

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie Civil



Projet de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Option : Structure

Thème

**ETUDE D'UNE POUTRE MIXTE BOIS *BETON* :
APPLICATION D'UN PLAN D'EXPERIENCE**

Dirigé par :

Mr DEHMOUS Hocine

Réalisé par :

HACHEMANE Yasmine

Promotion 2013-2014

Remerciements

Tout d'abord je remercie le bon dieu qui m'a donné la force, le courage, et la volonté pour atteindre mon objectif.

La première personne que je tiens à remercier c'est mon promoteur Mr DEHMOUS HOCINE pour sa gentillesse, sa disponibilité, sa patience, et surtout son orientation pour faire ce travail.

Je tiens a remercié Mr ALICHE AMAR pour sa gentillesse, ses explication, ses réponses sa toute les questions et les problèmes rencontrés dans le code ABAQUS.

Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils sont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail, et de l'enrichir par leurs propositions

Et je remercie toutes les personnes qui mon aider pour faire ce travail.

Dédicaces

A mon cher père, à ma chère mère, sans eux je n'aurais pas abouti à ce stade,
que dieu puisse m'aider à les honorer.

A mes chers grands parents.

A mes Chères sœurs.

Chers oncles, chères tantes.

Chères cousines, chers cousins.

A toutes la famille HACHEMANE

A mes ami(e)s

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralité sur les planchers mixte bois-béton

I-1-Utilisation de planchers mixtes bois béton.....2

I-2-différents types de planchers mixtes bois-béton.....3

 I-2.1-Plancher D-Dalle-CBC-CBT.....3

 I-2.2-Plancher PP2B (COSYLVA).....4

 I-2.3-Plancher LIGNADAL.....4

 I-2.4-Plancher TECNARIA.....5

 I-2.5-Plancher SBB.....6

I-3-Avantages et inconvénients de plancher mixte.....7

I-4-les connecteurs.....8

 I-4.1-Rôle des connecteurs.....9

 I-4.2 différents types de connecteur.....11

 a- les tiges et les tubes.....11

 b- SBB.....12

 c- Systèmes composites Timco.....12

 d-Ruban.....12

I-5- Béton.....13

 I-5.5-avantages et inconvénients du béton.....14

I-6- le bois.....14

 I-6.1- Constitution du bois.....14

 I-6.2- Différents type de bois utilisés en construction.....15

 I-6.3- caractéristiques de bois.....17

 • Propriété physique.....17

 1-Humidité.....17

 2-Le retrait.....17

 3-Le gonflement.....17

 4- dilatation thermique.....18

• Propriété mécanique.....	18
1-Compression axiale (parallèle au fil).....	18
2- Compression perpendiculaire au fil (compression transversal).....	18
3- Traction parallèle au fil.....	19
4-Traction transversal (perpendiculaire au fil).....	19
5-Résistance à la Flexion.....	20
6-Résistance au cisaillement.....	21
• Diagramme contrainte – déformation.....	21
I-7 Conclusion.....	22

Chapitre II : Notion de plan d'expérience

II. Introduction.....	23
II-1-Généralités sur les plans d'expériences.....	24
II-2-But des plans d'expérience.....	25
II-3-Méthodologie des plans d'expériences.....	25
• 1. Formalisation du problème (Objectif).....	25
• 2. Choisir les facteurs, niveaux et interactions (modèle de base).....	25
• 3. Construire le plan (Choix des affectations).....	25
• 4. Réaliser les essais du plan (Résultats).....	26
• 5. Analyser les résultats (effets, graphiques, variances).....	26
• 6. Optimiser la réponse (Modèle, conclusion).....	26
II-4-Plan d'expériences par la méthode de Taguchi.....	26
II-5-Traitement des résultats.....	28
II-6-Conclusion.....	28

Chapitre 3 : simulation numérique

III. Introduction.....	29
III-1-Le modèle mécanique.....	29
III-2-Présentation du logiciel ABAQUS.....	32
1-ABAQUS/Standard.....	32
2-ABAQUS/Explicit.....	32
3-ABAQUS/CAE (complète Abaqus environnement).....	33
III-3- Manipulation du logiciel.....	33
III-4-Les étapes de la modélisation.....	34
➤ Géométrie de la poutre (bois et béton).....	34
➤ Géométrie des connecteurs.....	35
➤ Les propriétés des matériaux.....	35
➤ Module assembly.....	37
➤ Module Step.....	38
➤ Module Interaction.....	39
➤ Module load.....	40
➤ Module Mesh.....	40
➤ Module Job.....	42
➤ Module Visualization.....	42
III-5-Conclusion.....	44

Chapitre IV : Analyse de la poutre mixte par plan d'expérience

IV-Introduction.....	45
IV-1 Mise en place du plan d'expériences	46
IV-2 Modèle linéaire.....	46
-Traitement des résultats.....	50
-Combinaison optimale.....	56
IV-3.Modèle non linéaire.....	57
-Traitement des résultats : calcul non linéaire.....	58
-Combinaison optimale.....	65
IV-4.Conclusion.....	66
Conclusion générale.....	67

Liste des figures

Figure I.1 : planchers mixte en bois béton.....	2
Figure I.2 : Schéma d'un plancher mixte D-Dalle.....	3
Figure I.3 : Schéma d'un plancher PP2B (COSYLVA).....	4
Figure I.4 : schéma d'un plancher LINGNADAL.....	5
Figure I.5 : Schéma d'un plancher TECNARIA.....	6
Figure I.6 : Schéma d'un plancher SBB.....	6
Figure I.7 : schéma de représentation de rôle des connecteurs dans une poutre.....	9
Figure I.8 : Effet du connecteur sur le diagramme des contraintes.....	10
Figure I.9 : Connecteur tube.....	11
Figure I.10 : connecteur tige.....	11
Figure I.11 : connecteurs SBB.....	12
Figure I.12 : ruban.....	12
Figure I.13 : Essai de compression.....	13
Figure I.14 : Différents essais sur les résistances d'un béton en traction.....	13
Figure I.15 : les Trois axes principaux du bois.....	15
Figure I.16 : poutre en bois massif.....	16
Figure I.17 : Bois lamellé collé.....	16
Figure I.18 : Bois massifs contrecollés.....	16
Figure I.19 : différents types de panneaux.....	17
Figure I.20 : Contrainte de rupture de Compression axiale.....	18
Figure I.21 : Contrainte de rupture de compression transversale.....	19
Figure I.22 : Contrainte de rupture de traction axiale.....	19
Figure I.23 : Contrainte de rupture de traction transversale.....	20
Figure I.24 : Contrainte de rupture de flexion.....	20
Figure I.25 : Contrainte de rupture de cisaillement.....	21
Figure I.26 : Diagramme contrainte déformation dans le bois.....	22
Figure II.1 : Courbe de dispersion des mesures.....	23
Figure II.2 : Courbe optimisée de dispersion des mesures.....	24

Figure III.1 : présentation de la poutre.....	30
Figure III.2 : Organigramme de résolution de schéma statique implicite.....	32
Figure III.3 : Organigramme de résolution d'un problème mécanique en utilisant un schéma dynamique explicite.....	33
Figure III.4 : Interface d'ABAQUS.....	34
Figure III.5 : Module part.....	35
Figure III.6 : Module part pour les connecteurs.....	35
Figure III.7 : Module materials.....	36
Figure III.8 : Espacements des connecteurs.....	38
Figure III.9 : Module assembly.....	38
Figure III.10 : Module Step.....	39
Figure III.11 : Module interaction.....	40
Figure III.12 : Géométrie de la poutre.....	40
Figure III.13 : Module load.....	41
Figure III.14 : Module Mesh.....	41
Figure III.15 : Moule Job.....	42
Figure III.16 : Module visualization.....	42
Figure III.17 : Répartition des déplacements.....	43
Figure III.18 : Répartition des contraintes dans la poutre.....	43
Figure IV.1 : présentation de la poutre.....	45
Figure IV.2 : Evolution du déplacement max.....	53
Figure IV.3 : Diagramme des effets de chaque facteur sur le déplacement max.....	53
Figure IV.4 : Evolution de la contrainte dans le bois.....	54
Figure IV.5 : Diagramme des effets de chaque facteur sur la contrainte dans le bois.....	55
Figure IV.6 : Evolution de la contrainte dans le béton.....	55

Figure IV.7 : Diagramme des effets de chaque facteur sur la contrainte dans le béton.....56

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Influence d'une connexion parfaite dans une poutre.....	10
Tableau II-1 : Plan d'expérience complet	27
Tableau II-2 : Plan d'expérience fractionné.....	27
Tableau III-1 : Propriétés géométriques de la poutre mixte.....	30
Tableau III-2 : Propriétés géométriques du connecteur.....	30
Tableau III-3 : Propriétés des matériaux.....	36
Tableau III-4 : loi de comportement du connecteur.....	37
Tableau III-5 : Tableau des unités correspond à ABAQUS.....	37
Tableau III-6 : tableau de coefficient d'interaction.....	39
Tableau IV-1 : Propriétés des matériaux.....	45
Tableau IV-2 : Tableau des coefficients d'interaction.....	45
Tableau IV-3 : Plan d'expérience complet. Niveaux des facteurs.....	47
Tableau IV-4 : Plan d'expérience complet : Valeur des facteurs.....	48
Tableau IV-5 : Plan d'expérience complet : Réponse de la poutre mixte.....	49
Tableau IV-6 : Effet Moyen des facteurs.....	52
Tableau IV-7 : Combinaison optimale.....	56
Tableau IV-8 : Plan d'expérience fractionnaire	57
Tableau IV-9 : Plan d'expérience fractionnaire : valeurs des facteurs.....	57
Tableau IV-10 : Plan d'expérience fractionnaire : la réponse de la structure.....	58
Tableau IV-11 : effet des facteurs.....	61
Tableau IV-12 : Combinaison optimale.....	65

Résumé

La structure objet de notre étude est un assemblage des 3 matériaux différents; bois, béton et connecteur en acier. Ainsi l'objectif est de déterminer la combinaison optimale et ceci en appliquant la méthode des plans d'expériences. Le plan d'expérience adopté est un plan numérique c'est pourquoi on a fait appel au code abaqus pour la mise en place de deux modèles numériques ; un linéaire et un non linéaire. Dans le premier cas on réalise un plan d'expérience complet avec 5 facteurs à deux niveaux. Dans le second, on fait appel à un plan fractionnaire qui permet de passer de 32 à 8 essais. Les différents résultats obtenus ont permis d'analyser l'effet de chaque facteur et de déduire la combinaison optimale.

Abstract

The purpose of our study structure is an assembly of three different materials; wood, concrete and steel connector. Thus the objective is to determine the optimal combination and this by applying the method of experiments. The experimental design adopted is a digital map that is why it appealed to abaqus for the establishment of two numerical models code; linear and nonlinear. In the first case a complete experimental design with five factors is carried out at two levels. In the second, it uses a fractional plan to switch from 32-8 tests. The different results obtained were used to analyze the effect of each factor and to deduce the optimal combination.

Introduction Générale

Le principe d'un plancher mixte consiste à faire travailler deux matériaux différents grâce à la mise en œuvre de connecteurs. Dans le cadre de cette étude, il s'agit d'un plancher bois-béton. Autrement dit on va faire travailler en compression le béton et le bois en traction. 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.

Compte tenu du fait que notre structure résulte de l'assemblage de trois matériaux différents ; béton, bois et acier (connecteur), il serait judicieux de choisir une combinaison optimale qui permet d'obtenir la meilleure structure possible.

Un plan d'expériences est une suite d'essais organisée à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et avec un maximum de précision, l'influence des différents paramètres possibles, pour optimiser les performances d'un système ou d'une structure.

Dans le cadre de cette étude, nous allons appliquer la méthode des plans d'expériences numériques pour l'étude d'une poutre mixte bois béton. Il s'agira de déterminer l'effet de la variabilité des paramètres d'entrée sur les paramètres de sortie.

Dans un premier temps, un modèle numérique de la structure objet de notre étude sera mis en place en utilisant le code élément finis abaqus.

Dans un second temps, un plan d'expérience complet et fractionné sera mis en place en considérant 5 facteurs à deux niveaux. Ainsi plusieurs simulations numériques seront effectuées pour mettre en évidence l'effet de chaque paramètre sur le comportement de notre structure.

Chapitre I

Généralité sur les planchers mixte bois-béton

I-Introduction

Les planchers mixtes bois-béton (voir figure 1.1) sont composés d'une poutre en bois et d'une dalle en béton. Ils permettent de faire travailler le bois en traction et le béton en compression grâce à la mise en œuvre des connecteurs.

Les connecteurs sont caractérisés par un module de glissement qui joue un rôle primordial dans la rigidité du système.

Les planchers ont fait l'objet de nombreuses innovations, il existe donc plusieurs systèmes de dalles mixtes et de connexions

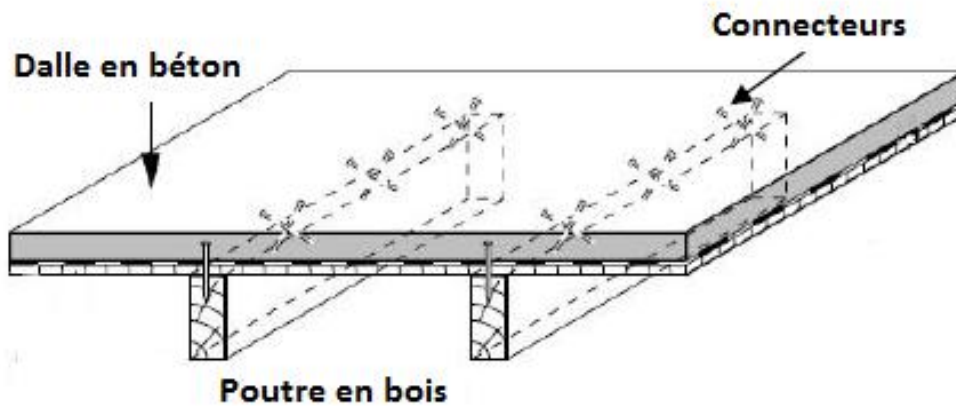


Figure I.1 : planchers mixte en bois béton

I-1-Utilisation de planchers mixtes bois béton

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 planchers mixtes sont utilisés dans la construction des bâtiments des ouvrages d'art, même en réhabilitation des structures anciennes. Les planchers mixtes bois-béton sont utilisés en réhabilitation car ils permettent de conserver la structure existante de planchers tout en augmentant la portée et la rigidité. Cette solution évite la démolition et le remplacement total des planchers anciens, parfois conçus pour des charges limitées. Lors d'une réhabilitation, il est assez courant que le projet consiste à disposer des connecteurs sur des poutres en bois existantes et, ensuite, à couler la dalle en béton qui sera connectée.

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 coût et d'esthétisme, il peut être judicieux d'avoir recours au plancher mixte bois-béton. Comparé à une dalle en béton armé, le plancher collaborant permet de réduire :

- la charge d'un bâtiment
- l'épaisseur des séparations horizontales
- les ponts thermiques

I.2-différents types de planchers mixtes bois-béton

Il existe plusieurs types de planchers mixtes bois-béton et de systèmes de connexion. Nous présentons dans ce qui suit quelques exemples de ces différents types de plancher.

I-2.1- plancher D-Dalle-CBC-CBT

La double dalle mixte bois-béton est utilisée dans le domaine des dalles de grandes portées de 11 m à 18 m sans appuis,

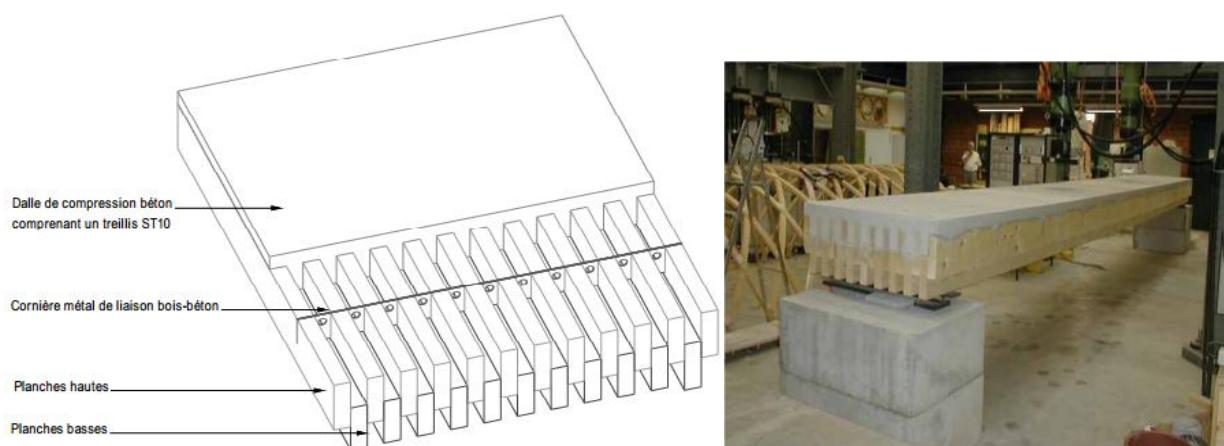


Figure I.2 : Schéma d'un plancher mixte D-Dalle.

Elle est constituée d'une structure bois en planches vissées et assemblées en crénelage par décalage alterné, augmentant la hauteur statique et la résistance à la flexion sans augmenter le poids de la structure. Elle permet également d'obtenir en sous-face un plafond acoustique d'aspect solives apparentes. La liaison bois-béton se fait par des plaques transversales en acier perforé transmettant les efforts de cisailement puis coulage d'une dalle de compression en béton [1].

I-2.2- plancher PP2B (COSYLVA)

Plancher mixte réalisé avec des poutres en bois pré connectées et une dalle en béton armé coulé sur place. La liaison entre les poutres en bois et la dalle en béton est assurée par des connecteurs métalliques tubulaires répartis, à intervalles régulier, le long de l'interface bois-béton. [2]

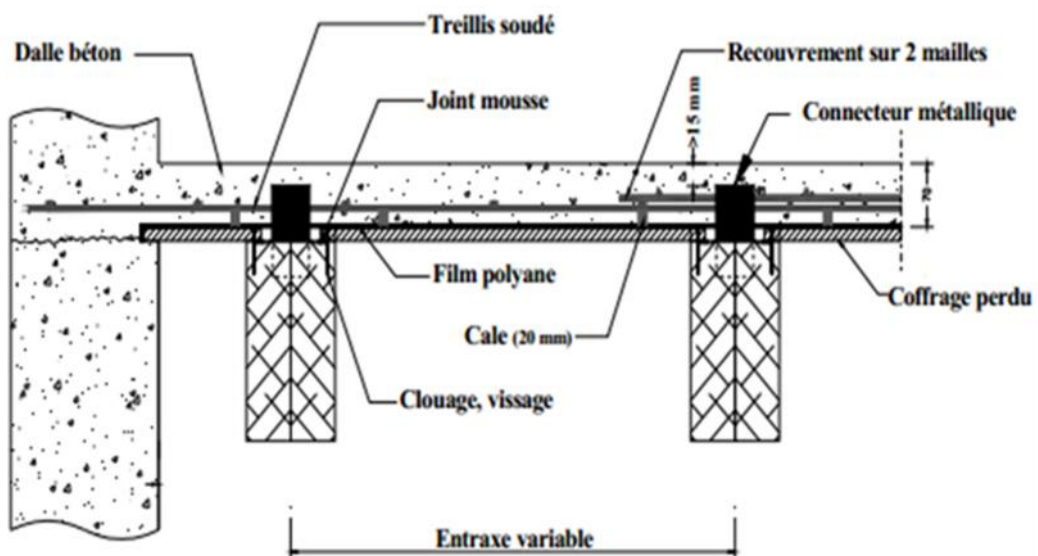


Figure I.3 : Schéma d'un plancher PP2B (COSYLVA).

I-2.3- Plancher LIGNADAL :

Le plancher mixte bois-béton LIGNADAL est un plancher qui associe une prédalle formée de planches en bois à une dalle en béton coulé en place. La liaison entre les planches en bois et la dalle en béton est assurée par des connecteurs en bois.

Ce plancher peut être utilisé pour la réalisation des planchers d'étages courants, ou pour les toitures, terrasses de bâtiments d'habitation, de bureaux, d'enseignement, d'activités sportives et d'autres destinations. [3]

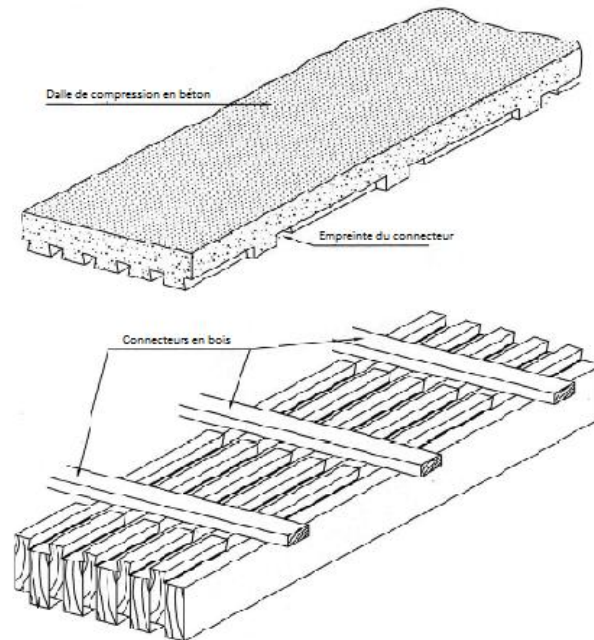


Figure I.4 : schéma d'un plancher LINGNADAL

I-2.4-Plancher TECNARIA :

Plancher mixte réalisé avec des poutres en bois et une dalle en béton armé à base de granulats lourds, coulée en place. La liaison entre les poutres en bois et la dalle en béton est assurée par des connecteurs métalliques de type ergots avec plaque de fixation, à intervalles réguliers ou variables, le long de l'interface bois-béton. Les connecteurs peuvent avoir deux types de plaque de fixation, « BASE » ou « MAXI » avec respectivement des tire fonds de 8 et 10 mm de diamètre. Le bois peut être résineux, feuillus ou lamellé collé. [4]

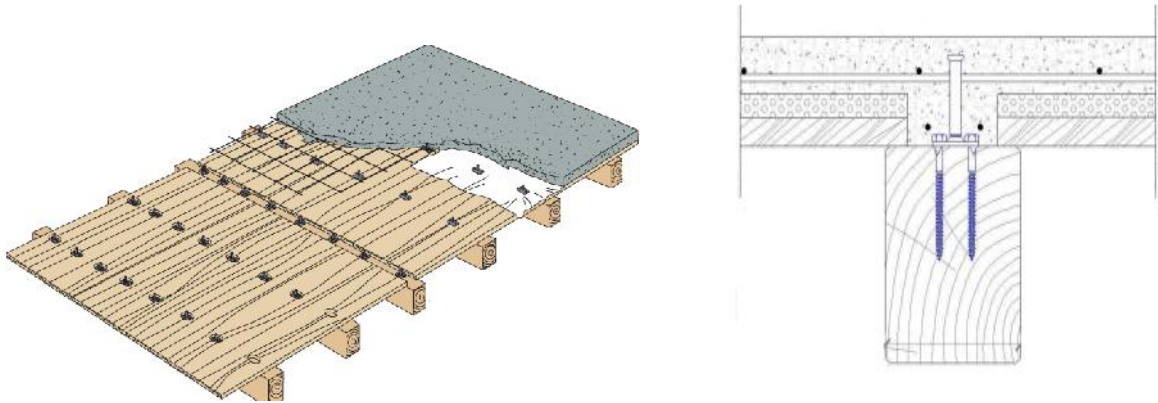


Figure I.5 : Schéma d'un plancher TECNARIA

I-2.5- plancher SBB

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 de connecteurs métalliques de type tire-fond à filet variable vissés dans les poutres en bois. Cette liaison permet de tenir compte de l'inertie de la section complète bois et table en béton associée pour justifier la résistance et les flèches du plancher. [5]

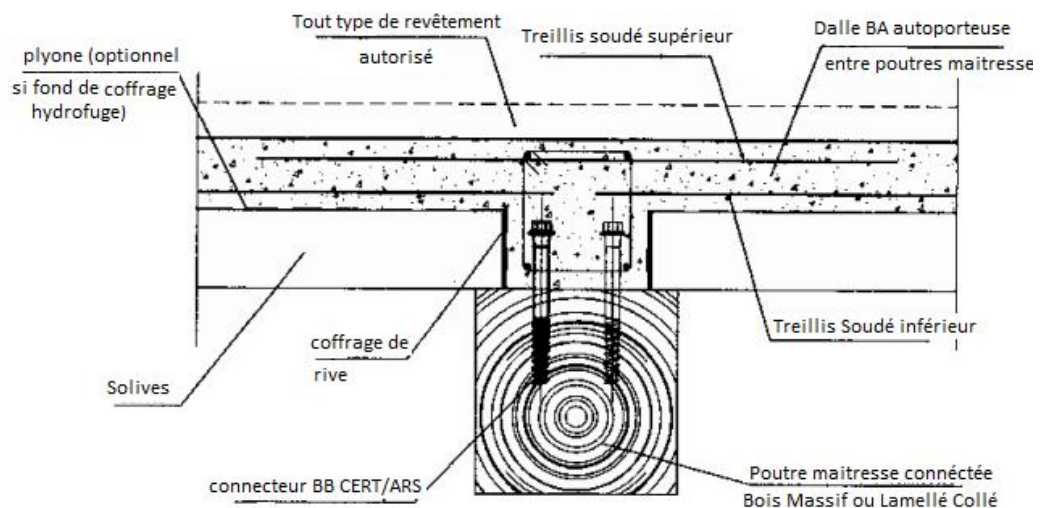


Figure I.6 : Schéma d'un plancher SBB.

I-3-Avantages et inconvénients de plancher mixte

- **Avantage** 📌:

- 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.
- 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.

- **Inconvénients** 📌 :

- 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 des 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.
- Enfin, un plancher mixte reste plus onéreux qu'un plancher classique. Son coût est en moyenne plus élevé qu'un plancher béton.

I-4-les 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.

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 ;
- 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.

I-4.1- Rôle des connecteurs :

Le rôle des connecteurs c'est de transmettre 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.

Pour comprendre le rôle joué par les connecteurs, il paraît intéressant de représenter le comportement d'une poutre simple soumise à flexion comme représenté dans le schéma suivant (figure 1.7)

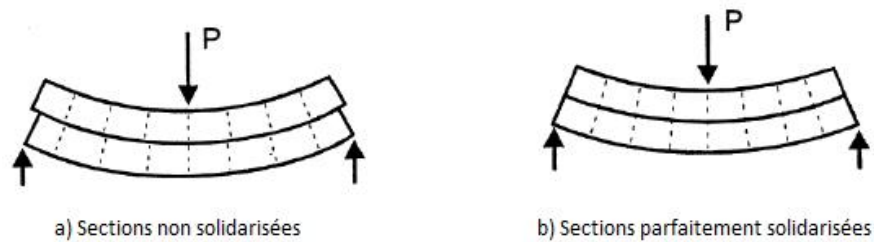


Figure I.7 : schéma de représentation de rôle des connecteurs dans une poutre [6]

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).

Le tableau suivant représente résumé l'effet de la présence du connecteur sur la flèche et la contrainte.

Cas	Distribution des contraintes	Contraintes	Flèche (charge ponctuelle centrée sur poutre isostatique)
Limite supérieure (monolithique)		$\sigma_a = \frac{M \frac{h}{2}}{b(h)^3} = \frac{6M}{bh^2}$	$f_{i,a} = \frac{PL^3}{48E \frac{bh^3}{12}} = \frac{PL^3}{4Ebh^3}$
Limite inférieure (glissement parfait)		$\sigma_b = \frac{M/2 \frac{h}{4}}{b\left(\frac{h}{2}\right)^3} = \frac{12M}{bh^2}$	$f_{i,b} = \frac{P/2L^3}{48E \frac{b\left(\frac{h}{2}\right)^3}{12}} = \frac{PL^3}{Ebh^3}$
Rapport $\frac{Lim_{sup}}{Lim_{inf}}$	-	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$

Tableau I-1. Influence d'une connexion parfaite dans une poutre [6]

Donc pour augmenter la résistance et la rigidité en flexion d'un plancher en bois, il faut connecter mécaniquement une dalle en béton au plancher en bois existant.

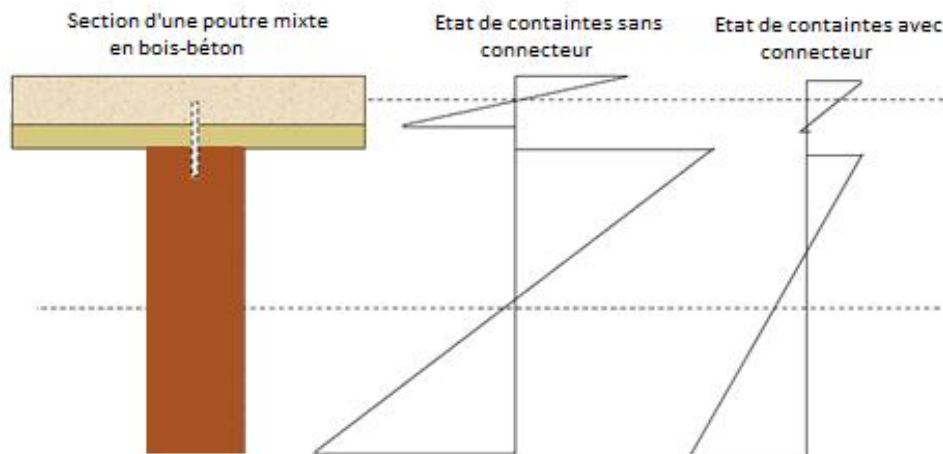


Figure I.8 : Effet du connecteur sur le diagramme des contraintes

La figure ci-dessous illustre schématiquement le gain de matière et de hauteur obtenu sur un plancher mixte en bois-béton par rapport à des planchers traditionnels en bois, pour un même moment de flexion sollicitant, grâce à la mise en place d'une collaboration (plus ou moins parfaite) entraînant la réduction de la section de la poutre en bois.

I-4.2 différents types de connecteur :

Pour effectuer cette liaison, on peut avoir recours à différents types de connecteurs certains sont très simples à mettre en place, alors que d'autres nécessitent une préparation en atelier.

On cite quelque connecteur :

a- les tiges et les tubes :

Les tiges sont des barres cylindriques de 15 mm de diamètre. Les tubes ont un diamètre extérieur de 30mm et une épaisseur de 1à5 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

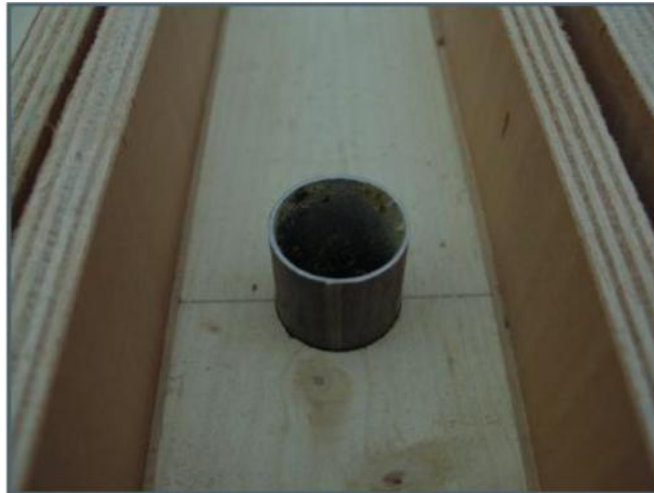


Figure I.9 : Connecteur tube



Figure I.10 : connecteur tige

b- SBB

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.



Figure I.11 : connecteurs SBB

c- Systèmes composites Timco :

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

d-Ruban

C'est un système de connexion continue, Le métal déployé est remplacé par une bande métallique trouée d'épaisseur 1; 5mm



Figure I.12: ruban

I-5- Béton:

La bibliographie consacrée au matériau béton [7, 8, 9, 10] est très vaste c'est pourquoi dans ce paragraphe, nous ne citons que l'essentiel. 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. 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.

La caractéristique essentielle du béton durci est la résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours) notée f_{c28} . Cette résistance caractéristique est déterminée à partir d'essais sur des éprouvettes 16 X 32.

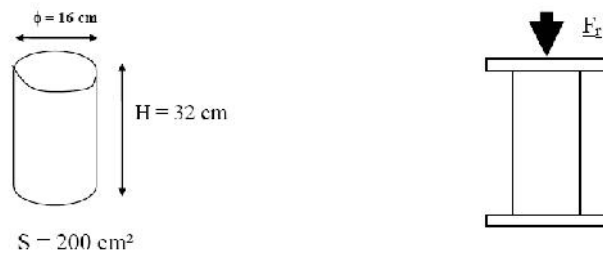


Figure I.13 : Essai de compression

Les résistances caractéristiques en traction peuvent être déterminées par l'essai de traction par flexion, essai de traction par fendage, et l'essai de traction directe

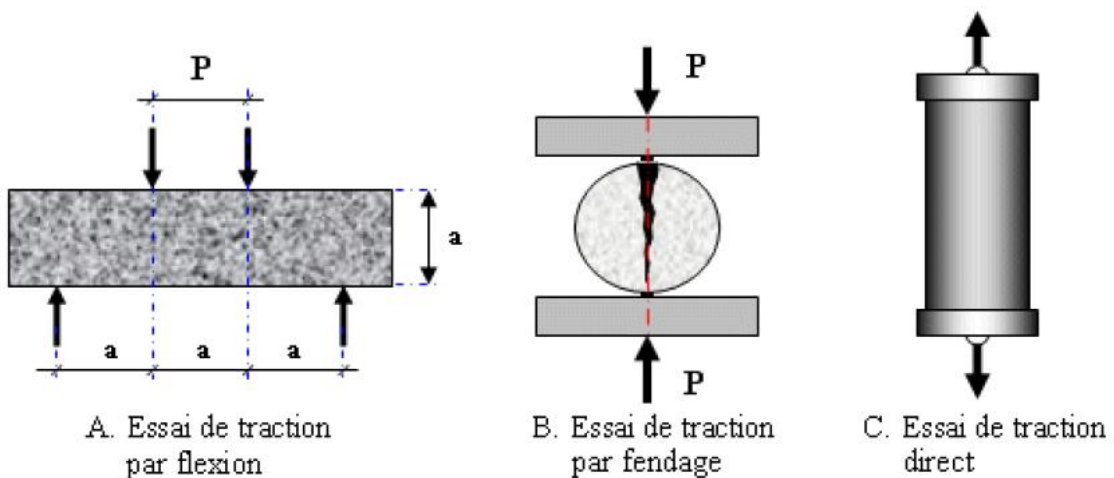


Figure I.14 : Différents essais sur les résistances d'un béton en traction. [7]

I-5.5-avantages et inconvénients du béton :

a- avantage :

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité.
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

b-inconvénient :

- Il a un poids propre élevé.
- Il a une faible résistance à la traction.
- Sa faible isolation thermique

I-6- le bois :

Le bois est une ressource naturelle qui est largement disponible dans le monde et il possède plusieurs avantages environnementaux et structuraux. Les structures en bois ont fait l'objet d'un nombre plus restreint d'étude, ceci peut s'expliquer en partie par la demande empirique adoptée par les anciens règlements.

I-6.1- Constitution du bois :

Le bois se distingue des autres matériaux de génie civil par son Orthotropie. Le matériau 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 orthotrope cylindrique du bois [11].

Suivant l'orientation par rapport aux fibres principales. En chaque point d'un tronç d'arbre, on distingue 3 axes d'orientations principaux ainsi que 3 coupes possibles perpendiculairement à ces axes :

- Une longitudinale L, plus important car les fibres sont essentiellement orientées dans ce sens.
- Une radiale R, perpendiculaire aux cernes de croissances (aux fibres).
- Une tangentielle T, perpendiculaire aux deux précédentes directions.

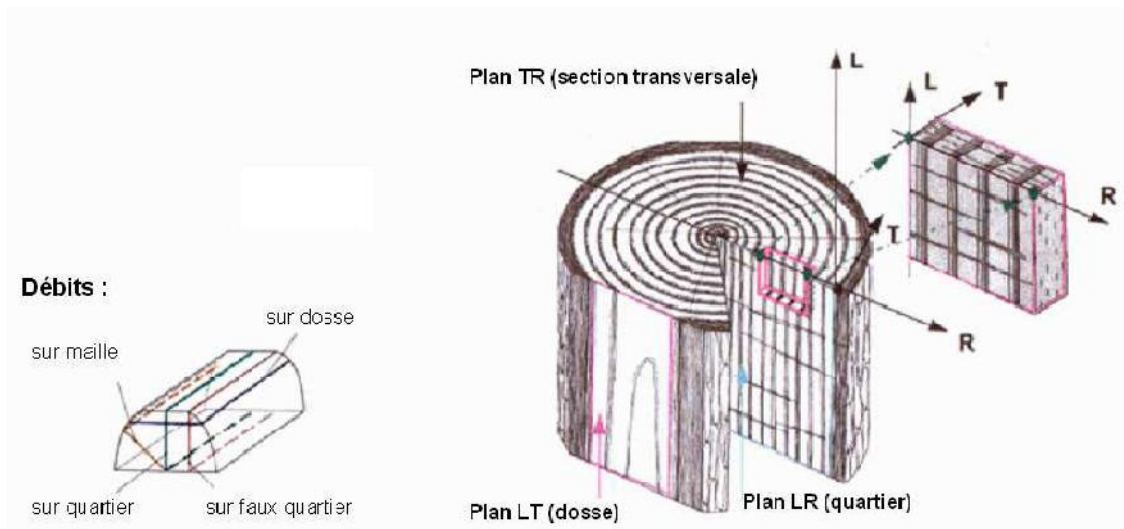


Figure I.15: les Trois axes principaux du bois [12]

I-6.2- Différents type de bois utilisés en construction :

Il existe deux types de bois utilisé dans la construction :

- **Le bois massif :**

Pièces de bois obtenues à partir de grumes ou de pièces de bois de plus fortes dimensions, par enlèvement de sciure ou de plaquettes dans le sens longitudinal, complété éventuellement par un tronçonnage ou un usinage supplémentaire en vue d'obtenir le niveau de précision requis.



Figure I.16 : poutre en bois massif

- **Bois reconstitué :**

Le bois reconstitué peut être fabriqué à partir de deux sous-produits tels que les sciures ou des bois de moindre qualité, ou à partir de composants en bois (lamelles par exemple). On distingue [13] :

- ✓ **Le bois lamellé collé :**

Élément structurel obtenu par collage de lamelles de bois dont le fil est généralement parallèle, les poutres peuvent être à inertie constante ou à inertie variable. Les poutres en bois lamellé-collé peuvent être composées soit de lamelles de bois massif de classes mécaniques identiques, soit de lamelles classes mécaniques différentes

- ✓ **Bois massifs contrecollés :**

Association par collage à plat de deux ou plusieurs lames de bois massifs dont les épaisseurs et sections unitaires ne sont pas réglementées par la norme NF EN 386 relative aux prescriptions de fabrication du lamellé collé.



Figure I.17 : Bois lamellé collé



Figure I.18 : Bois massifs contrecollés

- ✓ **Les panneaux :**

Ces produits de grand format sont constitués d'éléments de placage fins, de lames de bois, de particules ou de fibres, assemblés par collage, pressage et thermo durcissement d'un liant. De nombreux panneaux ont été mis au point en fonction de divers usages spécifiques [14].



Contreplaqué



en fibres de bois



particules de bois

Figure I.19 : différents types de panneaux

I-6.3- caractéristiques de bois :

- **Propriété physique :**

- 1- Humidité :**

L'humidité est définie comme la masse d'eau présente dans le bois exprimé en pourcentage de sa masse anhydre (sec).

Cette propriété mérite d'être citée en premier lieu car presque toutes les autres propriétés en dépendent [15]. 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 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%.

- 2- Le retrait :**

Les dimensions du bois varient en fonction de son humidité, lorsque l'eau contenue dans les parois des cellules s'évapore on peut observer un retrait du bois proportionnellement à la perte d'humidité.

L'anisotropie du bois se manifeste fortement dans le phénomène du retrait, les variations de longueur sont beaucoup plus faibles dans le sens des fibres que dans les autres sens ou on trouve que le retrait tangentiel est de l'ordre du double ou du triple du retrait radial [15].

On peut retenir les valeurs suivantes qui sont indicatives [12]:

- 3- Le gonflement :**

Le gonflement est en principe le phénomène inverse du retrait. Lorsque le bois absorbe de l'eau, sa teneur en humidité augmente et le bois a tendance à augmenter de

volume. Tout comme le retrait, le gonflement est proportionnel au gain d'humidité jusqu'au point de saturation des fibres.

4- dilatation thermique:

Le coefficient de dilatation thermique du bois est de l'ordre de 5.10^{-6} dans le sens axial et de 5.10^{-5} dans le sens perpendiculaire aux fibres, Il en résulte, en général que les effets des variations de température ne sont pas pris en compte dans les calculs statiques des ouvrages en bois : une élévation de température induit des dilatations thermiques mais elles sont en contre partie compensées par une baisse de taux d'humidité. Par contre, lorsque en combine le bois avec un autre matériau pour former des éléments mixte, bois-béton par exemple, il peut alors devenir nécessaire de tenir compte des coefficients de dilatation thermique différent.

- **Propriété mécanique :**

1-Compression axiale (parallèle au fil) :

Les cellules du bois sont toutes orientées dans le sens longitudinal, ce qui lui donne une très grande résistance à la compression exercée dans le sens du fil (compression axiale), les fibres se décollent puis flambement individuel de celles-ci.

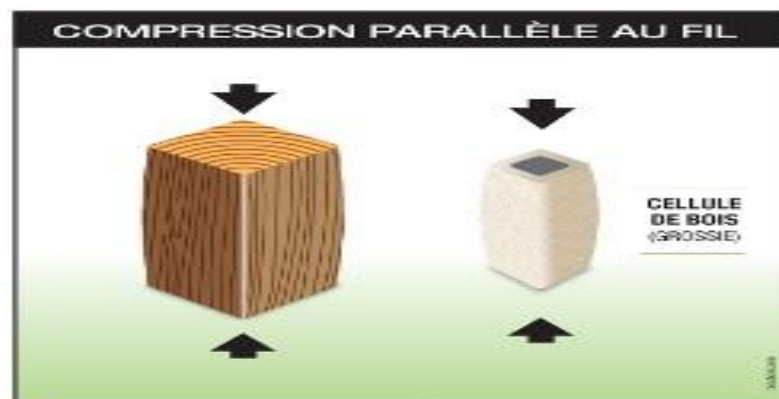


Figure I.20 : Contrainte de rupture de Compression axiale

2- Compression perpendiculaire au fil (compression transversal):

La résistance à la compression exercée perpendiculairement au fil est inférieure à celle appliquée parallèlement au fil. Elle est principalement causée par la présence de

charges concentrées ou par des contraintes exercées aux appuis des éléments fléchis [16].



Figure I.21 : Contrainte de rupture de compression transversale

3- Traction parallèle au fil :

Dans ce cas, la résistance ultime en traction axiale du bois parfait vaut 2 à 3 fois la résistance en compression dans le sens des fibres car elles ne tendent ni à s'écarter ni à flamber individuellement. Toute fois la présence de nœuds dans une pièce tendue réduit sa résistance en traction. [17] [18]

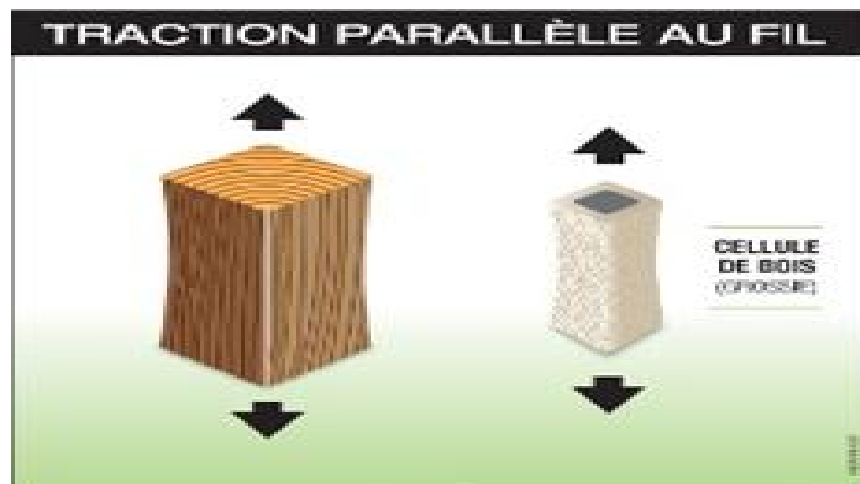


Figure I.22 : Contrainte de rupture de traction axiale

4-Traction transversal (perpendiculaire au fil) :

La traction exercée perpendiculairement au fil doit être le plus souvent possible limitée car le bois possède très peu de résistance dans cette direction. La résistance à la

traction transversale est l'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 (décohésion de l'interface fibre-matrice) ce qui la rapproche plus d'une rupture par clivage (rupture par fissure). Sa valeur ne vaut guère plus de 5% de la résistance à la compression. [16][15]



Figure I.23 : Contrainte de rupture de traction transversale.

5-Résistance à la Flexion :

Selon les principes de l'ingénierie, un couple de flexion et le résultat d'efforts de compression et/ou de traction excentrique par rapport à l'axe neutre d'un élément, et puisque le bois résiste très bien à la compression et à la traction axiale, il est donc également efficace en flexion.

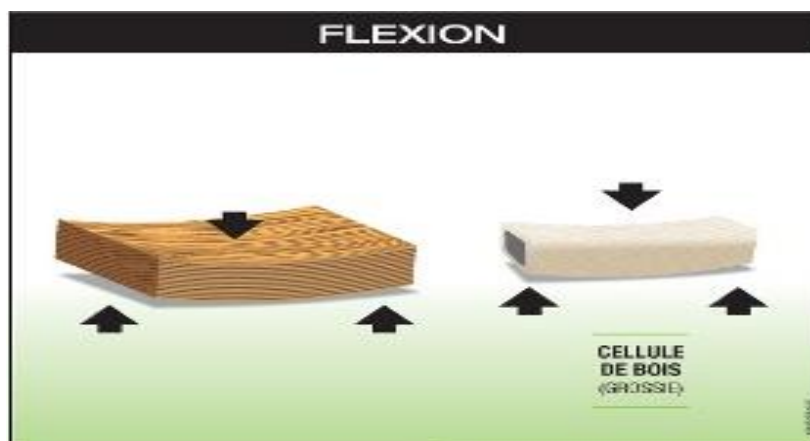


Figure I.24 : Contrainte de rupture de flexion.

6-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 [15]. 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. La réduction de l'aire transversale d'une section en bois causé par des ouvertures pour les connecteurs ou par des entailles influence la résistance aux cisaillements. Elle vaut environ 10% de la résistance à la compression.

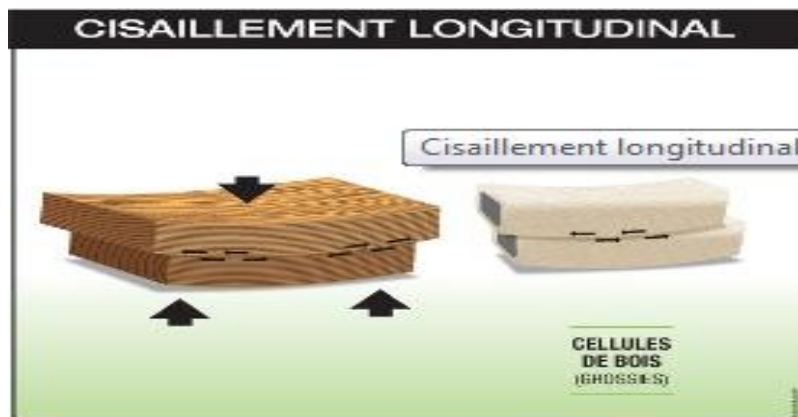


Figure I.25 : Contrainte de rupture de cisaillement.

- **Diagramme contrainte – déformation :**

En traction, le comportement du bois présente une certaine non-linéarité mais le domaine plastique n'est pas très étendu, on peut le considérer linéaire élastique jusqu'à la rupture et celle-ci présente un caractère fragile. Par contre En compression, on note que le bois présente un comportement élasto-plastique (non-linéarité) mais le domaine plastique n'est pas très étendu. La rupture ne donne pas lieu à de très grands allongements et il n'y a pas de branche descendante après la contrainte de rupture, et celle-ci présente un caractère ductile, voir figure suivante :

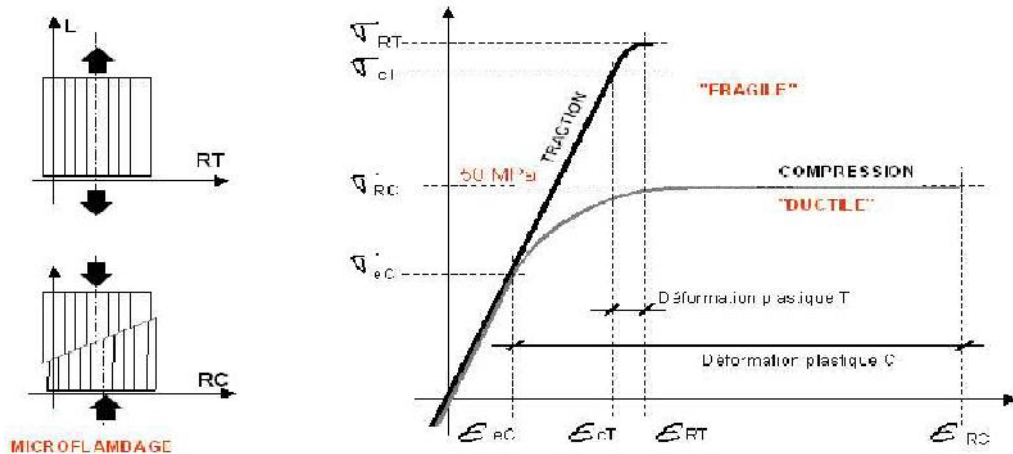


Figure I.26 : Diagramme contrainte déformation dans le bois [16]

I-7 Conclusion :

Ce chapitre est consacré à définir les différents plancher mixtes bois-béton ainsi les caractéristiques des matériaux bois, béton et les connecteurs, il est important de souligner que ce dernier joue un rôle essentiel dans le comportement de plancher, permettant ainsi d'atteindre des performances plus intéressantes pour l'ouvrage.

Chapitre II

Notion de plan d'expérience

II. Introduction

Lorsque les caractéristiques dimensionnelles et ou fonctionnelles, mesurées sur un lot de n pièces, sortent des limites de tolérance qui leur sont imposées, on dit que la qualité de ce produit n'est pas satisfaisante. Pour chacune de ces caractéristiques, on observe alors très généralement les deux phénomènes suivants :

- une dispersion des valeurs individuelles mesurées, par rapport à leur valeur moyenne y
- un écart entre cette valeur moyenne y et la valeur cible à respecter.

Cette dispersion est illustrée sur la figure II.2.

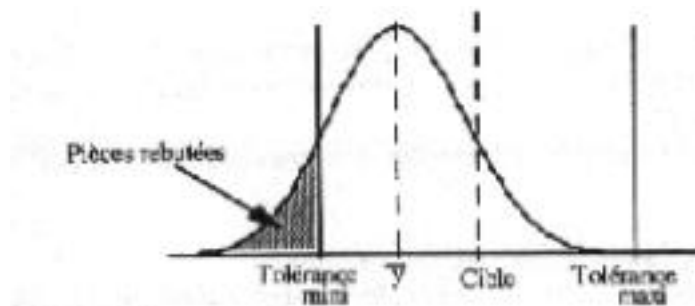


Figure II.1: Courbe de dispersion des mesures

Les causes de cette dispersion peuvent être multiples, mal identifiées. Elles sont généralement impossibles à éradiquer : *variabilité des matières premières et des composants utilisés, variabilité des conditions d'environnement*, etc... Ces causes parasites sont dénommées *facteurs bruits*

A travers cette introduction, nous comprenons très bien que pour optimiser la performance d'un produit, il faut que pour chacune des caractéristiques contrôlées, on cherche à minimiser :

- la dispersion des valeurs individuelles mesurées, par rapport à leur valeur moyenne y
- l'écart entre cette valeur moyenne y et la valeur cible à respecter.

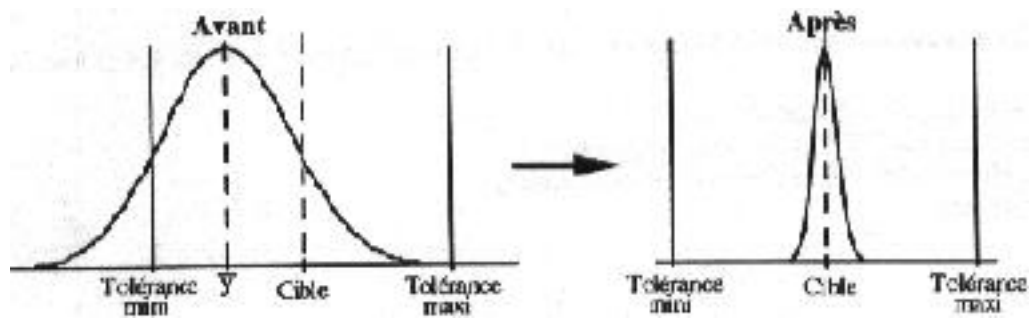


Figure II.2: Courbe optimisée de dispersion des mesures

Chercher à éliminer la plupart des facteurs bruits, engendre une augmentation considérable des coûts de production. Ainsi, la stratégie, prônée par G. Taguchi, est au lieu de viser l'élimination des facteurs bruits, la démarche consiste à minimiser leur impact. Autrement dit, elle consiste à identifier les paramètres qui réduisent les effets des causes, sans s'attaquer directement à celles-ci. [19]

II-1 Généralités sur les plans d'expériences

La recherche expérimentale des valeurs à donner, aux facteurs contrôlés pour minimiser l'impact des facteurs bruits, s'effectue à l'aide d'un plan expériences que l'on définit comme suit :

« Un plan d'expériences est une suite d'essais organisée à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et avec un maximum de précision, l'influence des différents paramètres possibles, pour optimiser les performances du système étudié ».

Les plans d'expériences ont été développés au début du siècle. Mais ces techniques ont relativement peu pénétré le domaine industriel du fait leur aspect trop théorique et de la complexité de leur mise en œuvre. Une des remarquables contributions du Japonais Genichi Taguchi est d'avoir vulgarisé les techniques des plans d'expériences, en proposant une panoplie de plans standard auxquels sont associés des dispositifs pratiques permettant de les adapter vite et sans se tromper aux besoins réels. Une grande partie de l'aspect statistique est ainsi simplifié ou éliminé. [20]

II-2 But des plans d'expérience

- Prédiction par modélisation du comportement d'un procédé.
- Détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé.
- Optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un appareil de mesure.

II-3 Méthodologie des plans d'expériences

Les expériences que doit comporter un plan d'expériences dépendent :

- ✓ Des informations que nous souhaitons recueillir.
- ✓ Des exigences de l'expérimentation.

Pour cela il faut respecter les étapes suivantes :

- **1. Formalisation du problème (Objectif) :**

Cette étape consiste à recueillir un maximum d'informations concernant le phénomène étudié. On détermine l'objectif final, les contraintes de l'étude, l'optimisation à atteindre.

- **2. Choisir les facteurs, niveaux et interactions (modèle de base) :**

Il s'agit de définir les facteurs, leurs niveaux et les interactions retenues. L'expérience permet de sélectionner certains facteurs, de définir leurs niveaux de variation, d'en figer d'autres, de sélectionner certaines interactions susceptibles d'être influentes sur la réponse.

- **3. Construire le plan (Choix des affectations) :**

Il s'agit de choisir le plan retenu qui peut être soit factoriel complet, soit factoriel fractionné (tables de Taguchi), et d'affecter les facteurs et interactions aux colonnes (graphe linéaire associé à la table).

- **4. Réaliser les essais du plan (Résultats) :**

La réalisation des essais doit se faire dans des conditions optimales. Les facteurs variables sont bien aux niveaux préconisés, les facteurs figés restent stables, l'environnement de la campagne d'essais est contrôlé autant que possible, la réponse est donnée avec la plus grande précision, l'essai est, si possible, répétée, les mesures sont réalisées par une unique personne compétente.

- **5. Analyser les résultats (effets, graphiques, variances) :**

Le calcul des moyennes et des effets permettent de déterminer les coefficients du modèle matriciel. La représentation graphique et son analyse donnent une interprétation du poids des effets sur la réponse. L'analyse de la variance permet de vérifier si les effets définis comme influents pour l'étude associée sont réellement associés au facteur étudié ou s'ils ne sont pas. Les résultats de la variabilité naturelle du phénomène étudié. Elle permet donc, une validation statistique des effets.

- **6. Optimiser la réponse (Modèle, conclusion) :**

Il est retenu pour le modèle matriciel final, les effets influents et statistiquement significatifs. Les coefficients retenus du modèle donnent l'extrémum recherché pour la réponse.

L'expérience permet ainsi l'élaboration d'un modèle représentatif du phénomène, l'estimation des quantités d'intérêt, la comparaison entre modèles concurrents ou de reprendre d'autres expériences avec plus d'information et de compréhension du phénomène.

II-4 Plan d'expériences par la méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi [21] a pour but de simplifier le protocole expérimental de mesure de la qualité d'un produit afin de mettre en évidence les effets des facteurs sur la réponse. Elle permet d'optimiser la qualité et de réduire le cout des produits fabriqués, tout en minimisant la durée et le prix de leur mise au point. Nous présenterons dans ce paragraphe un exemple de mise en place d'un plan d'expérience.

Si l'on considère une expérience qui dépend de 3 facteurs (paramètres) et que chaque facteur présente deux niveaux. Autrement dit chaque facteur prend deux valeurs ; une minimale noté 1 et l'autre maximale noté 2

En considérant tous ces éléments, le plan d'expérience complet obtenu est comme suit :

- 3 facteurs à deux niveaux $\Rightarrow 2^3 = 8$

Ainsi nous avons besoin de 8 expériences. Le tableau du plan d'expérience ainsi obtenu est présenté ci-dessous.

Expérience	Facteurs		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

Tableau II-1 : Plan d'expérience complet [21]

Afin de réduire le nombre d'expérience qui est de 8, la méthode Taguchi permet d'obtenir le plan d'expérience fractionné suivant :

Expérience	Facteurs		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Tableau II-2 : Plan d'expérience fractionné [21]

A travers le tableau suivant nous constatons :

- que le nombre d'expérience est réduit de 8 à 4 essais.
- chaque niveau de chaque facteur est confronté à tous les niveaux des autres facteurs et dans des proportions égales. On traduit cette particularité en disant que le plan est orthogonal.

II-5 Traitement des résultats

Pour traiter les résultats on introduit les grandeurs suivantes :

- Y : la réponse mesurée lors de chaque essai
- \bar{Y} : la moyenne de l'ensemble des résultats des différents essais.
- \bar{A}_1 : la moyenne des résultats lorsque le facteur A est au niveau 1.
- \bar{A}_2 : la moyenne des résultats lorsque le facteur A est au niveau 2.

L'effet moyen de chaque niveau de facteur s'apprécie par rapport à la moyenne générale \bar{Y} comme suit :

- L'effet moyen de A au niveau 1 est : $\bar{A}_1 - \bar{Y}$
- L'effet moyen de A au niveau 2 est : $\bar{A}_2 - \bar{Y}$

Une fois tous les effets de chaque facteur calculés, on trace le diagramme des réponses moyennes et le diagramme des effets moyens.

II-6 Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la présentation de la notion des plans d'expérience. Nous avons présenté brièvement les différentes étapes de la mise en place de ce plan. Cette notion sera appliquée au cas de notre structure mixte bois-béton dans le chapitre 4.

Chapitre III

Simulation numérique

III. Introduction

L'étude du comportement mécanique des composants industriels nécessite préalablement la modélisation des sollicitations auxquelles ils sont soumis. Le domaine d'application prioritaire est celui de la mécanique des solides déformables. La complexité des systèmes et l'intégration des phénomènes multi-physiques réclament l'utilisation de moyens de calcul par éléments finis.

L'objectif global est de pouvoir vérifier ou prédire tel ou tel comportement et aussi participer, dans le cadre d'une étude plus globale, à la compréhension du fonctionnement d'un système.

La simulation numérique se positionne entre les aspects théoriques ou analytiques. Ainsi que les essais physiques pour faciliter le dimensionnement ou le pré dimensionnement. Elle peut intervenir tant au niveau du produit que des procédés de fabrication. Les études concernent tous types de matériaux, y compris les matériaux anisotropes, non homogènes (ex : béton) ou orthotropes (composites comme le bois) et peuvent s'appliquer à de nombreux phénomènes physiques intervenant dans la mise en forme des pièces.

A cet effet, dans ce chapitre on présentera une simulation numérique d'une poutre composite en bois-béton simplement appuyée sollicitée en flexion sous **ABAQUS**.

III.1 Le modèle mécanique

Notre modèle est une poutre mixte bois-béton. La liaison entre ces deux éléments est assurée par les connecteurs mécaniques.

Le chargement est une force P appliquée à mi- portée de la poutre, qui est transmise par le biais de deux appuis ($P/2$) afin d'assurer une flexion 4 points.

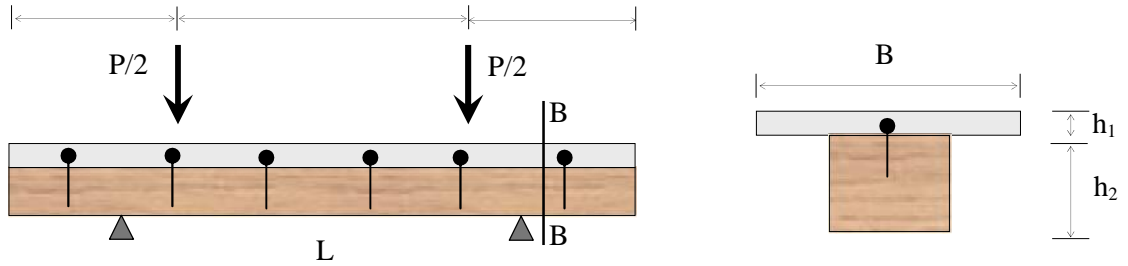


Figure III.1 : présentation de la poutre

Les Propriétés géométriques de la poutre mixte sont résumées dans le tableau ci-dessous

	béton	bois
Longueur (mm)	3600	
Largeur (mm)	400	75
Hauteur (mm)	70	170

Tableau III-1 : Propriétés géométriques de la poutre mixte.

	Connecteur
Longueur (mm)	100
Diamètre	5

Tableau III-2 : Propriétés géométriques du connecteur.

III.2 Présentation du logiciel ABAQUS :

Le code de calcul Abaqus est une suite puissante des programmes de simulation créée en 1978. Il a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS, devenue ABAQUS), basé sur la méthode des éléments finis [22].

Le code de calcul ABAQUS est particulièrement réputé pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Il s'est imposé comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommée mondiale dans tous les secteurs industriels.

Il offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. ABAQUS a une bibliothèque étendue des éléments qui peuvent modéliser n'importe quelle géométrie.

Il a une liste également étendue de modèles matériels qui peuvent simuler le comportement de la plupart des matériaux typiques de technologie comprenant les métaux, le caoutchouc, les polymères, les composites, le béton armé, le bois béton, et les matériaux géotechniques comme les sols et la roche.

Il peut simuler des problèmes dans des secteurs divers, comme : la mécanique, le transfert thermique, électrique, l'acoustique et la mécanique des sols....

Dans la plupart des simulations, y compris fortement non linéaires, le besoin d'utilisateur est de fournir les données de technologie telles que la géométrie de la structure, le comportement des matériaux constitutants, ses états de frontière, et les charges appliquées.

ABAQUS peut simuler n'importe quelle géométrie telles que : poutres, plaques, coques et éléments spéciaux (ressorts, masses...) en deux dimensions ou en trois dimensions.

Le cœur du logiciel ABAQUS est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données *fichier.inp*, qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier *fichier.odt*.

Deux tâches sont à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier.odt (ou post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, et des chargements.

➤ **ABAQUS** se divise en trois grands codes [23] :

1. **ABAQUS/Standard** : est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite (résolution par un algorithme statique implicite).

ABAQUS/Standard nous permet de réaliser des études statiques en contraintes/déplacements, dynamiques linéaires ou non linéaires. Généralement, c'est la méthode de Newton qui est utilisée pour résoudre les problèmes non linéaires [24].

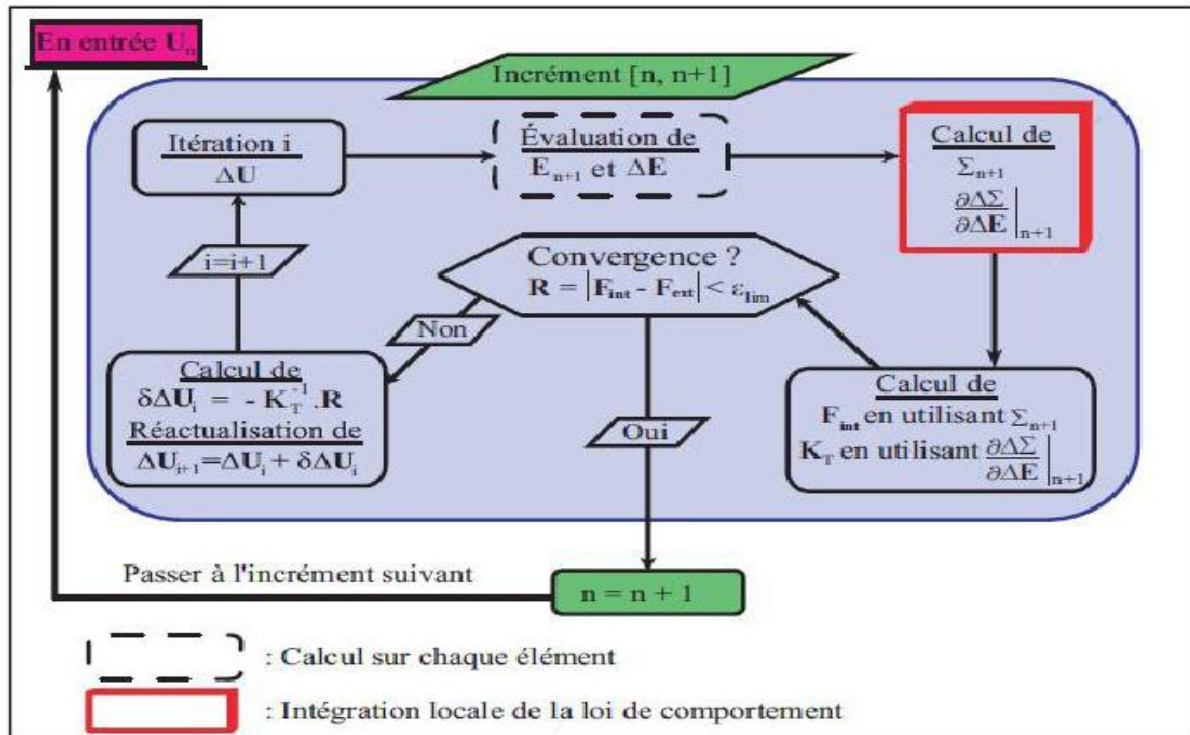


Figure III.2: Organigramme de résolution du schéma statique implicite.

2. **ABAQUS/Explicit** : emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamique ou quasi-statique non-linéaires (résolution par un algorithme explicite).

Le schéma de résolution explicite n'est pas itératif. Il consiste en une résolution explicite des équations du mouvement.

La procédure explicite est souvent utilisée pour des problèmes invoquant de fortes non-linéarités géométrique tels que la simulation en quasi-statique des procédés de mise en forme. Elle n'est cependant fiable que sous certaines conditions. En effet, les formulations explicites présentent une stabilité numérique conditionnée par la taille de l'incrément de temps Δt [24].

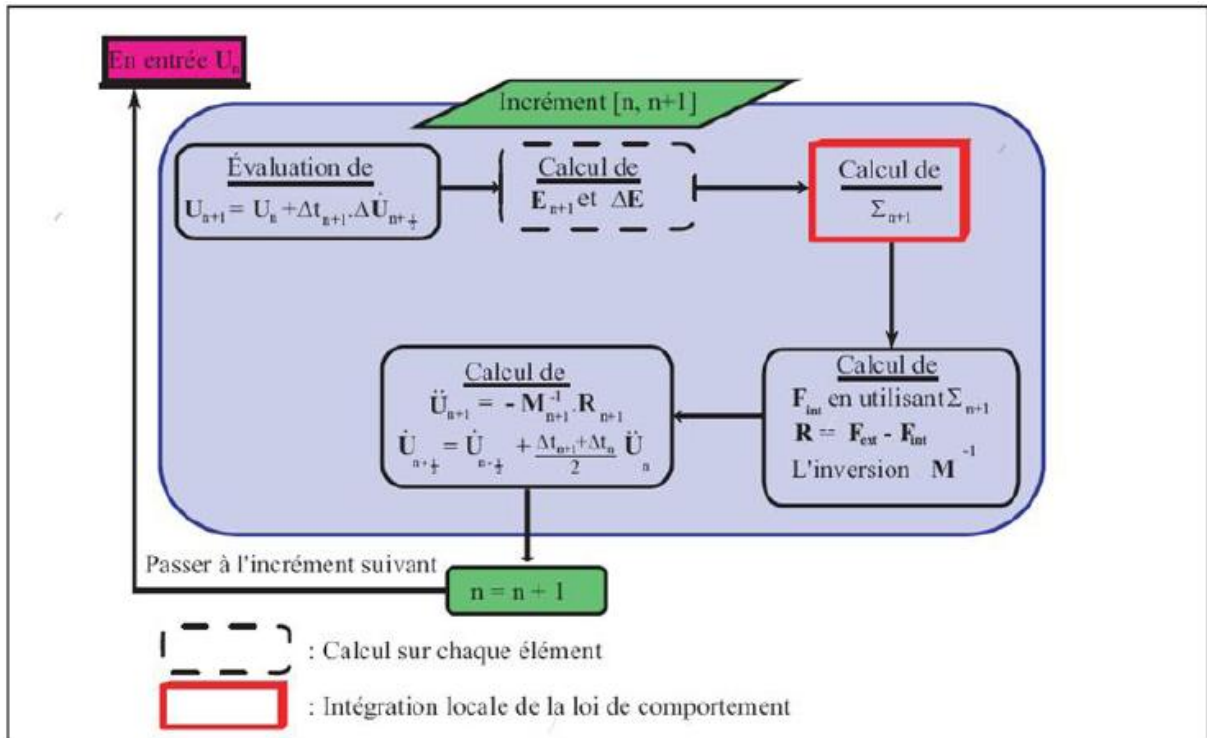


Figure III.3: Organigramme de résolution d'un problème mécanique en utilisant un schéma dynamique explicite.

- ABAQUS/CAE (complète Abaqus environnement) :** représente l'interface graphique interactive idéale pour la modélisation, la gestion et le post traitement des modèles Abaqus (implicite et explicite). Le CAE permet d'effectuer la totalité de la mise en donnée, de la création ou l'import de pièce, du maillage jusqu'à l'exploitation avancée des résultats [23].

III.3. Manipulation du logiciel :

En raison du large spectre de ces capacités d'analyse et sa bonne ergonomie il est très utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. Il se prête bien pour l'analyse des comportements non linéaires. Il possède une vaste gamme de lois de comportement. En 2005 ABAQUS/Inc a été acquis par Dassault Systèmes est devenu SIMULIA.

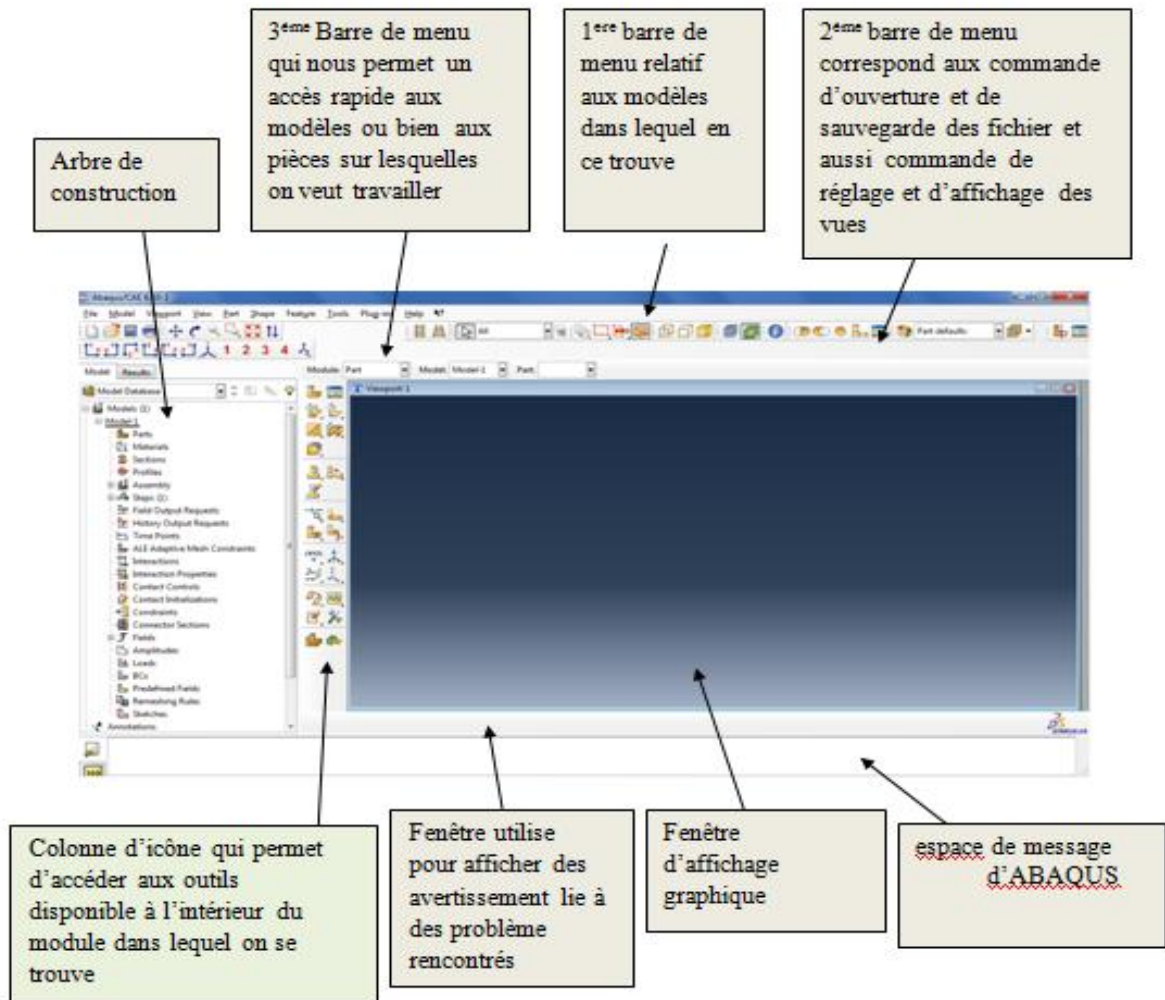


Figure III.4 : Interface d'ABAQUS

III.4. Les étapes de la modélisation :

Pour la modélisation de la poutre on a suivi les étapes suivantes :

➤ Géométrie de la poutre (bois et béton) :

La géométrie de la poutre est créée dans le « module part » en utilisant des coordonnées des points à 2 dimensions (largeur et longueur) à partir de l'icône « Great line rectangle » puis « Done » pour spécifier l'épaisseur.

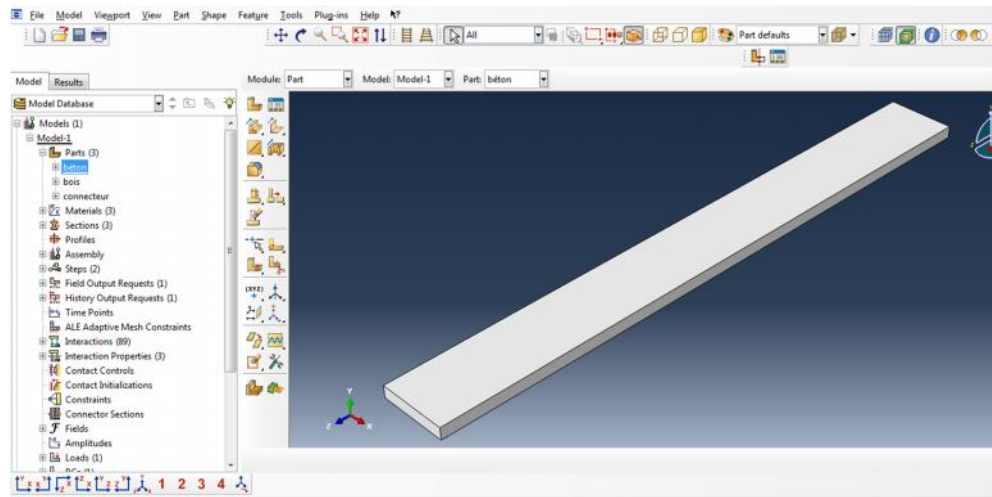


Figure III.5 : Module part

➤ **Géométrie des connecteurs :**

Les connecteurs sont créés avec le « module part » 3D déformable, puis on dessine le cercle à partir de la commande « Great cercle » et on spécifie le diamètre et « Done » pour lui donner une épaisseur.

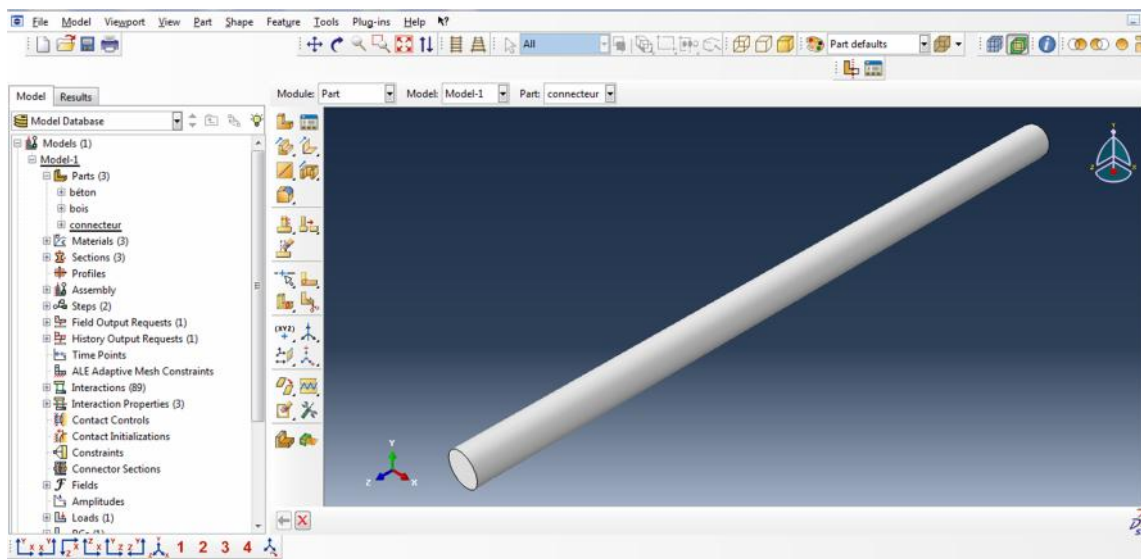


Figure III.6 : module part pour les connecteurs.

➤ **Les propriétés des matériaux :**

Notre poutre est constituée de trois (3) matériaux ; bois, béton et des connecteurs en acier. Avant toute simulation il faut définir les propriétés de ces matériaux.

Pour les besoins du calcul dans le domaine élastique, il faut introduire toutes les données suivantes qui nous permettent de lancer le calcul linéaire :

- masse volumique
- module de Yong
- coefficient de poisson

Dans le cadre de cette étude, les propriétés du modèle classique utilisé sont résumées dans le tableau suivant :

Matériaux	Béton	Bois	Connecteur
Coefficient de poisson	0.2	0.45	0.3
Masse volumique	2.2E-6	3.5E-6	7.875E-6
Module de Yong (Mpa)	30627	11000	210000

Tableau III-3 : Propriétés des matériaux.

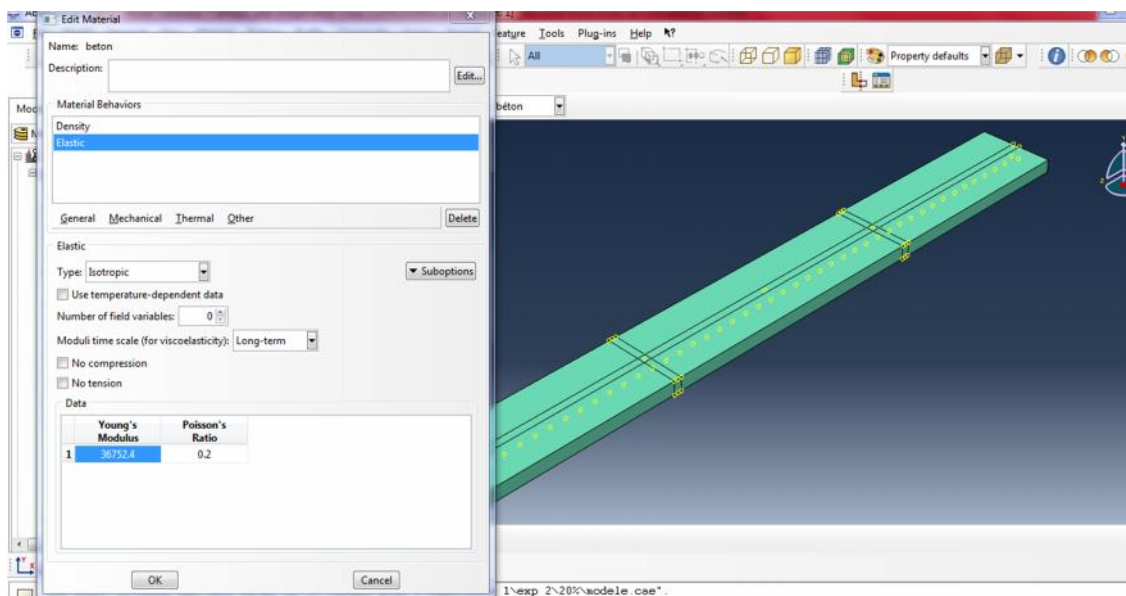


Figure III.7 : Module materials

Pour les besoins du calcul dans le domaine plastique, on garde les propriétés des matériaux dans le domaine élastique et on introduit une loi de comportement non linéaire. Dans le cadre de cette étude, seul le comportement non linéaire des

connecteurs est considéré. Ainsi, la loi de comportement de ce connecteur est présentée sur le tableau III-3.

Contrainte	Déformation
0.004	0
450	0.002
500	0.004

Tableau III-4 : loi de comportement du connecteur

Il y a lieu de préciser que les unités retenues pour la modélisation de la structure, sont résumés dans le tableau III.4 ci-dessous.

MASSE	LONGUER	TEMPS	FORCE	PRESSION	ENERGIE
M	L	T	$M.L.T^{-2}$	$M.L^{-1}.T^{-2}$	$M.L^2.T^{-2}$
Kilogramme	Mètre	Seconde	Newton	Pascal	Joule
Gramme	Millimètre	Milliseconde	Newton	MPa	Mili joule
Tonne	Millimètre	Seconde	Newton	MPa	Mili joule

Tableau III-5 : Tableau des unités correspond à ABAQUS.

➤ **Module assembly :**

Dans ce module on peut répéter chaque part créé plusieurs fois et lui faire des rotations et des translations jusqu'à obtenir notre modèle.

Pour les deux matériaux bois et béton à partir de la commande « extrude » on réalise les trous dans différents points (chaque 80 mm voir figure III.7) pour placer nos connecteurs (voir figure III.8).

Remarque : Lors de l'assemblage, le connecteur est introduit dans le bois sur 60 mm et dans le béton sur 40 mm.

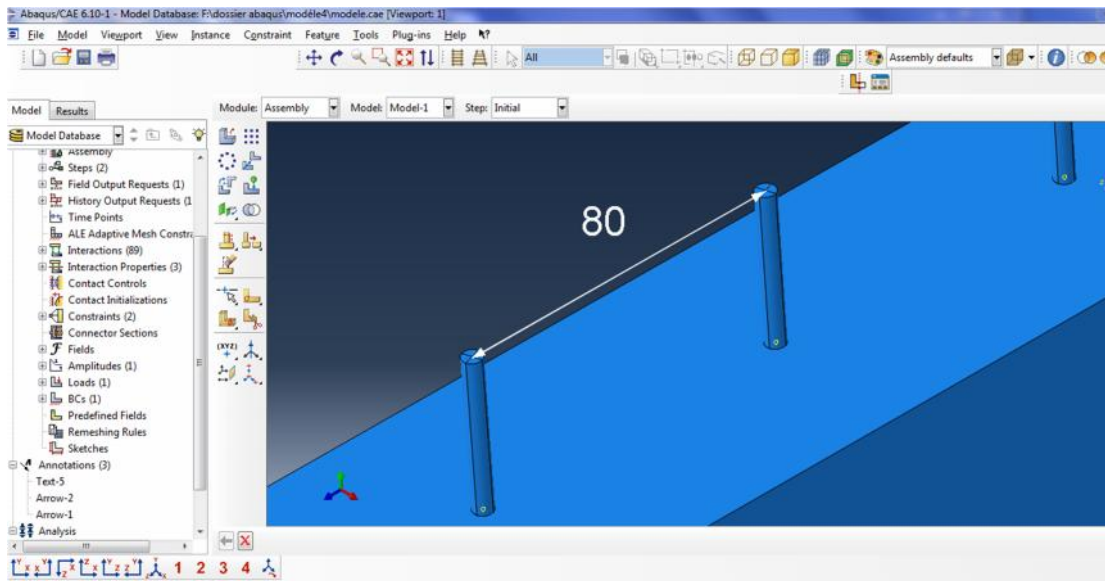


Figure III.8 : espacements des connecteurs

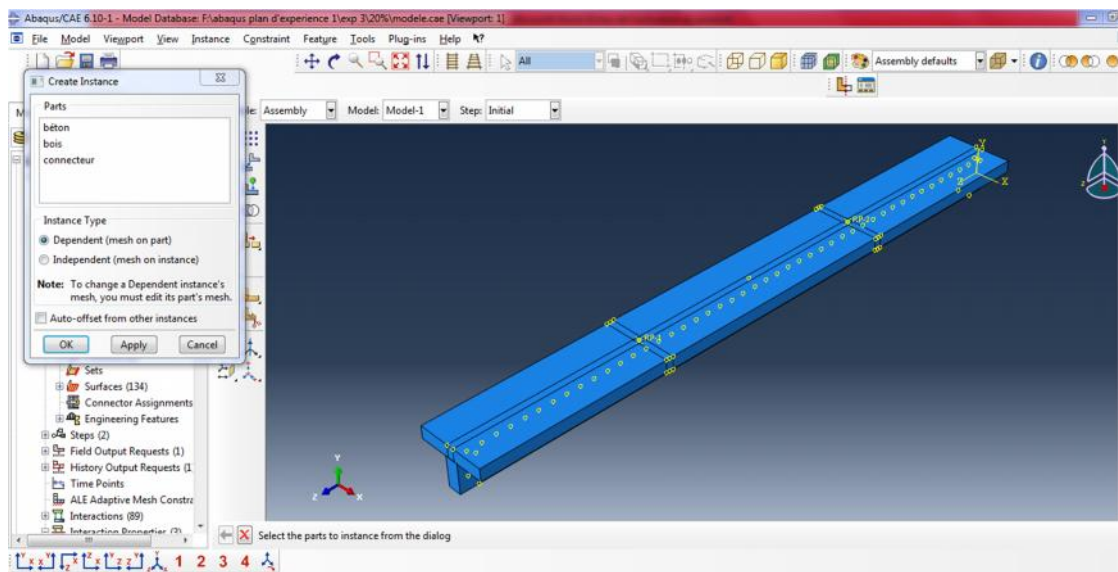


Figure III.9 : module assembly.

➤ **Module Step :**

C'est à cette étape qu'on définit tous les critères de calcul utilisé par abaqus dans le module Job. En particulier il détermine l'incrément, valeur du temps final.

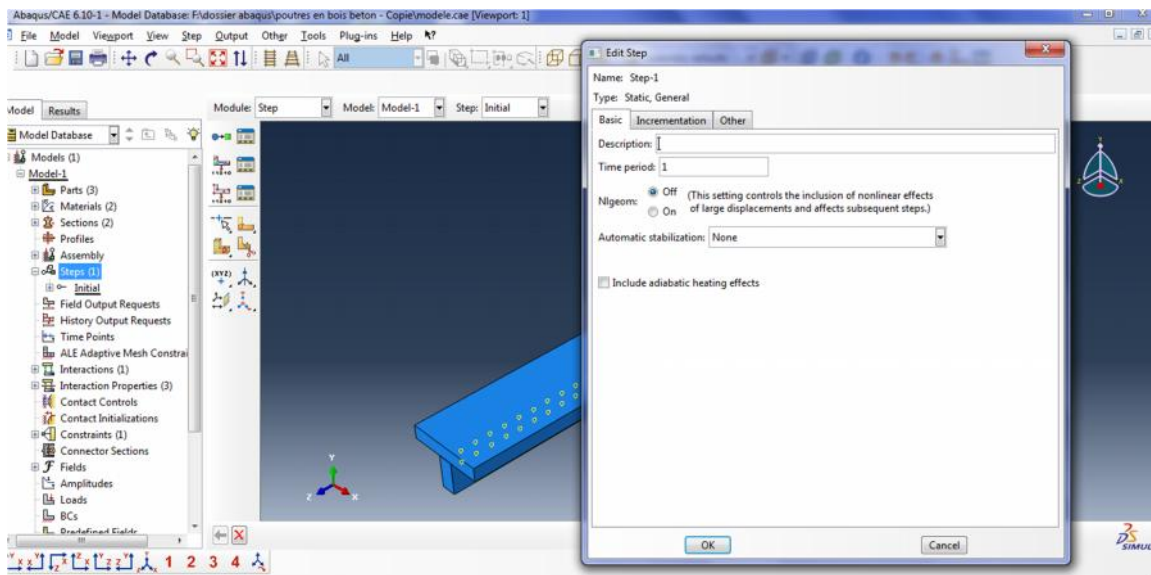


Figure III.10 : Module Step.

➤ **Module Interaction :**

Dans ce module on définit les interactions entre les matériaux, ce qui peut prendre la forme d'un contact ou d'équations de liaison entre le degré de liberté. Le contact s'effectue entre deux surfaces qui appartiennent à deux matériaux différents. Comme dans notre cas :

- Interactions connecteur-bois.
- Interactions connecteur-béton.
- Interactions bois-béton.

La première étape c'est de définir les surfaces à partir de « Great interaction », une fois que les surfaces sont définies on passe à l'étape suivante qui est de définir les propriétés mécaniques du contact à travers la commande « interaction properties » puis « mécanique » et dans « Tangential behavior » on clique sur « penalty » et on donne la valeur du coefficient. Ces valeurs sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Matériaux	Béton / connecteur	Bois / connecteur	Béton / bois
Coefficient d'interaction	0.6	0.3	0

Tableau III-6 : tableau de coefficient d'interaction.

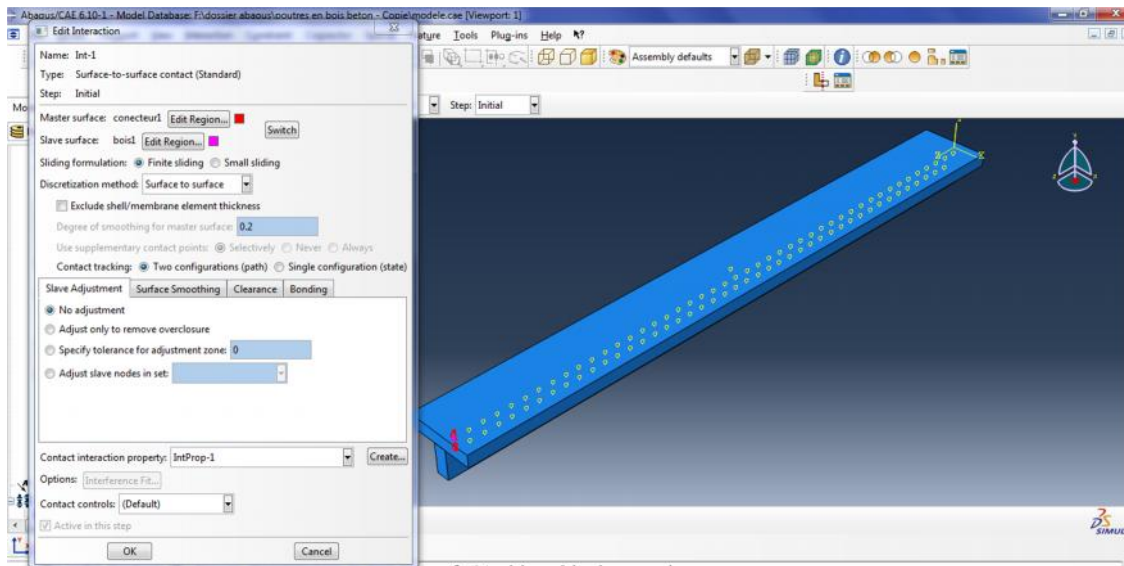


Figure III.11 : Module interaction.

➤ **Module load :**

Dans ce module on spécifie les chargements et les conditions aux limites, et ces deux derniers dépendent du step.

Dans la commande load il y a plusieurs types de chargements ; force concentré, pression, moment.

Dans notre cas c'est une force concentré appliqué dans deux points. Pour se faire, nous avons créé une surface rigide à partir de la commande « constraints » on choisit « rigide body » puis « Tie » et on sélectionne la surface.

Notre poutre repose sur des appuis simples.

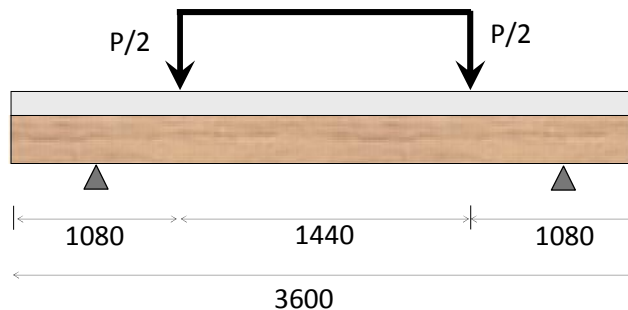


Figure III.12 : géométrie de la poutre

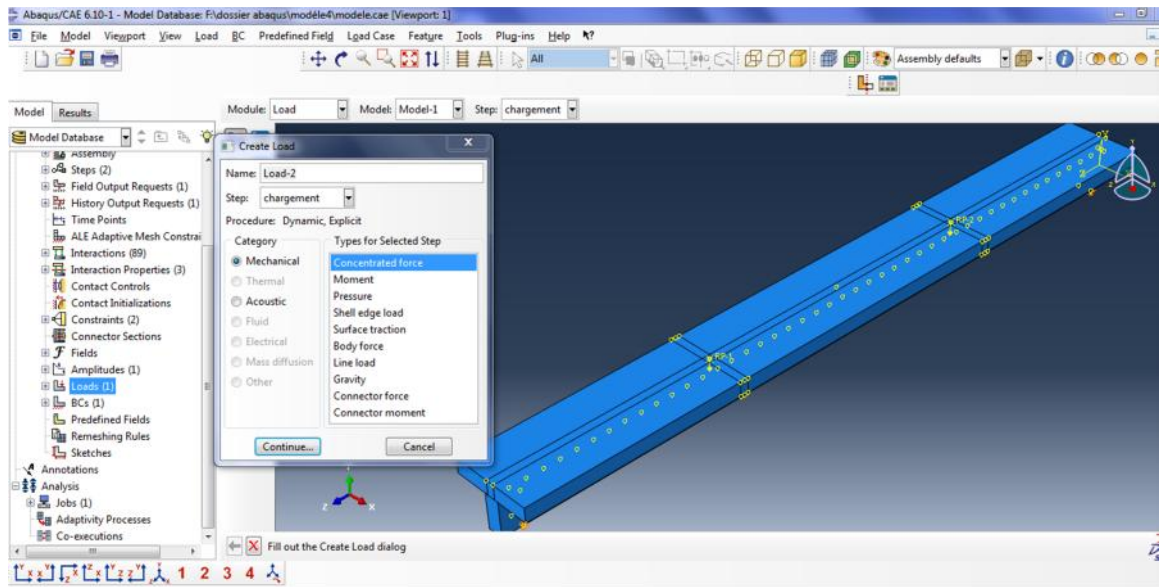


Figure III.13 : Module load

➤ Module Mesh :

Le module « Mesh » contient des outils qui nous permettent de générer un maillage d'élément finis pour chaque matériau. Le maillage d'une pièce peut ne pas être uniforme lorsqu'il y a présence de discontinuités (trous,...). Ainsi, concernant notre modèle et compte tenu du fait que notre poutre est trouée et assemblée, le maillage au niveau des connecteurs et de leur emplacement sera raffinée pour avoir un bon assemblage.

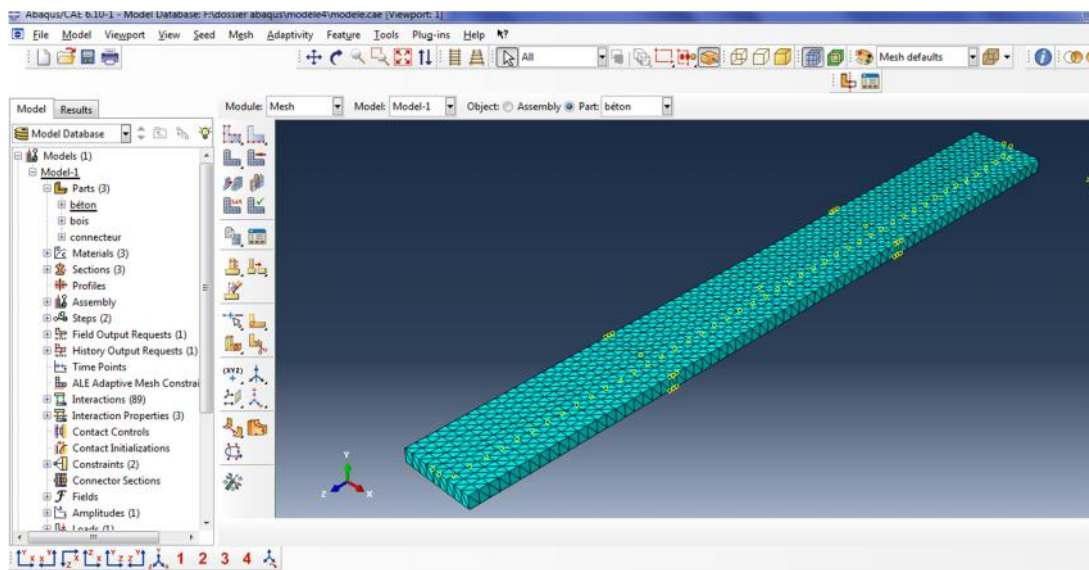


Figure III.14 : Module Mesh.

➤ **Module Job :**

Après avoir créé toutes les tâches de définitions du modèle, nous utilisons le module « Job » pour l'analyse.

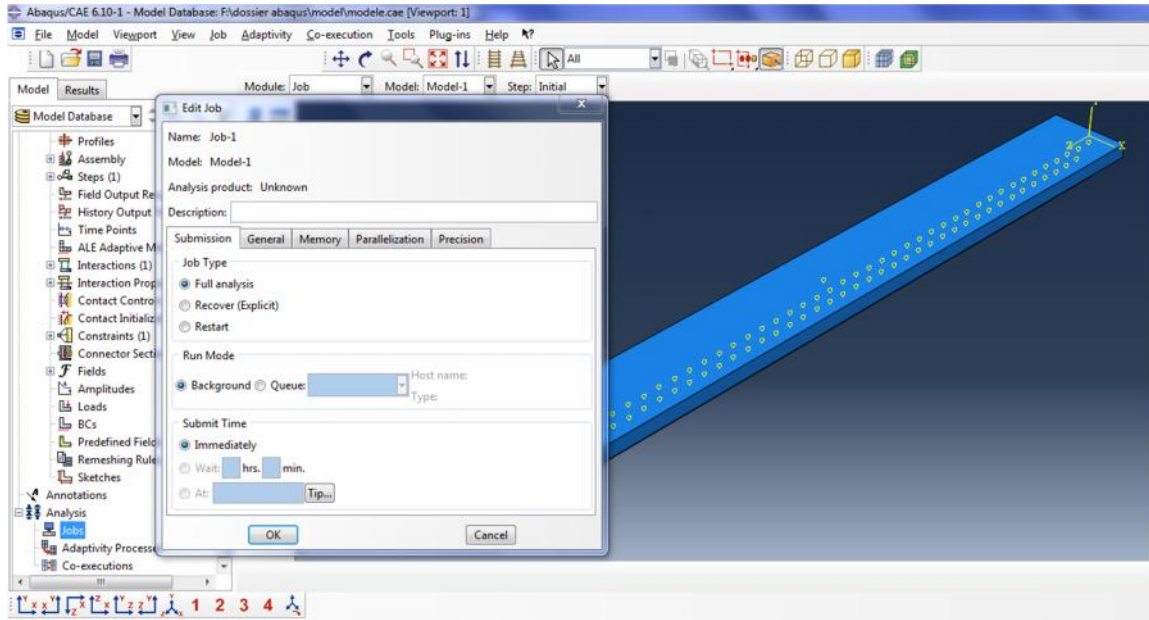


Figure III.15 : Module Job.

➤ **Module Visualization :**

Une fois le calcul terminé et qu'aucune erreur n'est signalée, ABAQUS nous permet visualiser les résultats de l'analyse; répartition des contraintes et des déformations, déplacements...etc.

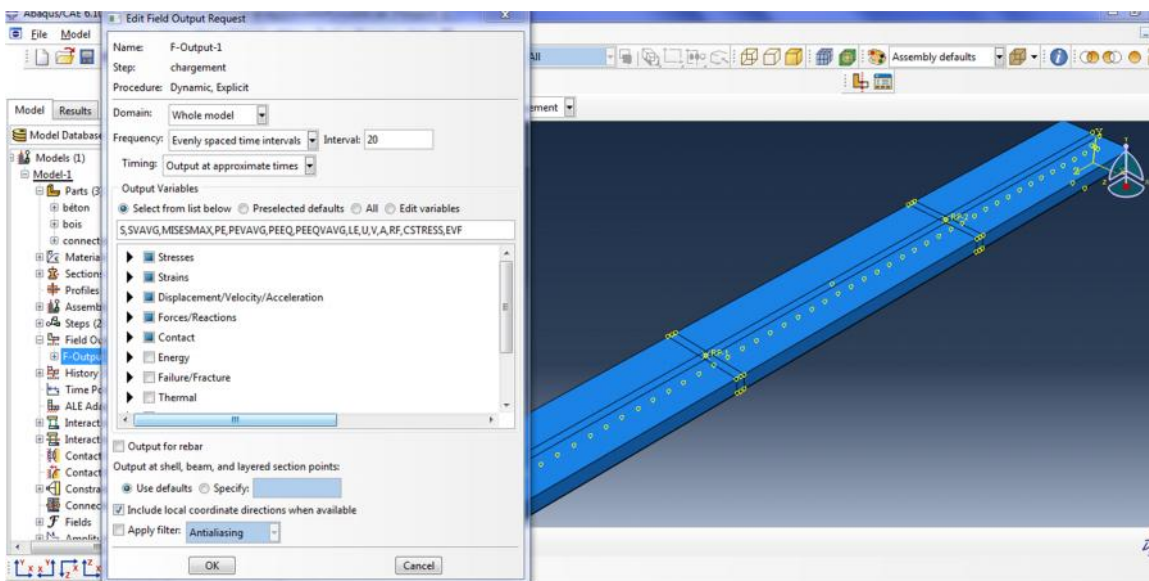


Figure III.16 : Module visualization.

Afin d'extraire les résultats obtenus, on fait appel à la commande « result ». A ce niveau, on sélectionne les résultats que l'on veut visualiser

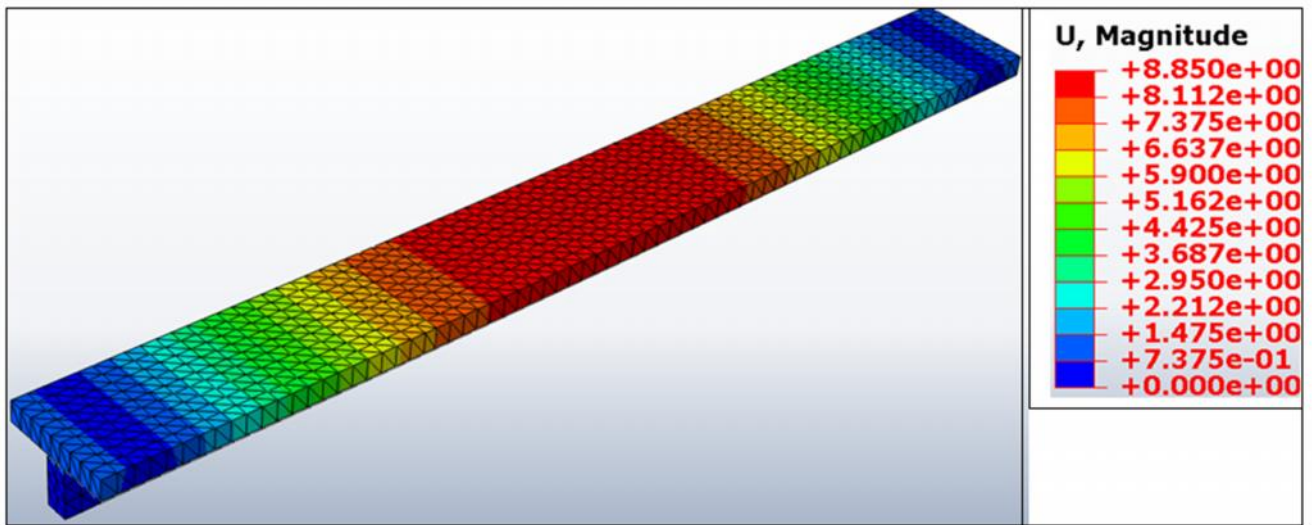


Figure III.17 : Répartition des déplacements.

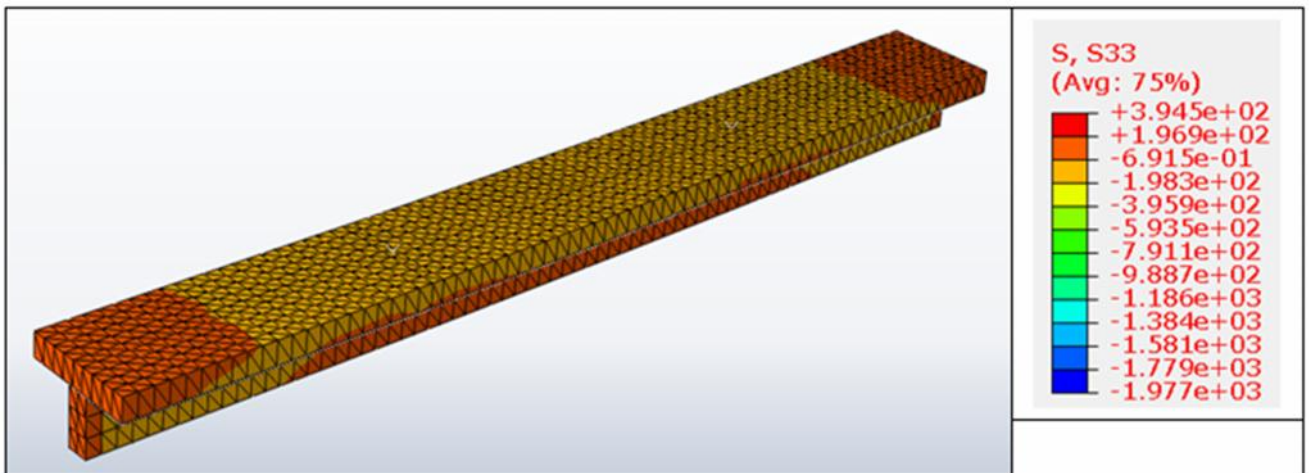


Figure III.18 : Répartition des contraintes dans la poutre.

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté dans un premier temps d'une part le modèle étudié ; propriétés géométriques et caractéristiques des matériaux. D'autre part, nous avons présenté le fonctionnement du code ABAQUS, ainsi que les étapes à suivre pour créer un modèle.

Puis nous avons présenté les différentes étapes nécessaires pour la mise en place de notre modèle de la poutre mixte bois-béton.

Chapitre IV

**Analyse de la poutre mixte par
plan d'expérience**

IV-Introduction

Comme présenté dans le chapitre précédent, la poutre objet de notre étude est une structure mixte bois-béton (voir figure IV.1). Elle est soumise à une flexion quatre points.

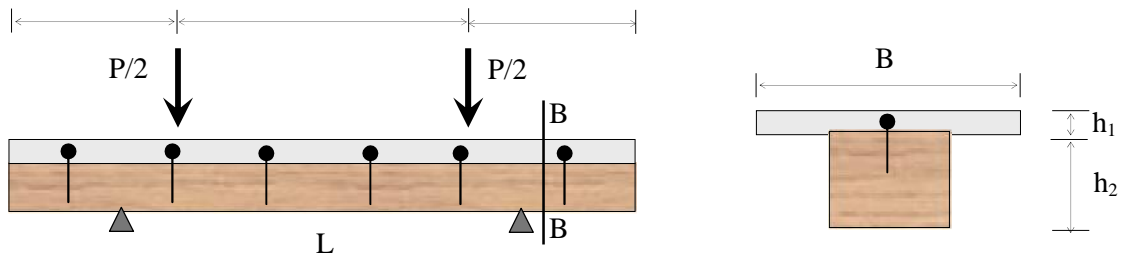


Figure IV.1 : présentation de la poutre

Les Propriétés géométriques de la poutre sont présentées dans le tableau 1 du chapitre III.

Notre poutre est constituée de trois (3) matériaux ; bois, béton, et des connecteurs en acier. Pour les besoins des calculs, nous présentons les propriétés suivantes des matériaux constituant notre poutre.

Matériaux	Béton	Bois	Connecteur
Module de Young [Mpa]	30627	11000	210000

Tableau IV-1 : Propriétés des matériaux.

Matériaux	Béton / connecteur	Bois / connecteur
Coefficient d'interaction	0.6	0.3

Tableau IV-2 : Tableau des coefficients d'interaction.

Nous rappelons aussi que l'analyse de la poutre mixte se fait par simulation numérique par élément finis en utilisant le code de calcul Abaqus.

IV-1 Mise en place du plan d'expériences

Comme indiqué dans le chapitre II, la mise en place d'un plan d'expérience nécessite la définition de certains paramètres ; les facteurs, les niveaux de chaque facteurs et la réponse.

Ainsi dans le cadre de cette étude, nous considérons les facteurs suivants :

- Le module de Young du béton noté E1
- Le module de Young du bois noté E2
- Le module de Young de l'acier (connecteur) noté E3
- Le coefficient d'interaction entre le béton et le connecteur noté C1 (béton-acier)
- Le coefficient d'interaction entre le bois et le connecteur noté C2 (bois-acier)

Pour chaque facteur on définit, deux niveaux. Autrement dit chaque facteur prend deux valeurs ; une minimale noté 1 et l'autre maximale noté 2

Dans la 1^{ère} partie (modèle linéaire) on considérant tous ces éléments, le plan d'expérience complet obtenu est comme suit :

$$5 \text{ facteurs à deux niveaux} \Leftrightarrow 2^5 = 32$$

La 2eme partie on considérant un plan fractionnaire donc 8 expériences

Concernant les deux niveaux de chaque facteur, nous avons considéré que chaque facteur varie dans un intervalle de 20% par rapport à la valeur moyenne. Autrement dit la valeur minimale de chaque facteur noté 1 est donnée par :

$$x_1 = x - 20\% \cdot x$$

Et la valeur maximale de chaque facteur noté 2 est donnée par :

$$x_2 = x + 20\% \cdot x$$

VI-2.Modèle linéaire

Dans cette étude nous considérons un plan d'expérience numérique, Autrement dit pour chaque combinaison nous procédons par simulation numérique pour estimer la réponse de notre structure. Le tableau du plan d'expérience obtenu est présenté ci-dessous.

En tenant compte de ces deux relations précédentes, on obtient le tableau IV.4 résumant les différentes expériences à réaliser.

Expérience	E1	E2	E3	C1	C2
1	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	1
3	2	2	2	1	2
4	2	2	1	2	2
5	2	1	2	2	2
6	2	2	1	2	1
7	2	2	2	1	1
8	2	2	1	1	2
9	2	2	1	1	1
10	2	1	2	2	1
11	2	1	2	1	2
12	2	1	2	1	1
13	2	1	1	2	2
14	2	1	1	2	1
15	2	1	1	1	2
16	2	1	1	1	1
17	1	2	2	2	2
18	1	2	2	2	1
19	1	2	2	1	2
20	1	2	1	2	2
21	1	1	2	2	2
22	1	2	1	2	1
23	1	2	2	1	1
24	1	2	1	1	2
25	1	2	1	1	1
26	1	1	2	2	1
27	1	1	2	1	2
28	1	1	2	1	1
29	1	1	1	2	2
30	1	1	1	2	1
31	1	1	1	1	2
32	1	1	1	1	1

Tableau IV-3 : Plan d'expérience complet. Niveaux des facteurs

Expérience	E1	E2	E3	C1	C2
1	36752,4	13200	252000	0,72	0,36
2	36752,4	13200	252000	0,72	0,24
3	36752,4	13200	252000	0,48	0,36
4	36752,4	13200	168000	0,72	0,36
5	36752,4	8800	252000	0,72	0,36
6	36752,4	13200	168000	0,72	0,24
7	36752,4	13200	252000	0,48	0,24
8	36752,4	13200	168000	0,48	0,36
9	36752,4	13200	168000	0,48	0,24
10	36752,4	8800	252000	0,72	0,24
11	36752,4	8800	252000	0,48	0,36
12	36752,4	8800	252000	0,48	0,24
13	36752,4	8800	168000	0,72	0,36
14	36752,4	8800	168000	0,72	0,24
15	36752,4	8800	168000	0,48	0,36
16	36752,4	8800	168000	0,48	0,24
17	24501,6	13200	252000	0,72	0,36
18	24501,6	13200	252000	0,72	0,24
19	24501,6	13200	252000	0,48	0,36
20	24501,6	13200	168000	0,72	0,36
21	24501,6	8800	252000	0,72	0,36
22	24501,6	13200	168000	0,72	0,24
23	24501,6	13200	252000	0,48	0,24
24	24501,6	13200	168000	0,48	0,36
25	24501,6	13200	168000	0,48	0,24
26	24501,6	8800	252000	0,72	0,24
27	24501,6	8800	252000	0,48	0,36
28	24501,6	8800	252000	0,48	0,24
29	24501,6	8800	168000	0,72	0,36
30	24501,6	8800	168000	0,72	0,24
31	24501,6	8800	168000	0,48	0,36
32	24501,6	8800	168000	0,48	0,24

Tableau IV-4 : Plan d'expérience complet : Valeur des facteurs

Pour chaque expérience nous déterminons la réponse de la structure. Ainsi dans le cadre de cette étude nous définissons trois réponses :

- Le déplacement maximal de la poutre
- La contrainte maximale dans le béton
- La contrainte maximale dans le bois

En considérant les différentes combinaisons du tableau, les simulations numériques sur Abaqus nous ont permis d'obtenir les réponses suivantes :

Expérience	Facteurs					Réponse y de la poutre		
	E1	E2	E3	C1	C2	U _{max}	† _{bois}	† _{béton}
1	36752,4	13200	252000	0,72	0,36	13,66	2152	2106
2	36752,4	13200	252000	0,72	0,24	5,969	1021	968,7
3	36752,4	13200	252000	0,48	0,36	5,984	989,2	1010
4	36752,4	13200	168000	0,72	0,36	6,368	1002	1018
5	36752,4	8800	252000	0,72	0,36	7,135	834,9	1014
6	36752,4	13200	168000	0,72	0,24	6,375	1049	1020
7	36752,4	13200	252000	0,48	0,24	5,99	1026	1012
8	36752,4	13200	168000	0,48	0,36	6,376	1004	1070
9	36752,4	13200	168000	0,48	0,24	6,383	1052	1072
10	36752,4	8800	252000	0,72	0,24	7,138	866,9	1018
11	36752,4	8800	252000	0,48	0,36	3,418	453,6	558,3
12	36752,4	8800	252000	0,48	0,24	7,171	874,4	1051
13	36752,4	8800	168000	0,72	0,36	7,687	923,6	1063
14	36752,4	8800	168000	0,72	0,24	7,691	960,4	1063
15	36752,4	8800	168000	0,48	0,36	7,703	926,2	1104
16	36752,4	8800	168000	0,48	0,24	7,707	964,1	1105
17	24501,6	13200	252000	0,72	0,36	6,689	992,9	823,7
18	24501,6	13200	252000	0,72	0,24	6,718	1032	824,3
19	24501,6	13200	252000	0,48	0,36	6,707	999,6	843,3
20	24501,6	13200	168000	0,72	0,36	7,206	1018	905,2
21	24501,6	8800	252000	0,72	0,36	8,134	877,1	889,6
22	24501,6	13200	168000	0,72	0,24	7,213	1072	909,7
23	24501,6	13200	252000	0,48	0,24	6,729	1039	846,7
24	24501,6	13200	168000	0,48	0,36	7,213	1025	932,6
25	24501,6	13200	168000	0,48	0,24	7,225	1075	934,8
26	24501,6	8800	252000	0,72	0,24	8,135	910,1	895,7
27	24501,6	8800	252000	0,48	0,36	8,172	882,9	919,4
28	24501,6	8800	252000	0,48	0,24	8,184	918,6	923,5
29	24501,6	8800	168000	0,72	0,36	8,839	978,5	962,9
30	24501,6	8800	168000	0,72	0,24	8,844	1018	965,5
31	24501,6	8800	168000	0,48	0,36	8,865	982,9	989,9
32	24501,6	8800	168000	0,48	0,24	8,875	1024	993,1

Tableau IV-5 : Plan d'expérience complet : Réponse de la poutre mixte

-Traitement des résultats

Comme indiqué précédemment dans le chapitre II, pour traiter les résultats on définit les grandeurs suivantes :

- Y : la réponse mesurée lors de chaque essai
- \bar{Y} : la moyenne de l'ensemble des réponses des différents essais.
- $\bar{Y}/A_{niveau1}$: la moyenne des réponses lorsque le facteur A est au niveau 1.
- $\bar{Y}/A_{niveau2}$: la moyenne des réponses lorsque le facteur A est au niveau 2.

Une fois la réponse de la structure est connue pour tout le plan, on détermine la moyenne arithmétique des réponses comme suit :

- $U_{max} = \frac{\sum U_{max}}{32} = 7,39$
- $bois = \frac{\sum bois}{32} = 998,27$
- $béton = \frac{\sum béton}{32} = 994,15$

Pour chaque facteur, on peut estimer la moyenne des réponses lorsque ce facteur prend la valeur minimale et la valeur maximale (facteur à deux niveaux).

NB : A titre d'illustration, nous présentons les différentes étapes de calcul pour le facteur module d'élasticité du béton E1. Les mêmes calculs sont effectués pour les quatre autres facteurs mentionnés dans notre modèle.

- **Moyenne des déplacements max lorsque :**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$U_{max}/E1_{niveau1} = \frac{\sum U_{max}/E1_{niveau1}}{16}$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$U_{max}/E1_{niveau2} = \frac{\sum U_{max}/E1_{niveau2}}{16}$$

- **Moyenne des contraintes dans le bois lorsque**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$U_{\max}/E1_{\text{niveau1}} = \frac{\sum \sigma_{\text{bois}}/E1_{\text{niveau1}}}{16}$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$U_{\max}/E1_{\text{niveau2}} = \frac{\sum \sigma_{\text{bois}}/E1_{\text{niveau2}}}{16}$$

- **Moyenne des contraintes dans le béton lorsque**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$U_{\max}/E1_{\text{niveau1}} = \frac{\sum \sigma_{\text{béton}}/E1_{\text{niveau1}}}{16}$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$U_{\max}/E1_{\text{niveau2}} = \frac{\sum \sigma_{\text{béton}}/E1_{\text{niveau2}}}{16}$$

L'effet moyen de chaque niveau de facteur s'apprécie par rapport à la moyenne générale Y comme suit :

- **Effet Moyen sur les déplacements max lorsque :**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$U_{\max}/E1_{\text{niveau1}} - U_{\max}$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$U_{\max}/E1_{\text{niveau2}} - U_{\max}$$

- **Effet Moyen sur les contraintes dans le bois lorsque :**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$\sigma_{\text{bois}}/E1_{\text{niveau1}} - \sigma_{\text{bois}}$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$\sigma_{\text{bois}}/E1_{\text{niveau2}} - \sigma_{\text{bois}}$$

- **Effet Moyen sur les contraintes dans le béton lorsque :**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$\sigma_{\text{béton}}/E1_{\text{niveau1}} - \sigma_{\text{béton}}$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$\sigma_{\text{béton}}/E1_{\text{niveau2}} - \sigma_{\text{béton}}$$

En tenant compte de toutes les relations ci-dessus, on obtient le tableau suivant :

Facteur		E1	U_{max}	†_{bois}	†_{béton}
Moyenne réponse	niveau	1	7,73425	990,35	909,99375
		2	7,0471875	1006,2063	1078,3125
Effet	niveau	1	0,3435313	-7,928125	-84,15938
		2	-0,343531	7,928125	84,159375
Facteur		E2	U_{max}	†_{bois}	†_{béton}
Moyenne réponse	niveau	1	7,731125	899,7625	969,74375
		2	7,0503125	1096,7938	1018,5625
Effet	niveau	1	0,3404063	-98,51562	-24,40938
		2	-0,340406	98,515625	24,409375
Facteur		E3	U_{max}	†_{bois}	†_{béton}
Moyenne réponse	niveau	1	7,535625	1004,6688	1006,7938
		2	7,2458125	991,8875	981,5125
Effet	niveau	1	0,1449062	6,390625	12,640625
		2	-0,144906	-6,390625	-12,64063
Facteur		C1	U_{max}	†_{bois}	†_{béton}
Moyenne réponse	niveau	1	7,043875	952,28125	960,35
		2	7,7375625	1044,275	1027,9563
Effet	niveau	1	-0,346844	-45,99687	-33,80313
		2	0,3468438	45,996875	33,803125
Facteur		C2	U_{max}	†_{bois}	†_{béton}
Moyenne réponse	niveau	1	7,2716875	993,90625	975,1875
		2	7,50975	1002,65	1013,1188
Effet	niveau	1	-0,119031	-4,371875	-18,96562
		2	0,1190312	4,371875	18,965625

Tableau IV-6 : Effet Moyen des facteurs

Une fois tous les effets de chaque facteur calculés, on trace le diagramme des réponses moyennes et le diagramme des effets moyens. Ainsi, En tenant compte des résultats du tableau IV.5, on obtient les graphiques suivants :

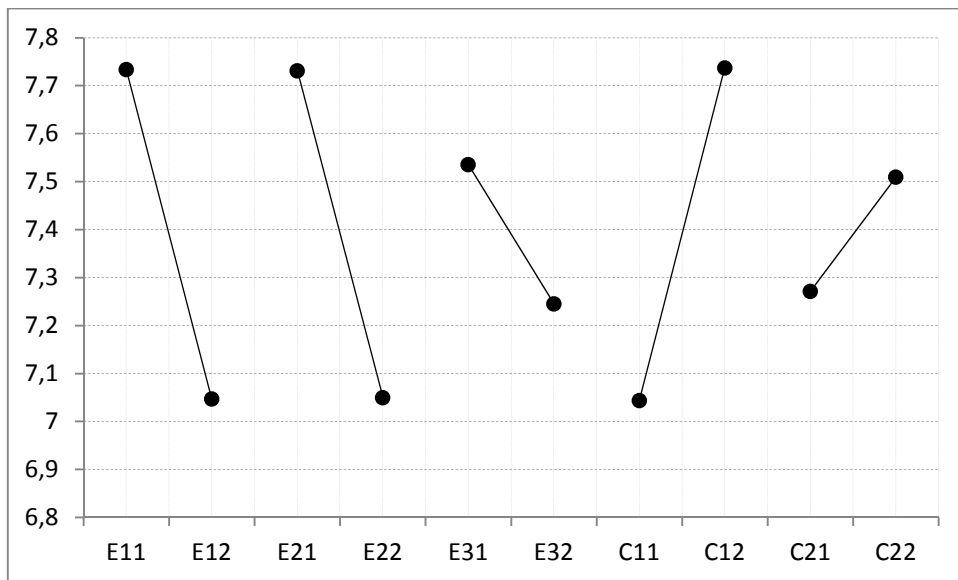


Figure IV.2 : Evolution du déplacement max

A partir de la figure IV.2, on constate que l'augmentation du module de Young des matériaux constituant la poutre mixte engendre la diminution du déplacement max. On observe l'effet contraire dans le cas des coefficients d'interaction entre les trois matériaux. En effet la figure IV.2 montre que lorsque les coefficients d'interaction acier-béton et acier-bois augmentent le déplacement max augmente.

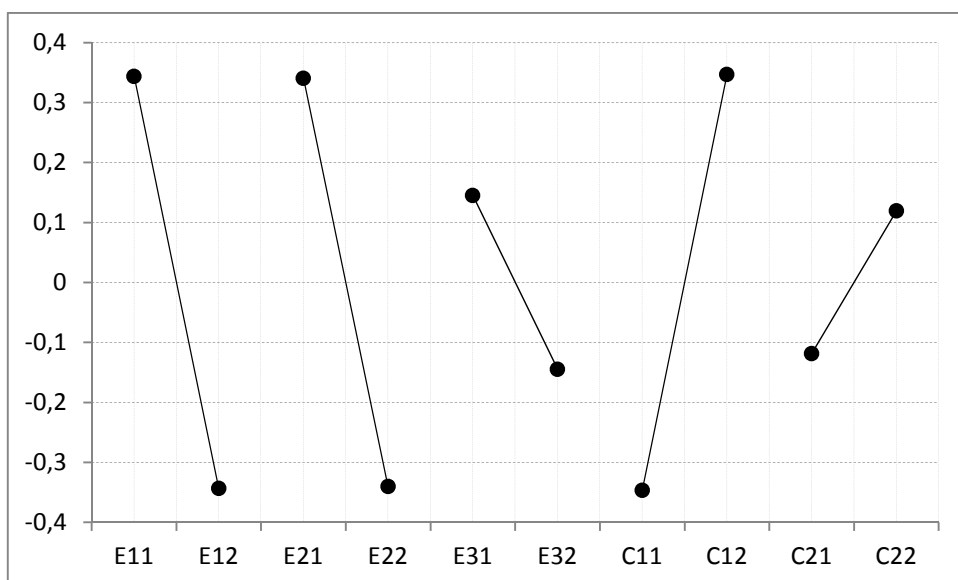


Figure IV.3 : Diagramme des effets de chaque facteur sur le déplacement max

A partir de la figure IV.3, on constate que l'effet des modules de Young du bois et du béton ainsi que l'effet du coefficient d'interaction béton-acier est plus important que celui du module de Young du connecteur et du coefficient d'interaction bois-acier.

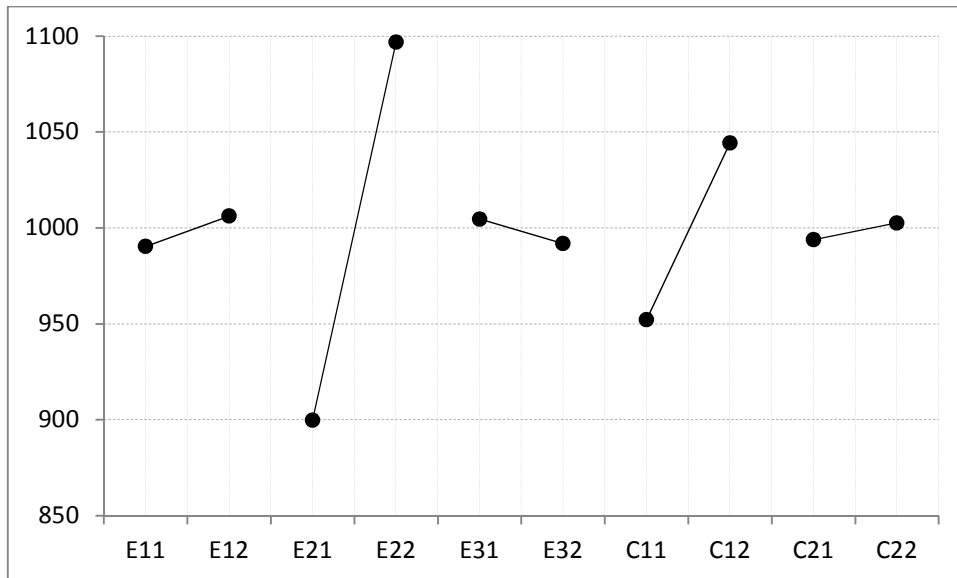


Figure IV.4 : Evolution de la contrainte dans le bois

A partir de la figure IV.4, on constate que l'augmentation du module de Young du bois influe considérablement sur la contrainte maximale dans le bois. On constate aussi que l'augmentation du coefficient d'interaction béton-acier augmente la contrainte dans le bois.

A partir de la figure IV.5, on constate clairement l'effet du module de Young du bois sur la contrainte dans le bois. La figure IV.5 montre aussi l'effet moindre du coefficient d'interaction béton-acier. Enfin, la figure IV.5 montre l'effet négligeable des autres facteurs.

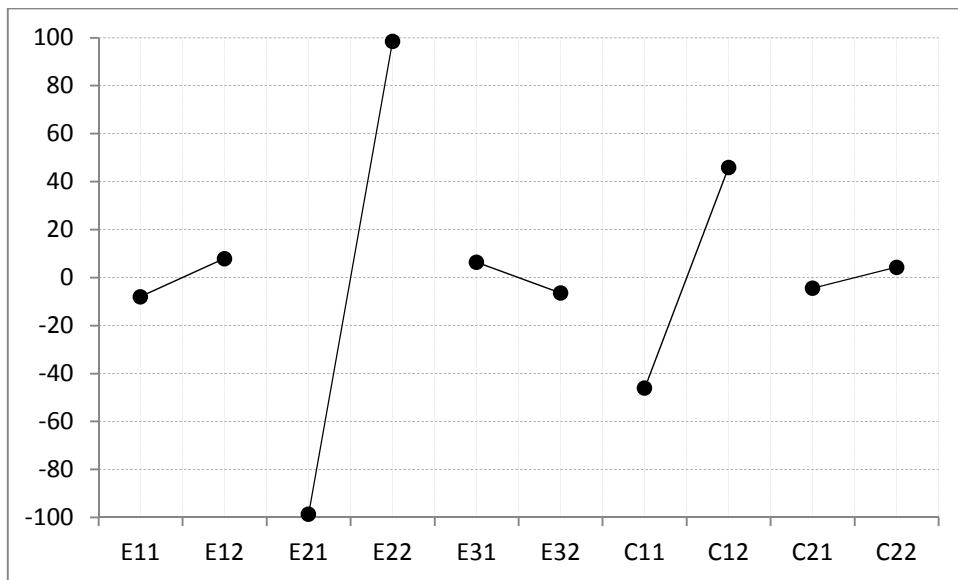


Figure IV.5 : Diagramme des effets de chaque facteur sur la contrainte dans le bois

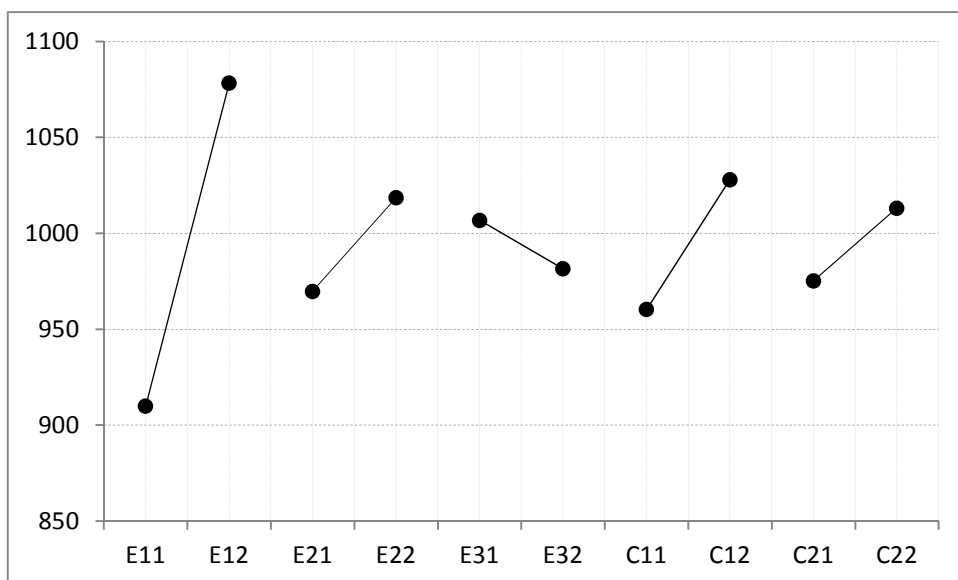


Figure IV.6 : Evolution de la contrainte dans le béton

A partir de la figure IV.6, on constate que l'augmentation des modules de Young du béton et du bois, ainsi que les coefficients d'interaction béton-acier et bois-acier engendre une augmentation de la contrainte dans le bois. On constate aussi que l'augmentation du coefficient d'interaction béton-acier augmente la contrainte dans le béton.

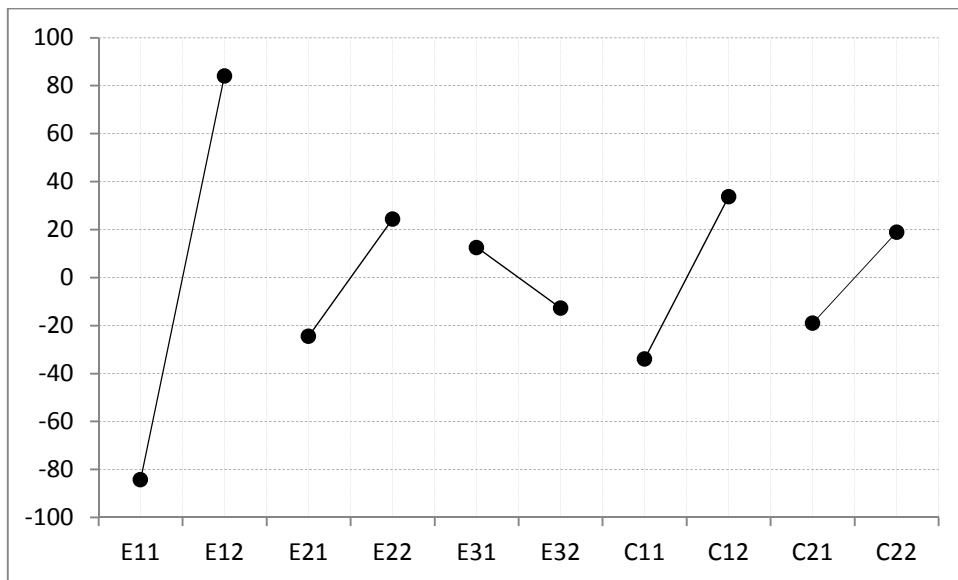


Figure IV.7 : Diagramme des effets de chaque facteur sur la contrainte dans le béton

-Combinaison optimale

A partir des résultats de la simulation, on remarque que l'expérience qui donne la solution optimale est la combinaison N°11.

Expérience	Facteurs					Réponses y de la poutre		
	E1	E2	E3	C1	C2	U_{\max}	\dagger_{bois}	$\dagger_{\text{béton}}$
11	2	1	2	1	2	3,418	453,6	558,3
	36752,4	8800	2520	0,48	0,36			

Tableau IV-7 : Combinaison optimale

En effet, lorsque le module d'élasticité du béton et celui des connecteurs ainsi que le coefficient d'interaction acier-bois sont à leur niveau maximal et que le module d'élasticité du bois et le coefficient d'interaction acier-béton sont à leur niveau minimal, on obtient :

- le plus petit déplacement maximal
- la plus petite contrainte dans le bois
- la plus petite contrainte dans le béton

IV-3. Modèle non linéaire

Compte tenu du fait que le temps d'exécution est très long en considérant le comportement non linéaire du connecteur, nous allons réaliser un plan fractionnaire. Autrement dit nous allons réduire le nombre de simulation.

Dans ce plan fractionnaire nous allons réaliser 8 simulations. Le plan d'expérience ainsi retenu est présenté dans le tableau suivant.

Expérience	Facteurs				
	E1	E2	E3	C1	C2
1	1	1	1	2	2
2	1	1	2	2	1
3	1	2	1	1	2
4	1	2	2	1	1
5	2	1	1	1	1
6	2	1	2	1	2
7	2	2	1	2	1
8	2	2	2	2	2

Tableau IV-8 : Plan d'expérience fractionnaire

Après la variation des facteurs avec 20%, on obtient les valeurs des facteurs dans le tableau suivant :

Expérience	Facteurs				
	E1	E2	E3	C1	C2
1	24501,6	8800	168000	0,72	0,36
2	24501,6	8800	252000	0,72	0,24
3	24501,6	13200	168000	0,48	0,36
4	24501,6	13200	252000	0,48	0,24
5	36752,4	8800	168000	0,48	0,24
6	36752,4	8800	252000	0,48	0,36
7	36752,4	13200	168000	0,72	0,24
8	36752,4	13200	252000	0,72	0,36

Tableau IV-9 : Plan d'expérience fractionnaire : valeurs des facteurs

Comme dans le modèle précédent Pour chaque expérience nous déterminons la réponse de la structure, Le déplacement maximal de la poutre, La contrainte maximale dans le béton, et La contrainte maximale dans le bois.

En considérant les différentes combinaisons du tableau, les simulations numériques sur abaqus nous ont permis d'obtenir les réponses suivantes :

Expérience	Facteurs					Réponse y de la poutre		
	E1	E2	E3	C1	C2	U _{max}	† _{bois}	† _{béton}
1	24501,6	8800	168000	0,72	0,36	8,85	394,5	257,9
2	24501,6	8800	252000	0,72	0,24	8,128	598,7	227,9
3	24501,6	13200	168000	0,48	0,36	7,25	384,3	174,8
4	24501,6	13200	252000	0,48	0,24	6,756	608	173,9
5	36752,4	8800	168000	0,48	0,24	7,732	497,5	192
6	36752,4	8800	252000	0,48	0,36	7,194	569,2	179,2
7	36752,4	13200	168000	0,72	0,24	6,416	619,8	192,6
8	36752,4	13200	252000	0,72	0,36	5,99	630,3	175,4

Tableau IV-10: Plan d'expérience fractionnaire : la réponse de la structure.

-Traitement des résultats : calcul non linéaire

Une fois la réponse de la structure est connue pour tout le plan fractionnaire, on détermine la moyenne arithmétique des réponses comme suit :

- $U_{\max} = \frac{\sum U_{\max}}{8} = 7,2895$
- $\text{bois} = \frac{\sum \text{bois}}{8} = 537,7875$
- $\text{béton} = \frac{\sum \text{béton}}{8} = 196,7125$

Pour chaque facteur, on peut estimer la moyenne des réponses lorsque ce facteur prend la valeur minimale et la valeur maximale (facteur à deux niveaux).

- **Moyenne des déplacements max lorsque :**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$\frac{\bar{U}_{\max}}{E1_{\text{niveau1}}} = \frac{\frac{\Sigma U_{\max}}{E1_{\text{niveau1}}}}{4} = 7,746$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$\frac{\bar{U}_{\max}}{E1_{\text{niveau2}}} = \frac{\frac{\Sigma U_{\max}}{E1_{\text{niveau2}}}}{4} = 6,833$$

- **Moyenne des contraintes dans le bois lorsque**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$\frac{\bar{U}_{\max}}{E1_{\text{niveau1}}} = \frac{\frac{\Sigma \sigma_{\text{bois}}}{E1_{\text{niveau1}}}}{4} = 496,375$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$\frac{\bar{U}_{\max}}{E1_{\text{niveau2}}} = \frac{\frac{\Sigma \sigma_{\text{bois}}}{E1_{\text{niveau2}}}}{4} = 579,2$$

- **Moyenne des contraintes dans le béton lorsque**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$\frac{\bar{U}_{\max}}{E1_{\text{niveau1}}} = \frac{\frac{\Sigma \sigma_{\text{béton}}}{E1_{\text{niveau1}}}}{4} = 208,625$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$\frac{\bar{U}_{\max}}{E1_{\text{niveau2}}} = \frac{\frac{\Sigma \sigma_{\text{béton}}}{E1_{\text{niveau2}}}}{4} = 184,8$$

De la même manière que pour le plan complet, l'effet moyen de chaque niveau de facteur s'apprécie par rapport à la moyenne générale Y comme suit :

- **Effet Moyen sur les déplacements max lorsque :**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$\frac{\bar{U}_{\max}}{E1_{\text{niveau1}}} - U_{\max} = 0,4565$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$\frac{\bar{U}_{\max}}{E1_{\text{niveau2}}} - U_{\max} = -0,4565$$

- **Effet Moyen sur les contraintes dans le bois lorsque :**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$\frac{\bar{\sigma}_{\text{bois}}}{E1_{\text{niveau1}}} - \sigma_{\text{bois}} = -41,4125$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$\frac{\bar{\sigma}_{\text{bois}}}{E1_{\text{niveau2}}} - \sigma_{\text{bois}} = 41,4125$$

- **Effet Moyen sur les contraintes dans le béton lorsque :**

- le facteur E1 est au niveau 1 :

$$\frac{\bar{\sigma}_{\text{béton}}}{E1_{\text{niveau1}}} - \sigma_{\text{béton}} = 11,9125$$

- le facteur E1 est au niveau 2 :

$$\frac{\bar{\sigma}_{\text{béton}}}{E1_{\text{niveau2}}} - \sigma_{\text{béton}} = -11,9125$$

En tenant compte de toutes les relations ci-dessus, on obtient le tableau suivant :

Facteur		E1	U_{max}	\dagger_{bois}	$\dagger_{béton}$
Moyenne réponse	niveau	1	7,746	496,375	208,625
		2	6,833	579,2	184,8
Effet	niveau	1	0,4565	-41,4125	11,9125
		2	-0,4565	41,4125	-11,9125
Facteur		E2	U_{max}	\dagger_{bois}	$\dagger_{béton}$
Moyenne réponse	niveau	1	214,25	514,975	214,25
		2	179,175	560,6	179,175
Effet	niveau	1	17,5375	-22,8125	17,5375
		2	-17,5375	22,8125	-17,5375
Facteur		E3	U_{max}	\dagger_{bois}	$\dagger_{béton}$
Moyenne réponse	niveau	1	204,325	474,025	204,325
		2	189,1	601,55	189,1
Effet	niveau	1	7,6125	-63,7625	7,6125
		2	-7,6125	63,7625	-7,6125
Facteur		C1	U_{max}	\dagger_{bois}	$\dagger_{béton}$
Moyenne réponse	niveau	1	179,975	514,75	179,975
		2	213,45	560,825	213,45
Effet	niveau	1	-16,7375	-23,0375	-16,7375
		2	16,7375	23,0375	16,7375
Facteur		C2	U_{max}	\dagger_{bois}	$\dagger_{béton}$
Moyenne réponse	niveau	1	196,6	581	196,6
		2	196,825	494,575	196,825
Effet	niveau	1	-0,1125	43,2125	-0,1125
		2	0,1125	-43,2125	0,1125

Tableau IV-11: effet des facteurs.

D'après les tableaux précédant on obtient les courbes suivantes :

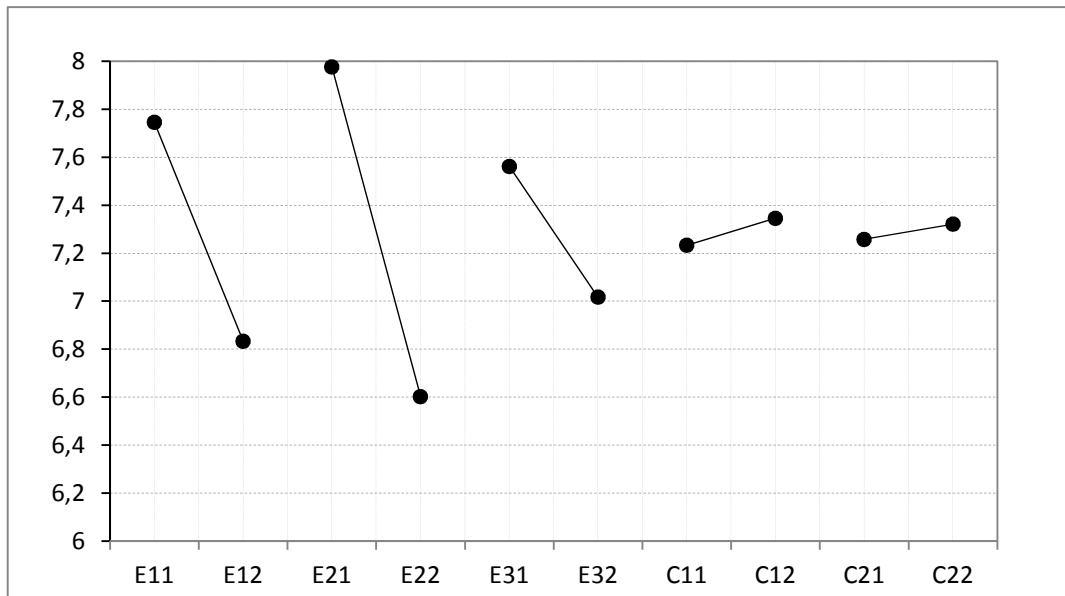


Figure IV.8 : Evolution du déplacement max.

Dans la figure IV.8 l'augmentation des modules de Young pour le béton, bois, et connecteurs engendrent une diminution de déplacement, par contre l'augmentation des coefficients d'interaction engendre une augmentation de déplacement.

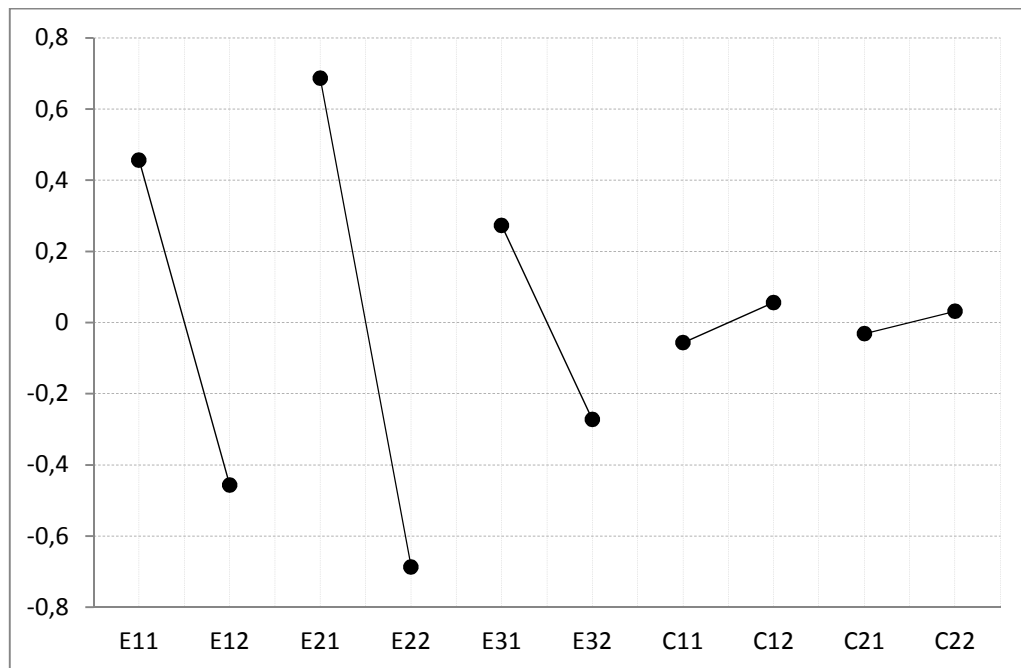


Figure IV.9 : Diagramme des effets de chaque facteur sur le déplacement max

La figure IV.9 présente les effets, et là on constate que les effets des facteurs E1, E2, E3 sont plus importante que les effets des facteurs d'interaction. Notons que l'effet de C1 a diminué par rapport au calcul linéaire.

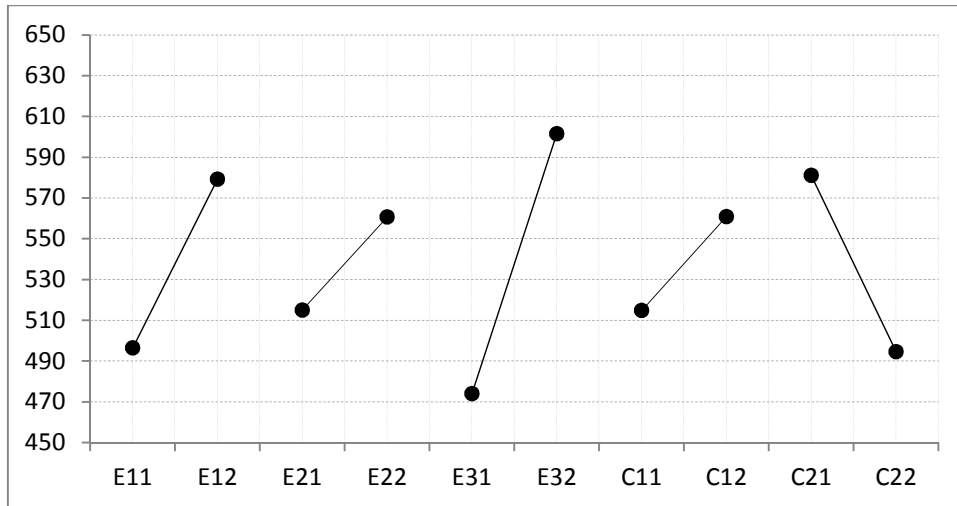


Figure IV.10 : Evolution de la contrainte dans le bois.

L'évolution de contrainte dans le bois engendre une augmentation de contrainte qui est dû à l'augmentation des modules de Young pour les trois matériaux et l'augmentation de coefficient d'interaction C1 (acier/béton), par contre l'augmentation de coefficient C2 (acier/bois) engendre une diminution de contrainte dans le bois.

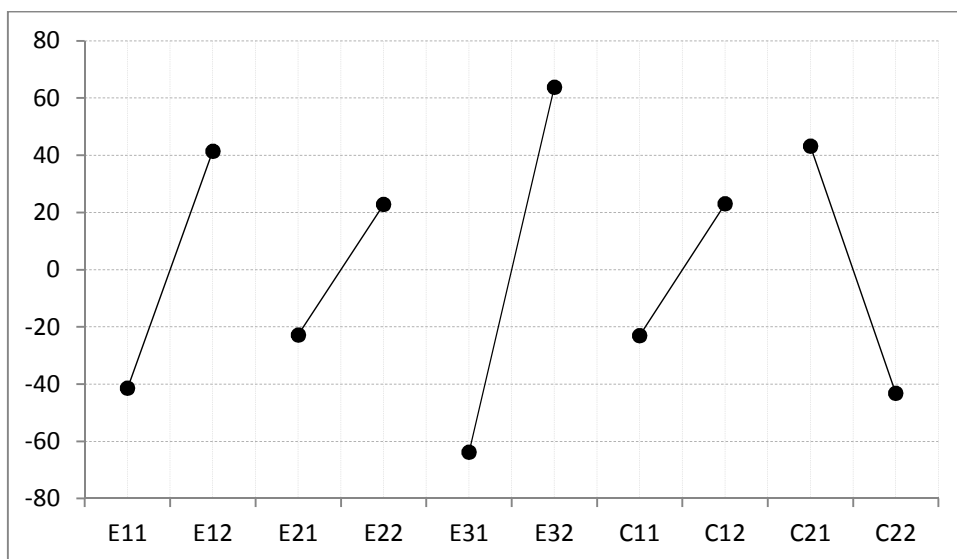


Figure IV.11 : Diagramme des effets de chaque facteur sur la contrainte dans le bois.

Dans cette figure on remarque que l'effet le plus important c'est l'effet de module de Young de connecteur, puis les effets le module de Young de béton et le coefficient d'interaction acier /bois sont moins important que le facteur E3. Notons que l'effet du module de Young du connecteur est plus important par rapport au calcul linéaire.

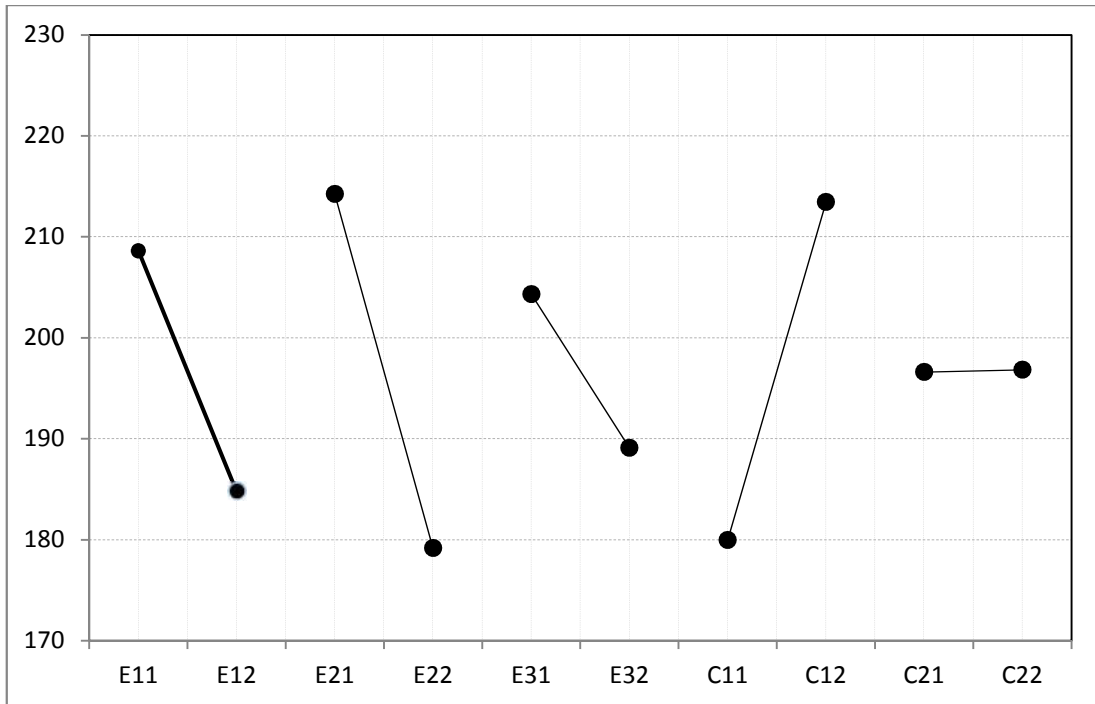


Figure IV.12 : Evolution de la contrainte dans le béton.

La figure IV.4 montre l'évolution de contrainte dans le béton, l'augmentation des modules de Young (E1, E2, E3) engendre une diminution de contrainte dans le béton, et l'augmentation de coefficient d'interaction acier/béton engendre une augmentation de contrainte dans le béton.

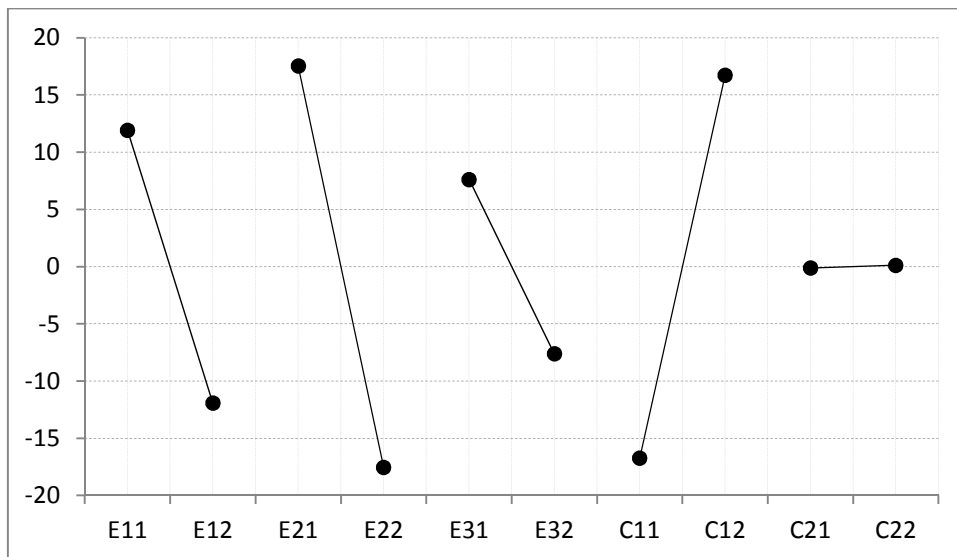


Figure IV.13 : Diagramme des effets de chaque facteur sur la contrainte dans le béton.

Les effets de module de Young de bois et l'interaction acier/béton sont les plus importants, aussi l'effet de module de Young de béton est moins important que les deux effets précédents.

-Combinaison optimale

A partir des résultats de la simulation, on remarque que deux expériences donnent la solution optimale.

Compte tenu du fait que la combinaison 8 présente une faible valeur du déplacement max et une très grande valeur de la contrainte dans le bois, la combinaison optimale est l'expérience 3.

Expérience	Facteurs					Réponse y de la poutre		
	E1	E2	E3	C1	C2	U_{\max}	\dagger_{bois}	$\dagger_{\text{béton}}$
3	24501,6	13200	168000	0,48	0,36	7,25	384,3	174,8
8	36752,4	13200	252000	0,72	0,36	5,99	630,3	175,4

Tableau IV-12 : Combinaison optimale

I-7 Conclusion :

Ce chapitre est consacré à l'application de la méthodologie des plans d'expérience pour l'analyse d'une poutre mixte bois-béton.

Il y a lieu d'indiquer que les expériences menées ici sont des simulations numériques c'est donc un **plan d'expérience numérique**.

D'une part nous avons effectué une analyse linéaire de la poutre mixte avec application d'un plan d'expérience complet.

Ce plan nous a permis de mettre en évidence les facteurs les plus influents et de déduire une combinaison optimale.

D'autre part, nous avons considéré le comportement non linéaire du connecteur et ainsi nous avons abouti à un temps de calcul assez long. Ceci nous a contraints à adopter un plan d'expérience fractionné.

Ainsi, au lieu d'effectuer 32 essais, nous avons effectué 8 essais uniquement.

Notons aussi que les valeurs des contraintes obtenues sont très importantes et cela du fait que la charge appliquée est très importante (toutes les poutres sont rompues à ce niveau de chargement).

L'objectif de ce travail est de présenter l'application et l'utilité d'un plan d'expérience pour l'analyse des structures. Pour un meilleur dimensionnement il va falloir tenir compte des contraintes limites des différents matériaux.

Conclusion Générale

Dans le cadre de cette étude, nous avons appliqué la méthodologie des plans d'expériences pour l'étude d'une poutre mixte bois béton. Il y a lieu d'indiquer que les expériences menées ici sont des simulations numériques c'est donc un **plan d'expérience numérique**.

C'est pourquoi dans un premier temps, un modèle numérique de la structure objet de notre étude a été mis en place en utilisant le code élément finis abaqus.

Dans un second temps, un plan d'expérience complet a été mis en place en considérant 5 facteurs à deux niveaux. Ainsi, 32 simulations numériques ont été effectuées. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'effet de chaque paramètre sur le comportement de notre structure.

Compte tenu du fait que notre structure résulte de l'assemblage de trois matériaux différents ; béton, bois et acier (connecteur), cette démarche nous a permis d'établir la combinaison optimale qui permet d'obtenir la meilleure structure possible.

Enfin, une analyse non linéaire de la structure a été effectuée en considérant le comportement non linéaire du connecteur. Ainsi nous étions contraints de considérer un plan d'expérience fractionnée où nous avons réduit le nombre de simulations de 32 à 8 simulations.

Il y a lieu d'indiquer que dans le cadre de cette étude nous avons considéré un comportement élastique et le comportement plastique du connecteur. Ainsi en perspective et pour un meilleur dimensionnement il serait intéressant d'appliquer cette démarche dans le cas où l'on considère le comportement non linéaire du bois et du béton.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Avis Technique 3/06-488**, D-DALLE, Plancher mixte bois-béton Composite wood-concrete floor, CSTB.2007.
- [2] **Avis Technique 3/08-574**, PP2B, Société COSYLVA, CSTB.2008.
- [3] **Avis Technique 3/09-605**, LIGNADAL, LIGNALITHE, 2009.
- [4] **Avis Technique 3/12-720**, TECNARIA, *Plancher mixte bois-béton Composite wood-concrete Floor*,2012.
- [5] **Avis Technique 3/05-450**, SBB, REPPEL ,2006.
- [6] **CSTC-Rapport n° 13**, comportement physique et mécanique des planchers mixtes en bois-béton 2010
- [7] **Olivier Gagliardini** , Cours de Béton Armé, IUP GCI3 option OS IUP Génie Civil et Infrastructures, UJF-Grenoble 2004.
- [8] **ADAM et NEVILLE .M**, « Propriétés des bétons ». Editions Eyrolles, Paris, 2000.
- [9] **Slim GUERMAZI**, cours de matériaux de construction2.
- [10] **Baraka Abdelhak**, Support du cours Béton Armé I. Centre Universitaire de Béchar.
- [11] **Natterer J., Sandoz J.L. et Rey M.** Construction en bois. Presses polytechnique et universitaires romandes, 2000.
- [12] **Eric Pradier**, Le matériau bois, cours sur le bois
- [13] **Eric Pradier**, Le matériau bois, le matériau bois et ses principales caractéristiques physico-chimiques et mécaniques, cours sur le bois.
- [14] **Emmanuel Fleury, Martin Chiche**, le bois dans la construction, Rapport n° 1, centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), 2006.
- [15] **J. M. Franssen**, construire en bois, cours, année académique 2007-2008. *Université de Liège*.
- [16] **Yves Benoit**, le guide des essences du bois, Edition Eyrolles 2008
- [18] **J. M. Franssen**, construction en bois, cours à l'initiation, université de Liège, 2007/2008
- [19] **Jean-Claude chauveau / Jean-Paul chassaing**.
- [20] **Goupy**, "*Plans D'expériences*." Techniques de l'Ingénieur, traité Analyse et Caractérisation, Doc. PE230, 1997, 26 pages. / **Sabre**, "*Plans D'expériences – Méthode De Taguchi*." Techniques de l'Ingénieur, Procédés chimie-bio - agro, Apport du génie des procédés, Doc. F 1 006, 2007, 10 pages.

[21] **Alexis et Alexis**, *"Pratique Industrielle Des Plans D'expériences. La Qualité À Moindre Coût: L'approche Taguchi."* Editions AFNOR, 1999 276 pages.

[22] **HIBBIT, KARLSSON& SORENSEN, INC.** ABAQUS documentation version6.10.

[23] **Julien Briche**, Introduction à la CAO sur le logiciel ABAQUS

[24] **Kezmane Ali**, Etude d'un voile renforcé avec des barres diagonales internes par Abaqus, thèse M2 structures et matériaux, UMMTO, 2010