

Etude de la connexion de cisaillement dans les poutres mixtes bois-béton

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER D'INGENIERIE DE L'EAU ET L'ENVIRONNEMENT
OPTION : **Génie Civil**

Présenté et soutenu publiquement le 21 Juin 2013 par

Yaovi Edem BAITE

Travaux dirigés par : **Pr Abdelhamid BOUCHAIR** Tuteur Polytech
Dr Eric FOURNELY Co - Tuteur Polytech
Dr Adamah MESSAN Tuteur 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr A. MESSAN

Membres et correcteurs : K. KOKOLE
M. KABORE
S. BARRO

Promotion [2012/2013]

CITATION

« L'une des meilleures façons d'aider quelqu'un est de lui donner une responsabilité et de lui faire savoir que vous lui faites confiance ». **Booker T. Washington**

À Dieu,

À mes oncles Emmanuel, Cimon, Daniel et Jean,

À ma famille et à ma petite amie Cynthia,

À mes parents Nicolas et Afi.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche présenté dans ce mémoire a été mené en cotutelle avec la plate-forme Mécanique/Matériaux et Structure (MMS) de Polytech Clermont et le laboratoire d'éco matériaux du centre commun de recherche « Energie et Habitat Durables » de 2ie. Comme tout travail de recherche, il fut instructif et passionnant, tout en étant constitué de tâches souvent ardues et décourageantes. Je tiens donc à remercier les personnes qui m'ont apporté leur soutien pour la réalisation de ce travail.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au professeur **Hamid BOUCHAÏR** qui m'a fait l'honneur de diriger ce travail. Il a été la personne qui m'a initié au travail de recherche. A travers nos discussions, souvent longues mais toujours fructueuses, il m'a amené à réfléchir et avoir un regard critique sur un nombre de phénomènes, qui paraissaient souvent être des évidences. Ce n'est qu'avec le recul qu'à présent je comprends que c'est justement ce travail de réflexion qui est la base de tout savoir. Je tiens à l'assurer de mon profond respect et sympathie.

Je tiens à remercier **Mr Eric FOURNELY**, maître conférence à Polytech Clermont pour tous ces conseils scientifiques.

Ma reconnaissance va également à mon tuteur **Mr Adamah MESSAN**, maître conférence à 2ie pour ses conseils, son optimisme et sa confiance qu'il m'a accordé au cours de ce travail.

Je tiens à remercier tous les responsables et tout le personnel de la plate-forme MMS, pour sa qualité humaine et sa sympathie.

Un grand merci à tous les doctorants et stagiaires de l'Institut Pascal pour leur accueil chaleureux durant cette période. Ils ont su créer une ambiance solidaire et conviviale.

Je souhaite exprimer, de tout mon cœur mon affection et ma reconnaissance à mes parents pour leur soutien constant qui m'a permis d'en arriver là.

En fin, ma gratitude va à ma cousine Cynthia pour ses conseils et l'amour qu'elle m'a apporté.

Je n'oublie ma promotion route et ouvrage d'art, et tous les autres options, spécialement mes camarades :

Edem PAKAMEY ; Decroly DJOUBISSIE DENOUWE ; Jean de Dieu IYAMUREMYE; YONTCHUI SANDJONG Ghislain ; Danièle TIENDREBEOGO pour l'agréable ambiance de travail qu'ils m'ont apporté, et Mr Daouda pour l'aide en modélisation et sur MATLAB.

RESUME

Les structures mixtes associant des matériaux de qualités différentes mais complémentaires représentent une alternative intéressante en comparaison avec les techniques traditionnelles mono-matériaux. Dans la construction les associations les plus courantes des matériaux concernent les structures bois-béton ou acier-béton. Dans ces structures, le béton est mobilisé dans son domaine de prédilection associé à sa bonne résistance en compression. Le bois et l'acier remplissent la fonction de résistance en traction. Ainsi, une section mixte a des caractéristiques de résistance et de rigidité plus élevées que celles des matériaux pris séparément pour le même poids et quantité de matériaux. Cependant, pour atteindre les performances mécaniques souhaitées il est nécessaire d'assurer la connexion de cisaillement qui s'oppose au glissement entre les deux matériaux.

L'idée principale de l'utilisation d'une structure mixte, c'est de profiter des meilleurs caractéristiques de chaque matériau afin d'obtenir un élément structural efficace en ce qui concerne la résistance, la rigidité et la qualité. En plus des fonctions mécaniques optimales, les structures mixtes présentent des qualités de résistance au feu. C'est pour ces raisons, que les structures mixtes constituent des solutions intéressantes aussi bien en construction neuve qu'en réhabilitation. Cependant, les méthodes de calcul et de dimensionnement des structures mixtes bois-béton sont peu développées. L'objectif de la présente étude est de développer un outil de calcul de la résistance et de la rigidité d'une section mixte constituée de deux matériaux différents avec prise en compte de la connexion.

Le modèle s'appuie sur la décomposition de la section mixte en plusieurs couches et la décomposition de la poutre en tronçons. L'application concerne les sections mixtes bois-béton (section rectangulaire en bois et dalle en béton). Les résultats expérimentaux issus de la bibliographie ou de travaux réalisés à Clermont-Ferrand sont confrontés à ceux donnés par les méthodes analytiques existantes ainsi qu'aux résultats du modèle développé. Ces comparaisons permettent de bien comprendre le comportement des poutres mixtes et les contributions des différentes composantes y compris la connexion. Elles permettent aussi de valider l'outil de calcul développé qui s'appuie sur des hypothèses de comportement linéaire mais qui est construit pour être généralisé aux comportements non linéaires des matériaux et de la connexion.

Mots Clés :

-
- 1- Plancher bois-béton**
 - 2 - Calcul analytique**
 - 3 - Connecteurs**
 - 4 - Comportement mécanique mixte**

ABSTRACT

Mixed structures involving materials of different but complementary qualities represent to a valuable alternative comparison with traditional single-technical materials. In construction, the most common materials associations relate wood-concrete or steel-concrete structures. In these structures, the concrete is mobilized in his chosen field associated with its good compressive strength. The wood and steel fulfill the function of tensile strength. Thus, a composite section has higher than those of the materials separately for the same amount of weight and material characteristics of strength and stiffness. However, to achieve the desired mechanical performance it is necessary to ensure the shear connection that signs the slip between the two materials.

The main idea of the use of a composite structure is to take advantage of the best characteristics of each material in order to obtain an effective structural element regarding the strength, stiffness and quality. In addition optimal mechanical, composite structures have qualities of resistance to fire. It is for these reasons that composite structures are interesting solutions as well as in new construction and in renovation. However, the methods of calculation and sizing of wood and concrete structures are poorly developed. The purpose of this study is to develop a tool for calculating the resistance and rigidity of a composite section consisting of two different materials with consideration of the connection.

The model is based on the decomposition of the composite section in several layers and decomposition of the girder sections. The application relates to mixed wood-concrete sections (rectangular wood and concrete slab). The experimental results from the bibliography or works made in Clermont-Ferrand are compared with those given by the analytical methods as well as the results of the model developed. These comparisons allow to understand the behavior of composite beams and the contributions of the various components including the connection. They also validate the tool developed calculation is based on assumptions of linear behavior but is built to be generalized to non-linear behavior of materials and connection.

Key words:

-
- 1 - Slabs timber-concrete**
 - 2 - Analytical calculation**
 - 3 - Connectors**
 - 4 - Mixed mechanical behavior**

LISTE DES ABREVIATIONS

A_1	Section transversale de la partie en béton
A_2	Section transversale de la partie en bois
b_2	Largeur de la poutre
E_1	Module d'élasticité du béton
E_2	Module d'élasticité du béton
$E_{0,mean}$	Valeur moyenne instantanée du module d'élasticité
$(EI)_0$	Rigidité à flexion de la section mixte sans connexion
$(EI)_\infty$	Rigidité à flexion de la section mixte avec connexion parfaite
F_s	Effort de cisaillement dans le connecteur mécanique
$f_{m,k}$	Valeur caractéristique de la résistance en flexion
$f_{t,0,k}$	Valeur caractéristique de la résistance en traction dans le sens du fil
$f_{V,k}$	Valeur caractéristique de la résistance au cisaillement
K	Module de glissement de la connexion pour unité de longueur
M	Moment fléchissant
N	Effort normal
N_{ctot}	Efforts résultants de compression
N_{ttot}	Efforts résultants de traction
R	Distance entre les centres de la partie béton et partie bois
r_1	Distance entre le centre de la section A_1 et l'interface bois-béton
r_2	Distance entre le centre de la section A_2 et l'interface bois-béton
S^*_2	Moment statique de la section A^*_2 par rapport au centre de la section complet
V	Effort de cisaillement
V_2	Effort tranchant dans la poutre pour la section A_2
v	Flux de cisaillement dans l'interface bois-béton
W	Domaine des déplacements verticaux (flèches)
w_0	Flèche maximale (mi portée).
u	Le glissement du connecteur soumis à l'effort F_s
u_{10}	Déplacement horizontal barycentrique maximal de la partie béton
u_{20}	Déplacement horizontal barycentrique maximal de la partie bois

SOMMAIRE

CITATION.....	i
REMERCIEMENTS.....	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT.....	v
Liste des abréviations.....	vi
SOMMAIRE.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures.....	x
INTRODUCTION.....	2
Partie I : « Généralités, Matériaux, Système de connexion ».....	4
I. GÉNÉRALITÉS.....	5
I.1- Principes du plancher mixte en bois-béton.....	5
I.2 - Avantages et inconvénients des plancher mixtes bois-béton.....	8
I.3 - Systèmes de connexion de poutres mixtes bois-béton.....	8
I.3.1 - Connexions par compression locale du bois.....	9
I.3.2 - Connexions par cisaillement surfacique du bois.....	13
I.4 - Les Matériaux.....	14
I.4.1 - Le bois.....	14
I.4.2 - Le béton.....	16
Partie II« Méthodes d'analyses des structures Mixtes Bois-Béton ».....	18
II. MÉTHODES D'ANALYSES DES STRUCTURES MIXTES BOIS BÉTON.....	19
II.1 - Méthodes Elastiques.....	20
II.1.1 - Méthode Analytique.....	20
II.1.2 - Méthode Analytique approchée.....	22
Partie III« Développement et résultat de l'outil ».....	28
III. Développement et résultat de l'outil.....	29
III.1 - Modèle basé sur approche analytique.....	29
III.1.1 - Hypothèses de calcul.....	30
III.1.2 - Maillage.....	30
III.1.3 - Analyse de la section.....	31
III.1.4 – Analyse du comportement de la poutre.....	35
III.1.4.1 - Détermination de l'effort rasant.....	35
III.1.4.2 - Détermination de la flèche due au moment fléchissant.....	38
III.1.4.3 - Test en termes de moment résistant d'une section, de la courbure, la flèche et les contraintes de cisaillements.....	41
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	45
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	47

ANNEXEI

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 - Influence d'une connexion parfaite dans une poutre sur les valeurs de contraintes et de déformations.....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 2 - Principales caractéristiques des bois massifs</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 3 - Principales caractéristiques des bois lamellé-collé</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 4 - Principales caractéristiques du béton</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 5 - Valeur de K_{ser}, [EC5-1-1 1999]</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 6 - Résultats MALTAB ET RDM</i>	<i>42</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Schéma de principe d'un plancher mixte en bois-béton [CSTC 2010]	5
Figure 2 - Rôle joué par des connecteurs dans une poutre simple ;(a) Sections non solidarisiées ;(b) Sections parfaitement solidarisiées.....	5
Figure 3 - Etat de contraintes sans connecteur et avec connecteur dans une poutre mixte en bois-béton.....	6
Figure 4 - Comparaison des différents types de planchers (dans les limites des domaines d'application).....	7
Figure 5 - Brevet d'invention de Schaub et de Martino	9
Figure 6 - Brevet d'invention de Deperraz	10
Figure 7 - Brevet d'invention de Molard	10
Figure 8 - Dalle mixte bois béton nommée D-Dalle	10
Figure 9 - Clous et vis de grandes résistances testées par Ahmadi.....	11
Figure 10 - Brevet d'invention de Trygve et de Kuttel ; (a) [T.Trygve] ; (b) [Kuttel].....	11
Figure 11 - Connecteurs testés par Benitez et par Steinberg ; (a)[Benitez] ; (b) [Steinberg].....	12
Figure 12 - Brevet d'invention d'Alain	12
Figure 13 - Brevet d'invention de Raymond et de Welch ; (a)[Raymond] ; (b) [Welch]	13
Figure 14 - Les différents modes de sollicitation d'un joint de colle, [Creac hcadec 2008]	13
Figure 15 - Les différents modes de rupture d'un joint de colle, d'après [Creac hcadec 2008]	14
Figure 16 - Évolution des caractéristiques mécaniques en fonction du taux d'humidité.....	15
Figure 17 - Variation du module d'élasticité.....	16
Figure 18 - Détermination du coefficient de fluage $f(\infty, t_0)$ pour le béton dans un environnement intérieur (RH = 50%).....	17
Figure 19 - Méthodes de section homogénéisée	19
Figure 20 - Méthodes d'analyses des poutres mixtes bois-Béton.....	20
Figure 21 - Système poutre mixte, section, déformations	21
Figure 22 - Géométrie de la section composées et distribution des contraintes	24
Figure 23 - Poutre simplement appuyée avec un chargement sinusoïdale.....	25
Figure 24 - Types de section qui peuvent être étudiées avec l'outil développé.....	29
Figure 25 - Flexion à trois points	29
Figure 26 - Flexion à quatre points.....	29
Figure 27 - Chargement répartis	30
Figure 28 - Maillage de la section : discrétisation verticale.....	30
Figure 29 - Maillage de la poutre : discrétisation longitudinale	31

Figure 30 - Comportement d'une section multicouche.....	32
Figure 31 - Organigramme 1 : détermination de la loi moment-courbure d'une section multicouche	34
Figure 32 - Effort rasant.....	35
Figure 33 - Etat de contraintes dans un tronçon k.....	36
Figure 34 - Calcul de la contrainte de cisaillement ($\tau = \sigma_{xy}$) dans le tronçon k.....	37
Figure 35 - Organigramme de calcul de la charge ultime et les contraintes de cisaillement, le long de la poutre	38
Figure 36 - Organigramme de calcul de la flèche due au moment fléchissant, le long de la poutre.	40
Figure 37 - Caractéristique géométrique de la poutre.....	41
Figure 38 - Loi moment courbure.....	42
Figure 39 - La charge en fonction de la flèche.....	43
Figure 40 - Evolution de la contrainte le long de la poutre	43
Figure 41 - Evolution de la déformée le long de la poutre.....	44
Figure 42 - Distribution de contraintes normales moyennes de la dalle.....	II
Figure 43 - Contrainte état initial combinaison 1,35G+1,5Q.....	VII
Figure 44 - Contrainte état initial combinaison 1,35G.....	VII
Figure 45 - Contrainte état final combinaison 1,35G	VIII
Figure 46 - Contrainte état final combinaison 1,35G+1,5Q.....	VIII

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Une seconde tendance marquée est la démarche de construction durable, dont la notion apparaît à la fin des années 1960 et se pratique de plus en plus couramment en Europe et en Amérique [CTBA ,2007] . Elle consiste à limiter l'impact sur l'environnement à chaque stade de la vie d'un bâtiment, de sa conception jusqu'à sa démolition ou sa rénovation (réaffectation), en passant par sa mise en œuvre et son exploitation.

Ce type de construction implique, entre autres, le choix de matériaux peu énergivores de par leur provenance et leur mise en œuvre, recyclables en fin de vie, ou encore l'utilisation de techniques de construction favorisant la main-d'œuvre plutôt que d'importantes quantités d'énergie.

Le bois est un matériau bien adapté à ces préoccupations environnementales, mais limité sous sa forme brute au point de vue mécanique et dimensionnel [CSTC, 2010].

Afin de dépasser les limitations imposées par l'arbre et de conférer au produit fini les caractéristiques d'un matériau industriel, sans lui ôter ses qualités intrinsèques, de nouveaux produits de haute technologie, tels que les panneaux structuraux (OSB, MDF, multiplex..), les poutres à base de bois (poutres recomposées, poutres en lamellé-collé..), les systèmes de plancher (autoportants, à caissons, mixtes), etc. ont vu le jour ces dernières décennies.

En particulier, les nouveaux systèmes de plancher réalisés en grande partie ou complètement en bois se différencient des planchers en bois traditionnels de par leurs meilleures performances globales (résistance mécanique, isolation acoustique, sécurité en cas d'incendie, etc.) et permettent de respecter des exigences croissantes au-delà de la simple capacité portante. Le plancher mixte en bois-béton fait partie de ces systèmes modernes.

Le principal problème que pose l'étude de ce type de plancher, est la complexité de l'interaction entre deux matériaux différents, la connexion entre les éléments d'un plancher mixte est souvent du type semi-rigide et la théorie de Navier-Bernoulli n'est pas applicable.

Des méthodes de calcul simplifiées, qui prennent une série d'hypothèses, ont été développées afin d'étudier ce type de structures, mais lorsqu'on a besoin d'un degré d'exactitude supérieur dans l'analyse où l'intervention des phénomènes non linéaires est plus forte, l'application de méthodes numériques se montre plus intéressante.

L'objectif de ce travail, est de développer un outil de dimensionnement de structures mixte qui permettra de prendre en compte des phénomènes complexes présentes dans les planchers mixtes comme, les comportements non-linéaires ou discontinuités dans les composants.

Pour cette raison on s'est servi du logiciel de programmation MATLAB, pour créer un modèle numérique basé sur des structures réelles. Pour valider les démarches proposées, on réalise toujours une comparaison entre les résultats numériques et ceux obtenus par les approches normatives.

Ce travail est divisé principalement en trois parties :

- ✓ La première partie de ce mémoire, présente les généralités sur les planchers mixtes bois-béton, la caractérisation des matériaux constitutifs de ces structures et aussi leurs avantages et inconvénients ;
- ✓ La deuxième partie fait un état sur les différentes méthodes d'analyse existantes. Elles utilisent des hypothèses et font référence à des différents règlements ;
- ✓ La dernière partie présente le développement et résultats du modèle en utilisant le logiciel MATLAB et la comparaison des résultats.

Partie I : « Généralités, Matériaux, Système de connexion »

I. GÉNÉRALITÉS

I.1- Principes du plancher mixte en bois-béton

Le plancher mixte en bois-béton se rapproche du plancher traditionnel en bois sur lequel une dalle en béton est coulée. La différence essentielle réside dans la collaboration entre les deux matériaux grâce à la liaison mécanique obtenue par des connecteurs Figure 1.

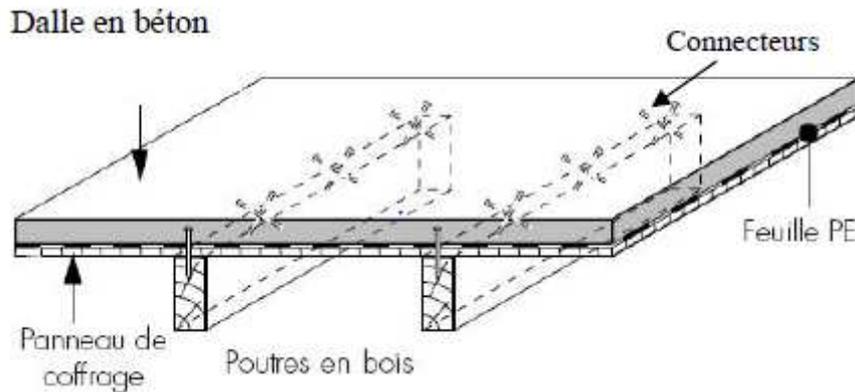


Figure 1 - Schéma de principe d'un plancher mixte en bois-béton [CSTC 2010]

Afin de bien comprendre le rôle joué par ces connecteurs, représentons le comportement d'une poutre simple soumise à flexion telle que celle illustrée à la Figure 2.

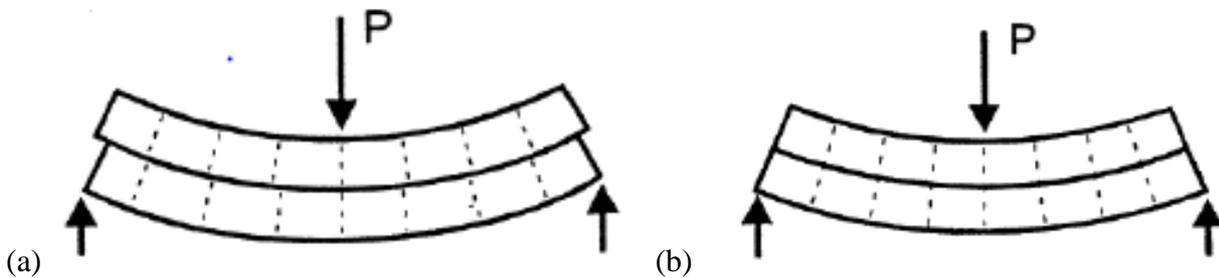
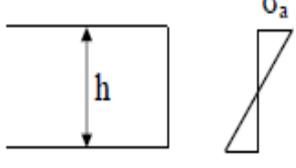
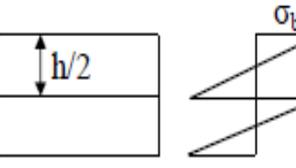


Figure 2 - Rôle joué par des connecteurs dans une poutre simple ;(a) Sections non solidarisiées ;(b) Sections parfaitement solidarisiées

En considérant 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). Si on admet un comportement élastique, il est aisé de montrer qu'à moment de flexion équivalent, la présence d'une liaison parfaite entre les deux composants réduit les contraintes normales maximales de moitié et divise la flèche par quatre tel que l'illustre le tableau 1.

Tableau 1 - Influence d'une connexion parfaite dans une poutre sur les valeurs de contraintes et de déformations.

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)		$\sigma_b = \frac{M/2 \frac{h}{4}}{b \left(\frac{h}{2}\right)^3} = \frac{12M}{bh^2}$	$f_{i,b} = \frac{P/2L^3}{48E \frac{b \left(\frac{h}{2}\right)^3}{12}} = \frac{PL^3}{Eb h^3}$
Rapport $\frac{Lim_{sup}}{Lim_{inf}}$	-	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$

Ainsi, une façon économique d'augmenter la résistance et la rigidité en flexion d'un plancher en bois consiste à connecter mécaniquement une dalle en béton au plancher en bois existant. Comme l'illustre la figure 3, la contribution des connecteurs permet notamment de diminuer l'ensemble des contraintes dans les deux matériaux (mais surtout dans le bois), afin d'exploiter ces derniers de manière optimale. Les connecteurs permettent de transférer les efforts (de cisaillement) entre le bois et le béton.

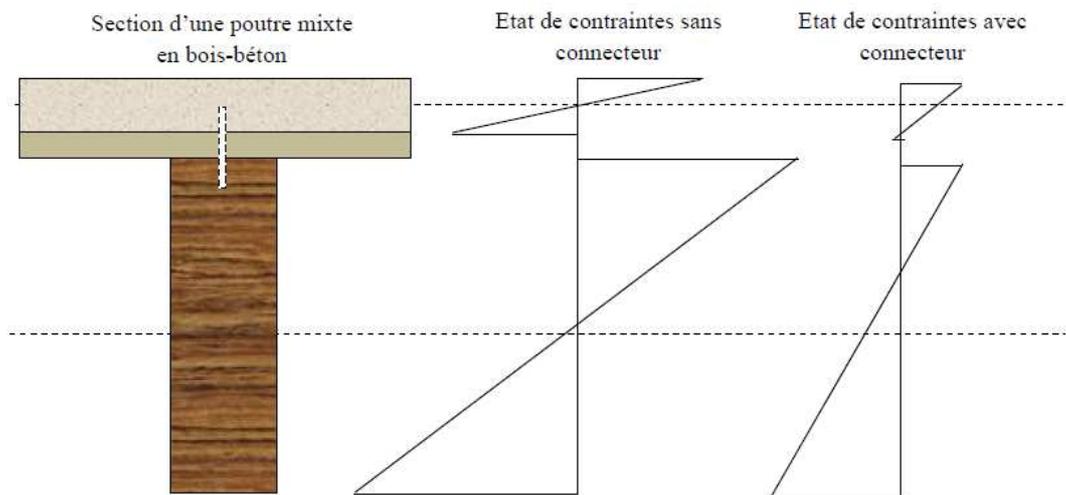


Figure 3 - Etat de contraintes sans connecteur et avec connecteur dans une poutre mixte en bois-béton

La figure 4 nous montre 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.

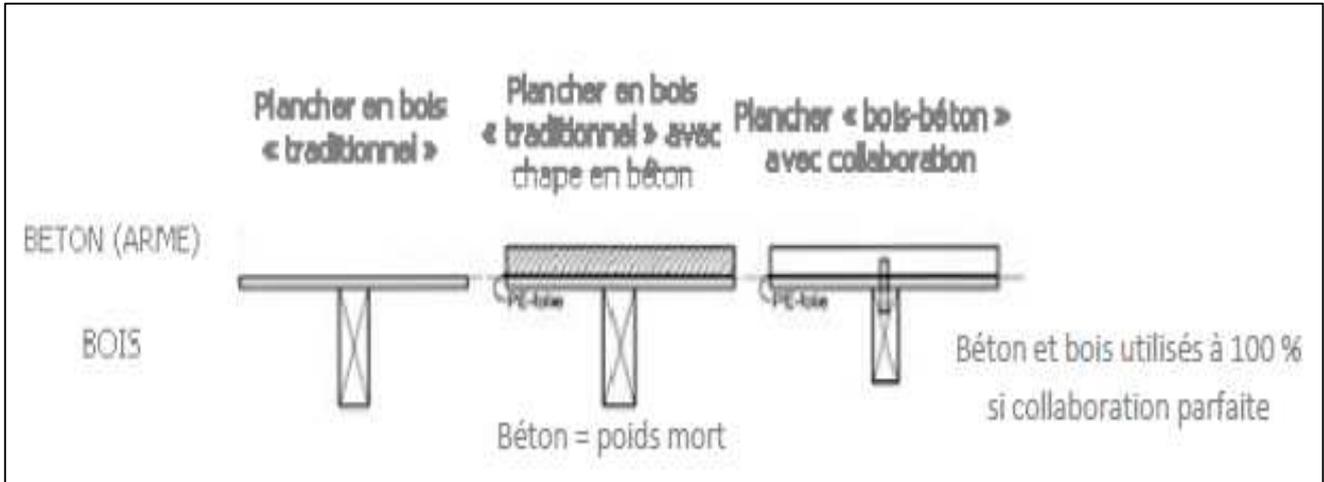


Figure 4 - Comparaison des différents types de planchers (dans les limites des domaines d'application)

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

Pour obtenir l'effet mixte souhaité (une collaboration optimale entre le bois et le béton), il convient que la liaison entre la poutre et la dalle soit réalisée de façon à transmettre les efforts rasants et à limiter les glissements à l'interface. Sans liaison, les solives en bois doivent supporter à elles seules toutes les charges. Par contre, si une connexion est mise en place, on réalise une poutre mixte dont la rigidité est sensiblement accrue. Pratiquement, pour assurer cet effet mixte, un étaieage est nécessaire durant la phase de construction jusqu'à la prise du béton.

L'utilisation du plancher mixte en bois-béton peut constituer, dans certains cas, une solution économique, tant en construction neuve qu'en rénovation. La solution du plancher mixte en bois-béton peut donc se révéler économiquement intéressante, étant donné qu'elle permet d'augmenter la capacité portante, tout en évitant le remplacement complet du plancher, et limite ainsi les interventions sur site.

I.2 - Avantages et inconvénients des plancher mixtes bois-béton.

Les planchers mixtes bois-béton présentent plusieurs avantages [Ario CECCOTTI, 2002], parmi lesquels on peut mentionner:

- La réduction du poids propre de la structure : la dalle en béton est de faible épaisseur et les bétons légers peuvent être privilégiés pour ne pas pénaliser les fondations.
- L'augmentation de la rigidité en flexion du plancher (diminution des flèches de service), de plus la rigidité dans le plan est considérablement augmentée. Le diaphragme ainsi constitué est capable de garder sa forme, ceci est très important pour le comportement d'une structure lors d'un séisme.
- L'amélioration sensible de la résistance à l'incendie. En effet, le béton travaille comme une barrière face au feu, cela augmente la résistance par rapport au plancher construit uniquement en bois.
- La réduction de l'effet « trampoline », en général, l'amortissement des vibrations est proche de 2% voire plus, facilitant les vérifications aux états limites de services.
- L'isolation acoustique est également accrue, l'isolation aux bruits aériens est améliorée par rapport au plancher en bois en raison de l'augmentation de la masse du plancher. Un meilleur amortissement augmente l'isolation aux bruits d'impact par rapport au plancher en béton. Ce procédé est bien adapté à la réhabilitation sans changer la topologie du bâtiment.

Comme inconvénients on peut mentionner [Martin MALLEA, 2003]:

- Quelques systèmes de liaison ne peuvent pas assurer une connexion suffisamment rigide entre le bois et le béton. Normalement la connexion est de type semi-rigide, facteur qu'il faut prendre en compte pour l'étude et la modélisation du système
- Le béton contient de l'eau, ce qui peut engendrer des dégâts sur le bois. Ce problème peut être minimisé en utilisant un super plastifiant qui réduit la quantité d'eau du béton. Un film plastique peut être également mis en place pour une protection supplémentaire de la surface du bois.

I.3 - Systèmes de connexion de poutres mixtes bois-béton

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

des tubes métalliques emmanchés dans le bois, soit par le collage. On peut classer les systèmes de connexion existants en deux (2) grandes familles :

- ✓ Les systèmes fonctionnant prioritairement par compression locale du bois ;
- ✓ Les systèmes fonctionnant prioritairement par cisaillement surfacique du bois.

I.3.1 - Connexions par compression locale du bois

Ces systèmes sont des éléments qui permettent de transmettre le cisaillement entre le bois et le béton par la compression de ces éléments sur le bois. On distingue:

- les connexions par des entailles
- les connexions par des pointes, des vis, des goujons
- les connexions par des crampons
- les connexions par des tubes

I.3.1.1 - Connexions par des entailles

Les connexions par des entailles consistent à usiner des rainures dans le bois, qui sont remplies de béton lors du coulage pour former des tenons dans le bois. Dans le brevet d'invention de [Schaub M.O, 1929] , les surfaces de contact entre le bois et le béton sont dentelées, crénelées, ou trouées afin d'empêcher le glissement longitudinal entre le bois et le béton. Pour renforcer des dents en béton dans le bois, des vis ou des fers d'ancrage sont enfoncés à l'intérieur des dents et du bois. [Martino, M 2005] a renforcé les rainures de section trapézoïdale dans le bois par des éléments en acier de même section (Figure 5).

[Deperraz, G 1998] propose des entailles de sections variables dans lesquelles différents profils sont convenablement disposés et orientés par rapport au signe de l'effort de cisaillement (Figure 6).

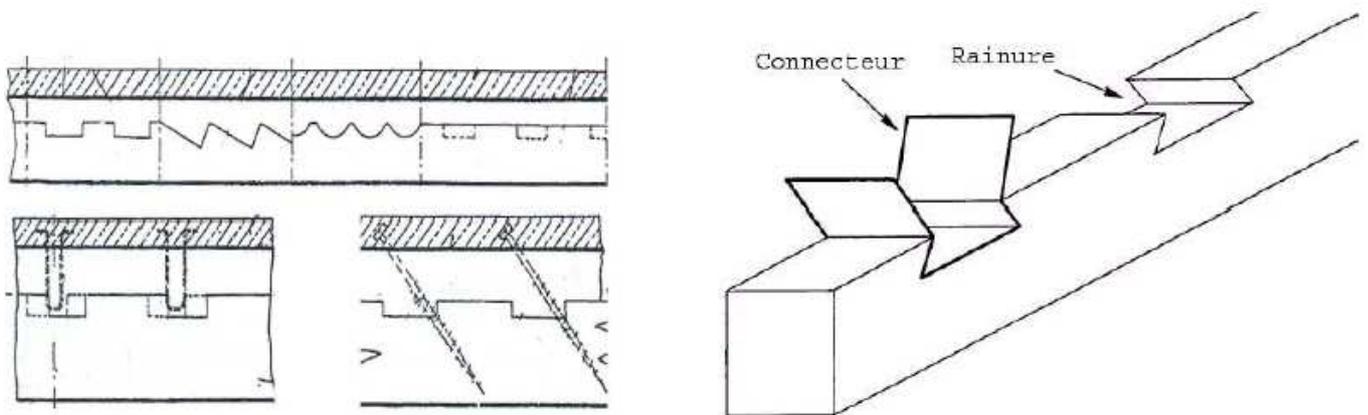


Figure 5 - Brevet d'invention de Schaub et de Martino

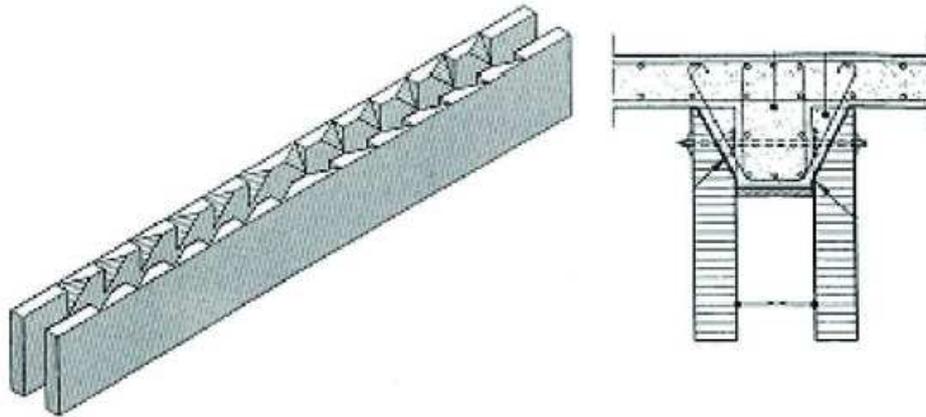


Figure 6 - Brevet d'invention de Deperraz

Un autre modèle de connexion est présenté dans le brevet de Molard, où le bois se compose de lattes assemblées entre elles par clouage ou collage de manière à ce que certaines lattes soient saillantes pour la création des rainures longitudinales. De plus, des connecteurs tels que les tasseaux en bois ou des cornières sont disposés transversalement pour l'accrochage du béton sur la surface du bois [Molard D et al, 1998]. Cela permet aussi de rigidifier l'ensemble de la structure au cours de la manipulation en atelier et du transport (Figure 7).

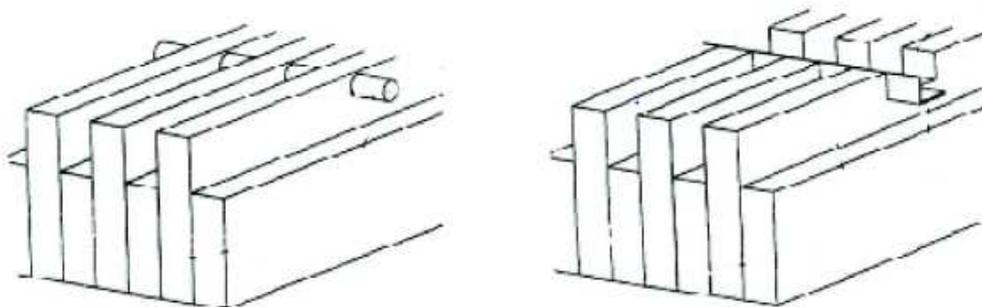


Figure 7 - Brevet d'invention de Molard

En se basant sur le même principe, le groupe CBS-CBT a présenté une dalle bois-béton dit D-Dalle (Figure 8). Avec cette section, la poutre peut atteindre une portée de 11m à 18m



Figure 8 - Dalle mixte bois béton nommée D-Dalle

I.3.1.2 - Connexions par des pointes, des vis, des goujons

Les éléments en acier sont utilisés pour former des tenons ou des dents qui sont cloués, vissés, ou collés dans le bois et noyés dans le béton. Selon [Ahmadi B.H. and Saka M.P, 1993], des différents types de clous et de vis de grande résistance ont été testés en faisant varier la profondeur de pénétration du connecteur dans le bois selon les gammes 8d, 11d et 15d, avec "d" diamètre des clous et vis (Figure 9). Les essais de cisaillement montrent que la résistance des connecteurs augmente avec la profondeur de pénétration des clous jusqu'à la valeur de 11d pour se stabiliser. La partie linéaire de la courbe force-glissement disparaît quand le glissement atteint la valeur de 0,38mm ; la force correspondante est prise comme la valeur admissible du connecteur. Les essais en flexion montrent une augmentation de 55% de la résistance en flexion et une diminution de la flèche de 230% par rapport à l'essai en flexion sans connexion.

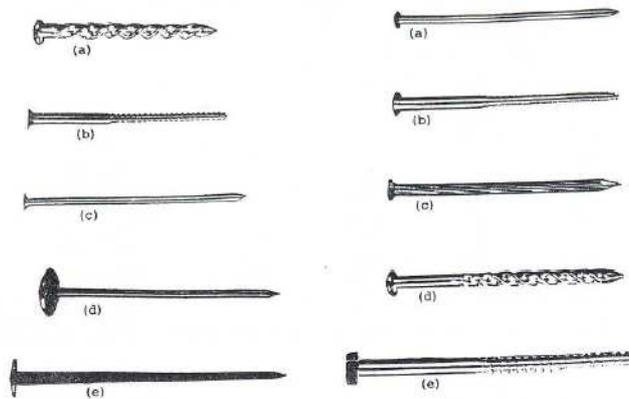


Figure 9 - Clous et vis de grandes résistances testées par Ahmadi

I.3.1.3 - Connexions par des crampons

Quant à [Kuttel R et al,1998], ils proposent d'autres types de connecteurs dans leurs brevets d'invention comme le montre la figure 10. Les vis sont utilisées pour fixer au bois la partie du connecteur noyée dans le béton au bois par l'intermédiaire d'une plaque de répartition. La rigidité supplémentaire apportée par cette plaque et l'amélioration de l'ancrage apportée par le nombre de vis conduit à une augmentation de la résistance de la liaison.

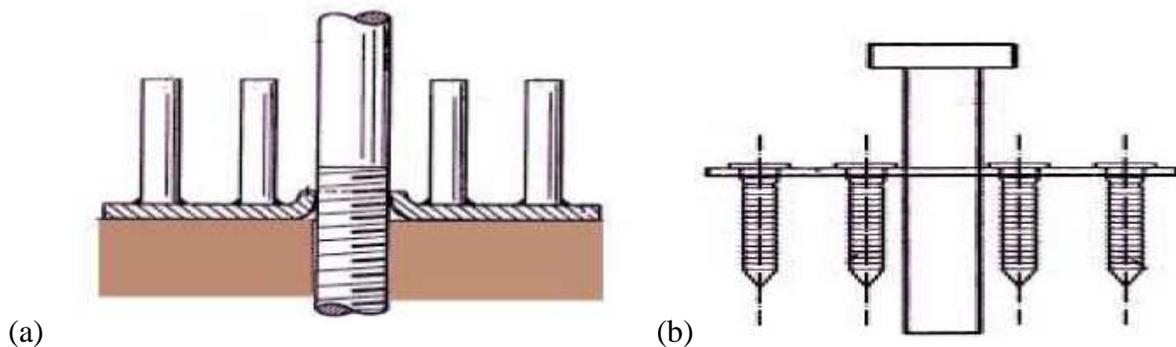


Figure 10 - Brevet d'invention de Trygve et de Kuttel ; (a) [T.Trygve] ; (b) [Kuttel]

D'après [Benitez M.F, 2000] trois connecteurs de type (Figure 11(a)) ont été testé . Il trouve une augmentation d'un facteur 3 de la résistance par rapport aux vis isolées. Cinq connecteurs de type (Figure 11(b)) ont aussi été proposés et testés par [Steinberg E et al, 2003]. La rigidité initiale, la limite du comportement élastique et la charge à la rupture sont comparées. Les clous, les vis, les goujons présentent une facilité d'exécution, et sont bon marché. Ils présentent l'inconvénient d'être assez flexibles, ce qui entraine une diminution de la raideur de la connexion.

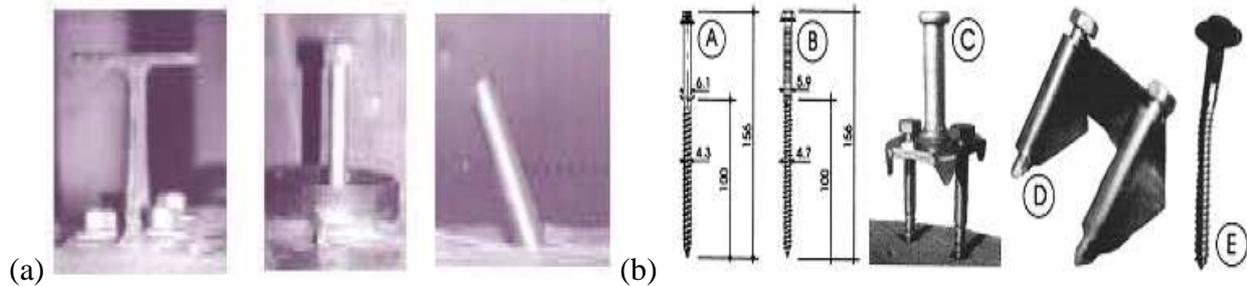


Figure 11 - Connecteurs testés par Benitez et par Steinberg ; (a) [Benitez] ; (b) [Steinberg]

I.3.1.4 - Connexions par des tubes

Les connexions par des clous ou des vis présentent l'inconvénient que leur flexibilité entraine une diminution de la raideur. Plusieurs auteurs de brevets proposent d'utiliser des tubes métalliques à section circulaire pour augmenter la résistance et aussi la rigidité du système de connexion.

Comme le propose [Alain G, 1988] ,un connecteur dont le diamètre du tube est suffisant pour le remplissage du béton, dans la partie supérieure lors du coulage en formant un renforcement de connecteur (Figure 12). Ce type de connecteur possède une grande rigidité et une grande résistance par rapport à des clous et des vis.

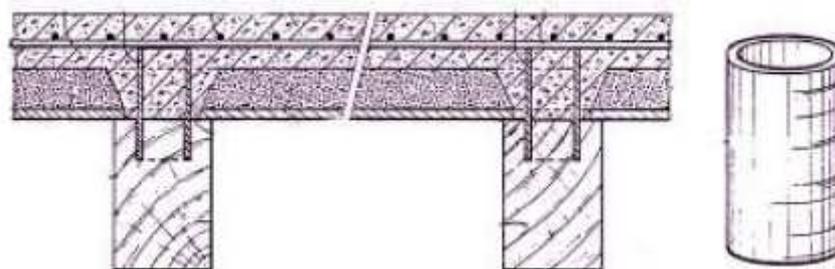


Figure 12 - Brevet d'invention d'Alain

Raymond quant à lui a amélioré la résistance d'arrachement du connecteur dans le béton et aussi dans le bois en changeant la section du tube, [Raymond H.G, 1995]. La partie implantée dans le bois est collée au moyen d'une résine et l'autre partie noyée dans le béton, est reliée à la précédente

par une partie intermédiaire. Les trois parties sont étudiées pour obtenir une bonne résistance à l'arrachement du connecteur dans le bois ou dans le béton. La partie intermédiaire peut se déformer pour autoriser un glissement relatif entre le bois et le béton, ce qui évite une rupture fragile de la structure en cas de surcharge (Figure 13(a)). Pour améliorer la ductilité de la structure, Welch a proposé un connecteur qui permet un glissement relatif entre le bois et le béton grâce à la réalisation d'une fente sur les cylindres creux, (Figure 13(b)).

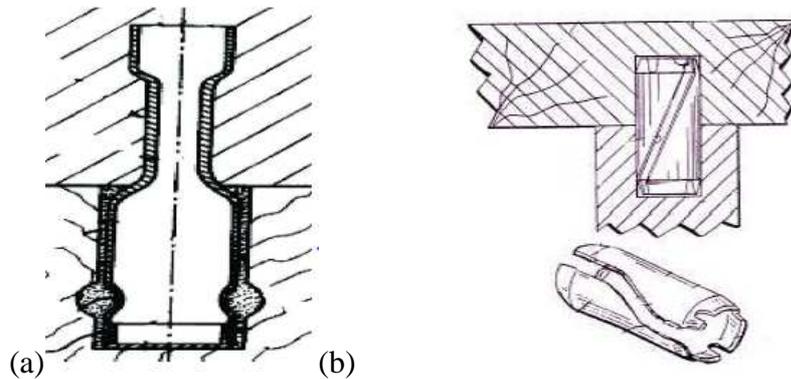


Figure 13 - Brevet d'invention de Raymond et de Welch ; (a)[Raymond] ; (b) [Welch]

I.3.2 - Connexions par cisaillement surfacique du bois

I.3.2.1 - Connexions par collage

Nous avons vu que la connexion bois-béton peut être effectuée par des moyens mécaniques tels que ceux présentés ci-dessus. Il existe cependant aussi une technique par collage pour associer le béton et le bois. Les résultats montrent un comportement rigide parfait de l'association bois-béton, c'est à dire sans glissement. Selon les auteurs, le collage évite aussi d'avoir des zones de concentration de contrainte que l'on retrouve avec une connexion mécanique. La figure 14 présente successivement les sollicitations de traction-compression, de cisaillement, de pelage et de clivage du joint collé. En fonction de la sollicitation à laquelle est soumis le joint de colle, la distribution des contraintes dans le plan moyen du joint est différente.

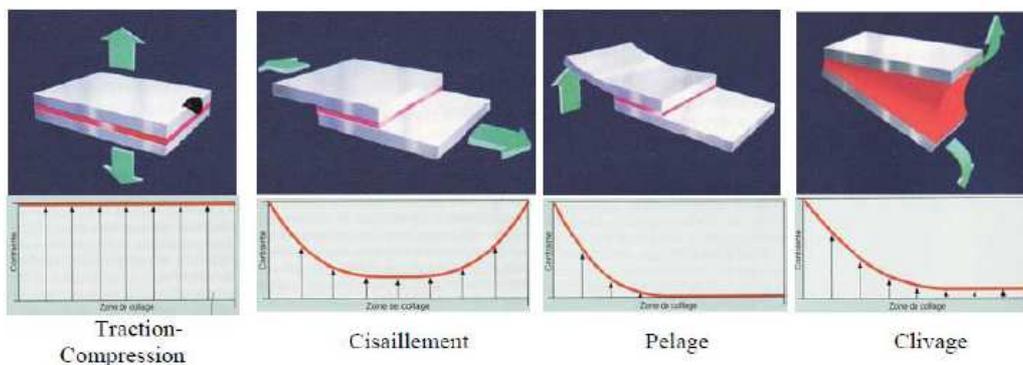


Figure 14 - Les différents modes de sollicitation d'un joint de colle, [Creac hcadec 2008]

La figure 15 présente les différents types de rupture que l'on peut observer dans un joint de colle. La rupture est dite cohésive lorsqu'elle a lieu dans le joint de colle, elle est dite adhésive lorsqu'elle a lieu au niveau de l'interface substrat-adhésif, elle est adhésive-mixte lorsqu'elle intervient sur chacune des interfaces.

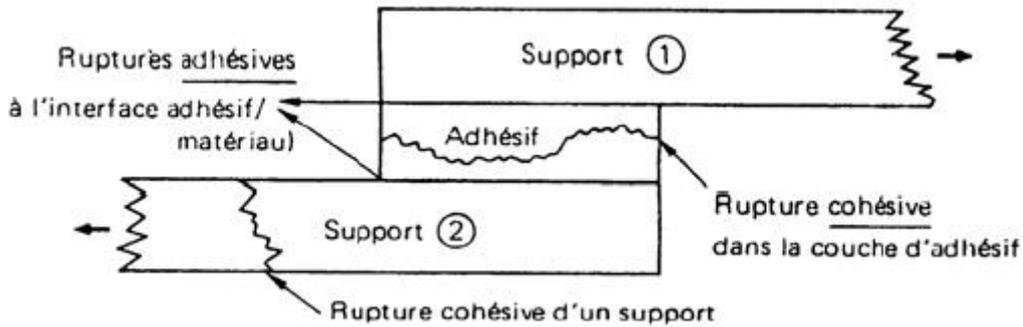


Figure 15 - Les différents modes de rupture d'un joint de colle, d'après [Creac hcadec 2008]

I.4 - Les Matériaux

I.4.1 - Le bois

Le bois, considéré en premier approche comme un empilement de couches cylindriques toutes identiques à elles-mêmes. Il est généralement considéré comme un matériau orthotrope homogène. Trois directions d'orthotropie s'imposent : L est la direction longitudinale, R la direction radiale et T la direction tangentielle, [A.BOUCHAÏR, 2006]. Le bois est une ressource naturelle qui est disponible partout dans le monde et il possède plusieurs avantages environnementaux et structuraux. Du côté environnemental, le bois est d'abord un lieu de fixation du dioxyde de carbone à travers un processus biologique de stockage de matière ligno-cellulosique au sein de l'arbre. Pendant la croissance d'un arbre, une tonne du bois absorbe 1,6 tonne de gaz carbonique, émet 1,1 tonne d'oxygène et fixe 0,5 tonne de carbone. En termes d'analyse du cycle de vie (ACV), plusieurs facteurs en faveur du bois ont été constatés :

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

Les Tableaux 2 et 3 montrent quelques valeurs caractéristiques de résistance et module d'élasticité des bois massifs et des bois lamellé-collé, [CTBA 2007]

Tableau 2 - Principales caractéristiques des bois massifs

		Peuplier et résineux					Feuillus		
		C18	C20	C24	C30	C40	D40	D50	D60
$f_{m,k}$	[MPa]	18	20	24	30	40	40	50	60
$f_{t,0,k}$	[MPa]	11	12	14	18	24	24	30	36
$f_{V,k}$	[MPa]	2	2,2	2,5	3	3,8	3,8	4,6	5,3
$E_{0,mean}$	[GPa]	9	9,5	11	12	14	11	14	17

Tableau 3 - Principales caractéristiques des bois lamellé-collé

		Homogène				Panaché		
		GL24H	GL28H	GL32H	GL36H	GL24C	GL28C	GL36C
$f_{m,k}$	[MPa]	24	28	32	36	24	28	36
$f_{t,0,k}$	[MPa]	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	22,5
$f_{V,k}$	[MPa]	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,8
$E_{0,mean}$	[GPa]	11,6	12,6	12,7	14,7	11,6	12,6	14,7

❖ **Influence de l'humidité sur les caractéristiques mécaniques du bois**

Les caractéristiques mécaniques du bois sont très sensibles aux facteurs environnementaux, comme le taux d'humidité, la température, la précipitation, le rayonnement solaire, etc. Le taux d'humidité est le facteur le plus important qui peut créer une influence importante sur la conception structurale du bois. Il faut savoir que la variation de niveau du taux d'humidité peut être importante au sein des structures en bois. Par exemple, pour un pont en bois, le taux d'humidité peut être autour de « Point de Saturation des Fibres » PSF pendant plusieurs années. Par contre, le bois utilisé en construction fermée a généralement un taux d'humidité compris entre 8 et 15%, [Sébastien FUENTES 2008].

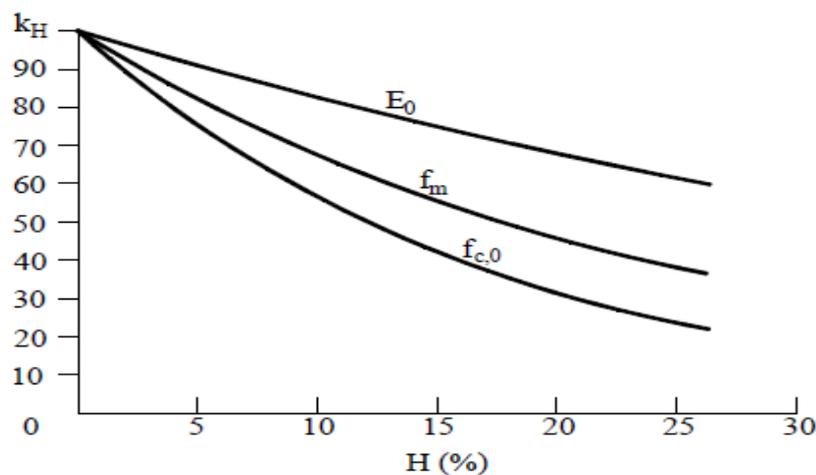


Figure 16 - Évolution des caractéristiques mécaniques en fonction du taux d'humidité

❖ **Module d'élasticité en compression**

Le module d'élasticité en compression parallèle aux fibres (E_0) présente une variation non linéaire par rapport au taux d'humidité entre 4 et 24%. Dans la direction transversale, le module E_{90} est inversement proportionnel au taux d'humidité jusqu'à 4%

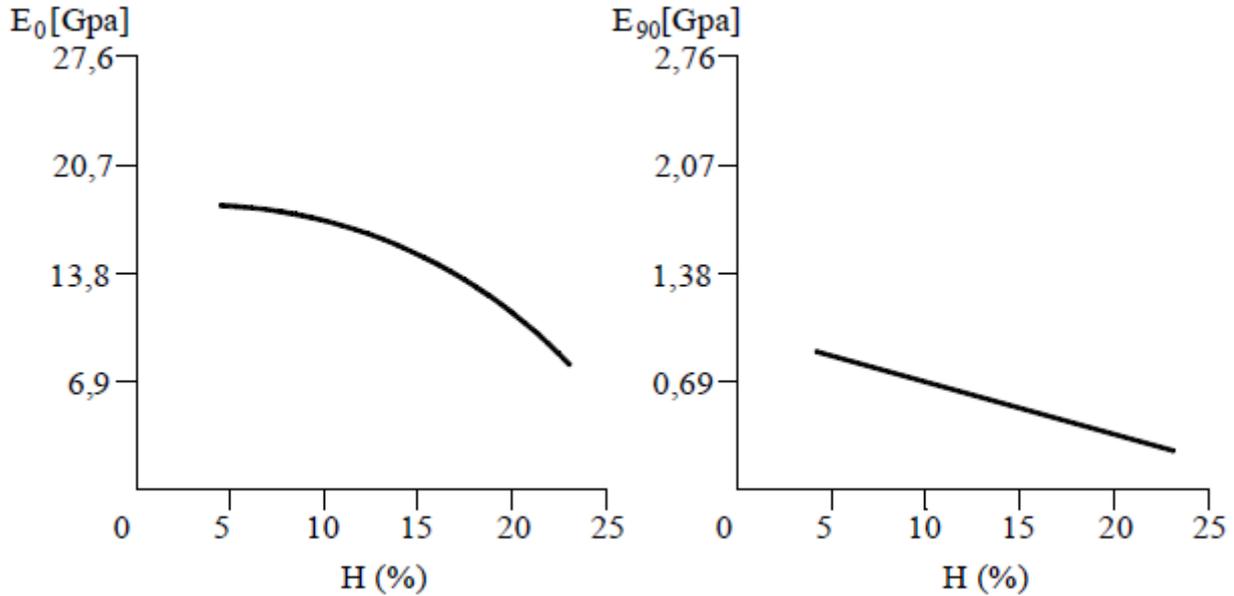


Figure 17 - Variation du module d'élasticité

❖ **Résistance en compression**

Quelle que soit la direction de sollicitation, la résistance en compression du bois présente une variation inversement proportionnelle au taux d'humidité.

I.4.2 - Le béton

Les propriétés de résistance du béton dépendent principalement des types de matériaux utilisés (ciment, granulats, additives), rapport eau/ciment et des conditions de cure, le tableau 4 montre les principales caractéristiques des bétons de masse volumique normal selon l'Eurocode 2.

Tableau 4 - Principales caractéristiques du béton

Caractéristiques		C16	C20	C25	C30	C35	C40	C45
f_{ck}	[MPa]	16	20	25	30	35	40	45
f_{ctm}	[MPa]	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8
E_{cm}	[GPa]	29	30	31	33	34	35	36

❖ Le fluage

Le fluage du béton dépend de l'humidité ambiante, des dimensions de l'élément et de la composition du béton. Il dépend également de la maturité du béton lors du premier chargement ainsi que de la durée et de l'intensité de la charge. La Figure 18 permet d'obtenir le coefficient de fluage du béton dans le cas où une grande précision n'est pas requise et sous réserve que le béton ne soit pas soumis à une contrainte de compression supérieure à $0,45 f_{ck}(t_0)$ à un âge t_0 , âge du béton au moment du chargement.

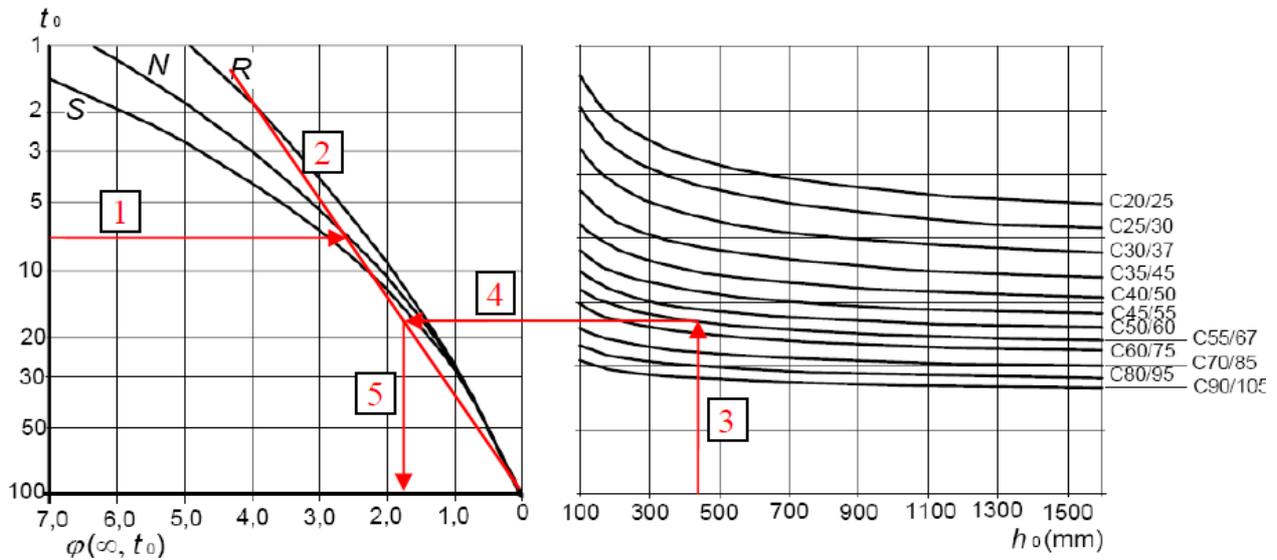


Figure 18 - Détermination du coefficient de fluage $f(\infty, t_0)$ pour le béton dans un environnement intérieur (RH = 50%)

**Partie II « Méthodes d'analyses des structures Mixtes
Bois-Béton »**

II. MÉTHODES D'ANALYSES DES STRUCTURES MIXTES BOIS BÉTON

Lorsqu'on a une section mixte avec une connexion rigide, le calcul se fait en considérant qu'il n'existe pas de glissement relatif entre les matériaux. Dans ce cas, il consiste seulement en l'application de la méthode de la section homogénéisée. Dans celle-ci la section en béton est transformée en une section en bois équivalente, et l'axe neutre est unique et placé sur la position originelle figure 19

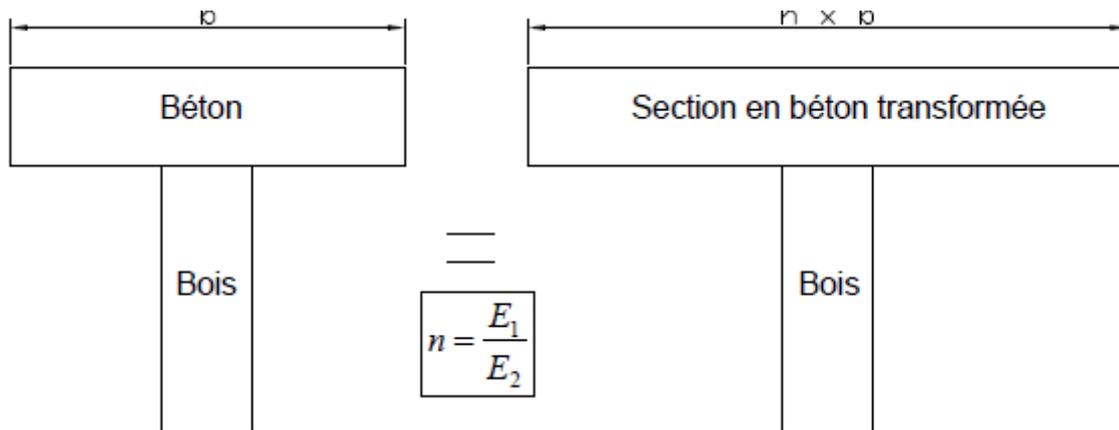


Figure 19 - Méthodes de section homogénéisée

Pour les dalles mixtes, avec des connexions semi-rigides, le comportement est différent, parce que la théorie de Navier-Bernoulli n'est pas valide pour la section dans son ensemble. Aujourd'hui, pour le calcul des planchers mixtes bois-béton, on considère habituellement les planchers comme des poutres en « T » associant de manière semi-rigide les poutres à une table de compression efficace.

Il existe différents moyens pour calculer les efforts et les déplacements pour une poutre mixte à connexion semi-rigide. On peut diviser le problème en deux grands groupes :

- Les analyses élastiques
- Les analyses non-linéaires

En même temps on peut appliquer pour la résolution, des méthodes analytiques ou méthodes numériques.

En termes de méthodes analytiques élastiques, on a deux possibilités :

- Application directe de la théorie de l'élasticité : On peut trouver les efforts et les déplacements au moyen de la résolution d'un système des équations différentielles, à coefficients constants, sur la base des hypothèses de la théorie de l'élasticité.
- Méthode approchées : On peut résoudre le problème sous les mêmes hypothèses de la théorie de l'élasticité, mais en utilisant quelques simplifications. Un exemple est la méthode de l'annexe B de l'Eurocode 5. Ces méthodes conduisent à des expressions plus simples et plus faciles à appliquer dans la démarche courante du génie civil.

Pour la résolution dans le domaine élastique on peut appliquer aussi des méthodes numériques, comme la méthode de différences finies ou la méthode des éléments finis. Actuellement, différents travaux intègrent des modèles numériques complexes pour la résolution des poutres mixtes, en considérant les non- linéarités géométriques et mécaniques de la structure et des autres phénomènes associés à l'interaction des matériaux.

La figure 20, présente une classification des méthodes disponibles aujourd'hui pour l'analyse de ce problème.

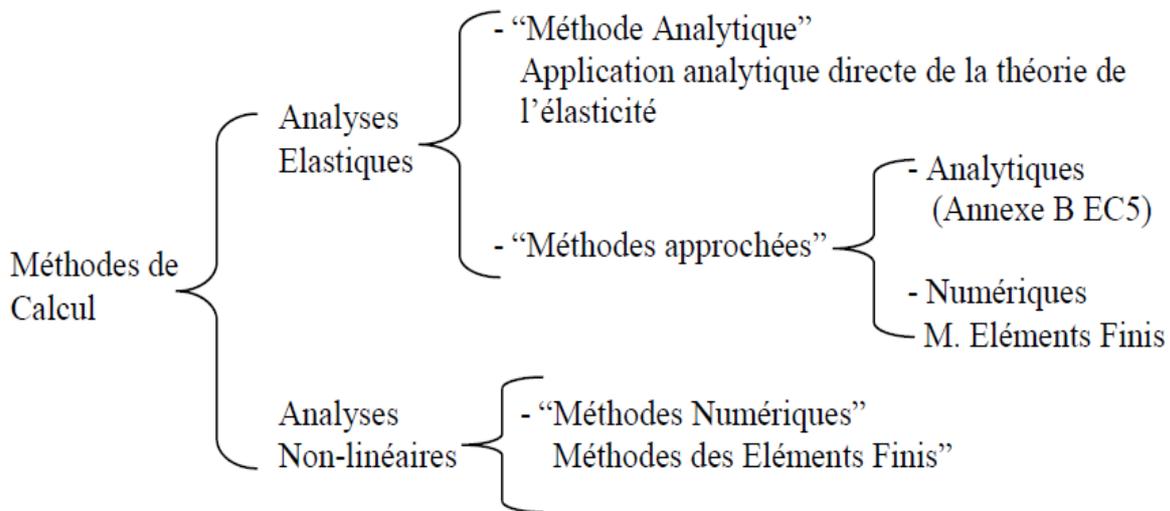


Figure 20 - Méthodes d'analyses des poutres mixtes bois-Béton

II.1 - Méthodes Élastiques

II.1.1 - Méthode Analytique

Cette méthode correspond à l'application directe de la théorie de l'élasticité. Par le moyen de la théorie basée sur les équations d'équilibre, on peut déterminer les contraintes, les déplacements et les sollicitations, [Cvetković R and Stojić D 2003]. Les hypothèses de base sont les suivantes :

- Les déplacements liés à la flexion sont petits et la théorie des petits déplacements est valide ;
- L'hypothèse de Bernoulli-Navier n'est pas valide pour la section composite, mais est valide pour les deux sections individuellement ;
- Les déplacements liés au cisaillement sont négligeables en chaque éléments ;
- Le bois et le béton sont tous les deux des matériaux élastiques isotropes, et la loi de Hooke est valide ;
- La loi constructive des organes de connexion est considérée élastique et linéaire. La connexion est considérée comme continue sur toute la longueur de la poutre.

Pour cette méthode, on a considéré un cas simple d'une poutre mixte bois-béton simplement appuyée avec un chargement vertical distribue q , (Figure 21). On connaît, alors les caractéristiques

géométriques et mécaniques des matériaux, les conditions limites et le chargement. De cette façon, si les principes de l'équilibre statique et de la compatibilité de déplacement sont appliqués à un tronçon de poutre (Figure 21 d), on trouve l'équation différentielle E.2.1 (à coefficients constants) qui gouverne le phénomène, en fonction du déplacement w .

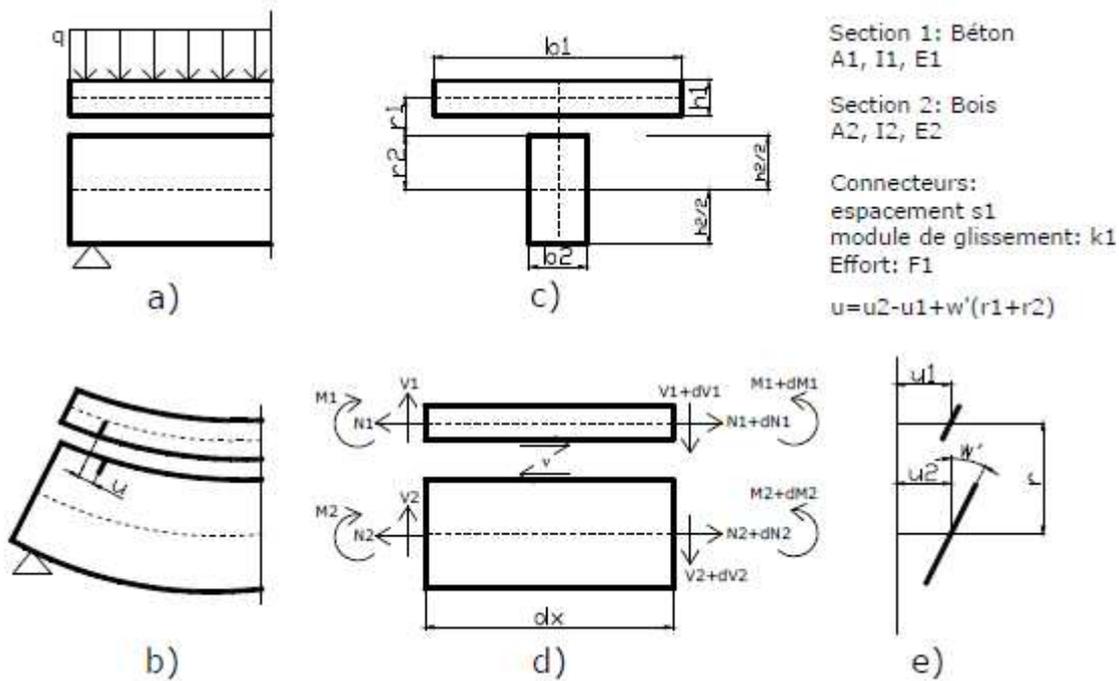


Figure 21 - Système poutre mixte, section, déformations

On a :

$$w'''' - a^2 w'' = -\frac{M''}{(EI)_0} + a^2 \frac{M}{(EI)_\infty} \quad E.2.1$$

Avec

$$a^2 = k \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} + \frac{1}{(EI)_0} \right) \quad E.2.2$$

$$(EI)_0 = E_1 A_1 + E_2 A_2 \quad E.2.3$$

$$(EI)_\infty = (EI)_0 + \frac{E_1 A_1 E_2 A_2}{E_1 A_1 + E_2 A_2} r^2 \quad E.2.4$$

La connaissance de la solution de l'équation E.2.1 en termes de w , pour les conditions limites spécifiques, permet de calculer les sollicitations dans la poutre mixte avec les expressions suivantes :

$$M = \frac{(EI)_{\infty}}{\alpha^2} w'''' - (EI)_{\infty} w'' - \frac{(EI)_{\infty} q}{\alpha^2 (EI)_0} \quad E.2.5$$

$$V = \frac{(EI)_{\infty}}{\alpha^2} w''''' - (EI)_{\infty} w''' - \frac{(EI)_{\infty} q'}{\alpha^2 (EI)_0} \quad E.2.6$$

$$N_1 = - \frac{M + (EI)_0 w''}{r} \quad E.2.7$$

$$N_2 = - \frac{M + (EI)_0 w''}{r} \quad E.2.8$$

$$v = \frac{V + (EI)_0 w'''}{r} \quad E.2.9$$

$$M_1 = -E_1 I_1 w'' \quad E.2.10$$

$$M_2 = -E_2 I_2 w'' \quad E.2.11$$

$$V_1 = M'_1 + v r_1 \quad E.2.12$$

$$V_2 = M'_2 + v r_2 \quad E.2.13$$

Connaissant les sollicitations, il est possible de déterminer les contraintes normales, où z est la distance entre le centre de l'élément considéré et la fibre dans laquelle on veut déterminer les contraintes :

$$\sigma_1(x, y) = \frac{M_1(x)}{I_1} z + \frac{N_1(x)}{A_1} \quad E.2.14$$

$$\sigma_2(x, y) = \frac{M_2(x)}{I_2} z + \frac{N_2(x)}{A_2} \quad E.2.15$$

On peut écrire :

$$\tau_1(x, y) = \frac{V_1 S^*_1}{b_1 I_1} + \frac{v}{b_1} \left(\frac{A^*_1}{A_1} - \frac{S^*_1}{I_1} r_1 \right) \quad E.2.16$$

$$\tau_2(x, y) = \frac{V_2 S^*_2}{b_2 I_2} + \frac{v}{b_2} \left(\frac{A^*_2}{A_2} - \frac{S^*_2}{I_2} r_2 \right) \quad E.2.17$$

II.1.2 - Méthode Analytique approchée

II.1.2.1 - Conception général

Pour cette méthode, les hypothèses considérées sont les mêmes que pour l'application de la théorie de l'élasticité. On a normalement une connexion discrète et non une connexion continue considérée pour l'application directe de la théorie de l'élasticité. Pour cette raison, la méthode approchée considère un module de glissement équivalent ou module de glissement homogénéisé pour vérifier la dernière hypothèse de la méthode appliquée à la théorie de l'élasticité. Cette grandeur, qui est une

valeur de raideur par unité de longueur, permet de simplifier les expressions développées dans le paragraphe précédent. Pour un connecteur K, on a un module de glissement égale à :

$$K = \frac{F_s}{u} \quad E.2.18$$

Le flux de cisaillement « v », qui apparaît à l'interface des deux matériaux est égal à

$$v = \frac{F_s}{s} \quad E.2.19$$

Où, s est l'espace entre les connecteurs. Si on remplace l'équation E.2.18 dans l'équation E.2.19, on peut écrire :

$$v = ku \quad E.2.20$$

$$k = \frac{K}{s} \quad E.2.21$$

Où, k est le module de glissement homogénéisé de la connexion. En outre la théorie de l'élasticité on peut écrire :

$$N_1 = E_1 A_1 u_1' \quad E.2.22$$

$$N_2 = E_2 A_2 u_2' \quad E.2.23$$

$$M_1 = -E_1 I_1 w'' \quad E.2.24$$

$$M_2 = -E_2 I_2 w'' \quad E.2.25$$

$$V_1 = -E_1 I_1 w''' \quad E.2.26$$

$$V_2 = -E_2 I_2 w''' \quad E.2.27$$

$$v = ku = k(u_2 - u_1 + w'r) = k(u_2 - u_1 + w'(r_1 - r_2)) \quad E.2.28$$

En vue de trouver l'équilibre du système composé, nous avons établis :

$$N_1' + v = 0 \quad E.2.29$$

$$-N_2' + v = 0 \quad E.2.30$$

$$M_1' = V_1 + vr_1 \quad E.2.31$$

$$M_2' = V_2 + vr_2 \quad E.2.32$$

$$V_1' + V_2' = -q = V' \quad E.2.33$$

Où q est un chargement générique appliqué à la poutre. Si on dérive les expressions E.2.31 et E.2.32 sur la longueur et on fait la somme avec l'expression E.2.33 on peut écrire.

$$M_1'' + M_2'' + v'r + q = 0 \quad E.2.34$$

En appliquant l'expression E.2.31 dans E.2.28 on a un système d'équations différentielles.

$$E_1 A_1 u_1'' + k(u_2 - u_1 + w'r) = 0 \quad E.2.35$$

$$E_2 A_2 u_2'' + k(u_2 - u_1 + w'r) = 0 \quad E.2.36$$

$$(E_1 A_1 + E_2 A_2) w'''' - k(u_2' - u_1' + w''r) = q \quad E.2.37$$

Ce système correspond aux équations E.2.29, E.2.30 et E.2.34 formulées en fonction des déplacements u_1 , u_2 et w . La résolution de ce système d'équations différentielles, représente la solution du problème.

II.1.2.2 - Méthode approchée de l'Eurocode 5

Le calcul des poutres mixtes bois-béton est réglé par l'annexe B de l'Eurocode 5. Avec cette application, on peut déterminer la rigidité en flexion des poutres mixtes, les contraintes dans les deux matériaux et les efforts dans la connexion. Pour analyser le comportement à long terme, il faut considérer les coefficients de fluage de chaque matériau.

La méthode de l'Eurocode 5, dérivé de l'application de la méthode approchée montrée dans le paragraphe précédent, en considérant les hypothèses suivantes, [EC5-1-1 1999]:

- Les planchers sont considérés comme des poutres en « T » qui reposent sur appuis simples avec une portée l voir Figure 22,
- Pour les poutres continues les équations peuvent être utilisées avec l égale à 80% de la portée à considérer et pour les poutres en porte-à-faux avec l égal à deux fois la longueur du porte-à-faux,
- Les composantes sont assemblées entre eux par des organes mécaniques, avec un module de glissement par organe égale à K ,
- L'espacement entre les organes d'assemblages est constant ou varie uniformément en fonction de l'effort de cisaillement entre S_{min} et S_{max} avec $S_{max} = 4S_{min}$,

Le chargement est appliqué dans la direction verticale avec un moment $M = M(x)$ qui varie sinusoidalement ou parabolique et avec un effort tranchant $V = V(x)$

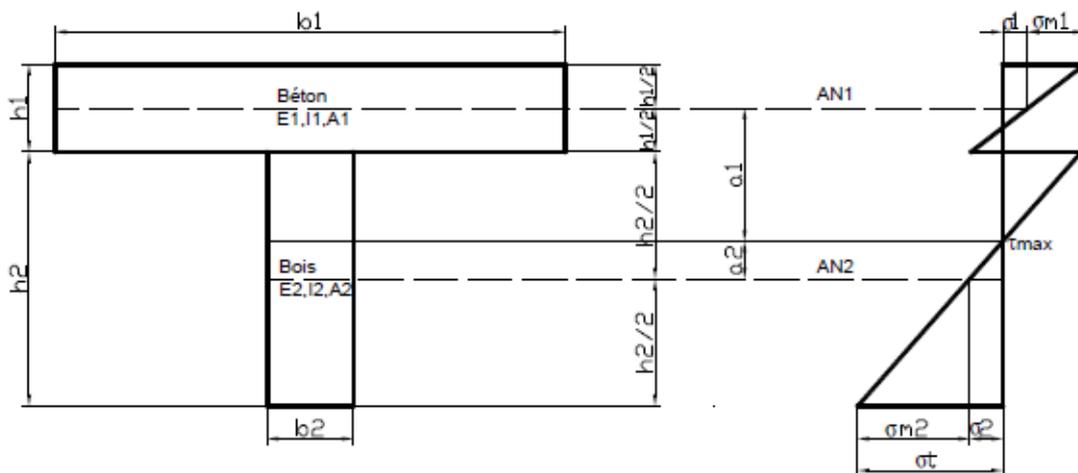


Figure 22 - Géométrie de la section composées et distribution des contraintes

Le module de glissement k peut être obtenu à partir des essais selon la norme EN 26891 « Structures en Bois – Assemblages réalisés avec des éléments mécaniques de fixation – Principes généraux pour la détermination des caractéristiques de résistance et de déformation ». L’Eurocode 5 aussi propose des formules pour obtenir la valeur du module k par organe d’assemblage à partir de la masse volumique du bois en kg/m^3 et le diamètre d en mm du connecteur, tableau 5.

Tableau 5 - Valeur de K_{ser} , [EC5-1-1 1999]

Type d'organe d'assemblage	k_{ser} [N/mm]
Broches	$\rho_m^{1.5} \frac{d}{23}$
Boulons sans jeu	
Tire-fonds	
Pointes (avec avant-trous)	
Pointes (sans avant-trous)	$\rho_m^{1.5} \frac{d^{0.8}}{30}$

Pour montrer la démarche pour l’obtention des expressions de l’annexe B de l’Eurocode 5, on a travaillé avec un exemple simple : une poutre simplement appuyée avec une charge de distribution sinusoïdale (figure 23). La simplicité de l’analyse est donnée pour la facilité d’intégration avec ce type de chargement et par ces conditions aux limites.

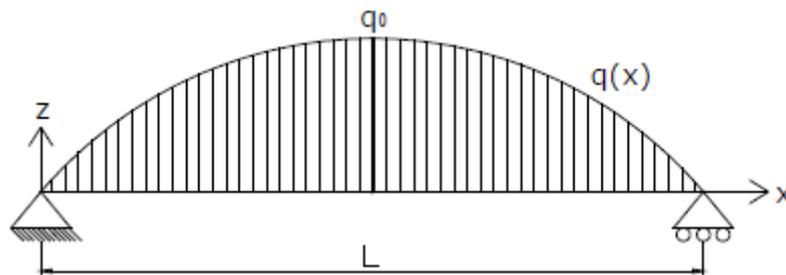


Figure 23 - Poutre simplement appuyée avec un chargement sinusoïdale

$$q = q_0 \sin\left(\frac{\pi}{l} x\right) \tag{E.2.38}$$

Par la résolution du système d’équations donné par les expressions précédentes en considérant le chargement q donné par E.2.38 on arrive à :

$$u_1 = u_{10} \cos\left(\frac{\pi}{l} x\right) \tag{E.2.39}$$

$$u_2 = u_{20} \cos\left(\frac{\pi}{l} x\right) \tag{E.2.40}$$

$$w = w_0 \sin\left(\frac{\pi}{l} x\right) \tag{E.2.41}$$

En remplaçant ces équations dans les équations E.2.35, E.2.36 et E.2.37, on peut le récrire en termes de u_{10} , u_{20} et w_0 comme constantes. La résolution de ce système a pour résultat la détermination des contraintes barycentriques maximales de la partie béton σ_1 et de la partie bois σ_2 . Finalement on obtient la distribution de contraintes à partir de la valeur du module de glissement k . on définit γ_1 et γ_2 selon la formule suivante :

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \pi^2 \frac{E_1 A_1 S_X}{k l^2}} \quad E.2.42$$

$$\gamma_2 = 1 \quad E.2.43$$

On définit aussi la valeur a_2 comme la distance entre l'axe neutre de la section T considéré et l'axe neutre d'élément qui travaille en traction selon l'équation suivante ;

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2)}{2(\gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_2 E_2 A_2)} \quad E.2.44$$

De la même façon, on définit la valeur a_1 comme la distance entre l'axe neutre de la section T et l'axe neutre d'élément comprimé selon l'expression suivante :

$$a_1 = H - \frac{h_2}{2} - a_2 - \frac{h_1}{2} \quad E.2.45$$

Avec ces valeurs on peut déterminer la rigidité efficace en flexion donnée par :

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^2 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad E.2.46$$

De là nous définissons les contraintes normales dans le béton et le bois selon les équations :

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i E_i M}{(EI)_{ef}} \quad E.2.47$$

La contrainte de cisaillement sur le bois, lorsque les contraintes normales sont nulles, est donnée par :

$$\tau_{max} = \frac{0,5 E_2 b_2 h_2^2}{b_2 (EI)_{ef}} V \quad E.2.48$$

Effort dans la connexion est donné par l'expression :

$$F_i = \frac{\gamma_i E_i A_i a_i S_i}{(EI)_{ef}} V \quad E.2.49$$

La flèche maximale est évaluée par :

$$w = \frac{5ql^4}{384(EI)_{ef}} \quad E.2.50$$

Le calcul à long terme est le même que pour la vérification à court terme, à cette différence près que l'on remplace les modules d'élasticité du bois et du béton par des modules d'élasticité finaux prenant en compte le fluage des deux matériaux dans le temps. Ce calcul est donné par les équations suivantes.

Le module de Young final dans un matériau

$$E_{i,Final} = \frac{E_i}{1 + \varphi_{\infty,t0}} \quad E.2.51$$

$$E_{i,Final} = \frac{E_i}{1 + \psi_2 k_{def}} \quad E.2.52$$

Le module de glissement final d'un connecteur

$$K_{ser,Final} = \frac{K_{ser}}{1 + \psi_2 k_{def}} \quad E.2.53$$

Le coefficient ψ_2 est un coefficient pondérateur qui permet de calculer la valeur quasi-permanente de l'action générant la plus grande contrainte eu égard à la résistance.

Afin de bien illustrer la méthode de l'E5, nous avons fait un développement sous Excel présenté en annexe.

Partie III « Développement et résultat de l'outil »

III. Développement et résultat de l'outil

III.1 - Modèle basé sur approche analytique

Ce modèle développé à l'aide du logiciel MATLAB permet de déterminer la charge élastique, la flèche ainsi que l'effort rasant et se limiter à l'étude de poutres isostatiques. Celles-ci peuvent avoir des géométries quelconques (figure 25) et être constituées de différents matériaux.

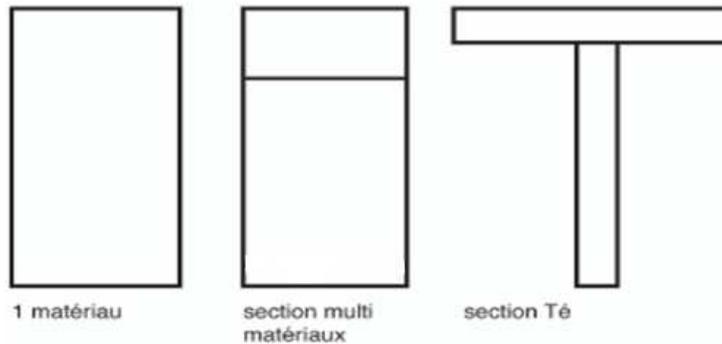


Figure 24 - Types de section qui peuvent être étudiées avec l'outil développé

Les types de chargement traité par l'outil sont les cas représentés sur les figures suivantes.

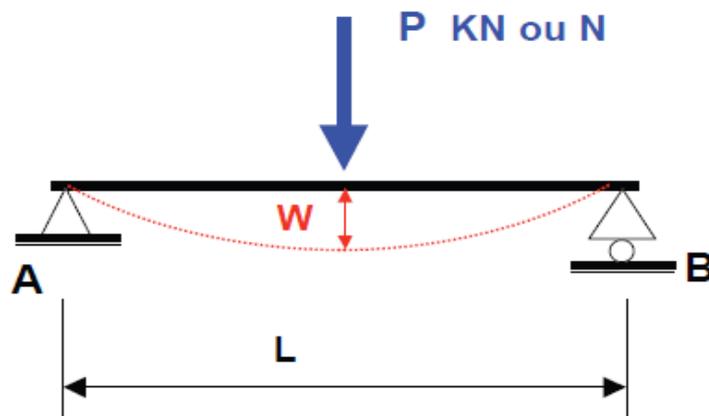


Figure 25 – Flexion à trois points

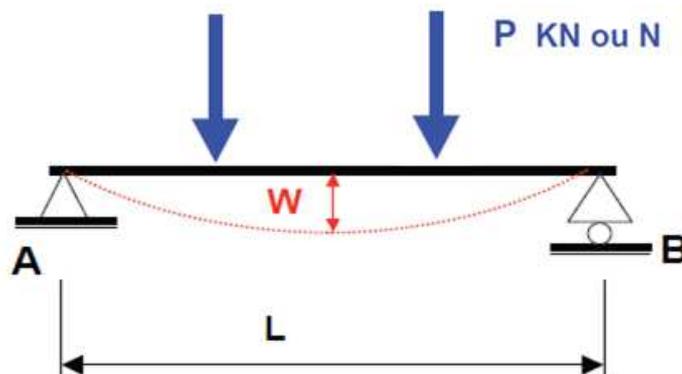


Figure 26 – Flexion à quatre points

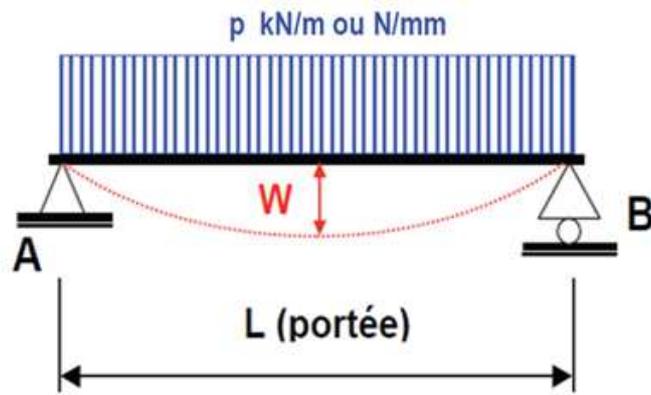


Figure 27 – Chargement répartis

III.1.1 - Hypothèses de calcul

Les calculs sont appliqués à des sections hétérogènes multicouches avec un comportement des matériaux qui sont différents en traction et en compression. L'hypothèse de conservation des sections planes est faite (Bernoulli) et la distribution des contraintes est obtenue à partir des déformations. Aussi, une adhérence parfaite est considérée entre les différents matériaux, on ne considère que la flexion plane.

III.1.2 - Maillage

III.1.2.1 - Maillage dans le plan de la section

La section est constituée de plusieurs zones (notées a à nbzone) correspondant soit à un matériau différent, soit une géométrie différente qui sont, elles-mêmes partagées en couches élémentaires (indice i de 1 à n(a)) de faible épaisseur.

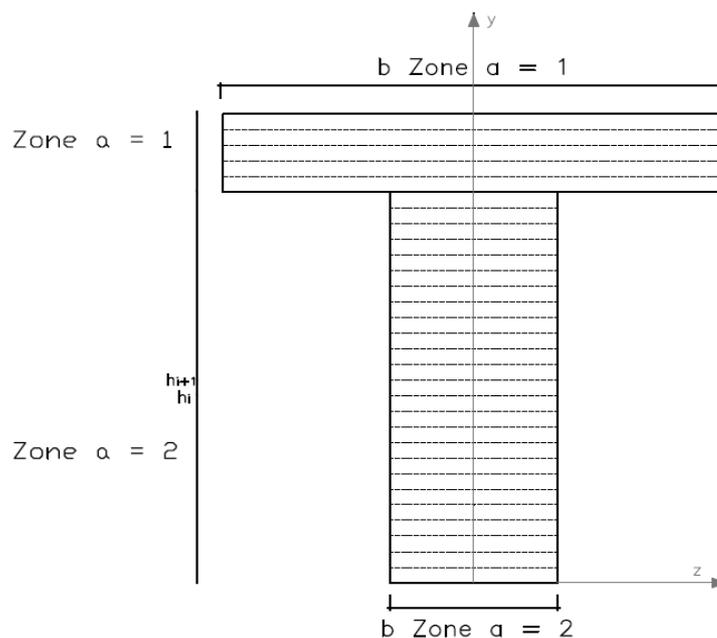


Figure 28 - Maillage de la section : discrétisation verticale

En définitive la section est discrétisée verticalement en n couches d'épaisseur h_i et de largeur b_i . i varie de 1 à n et $\sum_i^n h_i = h_{\text{tot}}$ correspond à la hauteur totale de la section figure 28.

III.1.2.2 - Maillage selon l'axe longitudinal de la poutre

La poutre est découpée longitudinalement en n poutres tronçons k (k appartient à l'intervalle $[1; n$ poutres]), comme présenté sur la figure 29. Chaque tronçon k est limité en amont (selon l'axe d'orientation longitudinal de la poutre) par la section droite k et en aval par la section droite $k + 1$. Notons que nous avons effectué un maillage constant tout le long de la poutre, la longueur de la poutre est notée l et comme montré sur le schéma nous tenons compte de la symétrie du problème (puisque nous étudions qu'une demie poutre). L'indice k varie de 1 ($x(1)$ correspond à l'appui gauche de la poutre) à n poutres ($x(n \text{ poutres})$ correspond à $l/2$ donc k appartient $[1; l/2]$.

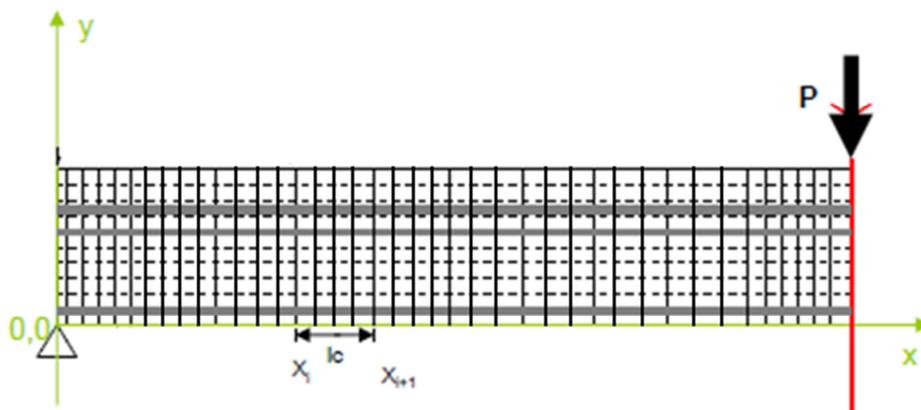


Figure 29 - Maillage de la poutre : discrétisation longitudinale

III.1.3 - Analyse de la section

L'analyse de la section nous permet de trouver :

- L'axe neutre ;
- Les contraintes de traction et de compression développées dans la section ;
- Le moment résistant et la courbure.

Chaque zone est décrite par sa géométrie et ses caractéristiques matérielles :

- Le module de Young E élastique et la déformation limite ϵ_{lim} sont les caractéristiques mécaniques d'un matériau ;
- La largeur b et la hauteur h sont les caractéristiques géométriques d'un matériau.

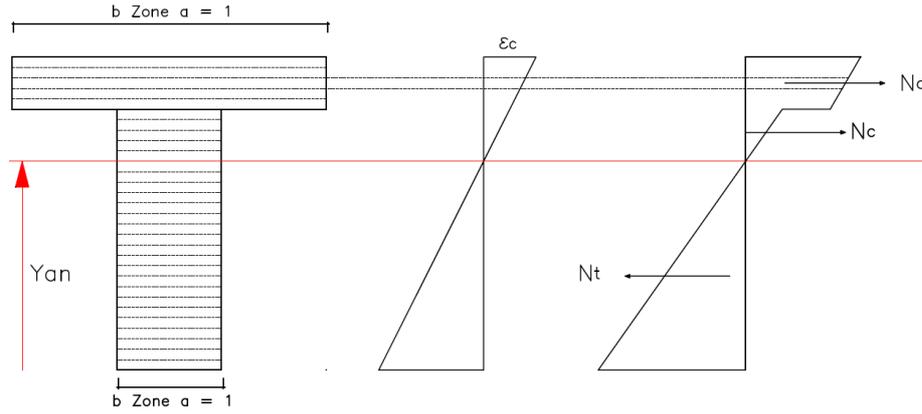


Figure 30 - Comportement d'une section multicouche

En ce qui concerne l'axe neutre Y_{an} , elle est connue quand la section est en équilibre, c'est-à-dire :

$$N_{ctot} = N_{ttot} \quad E.3.15$$

Pour ce faire on a fait varier la déformation de la fibre la plus tendue ϵ_T donnée par E.2.16

$$\epsilon_T = \epsilon_T + \Delta\epsilon_T \quad E.3.16$$

A une position de l'axe neutre, les déformations dans la couche d'altitude y sont évaluées par l'expression suivante

$$\epsilon = \frac{\epsilon_T}{h_{tot} - y_{an}} (y_{an} - y) \quad E.3.17$$

De là l'état de contrainte est déterminé pour chaque couche par

$$\sigma(a, i) = \epsilon(a, i) * E_i \quad E.3.18$$

Les efforts résultants de contraintes peuvent être calculés par l'équation suivante, dans laquelle $bzone$ correspond à la largeur de la couche considérée (constante sur chaque couche).

$$N(a, i) = - \iint \sigma ds = \iint f(\epsilon(y)) dx dy = bzone(a) * \int_{y^i}^{y^{i+1}} f(\epsilon(y)) dy \quad E.3.19$$

On a donc pour une couche élémentaire i d'une zone donnée, l'effort de compression N_c et de N_t traction donnée par :

$$N_c(a, i) = bzone(a) * \frac{(h(a, i) - h(a, i + 1))(\sigma_c(a, i) + \sigma_c(a, i + 1))}{2} \quad E.3.20$$

$$N_{c\,tot} = \sum_{a=1}^{nb\ zone\ n(a)} \sum_{i=1} N_c(a, i) \quad E.3.21$$

$$N_{t\,tot} = \sum_{a=1}^{nb\ zone\ n(a)} \sum_{i=1} N_t(a, i) \quad E.3.22$$

Connaissant la position de l'axe neutre donc un point de la relation moment courbure est donc connu, Figure 30.

$$\tan(\chi) \approx \chi = \frac{\varepsilon_T}{y_{an}} \quad E.3.23$$

$$M_{c\,out} = \left(y_{an} - \frac{h(a, i) + h(a, i + 1)}{2} \right) * N_{c\,out}(a, i) \quad E.3.24$$

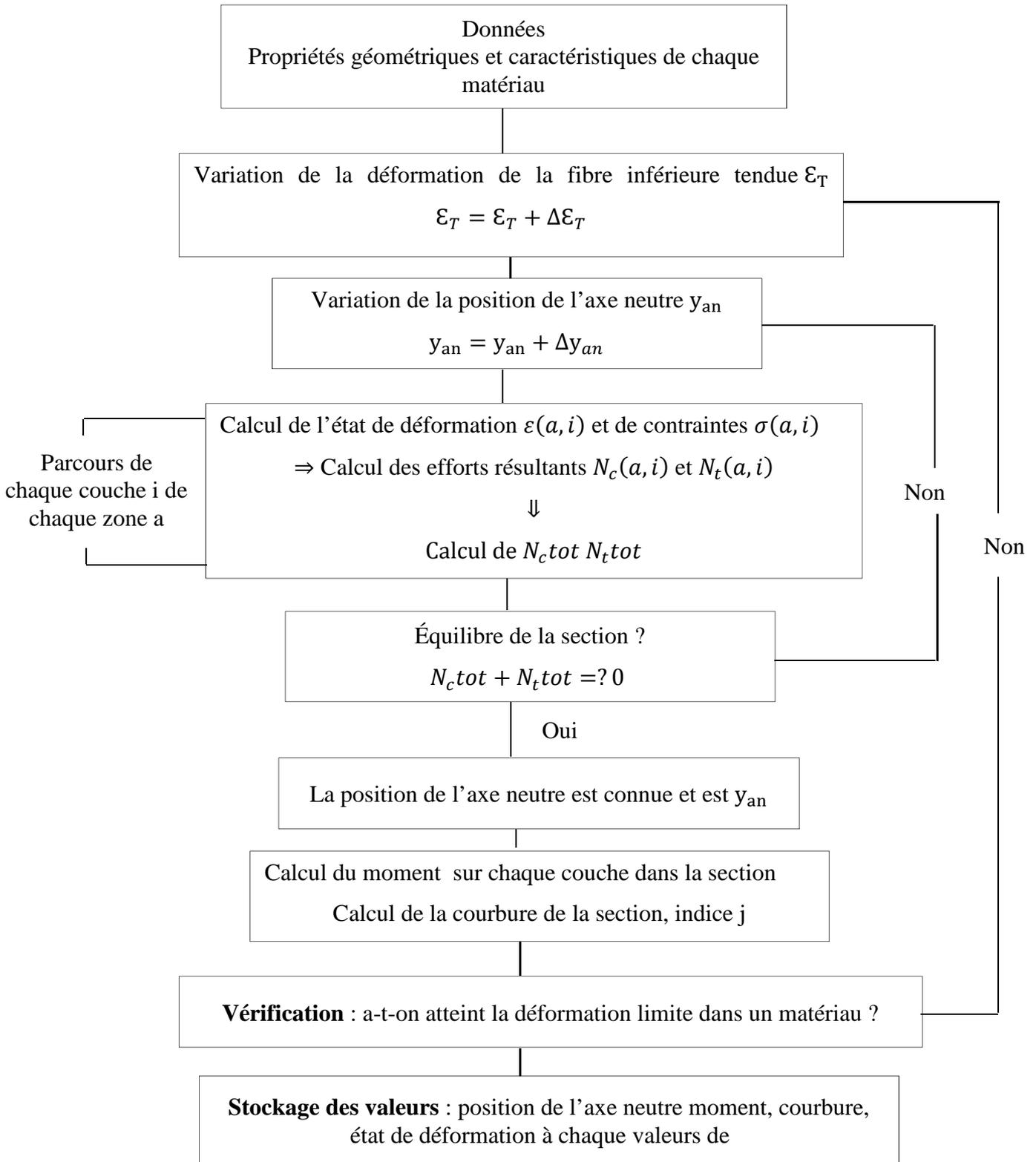


Figure 31 - Organigramme 1 : détermination de la loi moment-courbure d'une section multicouche

III.1.4 – Analyse du comportement de la poutre

A ce stade l’algorithme permet le calcul de poutres multi matériaux en flexion 3 points, isostatiques soumises à un chargement ponctuel.

III.1.4.1 - Détermination de l’effort rasant

La figure suivante nous montre une poutre prismatique de section quelconque soumise à la flexion simple dans le plan (x, y). En isolant dans cette poutre une tranche d’épaisseur dx par deux sections droites infiniment voisines S et S’; dans la section S agissent l’effort tranchant V et le moment fléchissant M ; dans la section S’ agissent l’effort tranchant V+dV et le moment fléchissant M+dM.

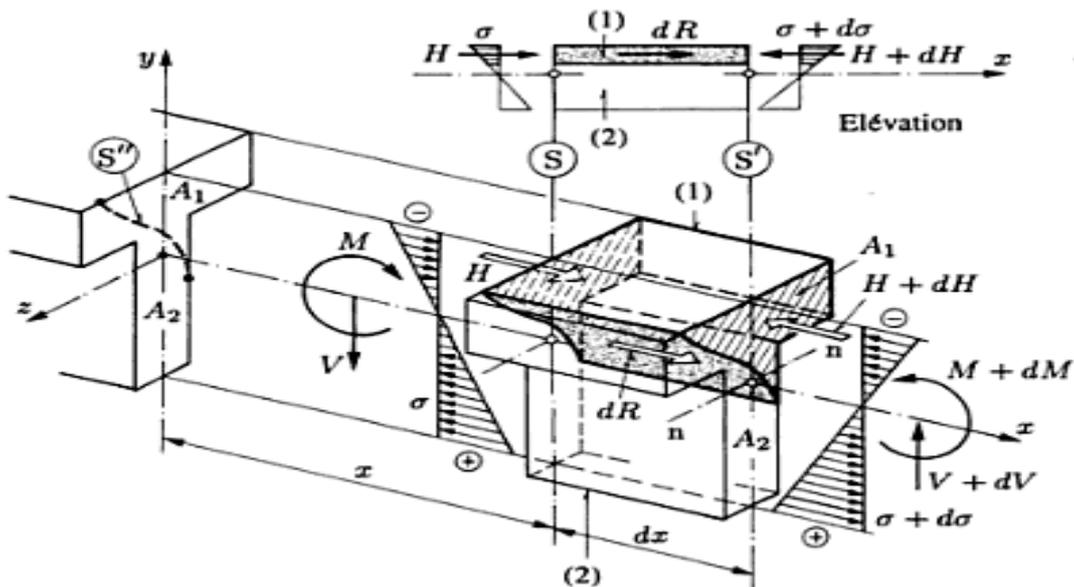


Figure 32 - Effort rasant

Afin d’étudier les contraintes tangentielles longitudinales, on a découpé cette tranche en deux fragments (1) et (2) par une surface de coupe cylindrique S’’ de directrice quelconque, mais dont les génératrices sont parallèles à l’axe de la poutre (Figure 32). Sur les faces d’aires A₁ du fragment(1) agissent des contraintes normales, dues à M et M + dM, dont les résultantes, H et H + dH sont parallèles à x. Sur ces mêmes faces existent également des contraintes tangentielles, dues à V et V + dV, mais leurs résultantes n’interviennent pas dans l’équation d’équilibre $\sum F_x = 0$ utilisé si après. Par réciprocité, il existe aussi des contraintes tangentielles parallèles à x sur la surface de coupe S’’ séparant les fragments (1) et (2). La résultante est noté dR (Figure 32). Cette force s’appelle l’effort rasant; elle est parallèle à l’axe x de la poutre et doit nécessairement apparaître pour assurer l’équilibre du fragment (1), puisque H + dH > H (principe de la coupe).

Dans la section S d’abscisse x, le moment fléchissant M provoque des contraintes de flexion réparties suivant la relation $\sigma = -My/I$.

La résultante des forces élémentaires σdA sur la face verticale gauche de ce fragment est une certaine force d'intensité.

$$H = \int \sigma dA = \frac{M}{I} \int Y dA \text{ (sur } A_1) \tag{E.3.25}$$

L'intégrale intervenant dans cette formule n'est autre que le moment statique, par rapport à l'axe neutre de flexion, de l'aire A_1 de la face verticale limitant le fragment (1). On désigne pour simplifier ce moment statique par S_n ce qui permet d'écrire.

$$H = \frac{M}{I} S \tag{E.3.26}$$

Dans la section S' d'abscisse $x + dx$, le moment fléchissant $M + dM$ produit des contraintes de flexion d'intensité $\sigma + d\sigma = (M + dM)y/I$. La résultante des forces élémentaires $(\sigma + d\sigma)dA$ sur la face verticale du fragment (1) vaut l'intensité.

$$H + dH = \int (\sigma + d\sigma)dA = \frac{M + dM}{I} \int Y dA = \frac{M + dM}{I} S \tag{E.3.27}$$

Le sens des forces H et $H + dH$ étant évident Figure 32, exprimons l'équilibre de translation selon x du fragment (1).

$$\sum F_x = H + dR - H - dH = 0 \quad \rightarrow \quad dR = dH \tag{E.3.28}$$

Étant donné qu'on travaille entre deux section infiniment petites k et $k+1$, à une altitude y donnée. L'effort rasant est donc la différence entre la résultante des efforts de contraintes normales dans chaque section de la portion de la poutre.

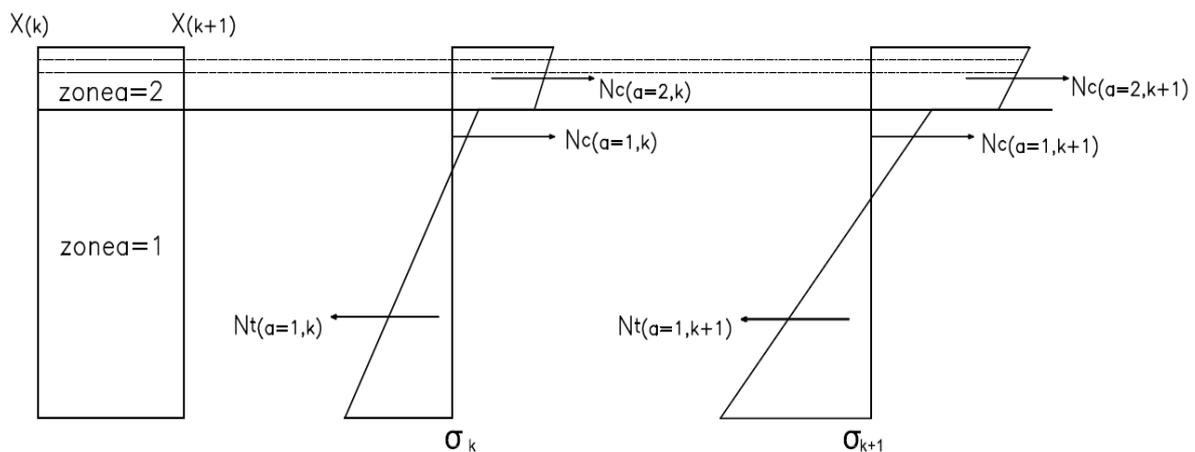


Figure 33 - Etat de contraintes dans un tronçon k

$$Ef_{ras} = N(a, k + 1) - N(a, k) \quad E.3.29$$

La contrainte de cisaillement horizontale, supposée constante est approchée par l'équation E.3.30

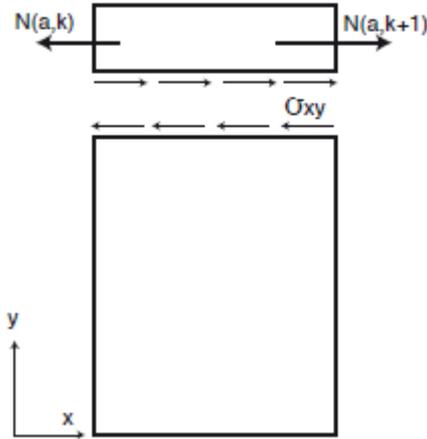


Figure 34 - Calcul de la contrainte de cisaillement ($\tau = \sigma_{xy}$) dans le tronçon k

$$\tau = \sigma_{xy} = \frac{Ef_{ras}}{bzone(a) * (x(k + 1) - x(k))} \quad E.3.30$$

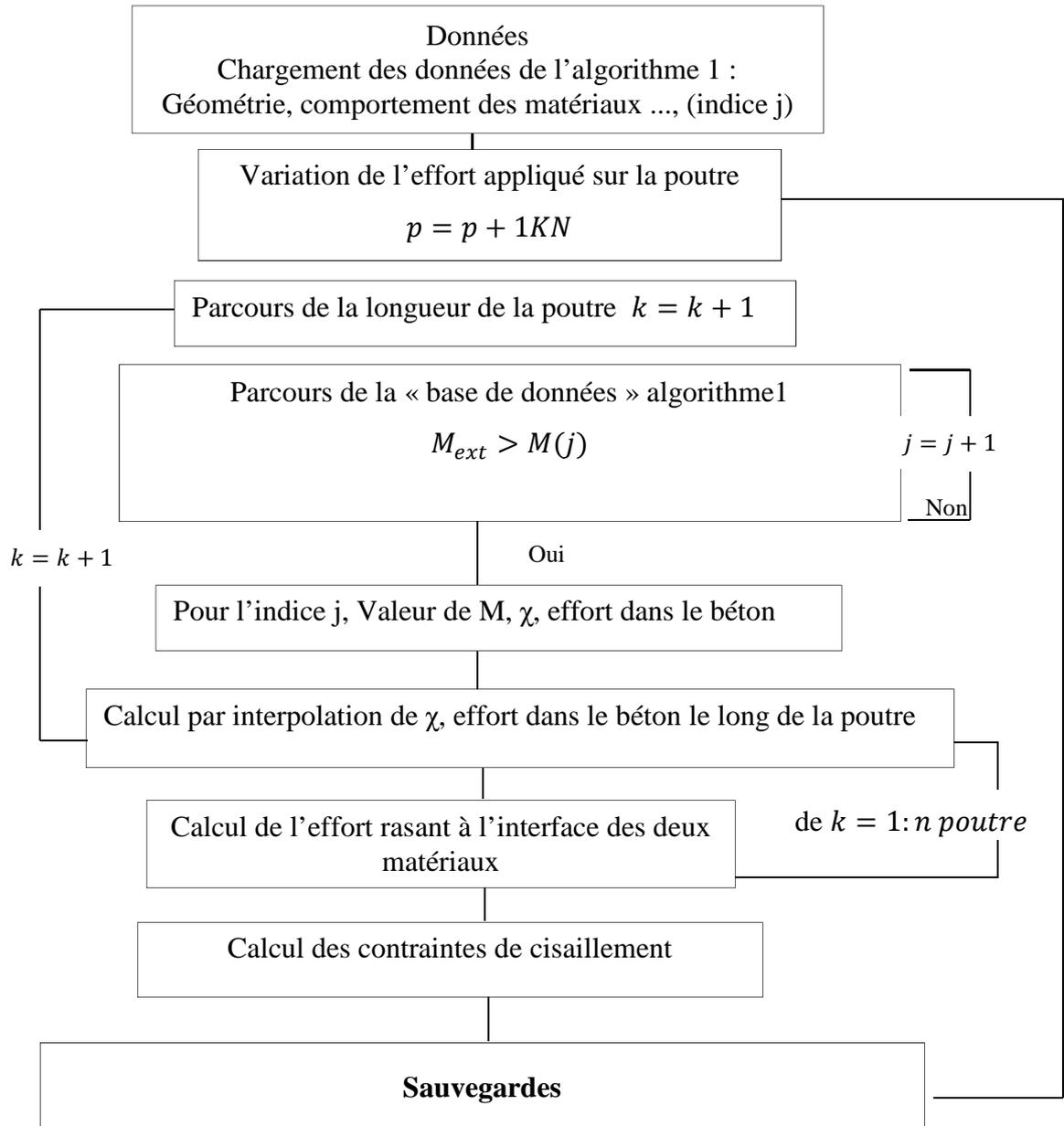


Figure 35 – Organigramme de calcul de la charge ultime et les contraintes de cisaillement, le long de la poutre

III.1.4.2 - Détermination de la flèche due au moment fléchissant

La flèche due au moment est calculée à partir de la courbure. En considérant l’hypothèse de petits déplacements et des petites rotations on a l’équation (E.3.31)

$$\frac{\partial^2 w}{\partial^2 x} = \chi(x) = -f(M(x)) \tag{E.3.31}$$

Avec laquelle f représente la relation numérique liant la courbure au moment fléchissant. À partir d’un schéma aux différences finies, nous allons calculer numériquement la flèche due au moment fléchissant. Par ailleurs nous rappelons que notre maillage est à pas régulier.

En discrétisant les termes de la dérivée seconde on a :

$$w(x + \Delta x_k) = w_{k+1} \quad E.3.32$$

$$w_{k+1} = w_k + \Delta x_k \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_k + \frac{\Delta x_k^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right|_k + \frac{\Delta x_k^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right|_k + 0(\Delta x_k^4) \quad E.3.33$$

$$w(x - \Delta x_k) = w_{k-1} \quad E.3.34$$

$$w_{k-1} = w_k - \Delta x_k \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_k + \frac{\Delta x_k^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right|_k - \frac{\Delta x_k^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right|_k + 0(\Delta x_k^4) \quad E.3.35$$

En faisant la somme de ces deux équations :

$$w_{k+1} + w_{k-1} = 2w_k + \Delta x_k^2 \left. \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right|_k + 0(\Delta x_k^4) \quad E.3.36$$

Ce qui donne

$$\left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_k^2 = \frac{w_{k+1} - 2w_k + w_{k-1}}{\Delta x_k^2} + 0(\Delta x_k^2) \quad E.3.37$$

En discrétisant les termes de la dérivée première on a :

$$w_{k+1} = w_k + \Delta x_k \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_k + \frac{\Delta x_k^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right|_k + 0(\Delta x_k^3) \quad E.3.38$$

$$w_{k-1} = w_k - \Delta x_k \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_k + \frac{\Delta x_k^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right|_k + 0(\Delta x_k^3) \quad E.3.39$$

En faisant la différence de ces deux équations :

$$w_{k+1} - w_{k-1} = 2\Delta x_k \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_k + 0(\Delta x_k^2) \quad E.3.40$$

Ce qui donne

$$\left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_k = \frac{w_{k+1} - w_{k-1}}{2\Delta x_k} + 0(\Delta x_k^2) \quad E.3.41$$

En négligeant l'erreur $0(\Delta x_k^2)$ on a :

$$\left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_k^2 = \frac{w_{k+1} - 2w_k + w_{k-1}}{\Delta x_k^2} \quad E.3.42$$

$$\left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_k = \frac{w_{k+1} - w_{k-1}}{2\Delta x_k} \quad E.3.43$$

Après avoir discrétisé les termes de la dérivée seconde, on peut écrire la relation suivante pour les nœuds $k \in (2, n)$.

$$\frac{w_{k+1} - 2w_k + w_{k-1}}{\Delta x_k^2} = \chi(x) \tag{E.3.44}$$

$$w_{k+1} - 2w_k + w_{k-1} = \chi(x)\Delta x_k^2 \tag{E.3.45}$$

Les conditions limites aux nœuds 1 à l'appui de gauche et n à mi- portée de la poutre s'écrivent comme suit :

$$w_{k=1} = w(x = 0) = 0 \tag{E.3.46}$$

$$\left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_n = 0 = \frac{w_{n+1} - w_{n-1}}{2\Delta x_n} \leftrightarrow w_{n-1} = w_{n+1} \tag{E.3.47}$$

Ce qui donne un système matriciel présenté en E.3.48

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 & -2 & 1 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 2 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_k \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \chi_k \Delta x_k^2 \\ \vdots \\ \chi_n \Delta x_n^2 \end{pmatrix} \tag{E.3.48}$$

La résolution d'un tel système revient à déterminer le vecteur w. L'organigramme général se présente comme suit :

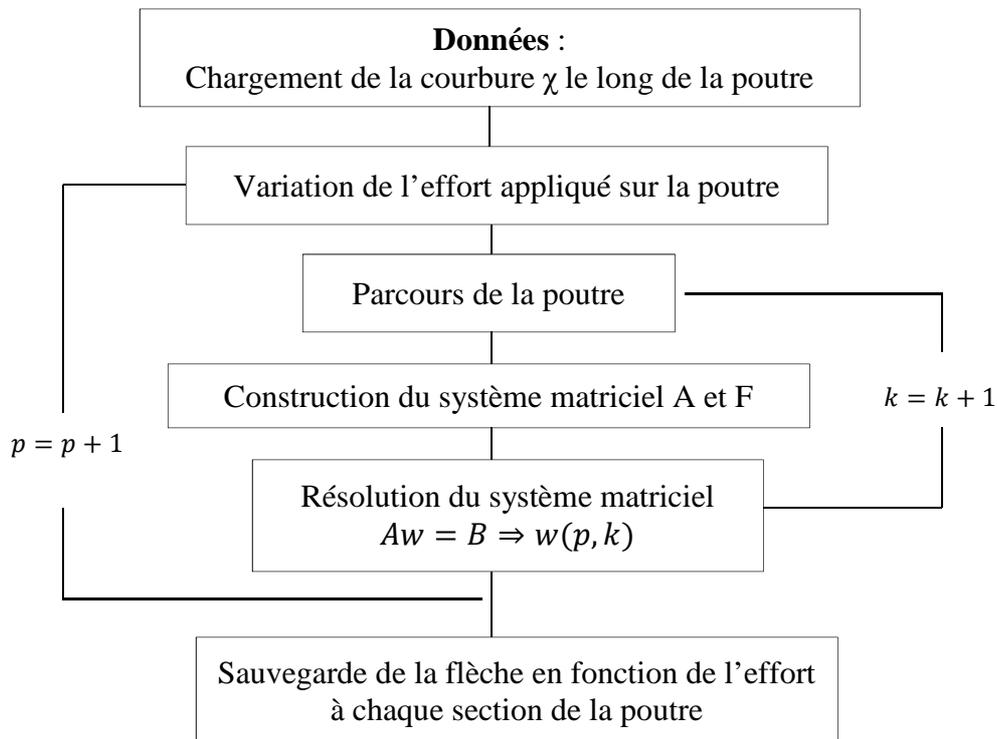


Figure 36 – Organigramme de calcul de la flèche due au moment fléchissant, le long de la poutre.

III.1.4.3 - Test en termes de moment résistant d'une section, de la courbure, la flèche et les contraintes de cisaillements

Dans un processus de validation de l'outil on a comparé les résultats numériques avec les valeurs obtenues par la théorie de résistance des matériaux, en prenant une poutre mixte bois-béton (Figure 37), cette structure est composée par une poutre en bois de 11,3x27cm de section, au-dessus d'elle, on trouve une dalle en béton de 45cm de largeur et 7cm d'épaisseur. Cette poutre est simplement appuyée aux extrémités.

➤ Caractéristiques mécaniques et géométriques

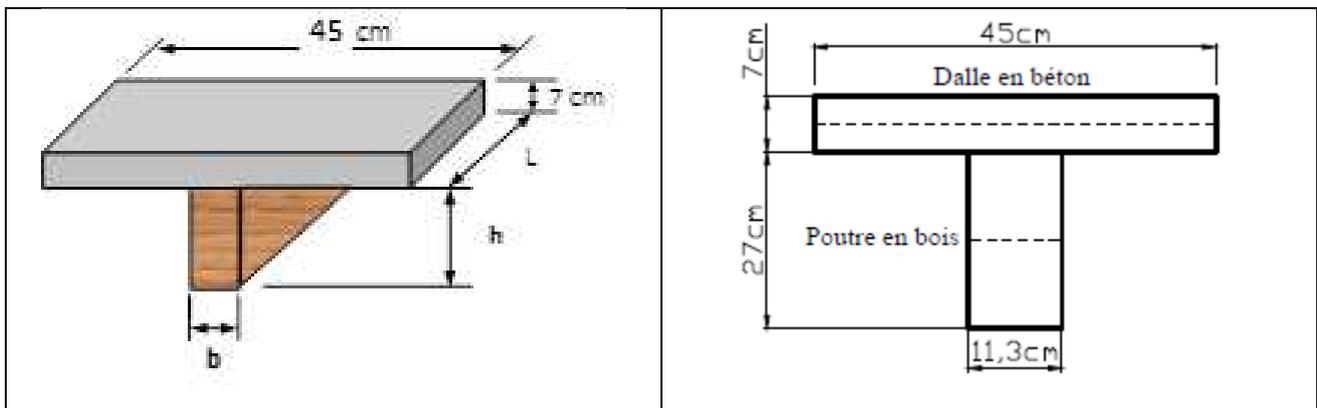


Figure 37 - Caractéristique géométrique de la poutre

Comme caractéristiques mécaniques et géométriques on a pris les valeurs suivantes :

- Poutre en bois
 - $E = 11000 \text{ MPa}$
 - Epaisseur $b = 113 \text{ mm}$
 - Hauteur $h = 270 \text{ mm}$
 - Déformation limite = 0,002

- Dalle en béton
 - $E = 30000 \text{ MPa}$
 - Largeur $l = 450 \text{ mm}$
 - Hauteur $h = 70 \text{ mm}$
 - Déformation limite = 0,003

➤ Hypothèses de l'analyse

Sur le modelé on a fait une analyse statique sous les hypothèses suivantes :

- Les matériaux sont parfaitement élastiques isotrope,
- Tous les éléments travaillent en domaine élastique,
- La connexion entre la poutre en bois et la dalle en béton est parfaite,

- On ne prend pas en compte l'effet de la fissuration du béton tendu,
- On ne tient pas en compte des imperfections des matériaux,

➤ *Analyse et résultats obtenus par MATLAB et RDM*

Tableau 6 - Résultats MALTAB ET RDM

Désignations	Unité	MATLAB	RDM
Axe neutre	cm	26,05	26,04
Moment limite élastique	kN.m	73,5	73,5
Courbure	1/m	0.0077	0.00770
Charge limite élastique	kN	147	147
Flèche	mm	2,50	2,50
Contrainte de cisaillement	MPa	2,85	2,86

Le tableau 6 montre les résultats obtenus par le modèle développer (MTLAB) et la résistance des matériaux (RDM). On observe une bonne corrélation entre ces modèles, l'axe neutre du modèle coïncide avec le centre géométrique de la section homogénéisée ou le moment statique est nul et la charge élastique limite élastique du modèle est égale à la valeur théorique donnée par la résistance des matériaux (RDM).

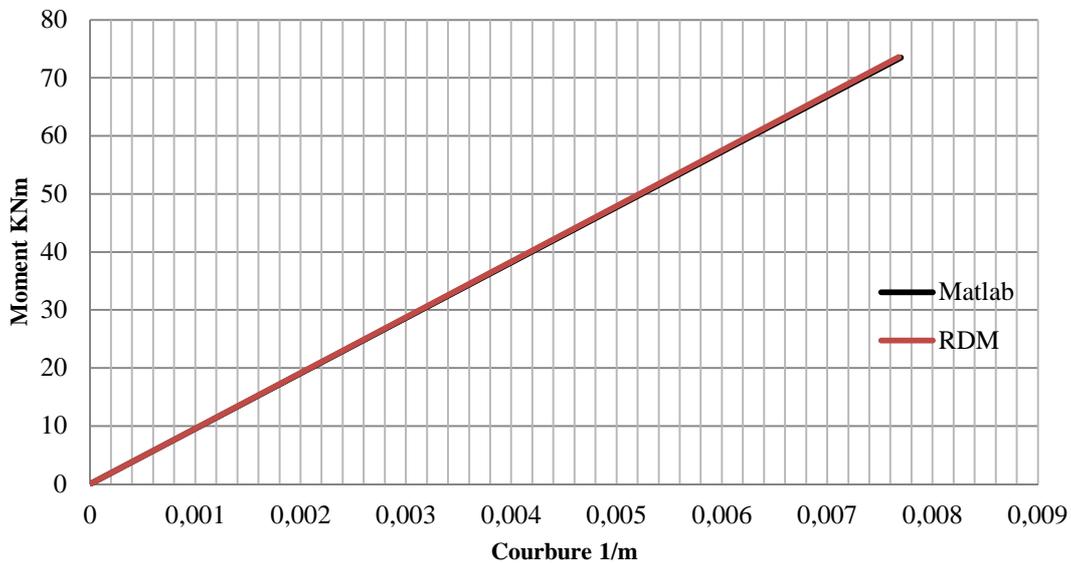


Figure 38 – Loi moment courbure

La figure 38 représente la loi courbure-moment de la section et cette loi est très bien représentée par rapport à celle de la théorie des poutres.

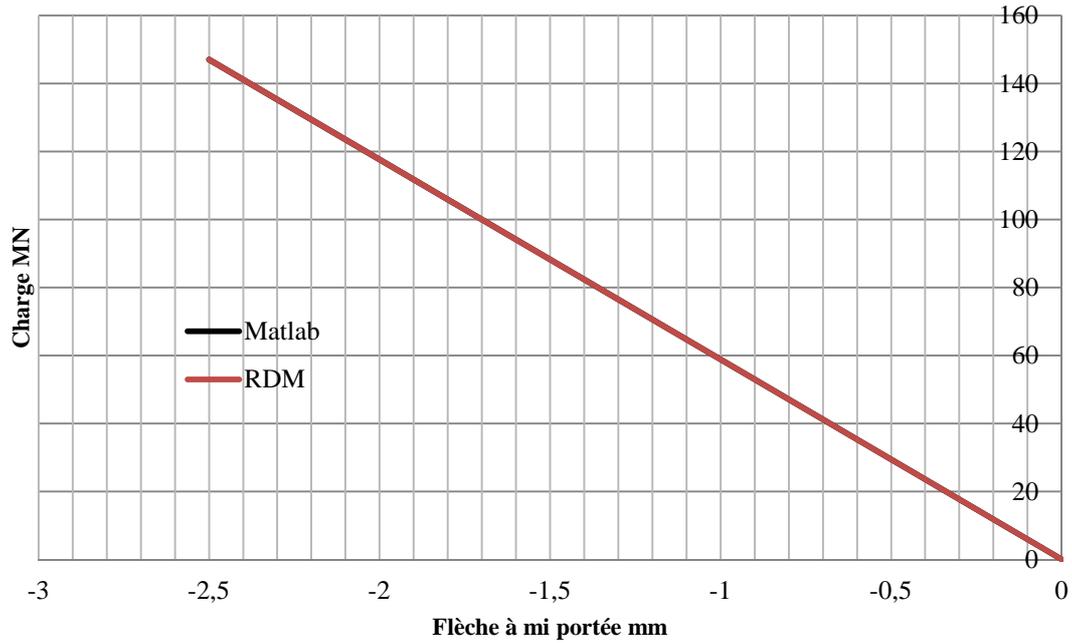


Figure 39 – La charge en fonction de la flèche

La figure 39 reproduit la charge en fonction de la déformée de la poutre jusqu'à la limite élastique; très bonne corrélation entre la production du modèle MATLAB la théorie des poutres

Contrainte de Cisaillement $P_e=147\text{KN}$

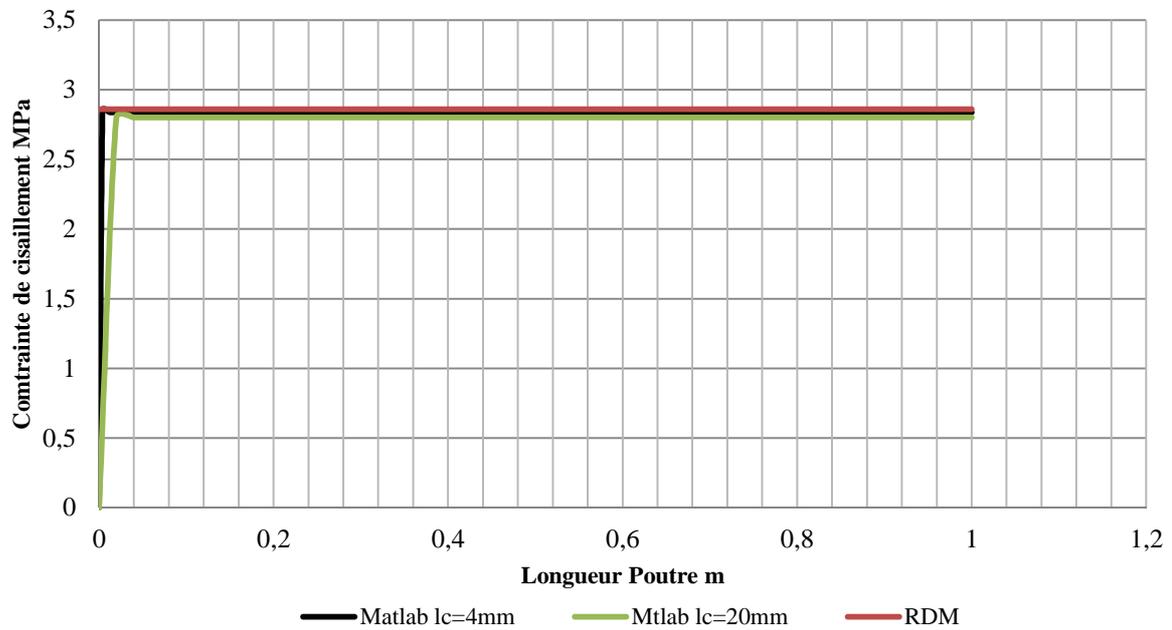


Figure 40 – Evolution de la contrainte le long de la poutre

La figure 40 montre l'évolution de la contrainte de cisaillement longitudinale le long de la poutre pour le charge $P = 147\text{KN}$; on trouve des écarts entre le résultat de la théorie des poutres et le modèle pour une épaisseur de tronçon élevée (Matlab $lc=20\text{mm}$). Pour une épaisseur très petite

(Matlab $l_c=4\text{mm}$), bonne corrélation entre les résultats du modèle et les résultats théoriques, donc une bonne convergence du modèle aux valeurs théoriques.

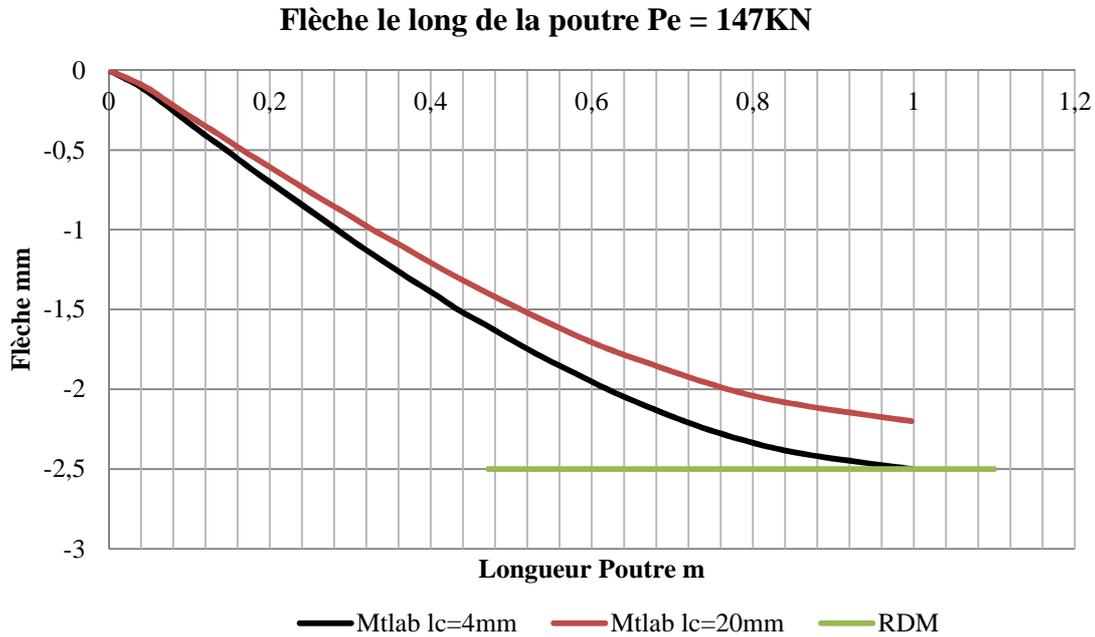


Figure 41 - Evolution de la déformée le long de la poutre

La figure 41 présente l'évolution de la déformée le long de la poutre ; on remarque également des écarts entre le résultat de la théorique et le modèle pour une épaisseur de tronçon élevée (Matlab $l_c=20\text{mm}$). Pour une épaisseur très petite (Matlab $l_c=4\text{mm}$), on observe une bonne corrélation entre les résultats du modèle et les résultats théoriques, donc une bonne convergence du modèle aux valeurs théoriques (RDM).

Donc pour un découpage fin le modèle représente de façon précise les comportements étudiés.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Un plancher mixte en bois-béton se compose d'un plancher en bois (poutres et panneaux OSB connecté mécaniquement à une dalle en béton armé ou non de 4 à 7 cm d'épaisseur en général. Les organes de connexion permettent une utilisation optimale des matériaux bois et béton, qui participent respectivement à la reprise des efforts de traction et de compression. Les planchers mixtes en bois-béton sont particulièrement indiqués en rénovation, où ils permettent de renforcer les planchers existants sans nécessiter le remplacement des poutres en bois.

Comparativement aux planchers traditionnels en bois, les planchers en bois-béton présentent globalement des performances accrues, non seulement sur le plan mécanique, mais également en ce qui concerne le confort vibratoire et la tenue à l'incendie

Ce projet de recherche mené à l'institut pascal en partenariat avec le 2iE a permis d'évaluer les comportements des planchers mixtes en bois-béton en proposant un outil de dimensionnement de ces structures. La méthodologie mise en place est déclinée en trois phases :

- Comprendre le principe de fonctionnement mécanique des structures mixtes bois-béton et les modes de connexion ;
- Faire le point et comprendre les méthodes d'analyses ;
- Analyse du comportement structural de poutres mixtes bois-béton dans le domaine linéaire des composantes.

Au terme de cette étude, les résultats révèlent que le modèle mis en œuvre est capable de reproduire de manière précise les comportements mesurés :

- Moment-courbure d'une section ;
- Charge, déformée et contrainte de cisaillement à l'interface bois-béton en différents points de la poutre.

En conclusion le modèle développé dans ce travail, peut être considéré comme une étape pour la création d'un modèle plus avancé pour la recherche plus fine de la prévision de planchers mixtes.

Cette étude doit être approfondie dans le futur sur :

- ✓ Le comportement non linéaire des composantes (Bois, béton et la connexion)
- ✓ Le comportement à long terme (fluage, effet hydrique, vieillissement ...)
- ✓ La déformée due à l'effort tranchant

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. BOUCHAÏR. 2006. "Structures Métallique, Bois Et Mixtes Et Leurs Assemblages-modélisation Et Expérimentation." *Mémoire D'habilitation à Diriger Des Recherches*.
- Ahmadi B.H., and Saka M.P. 1993. "Behaviour of Composite Timber-concrete Floors." *Journal of Structural Engineering*.
- Alain G. 1988. "Plancher à Collaboration Bois-béton". Brevet d'invention 0280228 EP0280229, Office Européen des brevets, 1988.
- Ario CECCOTTI. 2002. "Composite Concrete-timber Structures." *IUAV Université, Venise Italie, Publication Technique, 2002*.
- Benitez M.F. 2000. "Development and Testing of Timber/concrete Shear Connectors." *World Conference on Timber Engineering*.
- Creac hcadec. 2008. "Analyse Et Modélisation Du Comportement Non Linéaire D'assemblages Collés Pour Application Marine." *PhD Thesis, ENSIETA*.
- CSTC. 2010. "Comportement Physique Et Mécanique Des Planches Mixtes En Bois-béton." *Rapport N°13*.
- CTBA. 2007. "Bois Structure." *Centre Technique Du Bois Et De L'ameublement*.
- Cvetković R, and Stojić D. 2003. "Design Methods of a Timber-concrete T-cross-section." *Magazine Architecture and Civil Engineering*.
- Deperraz G. 1998. "Poutre Mixte Bois-béton Pour La Construction Et L'ouvrage D'art." *Brevet D'invention 2780427*, Institut National De La Propriété Industrielle edition.
- EC5-1-1. 1999. "Calcul Des Structures En Bois - Partie 1-1." *Règles Générales Et Règles Pour Les Bâtiments*, Paris la Défense Cedex edition.
- Kuttel R. 1998. "Connecting Element for Wood-concrete Composite Structure." *Brevet D'invention WO 96/21778 EP0832336*, Internationale Zusammenarbeit Auf Dem Gebiet Des Patentwesens edition.
- Martin MALLEA. 2003. "Comportement Des Planchers Mixtes Bois-béton. Validation, Application Et Comparaison De Modèles Numériques." *Mémoire Du CUST*.

Martino M. 2005. "System for the Construction of Mixed Wood and Concrete Floors, and the Components Required to Join the Two Materials." *Brevet D'invention EP 1582644A1*, European Patent Application edition.

Molard D et al. 1998. "Brevet d'invention-Élément De Paroi Composite Bois-béton. Brevet D'invention", Institut National De La Propriété Industrielle edition.

Raymond H.G. 1995. "Connecteur Pour Plancher Mixte, Plancher Incorporant Un Tel Connecteur Et Procédé De Réalisation." *Brevet D'invention 2742459 FR2742459*, Institut National de la Propriété Industrielle edition.

Schaub M.O. 1929. "Brevet d'invention-Liaison Exempte De Glissement Entre Armature En Bois Et Béton Dans Les Constructions En Béton à Armature En Bois." *Brevet D'invention 667419*, Brevet d'invention-Ministère du Commerce et de l'Industrielle edition.

Sébastien FUENTES. 2008. "Comportement Des Structures Mixtes Bois-béton En Ambiance Extérieure." *Mémoire Du Polytech' Clermont-ferrand*.

Steinberg E et al. 2003. "Connectors for timber-Lightweight Concrete Composite Structures." *Journal of Structural Engineering*.

<http://www.lignatech.ch/> « Page officielle de LIGNATECH ».

<http://www.chantiers.ch/> « Systèmes de dalle mixte en bois/béton léger », Magasine « Chantier & Rénovation ».

<http://www.archipente.com/> « LIGNATECH. Page officielle d'internet ».

ANNEXE

*Annexe 1 : « Concept de largeur efficace de table de compression »**Erreur ! Signet non défini.***

Annexe 1 : « Concept de largeur efficace de table de compression »

Un concept fondamental pour l’application des expressions de l’Eurocode 5, est la largeur efficace de table de compression. Le comportement réel d’une poutre mixte est loin de l’hypothèse de conservation des sections planes, en raison de l’existence de divers phénomènes, tels le comportement bidimensionnel de la dalle et sa déformée non uniforme sur la largeur due au trainage de cisaillement ou le glissement relatif dans l’interface bois béton. Le concept de largeur efficace inclut tous ces phénomènes en définissant une section plane équivalente de largeur fixe, dite effective, permettant de travailler avec la théorie de poutres et considérer l’hypothèse de Navier-Bernoulli.

L’effort rasant qui se génère en l’interface bois-béton, provoque dans la dalle, des contraintes normales $\sigma_{x(y)}$ dans le sens longitudinal de la poutre. La Figure suivante montre la variation de ces contraintes dans la feuille moyenne de la dalle. Comme ces contraintes sont dues à la diffusion de l’effort rasant à l’ intérieur de la section de béton, leur répartition sur la section n’est pas uniforme. Pour permettre tout de même la considération de l’hypothèse de Navier-Bernoulli, on définit une largeur participant ou largeur effective b_{eff} sur laquelle on admet une contrainte uniforme égale a la contrainte maximale $\sigma_{x,max}$ de sorte que :

$$b_{1,eff} * \sigma_{x,max} = 2 * \int_0^{B/2} \sigma_x dy$$

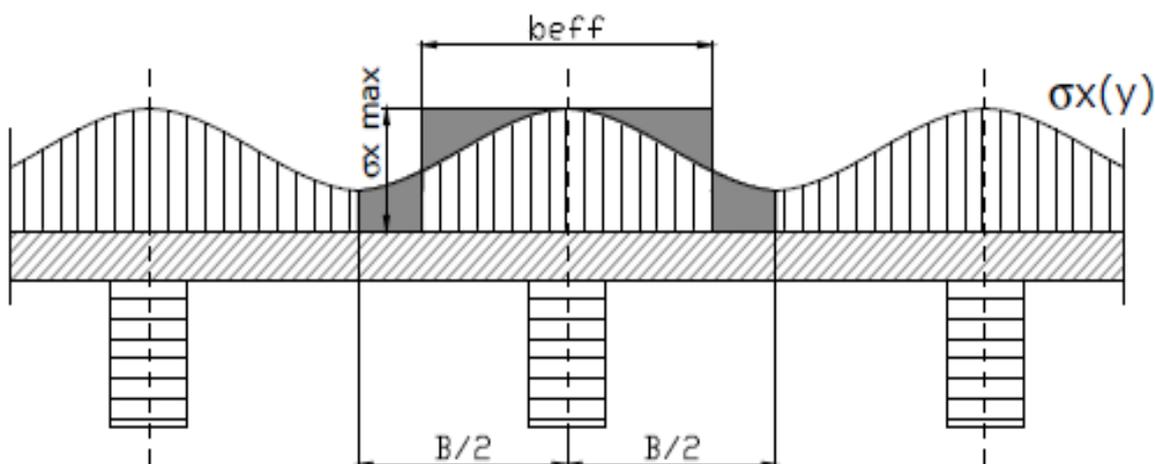


Figure 42 – Distribution de contraintes normales moyennes de la dalle

Des recherches basées sur la théorie élastique ont montré que le rapport b_{eff}/B dépend de manière complexe du rapport entre l'entraxe et la portée des poutres l , du type de chargement, de conditions d'appuis, l'épaisseur de la dalle en béton et d'autres variables.

Il y a beaucoup de travaux qui ont étudié le problème et c'est pour cela que l'on a plusieurs expressions pour déterminer la largeur effective. Par exemple on peut utiliser les expressions expérimentales de Natterer et Hoefl :

- Pour une charge uniforme

$$b_{eff} = B \left(1 - 1,4 \left[\frac{B}{L} \right]^2 \right)$$

- Pour une charge concentrée

$$b_{eff} = B \left(1 - 1,4 \left[\frac{B}{L} \right]^2 - 0,8 \left[\frac{B}{L} \right] \right)$$

B : Entraxe des poutres

L : Portée des poutres

D'après les recommandations de l'American Institute for Timber Engineering (AITE), la largeur effective, dans le cas de planchers mixtes bois-béton, peut être calculée comme:

$$b_{eff} \leq \frac{1}{4}L$$

$$b_{eff} \leq 12h_1$$

$$b_{eff} \leq B$$

h_1 : Epaisseur de la dalle en béton

L'Eurocode 4, Calcul des structures mixtes acier-béton, propose l'approche suivant:

$$b_{eff} = \min\left(\frac{1}{4}L_0; B\right)$$

B : Entraxe des poutres

L_0 : Distance entre les points de moment fléchissant nul

«Annexe B de l'Eurocode sous Excel»

DONNEES			
B [m]	0,5		
s [cm]	20		
d [mm]	50		
L [m]	2,5		
b ₁ [cm]	47		
b ₂ [cm]	9		
h ₁ [cm]	5		
h ₂ [cm]	27		
H [cm]	32		
G1 [kN/m]	1,22		
G2 [kN/m]	0,26		
Q cloison [kN/m]	0,8		
Q exploit [kN/m]	4		
G*1,35 [kN/m]	1,998		
Q*1.5 [kN/m]	7,2		
		φ ^{post} 0	2,25
		φ _{t,t0}	1,35
		Choix de bois	GL24H
		Classe de service	C.S 1
		Durée min de charge	M. term
		Choix de béton	C40
		Choix categorie bât.	A,B
		Choix du connecteur	EC5
		Choix du plancher	Plancher 1
		Kser [N/mm]	16103
		Ku	10736
		Flèche initial (L/x) x	300
		Flèche final (L/x) x	200
		Flèche w2 (L/x) x	500

RÉSULTATS			
A ₁ [cm ²]	236	I ₁ [cm ⁴]	491,7
A ₂ [cm ²]	243	I ₂ [cm ⁴]	14762,3
M _{Ed} (1,35G) [m.kN]	1,56	M _{Ed} (total) [m.kN]	6,01
V _{Ed} (1,35G) [KN]	2,85	V _{Ed} (total) [KN]	9,62
M _{Ed} (1,5Q) [m.kN]	4,45	Masse Vol.	
V _{Ed} (1,5Q) [KN]	7,125	Bois [kg/m ³]	380
Kdef perm	0,6	γ _m	1,25
Kdef var(ψ ²)	0,18		
E ₁ [MPa]	30000		
E ₂ [MPa]	11300		
CONTRAINTES			
ELU (États Initial)			
Kser [N/mm]	16103	a ₁ [cm]	14,3
Ku [N/mm]	10736	a ₂ [cm]	1,7
γ ₁	0,05	EL _r [KN*cm ²]	25582462
γ ₂	1		
Combinaison 1,35G		Combinaison 1,35G+1,5Q	
σ _{Beton} [Mpa]	0,12	σ _{Beton} [Mpa]	0,46
σ _m Beton [Mpa]	0,46	σ _m Beton [Mpa]	1,76
σ _c Beton [Mpa]	0,6	σ _c Beton [Mpa]	2,2
σ _r Beton [Mpa]	0,3	σ _r Beton [Mpa]	1,3
σ _{Bois} [MPa]	0,12	σ _{Bois} [MPa]	0,45
σ _m Bois [MPa]	0,93	σ _m Bois [MPa]	3,59
σ _r Bois [MPa]	1,0	σ _r Bois [MPa]	4,0
τ _{max} Bois [MPa]	0,15	τ _{max} Bois [MPa]	0,49
F ₁ [kN]	1,03	F ₁ [kN]	3,49

ELU (États Final)			
Charge permanent (1,35G)			
Eef 1 [Mpa]	9231		
Eef 2 [Mpa]	7063		
Kser,fin [N/mm]	10065		
Ku,fin [N/mm]	6710	a ₁ [cm]	14,4
γ ₁	0,09	a ₂ [cm]	1,6
γ ₂	1	El _{e,f} [KN ⁴ cm ²]	15332852
σ Beton [Mpa]	0,12		
σ _m Beton [Mpa]	0,23		
σC Beton [Mpa]	0,35		
σT Beton [Mpa]	0,11		
σ Bois [Mpa]	0,12		
σ _m Bois [Mpa]	0,97		
σt Bois [Mpa]	1,1		
τ max Bois [Mpa]	0,15		
F1 [KN]	1,03		
Charge variable (1,5Q)			
Eef 1 [Mpa]	12766		
Eef 2 [Mpa]	9576		
Kser,fin [N/mm]	13647		
Ku,fin [N/mm]	9098	a ₁ [cm]	14,4
γ ₁	0,09	a ₂ [cm]	1,6
γ ₂	1	El _{e,f} [KN ⁴ cm ²]	20812027
σ Beton [Mpa]	0,34		
σ _m Beton [Mpa]	0,68		
σC Beton [Mpa]	1,03		
σT Beton [Mpa]	0,34		
σ Bois [Mpa]	0,33		
σ _m Bois [Mpa]	2,77		
σt Bois [Mpa]	3,1		
τ max Bois [Mpa]	0,37		
F1 [KN]	2,59		
Contraintes Combinaison 1,35G+1,5Q			
σ Beton [Mpa]	0,46		
σ _m Beton [Mpa]	0,92		
σC Beton [MPa]	1,38		
σT Beton [MPa]	0,46		
σ Bois [Mpa]	0,45		
σ _m Bois [Mpa]	3,74		
σt Bois [MPa]	4,19		
t max Bois [MPa]	0,53		
F1 [KN]	3,62		

FLÈCHES			
ELS (États Initial)			
K_{ser} [N/mm]	16103	a_1 [cm]	13,64
γ_1	0,07	a_2 [cm]	2,36
γ_2	1	El_{ef} [KN*cm ²]	28534712
ΔG inst [mm]	0,264		
ΔG_1 inst [mm]	0,2		
w_Q inst [mm]	0,7		
Δ total [mm]	0,9		
ELS (États Final)			
Charges permanentes			
E_{1Fp} [mpa]	9231	a_1 [cm]	13,77
E_{2Fp} [mpa]	7063	a_2 [cm]	2,23
K_{serFp} [N/mm]	10065	El_{ef} [KN*cm ²]	1,70E+07
γ_1	0,13		
γ_2	1,00		
Δ perm [mm]	0,4		
Charge variable			
E_{1Fv} [mpa]	12766	a_1 [cm]	13,76
E_{2Fv} [mpa]	9576	a_2 [cm]	2,24
K_{serFv} [N/mm]	13647	El_{ef} [KN*cm ²]	2,31E+07
γ_1	0,13		
γ_2	1,00		
Δ var [mm]	0,8		
w net fin [mm]	1,3		
w_2 [mm]	1,1		

VERIFICATIONS							
E.I.	FLEXION EN BOIS	0,2338	VRAI	f_{cd} [MPa]	26,67		
	CISALLEMENT BOIS	0,2688	VRAI	f_{ctd} [MPa]	1,67		
E.I.	FLEXION EN BOIS	0,0844	VRAI	E.I.	TRACTION BETON	0,359	VRAI
	CISALLEMENT BOIS	0,1087	VRAI		COMPRES BETON	2,020	VRAI
Flèche	Flèche max w_{inst} [mm]	8,33		E.I.	TRACTION BETON	-0,045	VRAI
	Flèche max $w_{net,fin}$ [mm]	12,50			COMPRES BETON	0,373	VRAI
	Flèche max w_2 [mm]	5,00					
	w_Q inst [mm]	0,4	VRAI	F_d INITIAL [KN]	6,40		
	w net fin [mm]	0,9	VRAI	F_d FINAL [KN]	4,80		
	w_2 [mm]	0,744	VRAI	F_1 INITIAL [kN]	6,27	VRAI	
				F_1 FINAL [kN]	6,31	FAUX	
ELU	γ_1 Etat initial	0,15	VRAI	E.L.S	γ_1 Etat initial	0,21	VRAI
	γ_1 Etat final	0,27	VRAI		γ_1 Etat final	0,3528	VRAI

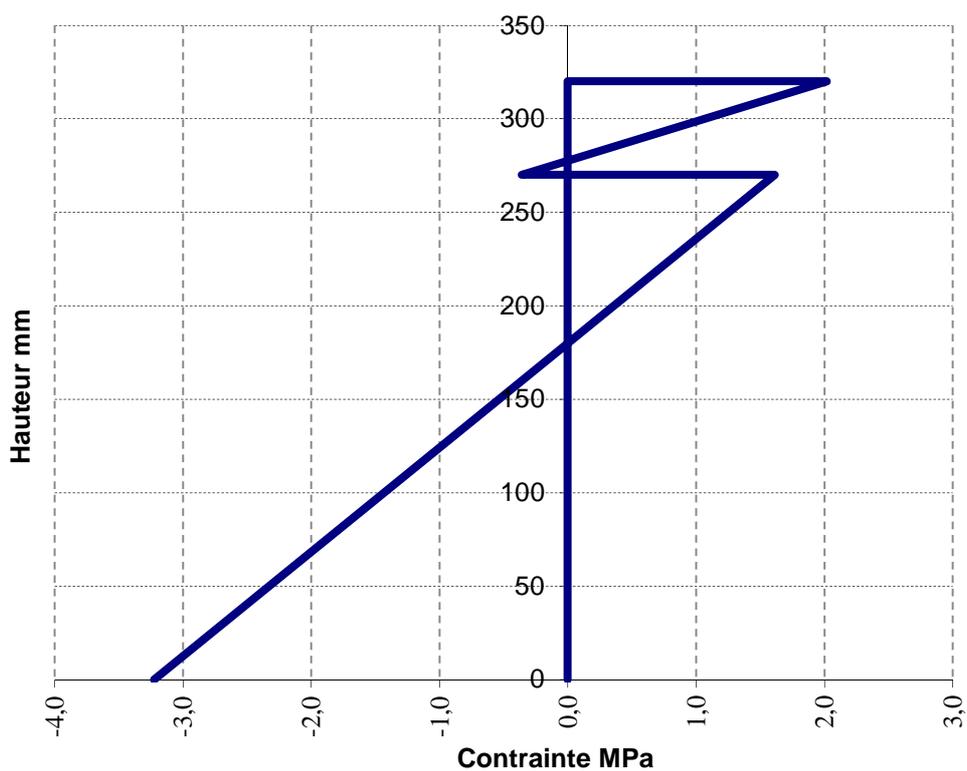


Figure 43 – Contrainte état initial combinaison 1,35G+1,5Q

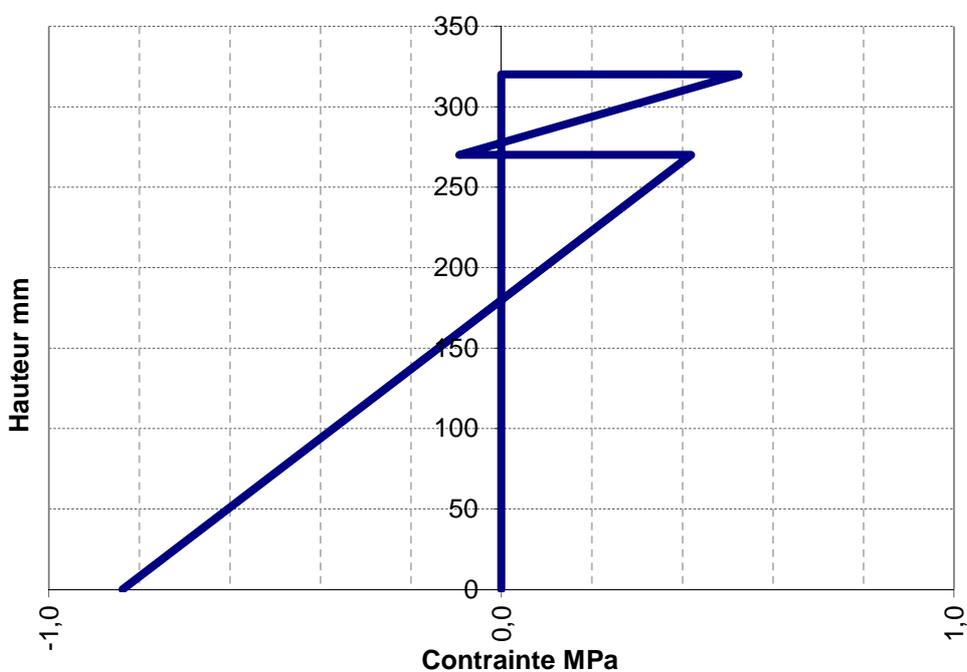


Figure 44 – Contrainte état initial combinaison 1,35G

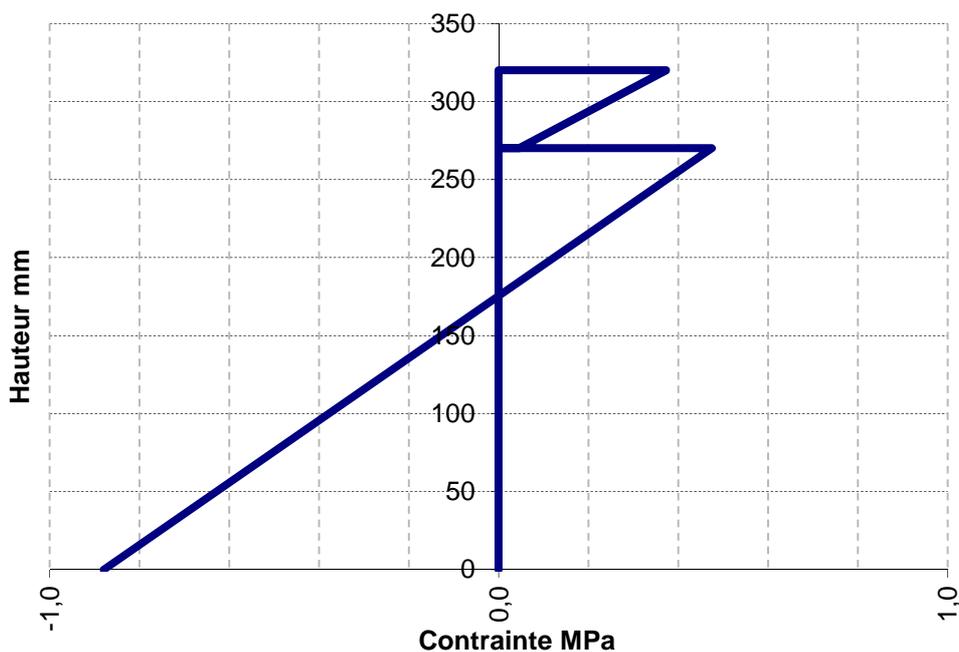


Figure 45 – Contrainte état final combinaison 1,35G

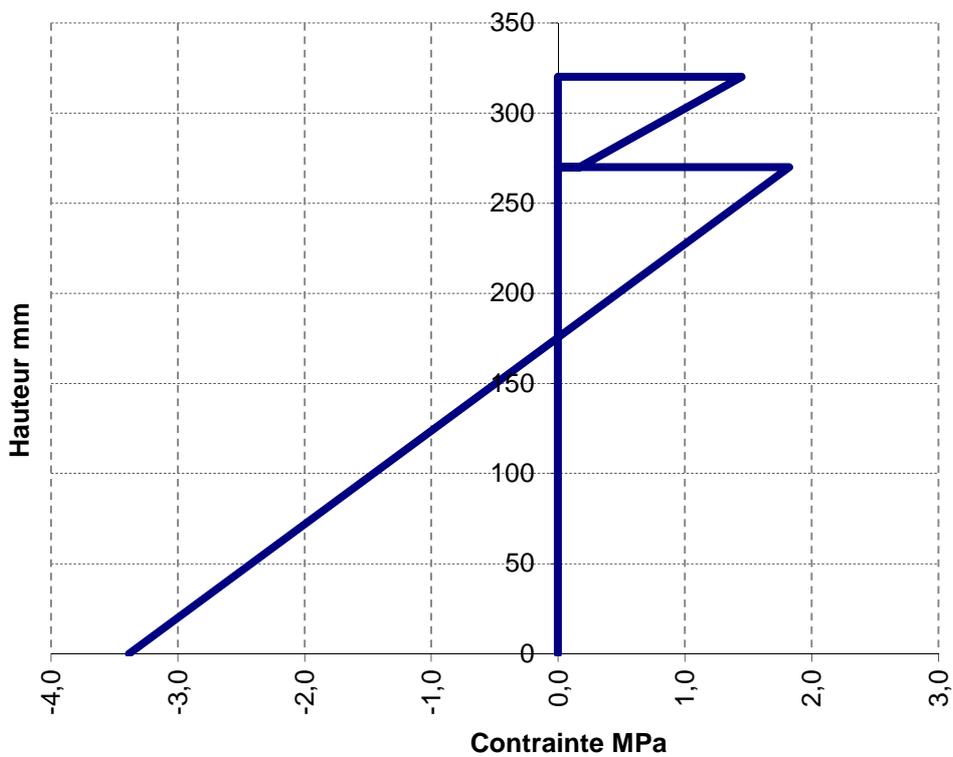


Figure 46 – Contrainte état final combinaison 1,35G+1,5Q