

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

BELKHALAFI Asma

CHRIFI Khaira

Sujet du mémoire

**ETUDE ANALYTIQUE DU COMPORTEMENT MECANIQUE
D'UNE POUTRE MIXTE ACIER-BETON**

Soutenu publiquement le 25/09/2020 devant le jury composé de :

Mr,	T.H.DAOUADJ	Président
Mr,	T.BENSATTALAH	Rapporteur
Mr,	M. ZIDOUR	Examineur
Mr,	A.SAOULA	Examineur

PROMOTION : 2019/2020

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr Bensattalah T on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous remercions s'adresse également à tout nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenus de près ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail particulièrement mes chers parents, qui ont consacré leur existence à bâtir la mienne, pour leur soutien, patience et soucis de tendresse et d'affection pour tout ce qu'ils ont fait pour que je puisse arriver à ce stade.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore, qui m'a encouragé durant toutes mes études, et qui sans elle, ma réussite n'aura pas eu lieu.

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.

A mon grand-père, toujours là pour nous aider, que Dieu prolonge sa vie.

A mes chères princesses Khadidja et Hadjer ,

A mes chères frères Youcef et Mohamed,

A mes chères tantes Souad, Khadidja et Amina ,

A mes oncles,

À mon cher binôme Khaira et sa famille,

A tous la famille BELKHALAFI ,

A mes chères amies,

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé,

BELKHALAFI Asma

Dédicace

A mes très chers parents pour leur amour tous en espérant qu'il touche le fruit de leur sacrifices

Mon cher mari "Louz Abdelkader" et leur enfants "Ayoub- Abed - krimo"

Mes très chers frères "Ahmed-Bensouna-Moulay-Mhamed"

Mes très chères soeurs "fadhila-soumia- saliha-messaouda"

À qui porte le nom " Cherifi"

À mon cher binôme : Asma et sa famille.

A ce qui ont pris place dans mon coeur mes chers amis:

"Badra- Rachida- Khadidja -Fatiha"

A tous et sans exception je dedie ce modeste travail

Cherif kheira.

Résumé :

Malgré les innovations dans les poutres mixtes concernant la connexion par exemple la connexion par adhérence et collage (adhésif), reste les connecteurs de type goujons à tête sont les plus utilisés réellement dans les différents constructions soit les bâtiments ou bien les ouvrages d'art (ponts). Dans ce travail, nous avons développé un modèle analytique se basé sur la méthode des éléments finis pour déterminer l'influence de nombre et l'espacement des goujons à la connexion des poutres mixtes acier-béton, leurs influences sur le glissement entre le profilé métallique et la dalle en béton. Ensuite, ces résultats obtenus sont comparées aux modèles existent dans littératures.

Mots Clés : Mixte acier-béton, élément fini, dalle en béton, profilé métallique

Abstract:

Despite the innovations in composite beams concerning the connection, for example the connection by adhesion and gluing (adhesive), the head stud type connectors are actually the most used in different constructions, either buildings or engineering structures (bridges). In this work, we have developed a model analytical based for finite element method to determine the influence of the number and spacing of studs at the connection of composite steel-concrete beams, their influences on the sliding between the metal profile and the concrete slab. Then these results obtained are compared to the models exist in literatures.

Keys words: steel-concrete composite, finite element, concrete slab, metal profile

ملخص

على الرغم من الابتكارات في الحزم المركبة المتعلقة بالاتصال ، على سبيل المثال الاتصال عن طريق الالتصاق واللصق (اللاصق) ، فإن موصلات نوع مسمار الرأس هي في الواقع الأكثر استخدامًا في الإنشاءات المختلفة ، سواء المباني أو الهياكل الهندسية المدنية (الجسور). في هذا العمل ، قمنا بتطوير نموذج تحليلي يعتمد على طريقة العناصر المحدودة لتحديد تأثير عدد وتباعد المسامير عند توصيل عوارض الخرسانة الفولاذية المركبة ، وتأثيرها على الانزلاق بين قطاع المعدن. والبلاطة الخرسانية. ثم يتم مقارنة هذه النتائج التي تم الحصول عليها مع النماذج الموجودة في الأداب

الكلمات المفتاحية: صلب - خرسانة مختلطة ، عنصر محدود ، لوح خرساني ، مقطع جانبي معدني

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Introduction générale..... 1

Chapitre 1 - Recherche bibliographique

I.1. Introduction..... 3

I.2. Développement historique des poutres mixtes..... 3

Chapitre 2 - généralités sur les constructions mixtes acier-béton

II.1. Introduction..... 16

II.2. Eléments de structures mixtes acier-béton..... 17

II.2.1. Poteaux mixtes acier-béton..... 17

II.2.2. planchers mixtes acier-béton..... 19

II.2.3. Poutres mixtes acier-béton..... 23

II.3. Comportement d'une poutre mixte 26

II.4. Caractéristiques des matériaux utilisés dans la construction mixte..... 29

II.4.1. Acier de construction 29

II.4.2. Acier d'armature 31

II.4.3. Tôle profilée..... 32

II.4.4. Béton..... 35

II.4.5. Connecteurs de cisaillement..... 39

II.5. Avantages et inconvénients des structures mixtes..... 42

II.5.1. Les avantages des structures mixtes..... 42

II.5.2. Les inconvénients des structures mixtes..... 44

II.6. Avantage des poutres mixtes 45

II.7. Conclusion. 45

Chapitre 3 – Modèle élément fini des poutres mixtes Acier-béton

III-1 Introduction 45

III-2 Hypothèses et simplifications..... 46

III-3 Poutre mixte acier-béton : équation fondamentales... 47

III-3-1 Equation d'équilibre 47

III-3-1-1	Cas de la connexion continue	47
III-3-1-2	Cas de la connexion discrète	50
III-3-2	Relation cinématique	51
III-3-3	Loi de comportement	53
III-3-3-1	Comportement de section : Relation entre efforts et déformation généralisés	53
III-3-2-3	Loi comportement de la connexion.....	55
III-4	Solution analytique et matrice de rigidité exacte dans le cas élastique linéaire	55
III-4-1	Connexion discrète... ..	56
III-4-1-1	Tronçon de poutre mixte non-connectée.....	56
III-4-1-2	Elément spécifique de connexion ponctuelle	59
III-4-1-3	Assemblage des éléments de connexion et l'élément de poutre mixte non-connectée	59
III-5	Conclusion.....	60
Chapitre IV : Résultats et discussions		
IV-1	Introduction.....	61
IV-2	Géométrie de la poutre	61
IV-3	Caractéristique des matériaux.....	62
IV-4	Validation du modèle	63
IV-5	Etude d'influence de nombre des goujons sur le glissement	64
IV-6	Les résultats et discussions.....	65
IV-7	Conclusion	66
Conclusion générale.....		67
Références Bibliographiques		68

Liste des tableaux

Chapitre II : Généralités sur les constructions mixtes acier-béton

Tableau II.1 : Désignation et caractéristiques des principaux aciers de construction laminés à chaud.....	30
Tableau II.2 : Caractéristiques des aciers d'armatures	31
Tableau II.3 : les tôles profilées conformes à la norme EN10147	32
Tableau II.4 : Classes de résistance du béton, valeurs du module sécant d'élasticité (en KN/mm ²), résistance caractéristique à la compression (sur cylindres) et résistance caractéristique à la traction moyenne du béton (en N/mm ²).....	36
Tableau II .5 : Comparaison entre poutre mixte et poutre métallique.....	43
Tableau II.6 : Comparaison entres des éléments mixtes et des éléments en béton armé	43

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.1 : Les caractéristiques des matériaux	62
Tableau IV 2 : Nombre des goujons dans les poutres mixtes acier-béton.....	63
Tableau IV.3 : les résultats maximaux de glissement en demi-travée de poutre pour les quatre cas.....	64

Liste des figures

Chapitre II : Généralités sur les constructions mixtes acier-béton

Figure II.1 : Elément de construction.....	17
Figure II.2 : Types de poteaux mixtes.....	18
Figure II-3 : utilisations de dalles préfabriquées.....	19
Figure II-4 : profilé connecté à une dalle mixte.....	20
Figure II.5 : liaison par frottement dans les dalles.....	20
Figure II.6 : liaison mécaniques dans les dalles mixtes.....	21
Figure II.7 : Ancrage d'extrémités dans les dalles mixtes.....	21
Figure II.8 : dalle alvéolée précontrainte intégrée à une poutre en acier.....	21
Figure II.9 un plancher collaborant.....	22
Figure II.10 : solutions classique et innovantes de poutres mixtes.....	23
Figure II.11 : poutre mixte :a) avec la tôle profilée, b) avec pré-dalle.....	24
Figure II.12 : différentes sections de poutres mixtes.....	25
Figure II.13 : principe de fonctionnement de poutre mixte fléchis.....	26
Figure II.14 : Effet de solidarisation entre deux poutres en flexion élastique.....	27
Figure II.15 : Comparaison entre section mixte et non mixte.....	28
Figure II.16 : localisation de l'axe neutre dans une poutre mixte et non mixte.....	29
Figure II.17: Relation contrainte-déformation spécifique des aciers de construction.....	30
Figure II.18: Diagramme contrainte-déformation de calcul pour l'armature.....	31
Figure II.19 : Exemples des tôles profilées : tôle de façade « bardage » Tôle de toiture « couverture »-tôle de plancher « dalle mixte ».....	33
Figure 2.20 : Quelques types de tôles profilées pour dalles mixtes.....	34
Figure II.21. Diagramme parabolique conventionnel.....	35

Figure II.22: Contrainte-déformation spécifique d'un béton mesuré sur cube	37
Figure II.23 : Loi de comportement du béton	38
Figure II.24 : Exemples de connecteurs	39
Figure II.25 : types de connecteurs de cisaillement	39
Figure II.26 : Types de connexion.....	39
Figure II.27 : Degré de connexion au cisaillement... ..	39

Chapitre III : Modèle élément fini des poutres mixtes Acier-béton

Figure III.1 – Modèles de connexion	46
Figure III.2 – Élément infinitésimal d'une poutre mixte.....	48
Figure III.3 – Élément de connecteur	50
Figure III.4- Cinématique de la poutre mixte.....	52
Figure III.5 – Élément de poutre mixte avec connexion discrète.....	56
Figure III.6 – Forces nodales et déplacements nodaux d'un élément de poutre mixte... ..	58
Figure III.7 – Assemblage des parties acier, béton et connecteur-matrice.....	59

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1 : la coupe longitudinale d'une poutre mixte avec 44 goujons.....	61
Figure IV.2 : la coupe longitudinale d'une poutre mixte avec 18 goujons.....	61
Figure IV.3 : la coupe transversale des poutres mixtes	62
Figure IV.4 : comparaison de glissement entre les trois modèles sous charge 297KN pour 18 goujons	63
Figure IV.5 : comparaison de glissement entre les trois modèles sous charge 297KN pour 44 goujons	63
Figure IV.6 : Positionnement de 30 goujons avec espacement identique	63
Figure IV.7 : Positionnement de 18 goujons avec espacement identique.....	63
Figure IV.8 : Positionnement de 36 goujons avec espacement identique.....	64
Figure IV.9 : Positionnement de 44 goujons avec espacement identique.....	64
Figure IV.10: Comparaison entre les quatre poutres mixtes acier-béton sous la charge de 297KN	64

Notations Et Symboles

A

A	Section
A_c	Section de la dalle de béton
A_d	Section de goujon
A_{f1}	Section de l'aile supérieure
A_{f2}	Section de l'aile inférieure
A_s	Section de profilé
A_{sy}	Section des armatures

B

b	Largeur de la poutre
b_{eff}	Largeur efficace de la poutre mixte
b_0	Largeur moyenne de nervure

D

d	Diamètre de goujon
d_{RD}	Diamètre de la tige de goujon

E

e	Excentricité par rapport à l'interface acier béton
E_a	Module d'élasticité de l'acier.
E_b	Module d'élasticité de béton
E_{cm}	Valeur moyenne du module sécant du béton

F

F	Résultante des efforts appliqués par le connecteur sur le béton
f	Contrainte de flexion.
f_{ck}	Résistance caractéristique à la compression du béton
f_{ctm}	Résistance caractéristique à la traction moyenne du béton
f_{cj}	Résistance caractéristique à la compression de béton à j jours en
Fe	Nuance d'acier selon la norme de SIA 161(1979)
FeE	Nuance d'acier selon la norme de SIA 161 (1989)
	Contrainte maximale de flexion
	Résistance à la traction de l'acier de construction et de l'acier du goujon
	Limite d'élasticité ultime réelle de l'acier du goujon
	Limite d'élasticité de l'acier de construction en
	Limite d'élasticité de la tôle
	Limite d'élasticité de l'acier des armatures

G

G	Module de cisaillement
-----	------------------------

H

h	Hauteur hors tout du goujon
h	Hauteur de la poutre
h_{RD}	Hauteur de la tige de goujon
h_p	hauteur de nervure

	L	
L		Longueur de la poutre mixte
	P	
P		Force de cisaillement
P_B		Forces de cisaillement transférées à la tige du connecteur de cisaillement
P_W		Force de cisaillement introduit à un petit angle par rapport à la soudure qui relie le connecteur de cisaillement et la semelle
P_z		Composante horizontale de l'effort de traction transféré à la tige des connecteurs de cisaillement.
	Q	
q_{max}		Contrainte de cisaillement maximale
	S	
S		Nuance d'acier de EN
SE		Nuance d'acier de EN
S		Glissement en mm de la dalle par-rapport au profilé d'acier Glissement maximal
	V	
V		Effort de cisaillement longitudinal
	W	
W		Charge uniformément répartie
	X	
x		Distance de mi-portée.
	Z	
Z		Espacement entre les connecteurs
$C20/25$		Classe de résistance du béton
f_{ck}		Résistance caractéristique à la compression
$fc28$		Résistance mécanique à la compression de béton à 28 jours
ρ		Masse volumique
σ_{bc}		Contrainte admissible de béton en compression
ϵ_{bc}		Déformation unitaire de béton
η		Degré de
τ $APDL$		Ansys Parametric Design Language
BTP		Bâtiment et travaux publics
CAO		Conception Assisté par ordinateur
CFD		Computational fluid dynamics (computational fluid dynamics)
$EC3$		Euro code 3
$EC4$		Euro code 4
EN		Norme européenne

Introduction Générale

Introduction Générale

I. Introduction générale

Dans les deux dernières décennies, le développement et l'application des sections mixtes a considérablement augmenté dans le monde entier. L'élément mixte est utilisé non seulement aux structures normales et aux ponts, mais également aux gratte-ciel et aux grands ouvrages.

Dans le cas des poutres et des dalles, le profilé est connecté mécaniquement à la dalle de béton. Cette connexion offre une importante résistance au cisaillement à l'interface des deux matériaux, leur permettant de travailler ensemble en flexion. La dalle de béton, outre son rôle de surface porteuse, permet la reprise des efforts de compression ainsi qu'une protection complémentaire intéressante du profilé en acier contre la corrosion et l'incendie, l'acier reprenant principalement les efforts de traction.

Dans la plus part des cas (bâtiments multi-étagés, ponts), il n'est pas rare de travailler avec des travées de plus 12 mètres.

Ces portées génèrent des moments de flexion importants qui peuvent être repris plus avantageusement par une structure mixte, que ce soit en raison de son prix ou de la hauteur du plancher plus faible.

Des recherches entreprises à travers le monde, ont démontré que l'association de l'acier et du béton entraîne une réduction de glissements entre eux.

II. Objectif

Le but principal de ce travail est de développer un modèle analytique basé sur la méthode des éléments finis des poutres mixtes acier-béton pour analyser le glissement entre la dalle en béton et le profil métallique ont été employés pour les comparer avec la méthode expérimentale de J.M.Aribert et K.Abdel Aziz en 1986 d'INSA à renne de la France d'une part et le modèle 3D par SAP 2000 de Zidour M et all (2015).

Ensuite , nous avons utilisé ce modèle pour étudier l'influence de nombre de connecteur et espacement entre eux sur la connexion entre les différents éléments (la dalle en béton et profilé métallique) d'une série des poutres mixtes d'autre part.

Ce mémoire traite seulement une série des poutres mixtes acier béton simplement appuyée soumises à une charge concentré au milieu avec des connecteurs de type goujon à tête.

III. Organisation du mémoire

Ce mémoire se compose d' une part i e d'introduction générale et de quatre chapitre. Le Chapitre 1 on y trouve le développement qu'ont connu les poutres mixtes. Le chapitre 2 est une présentation générale de la construction mixte, des matériaux utilisés dans la conception des poutres mixtes, ainsi que les avantages et les inconvénients dans le domaine du bâtiment, alors que le 3^{ème} Chapitre traite aussi le comportement de la connexion en fonction de différents paramètres. Le 4^{ème} Chapitre, présente la validation de notre modèle proposée, notamment par comparaison au modèle expérimentale de J.M.Aribert et K.Abdel Aziz en 1986 . Il présente aussi la série des poutres mixtes qui sont étudié avec leurs résultats obtenue par logiciel sap2000 et la discussion sur l'influence de nombre et l'espacement dans poutre mixte sur son comportement.

Enfin, nous achevons le mémoire par une conclusion générale dans laquelle nous rappelons les principaux résultats que nous avons pu tirer de ces analyses.

Chapitre I

Recherche bibliographique sur les poutres mixtes Acier-béton

Chapitre I : Recherche bibliographique sur les poutres mixtes Acier-béton

I-1 Introduction :

Les poutres mixtes acier-béton sont formées par la connexion des dalles de béton à une poutre en acier avec une structure d'appui de support structurel. Dans le début des années 1900, les poutres mixtes ont été considérées comme favorables pour la conception des ponts, mais au cours de ces dernières décennies, les structures mixtes acier-béton sont largement employées dans la construction des bâtiments modernes de grande hauteur.

La résistance à la flexion des poutres mixtes est fortement influencée par la résistance et la ductilité des connecteurs de cisaillement entre la poutre d'acier et la dalle de béton. Pour le comportement des connecteurs de cisaillement, il est important de connaître la force de cisaillement transmise et le degré de glissement qui se produit à l'interface entre l'acier et le béton [1].

Les poutres mixtes acier-béton sont de plus en plus utilisées dans les constructions des immeubles à plusieurs étages en raison de leurs rapports supérieurs portée/hauteur, leurs flèches réduites et leurs rigidités élevées. Cependant, leur performance est très dépendante des caractéristiques charge-glissement des connecteurs de cisaillement.

I-2 Développement historique des poutres mixtes :

En 1964, **J.C.CHAPMAN** et **S.BALAKRISHNAN** [2] : ont étudié Le comportement de dix-sept poutres mixtes simplement appuyée en forme de T sous l'effet d'une charge statique concentrée appliquée suivant l'axe longitudinale de la poutre. Le nombre des connecteurs de cisaillements « goujons soudés » est varié pour étudier l'effet de glissement à l'interface sur le comportement élastique et la charge limite. Comme conclusion, des recommandations ont été faites concernant la conception de la section de la poutre et les connecteurs. L'utilisation de l'idée de la charge ultime de la section mixte peut conduire à des sollicitations de service qui s'approchent de la limite d'élasticité, à cause du grand facteur de forme. Ils ont suggéré que, le connecteur de cisaillement doit être conçu pour supporter l'effort tranchant horizontal existant

dans la poutre à charge limite. Dans le cas des poutres uniformément chargées, l'espacement uniforme de connecteurs était satisfaisant, malgré la distribution triangulaire de la force de cisaillement externe.

En 1967, **ROBINSON, H [3]** : a effectué une série de tests sur 15 poutres mixtes avec 39 essais push-out. L'influence de la géométrie de la nervure sur les caractéristique de charge-flèche des poutres et de la résistance maximale des échantillons push-out sont étudiées. Une amélioration considérable de la résistance et de la rigidité sur les poutres non mixtes a été remarquée. Le mode de rupture du béton dans la tôle en acier cellulaire est influencé par les dimensions des nervures même si toutes les poutres sont en mesure de supporter une charge croissante lors de l'augmentation de flèche après que la fissure s'est produite. Trois types d'arrangements connecteurs et trois tailles des poutres ont été testés. Aucune de ces variations n'a une influence significative sur les caractéristiques de charge-flèche des poutres mixtes. Des essais avec deux poutres de hautes résistances en acier en forme de I ont montré une capacité de charge augmentée due principalement au retard dans la présence de la fatigue dans les fibres inférieures des poutres. La première apparition de la fatigue sous l'effet d'un système de charge à deux points apparaît dans certains cas, pour déclencher la rupture du béton dans les nervures de la tôle.

La résistance des connecteurs de cisaillement a est le sujet de recherche de **MENZIES, J B [4]** dans le début des années soixante-dix. Une série d'expériences a été effectuée avec une attention particulière sur l'influence de la résistance et de la densité du béton sur les résistances statiques et la fatigue des connecteurs. Des recommandations ont été faites pour étudier les résistances spécifiques, d'étendre la gamme des résistances de béton pour laquelle les forces de connexion sont déterminées.

Une méthode d'analyse a été développée pour les poutres mixtes continues avec interaction incomplète par **Wu, Y C, SLUTTER, R G et Fisher, J W [5]**. Le procédé est général et peut être utilisé pour tout système de poutre mixte continu. Cette analyse a permis de comprendre le comportement élastique et plastique de tous les éléments qui constituent la poutre mixte continue. Les résultats théoriques ont été comparés avec les résultats expérimentaux et une corrélation satisfaisante a été obtenue. Des recommandations concernant le nombre et l'espacement des connecteurs de cisaillement, ainsi que la quantité et la disposition de l'armature longitudinale dans la zone de moment négatif des ponts mixtes continus ont été présentées.

Dans la pratique, le dimensionnement des poutres mixtes acier-béton est basé sur l'hypothèse que l'effet du glissement longitudinal de la surface de contact acier-béton peut être négligé. Pour les types de poutres les plus couramment utilisés, cette hypothèse a été vérifiée par **ROGER P** et **JOHNSON** en 1978 [6], expérimentalement et numériquement.

Il y a, cependant, deux cas qui méritent d'être mentionnés :

- Les effets du glissement sont manifestement plus importants si le nombre des connecteurs dans la poutre est inférieur au le nombre nécessaire à développer la résistance ultime en flexion d'une poutre calculée par la théorie du calcul plastique simple.
- Une réduction du coût peut être obtenue.

Les effets de l'utilisation d'une connexion partielle sur la résistance et la déformation des poutres dans le bâtiment ont été étudiés en 1975 et des règles de dimensionnement ont été proposées. Les résultats ont montré que le glissement maximal augmente en fonction de l'augmentation de la portée des poutres (pour un degré de connexion donné), les connecteurs doivent donc être plus ductiles pour être capables de supporter un glissement plus grand en conservant le même niveau de sollicitation. Pour cette raison, l'utilisation de la connexion partielle a été proposée seulement pour des poutres de portées inférieures à 20 m, ce qui, en pratique, limite leurs utilisations aux bâtiments.

Une étude préalable, concernant la variation du glissement maximal en fonction de la portée au moyen de la loi d'interaction incomplète linéaire et pour des poutres de pont de portée variant entre 20 et 200 m, a montré que, pour un niveau de connexion donné, le glissement maximal augmente avec la portée jusqu'à 50 m environ et qu'il diminue ensuite. L'explication donnée à ce phénomène est que, dans ce domaine de portées, les dimensions de la dalle en béton de la poutre mixte n'augmentent pas avec la portée de manière aussi importante que les dimensions de la section en acier. Le cisaillement longitudinal total qui doit être transmis à la dalle pour une demi-travée ne peut dépasser la résistance à la compression de la dalle à mi- travée. Cette résistance est pratiquement indépendante de la portée, alors que le nombre de connecteurs dans une demi-travée augmente avec la portée, du fait que ce nombre est déterminé par l'ensemble des efforts tranchants et en respect des règles constructives qui limitent l'espacement maximal entre les connecteurs. Il est encore tôt de proposer des règles de dimensionnement pour l'application de la connexion partielle à des poutres d'une portée supérieure à 20 m, et pour les

ponts, les avantages sont dans tous les cas minimes, du fait que le nombre minimal de connecteurs est déterminé en chaque point par un calcul à la fatigue, comme c'est déjà le cas en travée pour les ponts autoroutiers en Grande-Bretagne.

En 1980, **YASUNORI ARRZUMI** et **SUMIO HAMADA** [7] : ont présenté une analyse des poutres mixtes non linéaires par les éléments finis. Un modèle non linéaire simplifié est proposé dans cette démarche. Ceci est appliqué à l'analyse élastique-plastique de poutres de béton armé et des poutres mixtes avec une interaction incomplète. Les résultats numériques sont comparés avec les résultats expérimentaux et des résultats déjà publiés. Le comportement élasto-plastique des poutres mixtes avec connexion partielles sans connecteurs dans la région de moment de flexion négatif est discuté.

Lors de la conception des poutres mixtes acier-béton, les problèmes qui doivent être pris en considération par les concepteurs sont le comportement de la poutre (la méthode utilisée dans les analyses), le comportement des connecteurs et leurs influences sur le comportement de la poutre mixte. Dans leurs recherches, **Zhu Pinru** et d'autres [8] : ont tenté de répondre à ces questions à travers une étude théorique et expérimentale à l'échelle réelle. Les résultats obtenus sont satisfaisantes.

En 1992, **Angelo Marcello Tarantino** et **Luigino Dezi** [9] : ont présenté une méthode pour l'analyse viscoélastique des poutres mixtes acier-béton avec connecteurs de cisaillement flexibles. La méthode proposée détermine les effets de la déformation de dispositif de connexion sur la migration des contraintes de la dalle de béton à la poutre en acier, qui se produit avec le temps en raison du fluage, et le retrait d'une partie en béton. La formulation mathématique de ce problème implique les équations d'équilibre, de compatibilité, et des relations constitutives, à savoir, la loi élastique pour la partie en acier et une loi de fluage de type intégrale pour la partie en béton. Ainsi, le problème est gouverné par un système de trois équations couplées, dont deux sont des équations de type différentielles.

N. Gattesco [10] : a porté une attention particulière aux phénomènes de fatigue dans la connexion. Si chaque partie de la structure se comporte de manière élastique, le problème peut être confronté à l'approche classique de la fatigue de charge/duré de vie, mais pour des poutres de longue portée, le glissement à l'interface peut atteindre des valeurs qui impliquent une

déformation plastique du connecteur. Dans ce cas, la rupture de certains connecteurs à cause de la fatigue avec un faible nombre de cycles peut se produire. En raison de la redistribution de charge de cisaillement le long de la connexion, l'approche charge/duré de vie doit être substituée par une approche déformation/duré de vie.

La progression du glissement de chaque connecteur au-delà de la plage élastique dépend du comportement de l'ensemble de la structure. La résistance à la rupture du connecteur pour un faible cycle de fatigue a été déterminée expérimentalement en utilisant un essai de cisaillement. Huit tests ont été effectués pour différentes valeurs de glissement.

En 1999, **Zdenek P. Bazant** et **Jan L. Vitek** [11] : ont étudié l'effet de la taille de goujon sur la résistance nominale de poutres mixte acier-béton causé par le cisaillement des connecteurs. L'étude des goujons soudés est effectuée par deux approches différentes :

Une analyse de type de rupture par l'énergie qui se dégage à cause de la propagation de la zone de rupture des connecteurs le long de la poutre.

Une solution directe à partir des diagrammes charge/flèches en utilisant des équations différentielles de la théorie de flexion des poutres.

Si les connecteurs sont géométriquement misent à l'échelle (redimensionné) avec la poutre, l'effet de taille dans la rupture par cisaillement des connecteurs (méso-échelle) est superposé à l'effet de taille due à la propagation de la zone de rupture de connecteur le long de la poutre (macro-échelle). Si les tailles des connecteurs et des zones d'interfaces par connecteur ne sont pas redimensionnées avec les dimensions globales de la poutre mixte, la loi de l'effet de la taille proposée par Bazant en 1984 est applicable. Une comparaison avec les résultats expérimentaux est présentée.

Slobodan Ranković et **Dragoljub Drenić** [12] : ont étudié la résistance des connecteurs dans les poutres mixtes acier-béton. Le mode de rupture possible et les critères de base utilisés pour la définition de la résistance de connecteur de cisaillement à dalles mixtes et dalles mixtes avec tôle profilée sont étudiés. Une analyse particulière a été faite sur les formules de l'EC4 dans la région de résistance de connecteur de cisaillement : élastique et rigide. Pour tous les règlements présentés, une analyse comparative avec la norme « JUS » est effectuée. Outre l'examen comparatif de la réglementation, une étude sur la résistance des connecteurs de cisaillement dans les poutres mixtes est exposée.

En 2003, **Stéphanie Buzon** [13] : a effectué une modélisation du comportement à long terme des poutres mixtes isostatiques. Les effets du fluage et du retrait du béton sont pris en compte dans le cadre de la formulation incrémentale de la viscoélasticité linéaire. Il a également tenu compte du glissement entre la dalle et la charpente métallique à la souplesse du dispositif de connexion. Ainsi, progressivement avec le temps, le problème s'exprime sous la forme d'une équation différentielle du second ordre dont l'inconnue est le glissement. Les résultats numériques présentés illustrent la capacité et l'intérêt de l'approche proposée.

Valente et P. J. S. Cruz [14] : ont effectué une série de tests expérimentaux pour étudier la connexion de cisaillement entre l'acier et le béton léger à haute résistance « HSLWC ». L'étude expérimentale implique des essais sur goujons avec des diamètres de 19, 22 et 25 mm. Grâce à ces tests, il est possible de caractériser les différents types de connexion et d'évaluer la capacité de charge et de déformation.

En 2005, **Qing Quan Liang, Brian Uy, Mark A. Bradford et Hamid R. Ronagh** [15] : ont étudié la résistance au cisaillement des poutres mixtes acier-béton simplement appuyées. La méthode des éléments finis est utilisée pour analyser ce type de poutres et un modèle tridimensionnel a été développé en tenant compte de la géométrie et de la non linéarité de matériau. Les résultats obtenus ont été comparés à des résultats expérimentaux et une grande concordance a été observée.

Dans la conception des poutres mixtes, les connecteurs de cisaillement « goujon à tête » sont couramment utilisés pour transférer les forces de cisaillement longitudinal à travers l'interface acier-béton. Les notions de base sur le comportement charge-glissement ont été obtenues par des essais.

En 2005 toujours, **Dennis Lam, et Ehab El-Lobody** [16] : ont développé un modèle en éléments finis pour simuler l'essai push-off. Une fois le modèle validé une comparaison en utilisant les codes BS5950, EC4, et AISC a été effectuée.

Des études paramétriques utilisant ce modèle ont été élaborées pour étudier les variations dans la résistance du béton et le diamètre de goujon de cisaillement. Ces modèles ont permis de mieux comprendre les différents modes de rupture observés pendant les essais expérimentaux et donc l'efficacité des goujons à tête dans une dalle en béton armé.

En 2006, **G.S. Veríssimo & d'autres** [17] : ont développé une nouvelle conception du connecteur de cisaillement. Leur modèle se compose d'une nervure en acier avec une forme dentelée qui fournit une résistance au cisaillement longitudinal et renforce la liaison entre la

dalle en béton et le profilé en acier. Aussi, la découpe des ouvertures de connecteur facilite la disposition des barres transversales de renforcement. L'installation des connecteurs est simple et nécessite seulement une procédure de soudage. En raison de sa capacité de charge, le connecteur dentelé est capable de remplacer un groupe de goujons.

Dans cette étude, ce nouveau connecteur a été analysé et comparé aux autres connecteurs existants. L'influence des différents paramètres géométriques et mécaniques sur la résistance de ce connecteur a été effectuée. Il s'est avéré que ce type de connecteur présente une bonne performance mécanique, associé à des avantages constructifs et économiques.

Toujours en 2006, **Shunzhi Qian** et **Victor C. Li** [18] : ont effectué une étude expérimentale sur l'influence de la ductilité du matériau béton sur la réponse au cisaillement de connexions de goujon, y compris le mode de rupture, la résistance maximale et la capacité de glissement. Une série des échantillons de push-out ont été testés pour cette évaluation en utilisant une fibre composite renforcée à base de ciment « ECC » (ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE). Le béton renforcé par des fibres d'acier « SFRC » (STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE) et le béton ordinaire (armé) ont été adoptés comme des matériaux de référence. Les résultats expérimentaux montrent que la connexion de goujon avec ECC rend le mode de rupture plus ductile avec une plus grande résistance et capacité de glissement par rapport à des connexions avec d'autres matériaux en béton, en plus d'une intégrité structurelle améliorée. La ductilité supérieure d'ECC a été clairement reflétée par le développement de microfissures près des goujons, en supprimant le mode de rupture localisée tel observé dans d'autres matériaux en béton. Cette amélioration significative de la ductilité montre que l'utilisation d'un matériau ECC peut être efficace dans la redistribution des efforts de cisaillement entre les goujons à tête et dans l'amélioration de l'action mixte entre les poutres en acier et les dalles en béton.

Dans son étude **Dr. Khalel I. Aziz** [19] : a présenté un développement d'une méthode d'analyse de transaction avec une poutre continue composite multicouche pour matériau linéaire et le comportement de connecteur de cisaillement, dans lequel le glissement (déplacement horizontal) et le soulèvement (déplacement vertical) sont pris en considération. La surface de section transversale de la poutre est constituée de trois couches différentes en épaisseur et en rigidité au cisaillement. L'analyse est basée sur une approche présentée par Roberts, essentiellement pour une poutre simplement supportée de deux couches (multicouches),

soumise à des charges uniformes et ponctuelles, qui prend en compte le déplacement horizontal et vertical dans les interfaces. L'analyse a conduit à une série de huit équations différentielles contenant des dérivés du quatrième et du troisième ordre. Un code de calcul a été basé sur la présente analyse est développé en utilisant la méthode des différences finis. Une comparaison entre les résultats trouvés et ceux des autres chercheurs a montré une bonne convergence.

Les poutres mixtes continues sont des éléments très importants dans la construction de bâtiments de grande hauteur, des structures à plusieurs étages et des ponts en raison des grands avantages qui peuvent être obtenus à l'aide de ce genre des éléments structurels, tels que la réduction des moments de la poutre et la réduction de la flèche. Les modèles sont considérés comme étant des poutres continues constituées de trois couches. La surface de section transversale est constituée d'un matériau composite comprenant la couche intermédiaire de béton et un matériau supérieur et inférieur avec une résistance élevée à la traction et à la compression (c'est à dire des plaques d'acier ou des poutres en acier).

Mirza, O [20] : a étudié le comportement des connecteurs de cisaillement. Il est important de comprendre la force de cisaillement transmise et le degré de glissement qui se produit à l'interface entre l'acier et le béton. Sachant que dernièrement, l'utilisation des dalles avec profilé trapézoïdale est devenue fréquente pour les immeubles de grande hauteur par rapport aux dalles pleines, car elles peuvent réaliser de grandes portées et exigent moins de béton et de contreplaqué de coffrage. Mais les profilés utilisés pour avoir ces économies peuvent avoir un effet néfaste sur le comportement des connecteurs de cisaillement. Les principaux points traités dans cette recherche sont les suivants :

- Les effets des fibres d'acier comme un système de renforcement des poutres mixtes acier-béton.
- Les effets de la température élevée sur le comportement de connecteur de cisaillement goujon à tête des poutres mixte acier-béton.
- Les effets à long terme sur le comportement des poutres mixtes acier-béton.
- Les effets des régimes de déformation sur le comportement des poutres mixtes acier-béton.
- Les effets de la combinaison de tension axiale et charge de cisaillement sur le comportement des poutres mixtes acier-béton.

Cette recherche se compose de nombreuses études numériques. Elle comprend le comportement mécanique et les différentes conditions de chargement du comportement et de la résistance au cisaillement de connecteur « goujon à tête » pour les poutres mixtes acier-béton.

Le code de calcul basé sur la méthode des éléments finis « ABAQUS » a été utilisé pour comparer les études expérimentales existantes par d'autres chercheurs. Les résultats numériques sont très satisfaisants. Ces études paramétriques ont permis d'élargir le domaine d'application.

F.D. Queiroz et autres en 2009 [21] : ont développé un modèle bidimensionnel en éléments finis pour les poutres mixtes en utilisant « ANSYS ». Divers types de conditions aux limites ont été traités et les différentes typologies de la dalle. Le modèle représente le comportement de toutes les composantes de conception mixte, y compris les barres d'armature (compte tenu de l'effet de la tension de raidissement), la caractéristique de charge/glissement des connecteurs de cisaillement, et les principaux éléments de la poutre à la colonne de connexion. Le modèle a été entièrement vérifié par des comparaisons détaillées par rapport aux résultats expérimentaux et numériques et il a été démontré qu'il est adapté pour des études paramétriques globales du comportement des poutres mixtes.

Isabel B. Valente et **Paulo J.S. Cruz** [22] : ont évalué le comportement de la connexion de cisaillement entre l'acier et le béton léger. Deux types de connecteurs de cisaillement sont étudiés dans la partie expérimentale. Ce sont des goujons à tête avec 19 mm,

22 mm et 25 mm de diamètre de la tige et une plaque avec des ouvertures circulaires. Le test push-out standard, tel que défini dans la norme EN 1994-1-1 est choisi pour cette analyse. Le comportement des connecteurs est analysé en termes de son rapport charge/glissement et les modes de rupture sont identifiés. En outre, la capacité de charge, glissement maximal, glissement élastique et glissement plastique sont déterminées. Certains des essais push-out effectués pour isoler les composantes de connexion acier- béton afin d'évaluer la contribution de chacun. L'ensemble des résultats qui permettent la caractérisation de la connexion entre l'acier et le béton léger sont comparés avec les résultats obtenus par d'autres auteurs avec des échantillons similaires en béton de densité normale.

Dans leurs travaux, **ZHENG Ze - Qun**, **FANG Zhen – Zheng** [23] : se sont orientés vers le comportement non linéaire des poutres mixtes acier-béton. Le logiciel « ABAQUS » est utilisé pour simuler les comportements statiques des poutres mixtes avec différents chargements en tenant compte des caractéristiques mécaniques des connecteurs de cisaillement, de la non-linéarité des matériaux et la non-linéarité géométrique.

En 2010, **O. Dogan** et **T. M. Roberts** [24] : ont étudié les poutres sandwich acier-béton-acier (poutre composite à double peau DSC). Les résultats expérimentaux y compris les forces axiales dans les plaques d'acier et les forces de cisaillement entre les couches sont comparés avec les résultats théoriques. La flexibilité des connecteurs goujons de cisaillement sur les deux faces de traction et de compression est prise en compte dans l'analyse de l'interaction partielle y compris l'influence des forces de frottement entre le béton et les plaques d'acier externes dans les supports et les points de chargement. Les résultats des essais quasi-statiques sur des poutres DSC sont comparés avec les solutions théoriques basées sur la théorie de l'interaction partielle. Cette comparaison a montré que la méthode théorique proposée présente une bonne corrélation avec le comportement réel et peut être utilisé de manière fiable pour l'analyse des poutres DSC simplement appuyées.

En 2011, **Akito POURHAMIDI** [25] : a analysé la construction mixte acier-béton en cherchant les matériaux les plus efficaces c'est-à-dire ceux qui offrent de nombreux avantages comme la diminution du poids de l'ouvrage et l'augmentation des hauteurs utiles sous l'ouvrage. Cependant dans la construction mixte classique, le béton n'est utilisé qu'en zone comprimée. En utilisant du béton comprimé, donc résistant en zone tendue, la poutre mixte Préflex permet d'optimiser au mieux la participation des matériaux.

La poutre Préflex est une poutre métallique laminée en acier, qui est soumise en atelier à une pré-flexion où la membrure tendue est alors enrobée de béton. En relâchant la pré-flexion après durcissement du béton, ce dernier est pré-comprimé et doit rester comprimé pendant la durée de vie de l'ouvrage le rendant ainsi efficace en zone tendue. On obtient une poutre mixte aux caractéristiques mécaniques améliorées.

La complexité des phénomènes due au procédé de fabrication de la poutre Préflex nécessite une attention particulière : Pour une même section, selon l'usinage, les caractéristiques mécaniques varient. Le premier objectif de cette étude a été donc de répertorier, d'analyser de déterminer l'influence des différents paramètres (acier, béton, retrait, fluage, connexion, température, force de pré-flexion...) sur le comportement de la poutre.

Malgré ses 60 ans d'existence, l'utilisation de ce type de poutre mixte reste faible. Les difficultés liées au calcul et à la fabrication de la poutre Préflex rendent difficile l'utilisation de ce procédé. Le deuxième objectif de cette étude était la création d'un outil simple mais complet de calcul des poutres Préflex sous Excel. Cet outil permettra la vérification et le dimensionnement des poutres Préflex de manière claire évitant ainsi au concepteur de se lancer dans des calculs complexes.

Amjad Hameed Abdul-Razaq [26] : s'est consacré dans sa recherche sur les poutres acier-béton-acier connue aussi sous le nom « les poutres Sandwich ». Ces dernières font partie des « nouveautés » dans la conception des structures modernes qui aident les interactions entre le béton et l'acier.

Toutefois, ces éléments de structure sont nouveaux et sont différents des poutres en béton armé standard. La poutre de type sandwich peut être créée en remplaçant les principales barres d'acier longitudinales qui supportent la tension et la compression par des plaques d'acier liées (plaque supérieure et plaque inférieure) avec des connecteurs (goujons) qui remplacent les bandes dans la poutre standard en béton armé et qui remplissent tous les espaces entre les deux plaques de béton.

Dans cette recherche, trois cas des poutres sandwich avec les dimensions suivantes : (150 mm de largeur * 250 mm de hauteur * 1300 mm de longueur) sont étudiées et les résultats obtenus sont comparés avec ceux trouvés pour une poutre en béton ordinaire avec les dimensions suivantes : (150 mm largeur * 300 mm de hauteur * 1300 mm de longueur) avec différentes conditions aux limites. Tous les résultats expérimentaux ont été comparés aux résultats théoriques à l'aide de la méthode des éléments finis « ANSYS » où une bonne concordance a été remarquée.

En 2012, **Suhaib Yahya Kasim Al-Darzi** et **Inas Mahmood A.H.Al-Juboory** [27] :

Ont présenté un nouveau type de connecteur de cisaillement « Perfobond » (plaque perforée).

Ce nouveau connecteur est testé dans la conception et la construction de six poutres mixtes acier-béton séparées en trois groupes formés à partir de section en acier standard

« W4X13 », avec une longueur totale de 1300 mm. La dalle de béton connectée à la section de l'acier à l'aide de trois types de connecteurs de cisaillement mécaniques à savoir ; connecteur goujon et connecteur Perfobond avec trou circulaire régulier en plus le type de connecteur Perfobond avec trou triangulaire nouvellement proposé. Les poutres sont testées expérimentalement avec différents types de chargement pour étudier les effets de type de connecteur sur le comportement de poutre au stade de fatigue en termes de flèche à mi-portée et le glissement aux extrémités des poutres testées. Un modèle tridimensionnel non linéaire en éléments finis est développé avec le logiciel « ANSYS » pour simuler la poutre testée jusqu'à la rupture. Les résultats ont montré que les poutres mixtes construites avec des connecteurs Perfobond triangulaires nouvellement proposés ont développé un pourcentage de résistance plus

élevé que ceux avec des connecteurs goujon ou le connecteur de Perfobond avec trou circulaire régulier. La modélisation du modèle numériquement a validé par comparaison avec les résultats expérimentaux des différences de résistances ultimes (0,9% à 5,7%) pour les connecteurs Perfobond avec trou circulaire régulière et (11,9% à 19,2%) pour les connecteurs goujon.

Dans leurs travaux, **Amer M. Ibrahim** et **Saad k. Mohaisen** et **Qusay W. Ahmed** [28] : ont réalisé une analyse en utilisant la méthode des éléments finis « non linéaire » pour étudier le comportement jusqu'à la rupture des poutres mixtes acier-béton simplement appuyées avec précontrainte extérieure, dans laquelle une dalle en béton est connectée avec une poutre acier en I au moyen des connecteurs de cisaillement goujons à tête, soumise à une charge statique de façon symétrique. Le code de calcul « ANSYS » version 12.0 a été utilisé pour analyser le modèle tridimensionnel. Cette étude comporte :

- Le comportement charge-flèche.
- La déformation dans le béton.
- La déformation dans la poutre d'acier et les modes de rupture.

L'étude est consacrée au non linéarité du matériau et à la géométrie. Trois modèles ont été analysés afin de vérifier l'efficacité du modèle et les résultats obtenus sont comparés avec les résultats expérimentaux.

L'utilisation de structures mixtes est de plus en plus présente dans les constructions civiles. Les poutres mixtes acier-béton, en particulier, sont des structures constituées de deux matériaux : un profilé d'acier situé principalement dans la région de tension et une section de béton situé à la zone coupe transversale de compression, tous les deux reliés par des dispositifs métalliques connus comme connecteurs de cisaillement. Les fonctions principales de ces connecteurs permettent la connexion à l'interface poutre-dalle, pour limiter le glissement longitudinal et le soulèvement à l'interface des éléments et de prendre des forces de cisaillement. Tout cela, a poussé **P.S.Patil**, et **M.G.Shaikh** [29] en 2013 à présenter des modèles numériques tridimensionnels des poutres mixtes acier-béton pour simuler leur comportement structurel, et spécialement sur l'interface poutre dalle. Les simulations ont été réalisées en utilisant la version 14.0 du code « ANSYS », basé sur la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux prévus par les normes, soit des travaux expérimentaux ou soit ceux trouvés

dans la littérature. Cette comparaison a montré que l'approche numérique suivie est un outil valable dans l'analyse de performance des poutres mixtes acier béton.

Ali Shariati et d'autres [30] : ont présenté une étude expérimentale pour étudier le comportement des connecteurs de cisaillement d'angle encastré dans une dalle de béton à haute résistance « HSC ». Huit échantillons push-out ont été testés couvrant différentes géométries des connecteurs d'angle de cisaillement. En plus de l'étude expérimentale, la précision des équations disponibles pour estimer la capacité de charge des connecteurs d'angle est également évaluée pour les angles intégrés dans HSC. Les résultats montrent un comportement de ductilité insuffisant pour les connecteurs de cisaillement à angle intégrés dans

HSC. Néanmoins, les connecteurs d'angle présentent un bon comportement dans le cas des dégradations de la résistance sous charge cyclique.

Tous les échantillons ont subi une rupture de type fracture d'angle et montrent une dégradation de la résistance très faible (0,1% à 1,4%) quand ils ont été soumis à une faible charge de fatigue cyclique. Cette étude conclut également que les équations disponibles actuellement déterminent la capacité de cisaillement de connecteurs d'angle intégrés dans HSC. La capacité ultime est soit conservatrice, soit surestimée.

Chapitre II

Généralités sur les constructions mixtes acier-béton

Chapitre II : Généralités sur les constructions mixtes acier-béton

II-1 Introduction :

La combinaison la plus importante et la plus fréquente de matériaux de construction que l'on rencontre est celle qui concerne l'acier et le béton avec des applications dans les bâtiments commerciaux à étages multiples, les usines et les ponts. Dans les systèmes structuraux, l'acier et le béton peuvent être utilisés de manière composée, par exemple des noyaux de béton entourés par des profils creux en acier, aussi bien que comme structures mixtes, dans lesquelles les éléments en acier et en béton agissent en commun de manière mixte.

Ces deux matériaux, essentiellement différents, sont complètement compatibles et complémentaires vis-à-vis l'un de l'autre. Ils ont le même coefficient de dilatation thermique et son une combinaison idéale pour la résistance. Le béton résistant de manière efficace à la traction. Le béton assure également une protection contre la corrosion et une isolation thermique de l'acier à température élevée, en plus il peut raidir les sections élancées en acier vis-à-vis du flambement et du déversement.

Parmi les sections mixtes les plus utilisée, on distingue

- Les poutres mixtes.
- Les dalles mixtes.
- Les poteaux mixtes.

II-2 Eléments des structures mixtes acier-béton :

Le principe de la méthode des constructions mixtes : les dalles sont portées par des poutres qui s'appuient sur des poteaux. Le plancher est donc constitué des poutres et de la dalle [30]

(figure II.1).

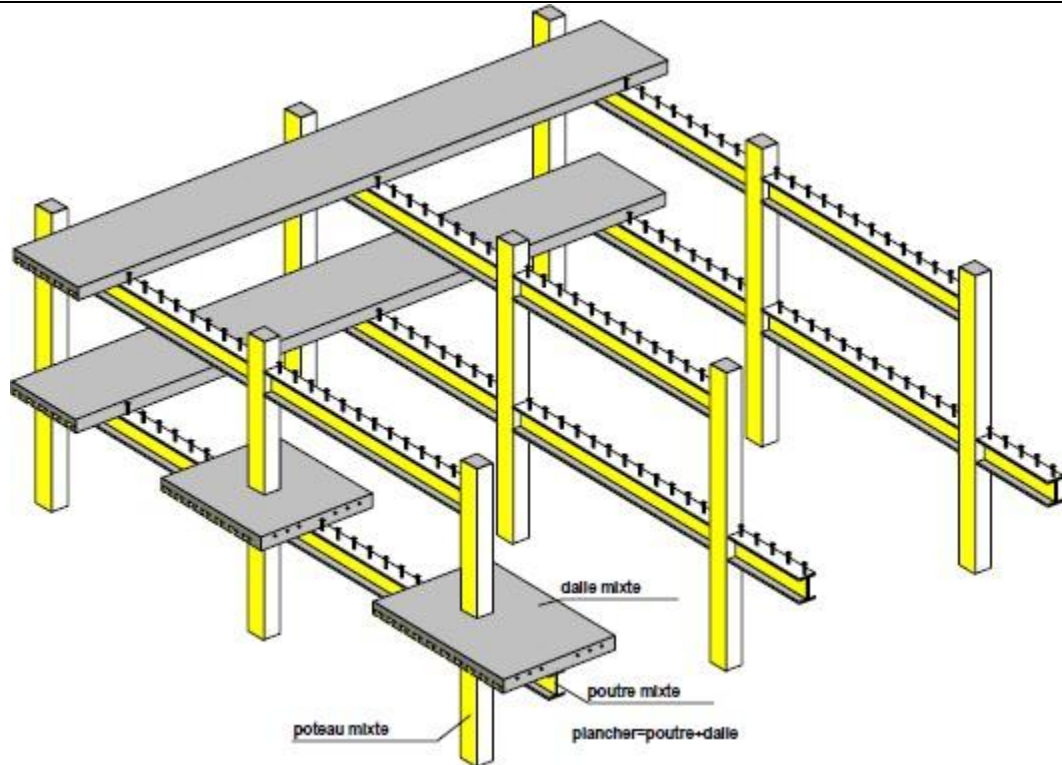


Figure II.1 : Élément de construction.

II-2-1 Poteaux mixte acier-béton :

Ce sont les éléments qui reprennent les charges verticales, ils sont composés essentiellement d'un profilé métallique enrobé totalement ou partiellement de béton, ou d'un tube en acier rempli de béton.

Il existe une grande variété de poteaux mixtes selon leurs sections (carrée, rectangulaire ou circulaire) et de leur degrés d'enrobages en béton (enrobé totalement de béton ou partiellement).

- Les plus courants présentent une section carrée ou rectangulaire, obtenue à partir d'un profilé en acier, de type H ou I, enrobé totalement de béton (figure II.2a).
- Ou partiellement enrobé dans les deux chambres comprises entre l'âme et les semelles (figure II.2b).
- La section cruciforme (figure II.2c) fait appel à deux profilés, identiques ou non, dont l'un est découpé en deux T qui sont ensuite ressoudés de part et d'autre de l'âme du second.

Si l'on revient au cas d'un poteau rectangulaire, totalement ou partiellement enrobé de béton, avec un profilé de grande hauteur, il peut être avantageux de renforcer le profilé dans chaque chambre par un ou plusieurs petits profilés en H ou en T à ailes épaisses, soudés sur l'âme (figure

II.2d).

On rencontre également des poteaux mixtes constitués de profilés creux remplis de béton, de forme carrée, rectangulaire ou circulaire (figure II.2e et II.2f).

Dans certains cas, il arrive qu'un profilé en acier, de section I ou H, soit positionné à l'intérieur d'un profilé creux circulaire (figure II.2g).

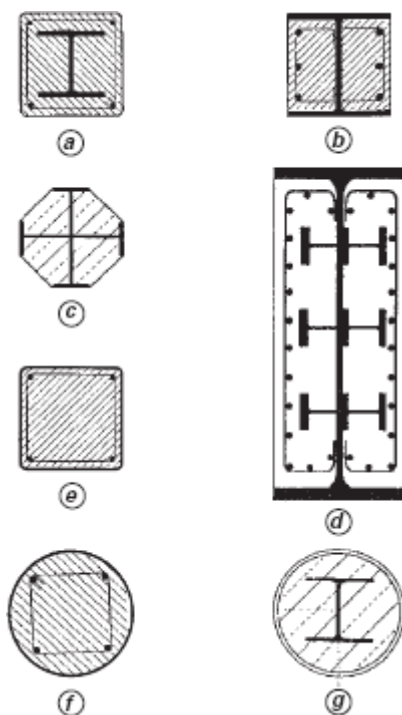


Figure II.2 : Types de poteaux mixtes.

II-2-2 Planchers mixtes acier-béton :

Dans la réalisation de la dalle, il existe plusieurs solutions :

Pour réaliser une dalle pleine, il est possible d'utiliser des éléments préfabriqués qui permettent un montage très rapide tout en évitant la mise en place d'échafaudages.

Des barres d'armatures « en attente » doivent être prévues pour entourer les connecteurs logés dans les encoches ou traverser les fenêtres des dalles, la rigole entre deux dalles et les fenêtres devant être remplies de béton coulé sur place. Une dalle pleine est souvent coulée sur les prés-dalles en béton de faible épaisseur, venant s'appuyer sur les ailes des profilés d'une part et d'autres de la ligne des connecteurs [31].

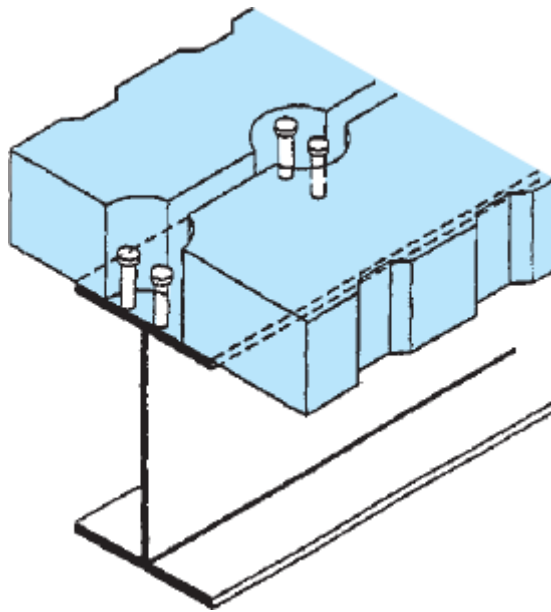


Figure II-3 : utilisations de dalles préfabriquées.

Un autre système de dalle consiste à utiliser un bac en tôle mince profilée à froid (figure II-4) qui sert de coffrage pour couler la dalle, et après durcissement du béton il joue le rôle d'une armature inférieure pour cette dalle [31].

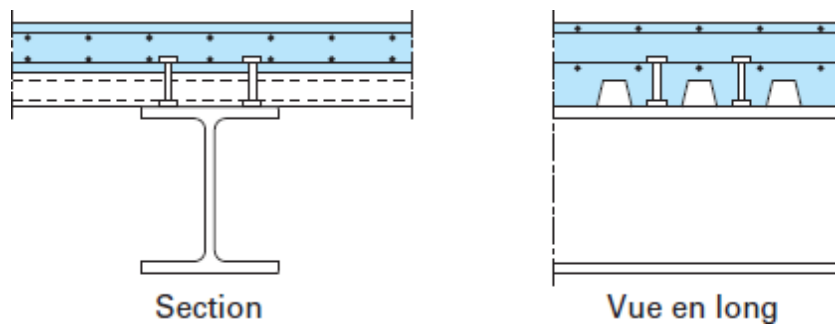


Figure II-4 : profilé connecté à une dalle mixte.

Dans les dalles mixtes, plusieurs possibilités existent pour assurer une liaison entre l'acier et le béton : [30]

- a) La liaison chimique : elle est fragile et peu faible c'est pourquoi elle n'est pas prise en considération.
- b) La liaison de frottement : elle est incapable de transférer des efforts de cisaillement important (figure II.5).
- c) La liaison mécanique : elle est assurée par un bossage de la tôle profilée (figure II.6).
- d) La liaison par ancrage d'extrémité : telle que les goujons à tête, les cornières ou les déformations des extrémités (figure II.7).

Un type de plancher est à signaler, il s'est beaucoup développé dans les pays scandinaves à partir des années 1980. Le système consiste à utiliser des dalles alvéolaires en béton préfabriqué, avec précontrainte par fils, venant prendre appui sur la semelle inférieure de poutrelles métalliques (figure II.8) [31].

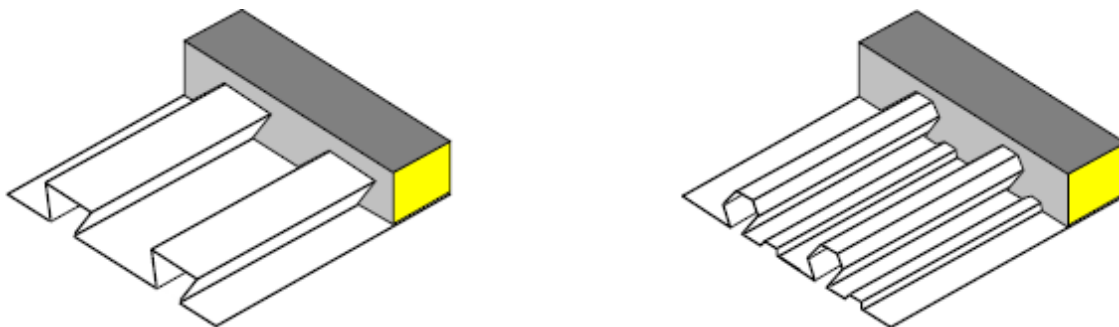


Figure II.5 : liaison par frottement dans les dalles.

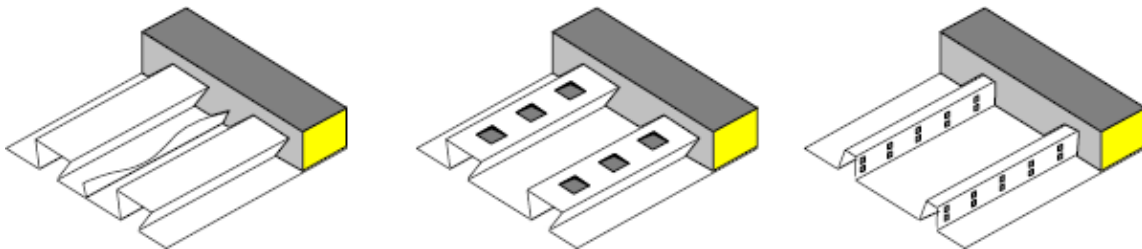


Figure II.6 : liaison mécaniques dans les dalles mixtes.

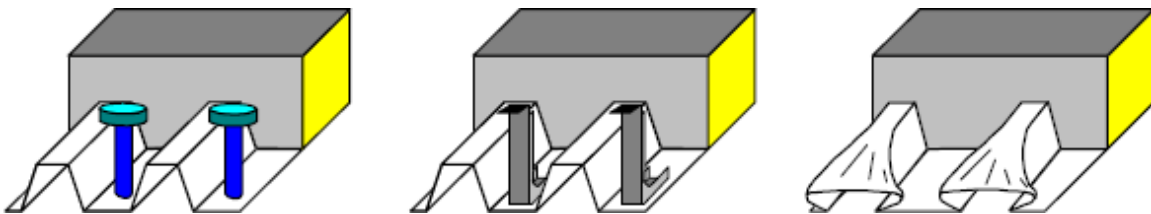


Figure II.7 : Ancrage d'extrémités dans les dalles mixtes.

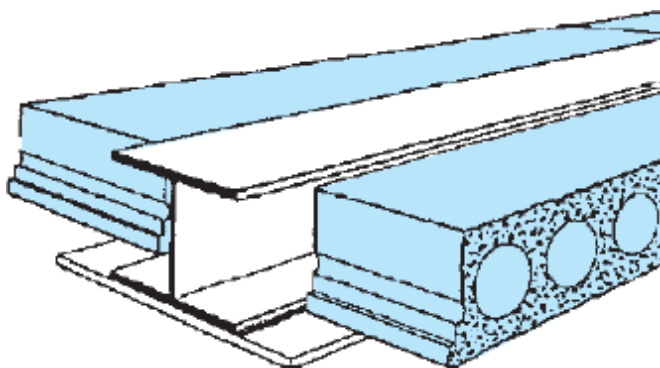


Figure II.8 : dalle alvéolée précontrainte intégrée à une poutre en acier.

Dans un plancher collaborant, la dalle de béton est liée à l'ossature primaire de plancher, c'est pourquoi elle participe à l'inertie globale de celui-ci, grâce aux connecteurs (figure II .9) [32].

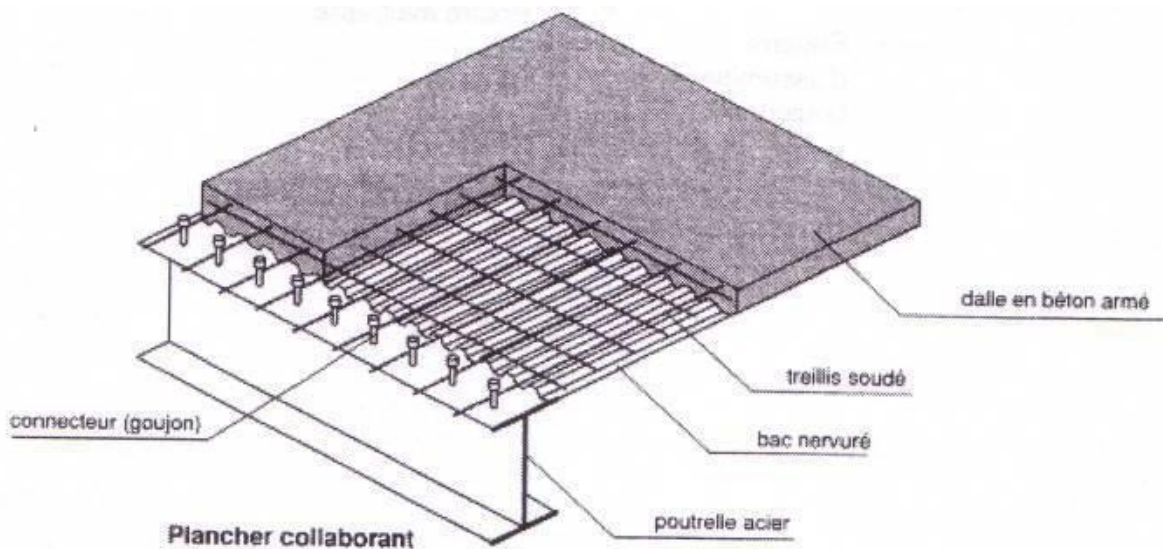


Figure II.9 un plancher collaborant.

II.2.3 : poutres mixtes acier-béton :

Les poutres supportant les dalles et amenant les charges aux poteaux sont le deuxième élément de plancher. Les grandes rigidités et la capacité portante des poutres mixtes permettent la construction de très grandes pièces libre de tous poteaux pour un poids de construction limite.

Jusqu'aujourd'hui, les poutres mixtes ont été construites comme bi-appuyées ou continues, les assemblages rigides aux poteaux ayant été évités par manque de savoir [1].

Pour les parties métalliques, des IPE, HEA, HEB, des U mais également des profilés reconstitués soudés sont utilisés pour les portées communes. Pour un espacement de poteaux encore plus grand, des poutres ajourées ou des treillis peuvent être nécessaires. Dans certains cas, les sections métalliques des poutres peuvent être partiellement enrobées pour leur assurer une

protection au feu (figure II.10) [30].

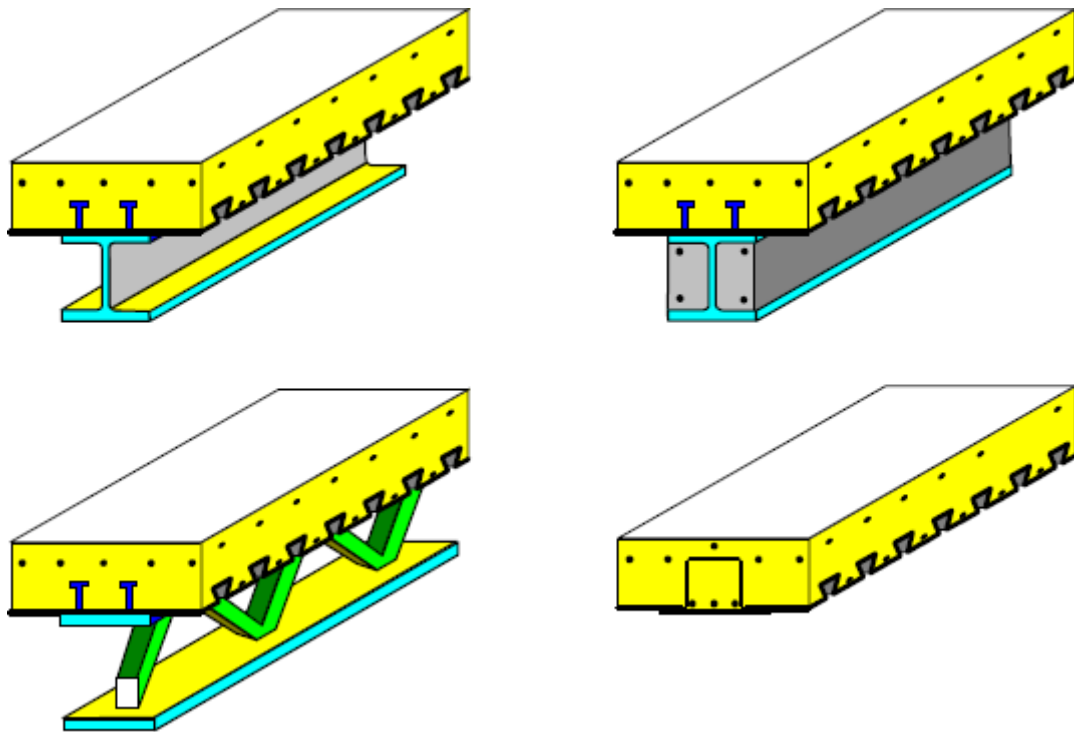
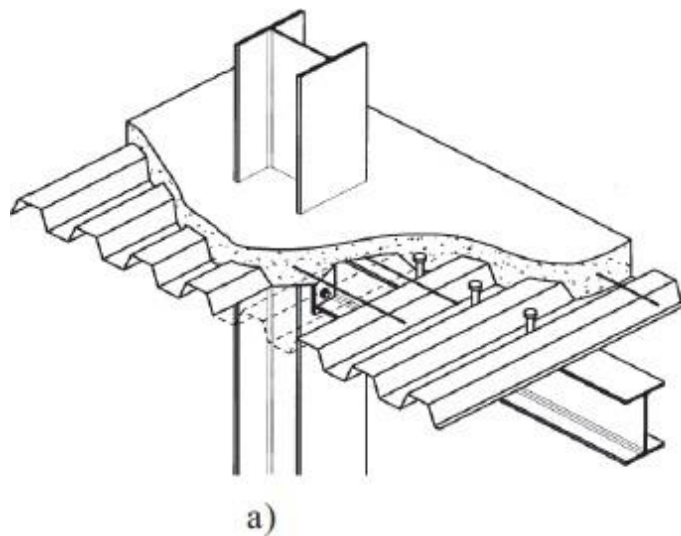


Figure II.10 : solutions classique et innovantes de poutres mixtes.

La solidarisation acier-béton est assurée par [33] :

- L'assemblage classique ou mécanique par connecteurs « goujons, équerres... »
- L'assemblage innovant par des joints adhésifs « colle époxy, polyuréthane,... »



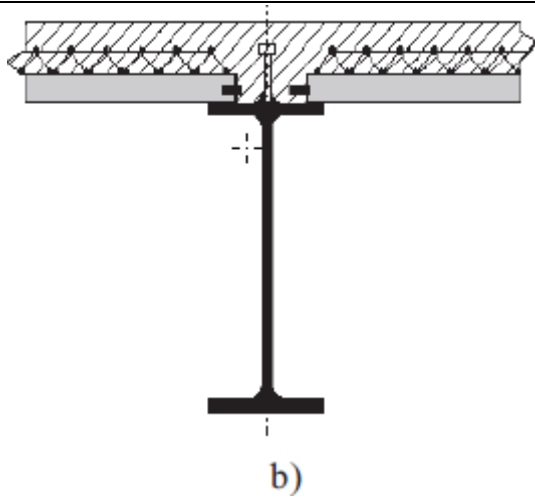


Figure II.11 : poutre mixte :a) avec la tôle profilée, b) avec pré-dalle.

Il existe des différentes sections de poutres mixtes de plancher en présence d'une dalle pleine en béton armés (figure II.12) .La forme en T est la plus classique (figure II.12a) c'est le résultat direct de l'association par des connecteurs de la dalle et d'un profilé en acier (laminé ou reconstitué soudé).

La présence d'un renformis (figure II.12b), bien que qu'assez rare en bâtiment, va se traduire par une plus grande excentricité de la dalle par rapport à l'axe du profilé métallique, d'où une plus grande inertie en flexion et un plus grand moment résistant de la section mixte.

On peut trouver des réalisations avec des poutres métalliques en caisson, éventuellement constituées d'un profilé creux laminé (de géométrie rectangulaire) pour de petites sections mixtes (figure II.12c).

La solution de poutres mixtes partiellement enrobées consiste à remplir de béton armé les deux chambres du profilé (figure II.12d). [30]

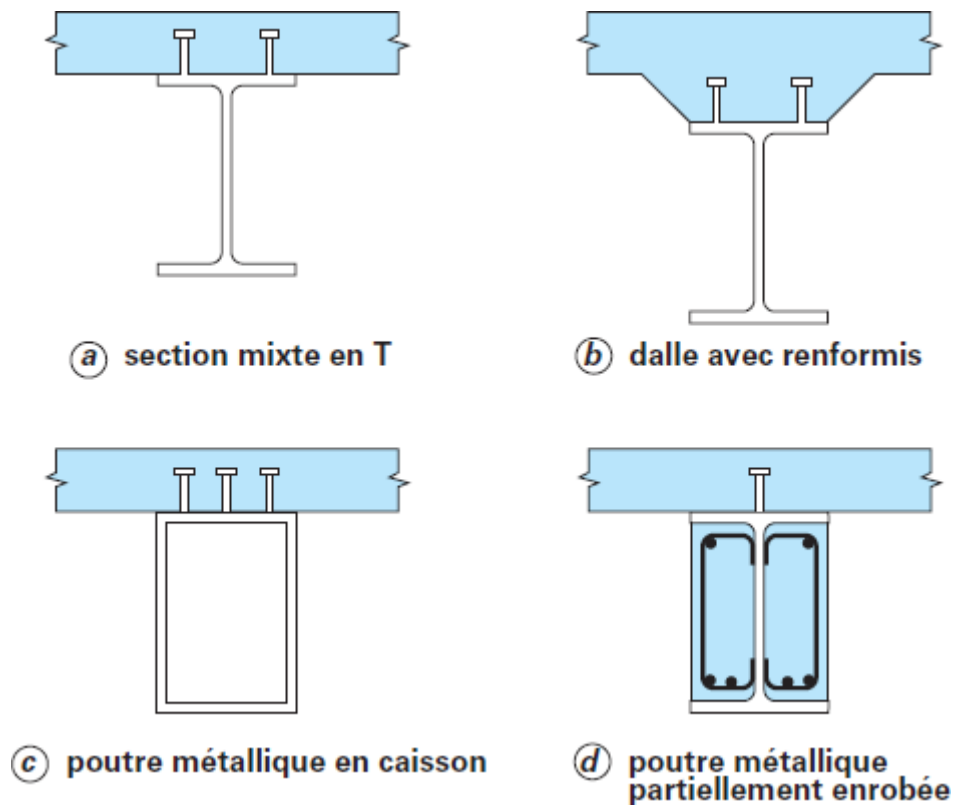


Figure II.12 : différentes sections de poutres mixtes.

II.3. Comportement d'une poutre mixte :

La flexion d'une poutre composée d'un profilé métallique et d'une dalle en béton sans aucune liaison entre les deux ne donne pas une action mixte, car chaque élément fléchit d'une façon indépendante d'où il y'aura un glissement entre les deux matériaux. Dans le cas d'une connexion plus ou moins totale entre les deux matériaux ça nous permet une amélioration de la résistance et de la rigidité. Ceci dépend souvent du rapport entre les dimensions du profilé et de l'épaisseur de la dalle [33].

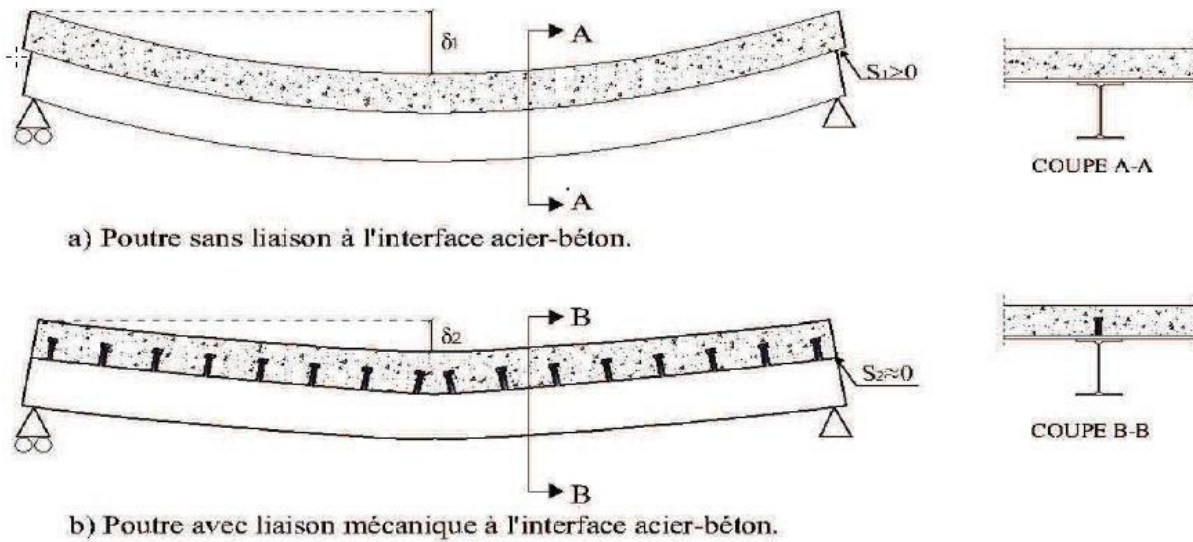


Figure II.13 : principe de fonctionnement de poutre mixte fléchis.

De ce fait, ce qui est tout à fait spécifique du fonctionnement d'un élément mixte, c'est l'association mécanique des deux matériaux, acier et béton par l'intermédiaire d'une connexion située à l'interface des matériaux. Cela va accroître à la fois la rigidité et la résistance de l'élément, dans un cas on suppose qu'il n'y a pas de liaison à l'interface des poutres et dans l'autre on suppose que la solidarisation est parfaite (figure II.14) [31].

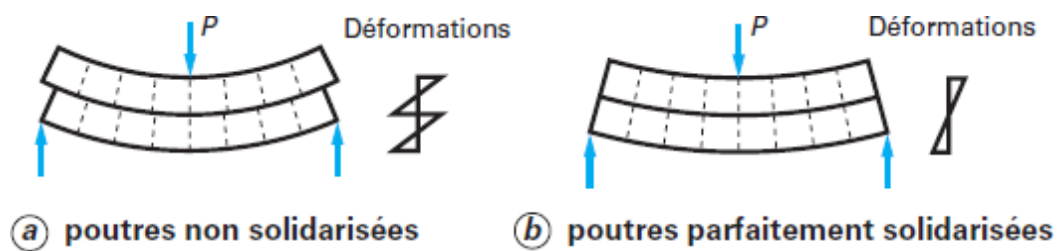


Figure II.14 : Effet de solidarisation entre deux poutres en flexion élastique.

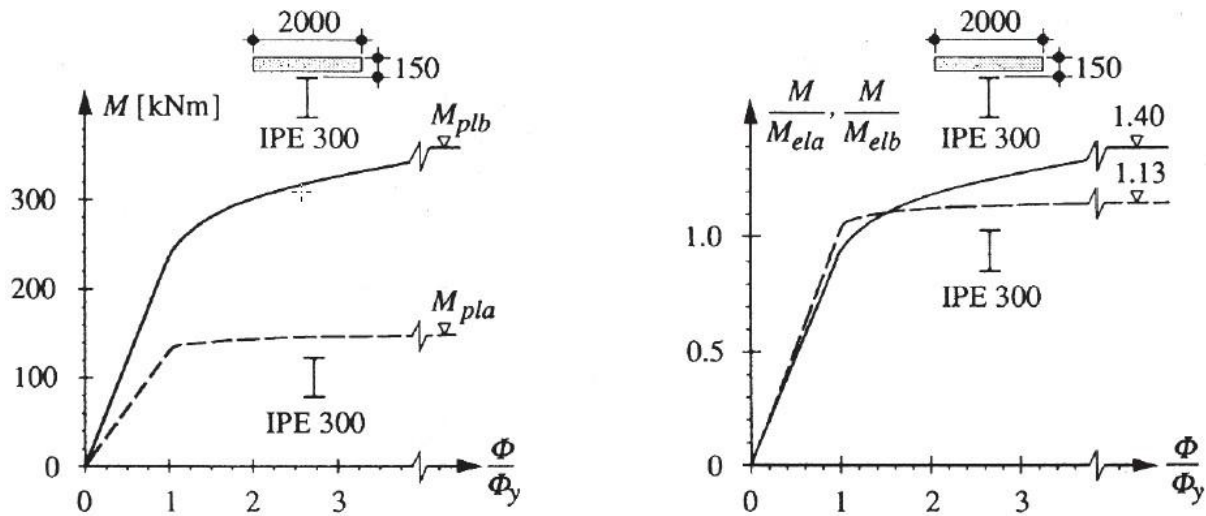


Figure II.15 : Comparaison entre section mixte et non mixte.

Il est à noter l'augmentation de la rigidité et la résistance d'une section mixte en travée par rapport à celle de la section du profilé seule (figure II.15) [34].

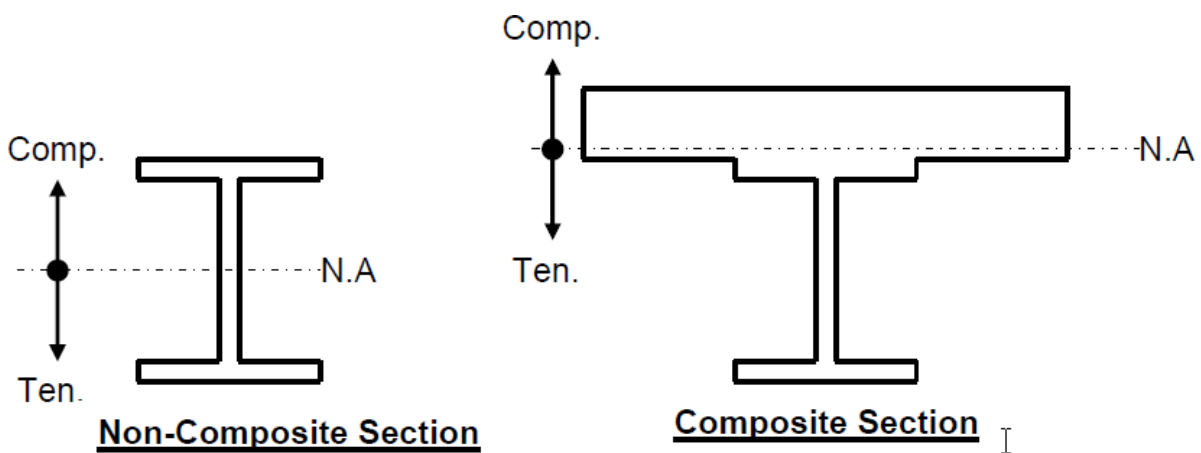


Figure II.16 : localisation de l'axe neutre dans une poutre mixte et non Mixte.

Dans la construction mixte, la dalle est suffisamment liée à la poutre d'acier au moyen des

« goujons » à tête résultant d'une poutre mixte. Le béton agit comme une large "semelle" en compression, tandis qu'une plus grande partie de la poutre en acier agit en traction. Il en résulte une poutre très efficace autant que 40% à 60% poids plus léger d'acier que la construction non-mixte [1].

Il est à noter que l'axe neutre (NA) dans une poutre non mixte est situé au milieu de la section. Ceci indique que la moitié de la section de poutre est en traction et l'autre moitié est en compression. Par le béton, tandis que la traction est effectuée par la poutre en acier [35] (figure II.16).

II.4 Caractéristiques des matériaux utilisés dans la construction mixte :

Les principales caractéristiques des matériaux ci-dessus sont examinées dans ce qui suit : [35]

II.4.1 Acier de construction :

Il existe plusieurs types de classification des aciers, basés soit sur leur composition chimique (aciers alliés, aciers non alliés, etc.) soit sur leurs caractéristiques mécaniques (résistance à la traction, limite d'élasticité). La classification couramment utilisée en construction métallique "Nuance d'acier " qui est définie par sa limite d'élasticité f_y .

L'Eurocode 4 couvre le calcul des structures mixtes fabriquées à partir des matériaux en acier relevant des nuances courantes S235, S275, S355, S460, définies dans les normes européennes EN10025 et EN10113.

Les valeurs de calcul des principales caractéristiques des aciers de construction sont les suivantes :

- Module d'élasticité longitudinale :
- Module de cisaillement : _____
- Coefficient de poisson :
- Masse volumique :

Pour les calculs et la conception, l'Eurocode 3 (EC3) admet l'idéalisation de la relation contrainte-déformation de l'acier de construction sous forme élastique parfaitement plastique, comme indiquée sur la figure 1.

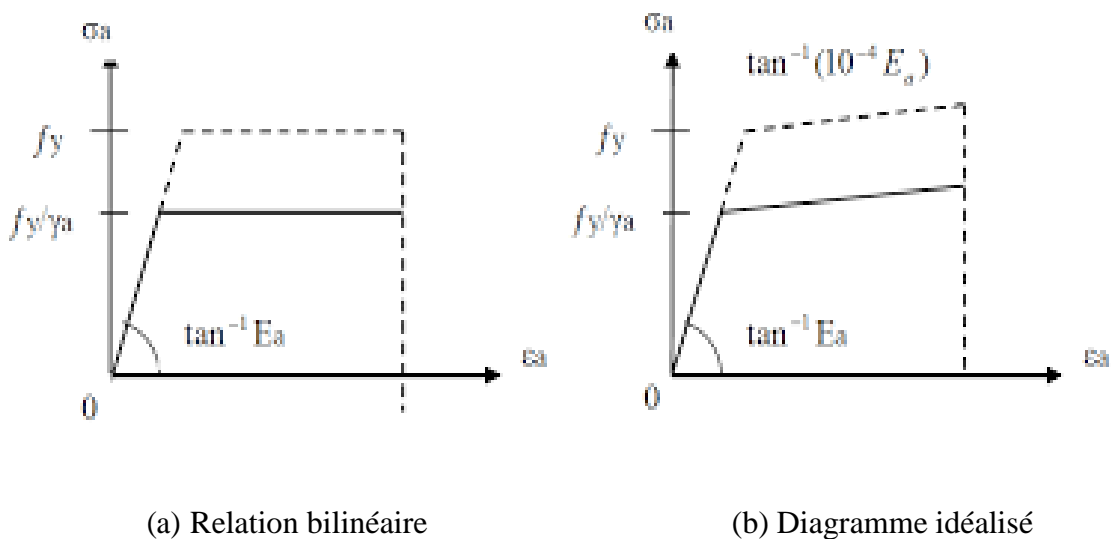


Figure II.17: Relation contrainte-déformation spécifique des aciers de Construction.

Tableau II.1 : Désignation et caractéristiques des principaux aciers de Construction laminés à chaud.

Nuance d'acier			Limite D'élasticité f_y (N/mm ²)	Résistance A la traction f_u (N/mm ²)	Allongement De rupture [%]	Désignation où utilisation
SIA 161 (1979)	SIA 161 (1989)	EN 10027 (1992)				
Fe360	FeE235	S235	235	360	26	Acier doux
	FeE275	S275	275	430	22	Acier pour Profilés creux
Fe510	FeE355	S355	355	510	22	Acier à haute résistance
	FeE460	S460	460	550	17	Acier à grain fin

Tableau II.1 : Désignation et caractéristiques des principaux aciers de Construction laminés à chaud.

II.4.2 Acier d'armature :

Les aciers d'armature se distinguent des aciers de construction non seulement par leur forme, mais également par leur mode de fabrication, leur composition chimique et leurs propriétés mécaniques, ils sont caractérisés par leur limite supérieure ou apparente d'élasticité correspondant dans ce dernier cas à un allongement permanent de 0.2%. Le module d'élasticité lui varie très peu. Il peut être admis comme égal à celui de l'acier de construction (figure II-18).

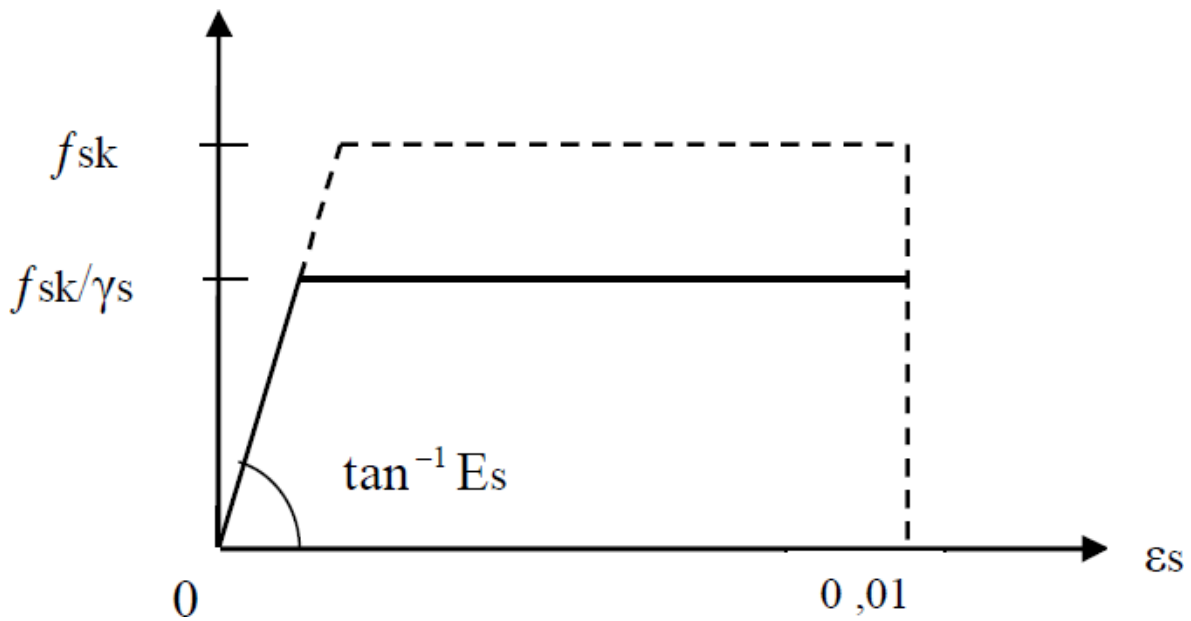


Figure II.18: Diagramme contrainte-déformation de calcul pour l'armature.

Tableau II.2 : Caractéristiques des aciers d'armatures.

Type d'acier		Limite d'écoulement		surface
		Valeur de calcul $f_y [N/mm^2]$	Valeur d'essai $f_{ys} [N/mm^2]$	
Acier d'armature	S325	220	235	Lisse nervurée nervurée
	S500	460	500	
	S550	520	550	

II.4.3. Tôle profilée

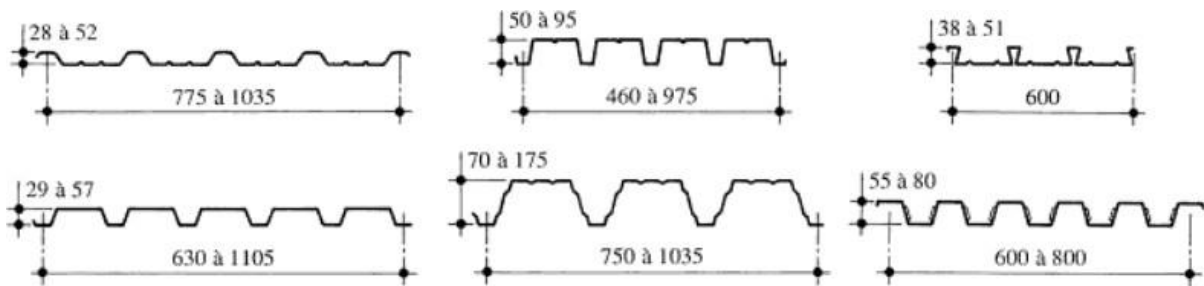
Les tôles nervurée ou les tôles profilées sont des feuilles en acier laminées à chaud et façonnées à froid pour obtenir des formes très variées. Ces tôles sont généralement galvanisées à chaud pour améliorer leur résistance à la corrosion. Les tôles jouent le rôle de plate forme de travail pendant la construction de l'ouvrage, de coffrage lors de bétonnage de la dalle et comme armature inférieure de la dalle mixte. [36].

Tableau II.3 : les tôles profilées conformes à la norme EN10147.

Norme	Nuance		f_{yb} (N/mm ²)
	Ancienne dénomination	Nouvelle dénomination NF EN 10027	
EN10147	Fe E 220 G	SE 220 GD	220
	Fe E 250 G	SE 250 GD	250
	Fe E 280 G	SE 280 GD	280
	Fe E 320 G	SE 320 GD	320
	Fe E 350 G	SE 350 GD	350

- Les valeurs nominales de la limite d'élasticité du matériau de base allant de 220 à 350.
- La relation entre la contrainte et la déformation pour l'acier de construction laminé à chaud s'appliquent aux tôles profilées en acier (comportement élasto-plastique parfait)
- Et En général, l'épaisseur des tôles profilées est comprise entre 0.75 et 1.5mm (selon la norme EN 10143, il est recommandé de choisir une épaisseur nominale de la tôle d'épaisseur 0.02mm environ.

- Le module d'élasticité longitudinale est égal 210KN/mm².
- La tôle principale peut être galvanisée ou pré laquée avant formage ce qui évite un traitement ultérieur pour protéger les surfaces.
- Il existe une très grande variété de tôles profilées sur le marché (figure II.19). Ces tôles se distinguent à la fois par leur formes, leurs hauteurs, leur entre-axe de leur nervures, le raidissage de leurs parois, leurs modes de recouvrement entre tôles contigües et la manière dont l'action mixte avec le béton est assurée.



**Figure II.19 : Exemples des tôles profilées : tôle de façade « bardage » -
Tôle de toiture « couverture »-tôle de plancher « dalle mixte »**

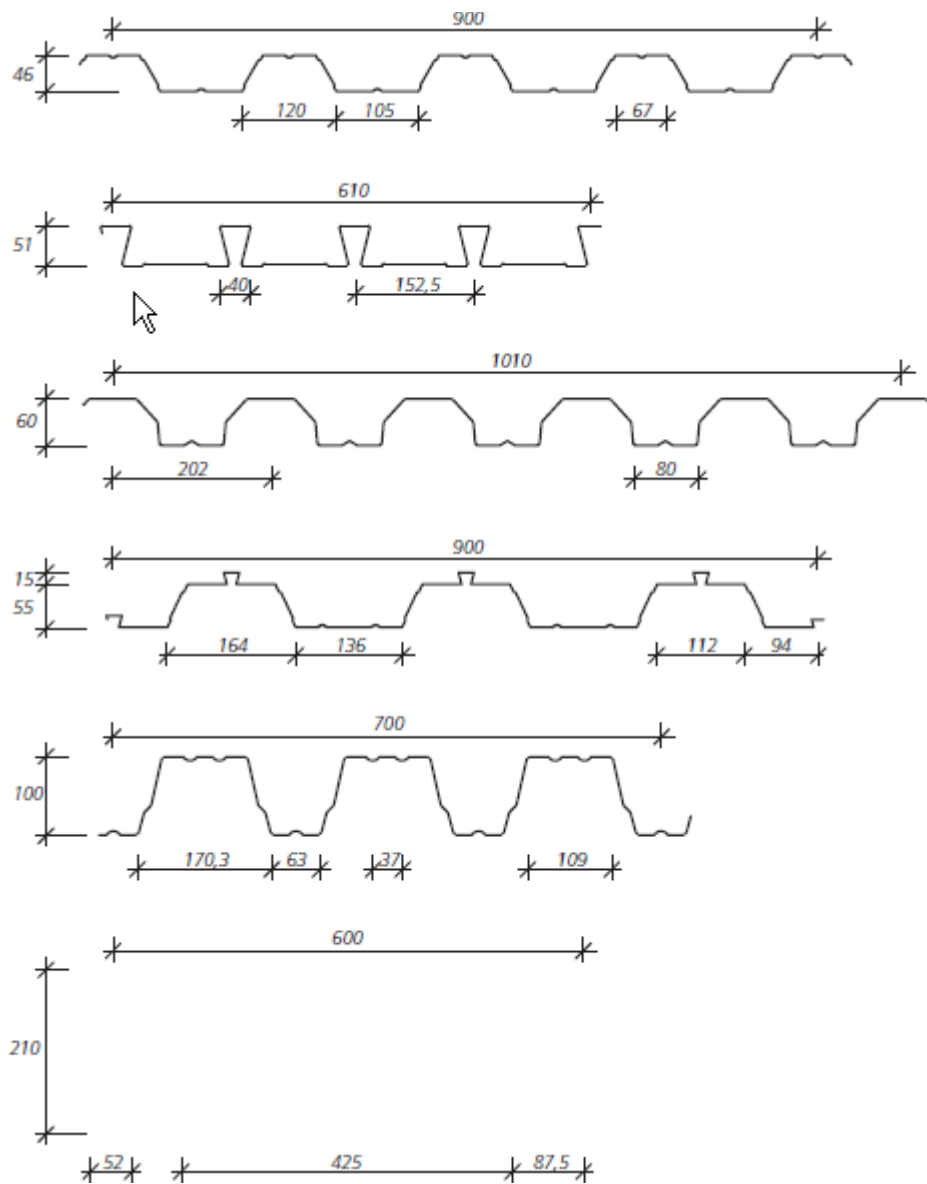


Figure 2.20 : Quelques types de tôles profilées pour dalles mixtes.

II.4.4. Béton :

Le béton est défini par sa résistance à la compression. Nous nous intéressons donc uniquement aux caractéristiques mécaniques du béton puisque ce sont elles qui déterminent sa résistance. La relation contrainte-déformation conventionnelle est définie comme suit :

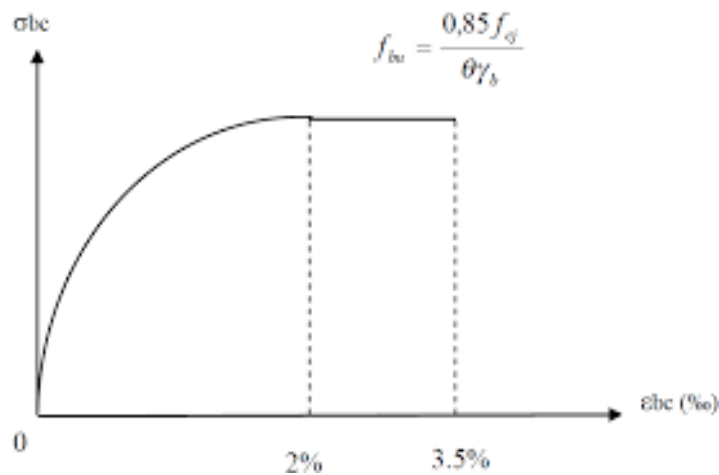


Figure II.21. Diagramme parabolique conventionnel.

Dans le domaine des poutres et dalles mixtes des bâtiments, on utilise habituellement un béton de type C20 à C25. Toutefois, selon la situation, il se peut que l'on utilise un béton de moindre (C16, C18) ou de meilleure qualité (C30, C40, C50).

Le module d'élasticité E du béton est une caractéristique présentant une dispersion non négligeable, qui dépend essentiellement de la résistance à la compression sur cylindre. Les propriétés du béton varient cependant au cours du temps. Le fluage et le retrait sont les principaux phénomènes qui influencent le comportement du béton.

On peut utiliser soit des bétons de masse volumique normale ($\rho = 2400 \text{ Kg/}$), soit des bétons légers (ρ compris entre 1600 et 1800 kg/).

Pour les bétons de masse volumique normale, le tableau 2.4 rassemble les valeurs de trois caractéristiques essentielles selon la classe de résistance du béton, allant de C2.à, C50.

Vu le comportement non linéaire « contrainte-déformation » du béton, y compris pour de faibles niveaux de contrainte, doit être interprété comme un module sécant moyen pour les contraintes de courte durée.

Tableau II.4 : Classes de résistance du béton, valeurs du module sécant d'élasticité (en KN/mm²), résistance caractéristique à la compression (sur cylindres) et résistance caractéristique à la traction moyenne du béton (en N/mm²).

Classe de résistance C des bétons	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
E_{cm} KN/mm²	29	30.5	32	33.5	35	36	37
f_{ck} N/mm²	30	25	30	35	40	45	50
f_{ctm} N/mm²	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1

- Pour les besoins de calcul, il y a lieu de considérer la valeur nominale du coefficient de poisson concernant les déformations élastiques (égale à 0.2) [37]
- On s'intéresse uniquement à sa résistance mécanique à la compression qui est définie par .
La résistance à la traction est négligeable. La figure II.21 présente le diagramme contrainte déformation spécifique d'un béton normal ayant une résistance à la compression à 28 jours sur cube de = 30 Mpa [33].

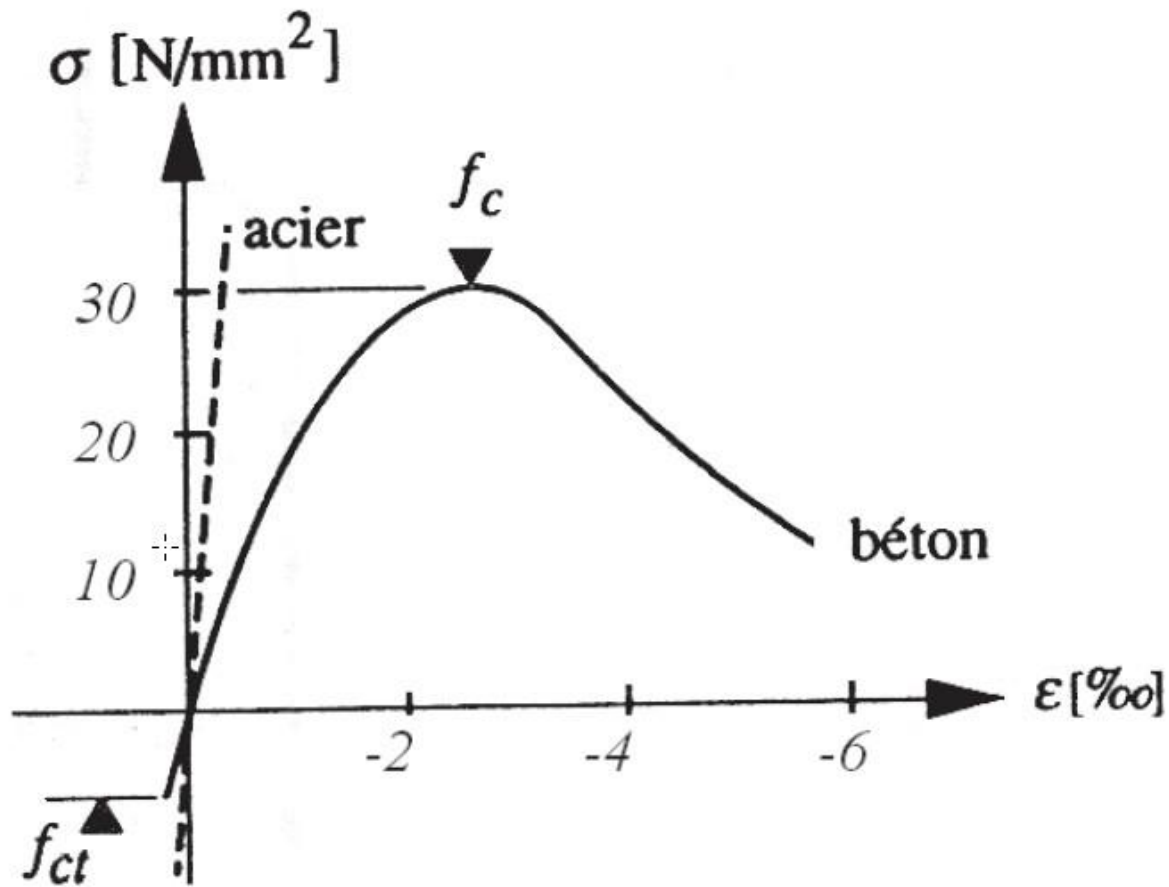


Figure II.22: Contrainte-déformation spécifique d'un béton mesuré sur cube.

- Loi de comportement du béton : En compression pure, le diagramme est constitué par la partie parabolique ci-dessous. Les déformations relatives étant limitées à 2 ‰, En compression avec flexion (ou induite par de la flexion), le diagramme qui peut être utilisé dans tous les cas est le diagramme de calcul dit « parabole-rectangle » [1] (figure2.22).

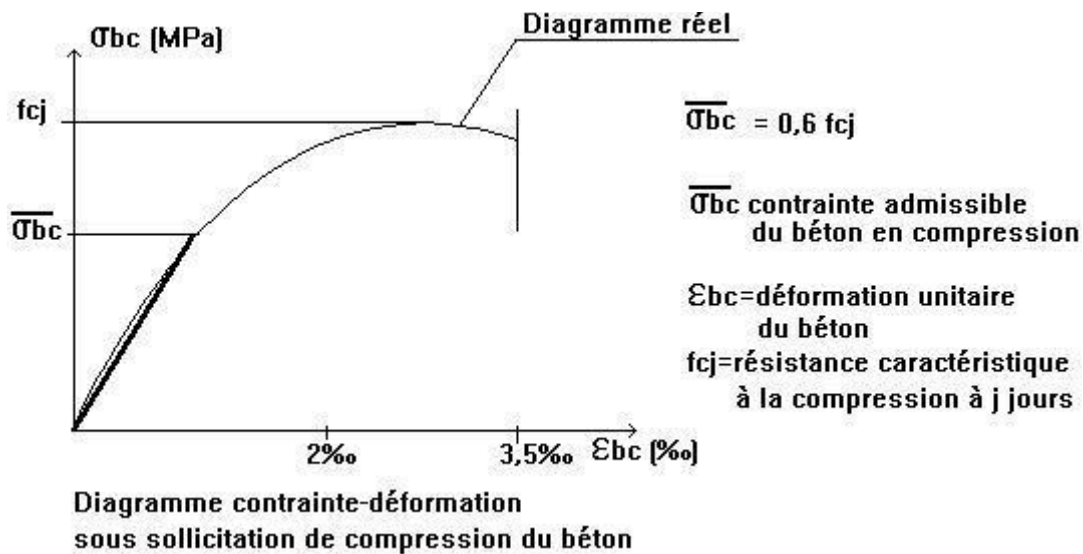


Figure II.23 : Loi de comportement du béton.

II.4.5. Connecteurs de cisaillement :

Ces des éléments qui constituent des oranges de liaison placés à l'interface entre le profilé métallique et la dalle en béton afin de diminuer ou d'empêcher le glissement relatif des deux matériaux à leur surface de contact ou le soulèvement éventuel de la dalle [1].

Ils sont classés selon leurs modes de comportement : ductiles, semi-ductiles ou rigides [33] (figure II.23).

C'est la connexion entre le béton et les composantes métalliques d'un élément mixte qui présente suffisamment de résistance et de rigidité pour permettre de calculer ces parties comme un élément structural unique [1].

Le glissement est défini comme le déplacement relatif entre les deux matériaux assemblés dans la couche d'interface. Ce type de déplacement ou de soulèvement entre l'acier et le béton doit être empêché par des éléments (connecteurs) capables de transférer les efforts de cisaillement ou de traction [1].

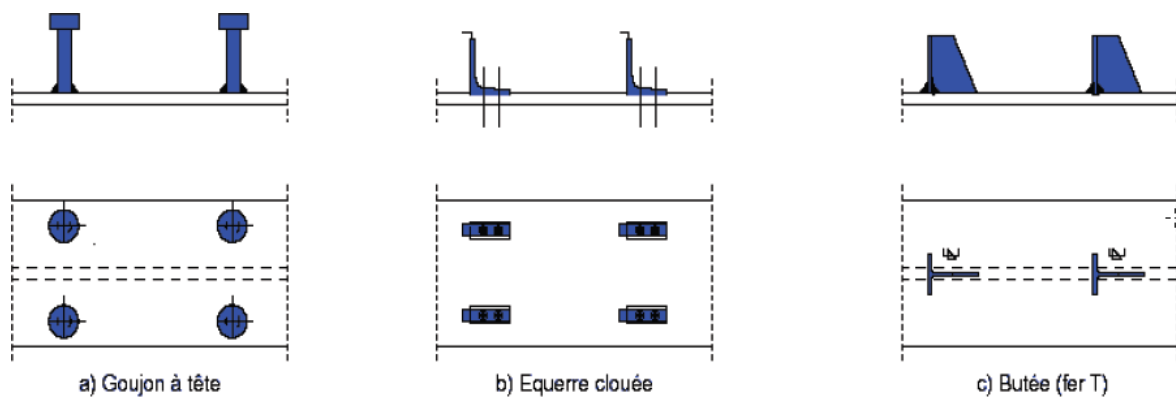


Figure II.24 : Exemples de connecteurs

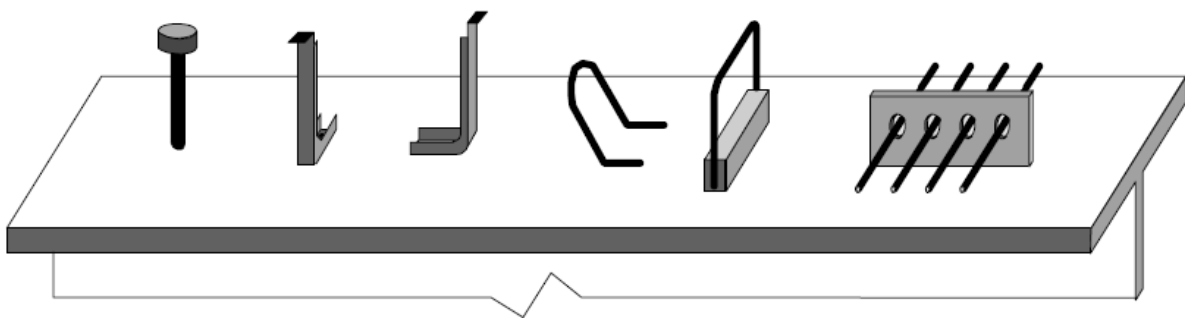


Figure II.25 : types de connecteurs de cisaillement

- La connexion est définie par un coefficient appelé le degré de connexion (η) qui détermine le rapport entre la capacité portante de la connexion au cisaillement et celle de la section mixte [1].

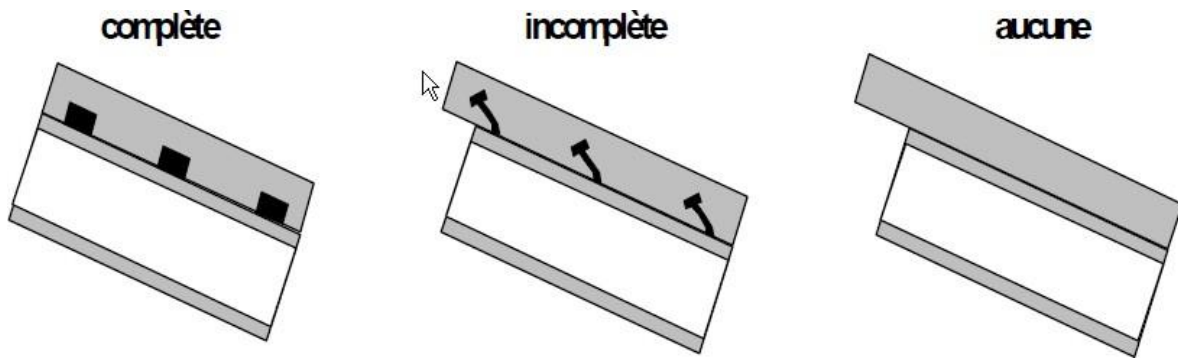


Figure II.26 : Types de connexion

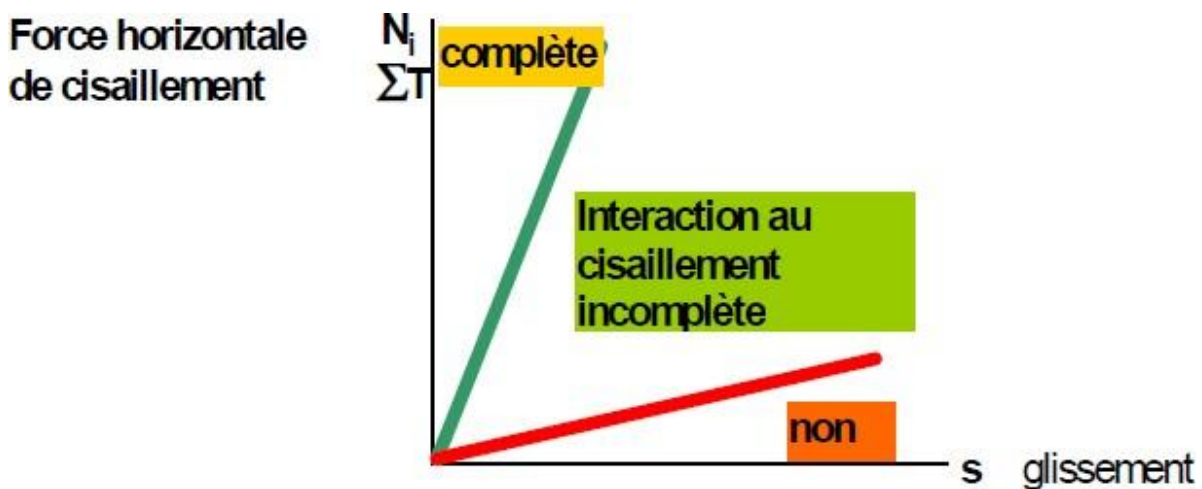


Figure II.27 : Degré de connexion au cisaillement

Degré de connexion au cisaillement [38] :

$\eta=0$: Les deux sections agissent de manière complètement séparée.

$0 \leq \eta \leq 100\%$: Connexion complète.

- L'EC4 autorise la connexion partielle si les connecteurs de cisaillement sont ductiles, avec un chargement statique, en moments positifs et une portée limitée. On verra plus loin qu'au niveau de la zone d'assemblage la connexion est considérée comme complète [39].

- Un glissement nul ne peut être obtenu que par un degré de connexion très élevé qui dépend des connecteurs eux-mêmes (solution non économique) [40].

II.5. Les avantages et les inconvénients des structures mixtes :

II.5.1 Les avantages des structures mixtes :

L'association de l'acier et du béton est la combinaison de matériaux de construction la plus fréquemment rencontrée dans les bâtiments et dans les ponts. Les constructions mixtes présentent plusieurs avantages selon les différents aspects :

❖ **Architectural Aspect:**

Les structures mixtes permettent de nombreuses variations architecturales pour combiner les différents types d'éléments mixtes. En plus de réduire les dimensions des éléments la construction mixte permet :

- Des portées plus importantes
- Des dalles mixtes plus minces
- Des colonnes mixtes plus élancées

Elle offre également une grande flexibilité ainsi que de nombreuses possibilités lors de la conception.

❖ **Aspect économique :**

L'intérêt économique des structures mixtes provient de dimensions plus réduites et d'une exécution plus rapide. La rigidité plus élevée de l'élément structural mixte entraîne des flèches plus faibles donc des portées plus grandes et des hauteurs totales plus faibles. Les rapports portée sur hauteur ($l/h=35$) des poutres sont faibles et peuvent présenter plusieurs avantages :

- La réduction des hauteurs permet de réduire la hauteur totale du bâtiment et permet dès lors une diminution de la surface de couverture ;
- Les portées plus grandes pour des hauteurs identiques (par rapport aux autres méthodes de construction) permettent de libérer des poteaux les pièces qui offrent alors plus de flexibilité ;
- Pour une même hauteur totale de bâtiment, celui-ci peut présenter plus d'étages ;
- Economie de coûts suite à la réalisation plus rapide de bâtiment ;
- Coûts de financement plus faibles ;

Prêt à l'emploi plus rapidement et donc revenu d'utilisation plus élevé.

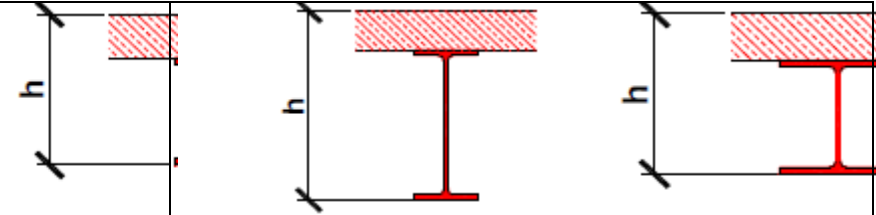
❖ **Aspect structural :**

Les structures métalliques et mixtes actuelle peuvent présenter une résistance au feu en utilisant les principes des constructions en béton armé dans lesquelles le béton protège l'acier grâce à sa masse élevée et sa conductivité thermique relativement faible.

Tout comme les planchers mixtes qui peuvent résister au feu, les poutres mixtes peuvent également être utilisés sans protection des semelles mais avec un enrobage de béton armé entre les semelles. Ce béton ne sert pas uniquement à maintenir des températures relativement basses dans la semelle supérieure et dans l'âme mais également à apporter de la résistance flexionnelle compensant la perte de résistance de la semelle inférieure portée à haute température.

❖ **Montage :**

- Plateforme de travaille
- Coffrage permanant
- Armatures
- Vitesse et simplicité de construction
- Produit à la qualité contrôlée

Types et propriétés des sections			
	Poutre mixte	Poutre métallique sans connexion au cisaillement	
Section métallique	IPE 400	IPE 550	HE 360 B
Hauteur (mm)	560	710	520
Charge	100%	159%	214%
Poids d'acier	100%	127%	93%
Hauteur totale	100%	72%	46%

Rigidité	100%		
----------	------	--	--

Tableau II.5 : Comparaison entre poutre mixte et poutre métallique.


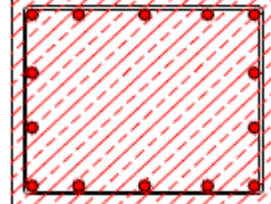
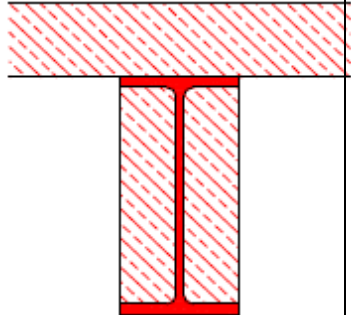
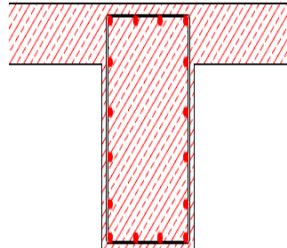
Élément	Mixte	Béton armé
Poteau		
Dimension (cm)	70/70	80/120
Poutre		
Dimension (cm)	16/40	160/120

Tableau II.6 : Comparaison entre des éléments mixtes et des éléments en Béton armé.

II.5.2 Les inconvénients des structures mixtes :

L'inconvénient principal de la construction mixte est la nécessité de la connexion au niveau de l'interface ce qui augmente le temps d'exécution et des dépenses.

- La difficulté de réaliser des assemblages lorsque l'élément mixte est complètement

enrobé (exemple semelle de la poutre enrobé)

- La méthode de construction est légèrement plus compliquée par rapport aux méthodes traditionnelles et demande une main d'œuvre plus qualifiée.

Mais ces inconvénients sont rattrapés par le nombre important d'avantage déjà cités.

II.6 Avantages des poutres mixtes :

Les principaux avantages liés au choix des poutres mixtes acier-béton, principalement pour les ouvrages d'art et les bâtiments multi-étages, et ceux comportant des travées de portée moyenne ou grande, se résument en :

- Gain sur le poids total de la construction par la réduction d'épaisseur en général.
- Une amélioration de la résistance au feu, surtout si la semelle des poutres est enrobée de béton ou se trouve dans l'épaisseur de la dalle.
- Une résistance améliorée vis-à-vis de l'instabilité locale (voilement de la semelle du profilé)
- Une rigidité flexionnelle plus importante (flèches plus faibles).

II.7 Conclusion :

D'une manière générale, une structure peut être définie comme mixte si, au niveau de la plupart de ses éléments (poutres, poteaux, assemblages, dalles), elle associe deux matériaux de natures et de propriétés différentes, ici l'acier et le béton, avec l'objectif de tirer le meilleur parti possible de cette association, tant sur le plan du fonctionnement structural que celui du coût de construction [33].

La construction mixte acier-béton, réputée depuis longtemps comme bien adaptée à des sollicitations telles que celles engendrées par des tremblements de terre, des tassements anormaux et des vents exceptionnels, est de plus en plus considérée aussi actuellement comme convenant très bien pour les constructions auxquelles des exigences de sécurité au feu sont imposées. En plus de son caractère de compétitive qui tend à s'affirmer de plus en plus, ce type de construction dispose, en effet comme le béton armé, d'une résistance au feu qui lui est propre naturellement et qui reste stable dans le temps. De plus, la construction mixte permet de combiner idéalement les avantages

de ses composants pris séparément, à savoir notamment, pour les poutrelles en acier, un encombrement de terre et pour le béton, une diffusivité thermique faible, une mise en forme qui est le rapport entre les surfaces exposées au feu d'un élément et son volume.

Chapitre III

Formulation analytique des poutres mixtes Acier-béton

Chapitre III : Formulation analytique des poutres mixtes Acier-béton

III.1 Introduction

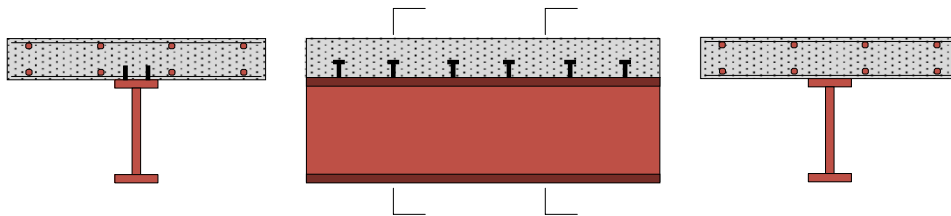
Dans ce chapitre, nous abordons la modélisation du comportement mécanique des poutres mixtes acier-béton. Les équations fondamentales y sont développées dans le détail. En particulier, deux modèles y sont présentés ; la première porte sur une modélisation continue de la connexion (le caractère discret est ignoré) ; pour le second, le caractère discret est pris en compte, tel qu'il se présente dans la réalité. Les équations d'équilibre ainsi que les relations cinématiques sont développées pour modélisation de la connexion.

Avant d'aborder la transposition en élément finis proprement dite (et qui constitue une partie essentiel de ce travail), une solution analytique est développée pour notre modèle. La démarche est pour l'essentiel, similaire à celle employée pour obtenir la matrice de raideur d'un élément de poutre classique. Elle permet d'établir une matrice de raideur exacte et ceci pour un chargement arbitraire. Ainsi, cette approche permet de réduire considérablement le nombre d'éléments qui, en pratique, est déterminé par les conditions d'appuis et les efforts concentrés [41].

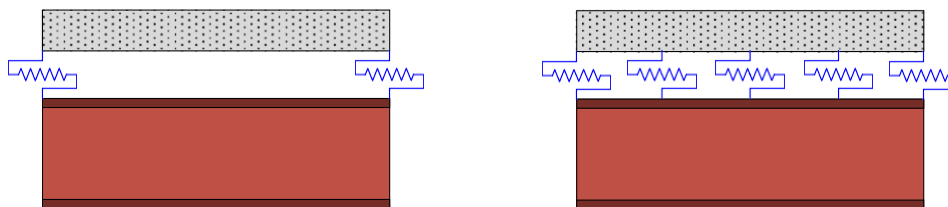
III.2 Hypothèses et simplifications

L'objet de cette thèse est l'étude des poutres mixtes acier-béton soumises à un chargement quasi-statique. On considère que les transformations sont petites, c'est-à-dire que les déformations et les déplacements sont petits. Ainsi les différentes configurations peuvent être confondues avec la configuration initiale et les équations d'équilibre écrites en configuration non-déformée. Sur le plan cinématique. Le déplacement vertical relatif entre la dalle de béton et la poutrelle métallique qui en toute rigueur, pourrait se produire, sera négligé dans le présent modèle. La présence de **NAVIER-BERNOULLI** pour l'ensemble de la section. Toutefois, il est permis de considérer que la dalle de béton et le profilé métallique se comportent l'un et l'autre comme une poutre en flexion dont la cinématique est définie par l'hypothèse de **NAVIER-BERNOULLI**. Autrement dit, que dans chacune des parties de la poutre mixte, les sections planes et normales à la fibre moyenne avant déformation restent planes et normales à la fibre moyenne après déformation. Remarquons qu'en présence d'une armature, la fissuration de la dalle, notamment en zone de moment négatif et faible degré de connexion, ne remet pas en cause cette hypothèse. Par ailleurs, les dimensions habituelles des poutres mixtes ont un élanement longitudinal (rapport de la

longueur de travée sur la hauteur transversale de section) supérieur à 10, ce qui permet généralement de négliger les déformations de cisaillement dues à l'effort tranchant. Dans le cadre de ces hypothèses, la courbure de section de chaque partie de la poutre mixte et la déformation des connecteurs [41].



(a) : Poutre mixte réel



b) modèle de connexion discrète

(c) modèle de connexion répartie

Figure III.1 – Modèles de connexion

Un des objets de notre travail est la réalisation d'un code de calcul permettant de dimensionner des poutres mixtes avec les deux modèles de connexion, à savoir la connexion discrète et la connexion continue (cf figure III.1). L'effort de cisaillement à l'interface sera ponctuel au droit du connecteur pour la connexion discrète et réparti pour la connexion continue.

III.3 Poutre mixte acier-béton : équation fondamentales

Dans un premier temps, la connexion dalle-poutre est supposée répartie de manière continue. D'un point de vue mécanique, le comportement d'un corps déformable est régi par trois groupes

d'équation :

- Les équations d'équilibre ;
- Les relations cinématiques ;
- La loi de comportement.

Ces équations sont développées en détail, pour les deux modèles de connexion, dans les paragraphes ci-après. Seules les équations d'équilibre changent pour le cas de la connexion ponctuelle [41].

III.3.1 Equation d'équilibre

La connexion discrète introduit des discontinuités des champs de force dont il conviendra de tenir compte dans les équations d'équilibre. La cinématique, traitée en section 2.3.2, n'est pas affectée par le mode de connexion [41].

La connexion discrète introduit des discontinuités des champs de force dont il conviendra de tenir compte dans les équations d'équilibre. La cinématique, traitée en section 2.3.2, n'est pas affectée par le mode de connexion.

III.3.1.1 Cas de la connexion continue

Les équations d'équilibre sont obtenues en considérant l'équilibre d'un élément de poutre mixte de longueur infinitésimal dx soumis à une charge répartie pz comme indiqué à la figure III.2 .L'équilibre de l'élément de poutre mixte est donc écrit dans la configuration non déformée. Pour ce faire, on considère l'équilibre de la dalle de béton et de la poutrelle métallique, pris séparément. Les grandeurs avec un indice c sont relatives à la dalle de béton, celle avec un indice s sont relatives à la poutrelle métallique .L'indice sc se rapporte à la connexion.

L'équilibre en résultante et moment (autour du point milieu) de la dalle en béton conduit à :

$$dN_c(x) + D_{sc}(x)dx = 0 \quad (2.1)$$

$$dT_c(x) + (V_{sc}(x) + pz)dx = 0 \quad (2.2)$$

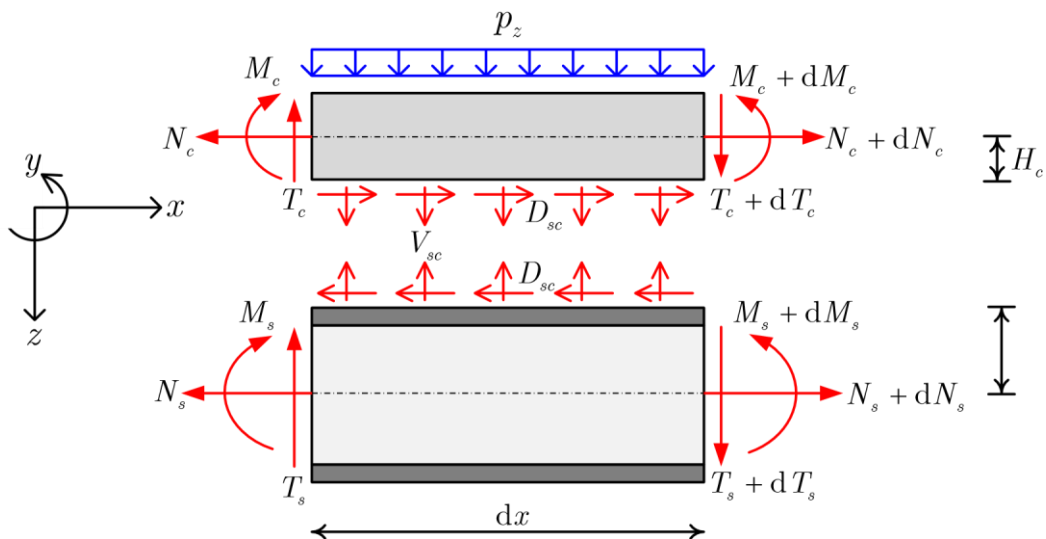


Figure III.2 – Élément infinitésimal d'une poutre mixte.

$$dM_c(x) - T_c(x)dx + H_c D_{sc}(x) - \frac{1}{2} dT_c(x)dx = 0 \quad (2.3)$$

Ou p_z désigne la charge uniforme répartie appliquée le long de l'élément. En négligeant les termes du second ordre, on obtient, pour la dalle de béton, le système d'équations suivantes :

$$\frac{dN_c(x)}{dx} + D_{sc}(x) = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{dT_c(x)}{dx} + V_{sc}(x) + p_z = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{dM_c(x)}{dx} - T_c(x) + H_c D_{sc}(x) = 0 \quad (2.6)$$

De même, l'équilibre en résultante et en moment (autour du point milieu) du profilé métallique conduit à :

$$dN_s(x) - D_{sc}(x)dx = 0 \quad (2.7)$$

$$dT_s(x) - V_{sc}(x)dx = 0 \quad (2.8)$$

$$dM_s(x) - T_s(x)dx + H_s D_{sc}(x)dx - \frac{1}{2} dT_s(x)dx = 0 \quad (2.9)$$

qui simplifie, après avoir négligé les termes du second ordre :

$$\frac{dN_s(x)}{dx} - D_{sc}(x) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{dT_s(x)}{dx} - V_{sc}(x) = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{dM_s(x)}{dx} - T_s(x) + H_s D_{sc}(x) = 0 \quad (2.12)$$

En combinant les équations 2.5 et 2.11, on retrouve la relation classique liant la charge répartie pz à l'effort tranchant total $T = T_c + T_s$:

$$\frac{dT(x)}{d(x)} + pz = 0 \quad (2.13)$$

De même, en combinant les équations 2.6 et 2.12, on obtient la relation suivante :

$$\frac{dM(x)}{dx} - T(x) + H D_{sc}(x) = 0 \quad (2.14)$$

Où l'on désigne par :

$H = H_c + H_s$: la distance entre les axes de référence de la dalle et du profilé ;

$$M(x) = M_c(x) + M_s(x)$$

Il convient de ne pas confondre $M(x)$ avec le moment de flexion total de la section mixte $M_t(x) + M_s(x) + H N_s(x)$. Par ailleurs, on observe dans la relation 2.14 que l'effet de la connexion apparaît clairement. L'effort tranchant est ensuite éliminé de l'équation 2.14. Ce qui conduit à :

$$\frac{d^2 M(x)}{d(x)^2} + H \frac{dD_{sc}(x)}{dx} + pz = 0 \quad (2.15)$$

Cette dernière équation complétée des relations 2.4 et 2.10 constitue le système d'équations indépendantes qui régissent l'équilibre d'une poutre mixte avec un effort d'interaction D_{sc} (qui n'exclue pas l'existence d'un glissement). On remarquera, puisque l'effort tranchant s'obtient en dérivant le moment fléchissant total, que nous avons 4 efforts inconnus indépendants : $N_c(x)$, $N_s(x)$, $D_{sc}(x)$ et $M(x)$.

Les équations d'équilibres (2.4), (2.10) et (2.15) peuvent également être écrites sous forme matricielle comme :

$$\partial D(x) - \partial_{sc} D_{sc}(x) - P_e = 0 \quad (2.16)$$

Où :

$D(x) = [N_s(x) \quad N_c(x) \quad M(x)]^T$ désigne le vecteur des efforts internes d'une section mixte ;

$P_e = [0 \quad 0 \quad pz]^T$ désigne le vecteur forces extérieures appliquées le long de l'élément ; ∂ et ∂_{sc} sont deux opérateurs différentiels par :

$$\partial = \begin{bmatrix} \frac{d}{dx} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{d}{dx} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{d^2}{dx^2} \end{bmatrix}, \quad \partial_{sc} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & H \frac{d}{dx} \end{bmatrix}^T \quad (2.17)$$

III.3.1.2 Cas de la connexion discrète

Pour ce type de connexion, il convient de distinguer deux zones : celle entre connecteurs et celle au droit du connecteur (cf. Figure III.3). Dans la première zone, les équations d'équilibre sont identiques à celles développées au paragraphe précédent en prenant $D_{sc} = 0$, ce qui conduit à :

$$\frac{dN_c(x)}{dx} = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{dN_s(x)}{dx} = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{d^2M(x)}{dx^2} + pz(x) = 0 \quad (2.20)$$

Au droit des connecteurs, les efforts normaux dans la dalle et le profilé métallique sont discontinus. En supposant que la transmission des efforts entre la dalle de béton et le profilé métallique n'a lieu qu'en un point de l'interface acier-béton, les efforts au droit du connecteur se calculent de la manière suivante (en considérant un élément de longueur) Δx :

$$N_c = N_c^+ - N_c^- = -Q_{st} \quad (2.21)$$

$$N_s = N_s^+ - N_s^- = -Q_{st} \quad (2.22)$$

$$M_c = M_c^+ - M_c^- = -H_c Q_{st} \quad (2.23)$$

$$M_s = M_s^+ - M_s^- = -H_s Q_{st} \quad (2.24)$$

métallique est égale à l'effort dans le connecteur Q_{st} , pris en valeur absolue. Cette relation s'écrit sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} N_c \\ N_s \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ -H \end{bmatrix} Q_{st} \quad (2.25)$$

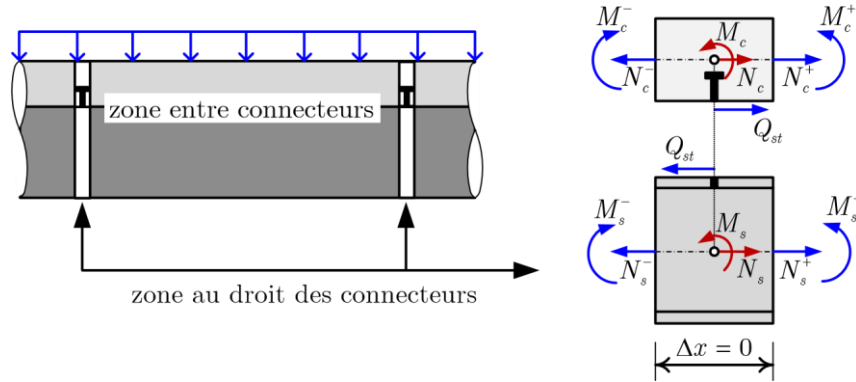


Figure III.3 – Élément de connecteur

III.3.2 Relations cinématiques

Dans ce paragraphe, les relations qui relient les déformations généralisées (courbure et allongements) aux déplacements sont données dans le cadre des petits déplacements. En considérant que les sections droites restent planes et normales à l'axe neutre pour chaque composant de la poutre mixte, on obtient les relations suivantes :

- **Profilé métallique :**

$$\varepsilon_s(x) = \frac{du_s(x)}{dx} \quad (2.26)$$

$$\theta_s(x) = -\frac{du_s(x)}{dx} \quad (2.27)$$

$$k_s(x) = \frac{d\theta_s(x)}{dx} = -\frac{d^2u_s(x)}{dx^2} \quad (2.28)$$

- **Dalle en béton :**

$$\varepsilon_c(x) = \frac{du_c(x)}{dx} \quad (2.29)$$

$$\theta_c(x) = -\frac{du_c(x)}{dx} \quad (2.30)$$

$$k_c(x) = \frac{d\theta_c(x)}{dx} = -\frac{d^2u_c(x)}{dx^2} \quad (2.31)$$

Ou ε_i représente la déformation de l'axe de référence du composant i ; θ_i représente la rotation de section du composant i et k_i représente la courbure du composant i .

- **Interface acier-béton :**

Un glissement d_{sc} se produit à l'interface acier-béton qui résulte d'un déplacement relatif. Les rotations étant petites, on peut assimiler la tangente à l'angle, ce qui fournit :

$$d_{sc}(x) = u_s(x) - H_s \theta_s(x) - u_c(x) - H_c \theta_c(x) \quad (2.32)$$

$$u_{sc}(x) = u_s(x) - u_c(x) \quad (2.33)$$

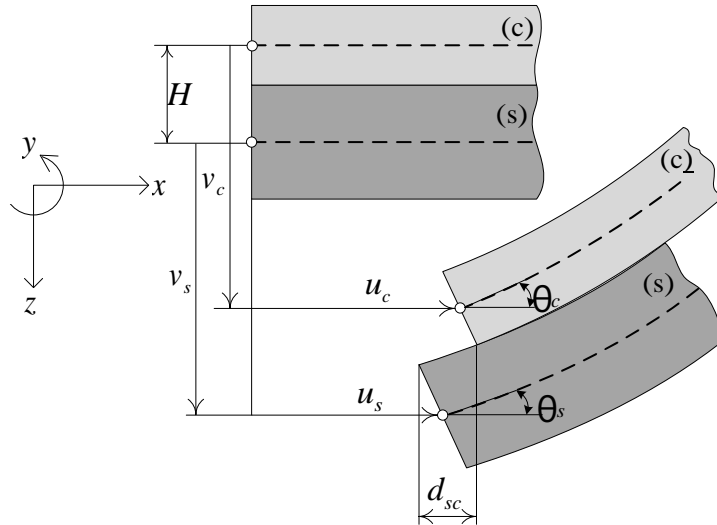


Figure III.4- Cinématique de la poutre mixte

En fait, plusieurs études à caractère théorique et expérimental montre que dans la plus part des cas, le soulèvement de la dalle par rapport au profilé métallique est très petit et ses effets sur le comportement global de la poutre mixte sont négligeable (**ARIBERT** et **ABDEL-AZIZ** (1985)[13] , **ROBINSON** et **NARAINÉ** (1988)[119]). Il est donc possible de négliger le phénomène de soulèvement de la dalle de béton par rapport du profilé métallique.

Dans la suite du développement du modèle de calcul, l'hypothèse de non soulèvement sera systématiquement adoptée. Ainsi, en l'absence de soulèvement (décollement), le champ de déplacement transversal est identique pour la poutrelle métallique et la dalle en béton :

$$u(x) = u_s(x) = u_c(x) \quad (2.34)$$

Il en résulte que les rotations et les courbures sont identiques pour les deux composants :

$$\theta(x) = \theta_s(x) = \theta_c(x)$$

$$k(x) = k_s(x) = k_c(x)$$

Ainsi les variables cinématiques indépendantes sont $(x), u_s(x)$ et $u_c(x)$, ce qui conduit aux relations cinématiques suivantes :

$$\varepsilon_s(x) = \frac{du_s(x)}{dx} \quad (2.35)$$

$$\varepsilon_c(x) = \frac{du_c(x)}{dx} \quad (2.36)$$

$$\theta(x) = -\frac{du(x)}{dx} \quad (2.37)$$

$$k(x) = -\frac{d^2u(x)}{dx^2} \quad (2.38)$$

$$d_{sc}(x) = u_s(x) - u_c(x) + H \frac{du(x)}{dx} \quad (2.39)$$

Ou, sous forme matricielle :

$$\partial d(x) - e(x) = 0 \quad (2.40)$$

$$\partial_{sc}^T d(x) - d_{sc}(x) = 0 \quad (2.41)$$

Où :

$d(x) = [u_s(x) \quad u_c(x) \quad u(x)]^T$ est le vecteur des déplacements ;

$e(x) = [\varepsilon_s(x) \quad \varepsilon_c(x) \quad k(x)]^T$ est le vecteur des déformations généralisées associé au vecteur des efforts internes $D(x)$.

III.3.3 Lois de comportement

L'objet de cette section est d'établir les relations de comportement généralisées à partir des relations uni axiales contrainte/déformation de chacun des composants.

III.3.3.1 Comportement de section : Relations entre efforts et Déformations généralisées

En se basant sur l'hypothèse que les sections droites de chaque sous-poutre (dalle et profilé) restent planes après déformation, le champ de déformation normale s'écrit :

$$\text{dans le profilé : } \quad \varepsilon_s(x, z_s) = \varepsilon_s(x) + z_s k(x) \quad (2.42)$$

$$\text{dans la dalle : } \quad \varepsilon_c(x, z_c) = \varepsilon_c(x) + z_c k(x) \quad (2.43)$$

Le champ de contrainte normal se déduit du champ de déformation à l'aide de la relation de comportement des matériaux. Par définition, les efforts internes résultent de l'intégration du champ de contrainte sur la section droite :

$$N_s(x) = \int_{A_s} \sigma_c(x, z) dA \quad (2.44)$$

$$N_c(x) = \int_{A_s} \sigma_c(x, z) dA + \sum_{n_{sr}} \sigma_{sr}(x, z_{sr}) A_{sr} \quad (2.45)$$

$$M(x) = \int_{A_s} z_c \sigma_c(x, z_c) dA + \sum_{n_{sr}} z_{sr} \sigma_{sr}(x, z_{sr}) A_{sr} + \int_{A_s} z_s \sigma_s(x, z_s) dA \quad (2.46)$$

Où A_s, A_c , et A_{sr} sont respectivement les aires de la section du profilé métallique, de la section de la dalle et de la section de l'armature ; n_{sr} est le nombre de barres d'armature.

Ces équations montrent que le comportement de section dépend des propriétés matérielles et de la géométrie de la section. En général, du au caractère inélastique du comportement des matériaux constitutants, le comportement global de la section de la poutre mixte est non- linéaire. Autrement dit, dans la plupart des cas, la relation efforts-déformations généralisées de section de la poutre mixte ne peut être de manière explicite. Toutefois, pour la suite des développements, nous la noterons par

$$D(x) = D^{\wedge}(e(x)) \quad \text{ou} \quad e(x) = e^{\wedge}(D(x)) \quad (2.47)$$

Dans ce chapitre 3, nous considérons un comportement élastique linéaire pour l'acier et le béton.

Ainsi, l'introduction des relations (2.57) et (2.42) dans les relations (2.45-2.46) donne :

$$N_s(x) = (EA)_s \varepsilon_s(x) + (ES)_s k(x) \quad (2.48)$$

$$N_c(x) = (EA)_c \varepsilon_s(x) + (ES)_c k(x) \quad (2.49)$$

$$M(x) = (ES)_c \varepsilon_c(x) + (ES)_s \varepsilon_s(x) + (EI) k(x) \quad (2.50)$$

Où :

$$(ES)_c = E_c + S_c + \sum_{n_{sr}} E_{sr} A_{sr} z_{sr} \quad (ES)_s = E_s S_s$$

$$(EA)_c = E_c A_c + \sum_{n_{sr}} E_{sr} A_{sr} \quad (EA)_s = E_s A_s$$

$$(EI) = E_c I_c + E_s I_s + \sum_{n_{sr}} E_{sr} A_{sr} z_{sr}^2$$

Avec

E_i : module élastique de la composante i ;

$S_i = \int_{A_i} z_i dA$, $i = c, s$: moment statique de la section i exprimé par rapport à son axe de référence ;

$I_i = \int_{A_i} z_i^2 dA$, $i = c, s$: moment d'inertie de la section i exprimé par rapport à son axe de référence ;

Les relations (2.48), (2.49) et (2.50) peuvent être écrites sous forme matricielle de la manière suivante :

$$D(x) = k \partial d(x) \quad (2.51)$$

Où k désigne la matrice de rigidité de la section :

$$k = \begin{bmatrix} (EA)_s & 0 & (ES)_s \\ 0 & (EA)_c & (ES)_c \\ 0 & 0 & (EI) \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

En choisissant comme axe de référence de chaque section (dalle et profilé) l'axe passant le centre de gravité de la section ($S_c = S_s = 0$) et faisant usage des relations cinématiques (2.35-2.38), on peut écrire la loi de comportement en faisant apparaître explicitement les déplacements :

$$N_s = (EA)_s \frac{du_s}{dx} \quad (2.53)$$

$$N_c = (EA)_c \frac{du_c}{dx} \quad (2.54)$$

$$M = -(EI) \frac{d^2u}{dx^2} \quad (2.55)$$

III.3.2.3 Loi comportement de la connexion :

La connexion peut être caractérisée des essais push-out[3]. Plusieurs essais push-out ont été réalisés dans la littérature qui montrent que la relation force-glissement est fortement non-linéaire au-delà d'un glissement de 1 mm[112]. Ainsi, de manière générale, l'effort de cisaillement est lié au glissement par une loi constitutive non-linéaire que l'on écrit sous la forme :

$$\text{Connexion discrète :} \quad Q_{st} = Q^{\wedge}_{st}(d_{sc}) \quad (2.56)$$

$$\text{Connexion continue :} \quad D_{sc}(x) = D^{\wedge}_{sc}(d_{sc}(x)) \quad (2.57)$$

Si l'on suppose que la connexion a un comportement élastique linéaire, les relations (2.56) et (2.57) deviennent

$$\text{Connexion discrète :} \quad Q_{st} = k_{st}d_{sc} \quad (2.58)$$

$$\text{Connexion continue :} \quad D_{ss}(x) = k_{sc}d_{sc}(x) \quad (2.59)$$

Ou' k_{st} [N/m] désigne la rigidité de la connexion discrète et k_{sc} [N/m²] désigne la rigidité de la connexion continue. Si la poutre est connectée de manière discrète (connecteur de type goujons, cornière...) et que l'on souhaite la modéliser comme une connexion répartie, la rigidité k_{sc} est alors donnée par :

$$k_{sc} = \frac{k_{st}}{@} \quad (2.60)$$

Ou' @ est l'espacement longitudinal entre les connecteurs. Si l'espacement n'est pas régulier le long de la poutre, la raideur k_{sc} varie le long de la poutre.

III.4 : Solution analytique et matrice de rigidité exacte dans le cas élastique linéaire

Dans cette partie, nous développons une solution analytique (exacte) pour une poutre mixte en considérant les deux modes de connexion : connexion discrète et connexion continue. On supposera que le comportement des matériaux et de la connexion est élastique linéaire. L'idée consiste à rechercher les fonctions d'interpolation exacte (qui par ailleurs dépendent du chargement) pour ensuite construire la matrice de raideur, dite « exacte ».

Dans cette démarche, l'ensemble des auteurs se sont inspirés de la solution exacte pour une poutre simplement appuyée, établie par **NEWMARK** [104]. La matrice de raideur (connexion répartie) a été proposée par **FAELLA** [63] en premier et une présentation différente en est faite par **RANZI** [116]. Par ailleurs, nous présentons également la solution analytique exacte pour la connexion discrète qui, bien que plus simple à obtenir, nous permettra de comparer l'effet de la modélisation de la connexion sur les champs mécaniques.

III.4.1 Connexion discrète

Afin de construire la matrice de raideur d'un élément de poutre mixte connecté de manière discrète à ses extrémités (cf. Figure III.5), nous séparons cet élément en trois sous-éléments : un élément poutre mixte non-connectée ; deux éléments spécifiques de

connexion discrète : il s'agit des éléments ponctuels (à un nœud) qui apportent une rigidité au cisaillement longitudinal au droit d'un connecteur. La matrice de raideur est obtenue en assemblant les matrices de raideur de ces trois éléments.

III.4.1.1 Tronçon de poutre mixte non-connectée

L'objectif de cette section est d'établir une solution analytique pour un tronçon de poutre mixte compris entre deux connecteurs, soumis à un chargement arbitraire. Nous supposons que le chargement est décrit par la fonction $p_z(x)$. Les deux extrémités de la poutre constituent des nœuds au sens des éléments finis.

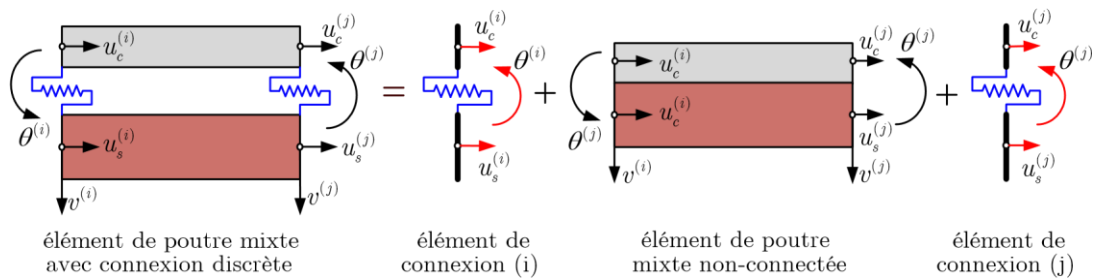


Figure III.5 – Élément de poutre mixte avec connexion discrète

En combinant les équations d'équilibre (2.18 – 2.20) et les relations de comportement exprimée en fonctions des déplacements (2.53 – 2.55), on obtient les équations d'équilibre exprimée en fonction des déplacements :

$$\partial_x^4 u(x) = \frac{P_z(x)}{(EI)} \quad (2.61)$$

$$\partial_x^2 u_c(x) = 0 \quad (2.62)$$

$$\partial_x^2 u_s(x) = 0 \quad (2.63)$$

Où l'on désigne $\partial_x^n \bullet = d^n \bullet / dx^n$. L'absence de connexion conduit à un système découplé dont la solution est :

$$u(x) = C_1 x^3 + C_2 x^2 + C_3 x + C_4 + u_{P_z}(x) \quad (2.64)$$

$$u_c(x) = C_5 x + C_6 \quad (2.65)$$

$$u_s(x) = C_7x + C_8$$

(2.66)

Où $u_{pz}(x)$ est une solution particulière de l'équation différentielle (2.64). Les constantes $C_i, i = 1..8$ sont déterminées en imposant que les déplacements aux extrémités sont égaux aux déplacements nodaux, qui sont les inconnues principales :

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \\ q_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_c(0) \\ u_s(0) \\ -\partial_x u(0) \\ u(0) \\ u_c(L) \\ u_c(L) \\ -\partial_x u(L) \\ u(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L & 1 \\ -3L^2 & -2L & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L^3 & L^2 & L & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\partial_x u_{pz}(0) \\ u_{pz}(0) \\ 0 \\ 0 \\ -\partial_x u_{pz}(L) \\ u_{pz}(L) \end{bmatrix}$$

(2.67)

D'où, sous forme matricielle :

$$q = XC + q_{pz}$$

(2.68)

Les déplacements étant indépendants, la matrice X est inversible. On obtient ainsi les constantes C_i en fonction des déplacements nodaux q_i :

$$C = X^{-1}(q - q_{pz})$$

(2.69)

Ceci équivaut à définir des fonctions d'interpolation qui dépendent du chargement. En l'absence de chargement, on retrouve exactement les fonctions d'interpolation pour les éléments finis de type poutre/poteau. Les efforts internes le long du tronçon de poutres mixte sont obtenus en substituant les relations (2.64 – 2.66) dans (2.53 – 2.55) :

$$M(x) = -(EI)(6C_1x + 2C_2 + \partial_x^2 u_{pz}(x))$$

(2.70)

$$N_c(x) = (EA)_c C_5$$

(2.71)

$$N_s(x) = (EA) C_7$$

(2.72)

On observe que les efforts normaux sont constants, ce qui est cohérent avec les

hypothèses du modèle. La matrice de raideur traduit le lien entre les efforts Q_i et les déplacements nodaux q_i . Elle s'obtient dans un premier temps en imposant les conditions aux limites statiques :

$$Q = YC + Q_{Pz} \quad (2.73)$$

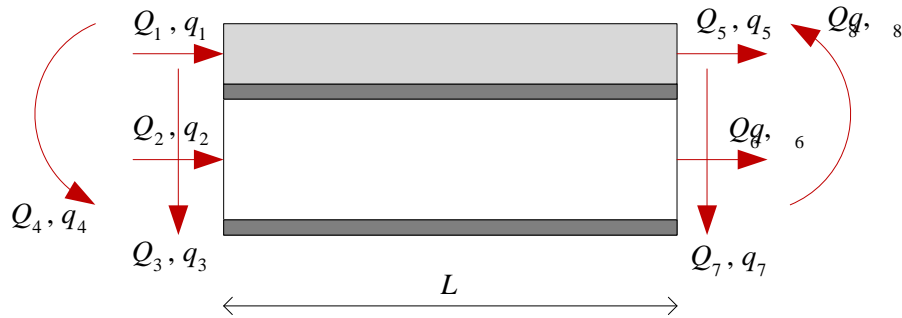


Figure III.6 – Forces nodales et déplacements nodaux d'un élément de poutre mixte.

Où

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -(EA)_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(EA)_s & 0 \\ 6EI & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2(EI) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (EA)_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (EA)_s & 0 \\ -6(EI) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6L(EI) & -2(EI) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

Et

$$Q_{Pz} = [0 \quad 0 \quad -EIu_{Pz}(0) \quad EI\partial_x^2 u_{Pz}(0) \quad 0 \quad 0 \quad EI\partial_x^3 u_{Pz}(L) \quad -EI\partial_x^2 u_{Pz}(L)]^T \quad (2.75)$$

En introduisant dans un deuxième temps l'équation (2.69) dans (2.73), on obtient :

$$K_e^{(nc)} q = Q + Q_0 \quad (2.76)$$

$$K_e^{(nc)} = YX^{-1} \quad (2.77)$$

Représente la matrice de rigidité exacte de l'élément de poutre mixte non-connectée et représente la vecteur de forces nodales du' à l'intérieur de l'élément (le vecteur des charges nodales équivalentes).

$$Q_0 = YX^{-1}q_{Pz} - Q_{Pz} \quad (2.78)$$

III.4.1.2 Élément spécifique de connexion ponctuelle :

Le connecteur va provoquer une discontinuité du champ d'efforts qu'il convient de prendre en compte. Pour ce faire, la connexion est modélisée par un élément spécifique sans longueur physique mais pour lequel une raideur existe. Il s'agit d'un à 1 nœud localisé au droit des goujons.

Nous développons dans cette section la matrice de rigidité d'un tel élément dans le cas du comportement élastique linéaire des goujons. On suivra la même démarche pour le cas du comportement non-linéaire en travaillant avec une relation linéarisée. En introduisant la relation cinématique de glissement (2.39) dans l'équation (2.58), on obtient la relation :

$$Q_{st} = k_{st} \begin{bmatrix} -1 & 1 & -H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ u_s \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

qui est ensuite introduite dans l'équation d'équilibre (2.25) afin de lier les efforts aux déplacements correspondants :

$$\begin{bmatrix} N_c \\ N_s \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ -H \end{bmatrix} k_{st} \begin{bmatrix} -1 & 1 & -H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ u_s \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

D'où l'expression de la matrice de rigidité de l'élément de connexion :

$$K_e^{(st)} = k_{st} \begin{bmatrix} 1 & -1 & H \\ -1 & 1 & -H \\ H & -H & 6H^2 \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

III.4.1.3 Assemblage des éléments de connexion et l'élément de poutre mixte non-connectée

L'assemblage des matrices de rigidité élémentaire se fait en tenant compte des conditions cinématique imposées aux nœuds. La figure 2.7 montre de manière schématique, comment se construit la matrice de raideur \mathbf{K}_e d'un élément de poutre mixte connectée de manière discrète aux deux extrémités, à partir des coefficients de $\mathbf{K}_e^{(nc)}$, de $\mathbf{k}_i^{(st)}$ et de $\mathbf{K}_j^{(st)}$ [140].

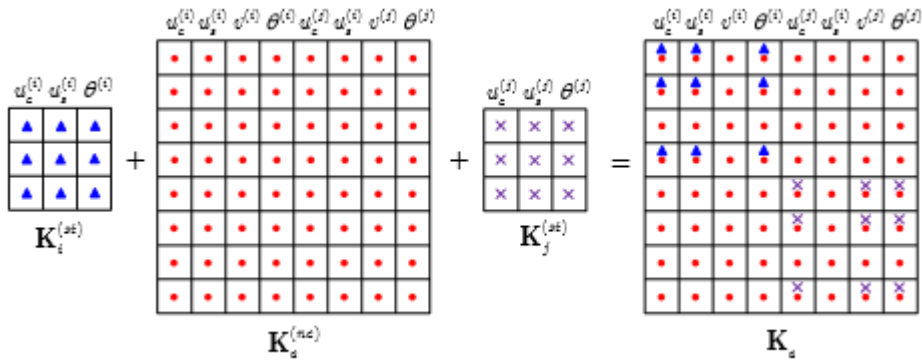


Figure III.7 – Assemblage des parties acier, béton et connecteur-matrice \mathbf{K}_e

Donc :

La matrice globale est :

$$\underline{KG} := \begin{bmatrix} kst + \frac{A}{L} & -kst & kst H & -\frac{A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -kst & kst + \frac{B}{L} & -kst H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kst H & -kst H & kst H^2 + \frac{4 \cdot C}{L} & 0 & 0 & \frac{-6 C}{L^2} & \frac{2 C}{L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{A}{L} & 0 & 0 & 2 \cdot \left(kst + \frac{A}{L} \right) & -2 \cdot kst & 0 & 2 \cdot kst H & -\frac{A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{L} & 0 & -2 \cdot kst & 2 \cdot \left(kst + \frac{B}{L} \right) & 0 & -2 \cdot kst H & 0 & -\frac{B}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6 C}{L^2} & 0 & 0 & \frac{2 \cdot 12 C}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6 C}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{2 C}{L} & 2 \cdot kst H & -2 \cdot kst H & 0 & 2 \cdot kst H^2 + \frac{2 \cdot 4 C}{L} & 0 & 0 & \frac{2 C}{L} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{A}{L} & 0 & 0 & 0 & kst + \frac{A}{L} & -kst & kst H \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{B}{L} & 0 & 0 & -kst & kst + \frac{B}{L} & -kst H \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6 C}{L^2} & \frac{2 C}{L} & kst H & -kst H & \frac{4 \cdot C}{L} + kst H^2 \end{bmatrix}$$

..

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation des poutres mixtes en considérant la modélisation de la connexion, à savoir un modèle de connexion discrète. Après avoir listé les hypothèses et les simplifications principales adoptées dans la modélisation, nous avons développé les équations fondamentales d'une poutre mixte acier-béton pour le modèle de connexion.

Les connecteurs entre la dalle et le profilé métallique d'une poutre mixte sont nécessaires pour résister aux forces de cisaillement, de flexion et de traction. La rigidité, la résistance et la quantité de béton confiné autour de chaque connecteur influent sur la performance de la connexion.

Chapitre IV

Résultats et discussions

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Dans cette partie, et dans le cadre de l'analyse des poutres mixtes en forme de T par notre modèle, nous avons procédé à l'étude d'une série de poutres mixtes avec des goujons à tête de différents nombre des connecteurs de cisaillements soumises à une charge concentrée. Ce qui nous a permis d'obtenir comme résultats du glissement total de la poutre aux extrémités et pour déterminer l'influence de nombre et l'espacement des goujons à la connexion des poutres mixtes acier-béton, leurs influences sur le glissement entre le profilé métallique et la dalle en béton. Ensuite, ces résultats obtenus sont comparées au modèle théorique de J.M.Aribert et K .Abdel Aziz [43] et aussi au modèle numérique 3D par SAP 2000 de Zidour M et Bensattalah T[42] .

Pour simplifier la présentation, notre modèle n'a été développé ici que dans le cas d'une poutre isostatique mais il se généralisé sans difficultés au cas des poutres hyperstatiques.

IV.2. Géométrie de la poutre :

Les figures IV (1 et 2) sont conformes à l'étude expérimentale et modèle théorique de J.M. Aribert et K .Abdel Aziz. La géométrie de ces poutres est représentée sur les figures IV (1, 2 et 3). La longueur, la largeur et l'épaisseur de la dalle de béton sont de 5000, 800 et 100 mm, respectivement. La longueur de profilé métallique de type IPE 400 est 5000 mm. Nous nous basons sur ces études pour valider notre modèle.

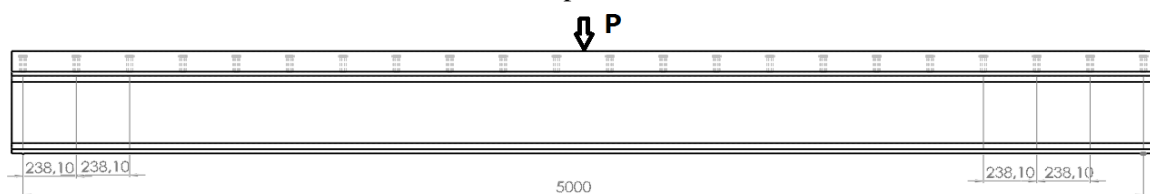


Fig.IV.1 : la coupe longitudinale d'une poutre mixte avec 44 goujons

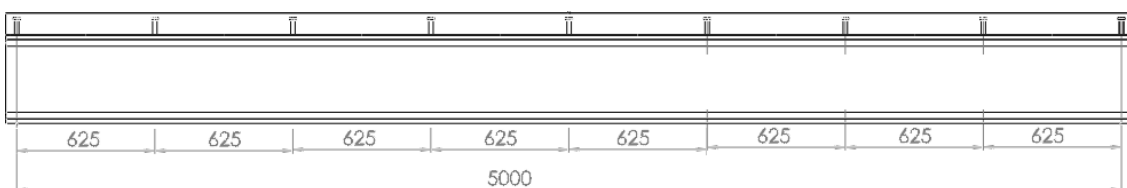


Fig.IV.2 : la coupe longitudinale d'une poutre mixte avec 18 goujons

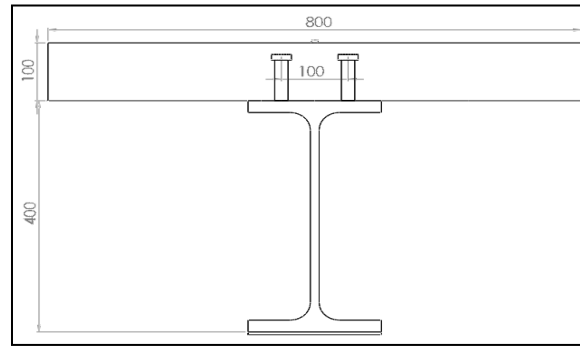


Fig.IV.3 : la coupe transversale des poutres mixtes

IV.3 Caractéristiques des matériaux

Le tableau IV.1, présente les différentes caractéristiques des matériaux du béton, profilé métallique et les goujons respectivement.

Matériau	Désignation	Valeur
Béton	Poids spécifique (y compris armature)	$\gamma_b = 24 \text{ kN} / \text{m}^3$
	Résistance à la compression	$f_{ck} = 40 \text{ Mpa}$
	Résistance à la traction	$f_{ct} = 2.6 \text{ Mpa}$
	Module d'élasticité longitudinal	$E_c = 24 \text{ kN} / \text{mm}^2$
	Coefficient de poisson	$\nu_c = 0.2$
Profilé métallique IPE400	Poids spécifique	$\gamma_a = 78,5 \text{ kN} / \text{m}^3$
	Module d'élasticité longitudinal	$E_a = 210 \text{ kN} / \text{mm}^2$
	Coefficient de poisson	$\nu_a = 0.3$
	Module de Cisaillement	$G_a = 81 \text{ kN} / \text{mm}^2$
Goujon avec tête	Module d'élasticité longitudinal	$E_g = 210 \text{ kN} / \text{mm}^2$
	La limite de rupture	$F_{rg} = 450 \text{ MPa}$
	La limite d'élasticité	$F_{ug} = 350 \text{ MPa}$
	La rigidité par rang	$K_g = 40 \text{ kN} / \text{m}$

Tableau IV.1. Les caractéristiques des matériaux

4. Validation du modèle

En premier lieu, nous avons présenté une validation de notre modèle de deux poutres mixtes acier béton (44 goujons et 18 goujons) avec un espacement régulier entre les goujons ensuite, les résultats ont été comparés avec celles de la série des poutres mixtes qui ont été déjà étudiées par J.M.Aribert et K .Abdel Aziz en 1986 [43] et aussi au modèle numérique 3D par SAP 2000 de Zidour M et Bensattalah T[42].

Les figures IV (4 et 5) représentent une comparaison entre le modèle proposé et modèle théorie d’Aribert et K .Abdel Aziz 1985 [43], et avec aussi au modèle numérique 3D par SAP 2000 de Zidour M et Bensattalah T[42] (des poutres mixtes avec 44 et 18 goujons respectivement).

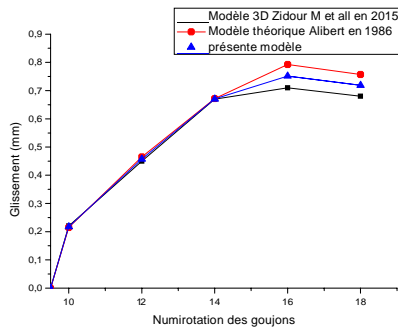


Fig.IV.4 : comparaison de glissement entre les trois modèles sous charge 297KN pour 18 goujons

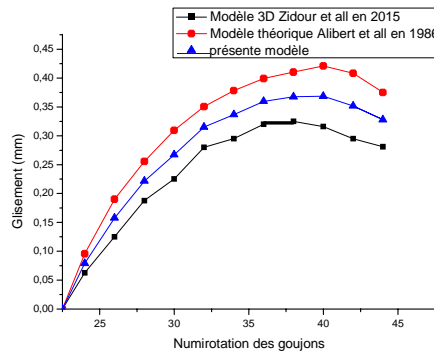


Fig.IV.5 : comparaison de glissement entre les trois modèles sous charge 297KN pour 44 goujons

Les courbes IV (4 et 5) présentent des comparaisons entre la distribution de cisaillement qui a été obtenue par notre modèle et celle trouvée par Aribert.J.M et AbdelAziz.K en 1986 à l’INSA de Rennes (France) et avec celle développé numérique 3D par SAP 2000 de Zidour M et Bensattalah T[42] sur les mêmes poutres mixtes acier-béton.

Nous avons observé que les trois courbes ont même l’allure et se convergent, donc notre modèle est adéquat pour les calculs des poutres mixtes.

IV .5. Etude d’influence de nombre des goujons sur le glissement

Une série des poutres mixtes acier-béton est étudiée par notre modèle développé pour analyser l’influence de nombre des goujons sur le glissement des poutres mixtes acier-béton. Nous avons analysé quatre poutres mixtes isostatiques, ne différent entre elles que par le nombre des goujons (18 goujons, 30 goujons, 36 goujons et 44 goujons) et avec un espacement identique entre les goujons comme présentées au tableau IV.2 ci-dessous:

Tableau IV 2 : Nombre des goujons dans les poutres mixtes acier-béton

Les cas	Nombre Des goujons	Charge (N)	Espacements (mm)
01	18	297000 397000	625.00
02	30	297000 397000	357.14
03	36	297000 397000	294.12
04	44	297000 397000	238.09

Tableau IV 2 : Nombre des goujons dans les poutres mixtes acier-béton

Les figures IV (6, 7,8 et 9) représentant les poutres mixtes Analysées [42] :

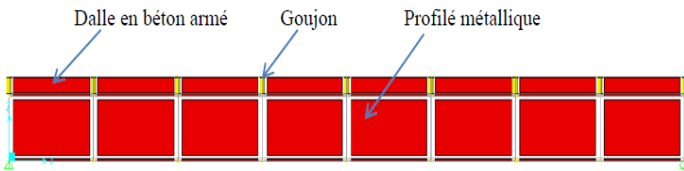


Fig. IV.6 : Positionnement de 30 goujons avec espacement identique [42]

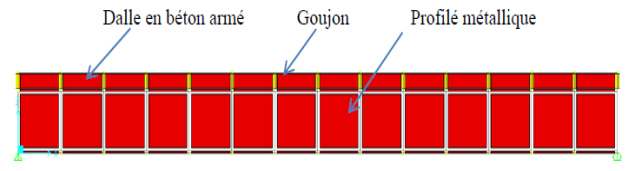


Fig. IV.7 : Positionnement de 18 goujons avec espacement identique [42]

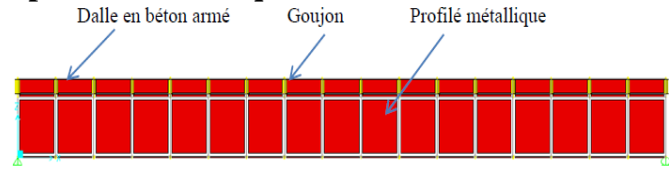


Fig. IV.8 : Positionnement de 36 goujons avec espacement identique [42].

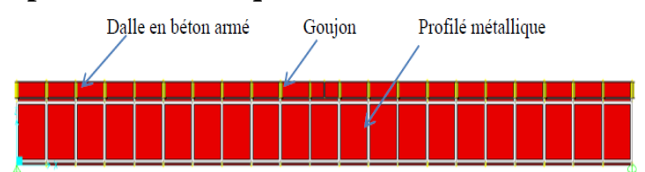


Fig. IV.9 : Positionnement de 44 goujons avec espacement identique [42].

8. Les résultats et discussions

Dans ce travail, nous avons présenté l'influence du nombre, l'espacement et l'impact ces derniers sur les valeurs de glissement entre la dalle en béton et profilé métallique.

Dans le tableau IV.3 et la figure IV.10, on présente la variation du glissement en fonction de nombre des goujons d'une poutre mixte acier-béton sous les charges 297KN et 397KN, respectivement avec (18 goujons, 30 goujons, 36 goujons et 44 goujons) à espacements identiques.

Tableau IV.3 : les résultats maximaux de glissement en demi-travée de poutre pour les quatre cas

Nombre des goujons	18		30		36		44	
Les charges (KN)	297	397	297	397	297	397	297	397
Glissement maximum (mm)	0,82	1,03	0,58	0,75	0,49	0,65	0,46	0,57

Tableau IV.3 : les résultats maximaux de glissement en demi-travée de poutre pour les quatre cas

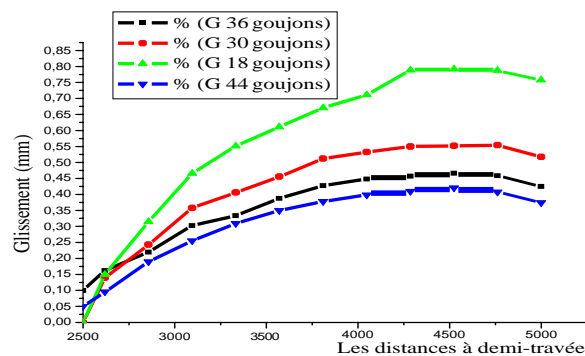


Fig. IV.10: Comparaison entre les quatre poutres mixtes acier-béton sous la charge de 297KN

Il est clair que les valeurs du glissement augmentent si le nombre des goujons diminue et vice-versa, donc nous avons une inversement proportionnel entre le glissement est nombre des goujons.

D'autre part, nous avons pu dire que les poutres mixtes qui elles contiennent grand nombres des goujons sont plus rigide que les autres poutres mixtes.

9. Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté un modèle analytique basé sur d'un élément fini d'une poutre mixte acier-béton pour analyser l'influence nombres et espacement des goujons sur le glissement au niveau de l'interface béton –acier. Une série des poutres mixtes acier-béton a été analysées via ce modèle, les résultats sont les suivants:

- L'augmentation de nombres des goujons réduit énormément la valeur de glissement entre la dalle en béton et profilé métallique.
- La variation d'espacement influe sur le glissement, la diminution de l'espacement permet de réduire les glissements de façon significative.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objet de la thèse est de développer un modèle analytique basé sur la méthode des éléments finis pour déterminer l'influence de nombre et l'espacement des goujons à la connexion des poutres mixtes acier-béton, leurs influences sur le glissement entre le profilé métallique et la dalle en béton. Ensuite, comparons au modèle théorique de J.M.Aribert et K .Abdel Aziz et aussi au modèle numérique 3D par SAP 2000 de Zidour M et Bensattalah.

Ce mode d'assemblage effectué par des systèmes de connexion est capable de transmettre les différents efforts à l'interface (utilisation des connecteurs), Il permet d'obtenir une solidarité entre le béton et l'acier.

Pendant cette analyse, nous nous sommes intéressés à l'influence de type de connecteurs métalliques et de leurs nombres sur le glissement total de la poutre mixte, c'est -à-dire sur le calcul du glissement au extrémités des poutres mixtes sous un chargement à mi-portée variant de 50 à 400 KN avec un pas de 50 KN.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence que :

- L'augmentation de nombres des goujons réduit énormément la valeur de glissement entre la dalle en béton et profilé métallique.
- La variation d'espacement influe sur le glissement, la diminution de l'espacement permet de réduire les glissements de façon significative.

En perspective, on recommande de simuler des modèles à leurs vraies échelles, en faisant varier le type et le nombre des connecteurs (espacement irréguliers) . Aussi, la présence ou non de la tôle en acier.

Références Bibliographiques

- [1] Moutassem Moudjib Arrahmanen : Analyse numérique des poutres composites Acier-béton simplement appuyées : étude de l'interface dalle-profil, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
- [2] J. C. Chapman Et S. Balakrishnan: experiments on composite beams. The structural engineer november, 1964 no 11 volume 42.-(John - Chapman)-
- [3] Robinson, H: tests on composite beams with cellular deck. Journal of the structural division, publisher: american society of civil engineers, 1967-8.
- [4] Menzies, J B: cp 117 and shear connectors in steel-concrete composite beams made with normal-density or lightweight concrete. publisher: institution of structural engineers issn: 1466-5123, nov 15 1971.
- [5] Wu, Y C, Slutter, R G et Fisher, J W : analysis of continuous composite beams, pennsylvania department of transportation, 1215 transportation and safety building ,harrisburg, pa 17120 usa, feb 15 1972 .
- [6] Johnson, Roger P : perte d'interaction dans les poutres mixtes de faibles portées, bulletin technique de la suisse romande, 104(1978).
- [7] Yasunori Arrzumi, Sumio Hamada Et Tateo Kajita: elastic-plastic analysis of composite beams with incomplete interaction by finite element method, conpufrrs & sruclures, vol. 14. no. 5-6. pp. 4c-462, 1981, printed in great britain.
- [8] Angelo Marcello Tarantino et Luigino Dezi: creep effects in composite beams with flexible shear connectors, struct. eng., 118(8), 2063–2080. 01 august 1992.
- [9] N. Gattesco, E. Giuriani, A. Gubana: low-cycle fatigue test on stud shear connectors, American society of civil engineers, 01 February 1997.
--- (Natalino Gattesco) ---
- [10] Zdenek P. Bazant et Jan L. Víttek: compound size effect in composite beams with softening connectors. i: energy approach, 1308 / journal of engineering mechanics / november 1999.
- [11] Slobodan Ranković et Dragoljub Drenić : static strength of the shear connectors in

- steel-concrete composite beams - regulations and research analysis -, faculty of civil engineering and architecture aleksandra medvedeva 14, 18000 niš, serbia and montenegro, facta universitatis, series: architecture and civil engineering vol. 2, no 4, 2002, pp. 251 – 259.
- [12] Stéphanie Buzon : modélisation du comportement différé des poutres mixtes acier-béton, laboratoire de génie civil de l.i.u.t. Robert Schuman, département génie civil. 72 route du Rhin. 67400 illkirch graffenstaden. xxiemes rencontres universitaires de génie civil 2003. prix « rene houpert ».
- [13] I. Valente & P. J. S. Cruz: experimental studies on shear connection between steel and lightweight concrete, civil engineering department, University Of Minho, Azurém, 4800-058 Guimarães, 2004.
- [14] Rene Maquoi, Rik Debruyckere, Jean-Francois Demonceau et Lincy Pyl : guide de construction métallique, construction mixte, construction mixte acier-béton dans les bâtiments : conception et dimensionnement a température ordinaire et en situation d'incendie selon l'euro-code 4.
- [15] Dennis Lam, et Ehab El-Lobody : behavior of headed stud shear connectors in composite beam, j. struct. eng., 131(1), 96–107. 01 january 2005.
- [16] G.S. Veríssimo, J.L.R. Paes, I. Valente, P.J.S. Cruz, R.H. Fakury: design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures. international association for bridge maintenance and safety, 2006.
- [17] Shunzhi Qian et Victor C. Li: influence of concrete material ductility on shear response of stud connections, aci materials journal, v. 103, no. 1, january-february 2006.
- [18] Khalel I. Aziz: behavior of multi-layer composite continuous beams with partial interaction, Anbar journal for engineering sciences © ajes, vol.1, no.2 / 2008.
- [19] Mirza, O: behaviour and design of headed stud shear connectors in composite steel concrete beams, the Australasian structural engineering conference, ase2008, Melbourne, Australia. December 2008.

- [20] F.D. Queiroz, G. Queiroz, D.A. Nethercot: two-dimensional fe model for evaluation of composite beams, i: formulation and validation, journal of constructional steel research, 23 january 2009.
- [21] Isabel B. Valente et Paulo J.S. Cruz : experimental analysis of shear connection between steel and lightweight concrete, journal of constructional steel research Volume 65, issues 10–11, october–november 2009, pages 1954–1963.
- [22] Zheng ze - qun, fang zhen – zheng: finite element method research on nonlinear analysis of externally prestressed steel - concrete composite beams, journal of fuzhou university (natural science edition), dec. 2009.
- [23] O. Dogan et T. M. Roberts: comparison of experimental internal forces with full and partial interaction theories in steel-concrete-steel sandwich beams, international journal of the physical sciences vol. 5(15), pp. 2322-2334, 18 november, 2010. --- (Orhan Doğan) ---
- [24] Akito Pourhamidi : étude du comportement d'une poutre mixte acier-béton de type préflex, polytech Clermont-Ferrand - mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur département génie civil – juillet 2011.
- [25] Amjad Hameed Abdul-Razaq: experimental and analytical study of the steel-concrete-steel beam under flexural behavior, college of engineering, Kufa University Al-Najaf, Iraq, 2012.
- [26] Suhaib Yahya Kasim Al-Darzi et Inas Mahmood A.H. Al-Juboory: experimental and finite element analysis of steel-concrete composite beams, Al-Rafidain engineering vol.20 no. 6 december 2012.
- [27] Amer M. Ibrahim et Saad k. Mohaisen et Qusay W. Ahmed: finite element modeling of composite steel-concrete beams with external prestressing, international journal of civil and structural engineering volume 3, no 1, 2012.
- [28] P.S. Patil, M.G. Shaikh: a study of effect of shear connector in composite beam in combined bending and shear by ansys, international journal of innovative technology

- and exploring engineering (ijitee) issn: 2278-3075, volume-3, issue-3, august 2013.
- [29] Ali Shariati , Mahdi Shariati , N.H. Ramli Sulong , Meldi Suhatril , M.M. Arabnejad Khanouki ,Mehrdad Mahoutian: experimental assessment of angle shear connectors under monotonic and fully reversed cyclic loading in high strength concrete, A. Shariati et al. / construction and building materials 52 (2014) 276–283.
- [30] P.Boeraeve : cours de stabilité : les constructions mixtes dans les bâtiments chapitre 1 : introduction : première version 19/11/2007.
- [31] Jean-Marie Aribert : construction mixte acier-béton -généralités. caractéristiques des matériaux : 10/11/2004.
- [32] Conception des planchers, notes sur les pratiques techniques, <http://notech.franceserv.com/planchers.html>.
- [33] Tebbakh Bachir : analyse expérimentale de la connexion acier-béton dans les structures mixtes, université Mentouri Constantine, faculté des sciences de l'ingénieur, directeur de thèse: sous la direction de prof. Mimoune Mostefa, doctorat d'état 2011.
- [34] Loubna Bouazaoui : contribution a l'étude expérimentale et théorique de structures mixtes acier-béton assemblées par collage, thèse de doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne .Le 21/10/2005.
- [35] Lecture 7 – Composite Steel Beams,AECT250 Lecture 7 - Scribd.
- [36] Suhaib Yahya Kasim Al-Darzi et Inas Mahmood A.H.Al-Juboory: experimental and finite element analysis of steel-concrete composite beams, Al-Rafidain engineering vol.20 no. 6 december 2012.
- [37] Belounis Radia : étude de la performance des poteaux mixtes acier-béton sous différentes sollicitations, mémoire de magister, Université De Mentouri Constantine, 2008.

- [38] Slimani Rachid : étude et caractérisation des assemblages mixtes de type poutre-poteau selon l'euro code- 4: mémoire de magister, université Mentouri Constantine-2007.
- [39] EN 1994-1-1-Eurocode 4: « design of composite steel and concrete structures ». Part 1-1 General rules and rules for building: draft N°2, April 2000.
- [40] Structural steelwork eurocodes development of a tres-national approach (s.s.e.d.t.a). s.s.e.d.t.a-2 final version 2000.
- [41] Quang-Huy Nguyen : Modélisation du comportement non-linéaire des poutres mixtes acier-béton avec prise en compte des effets différés.
- [42] M. Zidour, T. Bensattalah, L. Hadji, T. H. Daoudji, A. Tounsi et El A. Adda Bedia, 1^{ère} Conférence Internationale de la construction métallique et mixte. (CICOMM (2015) «L'influence du nombre et espacement des goujons sur la connexion des poutres mixtes acier-béton » l'Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie, 12-13 Octobre 2015.
- [43] **ARIBERT J. M., ABDEL AZIZ K,** Calcul des poutres mixtes jusqu'à l'état limite ultime avec un effet de soulèvement à l'interface acier-béton. Construction Métallique, n° 4, pp. 3-36, 1985.

