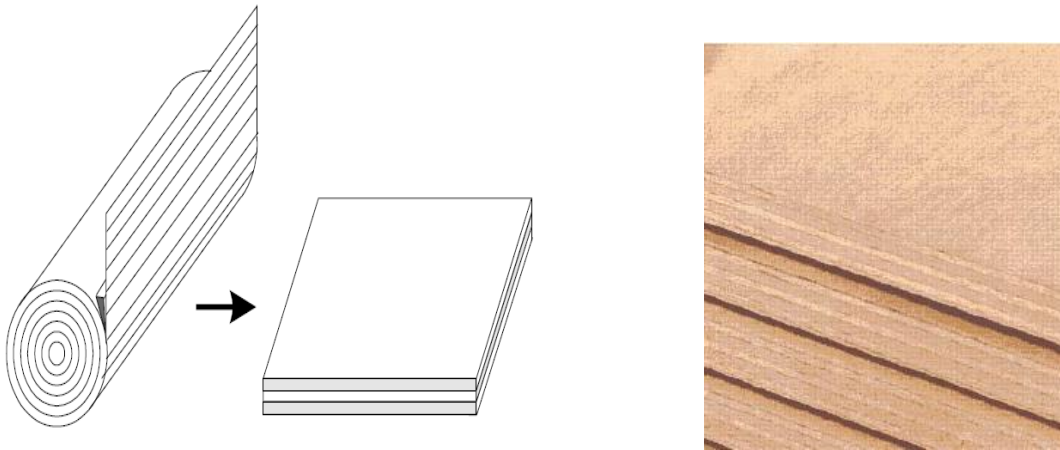


Fig I-25 : Principe de fabrication du contre-plaqué

I.2.4.4-2 Les panneaux de bois lamifiés + parralam

Les panneaux de bois lamifiés, appelés parfois lamibois ou encore LVL, sont constitués suivant un principe assez semblable à celui du contre-plaqué, avec comme différence le fait que les placages sont collés à fils parallèles et qu'ils sont produits dans des dimensions commerciales plus grandes, jusqu'à une vingtaine de mètres. On obtient ainsi des panneaux extrêmement résistants, même si les joints de chaque pli sont simplement posés bout à bout, de manière décalée afin de minimiser la perte de résistance qu'ils occasionnent. Parfois, surtout dans les panneaux de grande largeur, on insère une couche disposée dans l'autre sens pour améliorer la stabilité.

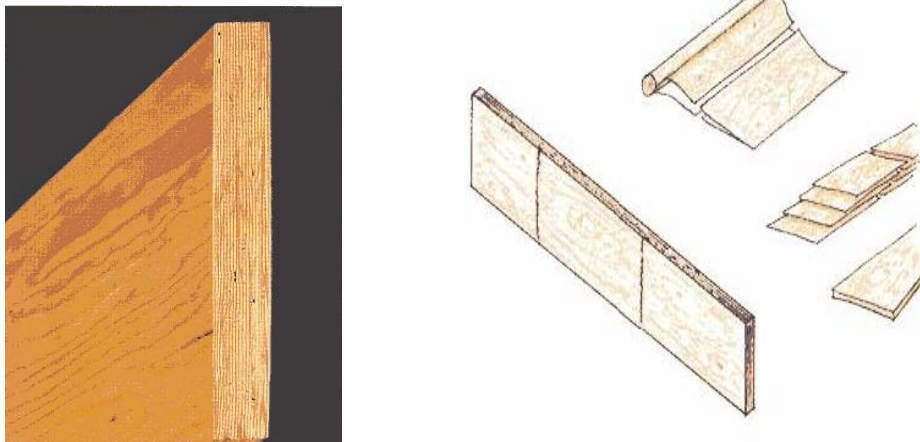


Fig I-26: Principe de fabrication du lamibois

Le Parallam est fabriqué au départ des mêmes éléments que le lamibois, c'est-à-dire des placages minces. On utilise ici les placages obtenus lors des couches externes de la bille de bois qui, à cause de leurs dimensions irrégulières, ne peuvent être utilisés pour le lamibois. Ces placages sont ensuite découpés parallèlement au fil du bois en fines lamelles de 3 mm d'épaisseur et de 2,4 mètre de longueur. Les lamelles, enduites d'un adhésif aux propriétés hydrofuges, sont introduites dans une presse en continu qui sort une section rectangulaire d'environ 30 x 50 cm². Après ponçage, l'élément produit est débité en section plus petites et aux longueurs voulues.

Ce produit présente une capacité de résistance jusqu'à deux fois supérieure à celle du bois d'œuvre ordinaire ainsi qu'une grande stabilité dimensionnelle. Il est utilisé aussi bien comme poutre, comme linteau, que comme poteau. On peut aussi assembler des éléments pour réaliser de grands treillis.

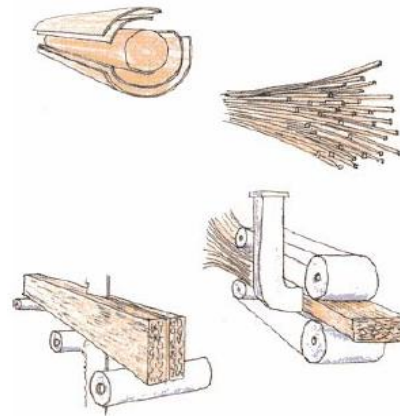
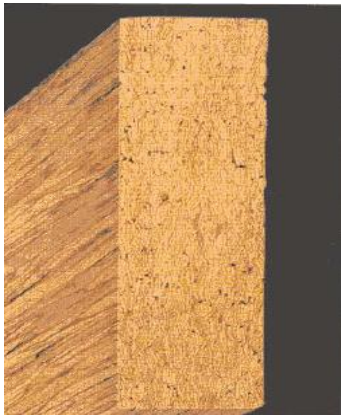


Fig I-27 : Principe de fabrication du parralam

I.2.4.4-3 Les panneaux de fibres et de particules

La logique de décomposition - recombinaison appliquée pour le BLC, avec des lamelles d'environ 50 mm, et pour le contre-plaqué ou le lamibois, avec des placages de quelques millimètres, peut être poussée encore plus loin avec les panneaux de particules ou, encore plus loin, avec les panneaux de fibres. Dans la construction, on les utilise essentiellement en sous-toiture, dans les planchers, comme cloisons, revêtement de plafonds.

La colle utilisée pour la fabrication des panneaux contient en général de la formaldéhyde dont certaines quantités vont se retrouver dans l'atmosphère du fait d'une lente décomposition au cours de la vie de la structure.

Les panneaux les plus connus sont appelés les **OSB** (*Oriented Strand Board*)

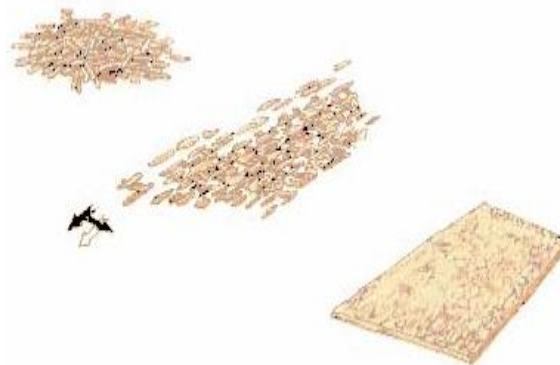


Fig I-28 : Principe de fabrication de l'OSB

I.3 Avantages et inconvénients des planchers mixtes

Tout d'abord, **les avantages** :

Connectée au bois, la dalle en béton confère au système une capacité portante plus importante et une déformation plus faible qu'un plancher bois. Ce système permet ainsi d'opter pour de plus grandes portées.

La légèreté de ces planchers par rapport à un plancher en béton donne un avantage certain dans le cas de sols difficiles. Cela permet d'éviter ou de réduire les fondations profondes. Cet avantage n'est bien évidemment significatif que dans la mesure où les autres parties d'ouvrage sont elles-mêmes assez économes en poids.

Outre ces aspects liés à la résistance, la dalle béton apporte aux planchers mixtes de meilleures performances en isolation acoustique (loi de masse) que des planchers bois. Ces planchers ont également un comportement au feu favorable.

Enfin, les vibrations, que l'on peut observer dans les structures à plancher bois, sont limitées grâce aux planchers mixtes.

Le bois est un matériau de construction de qualité qui se fabrique et se recycle naturellement depuis des millions d'années. Construire en bois, c'est stocker du carbone. Un mètre cube de bois mis en œuvre (700 kg) représente 350 kg de carbone en moins dans l'atmosphère, ou encore plus de 1 200 kg de CO₂.

L'utilisation du bois permet ainsi de retarder le moment où le carbone fixé par photosynthèse sera rejeté par décomposition ou combustion. Elle répond donc à la nécessité actuelle de réagir rapidement, étant donné la longue durée de séjour du gaz carbonique dans l'atmosphère (50 à 200 ans). D'autre part, l'utilisation du bois implique la diminution de l'emploi de matières plastiques, de métaux et de béton, qui sont des matériaux non renouvelables dont la fabrication dégage du CO₂ [Tableau I-2].

Matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Procédé de fabrication et mise en œuvre	
		Dégagement de CO ₂ (kg/m ³)	Fixation de CO ₂ (kg/m ³)
Acier	7 200	5 000	0
Béton	2 300	375	0
Ciment	1 600	2 500	0
Bois feuillus	700	Prise en compte des procédés industriels ≈ 200	1 000 (1)

(1) Le bois est constitué de C = 50 %, O = 43 %, H = 6 %, N = 1 % :
700 kg de bois contiennent 350 kg de C ;
1 mole de C = 12 g ; 1 mole de O₂ = 32 g ⇒ 1 mole de CO₂ = 44 g ;
⇒ pour 350 kg de C : $(350/12) \times 44 = 1283$ kg de CO₂ arrondi à 1 tonne de CO₂ par m³ de bois utilisé.

Tableau I-3 : Effet environnemental des matériaux de construction [6]

De plus, les planchers ont la possibilité d'être préfabriqués, ce qui conduit à un gain de temps important sur chantier.

Enfin, le plancher mixte bois-béton offre une plus grande liberté de conception par rapport aux planchers bois. Il permet notamment de disposer d'une technologie de dernière génération, par exemple avec la pose de plancher chauffant ou d'isolations acoustique et thermique renforcées. L'esthétique du plancher en sous face est également laissée au libre choix du concepteur.

Donc on peut résumer les avantages des planchers mixtes bois béton, mis en œuvre avec ce procédé comme étant les suivants :

1. Excellent rapport coût / performances.

2. Mode de pose simplifié accessible à tout entrepreneur qualifié.

Possibilité de mettre en œuvre les différentes zones de planchers bois béton en fonction de l'avancement général, sans contraintes de planning, d'étalement provisoire ou de préparations liées à l'intervention ponctuelle d'un soustraitant.

3. Utilisation massive du bois en tant que matériau de construction tout en gardant les qualités mécaniques, acoustiques et thermiques d'un plancher béton : excellent bilan carbone (1m³ de bois

stocke 1 tonne de CO₂) favorisant le respect des cibles HQE, le développement durable et faisant écho au « Grenelle de l'environnement ».

4. Présence de bois d'œuvre en sous face des planchers permettant d'améliorer : la qualité des ambiances intérieures d'un point de vue esthétique, hygrométrique et acoustique.

5. Gain de productivité sur chantier et rapidité de mise en œuvre grâce à la possibilité d'une préfabrication poussée en atelier de type « prédalles en bois » isolées (panneau isolant intégré), préconnectées voir équipées des câblages pour courants faibles.

6. Augmentation de l'inertie du plancher avec limitation des flèches et rehausse des charges d'exploitation admissibles. Augmentation de la rigidité : phénomènes de vibration problématiques en planchers bois devenant imperceptibles avec la technique bois-béton.

7. Excellentes performances acoustiques : isolement aux bruits aériens et aux bruits d'impacts, (fonctionnement de type masse-ressort-masse), correction acoustique des bruits intérieurs. Solution parfaitement adaptée aux établissements recevant du public ou aux logements collectifs.

8. Renforcement du degré de stabilité au feu et obtention du degré coupe feu par la dalle : blocage des gaz nocifs ou inflammables, limitation de l'élévation de température sous incendie.

9. Suppression du risque de rupture fragile : augmentation de l'inertie en travée, reprise partielle ou totale des efforts tranchants par la dalle aux appuis (résistance du connecteur en traction grâce au filet variable spécifique). Longévité de la liaison bois- connecteur métallique grâce au taraudage opéré par le filet variable lors du vissage : mise en compression des filets de bois autour de la pièce garantissant l'indesserrabilité et l'étanchéité de l'assemblage. Vissage sécurisé grâce au pré-trou calibré (mèche alésoir spécifique) et à la forme conique du connecteur.

10. Renforcement des ossatures bois anciennes en intervenant par le dessus (planchers classés, plafonds à la française peints, monuments historiques, ...). Faible encombrement des connecteurs avec possibilité de frettage par des cages d'armatures en aciers HA autour des zones connectées (dans le respect des règles **BAEL 91**).

Mais qui dit avantages, dit **inconvénients** :

En effet, la connexion de la dalle béton aux poutres bois est très simple à réaliser, mais l'assemblage des poutres bois aux autres éléments porteurs, comme les poteaux ou les murs, nécessite des organes ou procédés spéciaux.

De par sa constitution, ce type de plancher n'est pas adapté aux structures de plus de 11 ou 18 m de portée selon les systèmes. Sa résistance restant limitée par rapport à un plancher en béton, il présentera donc de moins bonnes performances vis-à-vis de sollicitations à caractère accidentel, comme des tassements différentiels de fondations, des séismes, des bombardements ou des explosions. Ces deux aspects excluent donc une utilisation dans les ouvrages d'art importants.

De même, bien que les vibrations soient réduites par rapport au plancher bois, un plancher mixte étant plus léger qu'un plancher en béton armé, il reste plus sensible à certains effets dynamiques des charges d'exploitation, qui peuvent apparaître dans des bâtiments à vocation industrielle par exemple.

La préfabrication implique une grande rigueur d'organisation, des études en amont importantes et soigneusement organisées, en coordination entre tous les corps d'état.

Enfin, un plancher mixte reste plus onéreux qu'un plancher classique. Son coût est en moyenne plus élevé de 54% qu'un plancher.

CHAPITRE II

*Etudes des connexions des planchers
en bois/béton.*

II.1 Systèmes de connexion et planchers mixtes

Les premiers systèmes de connexion utilisés pour les structures mixtes bois-béton étaient similaires à ceux utilisés pour la connexion bois-bois. A partir des années 1960, plusieurs projets de recherche ont été lancés pour développer et tester de nouveaux systèmes de connexion (Pincus 1969, cité par van der Linden 1999). En effet, l'amélioration du mécanisme de transmission des efforts dans le béton et le bois permet d'atteindre une rigidité et une résistance très élevées. Les divers développements réalisés dans ce domaine ont permis d'offrir une large gamme de systèmes de connexion, adaptés à des portées allant de 5 mètres à plus de 30 mètres pour des poutres droites, et jusqu'à 80 mètres pour des arcs. On distingue des systèmes de connexions ponctuelles [Bertsche, Natterer (Fig (b), SFS,...)], et des procédés de connexions réparties [système Lignadal (Fig (a), procédé Nulli, ...)].

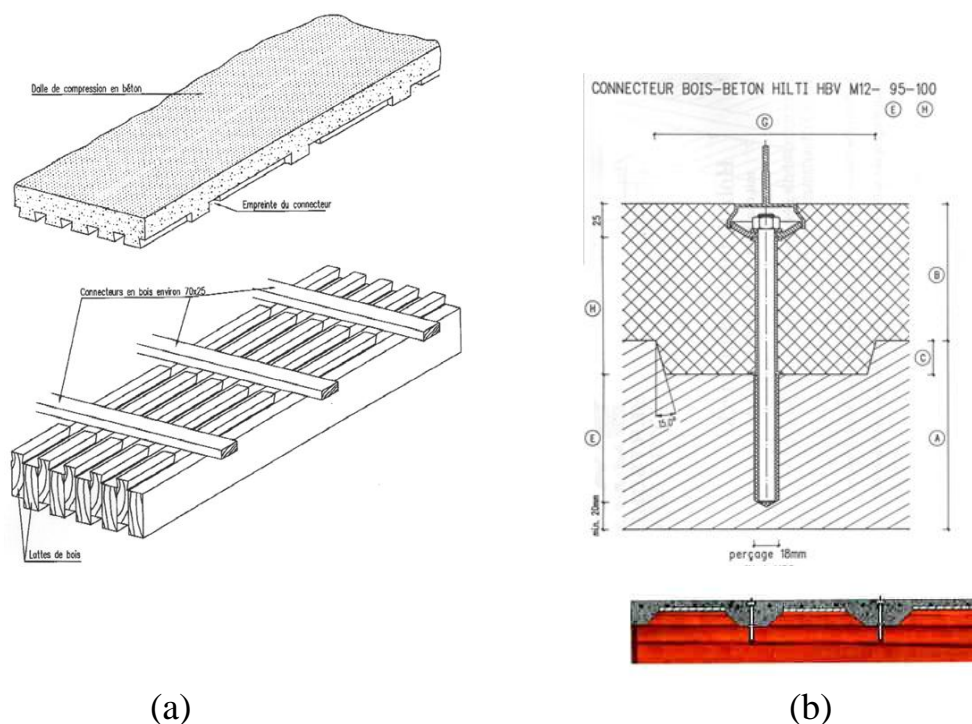


Fig II-1 : Le procédé de connexion Lignadal(a), Connecteur Natterer (b) [12]

Le système de connexion est l'un des principaux éléments qui influencent le degré d'interaction entre les matériaux constitutifs de la mixité.

La connexion de la structure mixte bois-béton est assurée par des éléments qui sont dénommés les connecteurs. Les connecteurs transmettent les efforts de cisaillement entre les deux matériaux pour assurer un comportement monolithique. L'état de l'interface pilote le taux d'augmentation de la résistance et de la rigidité. Si le bois et le béton travaillent d'une manière monolithique*, la structure atteint la rigidité optimale. Un système de connexion est constitué soit par des tenons en béton enfoncé dans le bois, soit par des éléments mécaniques comme des clous, des plaques métalliques, des tubes métalliques emmanchés dans le bois, soit par le collage. On peut classer les systèmes de connexion existants en 2 grandes familles :

- ❖ Les systèmes fonctionnant prioritairement par compression locale du bois : sont des éléments qui permettent de transmettre le cisaillement entre le bois et le béton par la compression de ces éléments sur le bois.

- ❖ Les systèmes fonctionnant prioritairement par cisaillement surfacique du bois : adhérence créée par des plaques métalliques.

On distingue les systèmes de connexion réalisés par des entailles [Deperraz, 1998] et [Martino, 2005], par des éléments mécaniques, comme des clous [Ahmadi *et al.* 1993], des tubes métalliques [Alain, 1988] et [Raymond, 1995], des plaques métalliques [Bathon *et al.* 2005], ou bien par collage [Pincus, 1970] et [Maurice *et al.* 2000]. Dans cet ensemble, trois familles différentes peuvent être distinguées : la famille des connecteurs locaux, celle des connecteurs continus métalliques et enfin celle par collage.

II.2 Connexion par collage

Le béton est coulé sur la poutrelle en bois, puis décoffré une fois durcie. La face de béton à encoller est ensuite sablée. L'assemblage par collage est effectué 7 jours après le coulage du béton. Une couche de colle de type **époxy** (Etanco 492) est appliquée sur chaque partie à coller sur une épaisseur de 1mm environ. L'ensemble est ensuite assemblé et maintenu en contact par une légère pression pendant 24heures. Les corps d'épreuve sont ensuite placés dans un four à 45°C pendant 24 heures.



Fig II-2 : Connexion par collage

La mise en place du procédé [9]:

Le collage a été réalisé au moins 28 jours après le coulage du béton pour diminuer les effets du retrait de dessiccation du béton. Le collage des poutres en bois sur la dalle nécessite une bonne préparation des surfaces de collage. La dalle en béton a été poncée en utilisant un disque diamanté (Fig II-4.a(a)). Les deux poutres en bois ont aussi été poncées en utilisant une ponceuse au papier de verre (Fig. II-4.a(b)). Les surfaces ont été ensuite soufflées à l'air comprimé pour enlever les poussières.

Le mélange des deux composants de la colle **Sikadur** a été réalisé par une perceuse équipée d'une hélice (Fig II-4.b(a)). La colle a été appliquée sur les surfaces de la dalle et des poutres en bois avec une épaisseur moyenne de 3mm à 4mm (Fig II-4.b(b)).

Pour assembler les deux parties et assurer bien le contact, les deux parties ont été maintenues par des serre-joints (Fig II-3).



Fig II-3 : serre-joint



(a) Ponceuse à disque diamantée



(b) Ponceuse au papier de verre

Fig II-4.a : Ponceuses pour la préparation des surfaces de collage



(a) Mélange de la colle



(b) Application de la colle

Fig II-4.b : Mise en place du collage

II.3 Les connecteurs

II.3-1 L'importance des connecteurs

En construction mixte, que ce soit acier-béton ou bois-béton, une grande attention est portée à l'interface des deux matériaux. Cette liaison ne peut être faite par adhérence (cas du béton), on utilise donc des organes de liaisons : **des connecteurs**.

C'est cette connexion qui assure l'action composite de la section composée de deux matériaux. Son rôle majeur est d'empêcher (ou de limiter) le glissement tendant à se produire à l'interface bois-béton sous l'effet des forces extérieures. Ainsi, ils transmettent les efforts de la partie béton à la partie bois du plancher.

Sans le connecteur la structure se comporterait comme des sections indépendantes aux propriétés mécaniques faibles.

II.3-2 différents types de connecteur

Pour effectuer cette liaison, on peut avoir recours à différents types de connecteurs allant du simple clou à la planche en bois cloué sur place.

Cependant, un bon nombre de sociétés mettent au point divers procédés, certains sont très simples à mettre en place, alors que d'autres nécessitent une préparation en atelier.

Voici une liste de quelques connecteurs :

II.3.2-1 Connexion locale

a) les tiges et les tubes :

Les tiges sont des barres cylindriques de 15 mm de diamètre. Les tubes ont un diamètre extérieur de 30 mm et une épaisseur de 1,5 mm. Ces connecteurs sont collés dans des trous percés dans le bois sur une profondeur de 50 mm et sont ancrés dans le béton sur 30 mm. Chaque poutre possède quatre connecteurs locaux dont deux sur l'axe de l'appui et deux autres à une distance de 30 cm par rapport au celui sur l'appui.

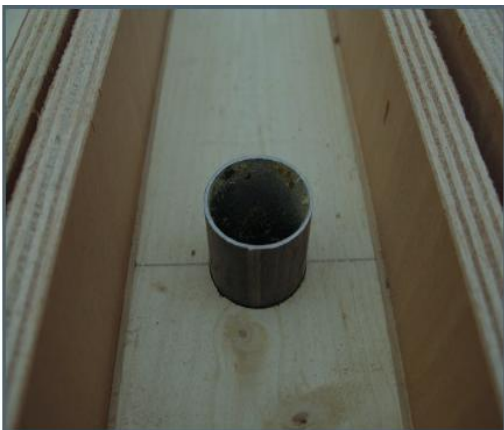


Fig II-5 : Connecteur tube



Fig II-6 : Connecteur tige

Cosylva

La liaison entre les poutres en bois et la dalle en béton est assurée par des connecteurs métalliques tubulaires repartis, à intervalles réguliers, le long de l'interface bois-béton. Il s'agit de connecteurs tubulaires en acier d'épaisseur 2 mm et de diamètre 50 mm, la longueur de ces connecteurs est de 100 mm. L'espace entre les connecteurs doit être de 20 cm. Les poutres sont percées en atelier à un diamètre légèrement inférieur à celui des connecteurs afin de faciliter leurs mises en place et de limiter

tout jeu possible. Les connecteurs sont enfoncés de 40 mm dans la poutre, de façon à ce que leur extrémité supérieure soit recouverte d'au moins 20 mm par le béton de la dalle.

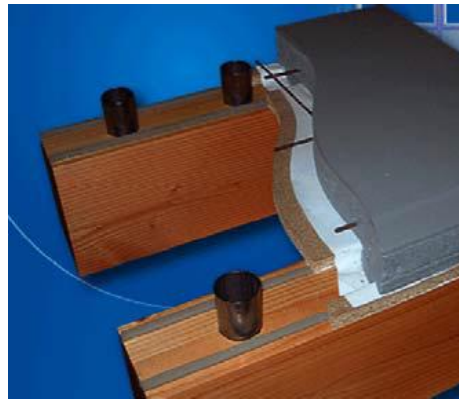


Fig II-7 : Connecteur Cosylva

Resistance cisaillement max : 2500daN [14]
Espacement : 20 cm

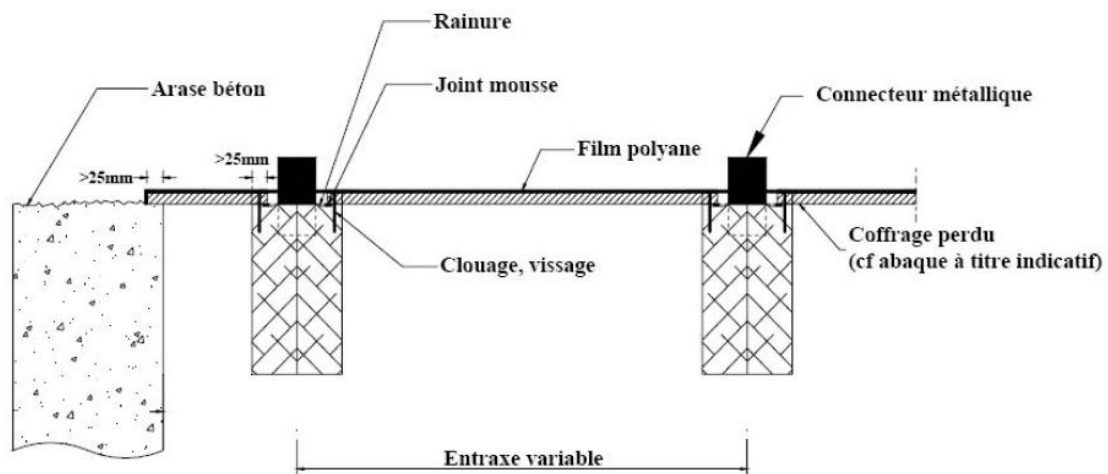


Fig II-8: Présentation schématique d'un plancher avec Connecteur Cosylva

b) SBB - Rappel

Les connecteurs sont des tire-fond métalliques. Leur diamètre est de 20-25 mm pour une longueur de 150 mm 170 mm ou 250 mm. Ils sont utilisés pour les dalles de faibles épaisseurs.

Le système SBB peut être utilisé en réhabilitation ou en construction neuve pour tout type de bâtiments, dont la structure porteuse verticale peut être en béton armé, en maçonnerie ou en bois.



Fig II-9 : *Vue d'une mise en œuvre des connecteurs SBB* → *vue en coupe*

C) Tecnar

Il s'agit de connecteurs à ergots et crampons extrêmement simples à poser. Il suffit en effet de visser des vis dans la poutre pour installer le connecteur. La plaque de base fait 50 x 50 x 4 mm avec des vis de 8 mm de diamètre pour une longueur de 70, 100 ou 120 mm. L'ergot fait 12 mm de diamètre avec un crampon en tête de 18 mm. Pour la hauteur, il existe différents modèles disponibles 30, 40, 60, 70, 80, 105, 125, 150, 175, 200 mm.



Fig II-10 : *Mise en œuvre en construction neuve*

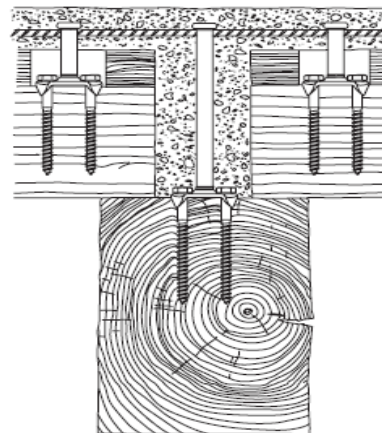


Fig II-11: *Mise en œuvre en réhabilitation (connecteur en contact direct avec la poutre principale et sur les solives secondaires)*

L'outillage nécessaire pour réaliser un bon vissage :

- perceuse pour effectuer le carottage du plancher
- Fraise
- Lubrifiant pour crampons
- Visseuse ou boulonneuse avec un bon couple (de préférence à impulsions)

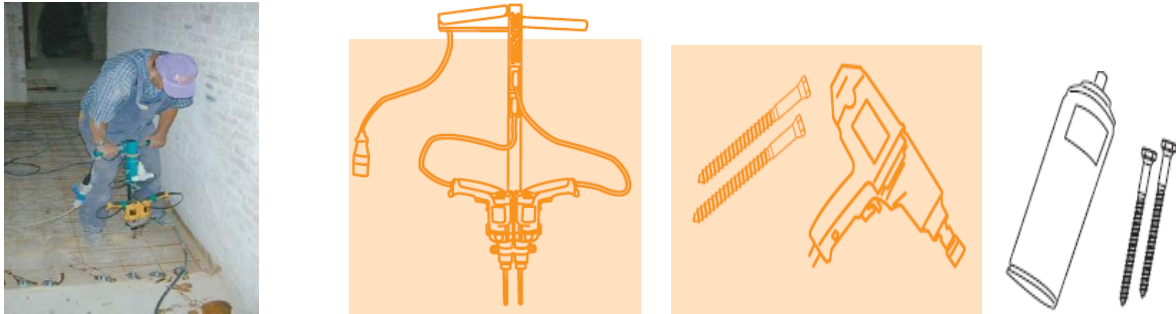


Fig II-12 : Outillage pour la pose des connecteurs

On distingue deux types de connecteurs tecnarìa :

Connecteur base [14]:

Les connecteurs « Base » sont composés d'une plaque de base de 50 x 50 x 4 mm, modelée à crampons, ayant deux trous pour l'introduction de deux vis ou tire-fonds de 8 mm de diamètre avec sous tête tronconique, et d'un ergot en acier zingué de 12 mm de diamètre, assemblé à la plaque par calquage à froid.

Les hauteurs d'ergot disponibles sont 30, 40, 60, 70, 80, 105, 125, 150, 175 et 200 mm associées à des longueurs de vis de 70, 100 et 120 mm.

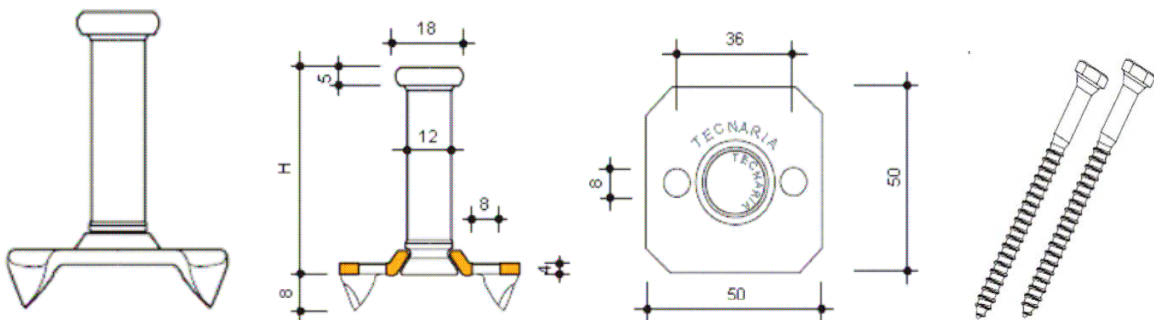


Fig II-13 : Connecteur base

Resistance cisaillement max : 2090daN

Module de glissement (ELS) = 8700 N/mm

Module de glissement (ELU) = 17200N/mm

Connecteur maxi [11] :

Les connecteurs « Maxi » sont composés d'une plaque de base de 75 x 50 x 4 mm, modelée à crampons, ayant deux trous pour l'introduction de deux vis ou tire-fonds de 10 mm de diamètre avec sous tête tronconique, et d'un ergot en acier zingué de 12 mm de diamètre, assemblé à la plaque par calquage à froid.

Les hauteurs d'ergot disponibles sont 30, 40, 60, 70, 80, 105, 125, 150, 175 et 200 mm associées à des longueurs de vis de 100, 120 et 140 mm.

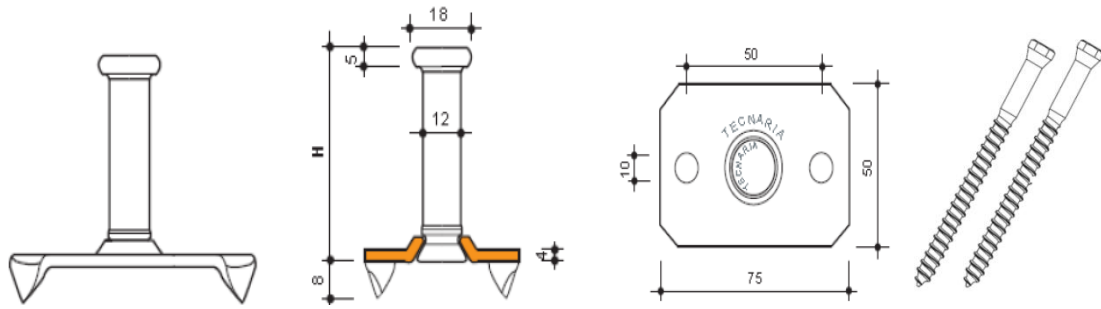


Fig II-14 : Connecteur maxi

Resistance cisaillement max : 2425daN

Module de glissement (ELS) = 8700 N/mm

Module de glissement (ELU) = 17200N/mm

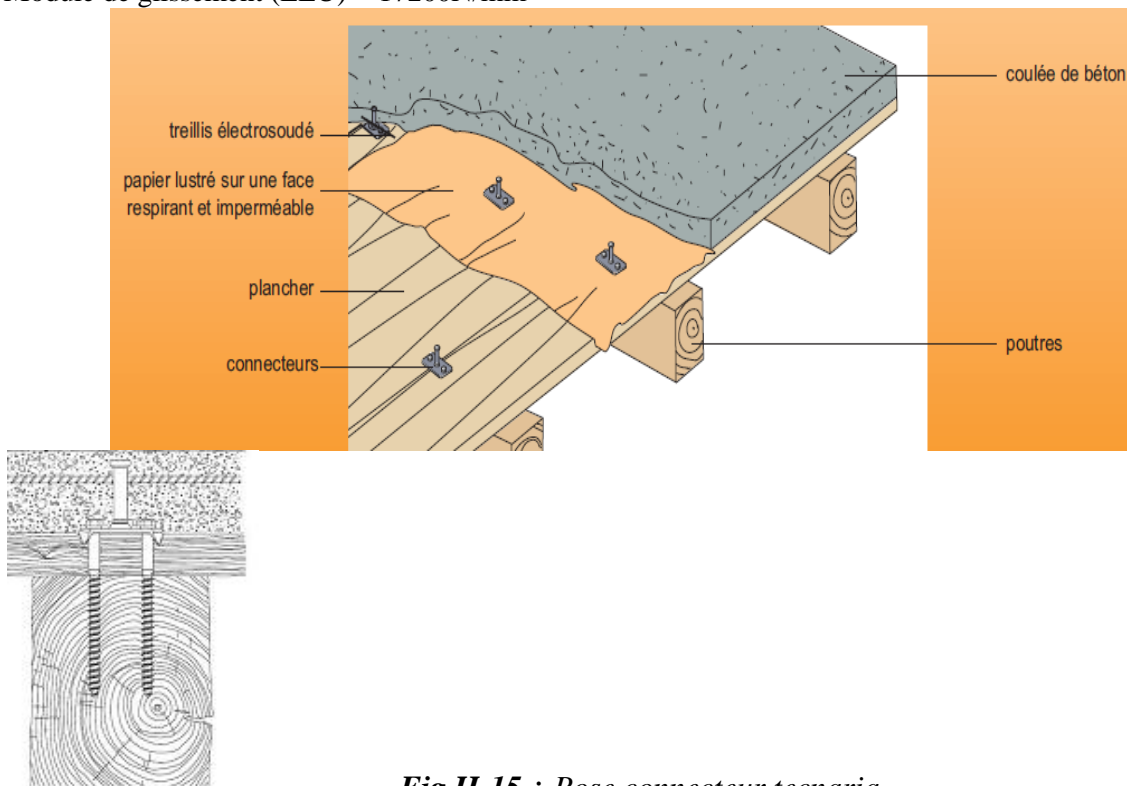


Fig II-15 : Pose connecteur tecnaria

Entre le plancher et la coulée, une feuille de papier lustré sur une face a été interposée pour éviter le contact direct entre le bois et le béton qui provoquerait une perte d'humidité du béton dommageable durant le séchage de la coulée.

D) Système mixte SFS VB

Il s'agit d'une sorte de grosses vis ne nécessitant pas de pré perçage. La pointe filetée mesure 100 mm pour un diamètre de 7.5mm. Pour une meilleure utilisation de ces vis, elles sont généralement disposées par paire et doivent être orientées à 45 °, cette disposition permet une sollicitation en traction et compression. La paire de connecteurs est placée sur le même axe transversal et espace au maximum de 20 cm, pour les cas d'une poutre très large, il faut placer deux paires de connecteurs avec un espacement maximum de 60 cm entre les paires. Sur le plan longitudinal, l'espacement maximum est de 80cm.

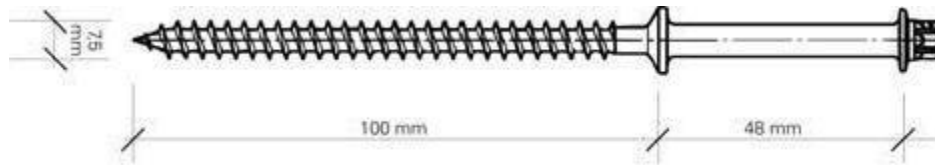


Fig II-16 : Dimension d'un connecteur SF5 VB

- Disposition 45°/90° par paires de connecteurs [14] :

Resistance cisaillement max : 500 daN

Module de glissement (ELS) = 18 000 N/mm

Module de glissement (ELU) = 12 000 N/mm

- Disposition 45°/135° par paires de connecteurs :

Resistance cisaillement max : 700 daN

Module de glissement (ELS) = 25 000 N/mm

Module de glissement (ELU) = 16 667 N/mm

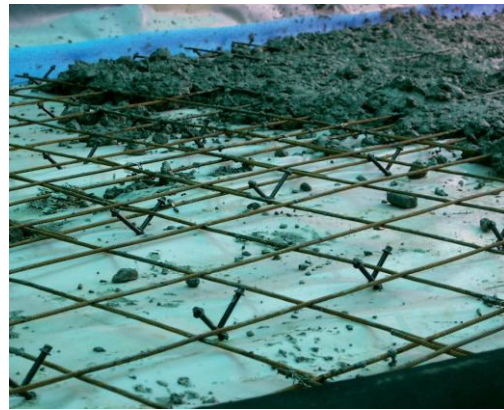


Fig II-17 : Exemple de mise en œuvre de ce système

E) Systèmes composites Timco

Il s'agit d'une sorte de Vis de 150mm de longueur et un diamètre de 7.3 mm avec revêtement anticorrosion.



Fig II-18 : Système de connexion Timco

II.3.2-2 Connexion continue

a) Bande de métal déployé (**MD**) en (Fig II-19(a)). La bande de métal déployé est insérée dans une rainure pratiquée dans le bois sur une profondeur de 50mm et collée à l'époxy. Elle est noyée dans le béton sur 30mm de profondeur.

b) Bande de plaque à pointes (**PAP**) en (Fig II-19(b)) La poutre en bois est découpée en deux et les plaques à pointes sont clouées sur chaque partie. Les deux parties sont ensuite assemblées et collées à

l'époxy et maintenues en compression transversale par des tiges filetées précontraintes. Les profondeurs de pénétration sont les mêmes que précédemment.

c) Ruban métallique perforé (Fig II-19(c)). La conception est la même que précédemment. Le métal déployé est remplacé par une bande métallique trouée d'épaisseur 1; 5mm.

d) Le ciseau continu (the continuous shear) [15]: connecteur de la forme d'une maille de l'acier, est inséré dans une fente continue dans la poutre en bois qui est relié par l'action de l'adhésif (fig II-19(d)). La fente continue dans la poutre en bois est fabriquée à travers un moyen commun utilisé dans la charpenterie. L'adhésif usagé est résistant au feu jusqu'à approximativement 200° C (392° F) et cures dans 30 minutes. Les actes du connecteur ciseau sont considérés comme un support du renforcement arrangé avec le béton durci.



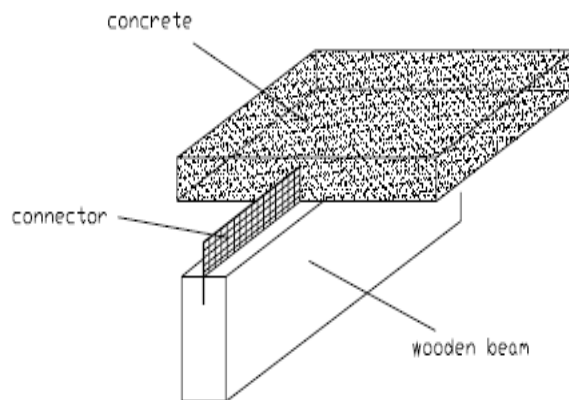
(a) MD



(b) PAP



(c) ruban



(d)

Éléments structurels du système composé bois béton avec connecteur ciseau

Fig II-19 : Les Connecteurs continus

On rencontre aussi des systèmes connus tels que :

II.3.2-3 Lewis – Rappel

Il s'agit de bacs en acier galvanisé utilisés comme coffrage perdu combiné au système précédent (SBB).

Les caractéristiques techniques des bacs acier :

- Largeur : 630 mm.
- 4 Longueurs standards : 1220 mm - 1530 m - 1830 mm - 2000 mm.
- Épaisseur de la tôle : 0,5 mm.
- Hauteur du profil : 16 mm.

Dans le sens de la largeur, il faut effectuer un recouvrement de 50 à 100 mm. Pour un faible entraxe de poutre, l'épaisseur minimale de béton doit être de 50 mm et pour des entraxes importants, elle doit être de 70 mm (bacs inclus).

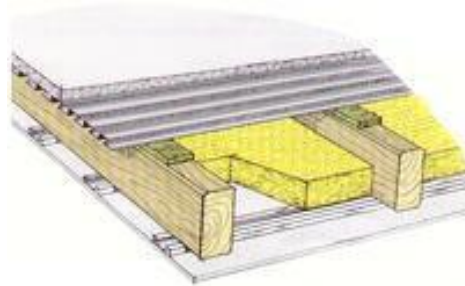


Fig II-20 : Vue d'un plancher

II.3.2-4 Lignadal

Il s'agit d'une prédelle formée de planches de bois. Celles-ci ont une épaisseur de 43 mm et une hauteur comprise entre 90 mm et 220 mm. Elles sont clouées, accolées par leurs faces et alternativement décalées en hauteur. Le décalage des planches est constant, il est de 25 mm ou 35 mm. On obtient ainsi une dalle constituée de rainures sur toute la longueur. De plus, il y a des rainures transversales sur toute la largeur de dalle. Elles ont une largeur de 115 mm et une hauteur qui dépend du décalage des planches (25mm ou 35mm). Dans ces rainures sont placés les connecteurs. Il s'agit de planches de 25 mm d'épaisseur et de 70 mm de large. Les connecteurs sont espacés de 320 mm.

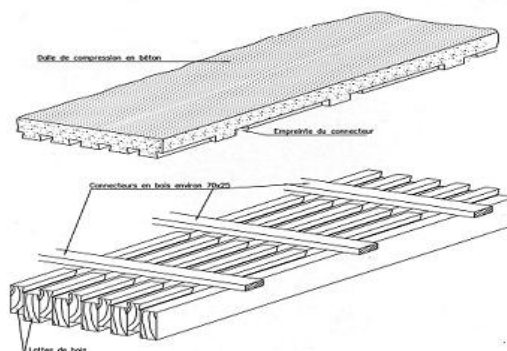


Fig II-21 : Vue en 3D du système Lignadal [14]

II.3.2-5 D – Dalle

Il s'agit d'une double dalle mixte bois-béton pour le domaine des dalles de très grandes portées, de 11 m à 18 m sans appui. Elle est constituée de planches visées en décavées sur la hauteur. Pour améliorer la connexion, les dalles sont sciées transversalement pour ensuite positionner des plaques métalliques en forme de L perforées sur le côté et vissées en tête. Ce type de dalle peut être utilisé de plusieurs manières, par exemple en solive.

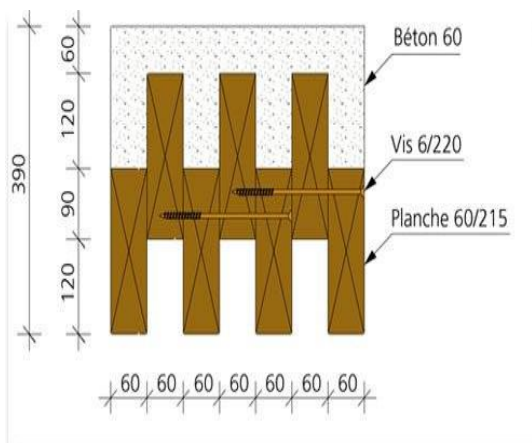


Fig II-22 : Coupe et aperçu d'un essai du système

II-4 Etude comparative des connecteurs

Concernant le domaine d'utilisation, on constate par exemple que les planchers COSYLVA et LIGNADAL sont plutôt utilisables jusqu'à 11m de portée, tandis que le plancher D-DALLE est adapté à de plus grandes portées pouvant atteindre 18m. Ce qui explique la différence observée au niveau des dimensions des poutres bois.

Ces planchers offrant une isolation thermique faible à moyenne, ils pourront être associés à une isolation classique supplémentaire afin de garantir un confort thermique aux usagers.

Une comparaison a été faite par [6] alors nous présentons le tableau suivant à titre d'exemple :

Système	dimensions				
	portée	épaisseur dalle béton	largeur poutre bois	hauteur poutres bois	espacement connecteurs
COSYLVA standard	L = 0 à 6 m L poutre = L - 10 mm	mini 5 cm	≈12 cm	≈22 cm	≈20 cm
calculé	L = 6 à 11(12 m) L poutre = L + (70 mm mini x 2)				
D-DALLE	L = 11 à 18 m	> 6 cm	18 à 21 cm	50 à 80 cm	réduit en s'approchant des appuis
LIGNADAL	L = 2 à 8m	6 à 10 cm	épaisseur des planches de 4,3 cm	poutres de 9 à 22 cm	système de prédalles préfabriquées, connecteurs dans des rainures

Tableau II-1 : Tableaux comparatifs de trois systèmes de dalles mixtes

II-5 Exemple

II.5-1 réhabilitation

Pour mieux présenter les choses et éclaircir la manière de réalisation d'un plancher mixte Bois-Béton avec connecteurs, nous présentons en toute simplicité les étapes nécessaire en cas de la restauration de La Magnanerie de SEILLANS (83) en Provence en utilisant les connecteurs de type tecnaria.



1- Préparation du platelage avant l'intervention: ici le sciage des lattes au droit des poutres est mis en évidence.



2- Un film transpirant est ensuite étalé et agrafé avec soin.



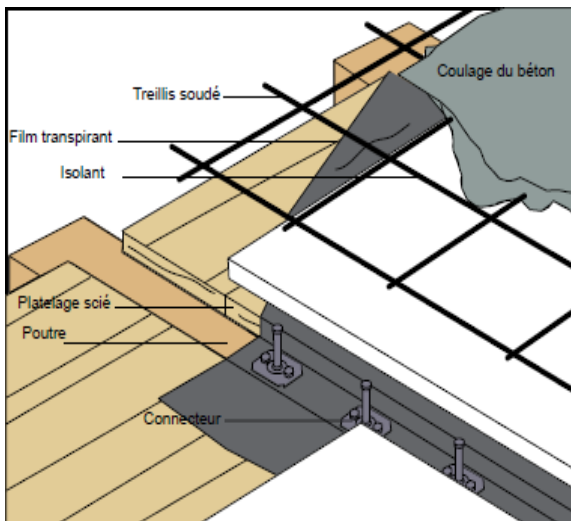
3- Les connecteurs sont ensuite posés en suivant les indications de la feuille de calcul pour ce qui concerne les espacements.



4- Mise en place des panneaux isolants type fond de coffrage.



5- Les renforts sont ensuite positionnés.



6- Dessin : Principe du complexe de connexion et renforcement du plancher.



7- Le plancher est prêt à recevoir le coulage du béton.



8- Toupie en action



9- Mise en action de la pompe à béton.



10- Compagnons en train de « tirer » le béton.



11- Lissage de la dalle.

II.5-2 Neuf

Nous avons trois phases à considérer lors de la réalisation d'un plancher mixte bois béton [4] :

- Phase 1 de chantier : pose des poutres bois seules,
- Phase 2 de chantier : coffrage et coulage du béton,
- Phase 3 de mise en service.

a-Phase chantier : poutres bois seules

Les poutres en bois sont posées (avec ou sans les connecteurs) (Fig II-23).

Chaque poutre doit donc supporter son poids propre (et celui des connecteurs).

Si un étaieement des poutres est prévu, il viendra les soutenir et les soulager.



Fig II-23 : Poutres bois et connecteurs

b-Phase chantier : coffrage et coulage du béton

Le béton est coulé mais il n'a pas encore fait prise (Fig II-24). Il apporte une charge à la structure mais aucune résistance. Les deux matériaux ne sont pas encore connectés.

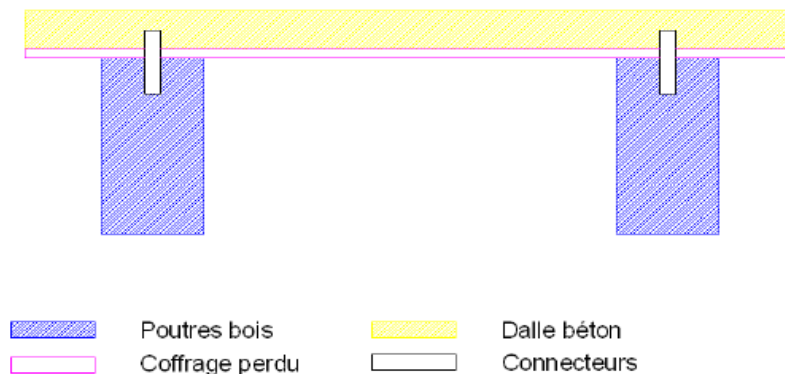


Fig II-24 : Coffrage et coulage du béton

c- Phase de mise en service :

Le béton durci, les connecteurs et le bois font corps. Le calcul se fera donc en structure mixte.

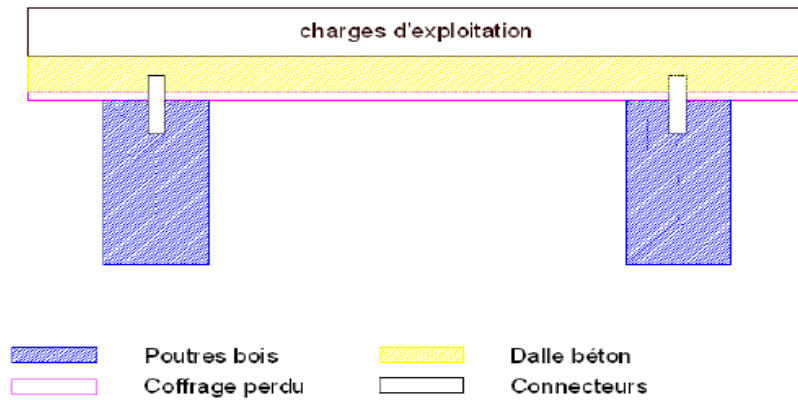


Fig II-25 : Système mixte en phase d'exploitation

II.5-3 La réalisation du premier pont bois-béton en Allemagne 2008

Le Birkberg-Bridge près de la petite ville Wippra a une longueur de plus de 15m. Il est employé comme pont à voie unique en route à travers le fleuve Wipper. Le pont est conçu pour des charges de circulation selon la norme nationale en Allemagne (DIN FB 101), qui correspond au Eurocodes. La charge se compose d'un système tandem de 48 tonnes et d'une charge uniformément distribuée de 9 kN/m².

La superstructure se compose d'une plate-forme en béton de 25 centimètres, lié à deux poutres en bois de construction. La section transversale d'une poutre principale à une hauteur constante de 70 centimètres et une largeur de 1,26 m. Le connecteur qui reprend les forces de cisaillement entre le béton et le bois, se compose d'un plat en acier de 3 centimètres avec les goujons soudés du côté concret, par lequel le lien au béton est assuré. L'étude apportée à ce projet, les approches, les essais réalisés ainsi que les diagrammes obtenus font l'objet de la référence [16]

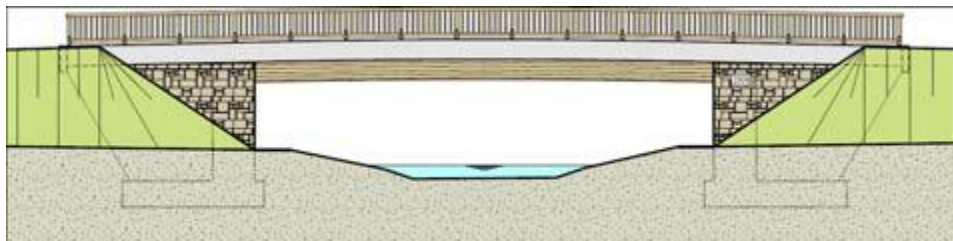


Fig II-26 : Vue du pont

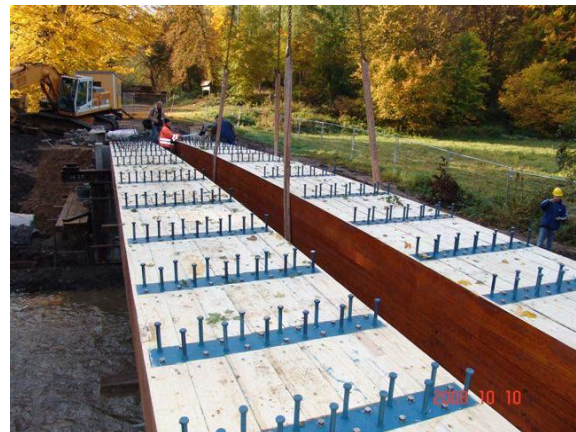


Fig II-27 : Montage des poutres en bois lamellé collé et leurs mises en place



Fig II-28: Le pont en phase de réalisation ainsi que à la fin des travaux

II.5-4 La réalisation des bâtiments à plusieurs étages et les gratte-ciels

Le bois stratifié est un produit extrêmement bon adapté aux bâtiments de plusieurs étages en raison de son polyvalence. Avec des longueurs jusqu' à 16 mètres, largeurs de jusqu'à 2,5 mètres selon fabricant et une épaisseur qui peut atteindre les 350 millimètres, presque toutes les formes nécessaires peut être trouvée sur le marché aujourd'hui.

Le concept des bâtiments très hauts peuvent être construit avec de grandes quantités éléments préfabriqués. Aspects et la mécanique de conception des paramètres sont identifiés comme étant des avantages pendant l'étape de construction.

Beaucoup de hautes bâtisses, des gratte-ciel, des monuments et même toute une ville tel que la ville de **SHANGHAI** ont été réalisées avec du bois-béton, il semble d'après les calculs fait et les vérifications faites au niveau des rigidités et des déplacements [17] que le principe de construction est faisable, mais le besoin de beaucoup d'autre d'aspects doit être toujours pris en considération.



Fig II-29 : La ville de SHANGHAI

CHAPITRE III

Comportement expérimental des connexions

III.1 Etudes expérimentales

En Italie, les analyses expérimentales du comportement instantané et différé des structures mixtes bois-béton ont commencé dès 1989 (Ceccotti 1992). Le système de connexion utilisé est constitué d'une tige en acier collée dans le bois par une résine, et incurvée du côté béton pour faire office de dispositif anti-soulèvement. Ces études soulignent l'effet prononcé des variations climatiques sur l'évolution de la flèche et sur le glissement à l'interface bois-béton.

Depuis le début des années 1990, plusieurs études sont menées sur le comportement des systèmes de connexion à l'école polytechnique fédérale de Lausanne. Parmi ces systèmes, celui de Natterer (**Fig II-1(b)**) réalisé avec un connecteur HBV de Hilti. Ce système a fait l'objet de plusieurs essais à court et à long terme. Il est constitué d'une tige enfoncée dans un emboîtement. La tige transmet un effort de précontrainte appliqué en serrant l'écrou placé sur son sommet. Ce serrage permet de compenser le jeu à l'interface induit par le retrait du béton, et de mobiliser plus de résistance au cisaillement.

Autres types d'essais ont été réalisés à l'EPFL par Fontana et Fangi (1998) pour déterminer la résistance au feu du connecteur SFS (développé par SFS company, 1992). Ces essais montrent l'effet de la largeur des poutres en bois sur la perte de résistance au cisaillement induite par le feu.

En 1995, une étude expérimentale a été conduite à l'université de Karlsruhe dans le but de caractériser quatre systèmes de connexion (van der Linden 1999). Des essais de flexion à court et à long terme ont été ensuite réalisés sur des poutres bois-béton connectées avec ces systèmes. Un de ces essais fera par la suite l'objet d'une modélisation numérique.

A partir de 1996, plusieurs systèmes de connexion sont développés et examinés dans le cadre d'une collaboration entre Hilti A.G. et l'INSA* de Lyon. Des essais de cisaillement et des essais de flexion de dalle mixte ont été menés avec des chargements monotones et cycliques. Parmi ces connecteurs, le connecteur "INSA-Hilti" destiné à la réhabilitation des planchers en bois feuillu (Mungwa *et al.* 1999), le connecteur "HCC" qui sera prochainement commercialisé par Hilti A.G., et le système "Shear crown" [12] qui sera présenté par la suite.

Depuis 1997, un projet de recherche est mené au centre de recherche technologique du bâtiment en Finlande (VTT), dans le but d'améliorer la performance des structures de planchers. Deux systèmes de plancher mixte bois-béton sont développés, dont l'un est préfabriqué et l'autre est construit sur place (Toratti et Kevarinmäki 2001). La structure est constituée d'une dalle en béton connectée par des plaques métalliques à un treillis en bois. Ce projet a permis d'examiner le comportement statique et dynamique de ces planchers. En plus, l'isolation phonique et la résistance au feu ont été testées afin de montrer que ces systèmes de structure mixte remplissent toutes les exigences du code de dimensionnement.

III.2 Performances mécaniques des planchers mixtes en bois-béton

Plusieurs campagnes d'essais de **cisaillement** et de **flexion** à court et à long terme ont été réalisées pour mettre en évidence, respectivement, les phénomènes de glissement à l'interface bois-béton et l'influence de la connexion sur la résistance mécanique et la déformation des planchers mixtes en bois-béton. Différents paramètres, ont été étudiés afin d'évaluer leur influence sur le comportement du plancher mixte : type de connecteur, espacement entre connecteurs, épaisseur de la couche de béton, type de fixation entre les panneaux OSB (coffrage perdu) et la poutre en bois, etc.

III.3 Caractérisation des systèmes de connexion

La prise en compte de la flexibilité de connexion dans le dimensionnement des structures mixtes nécessite la détermination des propriétés mécaniques des connecteurs utilisés. Les deux principales caractéristiques traduisant le comportement d'un système de connexion sont la rigidité et la résistance

à la rupture. Elles sont déterminées par des essais de cisaillement "push-out test" définis selon l'EUROCODE 5 (1995) [8].

III.3-1 La rigidité

Cette propriété est d'une part fonction des caractéristiques mécaniques du bois, du béton, et du système de connexion, et d'autre part de la forme géométrique du connecteur et sa disposition qui pilotent le mécanisme de transmission des efforts.[12] a rappelé les travaux de Ceccotti (EC5 Step II 1995) qui présente un classement de différents systèmes de connexion en fonction de leur rigidité (Fig III-1). Les types de liaisons ayant les indices (a, b, c) correspondent à des systèmes flexibles, tandis que les types (d) sont considérés comme rigides, c'est à dire assurant une interaction totale entre le bois et le béton.

L'optimisation de la rigidité, dite aussi module de glissement par organe d'assemblage, consiste à réduire au maximum la déformabilité du connecteur et des matériaux constitutifs qui l'entourent. Le bois et le béton constituent localement une sorte de fondation viscoélastique ou viscoplastique pour le connecteur. Du côté bois, il est important de transmettre les efforts parallèlement aux fibres afin de mobiliser ses meilleures caractéristiques mécaniques. Dans la partie béton, la perte de rigidité est principalement induite par des fissurations dans la zone entourant le connecteur. D'où l'intérêt d'avoir un mécanisme de transmission d'efforts capable d'assurer une bonne répartition des contraintes tout en limitant les efforts de traction dans le béton.

On rappelle que la rigidité d'un système de connexion ne reflète pas directement le degré d'interaction globale entre le bois et le béton dans une structure mixte. En effet, c'est le module de glissement divisé par l'espacement entre les connecteurs "smeared slip modulus" qui influence la rigidité globale de la structure. Ainsi, pour avoir le même comportement à court terme de deux connecteurs de rigidités différentes, il suffit qu'ils aient le même rapport module de glissement/espacement entre connecteurs. Néanmoins, cette équivalence n'est pas forcément valable à long terme ou en cas d'efforts relativement élevés.

Pour un chargement à court terme, il est communément admis qu'une forte rigidité de liaison permet d'avoir un comportement mécanique bien plus performant qu'une connexion flexible. En revanche, ce n'est pas toujours le cas pour le comportement à long terme des structures mixtes exposées à des variations climatiques, puisque la connexion flexible a l'avantage de dissiper une bonne partie des déformations d'expansion empêchées d'origine thermique ou hydrique. Par ailleurs, cet avantage n'est pas suffisant pour favoriser l'usage des connecteurs flexibles dans des conditions climatiques variables [12], car la flexibilité n'est pas le seul paramètre à prendre en compte. Les connecteurs flexibles sont généralement caractérisés par une résistance ultime plus faible que les systèmes rigides.

Ainsi, malgré la dissipation d'une partie des déformations d'expansion empêchées par leur déformabilité, ces connecteurs flexibles restent susceptibles d'atteindre plus rapidement des niveaux de sollicitations critiques vu leur faible résistance.

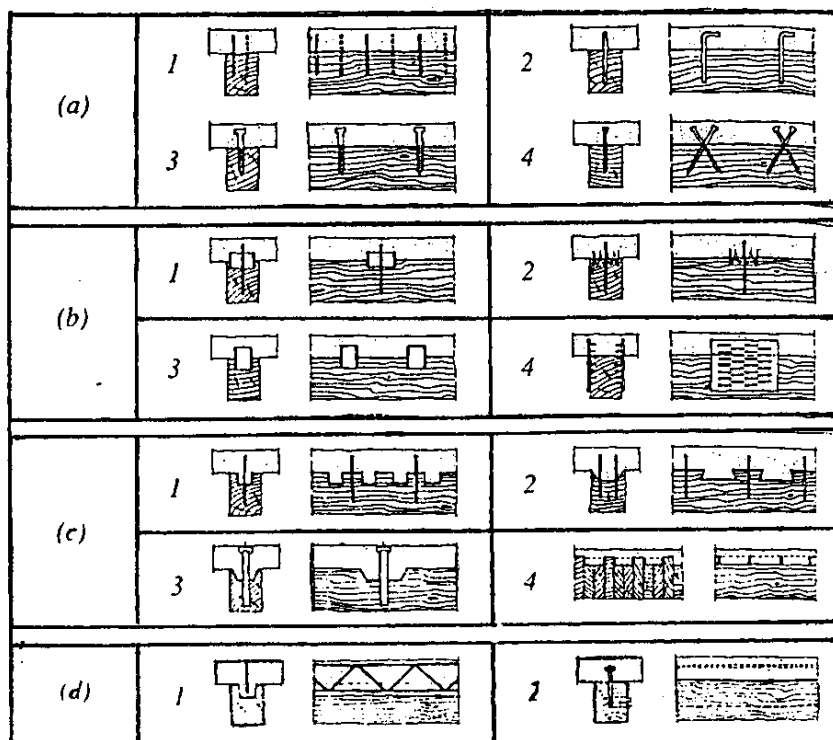


Fig III-1 : Exemples de différents systèmes de liaisons bois-béton: (a1) pointes ; (a2) fers à béton collés; (a3/4) vis; (b1/2) assembleurs, respectivement anneaux et crampons; (b3) tubes d'acier; (b4) connecteurs métalliques; (c1) trous ronds dans le bois et anti-soulèvements; (c2) entailles droites et organe d'assemblage; (c3) évidement et barre d'acier précontrainte; (c4) platelage en planches cloué et plaques de cisaillement entailées dans l'épaisseur des planches; (d1) treillis en acier collé sur le bois; (d2) plaques métalliques collées sur le bois.

III.3-2 Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement est un facteur très important dans le calcul aux états limites ultimes. Cette propriété de résistance est pilotée par la plus faible résistance des trois composantes du système de connexion. Une conception optimisée consiste à mobiliser au mieux les résistances du bois, du béton, et du connecteur. Afin de maîtriser le comportement à la rupture, il est convenable que cette phase soit générée par l'écoulement plastique de l'acier du connecteur.

Les différents connecteurs présentés dans la littérature ont des résistances ultimes très variées (entre 10 et 500 kN). Les connecteurs de très hautes résistances fonctionnent comme des ministructures capables de répartir les efforts d'une manière adaptée aux caractéristiques mécaniques du bois et du béton. On note que les connecteurs caractérisés par une forte rigidité et une faible résistance sont très contraignants dans le dimensionnement des structures mixtes.

III.3-3 Ductilité

Les systèmes de connexion sont classés suivant la valeur de leur ductilité statique, définie par le rapport entre le glissement ultime et le glissement à la limite élastique. La ductilité joue un rôle très important dans le cas de chargements accidentels. Elle est principalement liée au mécanisme de transmission d'efforts au niveau du connecteur.

III.4 Le comportement expérimental des connexions

Nous allons regrouper dans cette partie les essais réalisés en ce basant sur notre documentation pour les différents types de connexions disponibles, leurs résultats expérimentaux ainsi que les théories développées par leurs auteurs.

III.4-1 Connexion par collage

Les essais de flexion trois points ont été réalisés par **Hoi-Son-Pham [9]**, son pilotage de l'essai est composé de trois phases principales (Fig III-2) La première phase consiste en trois cycles de charge-décharge de 5% à 30% de la charge à la 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 5% à 60% de la charge à la rupture. Cette phase permet de déterminer le comportement des poutres dans le domaine plastique et aussi leur réversibilité. La dernière phase conduit la poutre à la rupture. Elle permet de déterminer le mode de rupture des poutres.

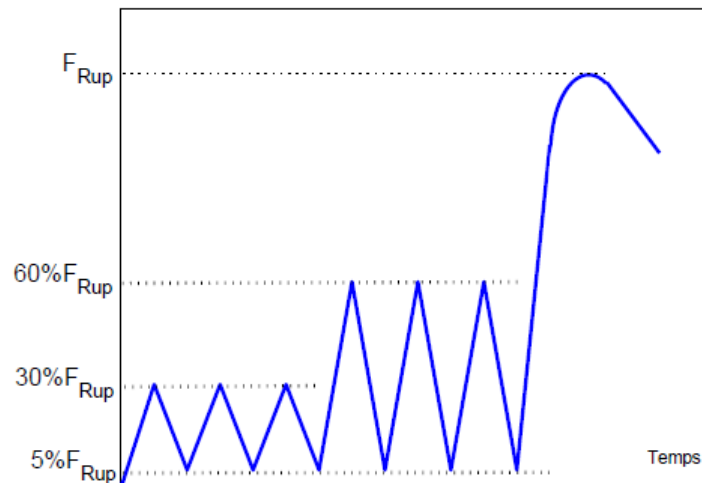


Fig III-2 : Schéma de pilotage des essais en flexion

Cinq capteurs de déplacement **D1;D2;D3;D4;D5** (fig III-3) sont disposés pour mesurer la flèche et le glissement relatif à l'interface aux deux extrémités de la poutre. Le capteur D1 mesure la flèche totale. Le tassement d'appui est mesuré par les capteurs D2;D3 les capteurs D4;D5 servent à mesurer les glissements aux deux extrémités de la poutre.

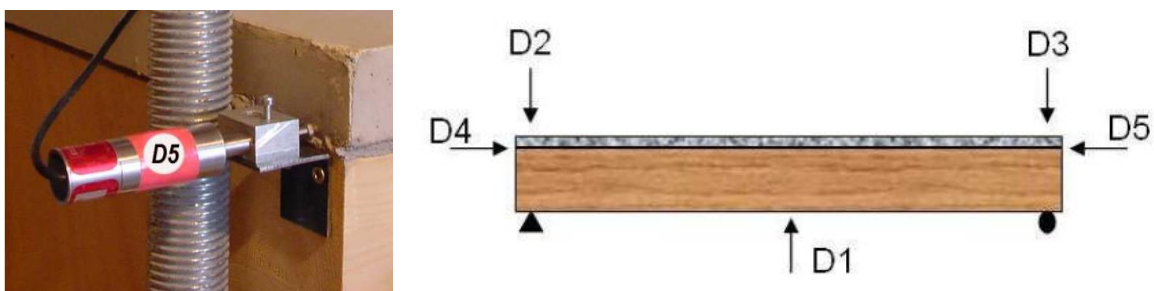


Fig III-3 : Disposition des capteurs

Le mode de rupture par connexion de collage cité par [9] représente son troisième mode selon ces résultats d'essais qui est une rupture brutale de la connexion mais il s'agit d'un arrachement du bois à l'interface (Fig III-4). La perte de liaison entre les 2 matériaux crée des contraintes de traction dans le béton et le bois. Il s'ensuit rapidement une rupture de celui-ci à mi portée. Une fois l'amorçage* réalisé, la propagation de la surface de décollement est rapide.



Fig. III-4 : Rupture par arrachement du bois



(a) Décollement au cours d'essai en flexion



(b) Décollement par retrait de dessiccation*

Fig III-5 : Rupture des poutres



Fig III-6 : Rupture de la poutre en bois

La rupture a eu lieu en traction dans le bois à la position d'un joint d'aboutement de lamellé collé. La fissure s'est ensuite propagée suivant l'interface de lamellé collé (Fig III-6). Nous vérifions ici que l'interface n'a pas constitué le lieu de faiblesse de la structure.



(a) Face du bois



(b) Face du béton

Fig III-7 : Rupture cohésive en cisaillement dans le bois

La rupture dans la (Fig III-7) s'est produite au niveau de l'interface bois-béton, après découpage de la poutre, nous avons pu observer que la rupture s'est produite dans le bois auprès de l'interface, Il s'agit donc d'une rupture cohésive.



Fig III-8 : Rupture adhésive de l'interface colle-béton

Martin Schäfers, Werner Seim [18], [19] ont montré que l'ambition principale des enquêtes présentes est de développer l'information des planchers composite en liaisons adhésives de bois de construction et le béton(UHPC)*.

En outre, une situation de l'épreuve standard pour la détermination expérimentale de la force d'attache de la construction mixte bois-béton sera dérivée. Il est trouvé que l'échec de la liaison se produit en bois de construction près de l'attache ligne dans la plupart des cas.

En général, les charges ultimes peuvent être estimées par la théorie de Volkersen. Dans le cas de longueurs de l'attache courtes les charges ultimes sont affectées par les insistances de la tension dans

bois de construction. Avec l'aide d'études numériques, cet effet pourrait être mesuré et il a été trouvé, que ceux-ci les insurances de la tension n'ont aucune influence en liant l'échec pour lier des longueurs de 300 mm partout. D'après les enquêtes de l'attache, les recommandations pour le dessin de courber des membres sont données, lesquels sont validés par deux épreuves du cintrage grandeur nature.

La charge de rupture d'une région en liaison adhésive dépend d'un côté des propriétés des différentes matières et de l'autre côté sur sa durée. Les modèles mécaniques qui considèrent cet effet de la "dimension" seront résumés et seront examinés. Les testes montrent que la surface de la fissure d'UHPC et le bois de construction est toujours située en bois de construction près de bond-line.

Tout les tests ont montré que la rupture se fait exclusivement presque au niveau de la surface en bois de construction. Non plus sur la surface du béton, ni le type de béton avait une influence sur ce phénomène. Les spécimens ont exposé deux différentes formes de surface de la fracture en général. Dans la plupart des cas, une surface de rupture le long des bagues du bois, une petite partie a exposé cependant une surface de rupture près de la région de la liaison du collage bond-line.



a) Test setup for the bond tests



b) surface de rupture au niveau du bois



c) Surface de rupture près de bond-line



Fig III-9 : Les types de rupture

Ils ont également étudié la relation qui lie **la longueur d'attache** (entre le bois- béton) et le déplacement ainsi que la charge de rupture.

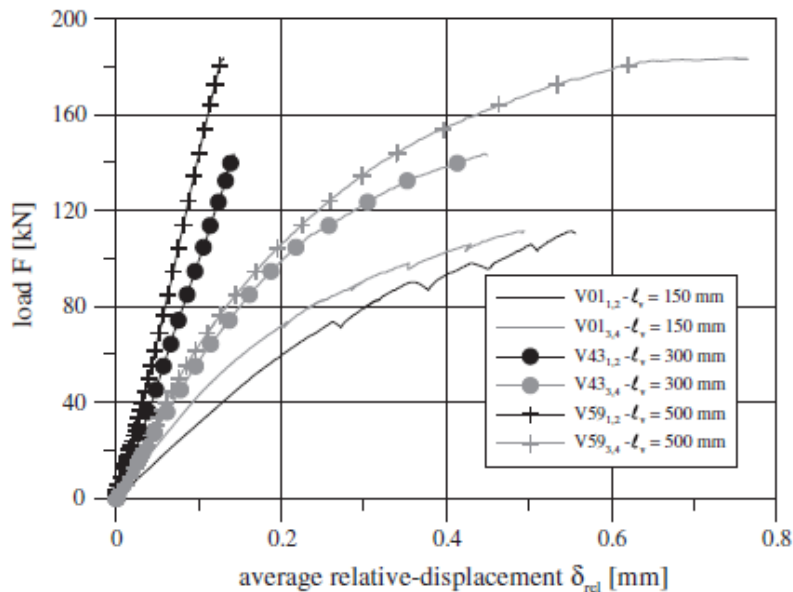


Fig III-10 : Les déplacements relatifs entre le bois et le béton

III.4-2 connexion par connecteurs

Le rapport du CSTC [4] a réalisé beaucoup d'essais, de cisaillement et de flexion, à court et à long terme.

a) Essai de cisaillement à court terme

Un essai de cisaillement consiste à appliquer une charge verticale sur la poutre en bois d'un élément mixte, de manière à engendrer un effort de cisaillement au niveau de la connexion entre les deux matériaux et à mesurer le glissement longitudinal à l'interface bois-béton; le déplacement vertical de la couche de béton est empêché (voir fig III-12).

Cet essai permet de caractériser la collaboration entre le bois et le béton à l'aide de la résistance au cisaillement caractéristique du connecteur et du module de glissement de service (**Kser**) (voir fig III-13).



Fig III-11: Détermination des performances mécaniques en laboratoire.



Fig III-12 : Dispositif d'essai de cisaillement sur échantillon.

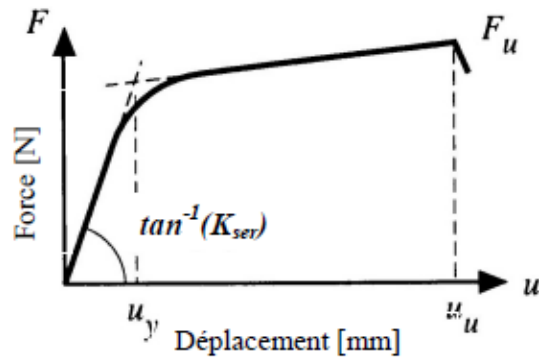


Fig III-13 : Courbe typique lors d'un essai de cisaillement.

Un certain nombre de paramètres, tels que le type de connexion, la section de bois et de béton, le type de matériau ou la présence d'une couche intermédiaire, ont été pris en compte dans la campagne d'essais afin de mettre en évidence leur influence sur le module de glissement K_{ser} et la résistance au cisaillement.

b) Essai de cisaillement à long terme

Les essais de cisaillement à long terme ont permis de déterminer des coefficients de fluage (Les essais ont duré 4000 heures, soit 166 jours, l'épaisseur des dalles en béton était de 70 mm) pour différentes types de connexion soit dans le cas d'un plancher mixte composé d'une couche en béton normal, ou d'un plancher composé d'une couche en béton léger (densité, module d'élasticité ainsi que la résistance à la compression). Ces coefficients sont nécessaires pour prendre en compte l'effet du fluage sur les caractéristiques mécaniques du connecteur. Plus précisément, le module de glissement du connecteur est réduit, à long terme, par un facteur représentant le coefficient de fluage du connecteur.

c) Essais de flexion à court terme

Afin de mettre en évidence l'influence de la collaboration entre le plancher en bois et la couche en béton, des essais de flexion quatre points ont été réalisés sur des échantillons de plancher de 5,70 mètres de portée.

Le graphique de la (fig III-14) présente les courbes « force-déplacement » de trois types de poutres soumises à un essai de flexion quatre points étudiés par [4].

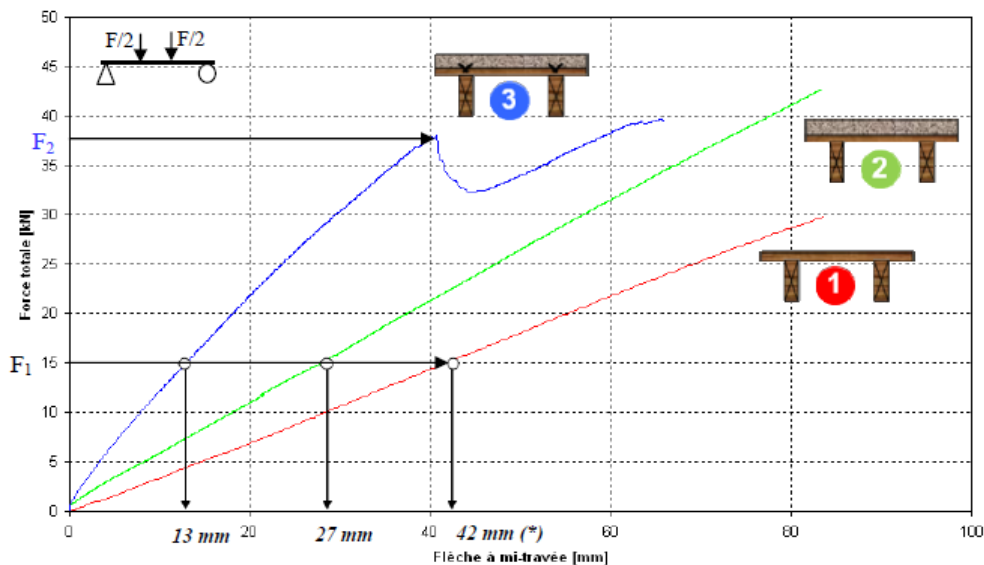


Fig III-14 : Influence des connecteurs (configuration 3) sur la rigidité des poutres mixtes en bois-béton par rapport à la rigidité d'un plancher traditionnel en bois avec chape* (configuration 2) et sans chape (configuration 1).

Globalement, l'ajout de connecteurs permettant la collaboration entre le bois et la couche supérieure en béton ou la chape à l'anhydrite (configuration 3) améliore nettement la rigidité flexionnelle de la poutre (pente des courbes de la (Fig III-14) et réduit ainsi considérablement la flèche sous charge d'exploitation.

Ainsi, pour la configuration testée de poutres mixtes (configuration 3), la première rupture survient par dépassement de la résistance en compression de la chape au niveau des connecteurs (voir fig III-15). Cette rupture peut être observée par la discontinuité sur la courbe «force-déplacement» de la poutre mixte (F2 à la Fig III-14). Au-delà de cette charge de première rupture, la collaboration entre les deux matériaux disparaît progressivement. Le système se comporte alors comme une poutre en bois seule (rigidité équivalant à la configuration 1 : les courbes bleue et rouge deviennent parallèles) et la rupture finale survient par dépassement de la contrainte de traction dans la fibre inférieure de la poutre en bois (voir fig III-16).

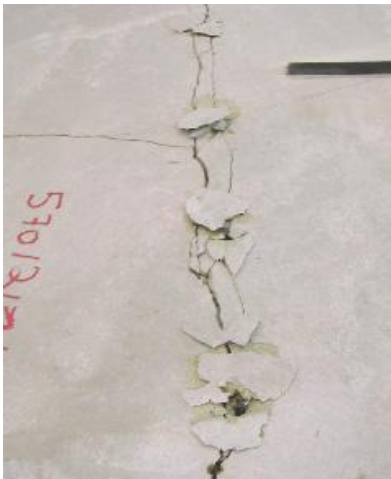


Fig III-15 : Rupture au niveau de la chape



Fig III-16 : Rupture au niveau de la poutre en bois.

d) Essais de flexion de longue durée (étude des effets différés)

Des essais de fluage sur des échantillons de plancher ont été réalisés pendant 425 jours. Durant ces essais, les prototypes ont été soumis à deux niveaux de chargement : un premier de 2 kN/m² représentant la charge et un second de 4 kN/m² (Fig III-17).

Les résultats des essais de fluage sont illustrés à la (Fig III-18), qui présente l'évolution de la flèche en fonction du temps, en incluant les phases de chargement et de déchargement. Le principal paramètre étudié lors de ces essais est le type de béton utilisé dans les poutres mixtes.

Ainsi des essais ont été réalisés pour de longues durées comme le montre la référence [20] où une poutre a été soumise à un chargement d'une durée de 5 années pour permettre d'étudier le raccordement, le glissement et la variation des contraintes au cours de ce temps.

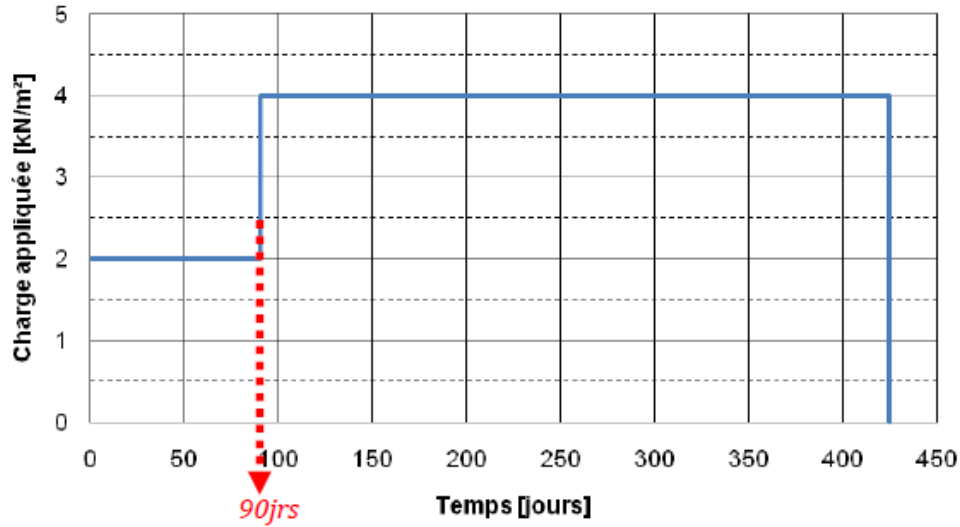


Fig III-17 : Evolution du chargement durant l'essai de fluage.

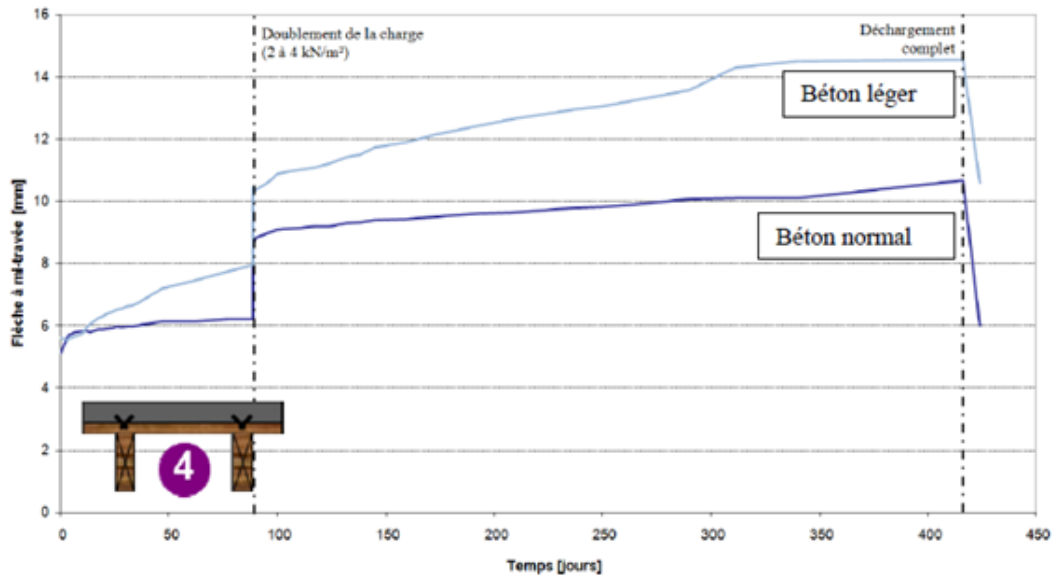


Fig III-18 : Essais de fluage sur les poutres en bois-béton.

On remarque que Le fluage des poutres mixtes comportant du béton léger est plus important que celui constaté sur les poutres mixtes avec du béton normal.

III.4.2-1 Connexion locale

Plusieurs études ont été faites concernant ce type de connexion, à titre d'exemple Bruce L. Deam, Massimo Fragiaco et Andrew H. Buchanan [21] ont effectué des essais sur différents connecteurs (fig III-19).

Number	Picture of the connector	Description	Number	Picture of the connector	Description
1 & 2		type: round plug plug: 48.5 mm diameter 20 mm depth	9		Pryda steel brace anchor with rods placed parallel to the beam axis
3 & 4		type: round plug with screw plug: 48.5 mm diameter 20 mm depth screw: 12 mm diameter 9 mm predrilled 150 mm length 100 mm embedment length	10		Pryda steel brace anchor placed parallel to the beam axis
5 & 6		type: reinforced plug plug: 48.5 mm diameter 20 mm depth pipe: 40 mm length	11		Pryda steel brace anchor placed at a 45° angle to the beam axis
7 & 8		type: rectangular plug with screw plug: 50 mm length 16.5 mm depth screw: 12 mm diameter 9 mm predrilled 150 mm length 103 mm embedment length	12		Pryda steel brace anchor placed perpendicular to the beam axis 4 x $\phi 5,5 \times 45$ mm
			13		Coach screw: 12 mm diameter 9 mm predrilled 165 mm length 115 mm embedment length
			14		Coach screw: 16 mm diameter 12.5 mm predrilled 155 mm length 105 mm embedment length
			15		Pryda framing bracket FB4776'
			16		Inverted Pryda framing bracket FB4776' 6 x $\phi 3 \times 40$ mm
			17		Two SFS screws $\phi 7,5 \times 100$ mm inclined at 45°

Fig III-19 : Les caractéristiques des connecteurs testés

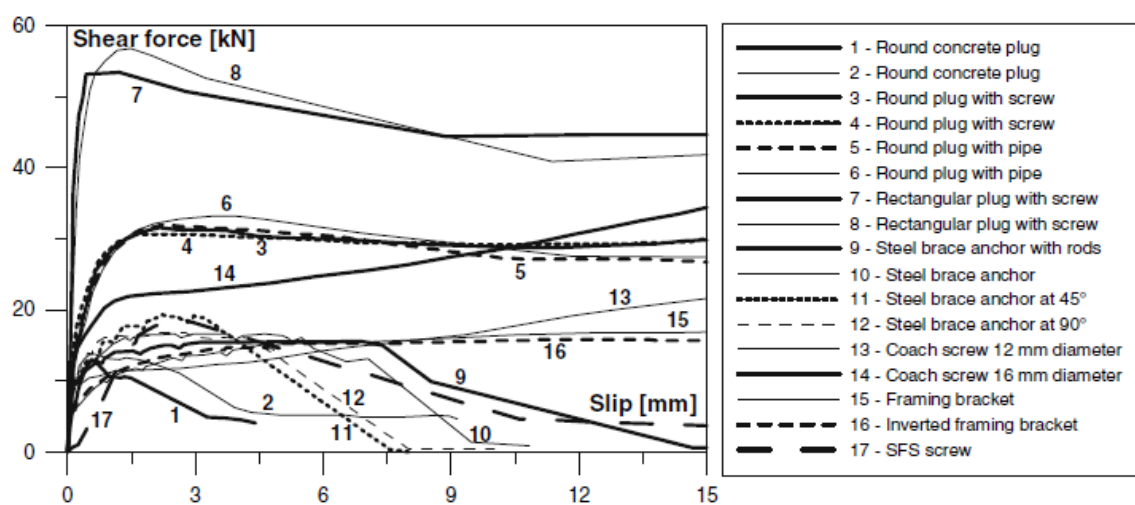


Fig III-20 : Courbe force – glissement pour les essais réalisés [21]



(a) – Specimen 1



(b) – Specimen 3



(c) – Specimen 6



(d) – Specimen 7



(a) – Specimen 16



(b) – Specimen 14

Fig III-21 : Résultats obtenus après essai de destruction sur quelques spécimens

Les spécimens ayant donné les meilleurs résultats (7et8) vont être sélectionnés pour faire d'autres essais à court et a long terme.

En utilisant des sections en I en bois béton dans [22], les connecteurs tubes ont provoqué des fissurations vraiment visibles au niveau du béton, donc un grand glissement comme le montre les figures suivantes.

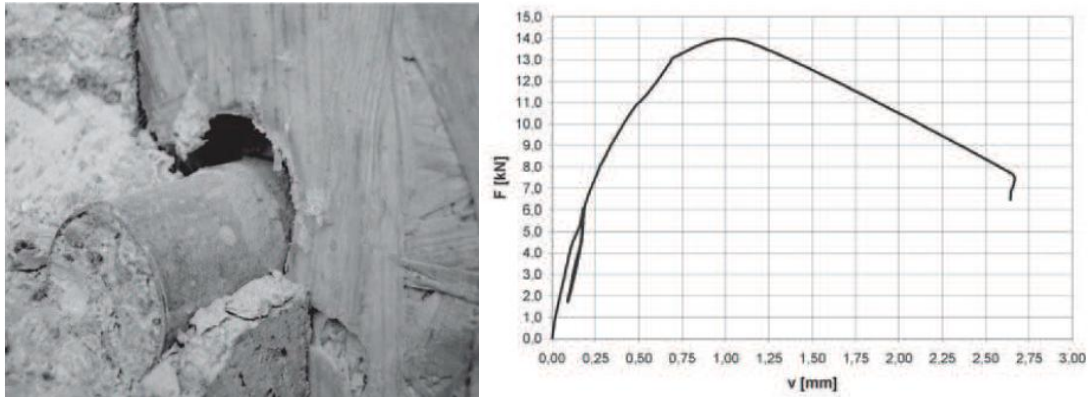


Fig III-22 : Eclatement du béton et la courbe force-déplacement

A son tour : **Laboratory tests of composite wood – concrete beams** a été le lieu de recherche pour les plusieurs fanes de la mixité du bois – béton. Les auteurs de [23] ont essayé de mettre en évidence le phénomène de transmission des charges dans ce matériau composite, les modes de fissuration, courbe flèche et la courbe déplacement en utilisant la section représentée sur la (fig III-23) avec un connecteur de type **HILTI**.

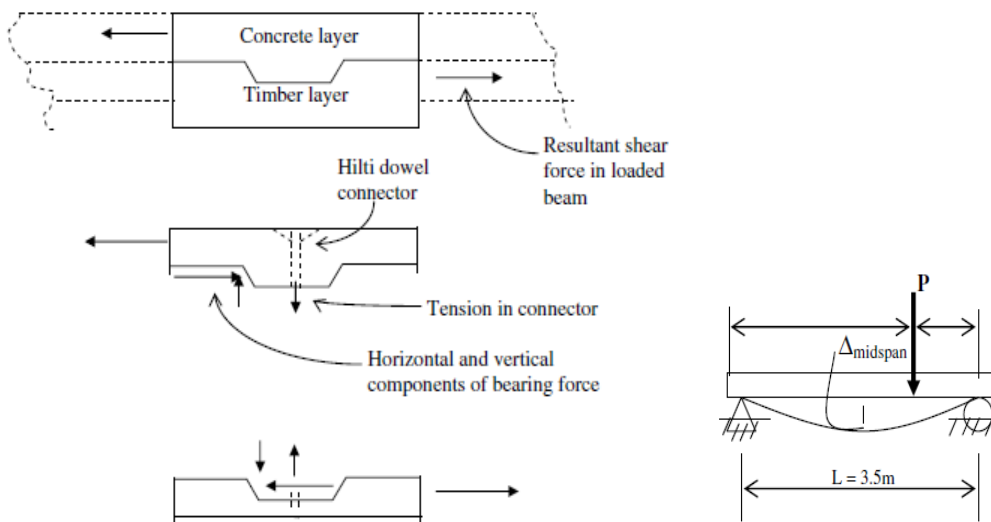


Fig III-23 : Le principe d'essai



Fig III-24 : Rupture de la couche de béton



Fig III-25 : Rupture de la poutre en bois

Quand à **Bathon, Leander A, Graf, Markus [15]**, ils ont développé un modèle mécanique d'analyse non linéaire pour pouvoir comparer les résultats de leur simulation et les résultats obtenus par l'essai de flexion 4 points.

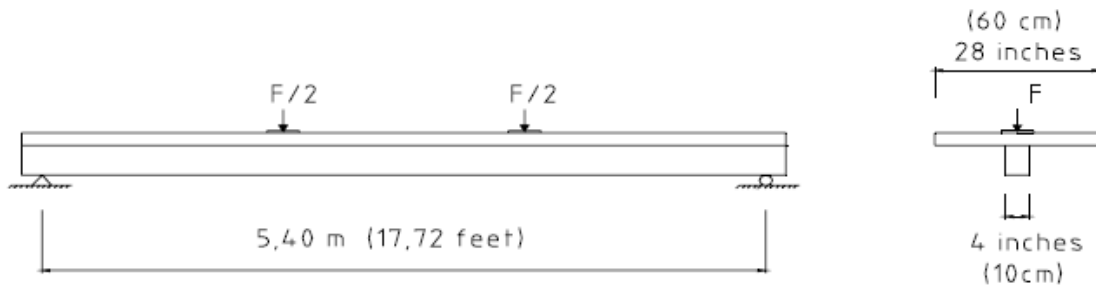


Fig III-26 : Essai de flexion quatre points

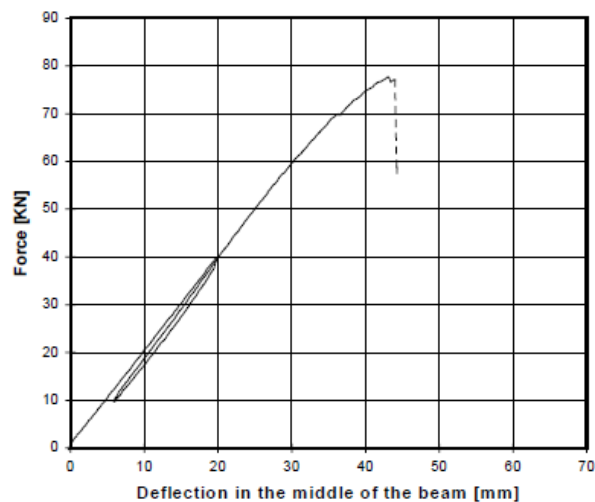


Fig III-27 : Diagramme force-flèche à mi travée

Le connecteur de type Hilti a été l'objet des travaux de **Matthew R. LeBorgne** et **Richard M. Gutkowski [24], [25]**, ils ont pris des poutres soit séparées ou assemblé deux poutres de diamètre différents et donc des couches de béton différentes pour avoir une poutre en bloc (Fig III-29), par la suite ils ont comparé le comportement de ces poutres, leur type de rupture, la localisation et la direction de ces fissures



Fig III-28 : Connecteur Hilti utilisé dans l'essai.



Fig III-29 : Les poutres réalisées pour les essais

Différents types de fissuration ont été apparues sur les deux poutres, tel que montre la (Fig III-30), cependant les diagrammes obtenus par l'essai sur les deux poutres étaient proche en terme de déplacement et de temps.



Fig III-30 : Fissuration dans toutes les directions du bois et béton.

Lors de l'étude de ces connecteurs HILTI une comparaison a été faite par [26] pour pouvoir étudier leurs performances et les résultats obtenus durant les essais.

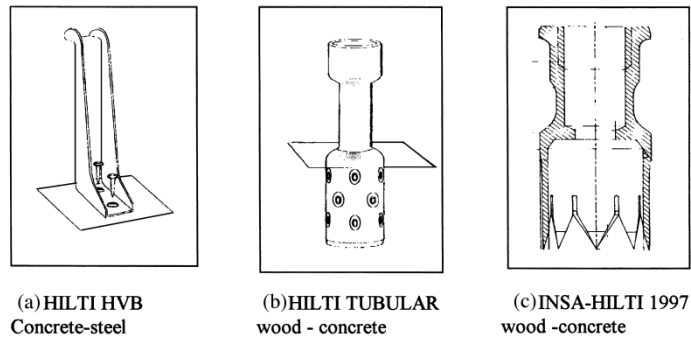


Fig III-31 : Les trois types de connecteurs

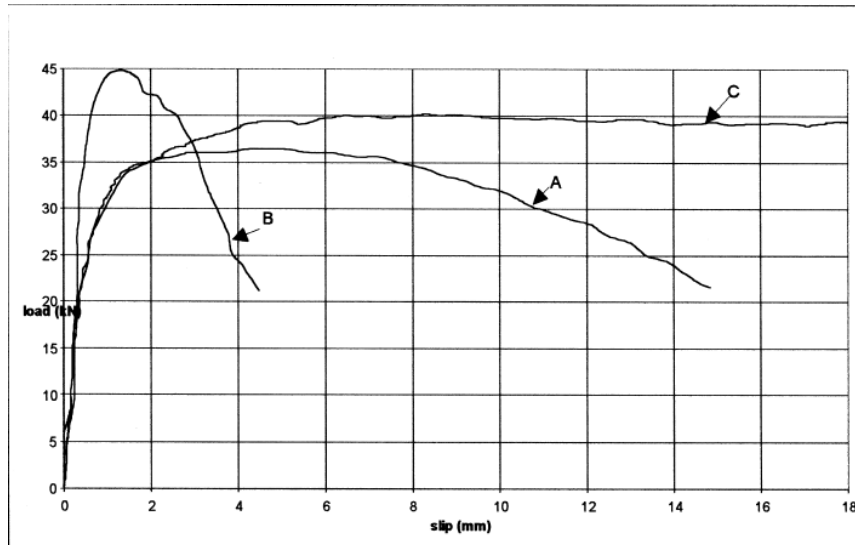


Fig III-32 : Courbe de charge-glissement pour les trois connecteurs

Le résultat d'essai a prouvé que le connecteur INSA-HILTI peut porter une charge uniformément distribuée de $15,6 \text{ kN/m}^2$ avec une flèche a mi travée de 9 millimètre ainsi la charge de rupture était de 145 kN avec un glissement apparent de 0,53 millimètres et donc les meilleurs résultats étaient obtenus par la catégorie C.

Plus loin que ça, d'autres chercheurs se sont intéressés au comportement de ce matériau composite dans les différentes conditions climatiques variables, tels que [12] lors de l'étude du connecteur « **shear crown** », il a déterminé que même si le fluage du béton n'affecte pas autant que celui du bois le comportement différé de la structure, les redistributions de contraintes peuvent induire des fissurations dans la partie inférieure de la dalle. Ce phénomène n'est pas pris en compte dans sa méthode, ce qui conduit à une surestimation de la rigidité et de la résistance de la poutre mixte. On rappelle aussi que cette méthode est adaptée à des structures isostatiques, ce qui limite son champ d'applicabilité.

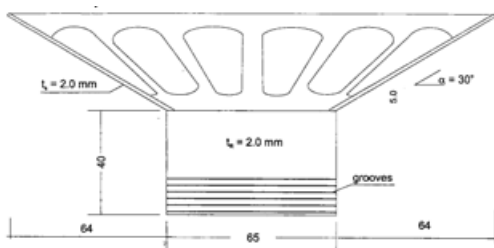


Fig III-33 : Le connecteur « *shear crown* » et son mode de rupture

[27] ont étudié les résultats des essais expérimentales sur une poutre composée bois béton assemblée par collage ayant une longueur de 6 mètres.

La poutre a été chargée pendant 5 ans à l'extérieur. Pendant l'essai de longue durée ils ont enregistré un accroissement dans le déplacement vertical surtout dans les deux premières années, tandis que le mouvement relatif entre la poutre en bois et la structure en béton a augmenté pendant tout le temps d'essai. Les variations de température et d'humidité ont causé une importante variation des deux paramètres sur l'échelle annuelle et journalière.

➤ Connecteur TECNARIA

La mise en place d'une dalle en béton collaborant avec le bois nécessite la présence de systèmes de connexion adéquats qui doivent être en mesure de transférer les efforts de cisaillement entre la dalle et l'ossature en bois.

Les connecteurs évitent le fluage relatif entre les deux matériaux grâce à leur résistance et à leur rigidité ; cette dernière n'est toutefois pas infinie et, dans les planchers mixtes équipés de connecteurs, le fluage, bien que limité, est présent.

Une campagne d'essai a été réalisée pour la détermination du comportement mécanique au cisaillement pur et relevé des courbes charge-déformation sur des joints pour structures mixtes bois-béton réalisés avec des connecteurs Tecnaria type « Base » et type « Maxi ».

En Italie un rapport sur ses essais a été publié [28] en étudiant ces connecteurs base et maxi, 50 éprouvettes ont été réalisées pour étudier ce comportement.

Exécution des essais

L'essai de cisaillement a été effectué en contrôle de vitesse d'application de la charge, selon la procédure décrite dans la figure suivante, où F est la charge appliquée, F_{est} la charge de rupture estimée.

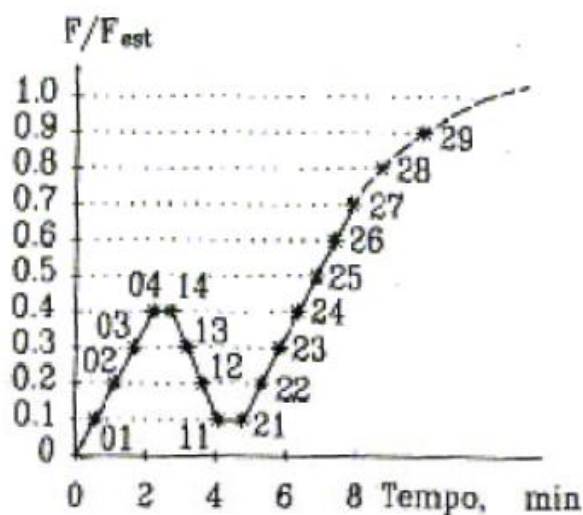


Fig III-34 : Cycle de charge

La charge de rupture F_{max} est celle qui correspond au fluage de 15 mm ou bien à la charge maximale si elle est atteinte avant. F_{est} a été déterminée de manière expérimentale et éventuellement rectifiée au cours des essais (si F_{max} diffère de F_{est} de plus de 20 %). Le fluage relatif de la dalle par rapport au bois a été relevé au moyen d'un couple de transducteurs positionnés comme le montre la (Fig III-35).



Fig III-35 : *Détail du transducteur linéaire pour le relevé du fluage.*



Fig III-36 : *Détail des coffrages, des connecteurs et du treillis métallique d'armature.*



Fig III-37 : *Pose du béton.*

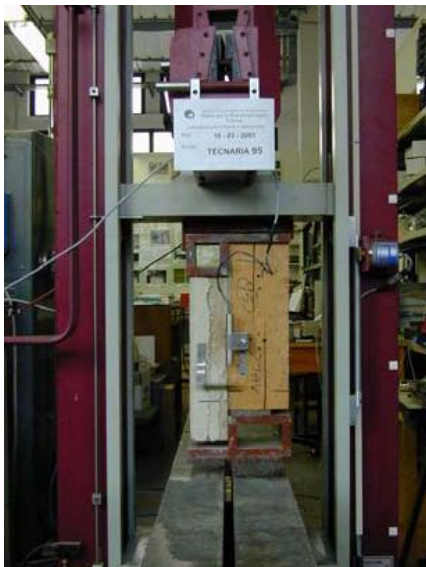


Fig III-38 : *Configuration de l'éprouvette à la fin de l'essai*



Fig III-39 : *Fluage des connecteurs à la fin de l'essai*

Résultats

L'ensemble des résultats des essais est recueilli sous forme de courbes charge/déplacement.

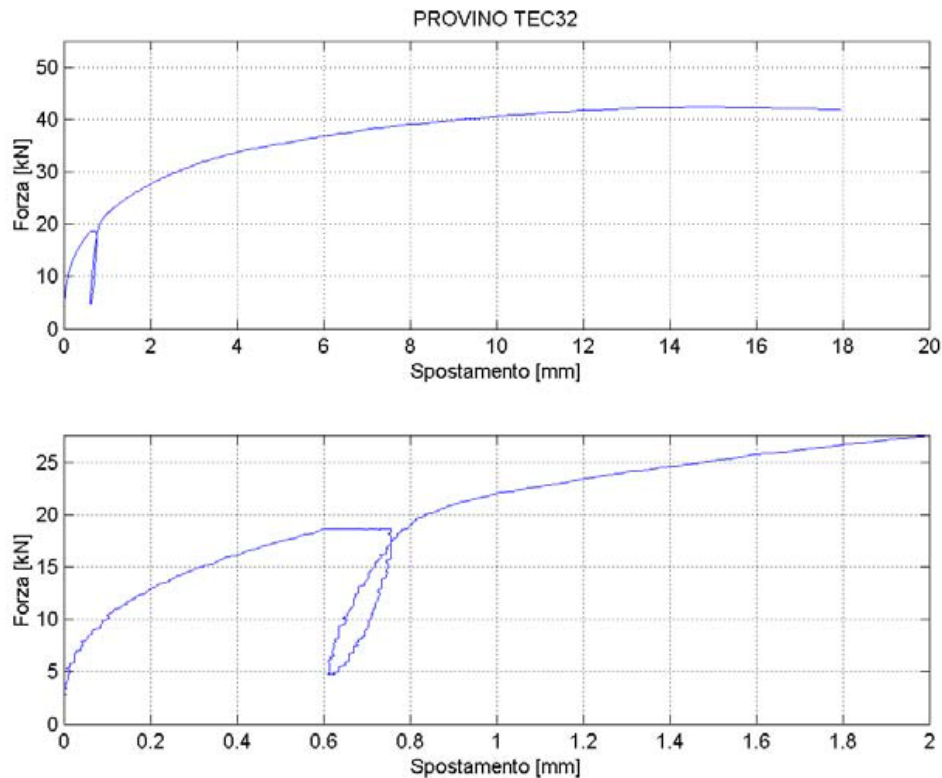


Fig III-40 : Courbe charge /déplacement obtenue par les essais

De leur côté M. Fragiacomio ; C. Amadio ; L. Macorini [29] ont étudié la performance des connecteurs « Tecnaria » à court et à long terme des poutres bois béton.

Les connecteurs SFS à leur tour ont été l'objet d'étude de L.F Jorge ; J Schanzlin ; S.M.R Lopes ; H Cruz ; U Kuhlmann [30], ils ont réalisé beaucoup d'essais pour l'étude de l'influence de certains paramètres tels que : le déplacement, la flèche et déformation en utilisant un chargement léger pendant un temps de 600 jours ainsi pour pouvoir observer le développement de ces paramètres au cours de ce temps, ils ont même défini un coefficient qui est fonction du glissement initial et du glissement final.

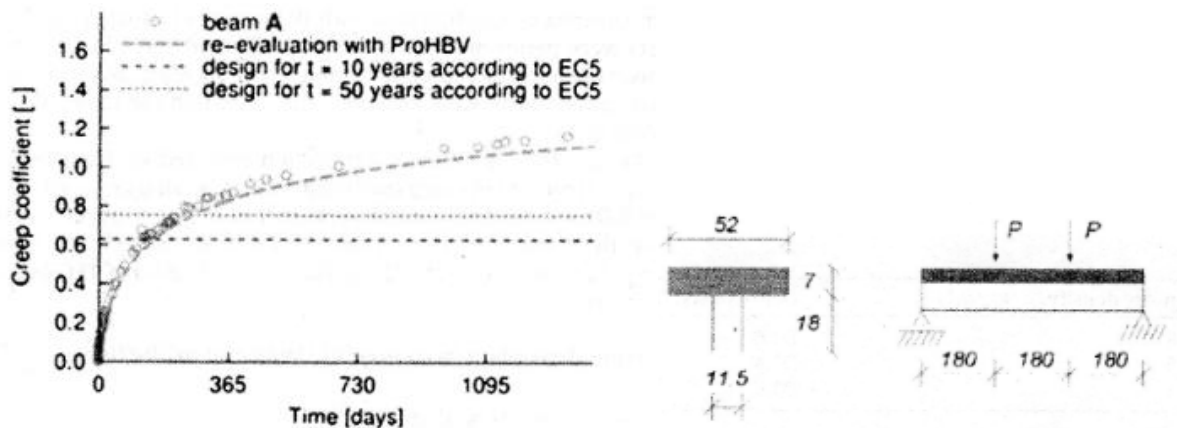


Fig III-41 : Configuration d'essai et le résultat de calcul du coefficient

D'un autre coté, le renforcement des ponts a pu permettre d'observer leur comportement en cour du, [31] ont essayé de prédire la flèche après 50 ans de vie en service. Des essais de fatigue en Allemagne ont été réalisés sur certains ponts et les résultats obtenus sont donnés dans [32] et [33].

III.4.2-2 connexion continu

Concernant ce type de connecteurs (MD - PAP-Ruban- the continuous shear)
 Les observations permettent de distinguer le mode de rupture principal des poutres [9].
 Ce mode de rupture est un décollement du connecteur par rapport au bois, il s'ensuit un développement de la rupture en traction dans le bois et le béton à mi-portée de la poutre (Fig III-42). Ce décollement vient d'une mauvaise mise en place du collage au bois, au contraire, dans la plupart des autres essais, le décollement se passe à un niveau de chargement assez grand.



Fig III- 42: Rupture en traction du bois et du béton

Les résultats d'une recherche expérimentale effectuée sur un élément de raccordement (fig III-43) par les essais de cisaillement. Le système de raccordement s'est composé de plats en acier perforés collés avec l'adhésif époxy. Cinq spécimens ont été faits et examinés sous des forces de cisaillement, comme le montre la courbe charge-glissement.

En outre, le système de raccordement a été évalué au moyen de simulations numériques et le logiciel ANSYS a été employé pour cette fin. Les simulations numériques ont démontré la bonne concordance avec les données expérimentales, particulièrement dans le régime du comportement élastique-linéaire [34].

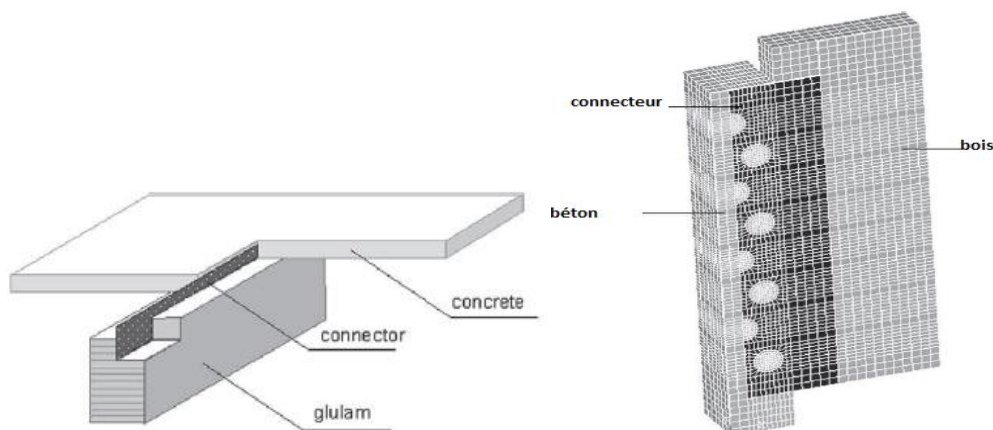


Fig III-43 : Le modèle réel et le modèle simulé avec ANSYS

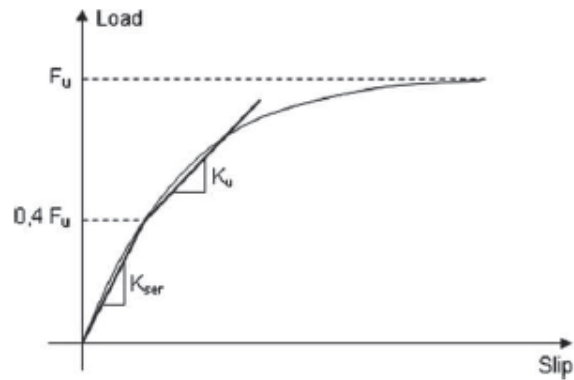


Fig III-44 : La courbe charge-glissement obtenu par l'essai

- ❖ [35] dans leur travaux ont exposé l'effet de la ductilité des connecteurs dans les poutres mixtes bois-béton car ce paramètre n'était pas pris en compte dans l'annexe B de l'eurocode 5 [8], sachant que la ductilité du connecteur participe à la réduction des risques de fissuration du système considéré ainsi que le développement de la déformation ultime du connecteur sous l'effet d'un chargement max. Ainsi même le frottement entre les deux matériaux a été pris en considération en prenant en compte le coefficient de frottement comme s'est mentionné dans [36].

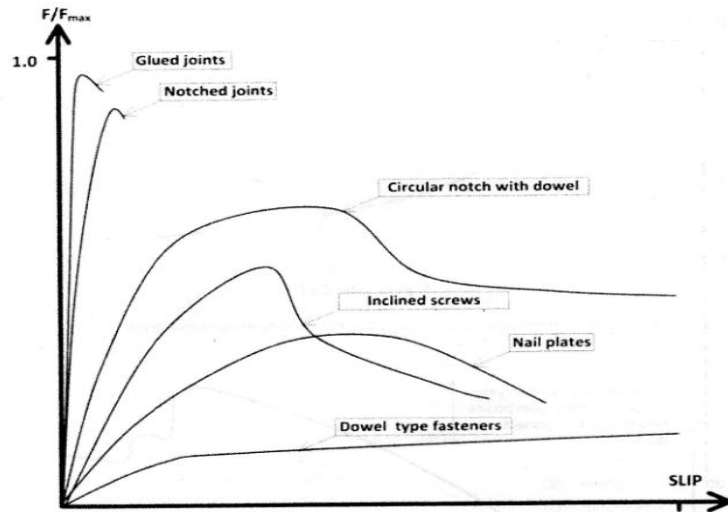


Fig III-45: Diagramme charge-glissement pour les différents types de connexion

La Fig III-46 montre l'effet de la ductilité apporté au niveau du test réalisé sur une section en T et le modèle élément fini à 2D en considérant pour le bois et le béton un comportement linéaire élastique et pour le connecteur un comportement non linéaire.

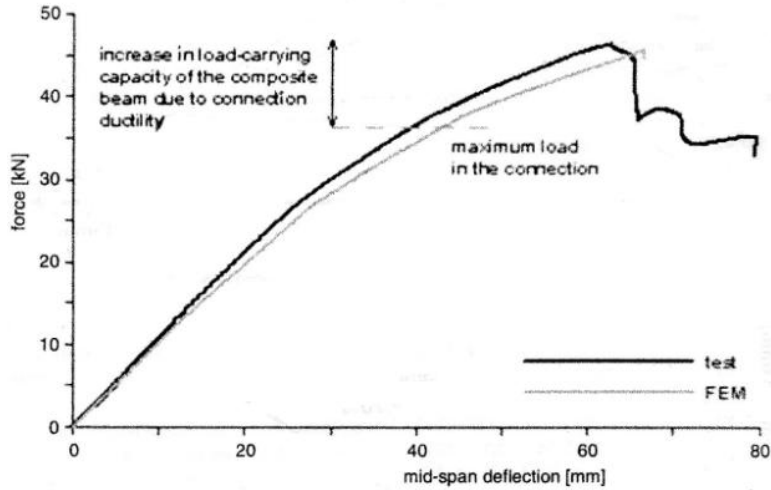


Fig III-46 : Effet de la ductilité sur le glissement de la section mixte

- ❖ Les trois types d'arrangement : béton au centre et bois sur les cotés, bois au centre et béton sur les cotés ainsi que bois et béton (Fig III-47) ont été étudiés par [37], les résultats d'essais obtenus ont fait l'objet de leur travaux en utilisant des connecteurs avec crochets (Fig III-48)

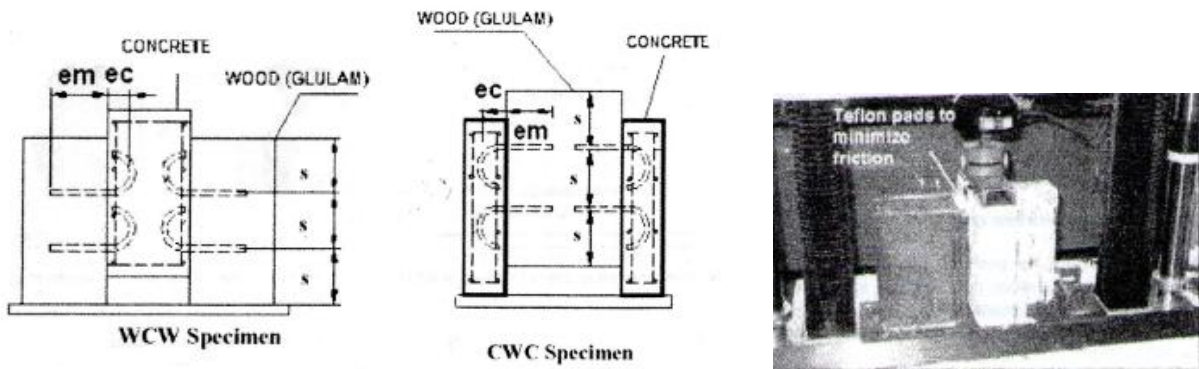


Fig III-47: Effet de la ductilité sur le glissement de la section mixte

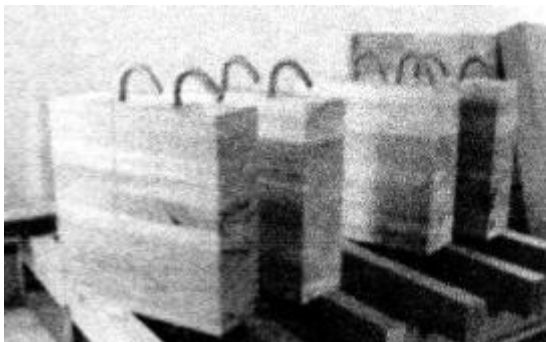
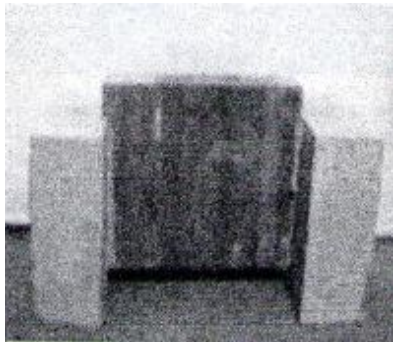
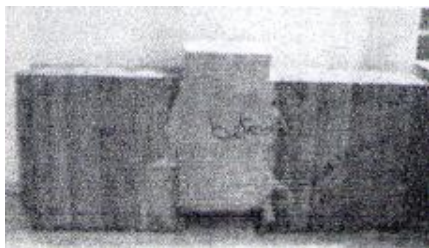
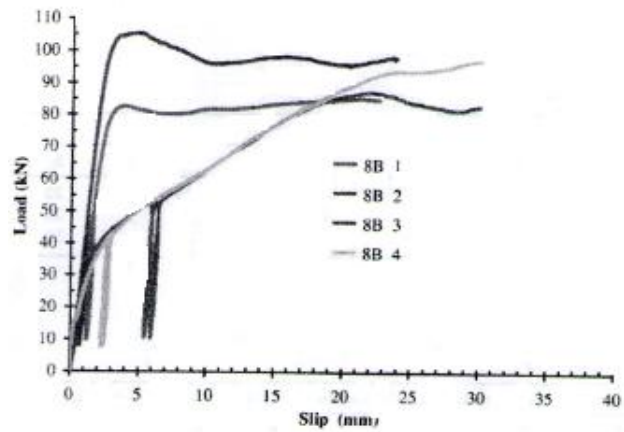


Fig III-48 : Les connecteurs avec crochets

La Fig III-49 représente le diagramme force - glissement obtenus lors de la réalisation d'essais avec les spécimens correspondants et la figure qui suit est celle des différents modes de rupture observés sur ces derniers.



CWC



WCW

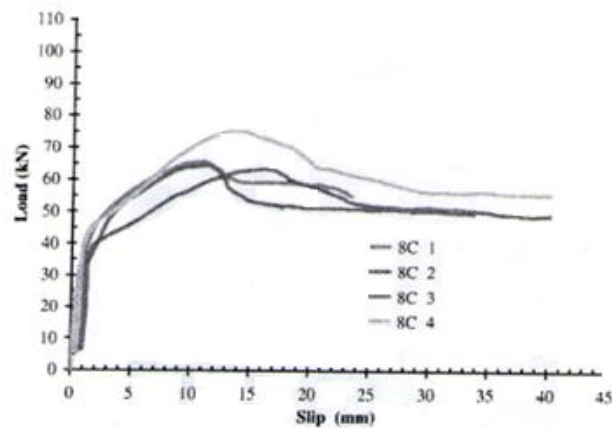


Fig III-49 : Diagramme force glissement pour les deux types de spécimens



Fig III-50: Les différents modes de rupture

- ❖ **A.M.P.G. Dias, J.W Van de Kuilen, S Lopes et H Cruz [38]** ont développé un modèle non linéaire à 3D pour prédire le comportement de la section mixte, en considérant l'acier et béton isotrope et le bois orthotrope vue sa structure interne. Ils ont comparé les résultats obtenus lors d'une simulation numérique (modèle élément fini) ainsi que ceux du laboratoire. Ils ont également étudié la transmission des charges au niveau de l'interface et le glissement max dans la section mixte bois- béton. Les diagrammes contrainte-déformation des trois matériaux, bois, acier et béton ont été représenté pour le modèle simulé et celui réalisé en laboratoire.

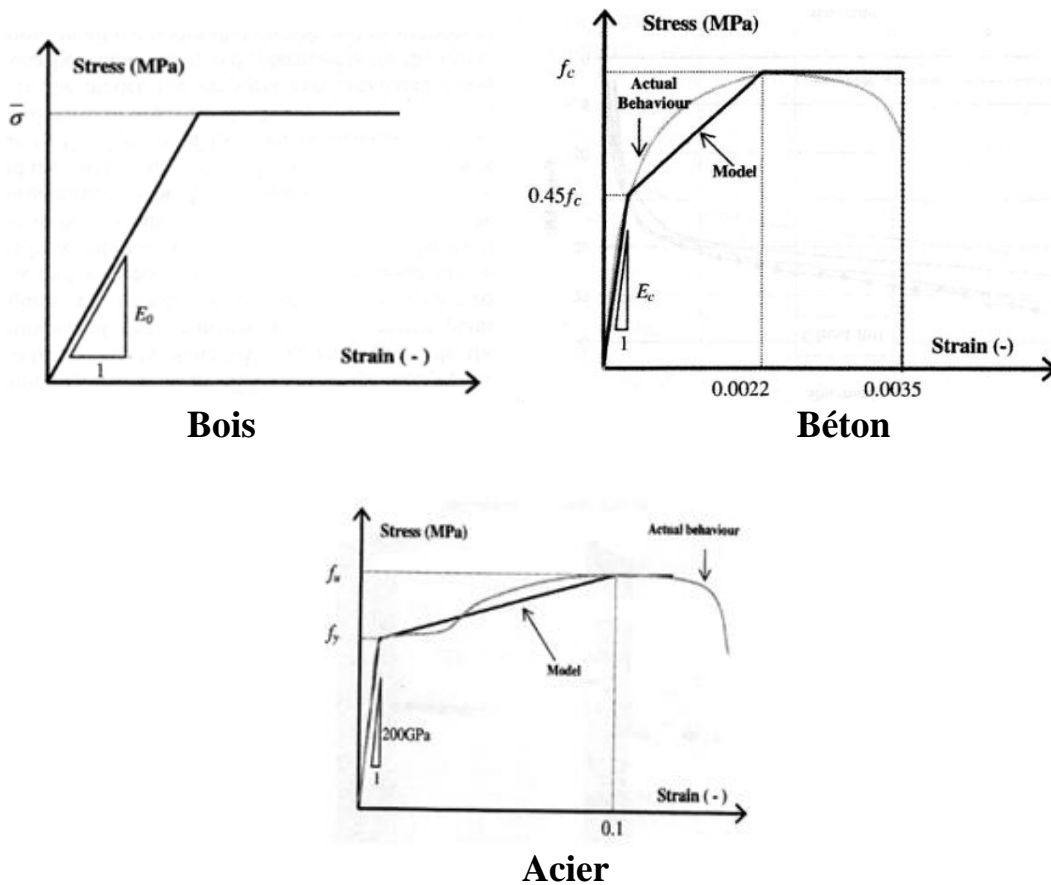


Fig III-51 : Les diagrammes des trois matériaux

- ❖ **Jorge M.Branco, Paulo J.S Cruz et Maurizio Piazza [39]** ont étudié la variation du module de glissement pour le modèle bois-bois donné par l'eurocode 5 et celui proposé dans leur travaux pour le bois – béton (fig III-52)
La (fig III-53) présente le diagramme force glissement obtenu pour les deux spécimens C et C_i

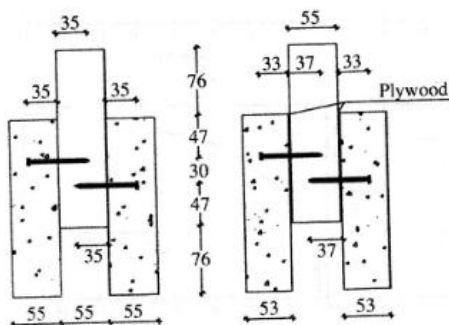


Fig III-52: Les spécimens d'essais

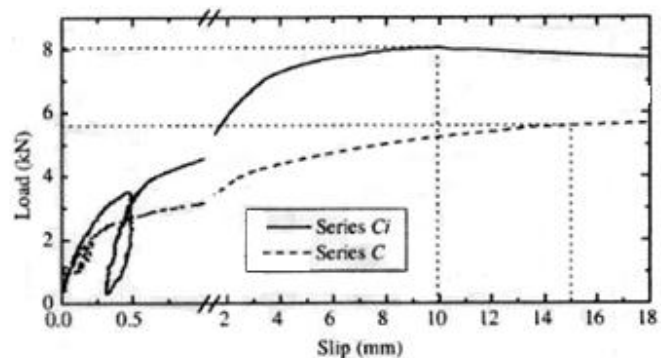


Fig III-53: Le diagramme obtenu pour les deux Spécimens

Ainsi ils ont exposé dans la fig III-54 la comparaison faite pour le module de glissement des résultats d'essais obtenus pour l'EC 5, TURRINI ainsi que CECCOTI.

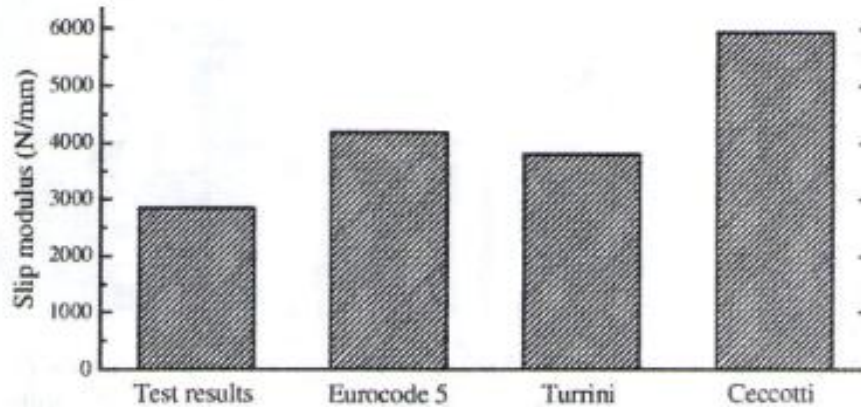


Fig III-54 : La comparaison faite pour les résultats du module de glissement.

- ❖ Plus loin que ça, ces planchers mixtes ont été testés vis-à-vis de la performance dynamique [40] ainsi que statique réalisés in situ ou même préfabriqués [41] pour pouvoir évaluer leur comportement et comparer avec les planchers traditionnels en terme de fréquence et de mode propre de vibration [42],[43].
- ❖ Concernant les fissures causées par le cisaillement le bois peut être traité avec les produits de renforcement **FRP** (fiber-reinforced polymer) grâce à leur efficacité portés par les études de [44] ou une étude comparative a été faite pour la nouvelle possibilité de renforcement des trois matériaux bois, maçonnerie et béton. Pour le matériau béton beaucoup de travaux ont été réalisé dans ce contexte de renforcement FRP, à titre d'exemple on peut citer les travaux de [45], [46].

[47] ont montré qu'en associant une couche de fibre de verre a une poutre en bois lamellé collé a sa partie inférieure (fig III-55) pourra permettre une augmentation moyenne de 28% sur le module de rupture et une diminution moyenne de 57% sur déplacements verticaux.

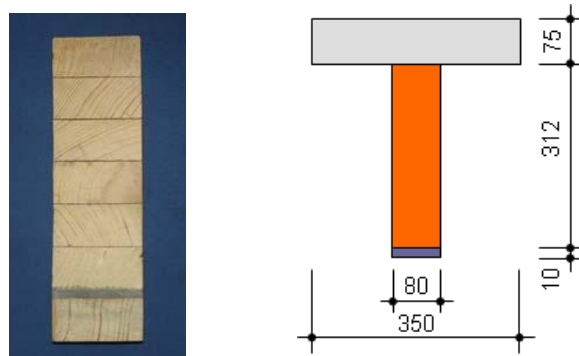


Fig III-55 : La section utilisée lors de l'essai

- ❖ Afin de réduire le cout des constructions faites de bois-béton, on a recours à des techniques d'exécution plus rapides et moins couteuses tel que le domaine de la préfabrication, plus spécifiquement les dalles bois-béton semi préfabriquées [57] ou préfabriquées car sa représente un procédé simple et rentable.

Un programme expérimental [49],[50] a visé d'étudier un certain nombre de différents connecteurs incorporés dans des dalles préfabriquées en béton, des auteurs ont dirigé des essais de cisaillement sur de petits blocs faits de ces dalles, les rapports relatifs de glissement ont été

mesurés et toutes les propriétés mécaniques appropriées telles que les modules de glissement et les résistances au cisaillement ont été calculées.

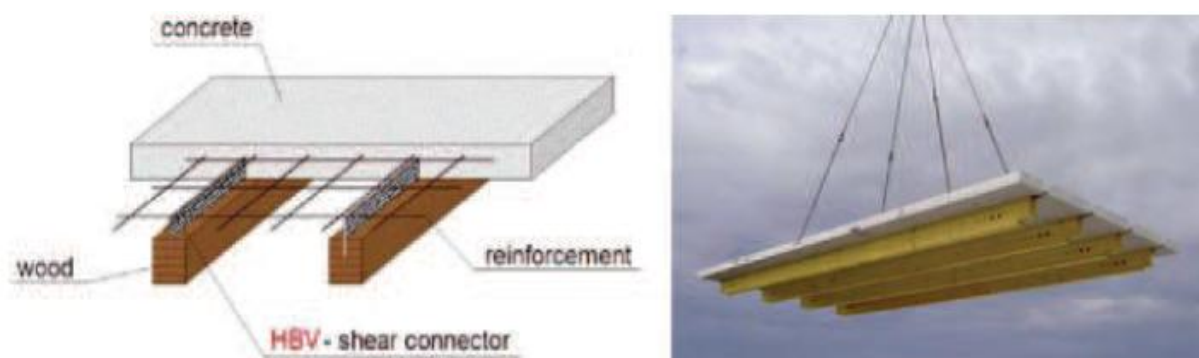


Fig III-56 : Exemple d'un plancher préfabriqué en bois-béton utilisé en ALLEMAGNE

CHAPITRE IV

*Modélisation du comportement non
linéaire des connexions.*

IV.1 Introduction

L'optimisation fine des structures composites nécessite de mettre en place des outils de modélisation du comportement mécanique de plus en plus sophistiqués et prenant en compte les spécificités de ces matériaux-structure. Les points clés à maîtriser sont essentiellement les phénomènes d'interface, tel que le glissement des connexions.

IV.2 Expérimentation sur la connexion bois - béton

Le concept de la structure mixte Bois-Béton dépend surtout de l'état de l'interface entre les deux matériaux. Cette interface est gouvernée par des systèmes de connexion dont la connaissance du comportement est nécessaire pour le dimensionnement. En général, le comportement d'un système de connexion dépend des facteurs suivants :

- Catégorie de connexion, locale ou continue ;
- Morphologie des connecteurs ;
- Profondeur de pénétration des connecteurs dans les matériaux ;
- Disposition des connecteurs à l'interface ;
- Caractéristiques des matériaux ;
- Mode de chargement, monotone ou cyclique.

Plusieurs paramètres interviennent dans le comportement du système de connexion. Une étude théorique n'est donc pas suffisante pour le décrire complètement. L'étude expérimentale est souvent nécessaire. Il existe plusieurs types d'essai pour étudier le comportement des connecteurs, tel que l'essai de cisaillement, l'essai de flexion (trois points ou quatre points) et même les essais de fatigue.

IV.2-1 Essai de cisaillement

L'essai de cisaillement a pour but de déterminer la loi de comportement d'interface et de quantifier l'influence de différents paramètres sur celui-ci. Un état de cisaillement à l'interface est créé, l'état dans lequel se retrouvent les différents systèmes de connexion pour tester leur comportement. Une loi de comportement d'interface est la relation entre l'effort de cisaillement d'interface et le déplacement relatif entre deux matériaux à l'interface appelé aussi le **glissement** d'interface. Le comportement d'interface est généralement composé d'une partie élastique linéaire qui peut être exprimée par la raideur d'interface initiale, K , suivie d'une deuxième partie non linéaire (Fig IV-2). Une connexion complète dans la poutre est obtenue quand K tend vers l'infini et il n'y a pas d'interaction quand K tend vers 0 [9].

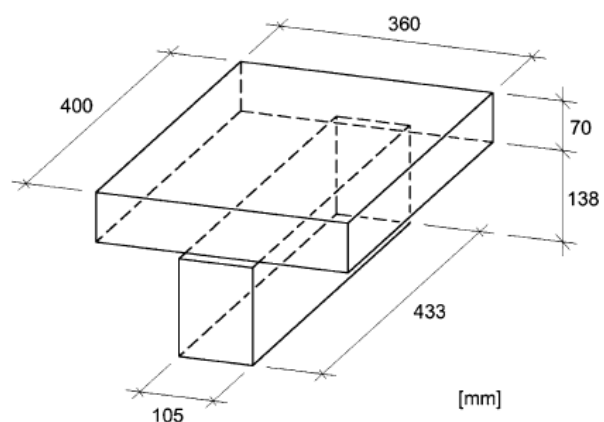
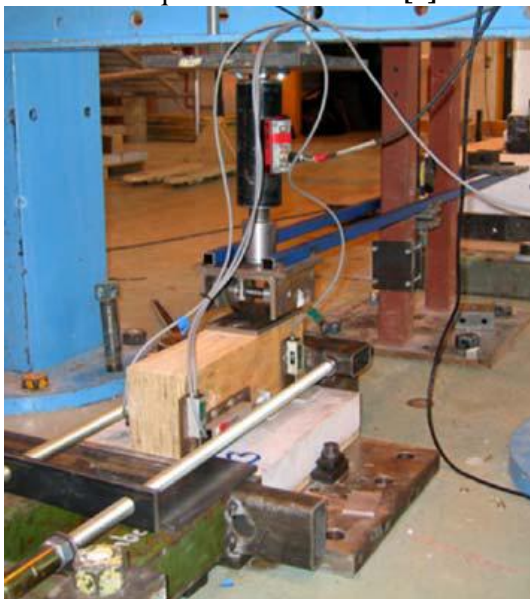


Fig IV-1.a : Essais de cisaillement et le dispositif géométrique

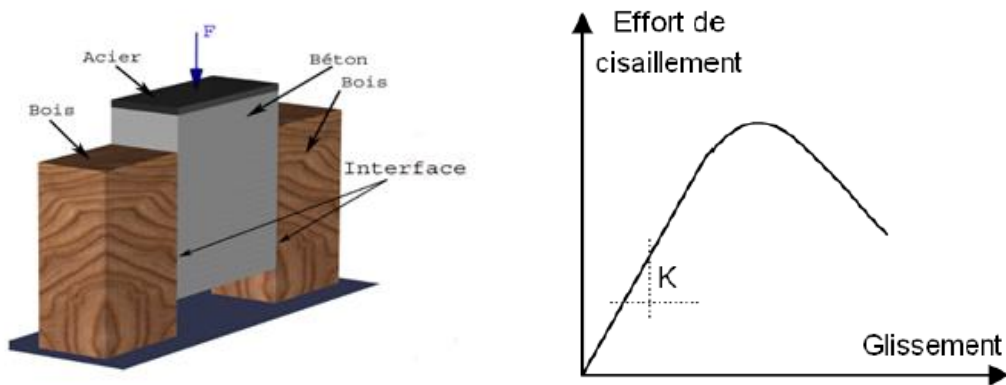


Fig IV-1.b : Essais à double cisaillement

IV. 2-2 Essai en flexion

L'essai en flexion permet de simuler les sollicitations qui sont proches de la réalité sur les systèmes de connexion. L'essai en flexion permet aussi de valider des modèles de structure mixte en prenant en compte le comportement des systèmes de connexion.

IV. 2-3 Essai de fatigue

L'utilisation des structures mixtes bois-béton dans les ouvrages d'art exige la validation des performances des systèmes de connexion sous l'action de charges cycliques. Il existe plusieurs procédures de réalisation des essais de fatigue. Les éprouvettes de cisaillement conçues initialement pour la réalisation d'essais statiques sont souvent utilisées pour de tels essais. Ces essais permettent de déterminer la résistance résiduelle et aussi les modes de rupture des connecteurs. Il est aussi possible de réaliser des essais en flexion pour étudier la tenue en fatigue des éléments structuraux dont les systèmes de connexion.

Des poutres bois-béton ont été testées sous l'action cyclique et par conséquent ont montré que la raideur en flexion de ces poutre diminue progressivement [9].

IV. 3 Effet apporté par la connexion bois béton (action composite)

Soit une poutre fléchie simplement appuyée, constituée de deux sections rectangulaires superposées de hauteur équivalente et d'un matériau identique, respectivement sans connexion dans le cas (a) et parfaitement solidarisiées dans le cas (b).

Afin de comprendre le rôle joué par ces connecteurs, il paraît intéressant de représenter le comportement d'une poutre simple soumise à flexion telle que celle illustrée.

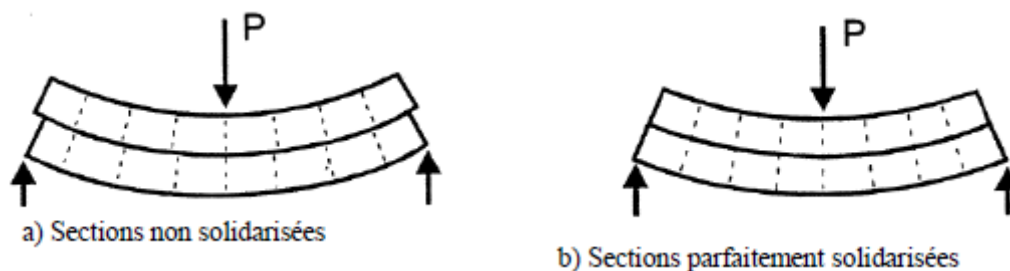


Fig IV-2 : Représentation schématique du rôle joué par des connecteurs dans une poutre simple

Si on admet un comportement élastique, il est aisé de montrer qu'à moment de flexion équivalent, la présence d'une liaison parfaite entre les deux composants réduit les contraintes normales maximales de moitié et divise la flèche par quatre tel que l'illustre [4], [51], [24] et [52].

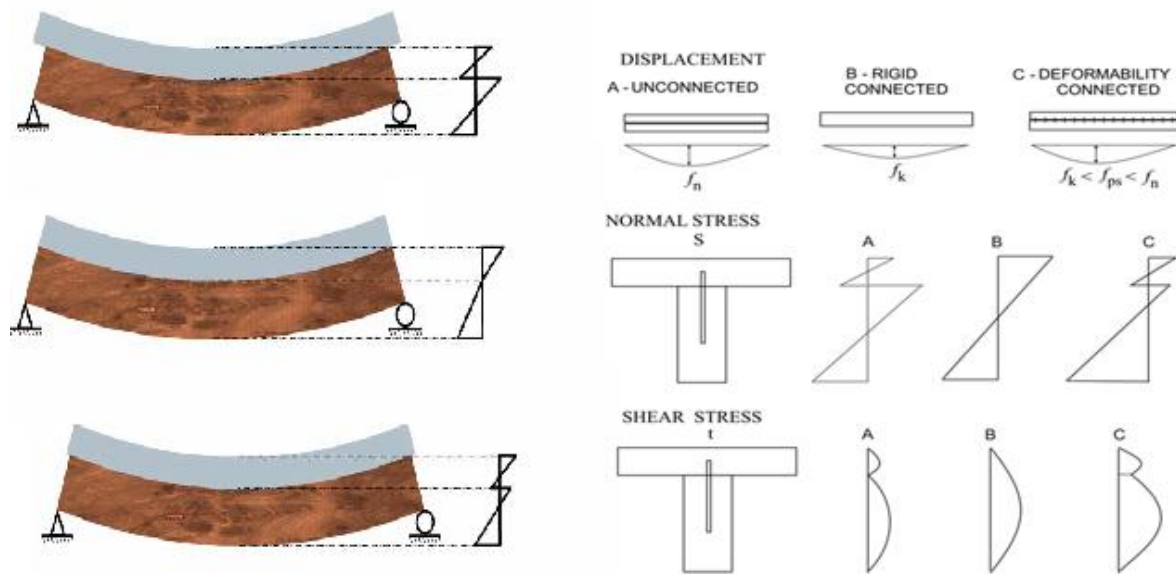


Fig IV-3: Effets des actions composites

Ainsi, une façon économique d'augmenter la résistance et la rigidité en flexion d'un plancher en bois consiste à connecter mécaniquement une dalle en béton au plancher en bois existant. Comme l'illustre la Fig IV-6, la contribution des connecteurs permet notamment de diminuer l'ensemble des contraintes dans les deux matériaux (mais surtout dans le bois), afin d'exploiter ces derniers de manière optimale, donc les connecteurs permettent de transférer les efforts (de cisaillement) entre le bois et le béton.

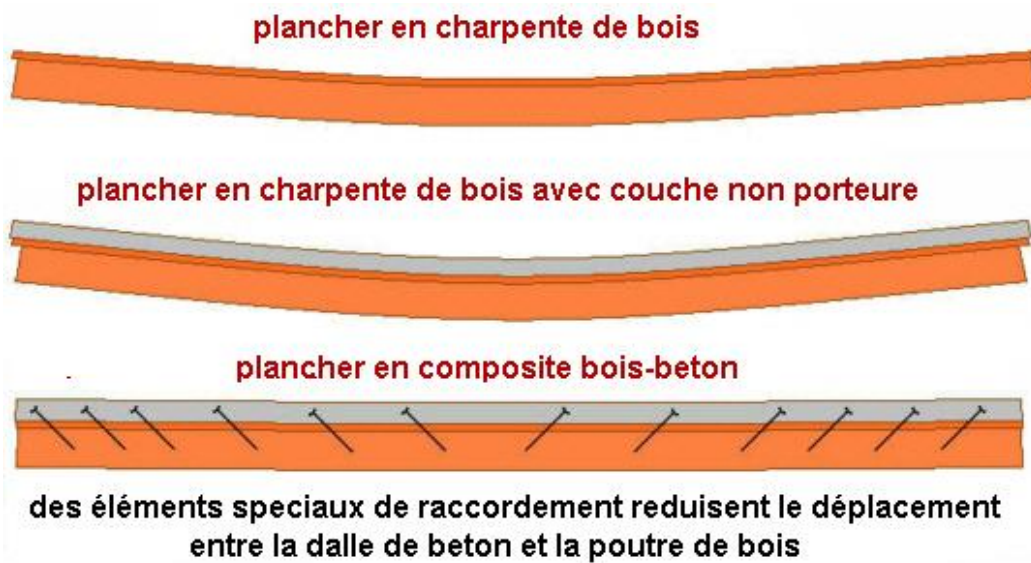


Fig IV-4 : Le rôle des connecteurs [5]

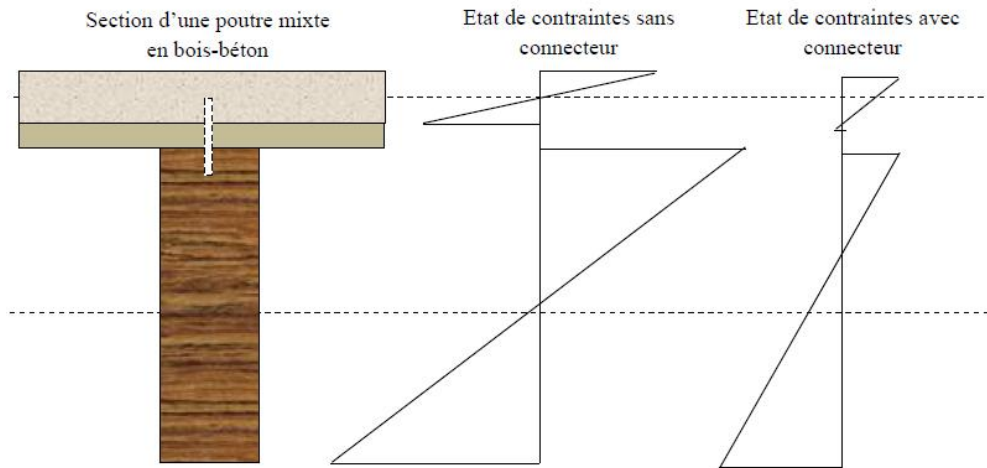


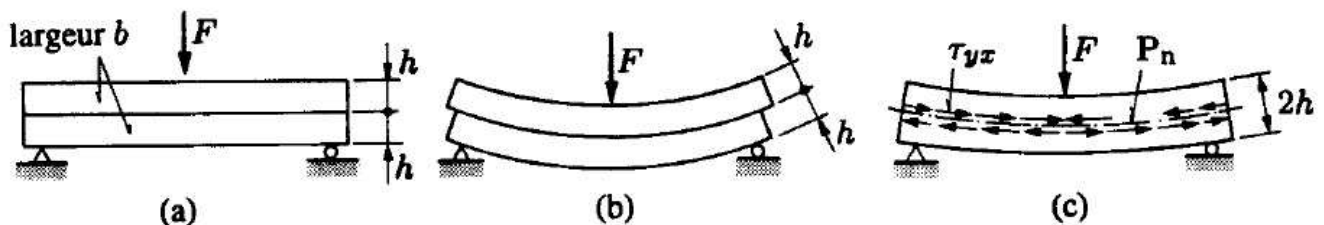
Fig IV-5 : Etat de contraintes sans connecteur et avec connecteur dans une poutre mixte en bois-béton [4]

Concrètement, la dalle en béton remplie, en travée, la fonction de table de compression, alors que la poutre en bois, située dans la partie inférieure, est essentiellement tendue. Par conséquent, les deux matériaux sont soumis à des contraintes en parfait accord avec leurs meilleures propriétés pour former une dalle nervurée. Dans le cas où la poutre est continue sur appuis, la participation de la dalle à la résistance est obtenue par une armature supérieure capable de reprendre les efforts de traction, la poutre en bois étant alors partiellement comprimée.

Pour obtenir l'effet mixte souhaité, c'est-à-dire une collaboration optimale entre le bois et le béton, il convient que la liaison entre la poutre et la dalle soit réalisée de façon à transmettre les efforts rasants et à limiter les glissements à l'interface. Sans liaison, les solives en bois doivent supporter à elles seules toutes les charges. Par contre, si une connexion est mise en place, on réalise une poutre mixte dont la rigidité est sensiblement accrue. Pratiquement, pour assurer cet effet mixte, un étaielement est nécessaire durant la phase de construction jusqu'à la prise du béton. L'utilisation du plancher mixte en bois-béton peut constituer, dans certains cas, une solution économique, tant en construction neuve qu'en rénovation.

➤ Le glissement

Un exemple simple permet d'illustrer le phénomène de glissement. Si l'on considère une poutre droite, de largeur b et de retombée (hauteur) $2h$, sollicitée en flexion 3 points et en supposant que toutes les conditions soient réunies pour l'application de la théorie des poutres [53] la contrainte de cisaillement (ou effort rasant) est déterminée par la relation de réciprocité $\tau_{yx} = \tau_{xy}$ et par l'effort tranchant $T = \int_S \tau_{xy} dS$. [54]



- a) disposition de la poutre
- b) lames superposées
- c) lames collées avec contraintes internes de cisaillement

Fig IV-6 : Mise en évidence du cisaillement dans une poutre en flexion

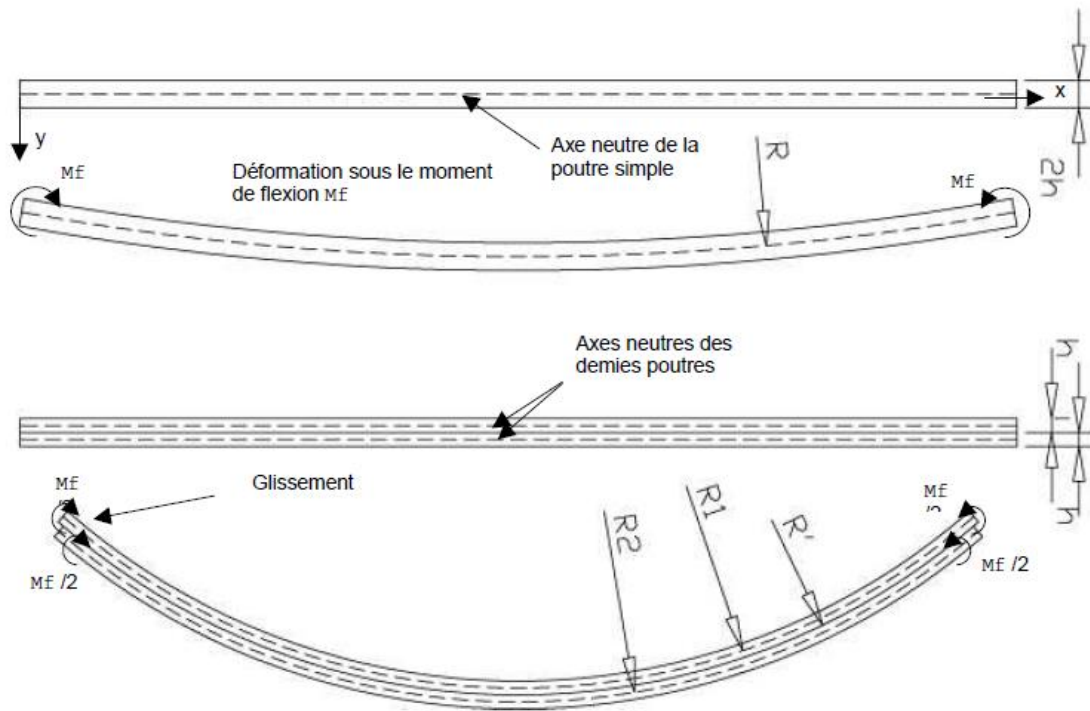


Fig IV-7 : Mise en évidence du glissement observé sur un bilame en flexion [54]

Les connecteurs ne présentent pas de jeu d'assemblage initial. Ils devraient donc limiter ces glissements et donner un comportement en flexion plus rigide que pour les planchers traditionnels. Dans la pratique, une poutre, constituée de plusieurs couches avec des joints de discontinuité et des efforts variablement répartis, présentera des zones dans lesquelles les connecteurs travailleront en arrachement. Cet organe n'étant pas adapté à la reprise de ce genre de sollicitation, ils devront être utilisés aux bons endroits pour que les lames ne s'écartent pas.

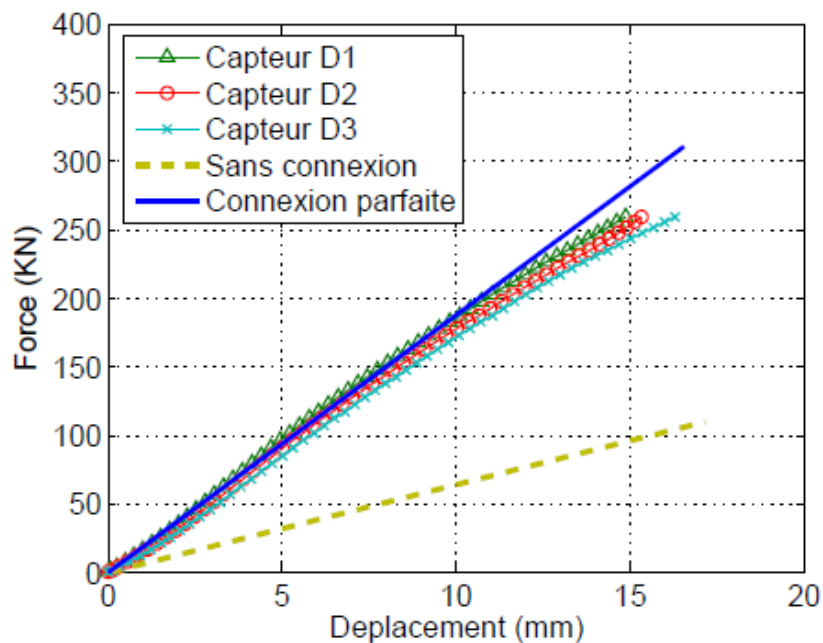


Fig IV-8 : Courbe force – déplacement [9]

IV. 4 Les étapes des travaux réalisés

Les présents travaux de recherche se concentrent donc sur l'étude du rôle du connecteur comme moyen d'empêcher le glissement relatif des deux sections en flexion ainsi que l'étude de l'influence des espacements de ces connecteurs.

Notre travail va être réparti en trois grands axes :

- **Le premier axe** : Programmation sous Excel suivant le règlement **EC5 [8]**
- **Le deuxième axe** : Résultats des essais expérimentaux réalisés.
- **Le troisième axe** : Simulation numérique et modélisation avec le logiciel **ABAQUS**.

Dans cette partie nous avons étudié deux modèles de poutres d'un plancher mixte bois béton d'une longueur L fixe avec les mêmes caractéristiques géométriques et mécaniques. Pour la première poutre nous avons utilisé 3 connecteurs d'un espacement moyen de 30cm, pour la deuxième poutre nous avons utilisé 7 connecteurs avec un espacement moyen de 15cm le montre la Fig IV-9

a- Les caractéristiques et la géométrie de la poutre utilisée :

Nous avons travaillé par rapport à la classe de **service 1** pour un bois massif de classe **C24** à 12 % d'humidité [EC5]:

$h_1 = 70\text{mm}$ $E_1 = 31000\text{Mpa}$
 $b_1 = 500\text{mm}$
 $h_2 = 150\text{mm}$
 $b_2 = 100\text{mm}$
 $L = 1\text{m}$

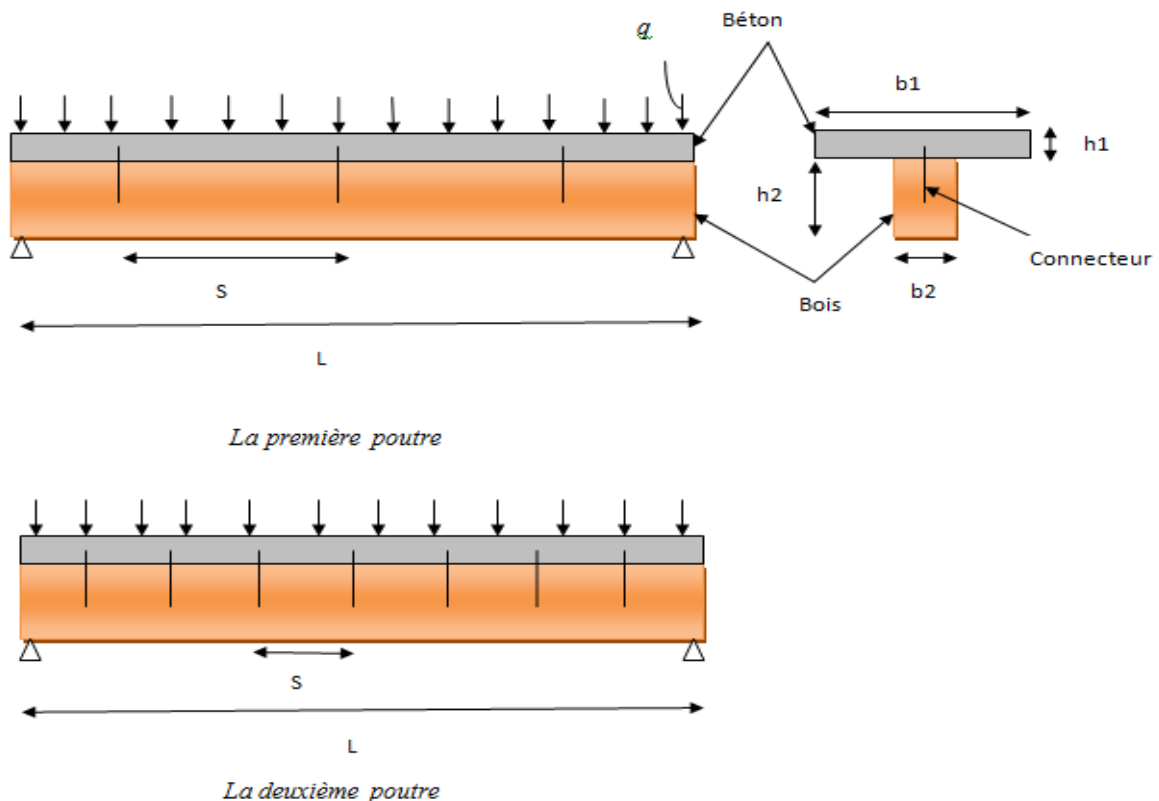


Fig IV-9 : Schéma de la poutre chargée uniformément

Nous allons évaluer les différentes courbes de glissement obtenues pour les trois parties, nous les comparons pour voir si il y a concordance ou pas tant pour le glissement et tant pour la validation de la théorie des modes de rupture pour les assemblages a simple cisaillement exposé dans l'eurocode 5[8], ainsi tirer des résultats concernant notre recherche et donner à la fin quelques perspectives.

IV.4 -1 Calcul sous EXCEL suivant les règles de l'EUROCODE 5 (Partie 1)

IV.4 -1-1 Appuis

Un plancher composé de poutres et de dalles est conçu pour être porté par deux murs, la liaison entre le mur et le plancher est une liaison rigide donc on pourrait dire que cette dernière est un encastrement, mais ceci entraînerait l'existence d'aucun mouvement relatif entre le mur et le plancher. Ce qui n'est pas possible pour un plancher mixte bois-béton, car les poutres en bois même si elles sont encastrees lors de la mise en œuvre, le bois subit un gonflement et un retrait en fonction de la température et de l'humidité donc au bout d'un certain temps le bois ne sera plus encastre dans le mur.

Il est plus simple d'admettre la possibilité de l'existence d'une petite rotation que l'on prend en compte dans le calcul [55], de ce fait il n'est pas exigé d'effectuer une liaison couteuse et complexe surtout que l'avantage d'un tel système est le cout et la rapidité de mise en œuvre.

De plus, on se place dans le sens de la sécurité, car au niveau de la flèche, celle-ci est plus importante avec des appuis simples qu'avec des encastremets.

Donc, on a modélisé le plancher comme une poutre reposant sur **deux appuis simples** car il n'y a pas de force horizontale qui vient interférer dans les calculs (pas de flexion composée).

Notre modèle est composé de deux appuis simples donc notre modèle est isostatique. Cette modélisation nous permet des calculs plus simples et plus rapides.

IV.4 -1-2 Comportement, traction compression

Un plancher travaille en flexion, c'est-à-dire que la fibre inferieure est tendue et que la fibre supérieure est comprimée. La limite se situe à l'axe neutre qui dépend des différents paramètres de la structure ainsi que du chargement. Dans le cas d'un plancher mixte, la partie en bois est donc généralement tendue alors que la partie en béton est plutôt comprimée.

Une poutre en bois soumise a de la compression ou de la traction travaille dans le sens des fibres lui conférant une bonne résistance mécanique dans ces deux types de sollicitations.

Quant au béton, celui-ci possède une très bonne résistance en compression de l'ordre de 25MPa alors que sa résistance en traction est ridicule environ 10 fois plus petite. De plus en traction, il se fissure ce qui entraine des désordres dans la structure, car cela réduit la section de béton utilisé. Ainsi dans un plancher mixte bois-béton la sollicitation en traction est laissée de préférence au bois.

Modes de rupture (bois sans nœud)

→ **Sens axial** (sens du fil)

- Compression

Rupture ductile non localisée (glissement et flambement des fibres)

Forte influence de l'humidité (ponts hydrogènes)

- Traction

Rupture fragile localisée (déchirement des fibres)

Faible influence de l'humidité

- Flexion

Rupture ductile ou fragile selon le rapport $f_{t,0} / f_{c,0}$

→ **Sens transversal** (perpendiculaire au fil)

Compression : pincement des fibres

Traction : déchirement interpariétal

→ **Cisaillement longitudinal**

Glissement des fibres

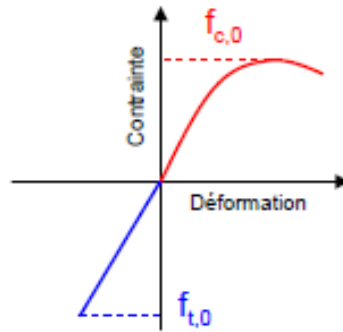


Fig IV-10: Comportement mécanique du bois [56]

IV.4 -1-3 Méthode de calcul simplifiée pour le calcul des planchers :

Sur la base de toutes les bibliographies explicités et de la théorie des **Eurocodes 2** [8](béton) et **5[57]** (bois), l'objectif était de mettre sur pied un modèle de calcul des planchers mixtes en bois-béton. Ce modèle permet de calculer tous les paramètres nécessaires rapidement pour tout type de plancher mixte en bois-béton, au état limite ultime (rupture dans le bois, le béton ou les connecteurs).

Le modèle calcul du plancher mixte en bois-béton est développé sous forme de programme Excel et suit les étapes énumérées dans l'organigramme, (Fig IV-11). Beaucoup d'exemples pratiques de calcul détaillés sont fournis dans les références **[58], [14] [4], [59], [8]**.

Ce modèle suppose que le comportement de tous les matériaux soit élastique jusqu'à la rupture (domaine élastique linéaire). Il fournit des résultats en concordance avec les résultats expérimentaux.

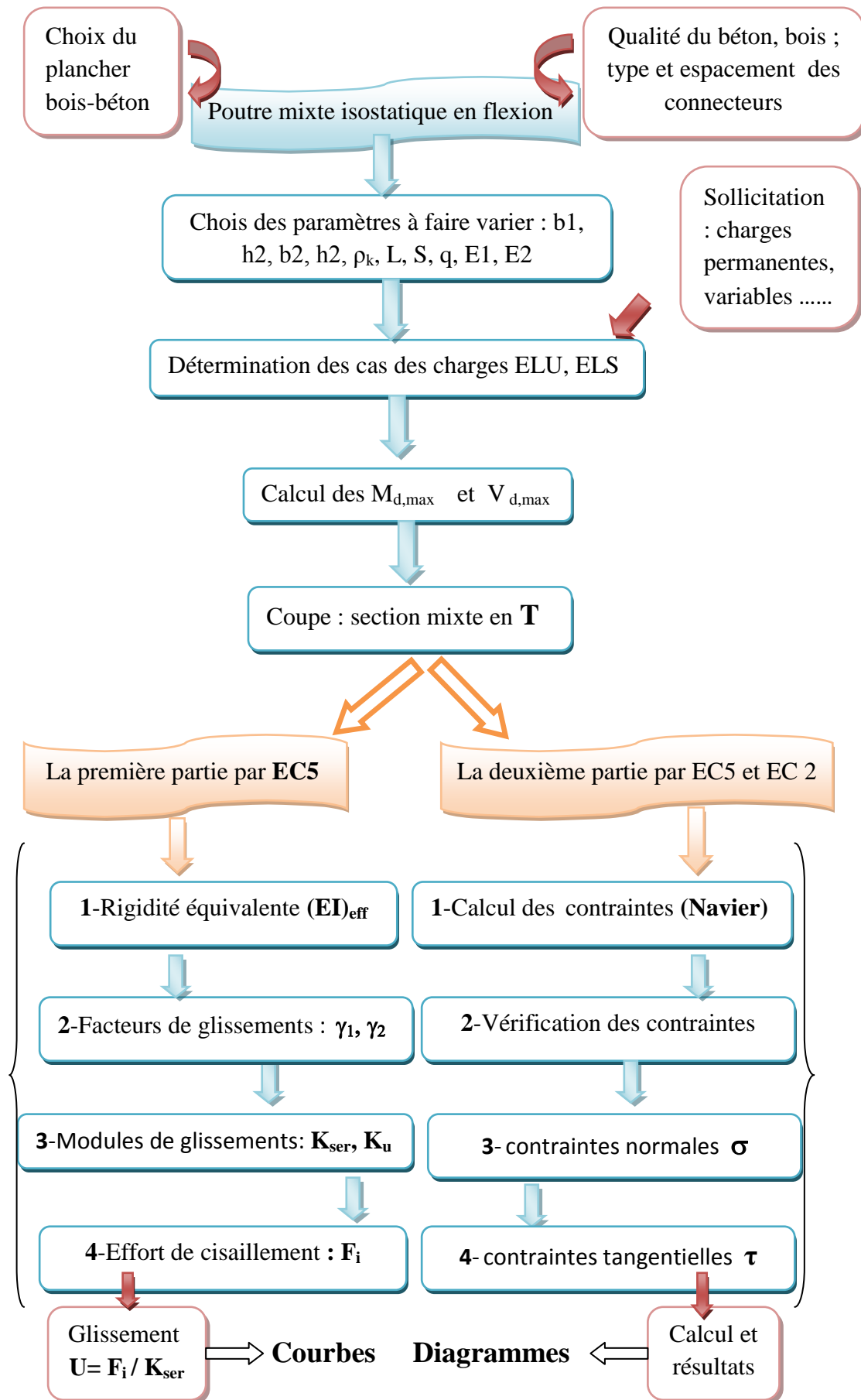


Fig IV- 11: Organigramme de calcul d'un plancher mixte bois-béton Suivant EC5

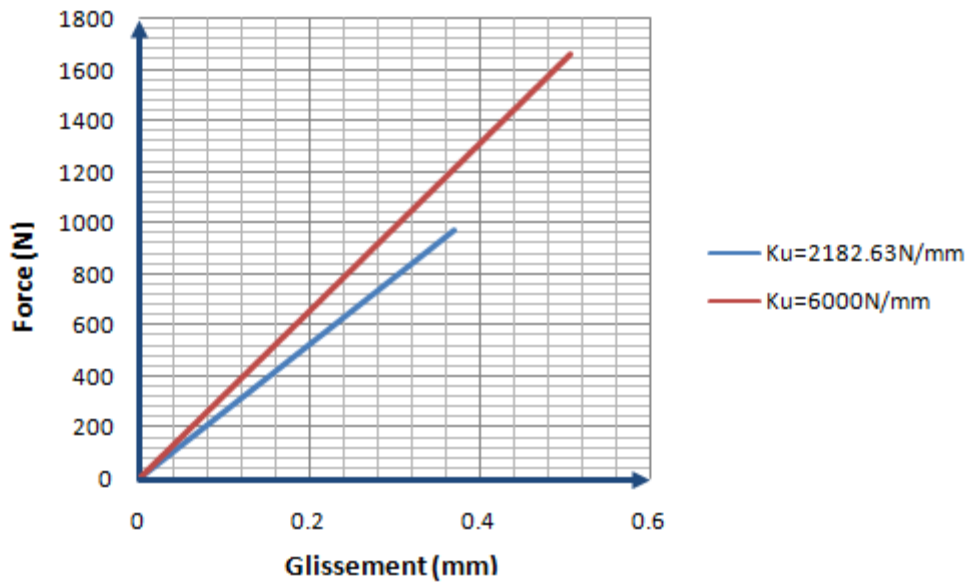


Fig IV-12: Courbe force-glissement pour une poutre de portée de 4m

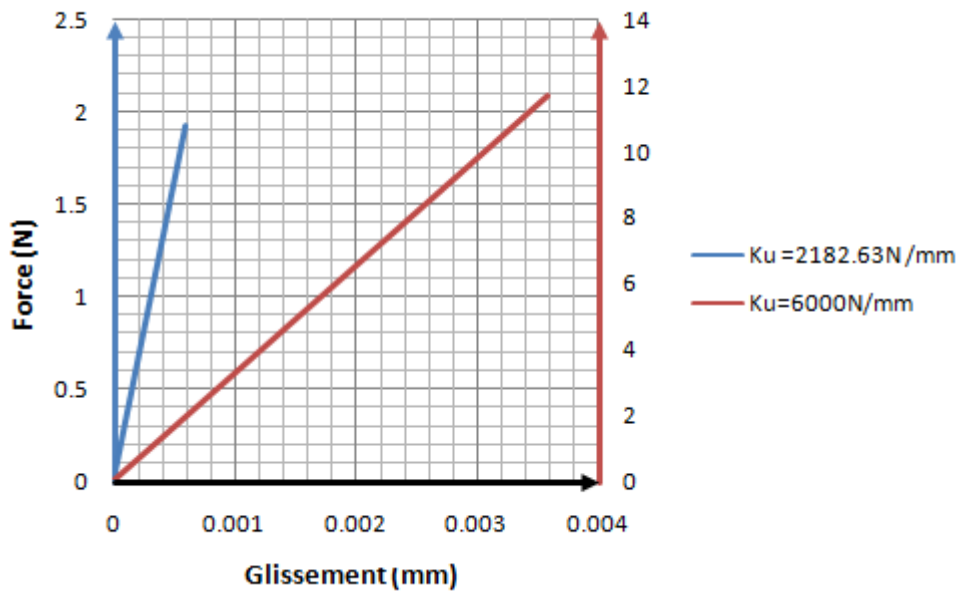


Fig IV-13 : Coube force-glissement pour une poutre de 1m

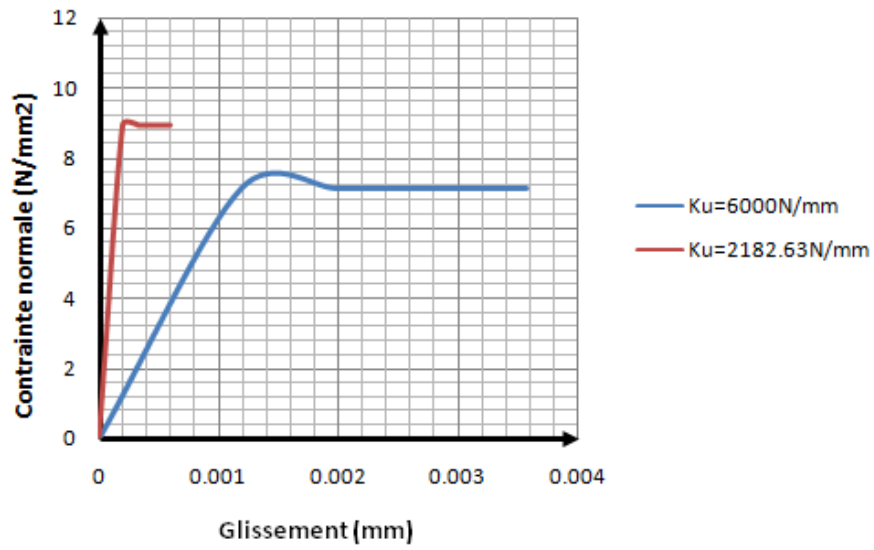


Fig IV-14: Coube contrainte-glisement pour une poutre de 1m(pour le béton inf)

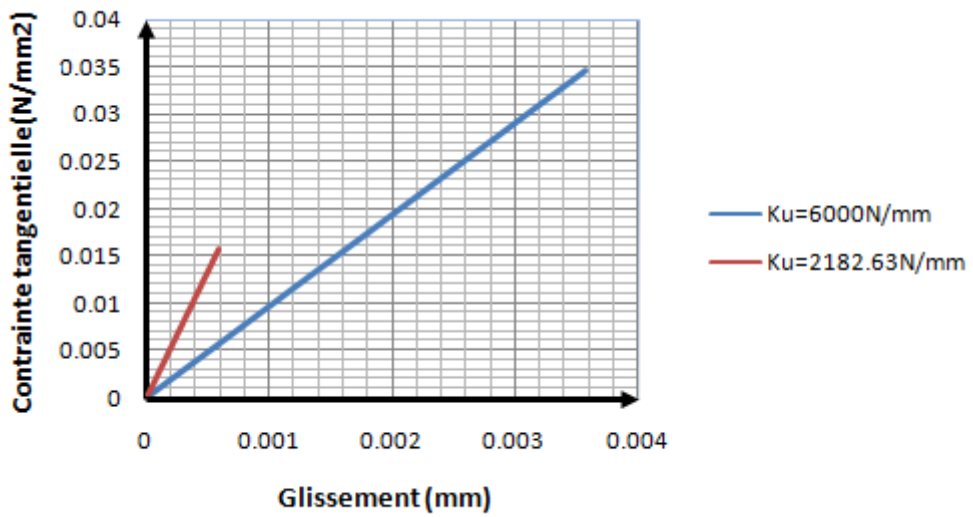


Fig IV-15 : Courbe contrainte –glissement pour la poutre de 1m(au niveau de l’interface)

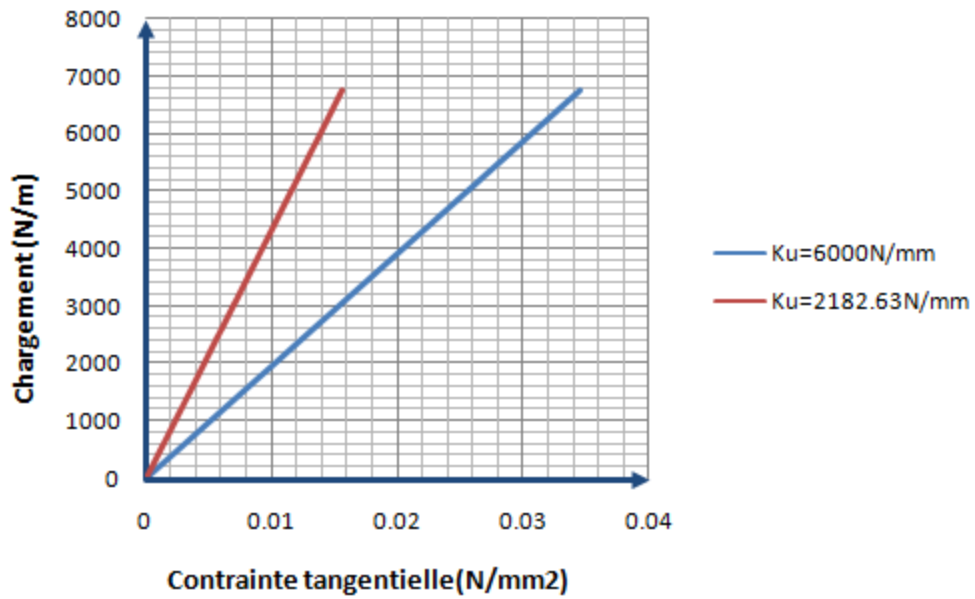


Fig IV-16: Courbe chargement –contrainte pour la poutre de 1m(au niveau de l'interface)

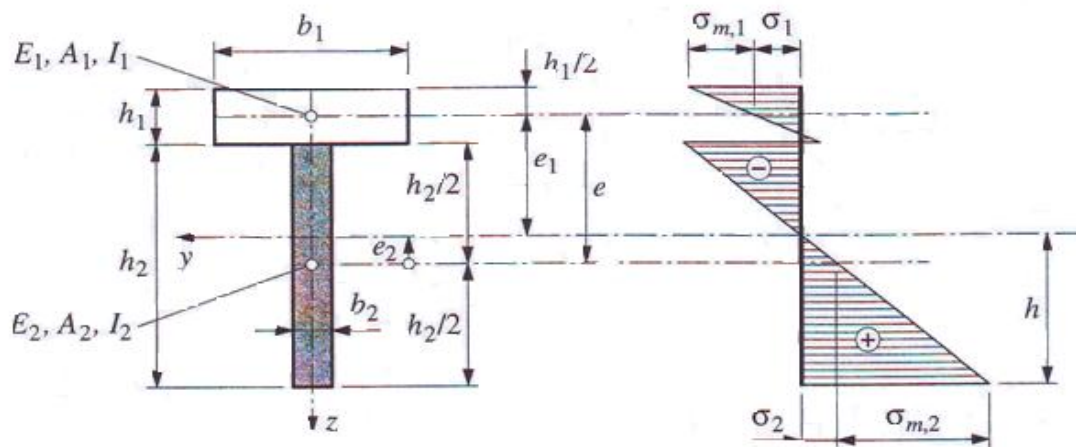


Fig IV-17 : Contraintes normales (1=béton, 2=bois)

Pour une charge à ELU de 3750N/m, $K_u=6000\text{N/mm}$ et longueur de 4m, nous avons obtenues les contraintes suivantes :

Contraintes dans le béton en (N/mm^2) : Fibre sup = -2.37 (compression)

Fibre inf = 1.12 (traction)

Contraintes dans le bois en (N/mm^2) : Fibre sup = 0.01 (traction)

Fibre inf := 2.91 (traction)

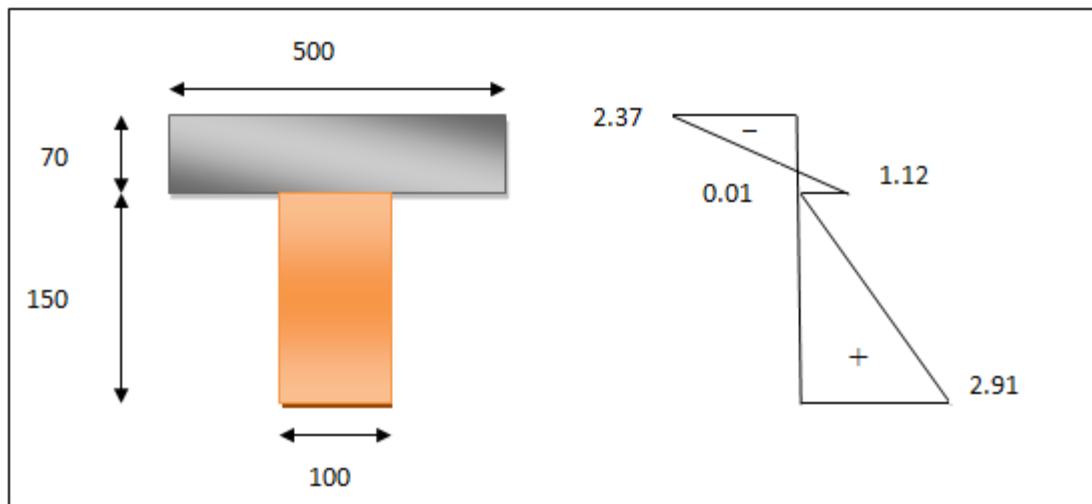


Fig IV-18 : La section mixte et les contraintes normales obtenues

IV .4-2 Modélisation avec ABAQUS (Partie 2)

IV .4-2-1 Introduction

L'avenir est à l'outil numérique et à la réalité virtuelle; la simulation et l'analyse numérique se sont développées ces dernières années dans la recherche industrielle privée ou publique (constructeurs automobile, aéronautique, spatial...) améliorant ainsi la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs.

La solution d'analyse par éléments finis optimise le prototypage virtuel et la simulation numérique pour l'entreprise en utilisant les hypothèses de la mécanique de la rupture en élasticité et de la dynamique. Ainsi elle simule et améliore les performances des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...).

La simulation et l'analyse numérique ont un impact direct sur la qualité et le temps de mise sur le marché des produits ; de plus, elles accroissent les performances des solutions de gestion du cycle de vie du produit.

Elles sont apparues, dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés. La difficulté est de créer un modèle C.A.O. se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, conditions aux limites...). L'étude ne sera validée qu'à partir d'essais physiques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation (crash test...).

D'un point de vue technique, les résultats obtenus grâce à ABAQUS sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations et de toutes les grandeurs physiques nécessaires à la conception d'un modèle.

Les logiciels de calcul de structures comme NASTRAN, RADIOS, ANSYS sont utilisés pour la modélisation de l'endommagement d'une structure métallique. Nous utiliserons le logiciel ABAQUS (analyse dynamique linéaire et non linéaire).

IV .4-2-2 Simulation numérique

Est l'un des outils permettant de simuler des phénomènes réels. Appelée aussi **simulation informatique**, elle désigne un procédé selon lequel on exécute un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler par exemple un phénomène physique complexe (par exemple : chute d'un corps sur un support mou, résistance d'une plateforme pétrolière à la houle, fatigue d'un matériau sous sollicitation vibratoire, usure d'un roulement à billes...).

Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de *modèles théoriques* utilisant souvent la technique dite des *éléments finis*. Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. On parle également de calcul numérique.

Les interfaces graphiques permettent la visualisation des résultats des calculs par des images de synthèse.

Ces simulations informatiques sont rapidement devenues incontournables pour la modélisation des systèmes naturels en physique, chimie et biologie, mais également des systèmes humains en économie et en science sociale .

IV .4-2-3 A propos d'ABAQUS

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples. ABAQUS, c'est une structure de plus de 350 personnes, 24 agences implantées dans le monde et un réseau de distributeurs sur les marchés émergents.

ABAQUS est un logiciel de calcul éléments finis développé par ABAQUS, Inc.

Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

- **ABAQUS/Standard** est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- Le solveur **ABAQUS/Explicit** emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.
- **ABAQUS/CAE** constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts et les paramétrisations. La gestion de l'interface graphique est assurée par FOX Toolkit.

ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues.

En 2005, ABAQUS, Inc a été acquise par Dassault Systèmes et est devenue SIMULIA.

Le fonctionnement du code ABAQUS est très bien expliqué dans la référence [60] et [61] ou toutes les étapes de son principe de calcul sont mentionnées.

IV .4-2-4 Travaux par simulation numérique pour les planchers bois béton

Au fond de ces technologies développées, les planchers mixtes ont imposés leurs présences dans le domaine de la simulation et de la modélisation par élément finis, plusieurs programmes et logiciels ont été utilisé tel que ANSYS, MATLAB, FORTRAN et ABAQUS pour pouvoir étudier le comportement de ces planchers et comparer ces résultats avec ceux trouvés en réalité par des essais expérimentaux.

Les différents types de connexion par collage [19] et [9] (pour l'étude de l'interface) ou par organes métalliques tels que le connecteur shear crown [12] ont été étudiés par ABAQUS.

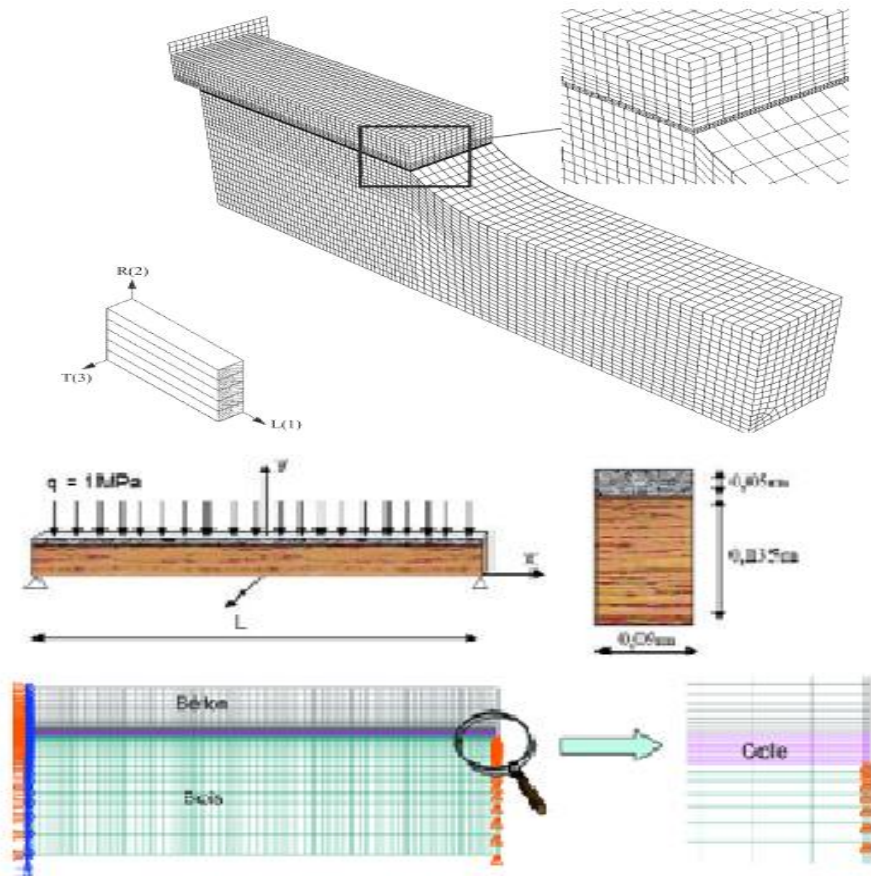


Fig IV-19 : Maillage d'une section en bois béton par collage avec ABAQUS

IV .4-2-5 Méthodologie (le premier modèle avec 7 connecteurs)

Voici un petit rappel des actions à effectuer pour créer un modèle **ABAQUS** :

1. Dessiner notre modèle (**Module Part**).
 - a. Dessiner le profil 2D de la forme voulue
 - b. Le développer en 3D
 - c. Rajouter les détails manquants
2. Affecter les propriétés à l'objet (**Module Property**).
 - a. Créer le matériau
 - b. Créer les sections sur lesquelles appliquer les matériaux
 - c. Affecter les matériaux aux sections correspondantes

MASSE	LONGUER	TEMPS	FORCE	PRESSION	ENERGIE
Gramme	Millimètre	Milliseconde	Newton	MPa	Mili joule

Tableau IV-1 : Tableau des unités correspond à ABAQUS

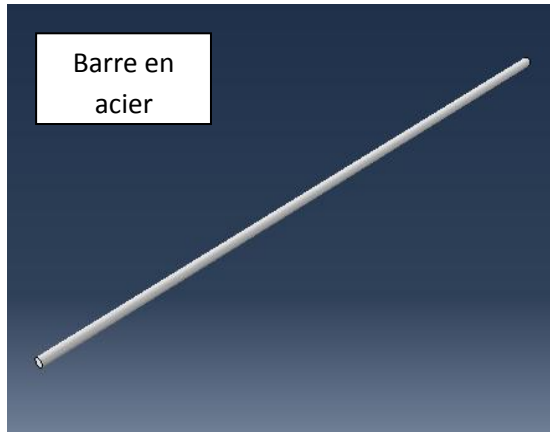
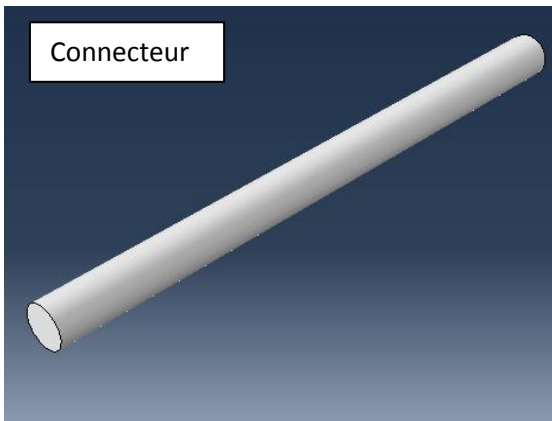
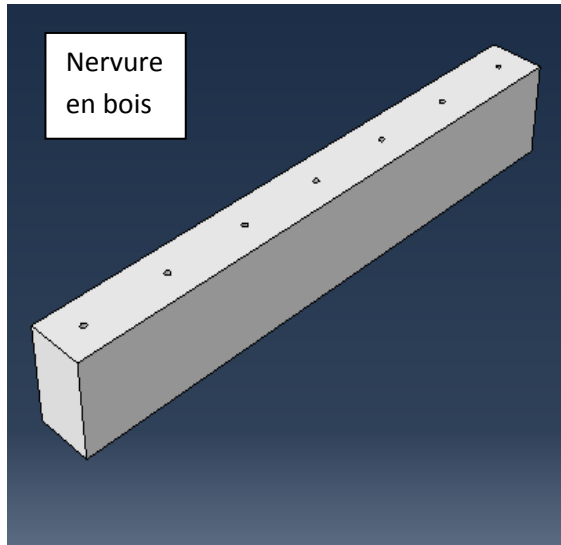
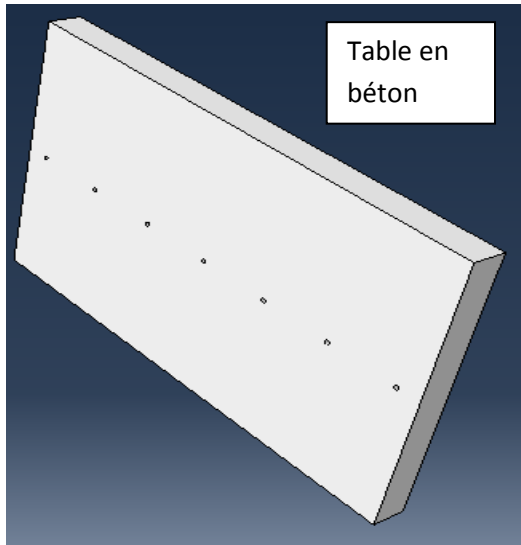
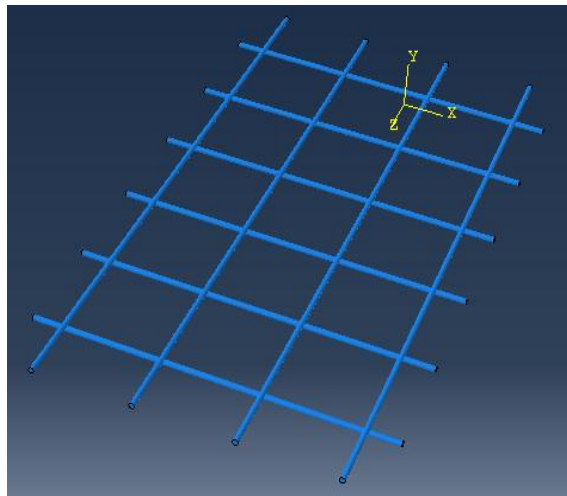
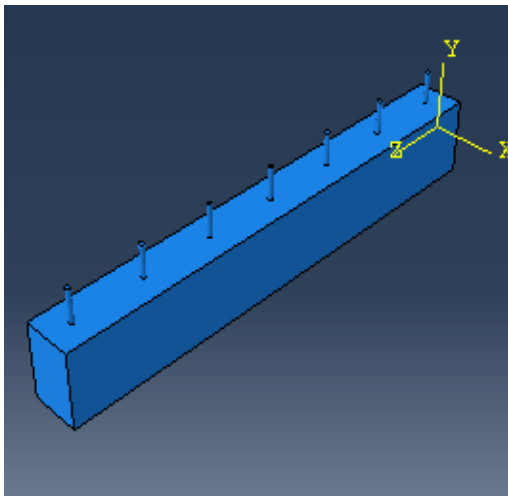


Fig IV-20 : Les modules part et property

3. Assembler le modèle (**Module Assembly**).
 - a. Créer les instances
 - b. Les positionner dans le repère général



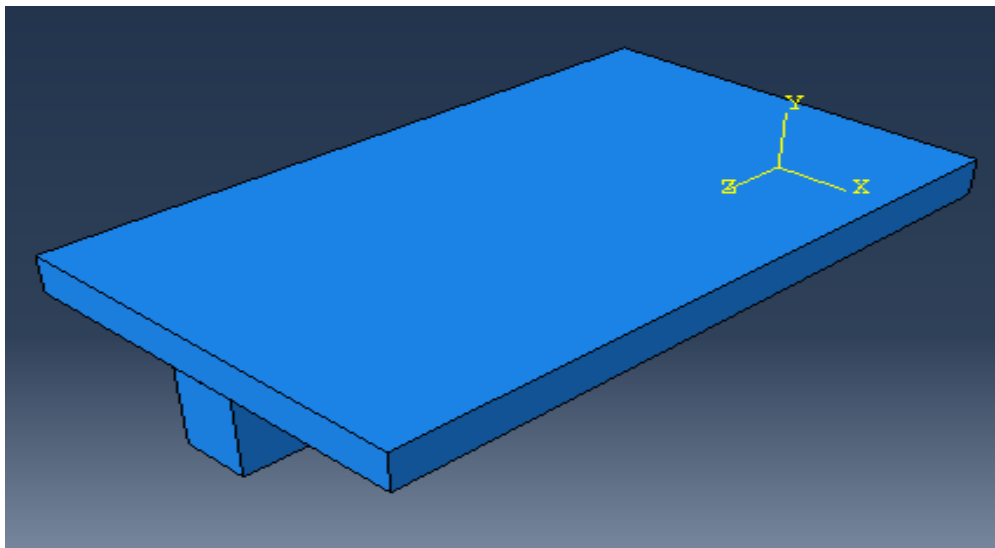
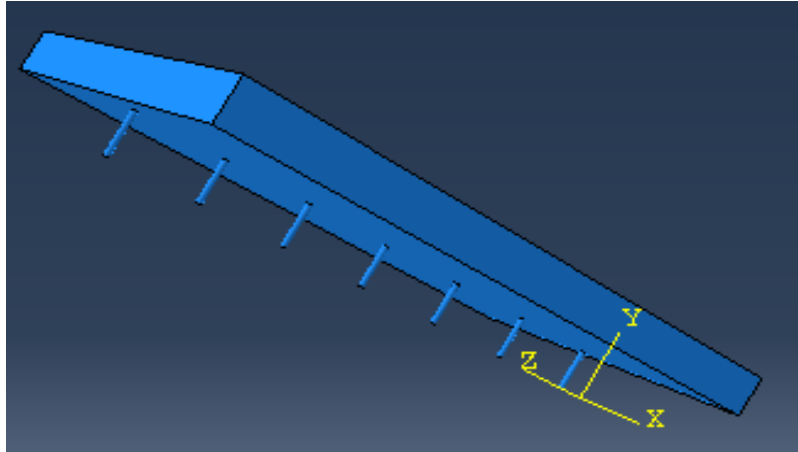


Fig IV-21 : Le module assembly

4. Définir les pas d'analyse (**Module Step**).
5. Créer les interactions entre les instances (**Module Interaction**).
 - a. Créer les surfaces
 - b. Définir les types de contacts
 - c. Associer des surfaces avec des types de contact

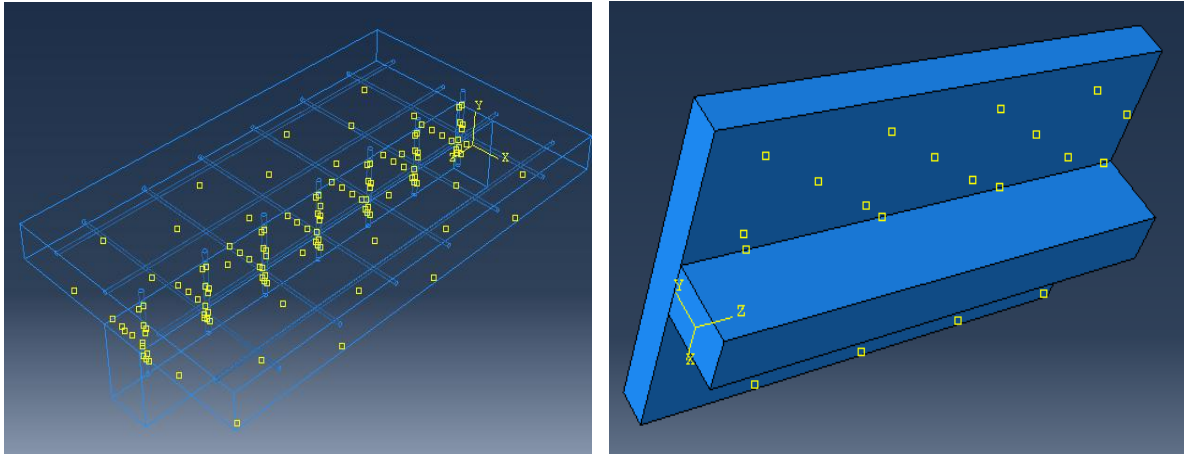


Fig IV-22 : Le module Interaction

6. Appliquer les conditions limites et les chargements (**Module Load**).
 - a. Définir les pas d'application
 - b. Définir les types de CL ou chargement

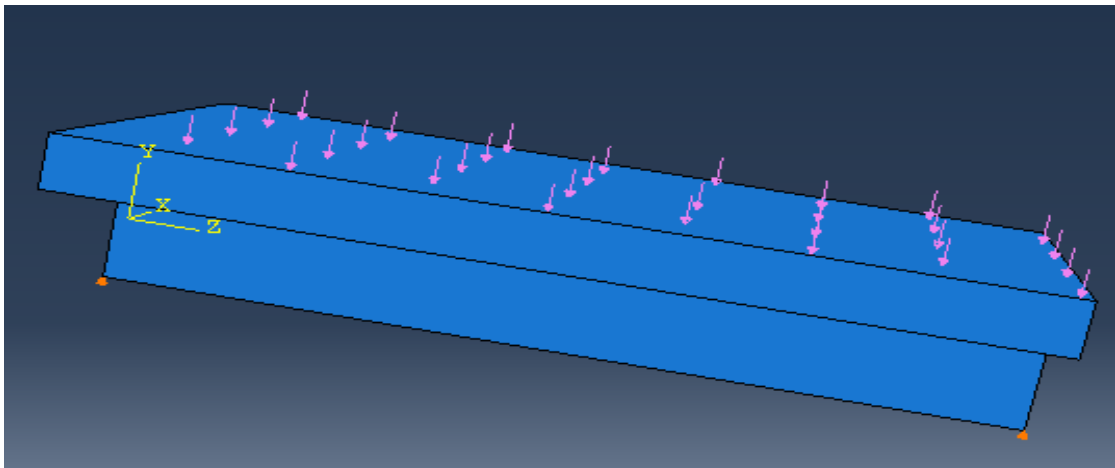


Fig IV-23 : Le module load

7. Mailler le modèle (**Module Mesh**).
- a. Partitionner le modèle
 - b. Choisir les techniques de maillage
 - c. Choisir les types de maille
 - d. Discrétiser le modèle
 - e. Mailler le modèle

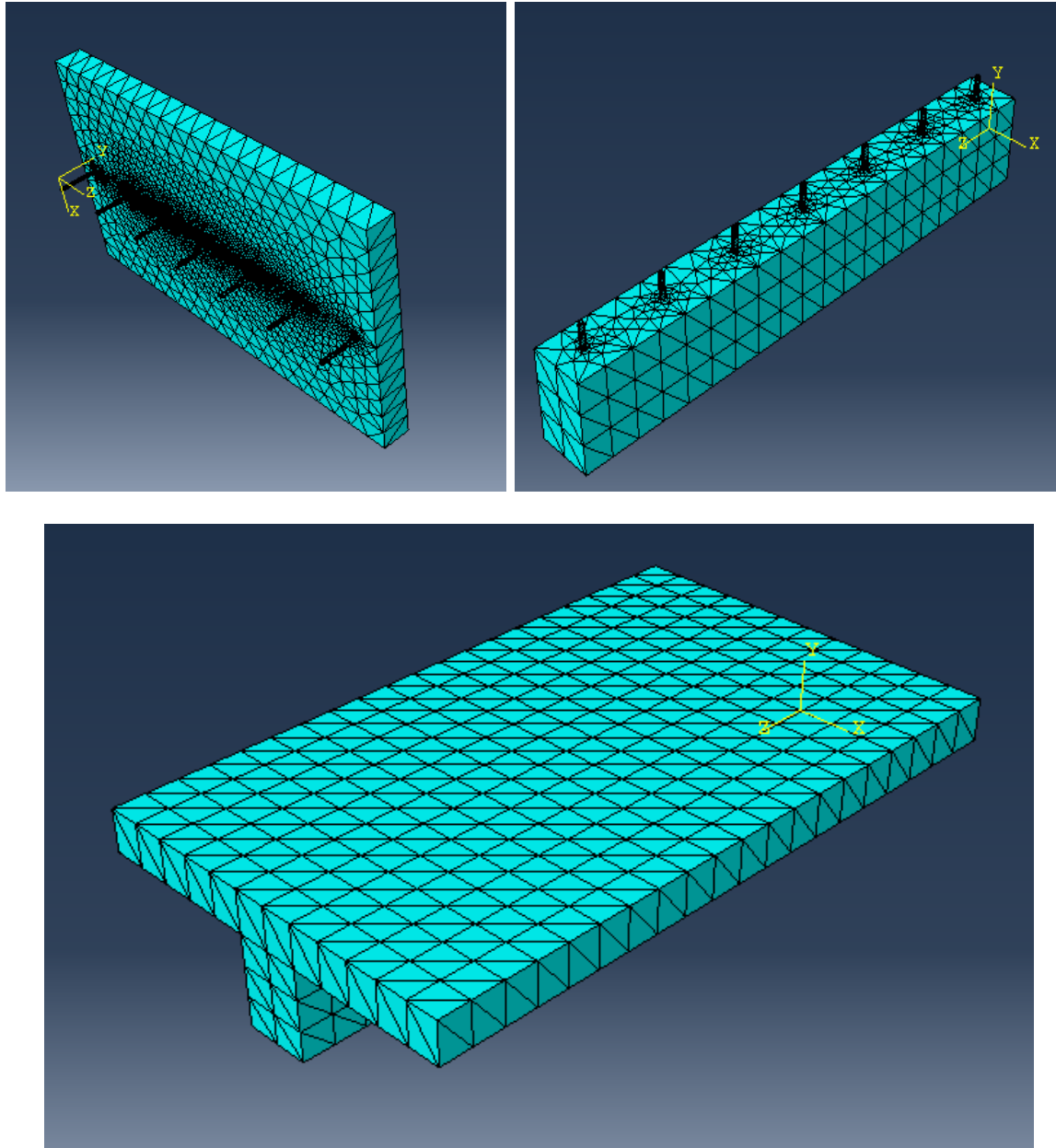


Fig IV-24 : Le module mesh (maillage adoptés lors de la simulation numérique)

8. Créer et soumettre un travail (**Module Job**).
9. Visualiser les résultats (**Module Visualization**).

Un aperçu du deuxième modèle de poutre sur ABAQUS (avec 3 connecteurs)

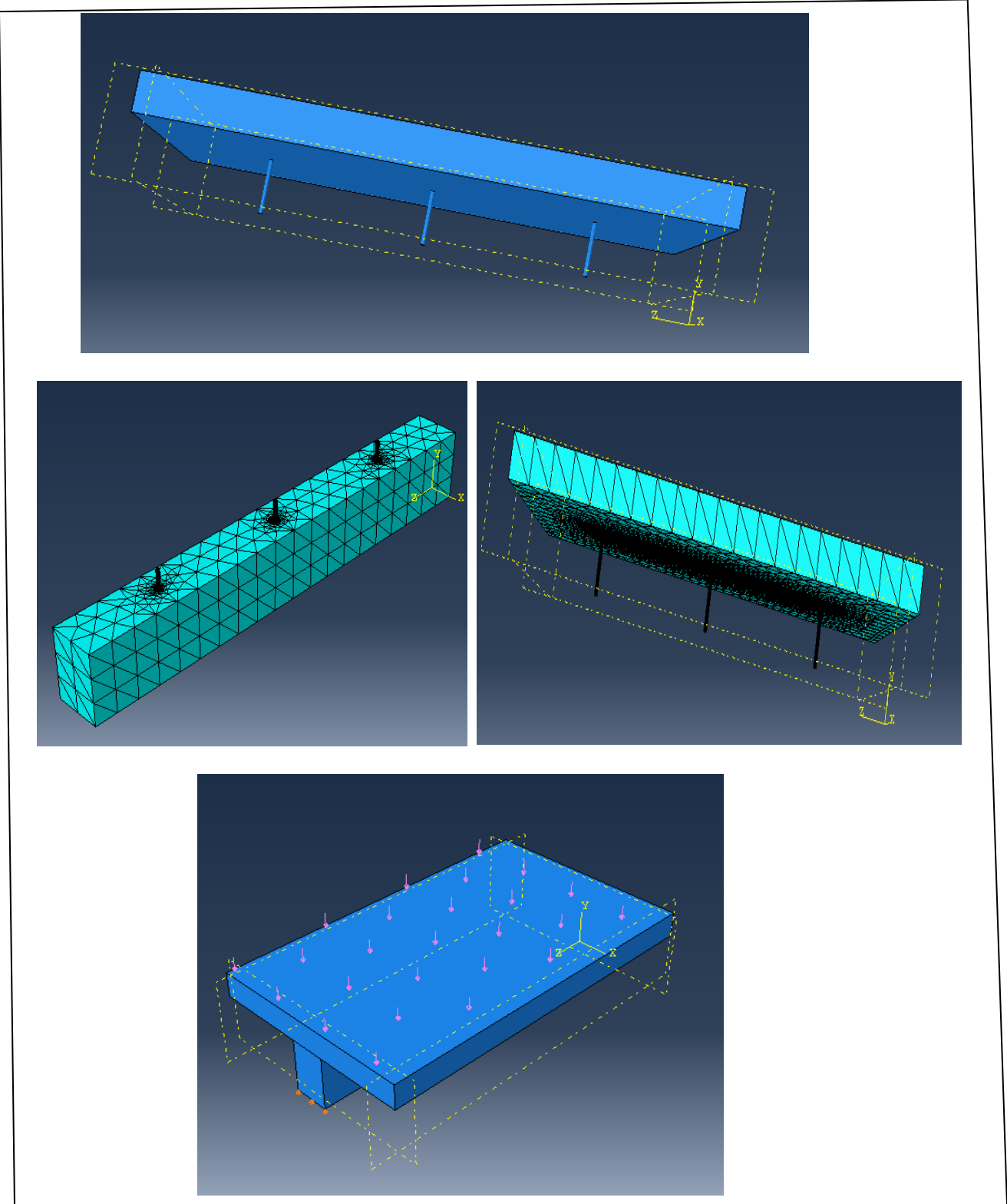


Fig IV-25: Le deuxième modèle de poutre

IV .4-2-6 Présentation des résultats obtenus par ABAQUS et interprétations :

A- Les contraintes :

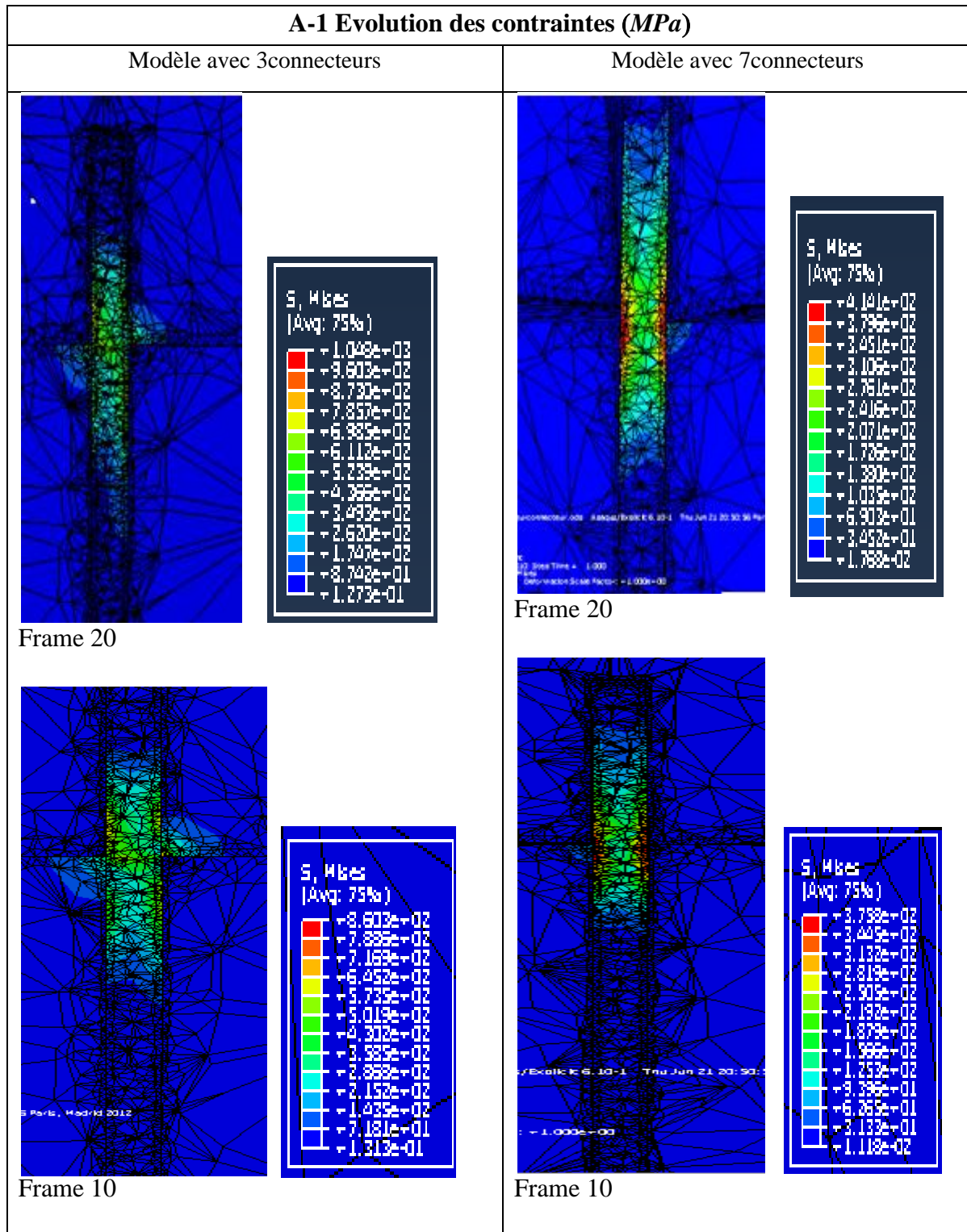


Fig IV.26 : Comparaison des contraintes dans le connecteur

A-2 Emplacement des contraintes maximales sur les organes d'assemblage Frame 20

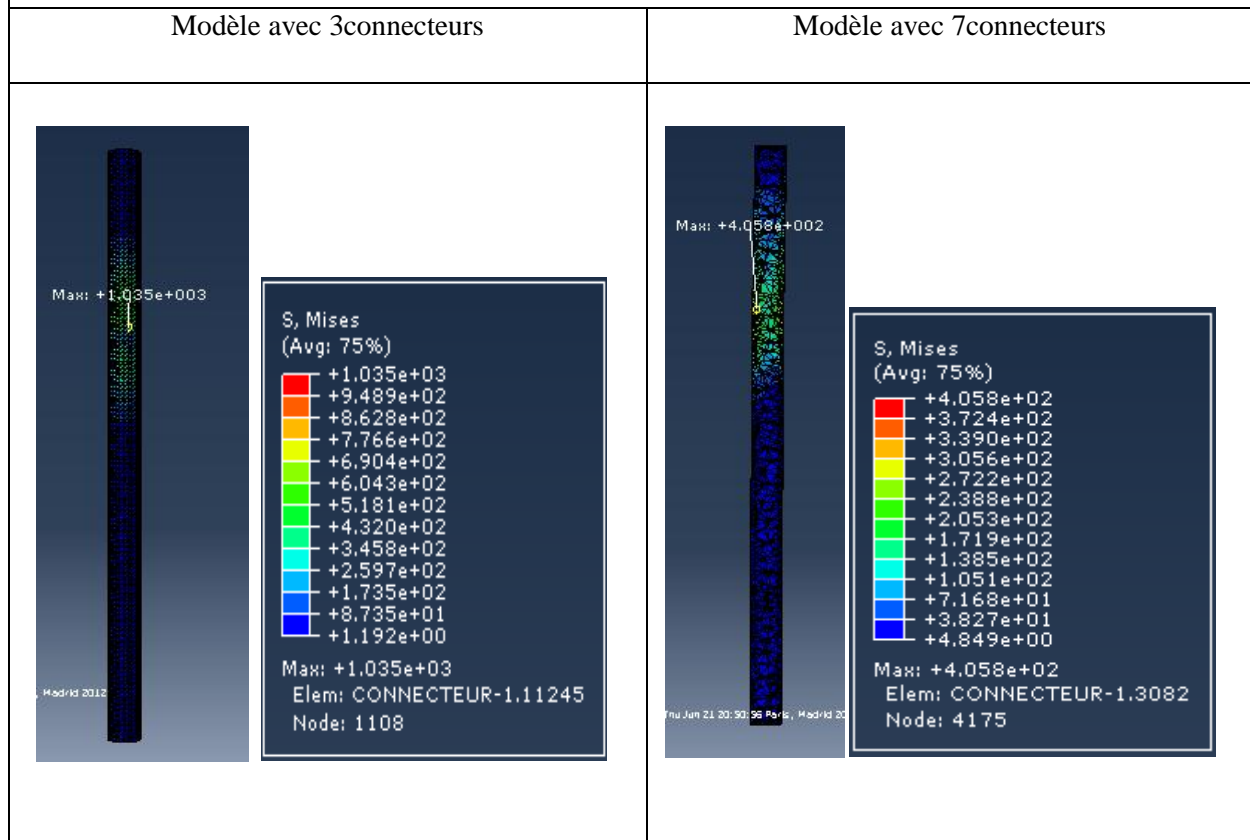
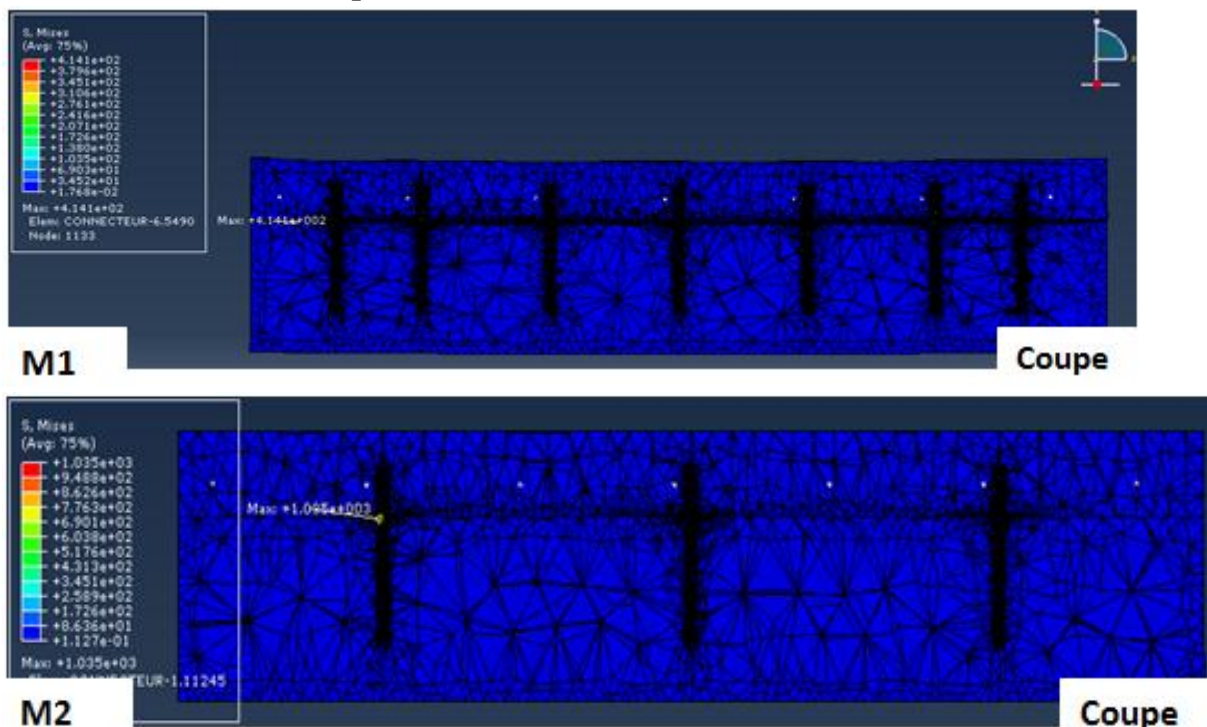
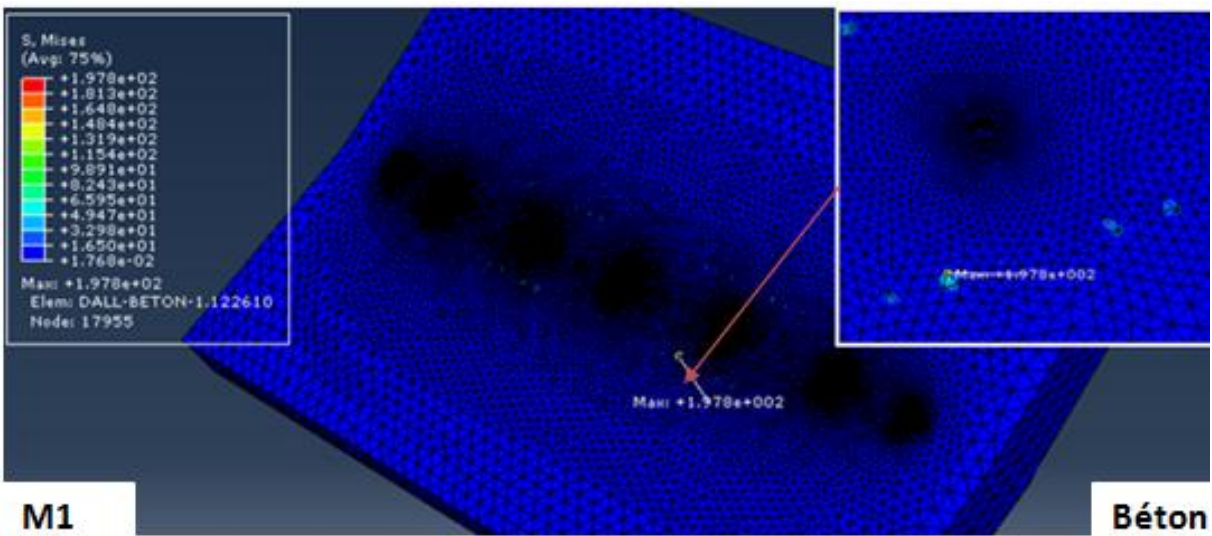
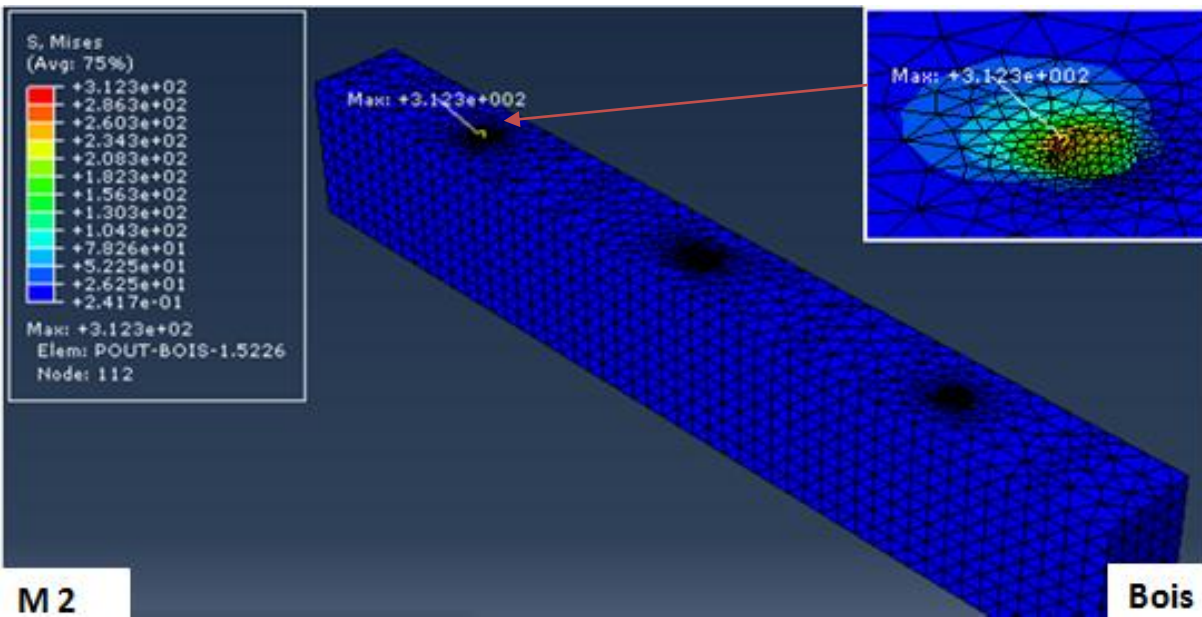
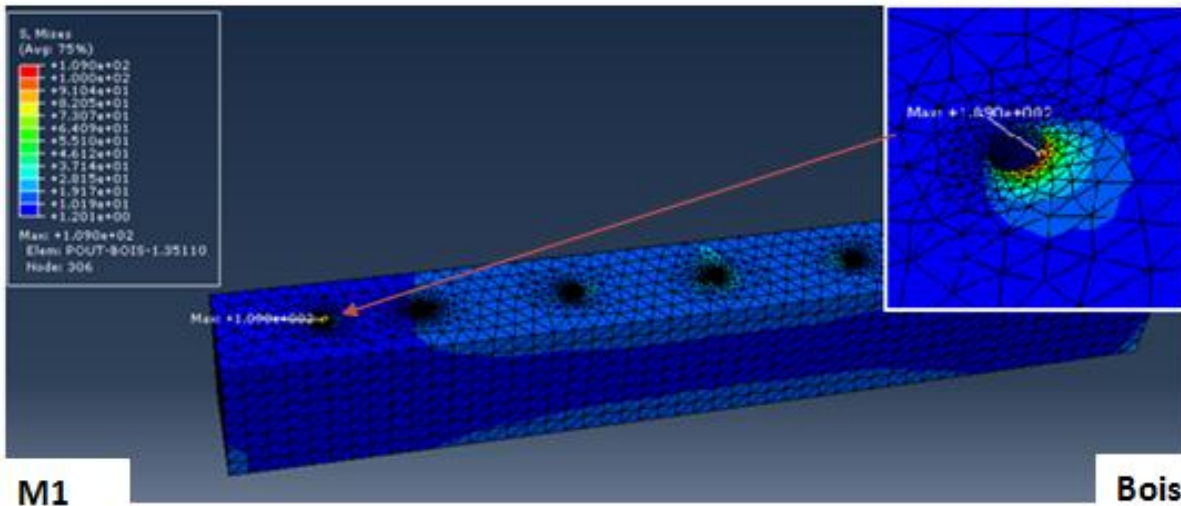


Fig IV-27 : Les contraintes maximales au niveau du connecteur de rive

A-3 Emplacement des contraintes maximales dans le bois et le béton pour le modèle 1(M1) et le modèle 2(M2) pour le Frame 20 :





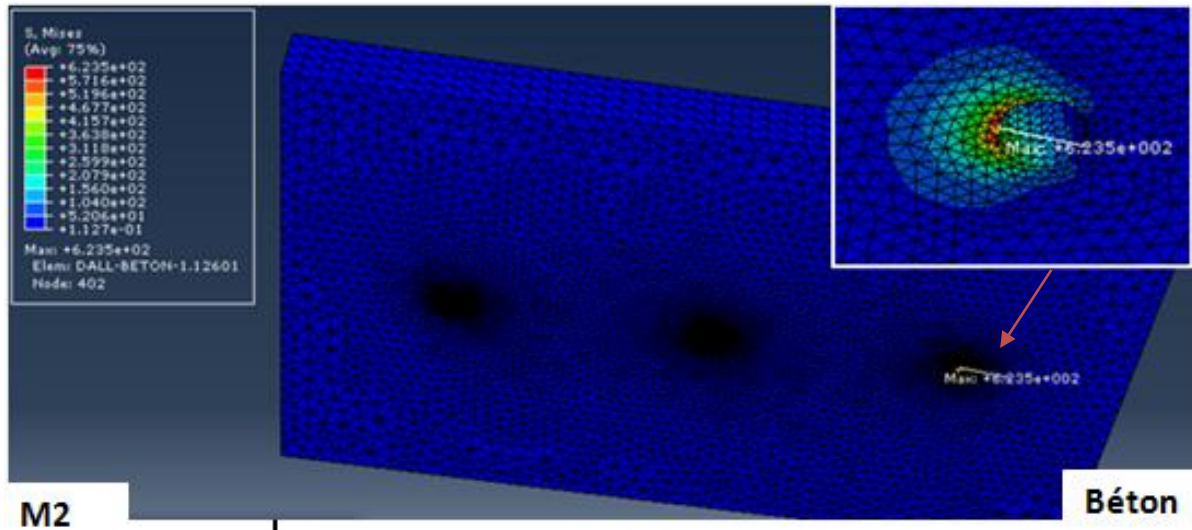
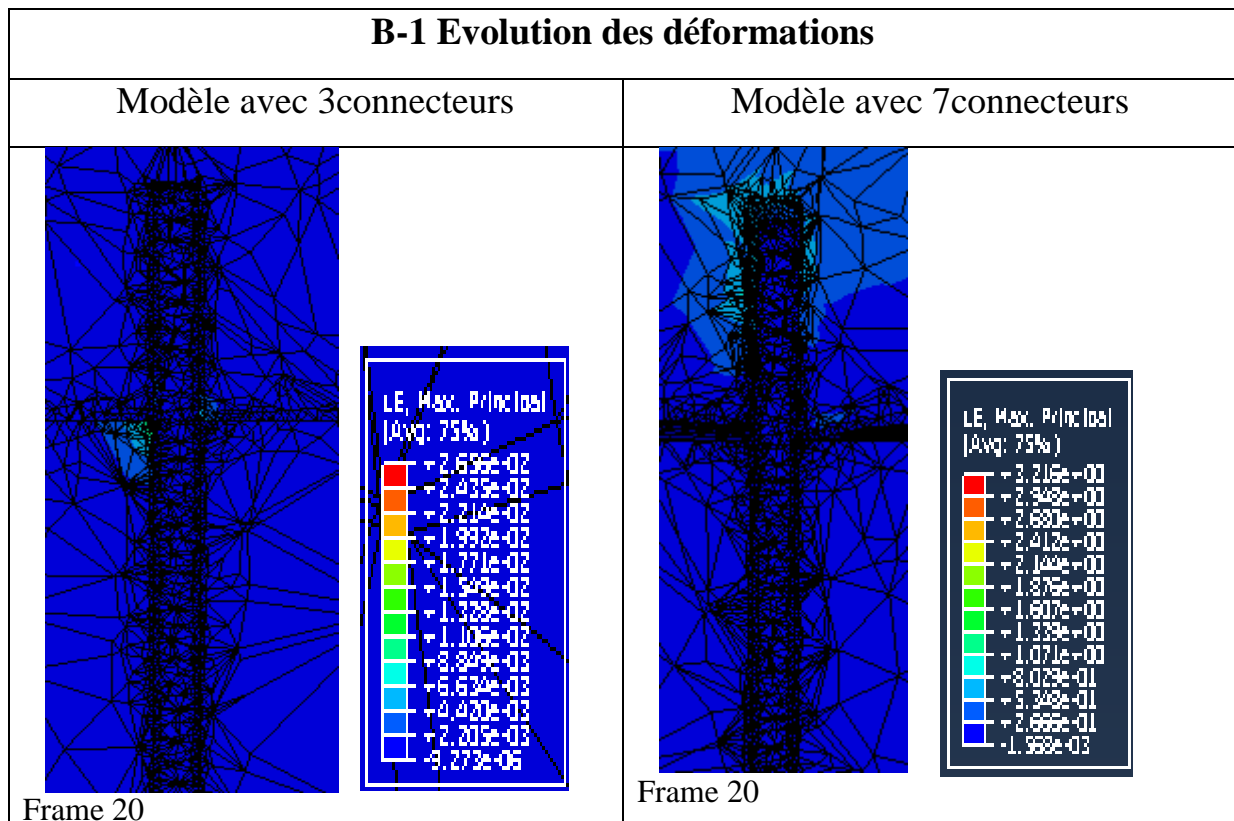


Fig IV-28 : Localisation des contraintes maximales dans les différentes sections.

Les figures IV26, 27 et 28. illustrent l'évolution de la distribution des contraintes de Von Mises dans le connecteur de rive pour les deux modèles, on observe que l'évolution du champ de contrainte dans le deuxième modèle est rapide, comparativement au premier modèle, l'évolution des contraintes est lente.

Ainsi on remarque que les contraintes se développent d'une manière rapide dans les connecteurs par rapport aux autres matériaux (bois et béton), chose qui confirme le rôle joué par ces derniers dans la mixité bois-béton.

B- Les déformations



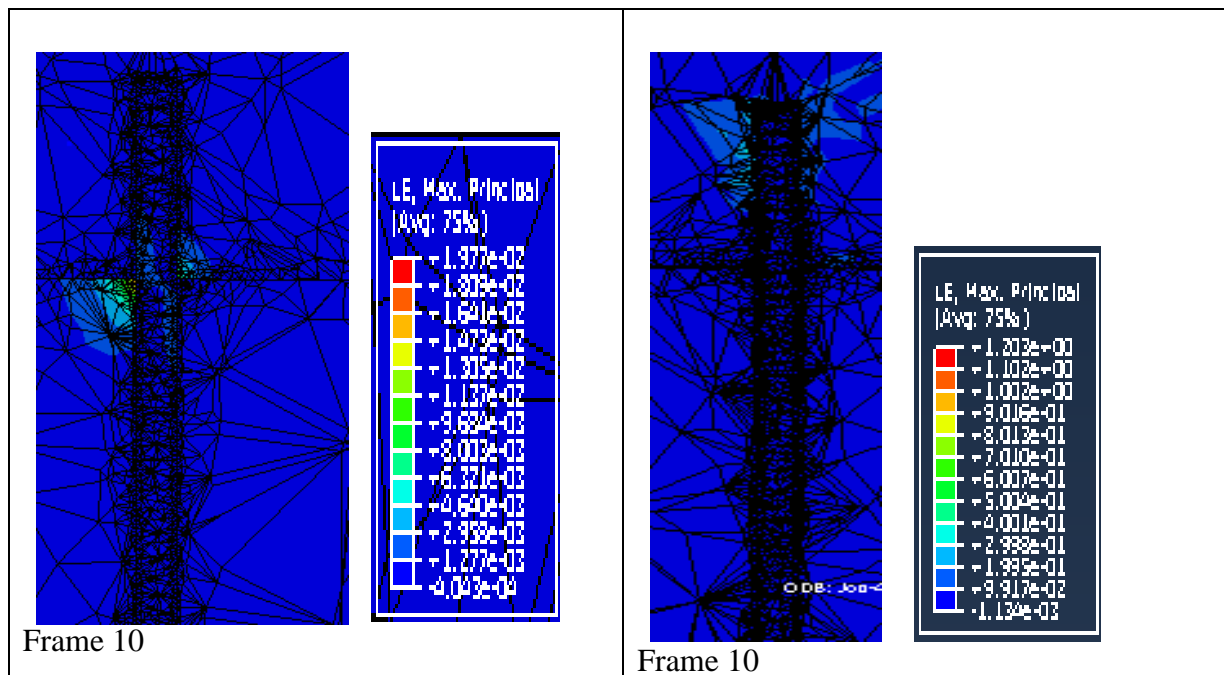


Fig IV-29 Propagation des déformations dans les poutres et les connecteurs

B-2 Emplacement des déformations maximales sur les organes d'assemblage (Frame 20)

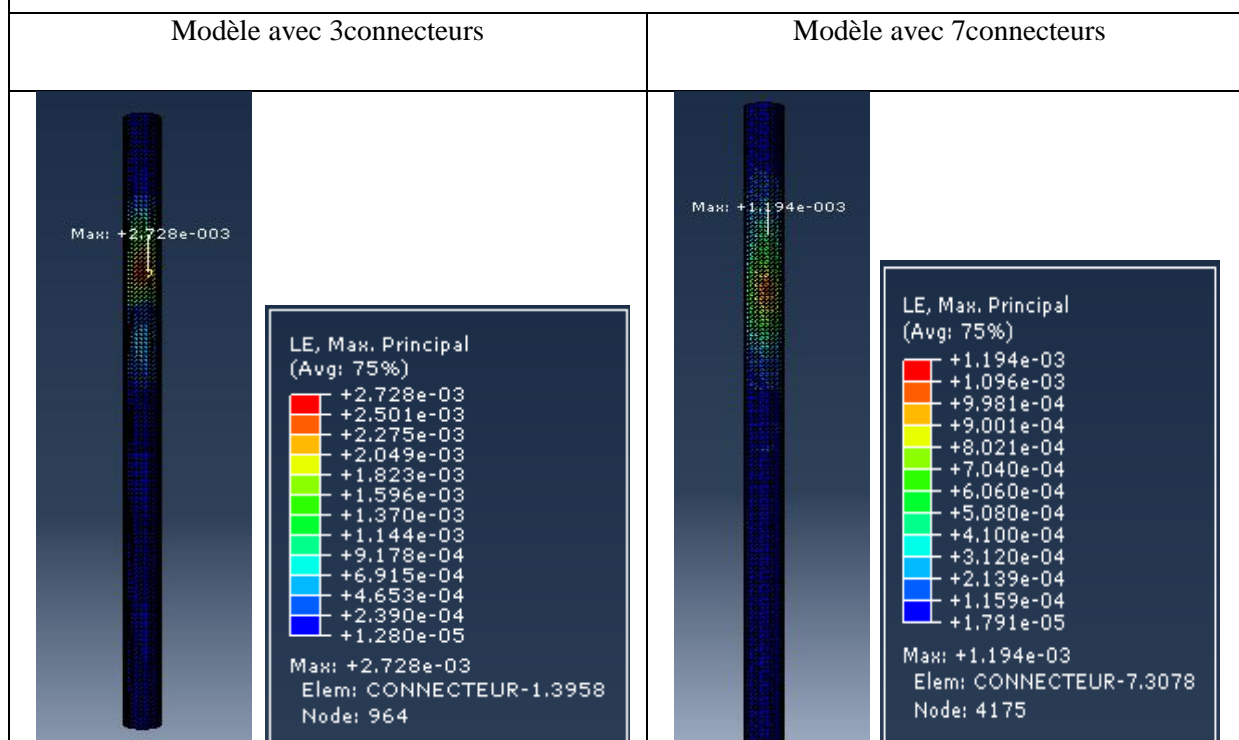
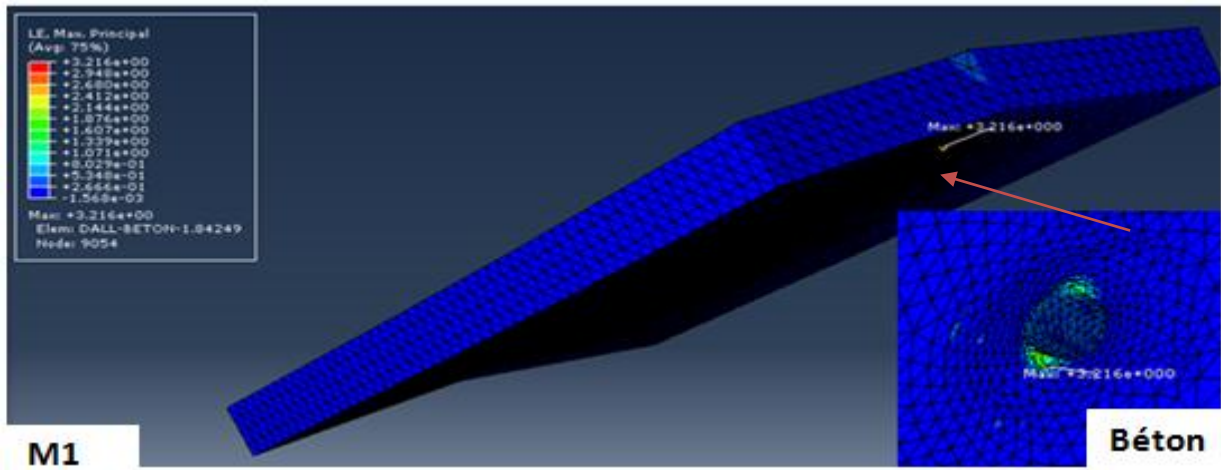
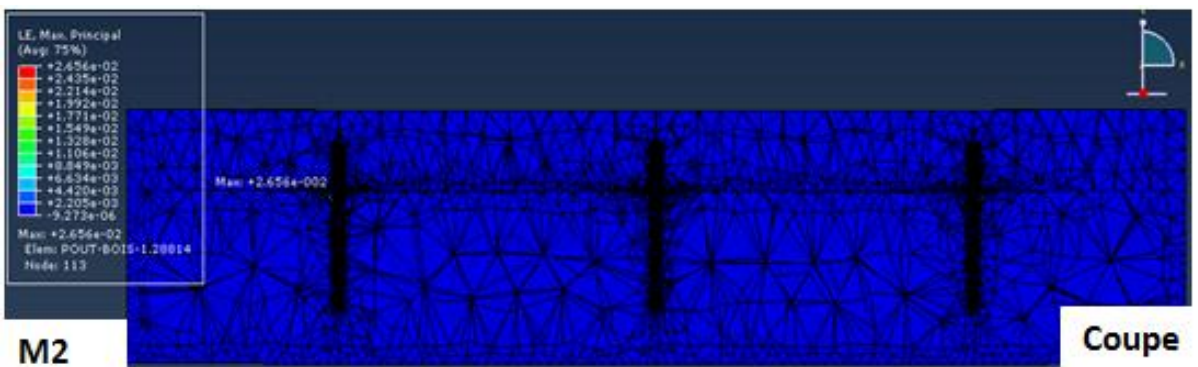
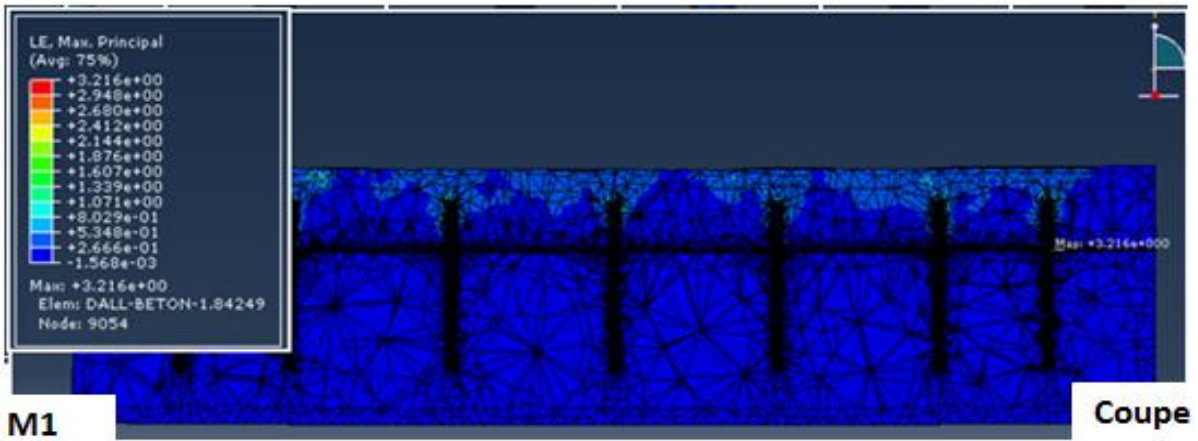


Fig IV-30 : Les contraintes maximales au niveau du connecteur de rive

B-3 Emplacement des déformations maximales dans le bois et le béton (Frame 20)



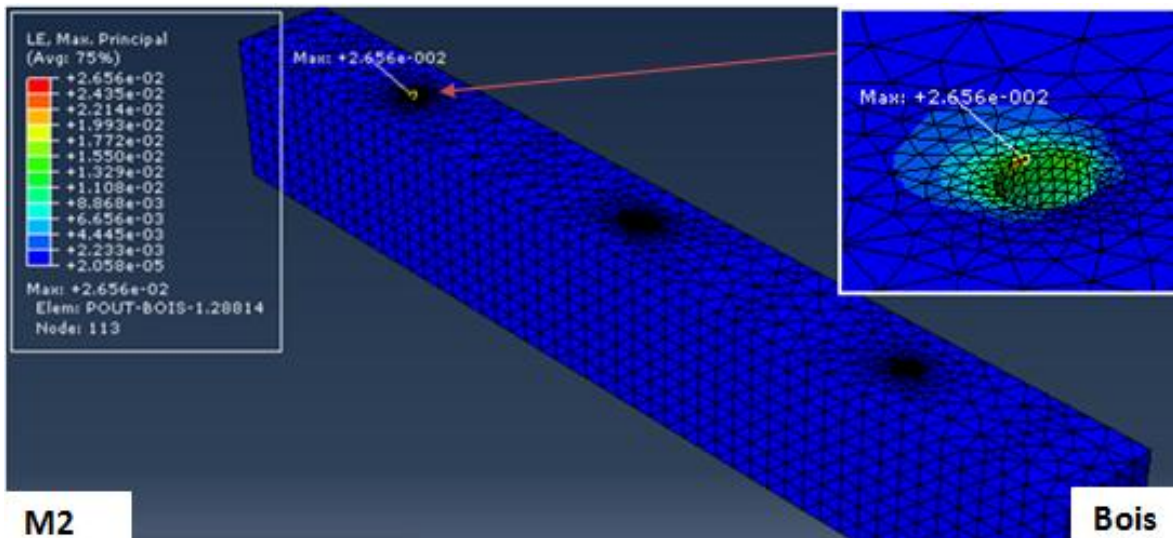
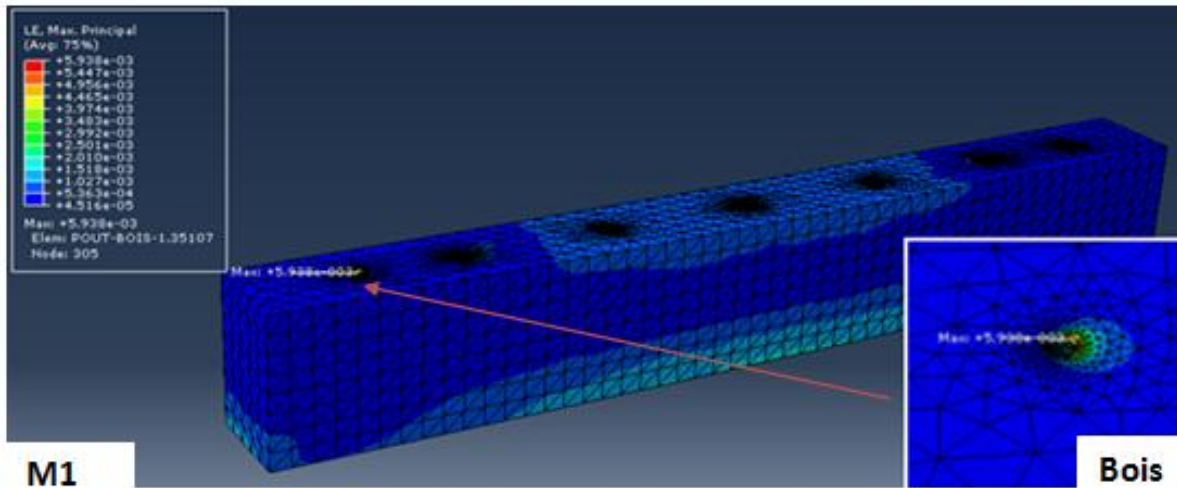
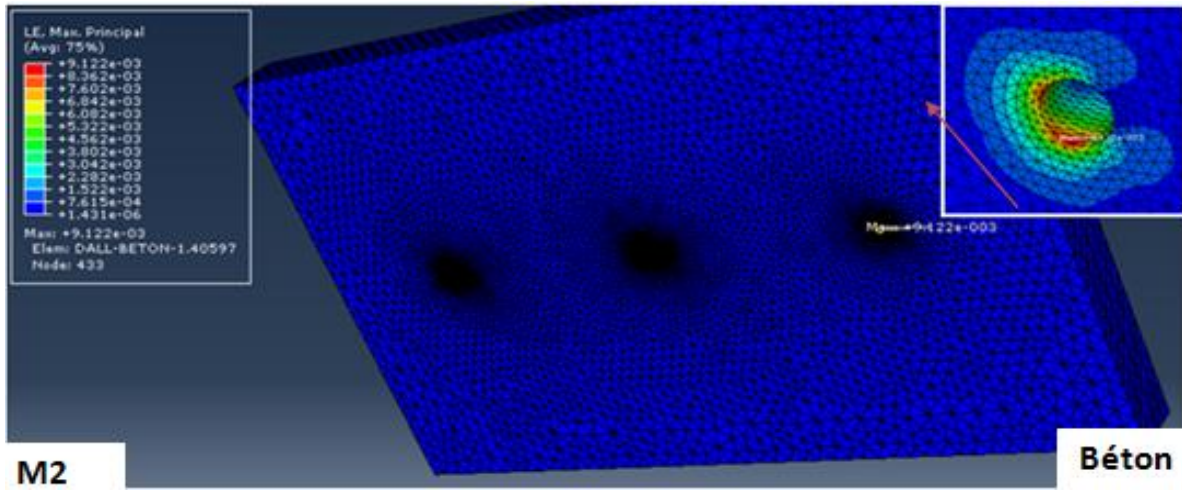


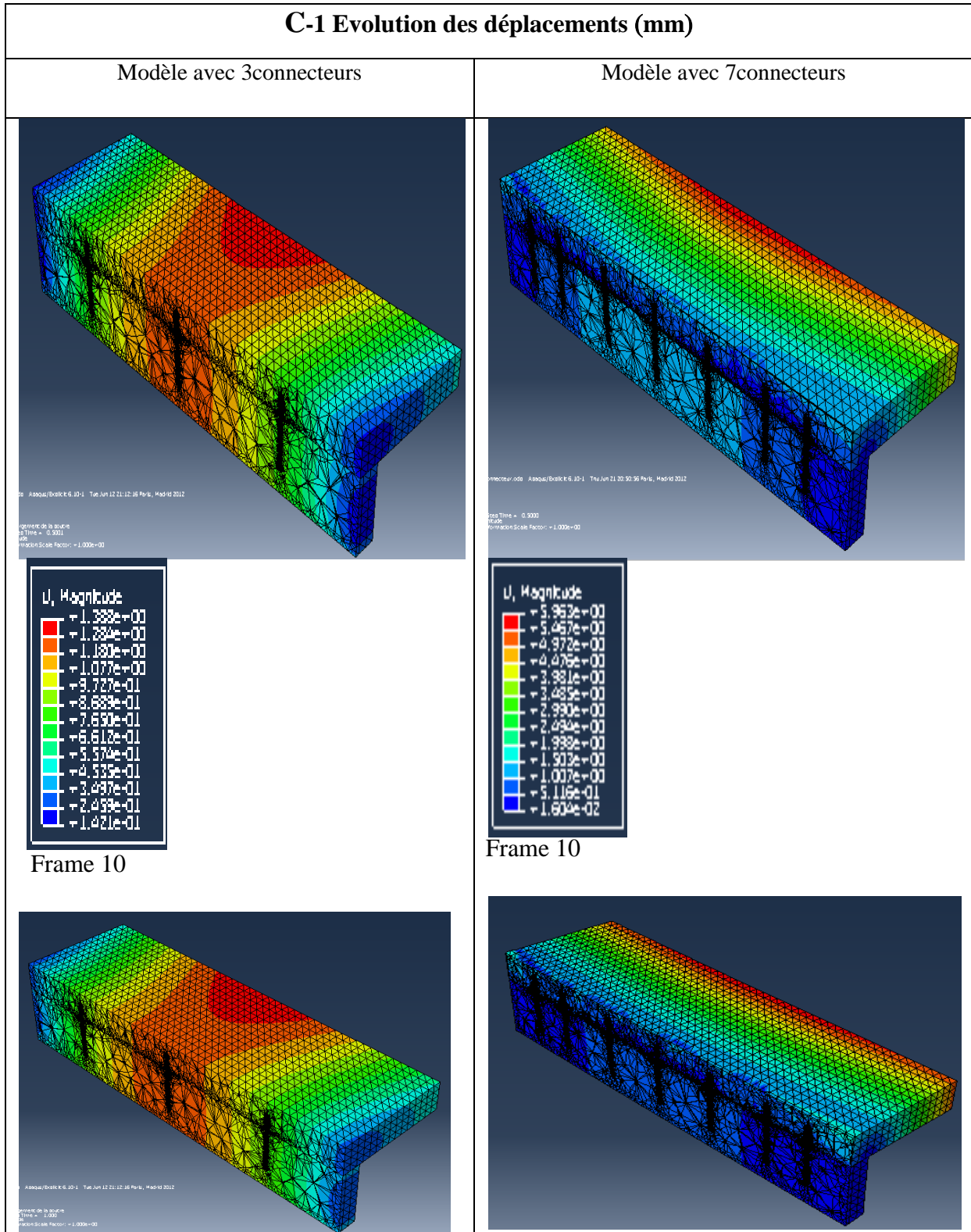
Fig IV-31 : Localisation des déformations maximales dans les différentes sections

Les figures IV.29, 30 et 31 illustrent l'évolution des déformations pour les deux cas de modèle, ces déformations se propagent progressivement sur toute la partie supérieure donc le béton par rapport aux deux autres matériaux au niveau de l'emplacement des connecteurs, pour le modèle à 7connecteurs,

comparativement au modèle à 3 connecteurs elles se placent au niveau de l'interface se qui conclue la fragilité de cette dernière.

Pour les connecteurs, les déformations se localisent au niveau des appuis (rive) et elles sont plus importantes pour le modèle à 3 connecteurs que du celui à 7connecteurs.

C- Les déplacements :



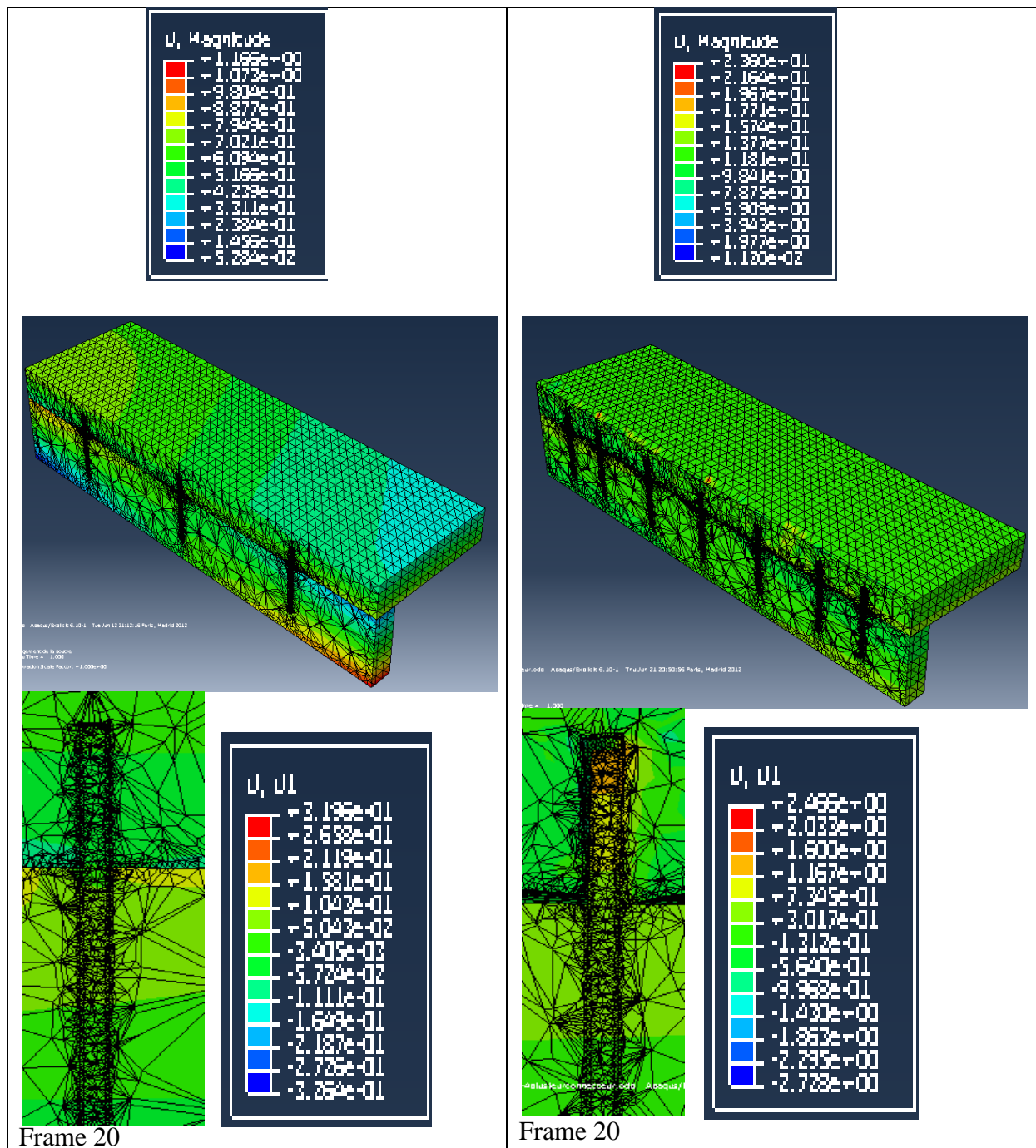


Fig IV-32: Propagation des déplacements dans les poutres et les connecteurs

C-2 Emplacement des déplacements maximaux sur les organes d'assemblage (Frame 20)

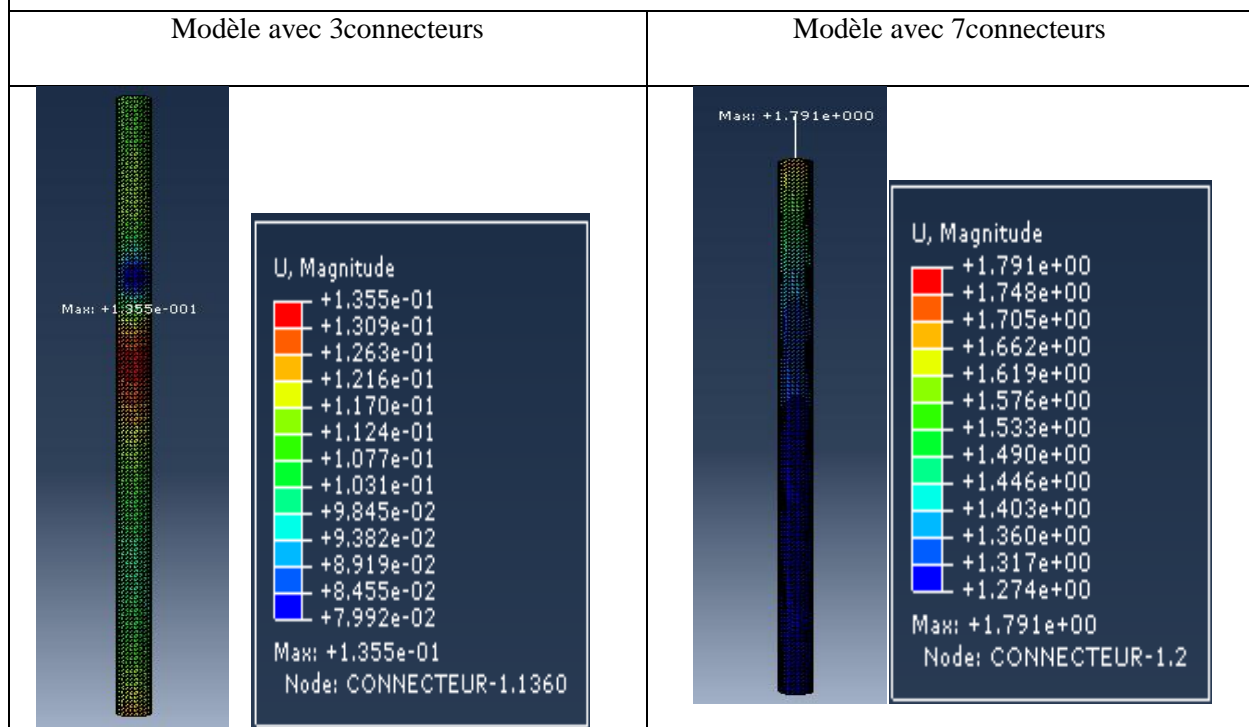
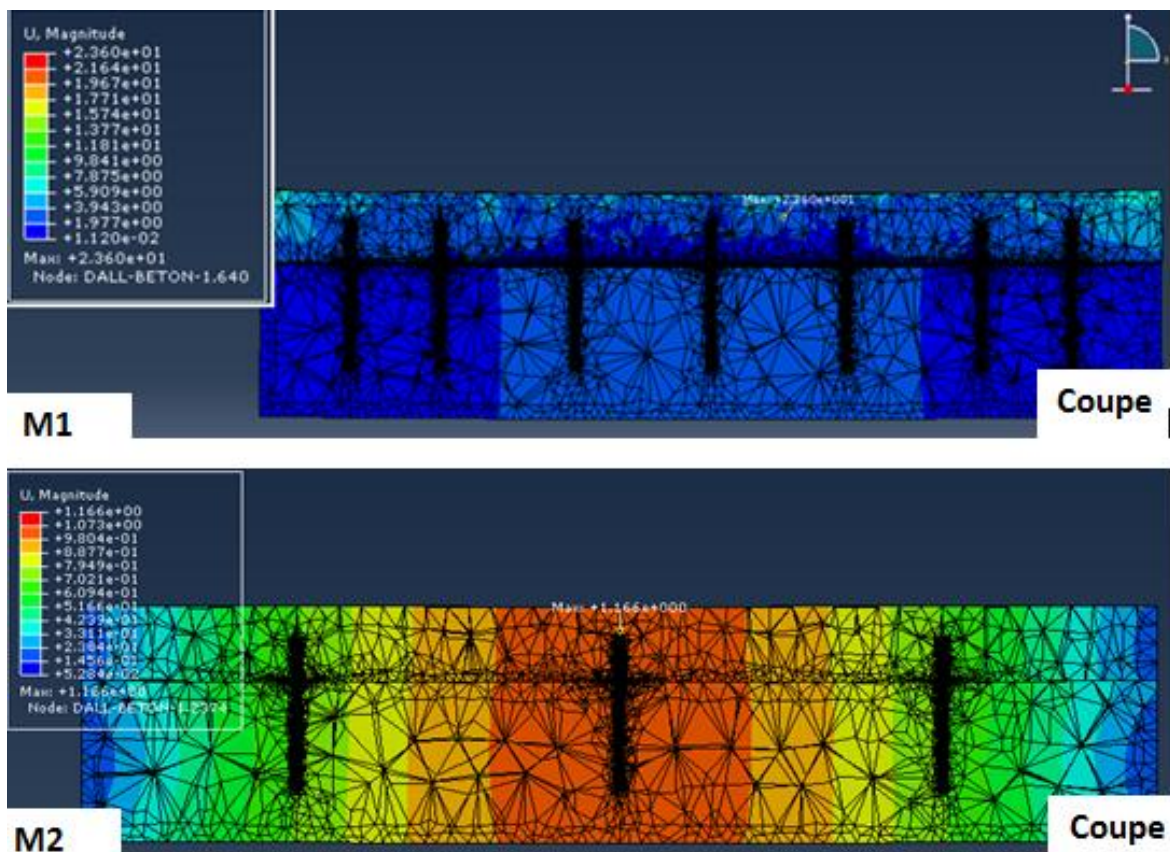
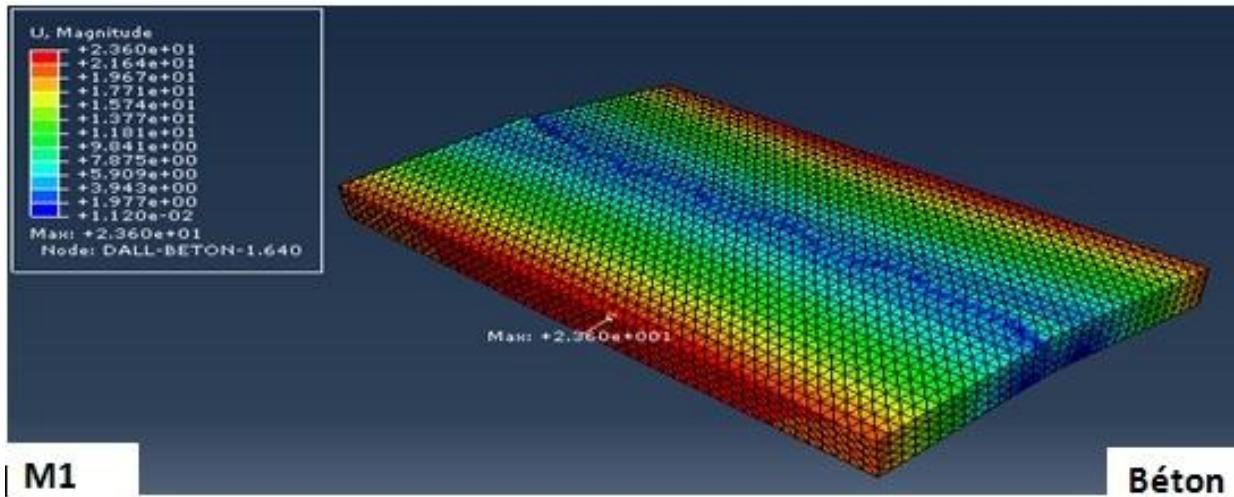
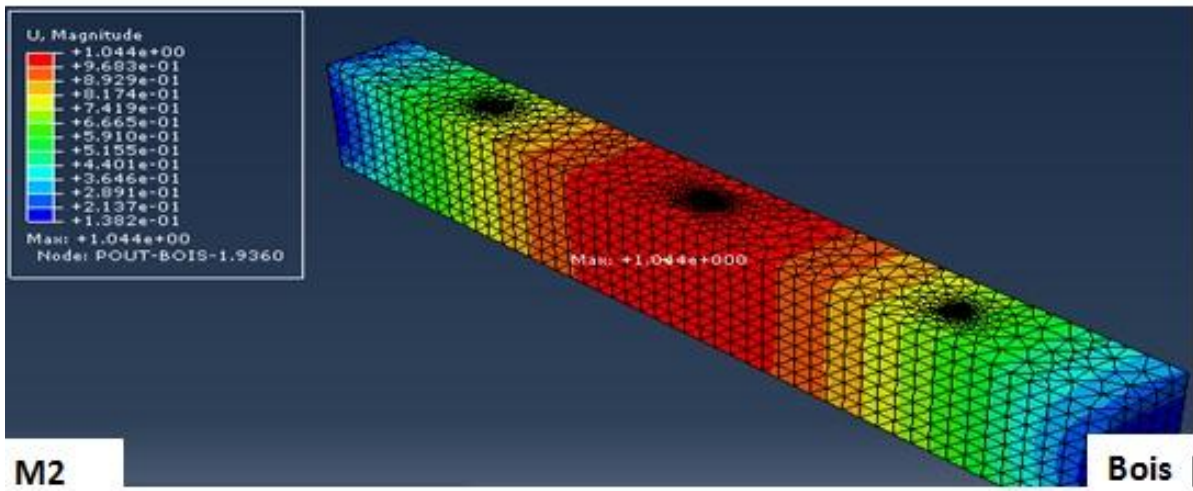
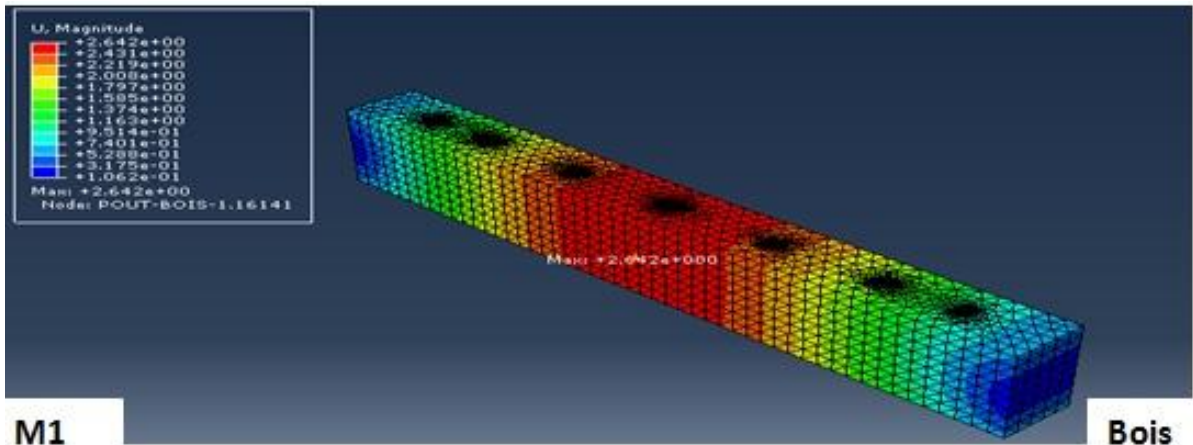


Fig IV-33 : Les déplacements maximaux au niveau du connecteur de rive

C-3 Emplacement des déplacements maximaux dans le bois et le béton (Frame 20)





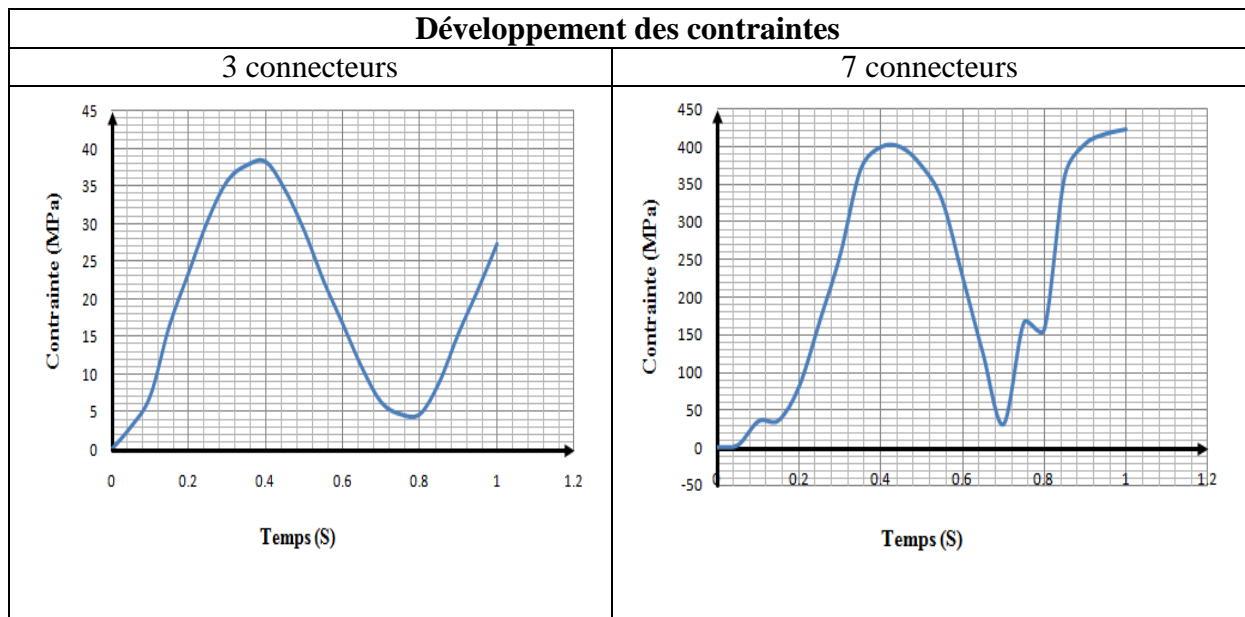


Fig IV-36 : Développement des contraintes dans les deux modèles

D'après la Fig IV-36, au début du chargement (0 à 0.05s) les contraintes sont nulles, pour le modèle à 7 connecteurs donc c'est le béton qui reprend la totalité du chargement; puis jusqu'à 0.2s on observe une faible transmission du chargement de la dalle du béton vers les connecteurs → la transmission vers la poutre en bois. Ensuite cette évolution rapide des contraintes et le résultat de l'endommagement du béton causé par l'apparition et le développement des microfissures aux alentours de la tête du connecteur encastrée dans la dalle en béton puis à partir de $T = 0.45$ on observe une chute des contraintes causée par la perte de rigidité dans l'organe sous chargement important ($\sigma = 400$ MPa). Pour le modèle à 3 connecteurs, on observe une évolution rapide dès chargement, au delà de 0.4s la chute apparaît sous perte de rigidité sous un chargement de l'ordre de 0.1 du chargement atteint au modèle à 7 connecteurs.

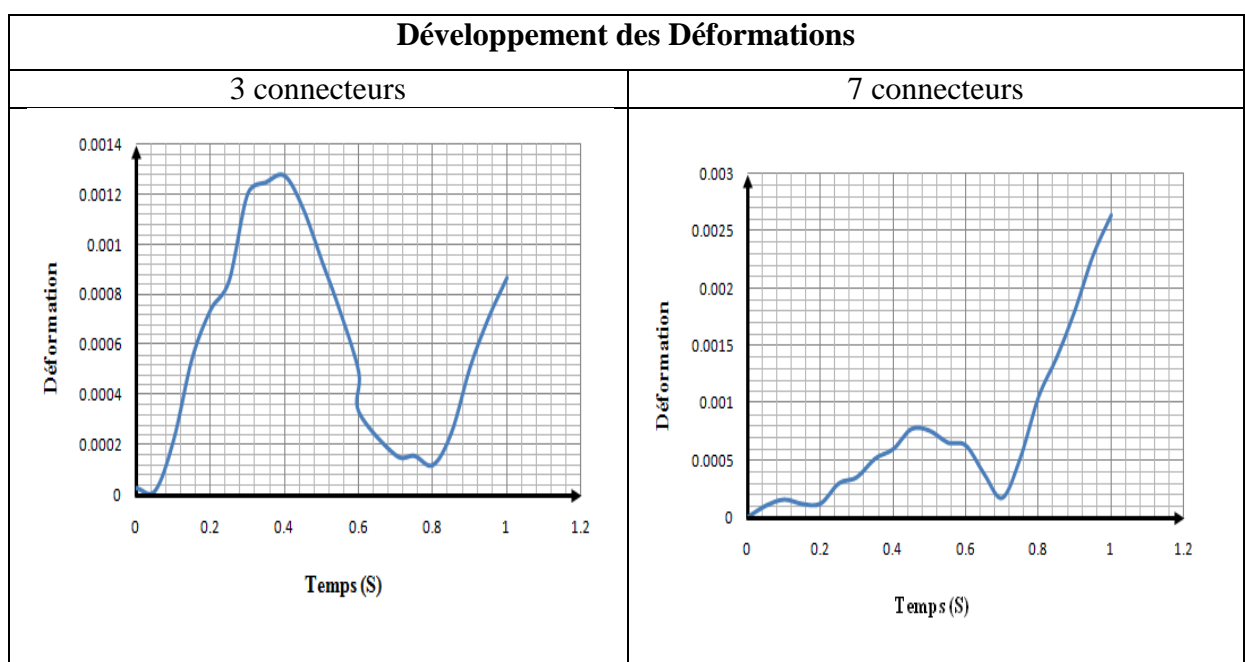


Fig IV-37 : Développement des déformations dans les deux modèles

On remarque dans cette figure que pour un temps de 0.4s une déformation de 0.0013 est atteinte dans le premier graphe par rapport à une déformation de 0.0008 environ (26%) dans le deuxième graphe, ce qui confirme l'importance joué par l'augmentation du nombre des connecteurs.

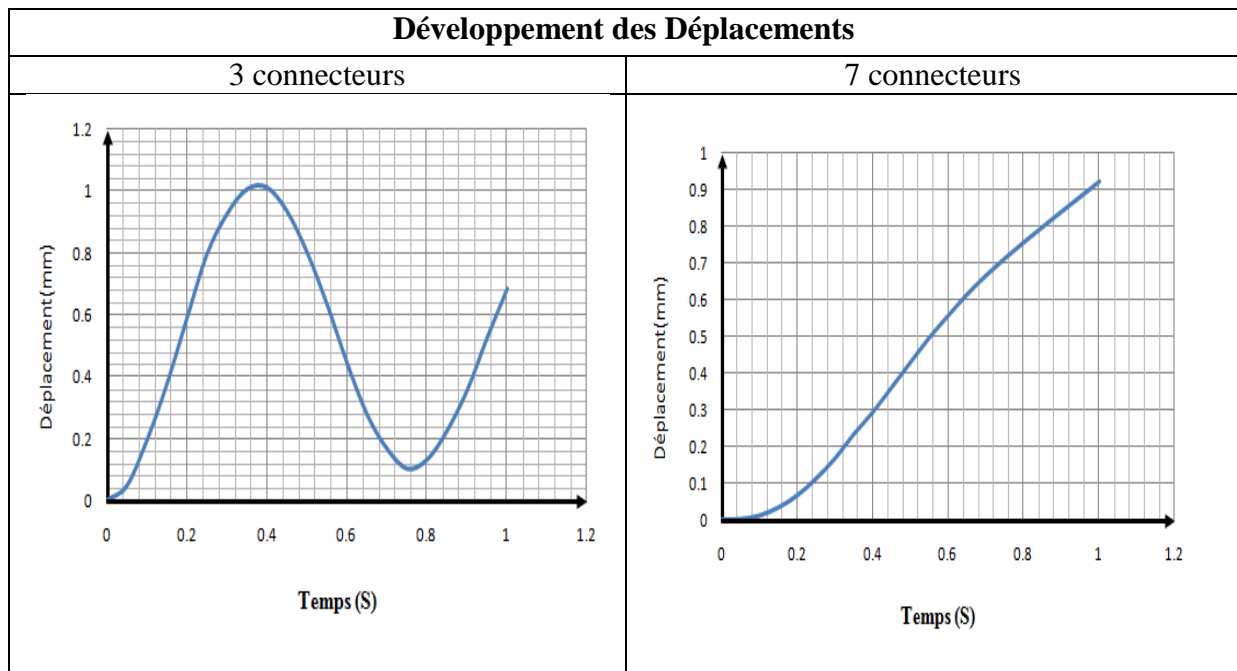


Fig IV-38 : Développement des déplacements dans les deux modèles

On remarque qu'un déplacement de 1mm est atteint pour un temps de 0.4s pour le modèle à 3 connecteurs mais pour le modèle à 7 connecteurs, il est atteint à 1s ce qui ouvre un grand axe sur le rôle repris par le nombre de ces connecteurs (espacements) dans la poutre mixte.

➤ **Contrainte-déformation :**

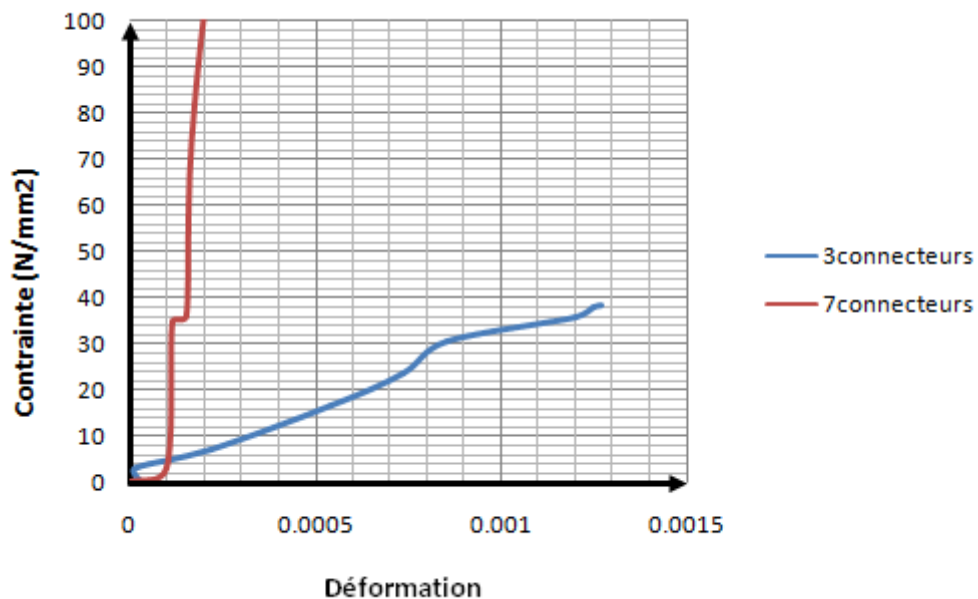


Fig IV-39 : Diagramme contrainte déformation

Pour la Fig IV-39, en termes de résultats ils sont beaucoup plus favorables pour le modèle à 7 connecteurs que pour le deuxième, car pour une grande capacité (contrainte) une petite déformation prend place au niveau du modèle à 7 connecteurs, contrairement au modèle à 3 connecteurs ou pour une petite capacité (1/3 de la première) de grande déformation apparait (15 fois la première)

Dans cette figure on remarque aussi que la courbe change de mouvement pour chaque intervalle de temps, donc elle prend une allure non linéaire.

IV-5 Comparaison et discussion des différents résultats :

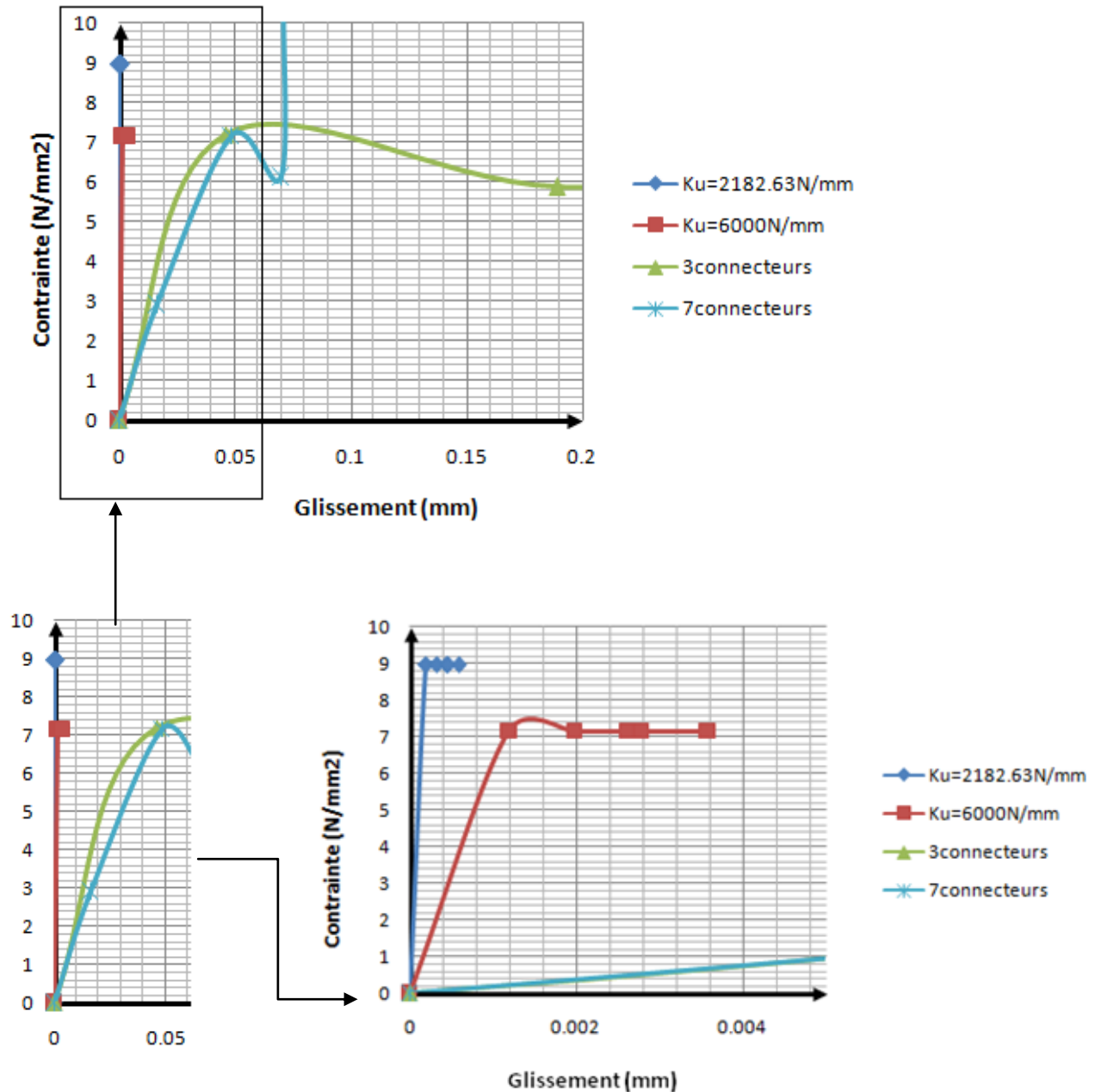


Fig IV-40 : Diagramme contrainte-glissement selon EC5 et ABAQUS

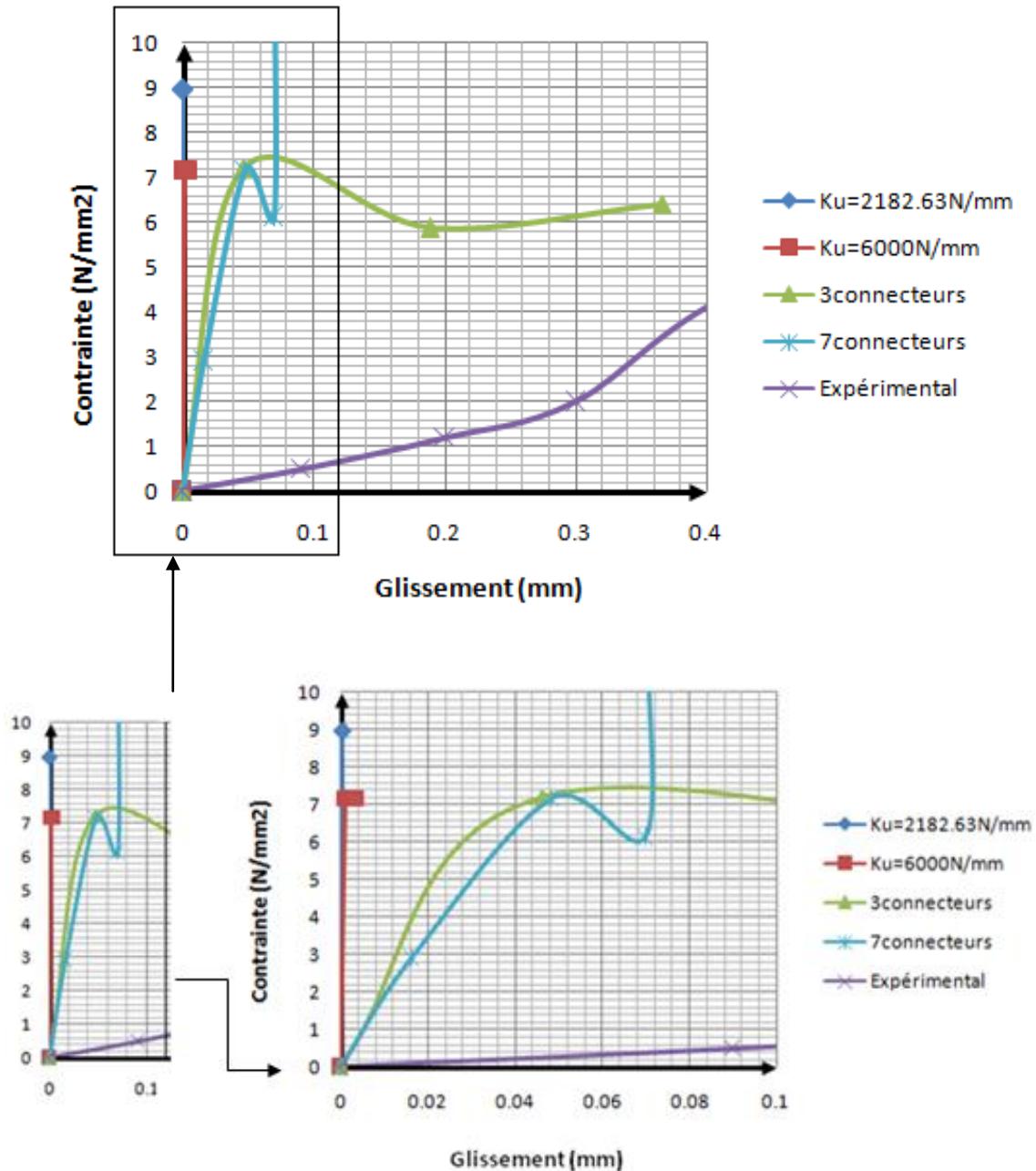


Fig IV-41: Comparaison des Diagrammes contrainte-glissement

Commentaire :

On remarque dans la Fig IV-41 que :

- ❖ Les résultats obtenus par le calcul analytique suivant l’Eurocode 5 sont très loin des autres résultats obtenus par la simulation numérique et l’expérimental.
- ❖ Le comportement de la poutre étudiée est pratiquement non linéaire sur tout l’intervalle d’étude pour la simulation et l’expérimental, donc chaque intervalle de temps obéit à une fonction spécifique indépendante, qui elle-même dépend des autres états de paramètres au

moment de développement de ces glissements ; contrairement aux ceux de EC5, car il admet dans la majorité des cas un comportement lineaire pour cette variation .

- ❖ Au niveau des glissement malgré que la poutre est soumise au même chargement, les glissement sont beaucoup plus important pour l'expérimental et la simulation que par rapport au calcul de l'Eurocode 5 .
- ❖ Nous avons constaté aussi que l'augmentation du nombre de connecteurs dans la poutre a diminué le glissement de cette dernière, ce qui confirme le role de ces connecteurs comme étant des organes intervenant dans la résistance aux efforts de cisaillement.

CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été consacré au développement du comportement non linéaire des connexions des planchers mixtes bois/béton. Le but principal consistait à mettre en évidence à travers une simulation numérique, un calcul analytique et un expérimental le comportement du système de connexion ainsi que son rôle dans la mixité bois/béton vis à vis du glissement au niveau des interfaces.

A partir des résultats obtenus, on constate que :

- Les différences constatées sont liées aux comportements fortement non linéaires du bois et du béton, la méthode analytique ne permet pas de reproduire les redistributions des efforts aux niveaux des connecteurs et ne prend pas en compte les éventuelles déformations irréversibles du système de connexion.
- La localisation des contraintes était au niveau de l'interface à l'endroit de l'emplacement des connecteurs, donc le rôle majeur de ces connecteurs était de diminuer le glissement au niveau de cette interface et de s'opposer aux efforts de cisaillements apportés par les sollicitations.
- La simulation numérique a permis de mieux comprendre le comportement de ces planchers mixtes bois/béton, l'étude de la poutre a montré les coins les plus fragiles et la variation des différents paramètres étudiés (contrainte, déformation et glissement).
- les résultats obtenus avec la méthode analytique suivant l'EUROCODE 5 sont loin de ceux obtenus avec l'expérimental et la simulation ABAQUS.
- Le comportement non linéaire de ces planchers est bien observé sur l'expérimental ainsi qu'à travers la simulation numérique avec ABAQUS, contrairement à l'EUROCODE 5.
- L'augmentation du nombre de connecteurs a permis l'augmentation de la capacité du plancher mixte en bois/béton (contraintes) et la diminution des déformations et des déplacements à travers ce dernier, une fois encore : l'importance de la présence de ces connecteurs dans les planchers est de reprendre l'effort de cisaillement transversal et la diminution du glissement et de la flèche.

PERSPECTIVES :

Au-delà des résultats obtenus dans cette étude, nous présentons quelques perspectives aux niveaux de la modélisation et de l'expérimentation pour les principaux phénomènes abordés.

- ❖ Réaliser des essais expérimentaux sur des poutres mixtes bois/béton hyperstatiques de différentes portées afin de mieux cerner le comportement non linéaire de cette dernière.
- ❖ Pouvoir tester les différents systèmes de connexions car ils permettent d'opter pour le meilleur résultat admis par un type de connexion.
- ❖ Réaliser des travaux par des connexions a double cisaillement.
- ❖ Introduire le comportement plastique de ces matériaux suivant une loi de comportement bien spécifique.
- ❖ La méthode analytique ne prend pas en compte la fissuration du béton, ni la non linéarité de son fluage (une loi rhéologique), ni les effets structuraux. En outre, le fluage du bois n'est pas un phénomène uniforme à l'encontre de l'hypothèse considérée dans la méthode analytique. Il dépend du niveau de contrainte combiné aux variations hydriques et à l'histoire cumulée de ces variations, à chaque point de la section.
- ❖ Introduction de la précontrainte dans le matériau bois pour voir l'effet apporté par cette dernière.
- ❖ Faire des calculs et des essais à cours, à moyen et à long terme pour ces planchers mixtes en bois/béton pour étudier l'effet des conditions climatiques telles que la température.
- ❖ Faire des développements numériques et les incorporés dans le code de calcul ABAQUS.

LISTE DES SYMBOLES

- b : la largeur de la poutre
h : la hauteur de la poutre
 ρ : valeur caractéristique de la masse volumique
l : la longueur de la poutre
s : l'espacement entre deux connecteurs successifs.
q : la charge uniformément répartie
E : le module d'élasticité
 M_d : valeur de calcul du moment fléchissant sollicitant dans la section étudiée
 V_d : valeur de calcul de l'effort tranchant sollicitant dans la section étudiée
 $(EI)_{\text{eff}}$: La rigidité équivalente en flexion
 γ : le facteur de glissement
K : le module de glissement
F : l'effort appliqué sur le connecteur
U : le glissement
 τ : contrainte maximale de cisaillement
 σ : contrainte normale

Les indices :

- 1 : le matériau béton
2 : le matériau bois
k : Fractile retenu pour une valeur caractéristique de 5%
max : maximum
eff : Efficace
u : état limite ultime
ser : état limite de service
i : le connecteur (i)
c : compression
t : traction

Références Bibliographiques

- [1] **Yoon-Seong Chang, Se-Jong Kim, Jun-Jae Lee, Hwanmyeong Yeo:** «Evaluation of indoor thermal environment in heated small scale-model houses» WCTE 2010.
- [2] **SBB : Système Bois Béton :** Notice technique 3/05/450 de **cert structure**, le 6 février 2006 ou sur <http://www.cstb.fr>
- [3] **Heinz WIELAND**, dipl ing : « **Structure composite bois-béton** » ou sur info@com-ing.com
- [4] **CSTC-Rapport n° 13 – 2010**, une édition du centre scientifique et technique de la construction : « comportement physique et mécanique des planchers mixtes en bois-béton »
- [5] **Renault DELABY :** « Étude des distributions des efforts horizontaux dans les structures mixtes : ossature bois, structures BA » projet de fin d'études, Juin 2010.
- [6] **Marilyne MBARGA** « Prédimensionnement de planchers mixtes bois-béton » INSA de Strasbourg, Juin 2009.
- [7] **BAEL** « Béton armée aux états limites »
- [8] **Eurocode 5** « Design of timber structures », DD_ENV_1995 partie 1-1 et partie 1-2.
- [9] **Hoai Son PHAM** « Optimisation et comportement en fatigue de la connexion bois-BFUP pour de nouveaux ponts mixtes » thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, Novembre 2007.
- [10] **J. M. FRANSEN** «Constructions en bois » Université de Liège, 2007-2008.
- [11] **Pascal TOUSSAINT** « Application et modélisation du principe de la précontrainte sur des assemblages de structure bois » thèse Docteur de l'□ université Henri Poincaré, Nancy 1
- [12] **Elias BOU SAID** « Contribution à la modélisation des effets diffères du bois et du béton sous conditions climatiques variables. Application aux structures mixtes bois-béton » thèse docteur de école doctorale des sciences de l'ingénieur de Lyon, mai 2003.
- [13] **James O'eill, David Carradine , Peter J. Moss, Massimo Fragiaco, Andrew H. Buchanan** « Fire performance of timber-concrete composite floors » WCTE 2010.
- [14] **FLEURET Mickaël, FUENTES Loïc, CHESNAY Christopher** « Plancher bois-béton » Projet M1 de l'université JOSEPH FOURIER, 2007-2008.
- [15] **Bathon, Leander A, Graf, Markus** «A continuous wood-concrete-composite system» University of Applied Sciences, Wiesbaden, Germany.

- [16] **Karl RAUTENSTRAUCH, Jens MUELLER, Antje SIMON** « The first timber-concrete composite road bridge in GERMANY » WCTE 2010.
- [17] **Jan-Willem van de Kuilen, Ario Ceccotti, Zhouyan Xia, Minjuan He, Shuo Li** «Wood concrete skyscrapers » WCTE 2010.
- [18] **Martin SCHAFERS, Warner SEIM** « Development of adhesive timber-UHPC composites- Experimental and theoretical investigations», WCTE 2010.
- [19] **Martin SCHAFERS, Werner SEIM** « Investigation on bonding between timber and ultra-high performance concrete (UHPC)» journal ELSEVIER , 12 February 2011.
- [20] **Ario CECCOTTI, Massimo FRAGIACOMO, Saverio GIORDANO** « Behaviour of a Timber-Concrete Composite Beam with Glued Connection at Strength Limit State »
- [21] **Bruce L. Deam, Massimo Fragiaco, Andrew H. Buchanan** «Connections for composite concrete slab and LVL flooring systems» Materials and Structures 2008
- [22] **Kestutis Gurkšnys, Audronis Kvedaras, Saulius Kavaliauskas** « Behaviour evaluation of “sleeved” connectors in composite timber-concrete floors» Journal of Civil Engineering and Management 14 Oct 2010.
- [23] **R. Gutkowski, K. Brown, A. Shigidi, J. Natterer** « Laboratory tests of composite wood–concrete beams» journal ELSEVIER, Construction and Building Materials 22 (2008), 31 May 2007
- [24] **Matthew R. LeBorgne, Richard M. Gutkowski** « load testing of wood-concrete beams incorporating recycled utility poles» April 2008
- [25] **M.R. LeBorgne, R.M. Gutkowski** « Effects of various admixtures and shear keys in wood–concrete composite beams» journal ELSEVIER, Construction and Building Materials 24(2010), 1 March 2010
- [26] **Martin S. Mungwa, Jean-François Jullien, Amos Foudjet, Guy Hentges** « Experimental study of a composite wood-concrete beam with the INSA-Hilti new flexible shear connector » journal ELSEVIER, Construction and Building Materials 13 (1999) 371-382
- [27] **Ario Ceccotti, Rilem Fellow, Massimo Fragiaco, Saverio Giordano** « Long-term and collapse tests on a timber-concrete composite beam with glued-in connection » Materials and Structures (2006) 40:15–25, 4 October 2006
- [28] **Rapport des essais réalisé sur joints mixtes bois-béton avec connecteurs à cheville et crampons. TECNARIA S.p.A.** Viale Pecori Giraldi n° 55 - 36061 Bassano del Grappa (VI) – Italie
- [29] **M. Fragiaco, C. Amadio, L. Macorini** «Short- and long-term performance of the “Tecnaria” stud connector for timber-concrete composite beams» Materials and Structures (2007) 40:1013–1026, 13 December 2006

- [30] **L.F Gorge, J Schanzlin, S.M.R. Lopes, H Kruz, U Kuhlmann** « Time-dependent behavior of timber lightweight concrete composite floors» Journal ELSEVIER, Engineering Structures 32 (2010)3966-3973.
- [31] **Jeno Balogh, Nathan Miller, Massimo Fragiaco, Richard Gutkowski** «Time-dependent behavior of composite wood-concrete bridges made from salvaged utility poles»
- [32] **Pietro Aldi , Ulrike Kuhlmann,** «Fatigue strength of timber-concrete composite bridges: determination of a s-n-line for the grooved connection and the x-connector» WCTE 2010.
- [33] **Leander Bathon, Oliver Bletz-Mühldorfer** «fatigue of single span wood-concrete-composite bridges» WCTE 2010
- [34] **José Luiz Miotto a,* , Antonio Alves Dias** « Evaluation of perforated steel plates as connection in glulam–concrete composite structures » journal ELSEVIER Construction and Building Materials 28 (2012) 216–223, 16 August 2011
- [35] **Alfredo M.P.G.Dias, Luis F.C.Jorge** « The effect of ductile connectors on the behavior of timber-concrete composite beams» Journal ELSEVIER, Engineering Structures 33 (2011) 3033-3042
- [36] **Sandra Monteiro, Alfredo Dias, João egrão** « Experimental and umerical evaluation of notched timber-concrete joints mechanical behavior »WCTE 2101.
- [37] **Eliene Pires Carvalho, Edgar V Mantilla Carrasco** «Influence of test specimen on experimental characterization of timber-concrete composite joints» » journal ELSEVIER Construction and Building Materials 24 (2010) 1313–1322.
- [38] **A.M.P.G. Dias, J.W.Van de Kuilen, S.Lopes, H Cruz** « A non-lineaire 3D FEM model to simulate timber-concrete joints» journal ELSEVIER, Advances in Engineering software 38(2007)522-530
- [39] **Jorge M. Branco , Paulo J.S. Cruz, Maurizio Piazza** « Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections » journal ELSEVIER, Construction and Building Materials 23 (2009) 400–410.
- [40] **Rajendra Rijal, Bijan Samali, Keith Crews, Rijun Shrestha** «Dynamic behaviour of timber-concrete composite flooring systems » WCTE 2010.
- [41] **Elzbieta Lukaszewska, Massima Fragiaco** «Static and dynamic (vibration) performance of composite beams with prefabricated concrete slab» WCTE 2010.
- [42] **Nor Hayati Abd. Ghafar, Bruce Deam, Massimo Fragiaco** « vibration susceptibility of multi-span lvl-concrete composite floors »WCTE 2010.
- [43] **Luís Jorge1, Johannes Habenbacher2, Bruno Dujic** « Timber-concrete composite systems with cross laminated timber» WCTE 2010.
- [44] **Thanasis C. TriantaFillou** « Composites: a new possibility for the shear

strengthening of concrete, masonry and wood » journal ELSEVIER, Composites Science and Technology 58 (1998) 1285-1295

[45] **Joan R. Casas , Jordi Pascual** « Debonding of FRP in bending: Simplified model and experimental validation » journal ELSEVIER, Construction and Building Materials 21 (2007) 1940–1949

[46] **C. Mazzotti, M. Savoia, B. Ferracuti** « An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete » journal ELSEVIER, Construction and Building Materials 22 (2008) 1409–1421

[47] **Antonio Alves Dias, José Luiz Miotto** « GFRP-glulam-concrete composite beams: an experimental evaluation » **WCTE 2010.**

[48] **David Yeoh, Massimo Fragiaco, Andrew Buchanan, Bruce Deam**
«Experimental performance of lvl-concrete composite floor beams» wcte 2010.

[49] **E. Lukaszewska, H. Johnsson, M. Fragiaco**« Performance of connections for prefabricated timber–concrete composite floors»Materials and Structures (2008) 41:1533–1550

[50] **Roberto Crocetti, Tiziano Sartori, Mathias Flansbjer** « timber-concrete composite structures with prefabricated frc slab “ WCTE 2010.

[51] **D. Yeoha, M. Fragiaco , B. Deam** «Experimental behaviour of LVL–concrete composite floor beams at strength limit State » journal ELSEVIER , Engineering Structures 33 (2011) 2697–2707

[52] **Silva Lozančić, Stjepan Takač, Mirjana Bošnjak Klečina** «research of the rheological slipping module on the composite wood-concrete structure samples » issn 1330-3651

[53] **Yves Debard** «Méthode des éléments finis : « Flexion des poutres à plan moyen » 24 mars 2006 - 29 mars 2011

[54] **Patrick MARTIN,** « Etude du comportement des poutres lamellées clouées boulonnées en flexion » thèse de Docteur de l'ENGREF, 13 janvier 2006

[55] « **Structure composées** » document de l'université de lorraine

[56] **Frédéric Duprat** « Construction Bois 1 »INSA

[57] **EUROCODE 2** « **Calcul des structures en béton** »

[58] « **Construction en bois** » **document** de l'université de lorraine

[59] **TECNARIA** « Plancher mixte bois-béton »**Avis Technique 3/09-603** ,24 juin 2009

[60] **Documentation ABAQUS,** Thèse de M2 recherche par **MADOUNI Lyliya,** UMMTO

[61] Documentation ABAQUS, Thèse de M2 recherche par KEZMANE Ali, UMMTO

[62] Christophe Gerber, Keith Crews, Matteo Foscoliano, Salvatorangelo Agus,
« Development of Timber Concrete Composite Flooring in Australia and New Zealand »
WCTE 2010.