

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريش
Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi- B.B.A.
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences de technologie
قسم هندسة مدنية
Département de génie civil



UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ
Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la technologie

Filière : Génie civil

Spécialité : Structure

Intitulé

**Etude de la connexion (acier-béton) dans les
poutres mixtes
des bâtiments métalliques**

Présenté par : ZEHAR Imene

Soutenu : 06-07-2019

Devant le jury :

Président : Dr. BOUZID

Encadrant : Dr. MAZOUZ Aida

Examineurs :

- Dr. SOUKI Esma
- Dr. Bouglada

Année universitaire : 2018/2019



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ
وَالَّذِي يُضَوِّبُ الْمَوْتَى
إِنَّ رَبَّهُ لَسَدِيدٌ
إِلَىٰ عَرْشِهِ الرَّحِيمُ
الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيَّاحَ
تُحْمَلُهُ السَّحَابُ
وَيُنزِلُ مِنَ السَّمَاءِ
مَاءً فَيُخْرِجُ بِهِ
الْحَبَّ وَالنَّخْلَ وَالزَّيْتُونَ
وَالنَّخْلَ وَالزَّيْتُونَ
وَالنَّخْلَ وَالزَّيْتُونَ

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu le tout Puissant de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail, également je remercie infiniment mes parents et mon marie, qui mon encouragé et aidé à arriver à ce stade de ma formation

Mes remerciements vont à docteur **MAZOU Aida** mon encadreur pour m'avoir guidé pour la réalisation de ce projet

mes plus grands remerciements vont à professeur TITOU MESSAOUD qui ma aidée lors de mon travail .

Je tiens à remercier tous ceux et celle qui ont contribué à finaliser ce modeste travail.

je remercie vivement les étudiants Master génie civil pour leur aide morale durant toute la période de préparation.

enfin, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé et assisté durant mes études

Résumé :

Ce travail de fin d'études aborde, en détail, le calcul élastique et plastique des poutres mixtes (acier-béton), selon la classe des sections, sous un moment fléchissant et sous un effort tranchant. Après avoir précisé les formules de résistance des goujons à tête soudés, en dalle pleine comme en dalle mixte (qui sont les connecteurs les plus utilisés aujourd'hui), le dimensionnement de la connexion est traité de manière approfondie, en distinguant le calcul élastique et le calcul plastique (lorsqu'il est possible) et, dans ce dernier cas, une connexion complète et une connexion partielle ; le dimensionnement de l'armature transversale est également précisé. Enfin, on termine par des applications numériques pour faciliter l'utilisation de calcul pour les ingénieurs praticiens dans les bureaux d'étude algériens.

Mots clés : poutre mixte, connexion (acier-béton), connecteurs, Eurocode 4.

SOMMAIRE

Remerciements	I
Résumé	II
ملخص	III
Sommaire.....	IV
Liste des figures.....	1
Liste des tableaux	II

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1- Définition et avantages des poutres mixtes	1
2- Problématique.....	1
3- Objectif	2
4- Contenu de manuscrit	2

CHAPITRE 1 : Etude bibliographique sur les poutres mixtes (Acier-béton)

1.1- Définitions.....	5
1.2 Poutres mixtes	5
1.3- Historique de calcul des poutres mixtes	6
1.4- Importance de la connexion (effet de la connexion).....	8
1.4.1- Sans connexion.....	8
1.4.2- Avec connexion.....	8
1.5- Types de connecteurs	9
1.5.1- Connecteur en goujon à tête.....	9
1.5.2- Connecteur en équerre clouée façonnée à froid	10
1.5.3- Connecteurs en butées	10
1.6- Classification des connecteurs selon leur capacité de glissement	11
1.7- Connexion totale et partielle	11
1.8- Résistance des connecteurs au cisaillement.....	12
1.8.1- Goujons à tête soudés en présence d'une dalle pleine	12
1.8.2- Goujons à tête soudés en présence d'une dalle mixte	12
1.9- Caractéristiques géométriques des sections transversales	13
1.9.1- Largeur participante de la dalle de béton (b_{eff})	13
1.9.2- Classification des sections transversales	14
1.10- Caractéristiques Des Matériaux	15
1.10.1- Béton	15
1.10.2. Acier de construction	16
1.10.3-Aciers d'armature	17

CHAPITRE 2 : Dimensionnement des poutres mixtes selon l'EUROCODE 4

2.1- Analyse élastique des poutres mixtes	19
2.1.1- Hypothèses de calcul.....	19
2.1.2- Coefficient d'équivalence ($n = E_a / E_c$)	19
2.1.3- Caractéristiques géométriques de la section mixte homogénéisée.....	20
2.1.4- Vérification des contraintes normales de flexion	22

2.1.5- Dimensionnement élastique de la connexion.....	23
2.2- Analyse plastique des poutres mixtes.....	25
2.2.1- Hypothèses de calcul	25
2.2.2- Calcul du moment résistant plastique en connexion complète	25
A- section sous moment positif.....	26
B- section sous moment négatif.....	29
2.2.3-Dimensionnement plastique de la connexion.....	31
2.2.4-Calcul du moment résistant plastique en connexion partielle.....	32
A- En présence d'une dalle pleine.....	33
B - En présence d'une dalle mixte.....	33
2.2.5-Dimensionnement des armatures transversales de la connexion.....	34
2.2.6-Résistance des sections mixtes à l'effort tranchant.....	34
2.2.7-Vérification des poutres mixtes à l'état limite ultime	35
2.2.8-Vérification des poutres mixtes à l'état limite de service	35

CHAPITRE 3 :Exemple d'application Effet du degré de connexion sur le comportement des poutres mixtes

Introduction	39
3.1- Description des poutres mixtes	39
3.2- Etude de la poutre mixte PM1	40
3.2.1- Largeur participante de la dalle	40
3.2.2- Position de l'axe neutre plastique.....	41
3.2.3- Moment résistant plastique.....	42
3.2.4- Chargement de la poutre et sollicitations.....	42
3.2.5- Vérifications à E.L.U.....	43
3.2.5.1-Vérification de résistance à la flexion.....	43
3.2.5.2-Vérification à l'effort tranchant.....	43
3.2.6- Dimensionnement de la connexion.....	43
3.2.7- Vérification de la flèche à E.L.S.....	44
3.3- Etude des poutres mixtes PM2, PM3, PM4.....	45
3.3.1- Moment résistant plastique réduit $M_{pl,Rd}^{+(red)}$ en fonction du degré de connexion $\frac{N}{N_f}$	45
3.3.2- Flèche de la poutre mixte δ en fonction du degré de connexion $\frac{N}{N_f}$	46

CONCLUSION GENERAL

Conclusion général.....	48
Bibliographie.....	50

Liste des figures :

Chapitre 1 :

Figure 1.1- Exemples d'éléments mixtes (acier-béton).....	5
Figure 1.2- Poutre mixte (acier- béton).....	5
Figure 1.3- Effet de la connexion acier-béton.....	8
Figure 1.4- Différents types de Figure connecteurs.....	9
Figure 1.5- Connecteur en goujon à tête.....	9
Figure 1.6- Différents types de goujons soudés sur la semelle supérieure du profilé métallique.....	10
Figure 1.7- Connecteur en équerre clouée.....	10
Figure 1.8- Connecteurs en butées.....	10
Figure 1.9- Classification des connecteurs selon leur capacité de glissement	11
Figure 1.10- Goujon soudé.....	12
Figure 1.11- Goujon soudé avec dalle mixte.....	13
Figure 1.12- Largeur participante de la dalle pour une poutre mixte.....	13
Figure 1.13- Travées équivalentes pour la détermination de la largeur participante de la dalle de béton.....	14
Figure 1.14- Les allures de la loi de comportement moment-rotation Correspondant à chaque classe.....	15
Figure 1.15- Diagramme (contrainte-déformation) des aciers S235 et S355.....	16
Figure 1.16- Diagramme contrainte-déformation d'un acier d'armature.....	17

Chapitre 2

Figure 2.1- Notion et convention adoptée pour une section mixte en travée et sur appui.....	20
Figure 2.2 : organigramme de calcul élastique des poutres mixtes	25
Figure 2.3 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans la dalle (flexion positive).....	26
Figure 2.4 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans la semelle	

(Flexion positive).....	27
Figure 2.5 : distributions plastique des contraintes avec axe neutre dans l'âme (flexion positive).....	28
Figure 2.6 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans la semelle (flexion négative).....	30
Figure 2.7 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans l'âme (flexion négative).....	31
Figure 2.8 : longueurs critiques de poutres simplement appuyées.....	32
Figure 2.9 : Définition de la section A_e des barres d'armature transversale pour diverses surfaces de rupture.....	34
Figure 2.10 : organigramme de calcul plastique des poutres mixtes.....	37
Chapitre 3	
Figure 3.1. Dimensions des poutres mixtes étudiées.....	40
Figure 3.2. Moment résistant réduit en fonction du degré de connexion.....	46
Figure 3.3. Variation de la flèche en fonction du degré de connexion.....	47

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Principales caractéristiques des bétons de masse volumique normal.....	15
Tableau 3.1 : Caractéristiques géométriques et mécaniques des poutres mixtes étudiées.....	39

Liste de symboles

d : le diamètre du goujon (avec $d \leq 22\text{mm}$).

h : la hauteur du goujon.

f_u : la résistance ultime en traction spécifiée de l'acier du goujon (sans dépasser 500 N/mm^2).

f_{cK} : la résistance caractéristique sur cylindre du béton à l'âge considéré.

E_{cm} : la valeur moyenne du module sécant du béton

$\gamma_v = 1,25$ (coefficient de sécurité).

N_r : est le nombre de goujons dans une nervure (sans prendre $N_r > 2$ dans la formule).

f_{ck} : résistance caractéristique à la compression sur cylindre, mesurée à 28 jours.

f_{ckm} : résistance moyenne à la traction, à la même période.

E_{cm} : module sécant d'élasticité à prendre en compte pour les actions ayant des effets à court

E_a : est le module d'élasticité longitudinale de l'acier de construction.

E_c : est le module d'élasticité longitudinale du béton.

($n = 18$) : Sous charge de longue durée (charge permanente) et effets différés (retrait, fluage et température).

($n = 6$) : Sous charge de courte durée.

$E_c = E_{cm}$: pour les actions de courte durée.

$E_c = E_{cm}/3$: pour les actions de longue durée (fluage et retrait).

$E_c = E_{cm}/2$: pour les cas intermédiaires.

A_c : aire de la section du béton ($A_c = h_c b_{eff}$).

A_s : aire de la section des armatures tendues.

A_b : aire de la section mixte homogénéisée ($A_b = A_a + A_c/n$).

b_{eff} : largeur participante de la dalle de béton (voir § I-8-1).

h_a : hauteur de la poutre métallique.

h_c : hauteur de la dalle de béton située au-dessus des nervures de la tôle.

x : hauteur comprimée de la dalle de béton.

e : hauteur des nervures de la tôle.

h : hauteur totale de la section mixte ($h = h_a + e + h_c$).

Z_a : position du centre de gravité de la poutre métallique par rapport à la fibre inférieure.

Z_s : position du centre de gravité des armatures par rapport à la fibre inférieure de la poutre métallique.

Z_b : position de l'axe neutre de la section mixte homogénéité par rapport à la fibre inférieure de la poutre métallique.

I_b : moment d'inertie de la section mixte homogénéisée par rapport à l'axe neutre élastique.

A_a : aire de la section du profilé métallique.

V : l'effort tranchant dans la section considérée.

S_c : moment statique de la dalle (de largeur b_{eff}) par rapport à l'axe neutre de la section mixte.

I_b : moment inertie de la section mixte.

n : coefficient d'équivalence élastique $\left(n = \frac{E_a}{E_c}\right)$.

V_{el} : effort rasant par unité de longueur.

L : longueur de répartition des connecteurs.

P : résistance au cisaillement de chaque connecteur.

Introduction générale

1- Définition et avantages des poutres mixtes

Les poutres mixtes sont largement utilisées de nos jours dans la construction des ponts mixtes et des planchers mixtes de bâtiments métalliques à étages multiples grâce à leurs avantages vis-à-vis des poutres purement métalliques ou des poutres en béton armé. Parmi ces avantages, on peut citer, par exemple :

- une meilleure optimisation dans l'utilisation des matériaux ;
- une bonne résistance aux efforts (le béton est utilisé pour résister aux efforts de compression et l'acier est utilisé pour résister aux efforts de traction) ;
- une bonne résistance aux problèmes d'instabilité (le déversement est empêché par la dalle en béton) ;
- une meilleure résistance au feu, car le béton de la dalle possède une bonne résistance thermique qui permet de ralentir l'échauffement des poutres en acier ;
- une meilleure protection contre la corrosion (le béton de la dalle assure une protection de l'acier contre les intempéries) ;
- une plus grande rapidité de construction, etc.

La théorie des poutres mixtes est basée essentiellement sur l'hypothèse qu'il existe une connexion entre le profilé métallique et la dalle en béton, la connexion entre les deux matériaux est assurée par des pièces métalliques, dit « connecteurs » qui sont fixés sur la face supérieure du profilé métallique et ancrés dans la dalle en béton, dont leur rôle est d'empêcher (ou limiter) le glissement et le soulèvement pouvant se produire à l'interface de liaison.

2- Problématique

Dans la théorie classique, le dimensionnement des poutres mixtes de bâtiment a été basé sur l'hypothèse que la connexion entre la dalle en béton et la poutre métallique était supposée complète avec l'absence de glissement à l'interface de liaison et d'après cette hypothèse la poutre mixte se comporte de façon monolithique. Cependant, le comportement réel des poutres mixtes est différent de cette hypothèse simplificatrice précédente pour les deux causes suivantes :

- D'une part, quelque soit l'efficacité des connecteurs utilisés, on ne peut pas éviter la présence de certains glissements à l'interface acier-béton au stade limite ultime d'une poutre mixte.
- D'autre part, la connexion partielle est imposée, parfois, par la nature même de la poutre mixte (lors de l'utilisation d'une dalle mixte avec tôle mince nervurée, on ne peut pas placer un nombre suffisant de connecteurs qu'il est nécessaire à arriver à une connexion complète). Dans ce cas le nombre prévu de connecteurs est inférieur à celui requis pour une connexion complète.

3- Objectif

Ce travail de fin d'études a donc pour objectif général de modéliser par la méthode des éléments finis des poutres mixtes de bâtiment avec la prise en compte de la connexion partielle. Le but principal est de mettre en évidence *l'influence du degré la connexion (acier-béton) sur le comportement des poutres mixtes à l'état limite ultime et à l'état limite de service*. C'est dans ce contexte qu'il faut placer notre contribution.

4- Contenu de manuscrit

Pour être plus précis, on va présenter maintenant chacun des trois chapitres qui constituent notre mémoire :

- On présente dans le **premier chapitre**, une étude bibliographique sur les poutres mixtes acier-béton. On commence d'abord par l'historique de l'évolution des méthodes de calcul des poutres mixtes avec une connexion partielle. En suite, on examine, à partir de résultats expérimentaux tirés de la littérature, le comportement des connecteurs en mettant l'accent sur les relations qui seront utilisés pour le dimensionnement de la connexion dans les poutres mixtes. Puis on montre l'importance de la connexion en expliquant la notion de la connexion totale et partielle et son influence sur le comportement des poutres mixtes de bâtiment.
- Au **deuxième chapitre**, on présente le dimensionnement des poutres mixtes aux états limites ultimes et aux états limites de service, pour les deux modes de connexion, connexion complète et connexion partielle, selon le règlement européen Eurocode 4 en dégageant de cette présentation les relations et équations de base qui seront utilisées ultérieurement dans le chapitre suivant.

- Dans le **troisième chapitre**, on montre, à travers d'un exemple d'application, l'influence du degré de connexion sur le comportement des poutres mixtes à l'état limite ultime et à l'état limite de service.

Enfin on achève notre travail par une **conclusion générale** dans laquelle on rappelle les principaux résultats acquis de ce travail de recherche, et on dégage quelques **perspectives** de ce travail.

Chapitre 1 : Etude bibliographique sur les poutres mixtes (Acier-béton)

1.1- Définitions

Un élément structural en construction est défini comme mixte, s'il associe deux ou plusieurs matériaux de nature et de propriétés différentes liés entre eux, la même idée existe dans les constructions mixtes (acier-béton):

- Le béton pour résister aux efforts de compression,
- L'acier pour résister aux efforts de traction et aux efforts tranchant.

On peut distinguer trois types principaux d'éléments mixtes :

Les poutres mixtes - les dalles mixtes et les poteaux mixtes (**Fig.1.1**).

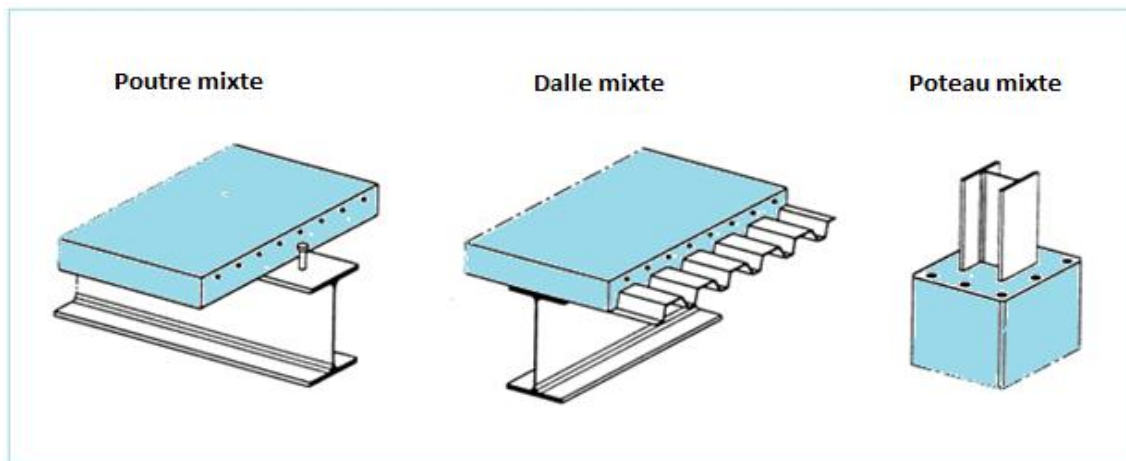


Figure 1.1- Exemples d'éléments mixtes (acier-béton)

1.2- Poutres mixtes

Les poutres mixtes acier-béton sont des éléments porteurs fléchis composés d'une poutre métallique connectée à une dalle en béton par des connecteurs (**Figure 1.2**).

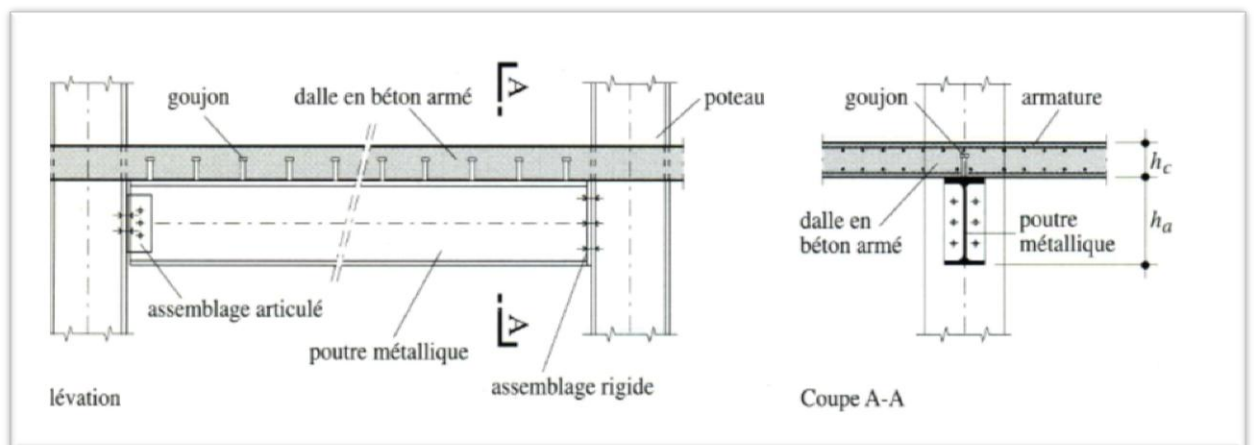


Figure 1.2- Poutre mixte (acier- béton)

1.3- Historique de calcul des poutres mixtes

La première approche a été proposée en 1912 par Andrews [**Trouillet, 1987**]. Il considère que l'acier et le béton sont liés par adhérence. Le calcul des sollicitations internes se fait donc suivant les hypothèses classiques de la résistance des matériaux. Cette approche est valable jusqu'à rupture par adhérence. Pour reprendre des sollicitations au delà de ce seuil, il faut utiliser des connecteurs ponctuels. Le modèle d'Andrews s'avérant inutilisable pour ces niveaux de sollicitations, plusieurs théories élastiques ont été proposées par Stussi et Granholm [**Stussi, 1947**], [**Granholm, 1949**]. En 1951, Newmark a montré l'existence du glissement le long de l'interface acier- béton. Il envisage un comportement linéaire pour l'acier, le béton et la connexion. Son modèle est satisfaisant pour les charges de service, cependant il s'avère trop approximatif pour des charges élevées du fait de la linéarité de la courbe charge/glissement des connecteurs [**Newmark, 1951**].

De 1964 à 1972, Chapman [**Chapman, 1964**] a testé 17 poutres mixtes isostatiques avec divers types de connecteurs en faisant varier l'intensité de la connexion et le mode de chargement. Ses résultats ont incité Barnard et Johnson [**Barnard, 1965**] à définir une méthode de calcul analytique de la résistance ultime des poutres mixtes isostatiques. Cette première tentative de calcul plastique des poutres mixtes suppose une connexion complète et un module d'élasticité du béton constant jusqu'à ce que l'acier atteigne sa limite d'élasticité. Au-delà, ces auteurs estiment que le comportement non linéaire du béton n'a pas une grande influence et qu'ils peuvent se contenter de ne retenir que la contribution de l'acier relevant d'un diagramme élasto-plastique parfait. D'autres essais sur des poutres hyperstatiques ont montré la validité de leur méthode, du moins dans les limites des dimensions des prototypes testés, moyennant quelques aménagements de la méthode, en particulier pour le calcul de la résistance ultime en section sous moment négatif. L'apparition du calcul automatique des structures sur ordinateur a incité Chapman à réaliser le premier modèle de calcul de poutres mixtes à connexion partielle [**Chapman, 1968**], [**Chapman, 1972**]. Il adopte un modèle de comportement élasto-plastique parfait pour l'acier et le béton et une loi de connexion continue à l'interface des deux matériaux. Il impose une force d'interaction nulle au droit des appuis simples de la poutre isostatique et néglige l'influence du glissement à l'interface sur la distribution du moment de flexion pour les poutres hyperstatiques. En 1967, Siess et Dai ont présenté un modèle de comportement pour des états élastiques et plastiques en supposant que

Chapitre 1 : Etude bibliographique sur les poutres mixtes(Acier-béton)

la liaison à l'interface acier/ béton est discrétisée et la courbe charge-glissement est décomposée en plusieurs droites [**Trouillet, 1987**].

En 1978, Hallam a proposé un modèle prenant en compte une loi de comportement du connecteur dépendante de l'histoire du chargement [**Hallam, 1978**]. Un modèle de ce type a été développé par Seddik et Behr [**Seddik, 1980**] au LCPC pour le cas des matériaux élastiques-plastiques.

En 1982, un modèle a été développé par Aribert et Labib [**Aribert, 1982**]. Ce modèle a été repris ensuite par Aribert et Abdel-Aziz [**Aribert, 1985**]. Ces auteurs ont supposé un comportement élasto-plastique parfait pour l'acier avec un diagramme contrainte-déformation symétrique en traction et en compression par rapport à l'origine, un comportement parabole rectangle pour le béton ; ils considèrent que le béton en traction n'offre aucune résistance, la liaison à l'interface acier-béton s'effectue de manière discontinue uniquement au droit de chaque connecteur.

Ensuite, plusieurs auteurs ont développé des méthodes de calcul numérique. C'est ainsi qu'en 1994, Ren et al. ont comparé deux modèles numériques avec des résultats d'essais de poutres mixtes dans le but de présenter un programme de calcul par éléments finis capable de prévoir au mieux le comportement et la résistance de poutres mixtes [**Ren, 1994**].

En 1996, Bin Zhao et al ont développé un modèle de calcul par éléments finis en formulation lagrangienne en prenant le glissement à l'interface comme inconnue [**Bin, 1996**]. En 1997, Aribert a présenté une approche analytique de l'influence de la nuance de l'acier du profilé métallique allant de S 235 à S 460 sur le degré minimum de connexion partielle d'une poutre mixte [**Aribert, 1997**].

En 2001, Seracino et al. [**Seracino, 2001**] ont introduit le concept du point focal de l'interaction partielle fondé sur la théorie classique linéaire élastique de l'interaction partielle de Newmark [**Newmark, 1951**]. Le modèle permet de prévoir le changement des contraintes dans l'acier et le béton dû à l'interaction partielle. L'idée est de considérer que la distribution des déformations est comprise entre celle de deux déformations limites : la première se produit quand les connecteurs ont une rigidité infinie (l'interaction est totale) la seconde lorsque la rigidité est nulle (il y'a absence d'interaction). Les deux courbes de déformation représentant ces deux cas se coupent en deux points appelés points focaux. La distribution des

déformations due à l'interaction partielle est donc obtenue en passant par ces deux points avec une pente qui est préalablement définie par le calcul.

1.4- Importance de la connexion (effet de la connexion)

La connexion entre la dalle en béton et la poutrelle métallique est la justification même de la poutre mixte, cette connexion est réalisée par des moyens de liaison appelés **connecteurs**, qu'ils ont pour but d'empêcher le glissement relatif entre les deux éléments à connecter ainsi que leur séparation (le soulèvement de la dalle). En assurant ainsi une reprise des efforts de cisaillement longitudinaux, cela permet d'obtenir une section mixte dont les deux composantes travaillent ensemble.

1.4.1- Sans connexion

L'absence de connexion entre le profile métallique et la dalle de béton n'est pas une bonne solution, car chaque élément est fléchi d'une façon indépendante (**Figure 1.3(a)**). La partie tendue de la dalle de béton se fissure et ne participe pas à la flexion. La résistance de la poutre métallique sera déterminée par un phénomène d'instabilité (Déversement, voilement de la semelle comprimée).

1.4.2- Avec connexion

Avec une connexion parfaite entre les deux matériaux (**Figure I.3(b)**), le diagramme des contraintes normales montre que l'exploitation des matériaux est meilleure. Toute la dalle est comprimée, la semelle supérieure du profile métallique est tenue latéralement par la dalle. De plus, l'acier est sollicité presque totalement en traction.

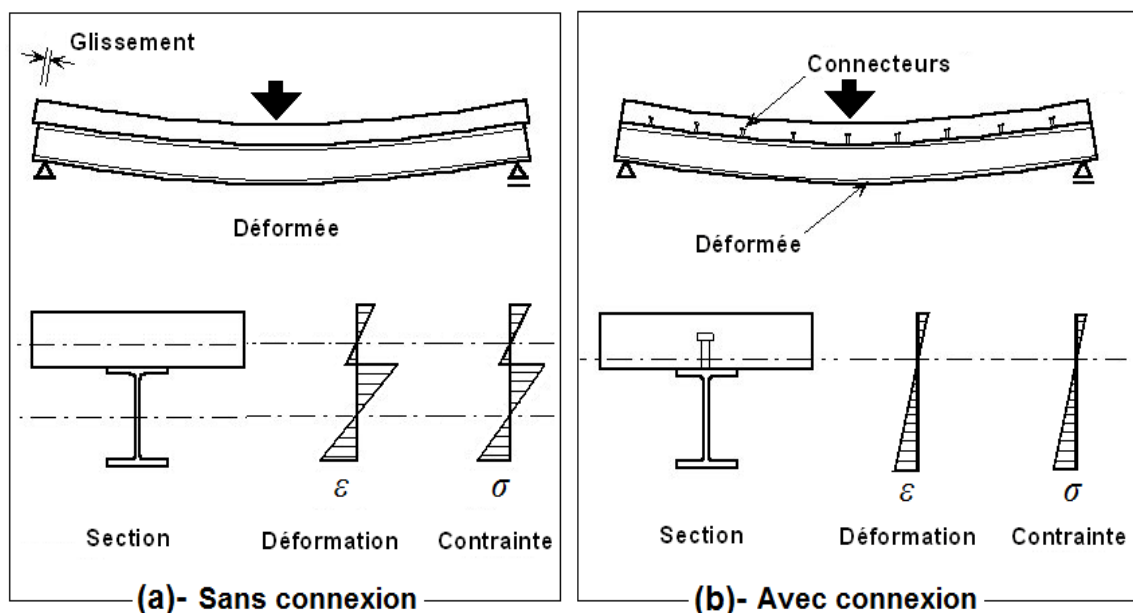


Figure 1.3- Effet de la connexion acier-béton

Après cette comparaison, on résulte que la présence de la connexion augmente, à la fois, la résistance et la rigidité de la poutre mixte et, en pratique, mène à la réduction de ses dimensions et souvent à la réduction de son coût. La connexion est, donc, la solution la plus judicieuse techniquement.

1.5- Types de connecteurs

Les connecteurs peuvent être: en goujons, en barres rondes, en équerres et en coupons de profils divers soudés sur la semelle supérieure de la poutre métallique (**Figure I.4**).

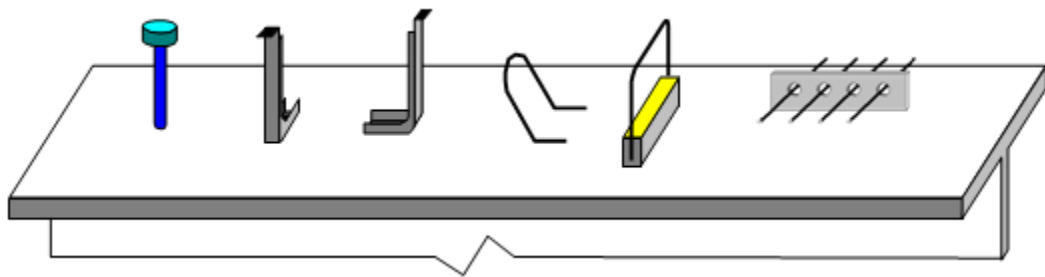


Figure 1.4- Différents types de connecteurs.

1.5.1- Connecteur en goujon à tête

Il s'agit de connecteurs souples, soudés sur la poutre métallique avec un pistolet électrique (soudage par résistance) où plus rarement à l'électrode. La tête du goujon permet d'empêcher l'arrachement de celui-ci et le soulèvement éventuel de la dalle de béton. C'est le type de connecteurs dont l'utilisation est la plus répandue, tant dans le domaine du bâtiment que dans celui des ponts.

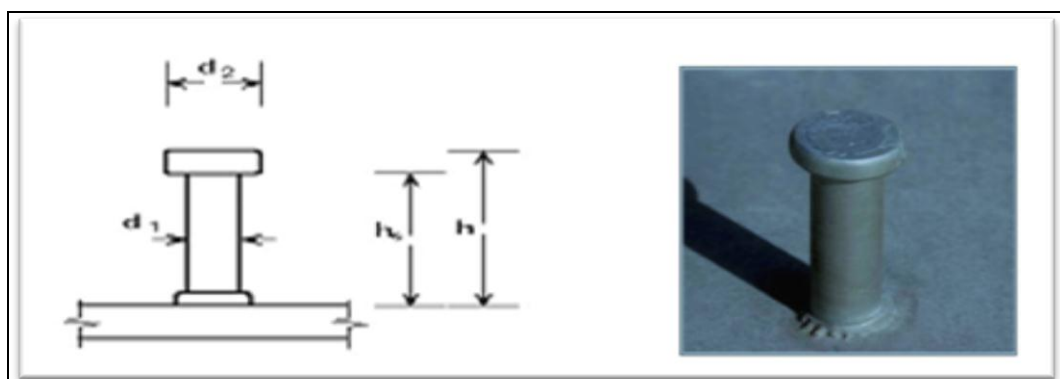


Figure 1.5- Connecteur en goujon à tête

La première utilisation des goujons est due à Viest, Siess et Newmark [Newmark, 1951]. Au départ, ils étaient soudés manuellement jusqu'à l'apparition du système industriel proposé et commercialisé par Nelson Stud Welding (**Figure 1.6**).

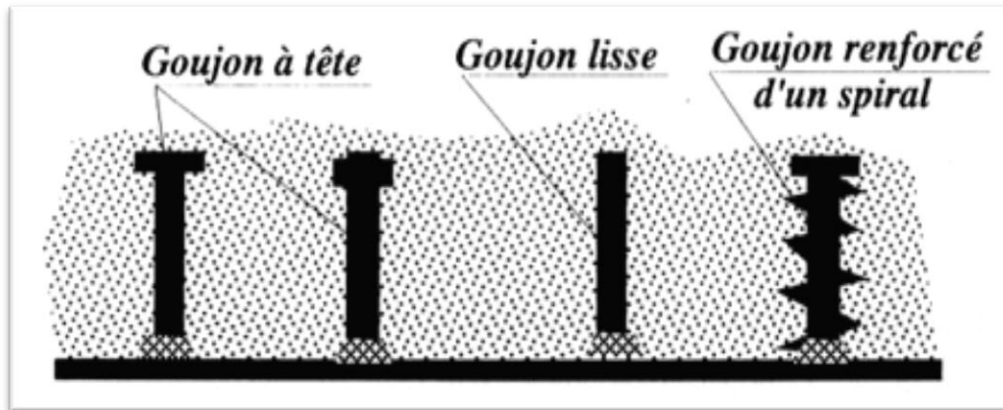


Figure 1.6- Différents types de goujons soudés sur la semelle supérieure du profilé métallique

1.5.2- Connecteur en équerre clouée façonnée à froid

Il s'agit de connecteurs souples, fixés sur la poutre métallique par clouage au pistolet. Ils sont utilisés exclusivement pour les poutres mixtes de bâtiment.

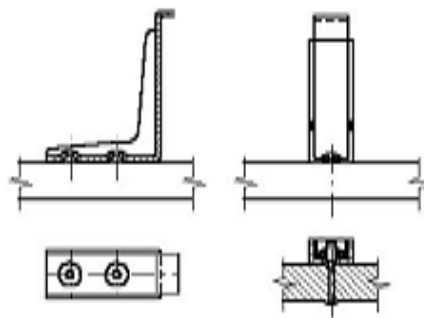


Figure 1.7- Connecteur en équerre clouée

1.5.3- Connecteurs en butées

Leur utilisation plutôt rare, essentiellement dans les ponts, pour l'introduction locale d'efforts rasants, Ils ne permettent pas la redistribution des efforts rasants.

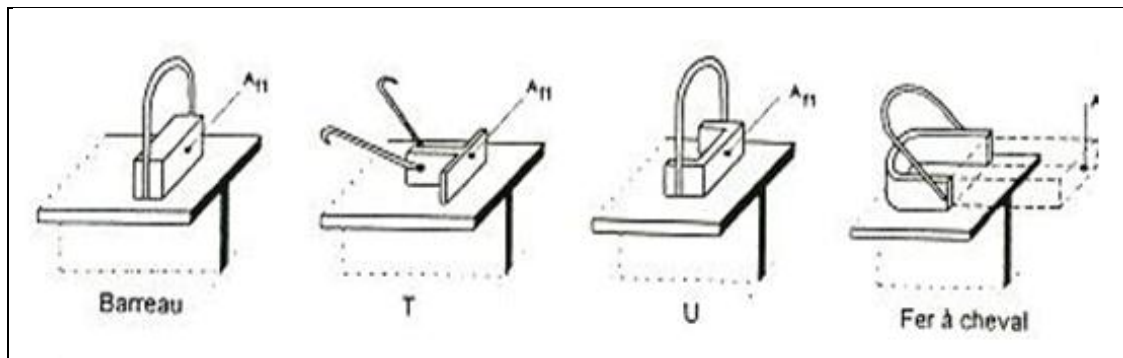


Figure 1.8- Connecteurs en butées

1.6- Classification des connecteurs selon leur capacité de glissement

L'Eurocode 4 propose deux classes de connecteurs : les connecteurs rigides et les connecteurs ductiles.

- Un connecteur est dit ductile lorsqu'il présente une capacité de déformation suffisante en glissement pour justifier l'hypothèse d'un comportement plastique de la connexion en cisaillement. L'Eurocode 4 considère qu'une valeur de glissement supérieure ou égale à 6mm permet, en pratique, de considérer un connecteur comme ductile.
- Le connecteur est rigide (non ductile), si pour une sollicitation déterminée il présente un Comportement idéalement élastique.

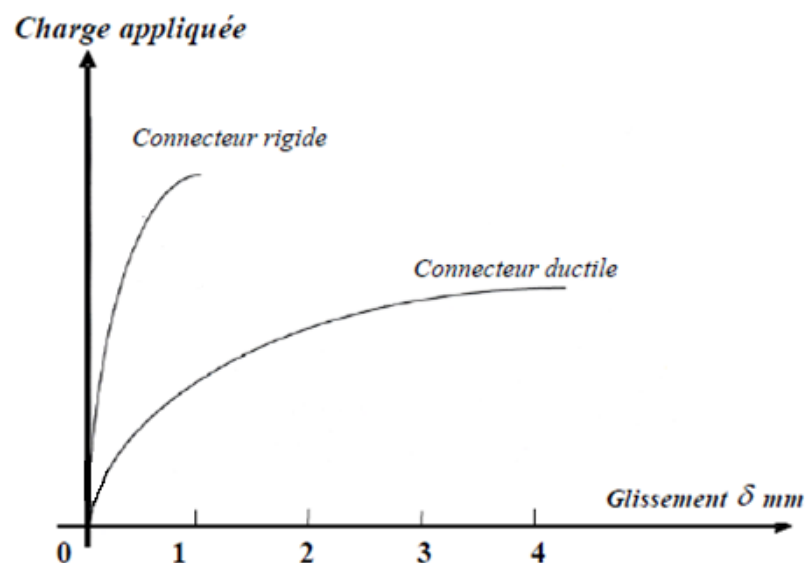


Figure 1.9- Classification des connecteurs selon leur capacité de glissement

1.7- Connexion totale et partielle

Chapitre 1 : Etude bibliographique sur les poutres mixtes(Acier-béton)

Selon le type de connecteurs et leur nombre, on distingue deux types de connexion,

La connexion totale et la connexion partielle.

- On est en présence d'une poutre mixte à connexion totale ou complète lorsqu'une augmentation du nombre de connecteurs n'entraîne plus d'augmentation de la résistance à la flexion de la poutre. La ruine de la poutre est engendrée par la plastification (ou par l'instabilité) de la section d'acier ou par la ruine du béton.
- La connexion est partielle lorsque le nombre de connecteurs dans une zone de cisaillement est inférieur au nombre requis pour l'obtention d'une connexion complète. Dans ce cas, il existe un glissement à l'interface acier-béton. La ruine de la poutre mixte avec une connexion partielle sera atteinte par l'épuisement de sa résistance à la flexion.

1.8- Résistance des connecteurs au cisaillement

1.8.1- Goujons à tête soudés en présence d'une dalle pleine

La résistance de la liaison par goujon est donnée par l'Eurocode 4 comme étant la plus petite des valeurs données par les deux formules suivantes (correspondant à des ruines respectivement au niveau du goujon ou du béton enrobant le goujon) :

$$P_{Rd}^{(1)} = \frac{0,8 \times f_u \times \left(\frac{\pi \times d^2}{4} \right)}{\gamma_v} \dots\dots\dots(1.1)$$

$$P_{Rd}^{(2)} = \frac{0,29 \times \alpha \times d^2 \times E_{cm} \times \sqrt{f_{ck}}}{\gamma_v} \dots\dots\dots(1.2)$$

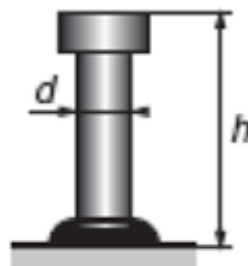


Figure 1.10- Goujon soudé

Avec :

d : le diamètre du goujon (avec $d \leq 22\text{mm}$).

h : la hauteur du goujon.

f_u : la résistance ultime en traction spécifiée de l'acier du goujon (sans dépasser 500 N/mm^2).

f_{ck} : la résistance caractéristique sur cylindre du béton à l'âge considéré.

E_{cm} : la valeur moyenne du module sécant du béton (voir paragraphe 3.1.4.1 de EC4),

$\alpha = 1$ pour $h/d > 4$ (facteur correctif).

$$\alpha = 0.2 [(h / d) + 1] \text{ pour } 3 \leq h / d \leq 4.$$

$\gamma_v = 1,25$ (coefficient de sécurité).

1.8.2- Goujons à tête soudés en présence d'une dalle mixte

Lorsque les nervures de tôle profilée perpendiculaires à l'axe de la poutre métallique, les formules (1-1) et (1-2) doivent être multipliées par un coefficient k_t de réduction éventuelle pour tenir compte des conditions d'enrobage des goujons et de leur mode de mise en place. Ce coefficient est donné par la formule empirique :

$$k_t = \left(\frac{0,7}{N_r^{0,5}} \right) \left(\frac{b_0}{h_p} \right) \left(\frac{h}{h_p - 1} \right) \leq 1 \dots \dots \dots (1-3)$$

N_r : est le nombre de goujons dans une nervure (sans prendre $N_r > 2$ dans la formule).

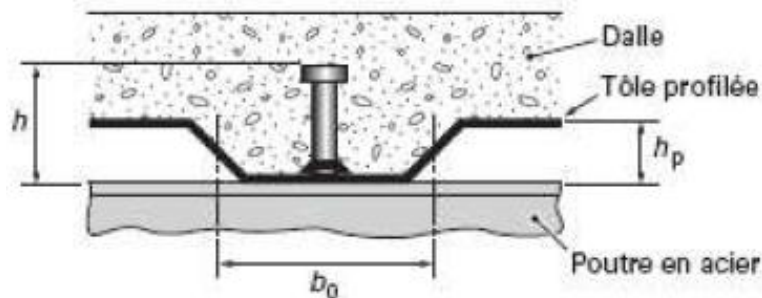


Figure 1.11- Goujon soudé avec dalle mixte

Mais dans le cas d'une nervure de tôle parallèle à l'axe de la poutre métallique, les formules (1.1) et (1.2) doivent être multipliées par le coefficient :

$$k_l = 0,6 \left(\frac{b_0}{h_p} \right) \left(\frac{h}{h_p - 1} \right) \leq 1 \dots \dots \dots (I-4)$$

1.9- Caractéristique géométriques des sections transversales

1.9.1- Largeur participante de la dalle de béton (b_{eff})

Dans un plancher mixte, le transfert de l'effort de cisaillement des connecteurs à la dalle ne mobilise pleinement celle-ci que si l'espacement $2b_i$ entre les poutres métalliques n'est pas trop grand (effet de traînage de cisaillement). De manière pratique, on utilise le concept de largeur participante (b_{eff}) de la dalle qui permet de supposer une distribution uniforme des contraintes normales sur cette largeur.

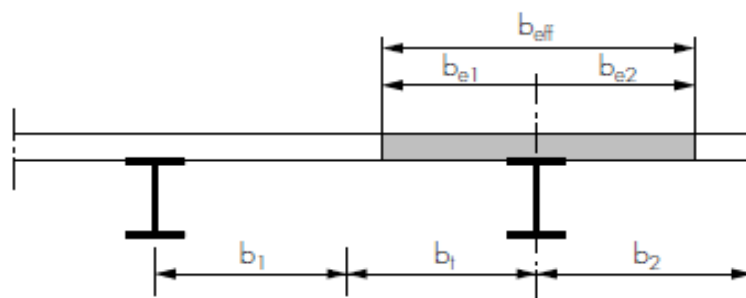


Figure 1.12- Largeur participante de la dalle pour une poutre mixte

Aussi l’Eurocode 4 propose des formules simples de b_{eff} . Pour les structures de bâtiment on peut adopter :

$$b_{eff} = b_{e1} + b_{e2} \dots\dots\dots (I- 5)$$

avec

$$b_{ei} = \min (L_0/8, b_i) \dots\dots\dots (I- 6)$$

Où, L_0 est fonction de la portée de la poutre. Pour une poutre isostatique sur deux appuis simples, L_0 est égale à la portée L de la poutre. Dans le cas d’une poutre continue, L_0 doit être pris différent dans les zones de moments de flexion positifs (b_{eff}^+) celles de moments de flexion négatifs (b_{eff}^-), (où seule l’armature tendue est concernée), conformément au schéma suivant :

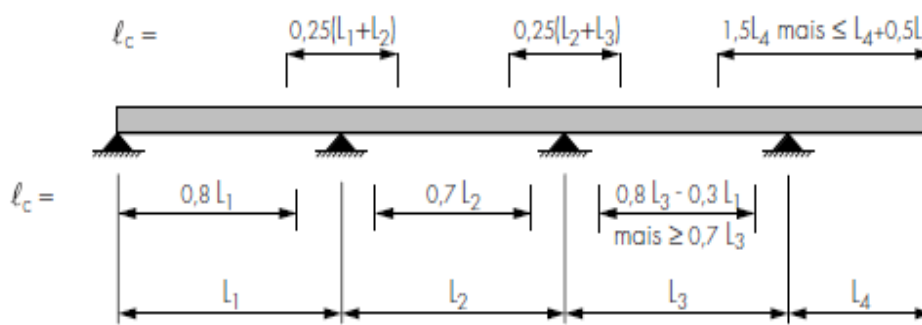


Figure 1.13- Travées équivalentes pour la détermination de la largeur participante de la dalle de béton

1.9.2- Classification des sections transversales

Ce paramètre permet de calculer la résistance des sections transversales en fonction de leur capacité à atteindre pleinement la plastification sur toute la hauteur de la section (rotule plastique). Selon la capacité de rotation de la section et le voilement local éventuel, on définit la classe à laquelle appartient la section (classe 1 à 4):

Chapitre 1 : Etude bibliographique sur les poutres mixtes(Acier-béton)

- **Classe 1:** Quand la section est capable de développer le moment de résistance plastique avec une capacité de rotation suffisante pour permettre la formation d'une rotule plastique.
- **Classe 2:** Lorsque la section est également capable de développer le moment résistant plastique, mais avec une capacité de rotation limitée.
- **Classe 3 :** Section transversales dont la contrainte calculée dans la fibre comprimée extrême de l'élément en acier peut atteindre, la limite d'élasticité, mais dont le voilement local est susceptible d'empêcher le développement du moment de résistance plastique.
- **Classe 4 :** Sections transversales dont la résistance au moment fléchissant ou à la compression est déterminée obligatoirement en tenant compte explicitement des effets du voilement local.
 - pour les sections mixtes de classe 1 ou 2, la résistance ultime est basée sur leur résistance plastique.
 - pour les sections mixtes de classe 3, la résistance ultime est basée sur leur résistance élastique, (section totale)
 - pour les sections mixtes de classe 4, la résistance ultime est basée sur la résistance élastique de la partie efficace de ces sections (sections efficaces) compte tenu du voilement local.

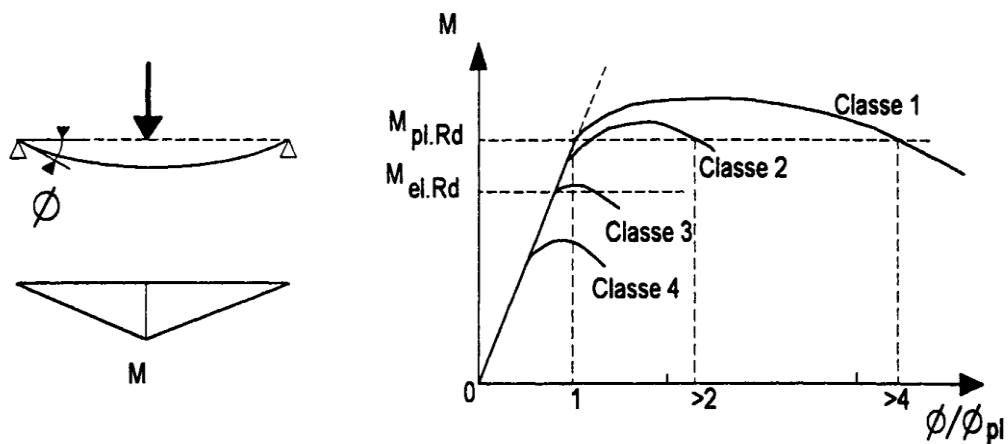


Figure 1.14- Les allures de la loi de comportement moment-rotation
Correspondant à chaque classe

1.10- Caractéristiques Des Matériaux

1.10 .1- Béton

Le béton est défini par sa résistance à la compression, Nous nous intéresserons donc uniquement aux caractéristiques mécaniques du béton puisque ce sont elles qui déterminent sa résistance.

Chapitre 1 : Etude bibliographique sur les poutres mixtes(Acier-béton)

Il s'agit des valeurs caractéristiques de la résistance à la compression sur cylindre (f_{ck}) et sur cube ($f_{ck, cube}$) avec un fractile de 5%, données en N/mm^2 C. $f_{ck}/f_{ck, cube}$.

Pour les bétons de masse volumique normale ($\rho=2400kg/m^3$) L'eurocode 4 s'applique aux classes de résistance allant de C20/25 à C50/60 et fait référence pour les caractéristiques de ces bétons.

Tableau 1.1 : Principales caractéristiques des bétons de masse volumique normale

Classe de résistance	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck} (N/mm ²)	20	25	30	35	40	45	50
f_{ckm} (N/mm ²)	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1
E_{cm} (kN/mm ²)	30000	31000	32000	34000	35000	36000	37000

Le Tableau 1.1 rassemble les valeurs de trois caractéristiques essentielles :

- * f_{ck} : résistance caractéristique à la compression sur cylindre, mesurée à 28 jours.
- * f_{ckm} : résistance moyenne à la traction, à la même période.
- * E_{cm} : module sécant d'élasticité à prendre en compte pour les actions ayant des effets à court terme.

Dans le domaine des poutres et dalles mixtes du bâtiment, on utilise habituellement

Un béton de type C20 à C25, dans le domaine des poutres mixtes de pont, on préférera un béton plus performant de type C30 –C40 ou éventuellement supérieur.

Les propriétés du béton varient cependant au cours du temps, le fluage et le retrait sont les principaux phénomènes qui influencent du béton.

1.10.2. 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 d'un acier telles que résistance à la traction, limite d'élasticité, allongement de rupture.

Dans la Figure (I.14), on a tracé la relation (contrainte-déformation spécifique) des deux principaux types d'acier utilisés dans la construction (S235 et S355), ou l'on admis un comportement parfaitement linéaire du matériau jusqu'à la limite d'élasticité.

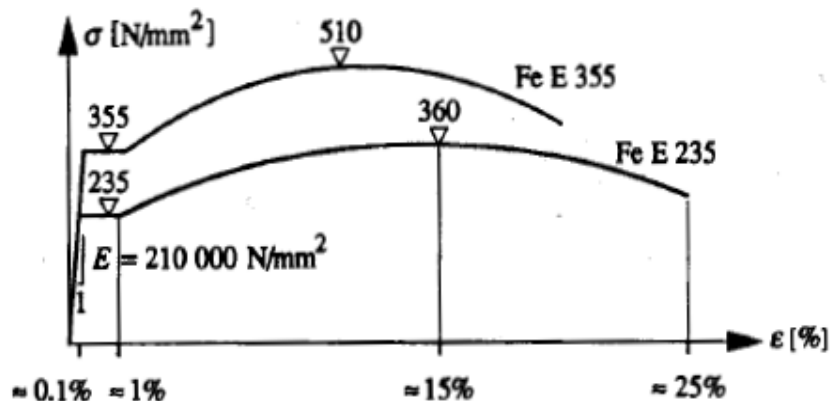


Figure 1.15- Diagramme (contrainte-déformation) des aciers S235 et S355

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

- * Module d'élasticité longitudinale $E_a = 210000 \text{ N/mm}^2 = 210 \text{ KN/mm}^2$
- * Module de cisaillement $G_a = E / 2(1+\nu) = 81000 \text{ N/mm}^2$
- * coefficient de contraction latérale (Poisson)..... $\nu = 0,3$
- * charge volumique..... $\rho = 78500 \text{ N/m}^3$

La contrainte f_y correspondant à la limite d'élasticité est fonction de l'épaisseur du produit.

1.10.3-Aciers 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 ($E_s = E_a = 210000 \text{ N/mm}^2$).

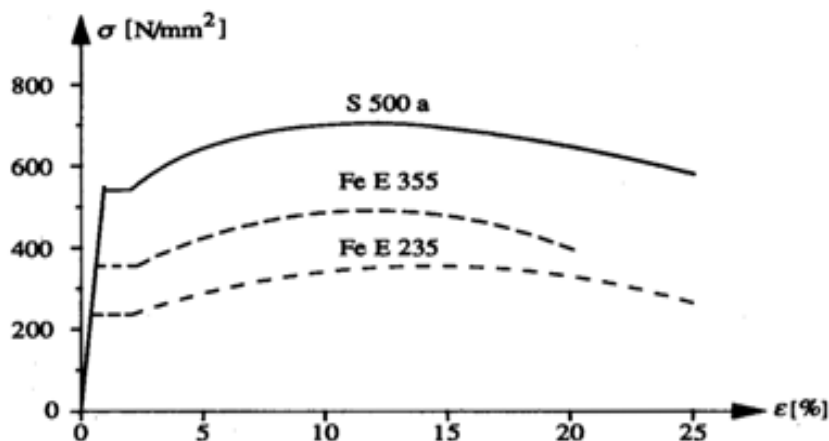


Figure 1.16- Diagramme contrainte-déformation d'un acier d'armature.

Chapitre 2:

Dimensionnement des poutres mixtes selon l'EUROCODE4

2.1- Analyse élastique des poutres mixtes

2.1.1- Hypothèses de calcul

L'analyse élastique des poutres mixtes est basée sur les hypothèses suivantes :

- * La connexion acier-béton est complète (il n'y a pas de glissement).
- * On admet que les matériaux acier et béton ont un comportement élastique linéaire (loi de HOOK, $(\sigma = E \cdot \varepsilon)$). Cela est vrai pour autant que les contraintes de flexion ne dépassent pas les contraintes limites élastique.
- * La loi de conservation des sections planes (hypothèses de Navier –Bernoulli).
- * On néglige le béton tendu, admis fissuré.
- * La contribution des armatures longitudinales peut être négligée lorsque la dalle de béton est comprimée.

2.1.2- Coefficient d'équivalence ($n = E_a/E_c$)

Pour déterminer les caractéristique géométriques de la section transversale d'une poutre mixte on utilise la théorie des sections homogénéisées qui permet de remplacer la section de béton par une section équivalente en acier à l'aide d'un coefficient d'équivalente (n) défini par :

$$n = E_a/E_c \dots\dots\dots (2.1)$$

Où :

E_a : est le module d'élasticité longitudinale de l'acier de construction.

E_c : est le module d'élasticité longitudinale du béton.

($n = 18$) : Sous charge de longue durée (charge permanente) et effets différés (retrait, fluage et température).

($n = 6$) : Sous charge de courte durée.

L'Eurocode 4 (§3.1.4.2) propose d'adopter les valeurs suivantes pour le module d'élasticité du béton :

$E_c = E_{cm}$: pour les actions de courte durée.

$E_c = E_{cm}/3$: pour les actions de longue durée (fluage et retrait).

$E_c = E_{cm}/2$: pour les cas intermédiaires.

Avec :

E_{cm} : valeur moyenne du module sécant d'élasticité [KN/m²]

Selon l'Eurocode 2 (§3.1.2.5) (E_{cm}) peut être calculé par l'expression suivante :

$$E_{cm} = 9,5(f_{ck} + 8)^{1/3} \dots \dots \dots (2.2)$$

Avec :

f_{ck} : résistance caractéristique à la compression sur cylindre du béton [KN/mm²].

2.1.3- Caractéristiques géométriques de la section mixte homogénéisée

* Notation (voir figure 2.1)

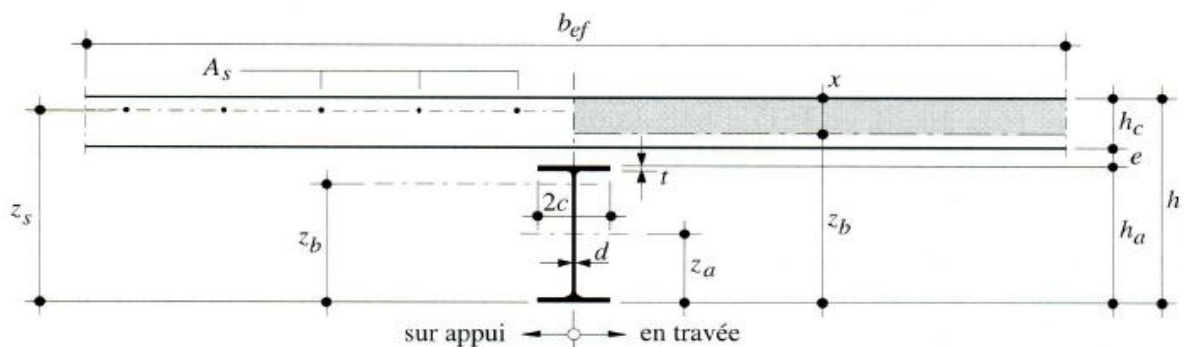


Figure 2.1 : Notion et convention adoptée pour une section mixte en travée et sur appui [7].

Une convention est la référence à la fibre inférieure de la poutre métallique pour positionner les axes de gravité ou les différents axes neutres possible. Voici les notations adoptées pour les sections mixtes fléchies :

A_a : aire de la section du profilé métallique.

A_c : aire de la section du béton ($A_c = h_c b_{eff}$).

A_s : aire de la section des armatures tendues.

A_b : aire de la section mixte homogénéisée ($A_b = A_a + A_c/n$).

b_{eff} : largeur participante de la dalle de béton (voir § I-8-1).

h_a : hauteur de la poutre métallique.

h_c : hauteur de la dalle de béton située au-dessus des nervures de la tôle.

x : hauteur comprimée de la dalle de béton.

e : hauteur des nervures de la tôle.

h : hauteur totale de la section mixte ($h = h_a + e + h_c$).

z_a : position du centre de gravité de la poutre métallique par rapport à la fibre inférieure.

z_s : position du centre de gravité des armatures par rapport à la fibre inférieure de la poutre métallique.

z_b : position de l'axe neutre de la section mixte homogénéité par rapport à la fibre inférieure

de la poutre métallique.

I_b : moment d'inertie de la section mixte homogénéisée par rapport à l'axe neutre élastique.

A- Section en travée (moment positif)

*** Position de l'axe neutre élastique de la section mixte (Z_b)**

La position de l'axe neutre élastique sera déterminée par équilibre des moments statiques par rapport à l'axe passant à la surface inférieure de l'aile du profilé.

On suppose par ailleurs que l'axe neutre est situé dans l'épaisseur de la dalle en béton.

Soit les moments statiques :

$$S_a = A_a \times Z_a \quad ; \quad S_c = A_c \times Z_c = b_{eff}^+ x \left(h - \frac{x}{2} \right)$$

$$S_b = A_b \times Z_b = \left(A_a + \frac{b_{eff}^+ x}{n} \right) (h - x)$$

L'équilibre des moments statiques s'écrit :

$$S_b = S_a + \frac{S_c}{n} \quad \text{soit :} \quad \left(A_a + \frac{b_{eff}^+ x}{n} \right) (h - x) = A_a \times Z_a + \frac{b_{eff}^+ x}{n} \left(h - \frac{x}{2} \right)$$

Après résolution on obtient :

$$\frac{b_{eff}^+}{2n} x^2 + A_a x + A_a (Z_a - h) = 0$$

La racine de cette équation qui est solution du problème est donnée par :

$$x = \frac{n A_a}{b_{eff}^+} \left[-1 + \sqrt{1 - \frac{2 b_{eff}^+}{n A_a} (Z_a - h)} \right]$$

Soit la position de l'axe neutre élastique par rapport à la fibre inférieure :

$$Z_b = h - x = h - \frac{n A_a}{b_{eff}^+} \left[-1 + \sqrt{1 - \frac{2 b_{eff}^+}{n A_a} (h - Z_a)} \right] \dots \dots \dots (2.3)$$

*** Moment d'inertie de la section mixte homogénéisée (I_b^+)**

Le calcul de la position de l'axe neutre Z_b permet de calculer le moment d'inertie I_b de la section mixte homogénéisée :

$$I_b = I_a + A_a (Z_b - Z_a)^2 + \frac{I_c}{n} + \frac{A_c}{n} \left(\frac{x}{2} \right)^2$$

$$I_b = I_a + A_a (Z_b - Z_a)^2 + \frac{b_{eff}^+ x^3}{12n} + \frac{b_{eff}^+ x}{n} \left(\frac{x}{2} \right)^2$$

Soit:

$$I_b = I_a + I_a (Z_b - Z_a)^2 + \frac{b_{eff}^+ x^3}{3n} \dots \dots \dots (2.4)$$

B- Section sur appui (moment négatif)

*** Position de l'axe neutre élastique de la section mixte(Z_b)**

Chapitre 2 : Etude Dimensionnement des poutres mixtes selon L'EUROCODE4

Le béton tendu, admis fissuré, est négligé. On suppose que l'axe neutre se trouve dans le profilé.

$$S_a = A_a \times Z_a$$

$$S_s = A_s \times Z_s \quad ; \quad S_b = A_b \times Z_b = (A_a + A_s)Z_b$$

Par équilibre : $S_b = S_a + S_s$

D'où :

$$Z_b = \frac{A_a \times Z_a + A_s \times Z_s}{A_a + A_s} \dots \dots \dots (2.5)$$

* Moment d'inertie de la section mixte homogénéisée (I_b)

En utilisant la théorie d'HUYGENS, le moment d'inertie de la section mixte par rapport à l'axe neutre est donné par l'expression suivante :

$$I_b = I_a + A_a (Z_a - Z_b)^2 + I_s + A_s (Z_s - Z_b)^2 \dots \dots \dots (2.6)$$

Avec I_s est négligeable.

Tableau II.1 : Caractéristique géométriques de la section mixte homogénéisée

Section	Axe neutre	Position de l'axe et inertie de la section
En travée	Dans la dalle $A_a (h - Z_a - h_c)$ $< \frac{A_c \times h_c}{2n}$	$Z_b = h - \frac{nA_a}{b_{eff}^+} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2b_{eff}^+}{n A_a} (h - Z_a)} \right]$ $I_b = I_a + A_a (Z_b - Z_a)^2 + \frac{b_{eff}^+ x^3}{3n} (h - Z_a)$
Sur appui	Dans le profilé $A_a (h - Z_a - h_c)$ $\geq \frac{A_c \times h_c}{2n}$	$Z_b = \frac{1}{A_a + \frac{A_c}{n}} \left[A_a \times Z_a \times \frac{A_c}{n} \left(h - \frac{h_c}{2} \right) \right]$ $I_b = I_a + A_a (h - Z_a)^2 + \frac{A_c}{3n} h_c^2 - A_b (h - Z_b)^2$ $Z_b = \frac{A_a \times Z_a + A_s \times Z_s}{A_a + A_s}$ $I_b = I_a + A_a (Z_a - Z_b)^2 + A_s (Z_s - Z_b)^2$

2.1.4- Vérification des contraintes normales de flexion

Les contraintes normales agissant sur les différents éléments de la section mixte soumise à un moment de flexion M peuvent être déterminées à l'aide des relations suivantes :

* Contrainte de flexion dans le béton (fibre supérieure) :

$$\sigma_c = \frac{1}{n} \times \frac{M_{sd}}{I_b} (h - Z_b) \dots \dots \dots (2.7)$$

* Contrainte de flexion dans l'acier de profilé (fibre inférieure) :

$$\sigma_a = \frac{M_{sd}}{I_b} \times Z_b \dots \dots \dots (2.8)$$

* Contrainte de flexion dans l'armature (traction) :

$$\sigma_s = \frac{M_{sd}}{I_b} (Z_s - Z_b) \dots \dots \dots (2.9)$$

La vérification de la résistance à la flexion consiste à limiter les contraintes dans le béton à une certaine valeur de la résistance à la compression et limiter les contraintes dans l'acier à une certaine valeur de la limite élastique.

* Dans le béton : $\sigma_c = \frac{1}{n} \times \frac{M_{sd}}{I_b} (h - Z_b) \leq \frac{0,85f_{cK}}{\gamma_c} \dots \dots \dots (2.10)$

* Dans l'acier : $\sigma_a = \frac{M_{sd}}{I_b} \times Z_b \leq \frac{f_y}{\gamma_a} \dots \dots \dots (2.11)$

* Dans l'armature : $\sigma_s = \frac{M_{sd}}{I_b} (Z_s - Z_b) \leq \frac{f_{sK}}{\gamma_s} \dots \dots \dots (2.12)$

Avec : γ_a, γ_c et γ_s sont des coefficients partiels de sécurité des matériaux :

$\gamma_a=1,1 \quad \gamma_c=1,5 \quad \gamma_s=1,15$

2.1.5- Dimensionnement élastique de la connexion

A - Calcul élastique de la connexion

Lorsque la résistance des sections mixtes est également établie avec un calcul élastique, l'effort de cisaillement(V_{el}) dépend directement de l'effort tranchant.

$$yV_{el} = \frac{VS_c}{I_b n} \dots \dots \dots (2.13)$$

V : l'effort tranchant dans la section considérée.

S_c : moment statique de la dalle (de largeur *beff*) par rapport à l'axe neutre de la section mixte.

I_b : moment inertie de la section mixte.

n : coefficient d'équivalence élastique ($n = \frac{E_a}{E_c}$).

B - Nombre de connecteurs(N)

Le nombre de connecteurs sur la longueur examiné (L) est donné par la formule :

$$N = \frac{V_{el} \times L}{p} \dots \dots \dots (2.14)$$

V_{el} : effort rasant par unité de longueur.

L : longueur de répartition des connecteurs.

P : résistance au cisaillement de chaque connecteur.

C - Espacement des connecteurs(e)

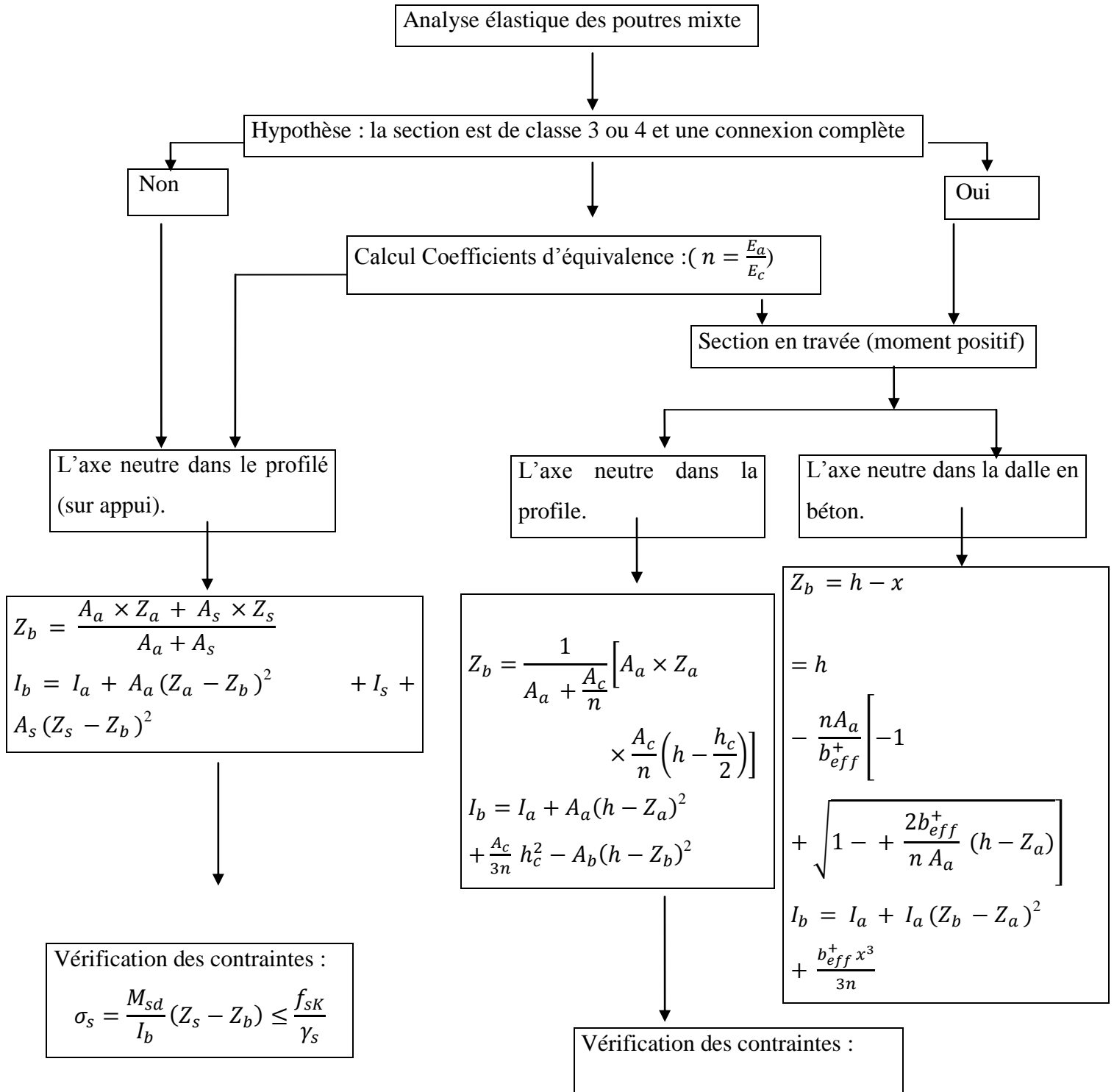
Chapitre 2 : Etude Dimensionnement des poutres mixtes selon L'EUROCODE4

Pour des raisons pratiques de construction, on choisit des connecteurs identiques sur toute la longueur de la poutre.

Le pas (e) entre deux connecteurs est donné par la relation :

$$e = \frac{PN}{V_{el}} \dots \dots \dots (2.15)$$

La procédure calcul élastique des poutres mixtes est résumée dans l'organigramme suivant :



$$\sigma_c = \frac{1}{n} \times \frac{M_{sd}}{I_b} (h - Z_b) \leq \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c}$$
$$\sigma_a = \frac{M_{sd}}{I_b} \times Z_b \leq \frac{f_y}{\gamma_s}$$

Figure 2.2 : organigramme de calcul élastique des poutres mixtes.

2.2- Analyse plastique des poutres mixtes

2.2.1- Hypothèses de calcul

- La connexion de la travée où est la section concernée permet une « interaction complète», l'un des composants (profilé, dalle, armature) pouvant atteindre sa résistance maximale.
- Toutes les fibres de la poutre en acier, y compris celles situées au voisinage immédiat de l'axe neutre, sont plastifiées en traction ou en compression (contraintes $\pm f_y / \gamma_a$).
- La distribution des contraintes normales dans le béton comprimé est uniforme et égale à $0,85 f_{ck} / \gamma_c$, (0,85 est un facteur de calibrage pour l'utilisation d'un diagramme
- La résistance du béton en traction est négligée.
- les armatures de la dalle, lorsqu'elles sont sollicitées en traction, sont plastifiées à la valeur de la contrainte de calcul f_{sk} / γ_s .
- la contribution des armatures peut être négligée lorsque la dalle est comprimée. En présence d'une dalle mixte, la tôle profilée comprimée doit être négligée.

2.2.2- Calcul du moment résistant plastique en connexion complète

A- section sous moment positif

On se place dans la situation, fréquente en bâtiment, où la dalle est de type mixte, avec les ondes de la tôle profilée perpendiculaires à l'axe de la poutre en acier. La hauteur maximale possible de béton comprimé est alors l'épaisseur h_c de la dalle au-dessus des sommets d'ondes, la hauteur des ondes étant par ailleurs définie par h_p . les formules données ci-après restent valables dans le cas d'une dalle pleine, en choisissant $h_p=0$.

Chapitre 2 : Etude Dimensionnement des poutres mixtes selon L'EUROCODE4

Pour simplifier la présentation, on suppose également que le profilé en acier est doublement symétrique, le principe des calculs resterait le même avec d'autres situations, par exemple inégales, dalle pleine avec renformis ou dalle mixte avec onde parallèle à l'axe de la poutre en acier.

L'expression de $M_{pl,Rd}^+$ dépendant de la position de l'axe neutre plastique, trois cas sont envisagés ci-après.

1^{er} Cas -Axe neutre situé dans la dalle

Désignons respectivement par f_a et f_c les résistances plastiques du profilé en traction et de la dalle en compression :

$$f_a = \frac{A_a \times f_y}{\gamma_a} \dots \dots \dots (2.16)$$

$$f_c = A_c \left(\frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right) \dots \dots \dots (2.17)$$

Où, A_a : est de la section du profilé. Le cas considéré se produit lorsque :

$$f_c \geq f_a \dots \dots \dots (2.18)$$

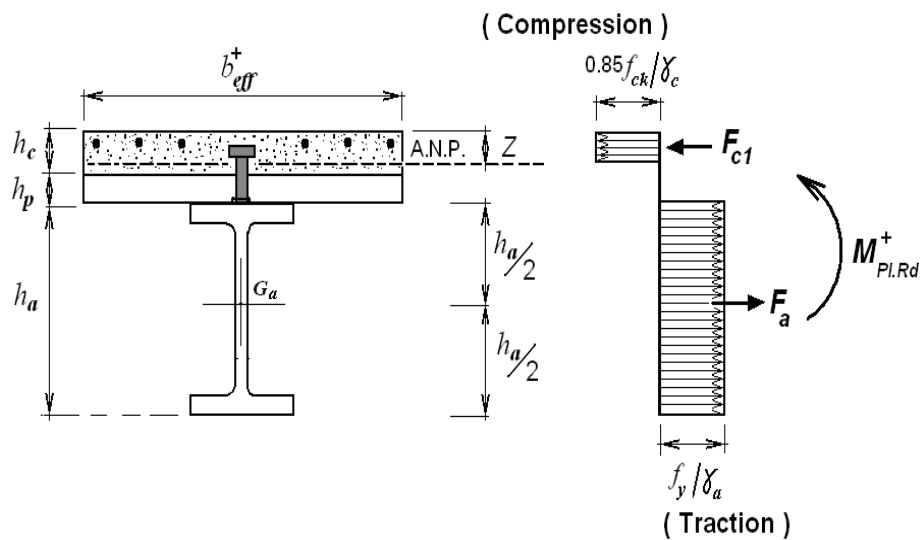


Figure 2.3 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans la dalle (flexion positive).

La cote Z de l'axe neutre plastique (A.N.P) par rapport à la face supérieure de la dalle (Figure 2.3) est donnée par :

$$Z = \frac{f_a}{b_{eff}^+ 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c}} \leq h_c \dots \dots \dots (2.19)$$

Le moment résistant se calcule alors au niveau de la résultante du béton comprimé :

$$M_{pl,Rd}^+ = f_a \left(\frac{h_a}{2} + h_c + h_p - \frac{Z}{2} \right) \dots \dots \dots (2.20)$$

2^{émé} Cas - Axe neutre situé dans la semelle an acier

Ce cas se produit lorsque $f_c < f_a$, si bien que la cote z de l'axe neutre plastique est supérieure à l'épaisseur totale de dalle ($h_c + h_p$), mais pour que l'axe neutre se situe dans la semelle (d'épaisseur t_f et de largeur b_f) (figure 2.4), la condition supplémentaire à satisfaire est:

$$f_a - f_c \leq \frac{2 \times b_f \times t_f \times f_y}{\gamma_a} \dots \dots \dots (2.21)$$

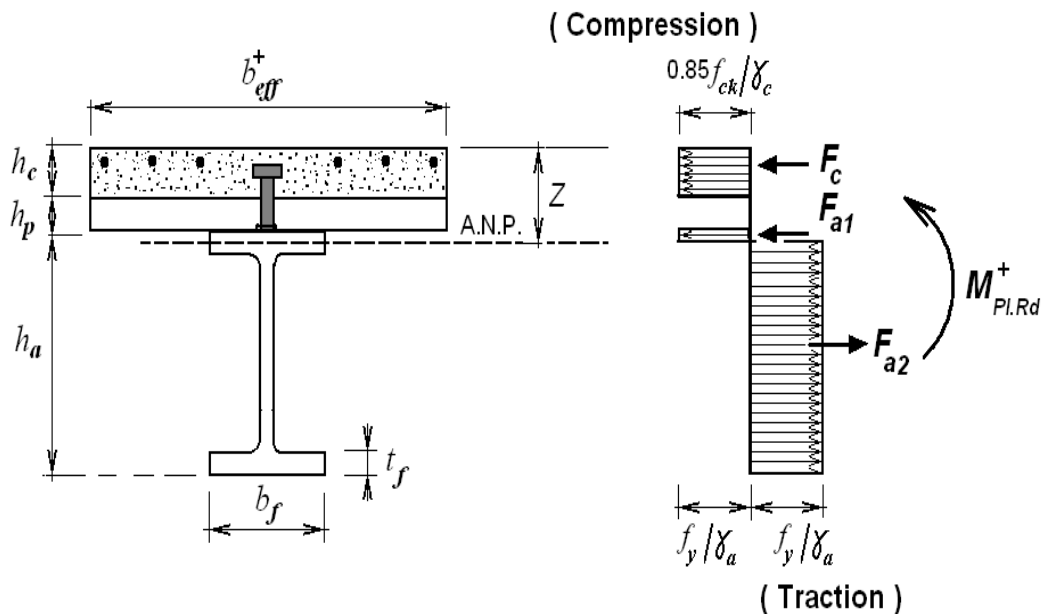


Figure 2.4 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans la semelle (Flexion positive).

La cote Z se calcule sans difficulté en considérant que la contrainte dans l'acier comprimé est égale à $2f_y / \gamma_a$ de manière à obtenir f_a comme résultante des contraintes de traction dans le profilé, au centre de gravité de celui-ci. On déduit alors Z de la condition d'équilibre :

$$f_a = f_c + 2b_f(Z - h_c - h_p) \frac{f_y}{\gamma_a} \dots \dots \dots (2.22)$$

Calculant le moment résistant également au niveau de la résultante du béton comprimé, on obtient :

$$M_{pl,Rd}^+ = f_a \left(\frac{h_a}{2} + \frac{h_c}{2} + h_p \right) - \frac{(f_a - f_c)(Z + h_p)}{2} \dots \dots \dots (2.23)$$

3^{ème} Cas - Axe neutre situé dans l'âme

Lorsque :

$$f_c < f_a \text{ et } f_a - f_c > 2b_f t_f f_y / \gamma_a$$

L'axe neutre plastique se situe dans l'âme (figure 2.5) :

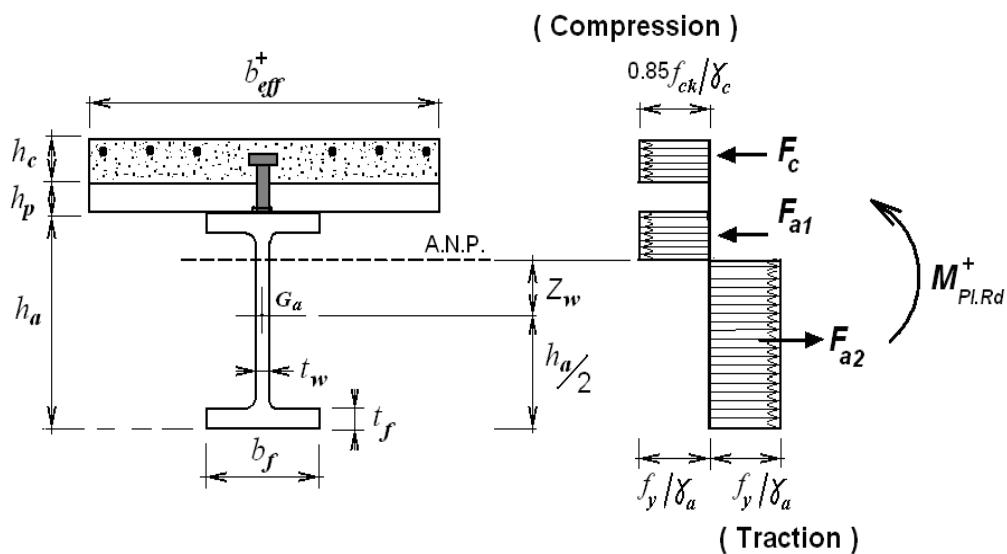


Figure 2.5 : distributions plastique des contraintes avec axe neutre dans l'âme (flexion positive).

Pour simplifier la présentation, supposons que l'axe neutre se situe en dehors du congé âme-semelle si l'on est en présence d'un profilé laminé. On trouve facilement la hauteur d'âme en traction Z_w située au-dessus du centre de gravité du profilé, en considérant que la contrainte est égale à $2f_y / \gamma_a$ sur cette hauteur de manière à obtenir une distribution uniforme de contraintes de compression f_y / γ_a sur toute la demi-hauteur supérieure $h_a / 2$ du profilé.

Soit :

$$Z_w = \frac{f_c}{2t_w \frac{f_y}{\gamma_a}} \dots \dots \dots (2.24)$$

Chapitre 2 : Etude Dimensionnement des poutres mixtes selon L'EUROCODE4

Le moment résistant se calcule alors au centre de gravité du profilé :

$$M_{pl,Rd}^+ = M_{apl,Rd} + f_c \left(\frac{h_a}{2} + \frac{h_c}{2} + h_p \right) - f_c \frac{Z_w}{2}$$

Ou encore :

$$M_{pl,Rd}^+ = M_{apl,Rd} + f_c \left(\frac{h_a}{2} + \frac{h_c}{2} + h_p \right) - \frac{f_c^2}{4t_w \times \frac{f_y}{\gamma_a}} \dots \dots \dots (2.25)$$

L'intérêt de cette expression est d'introduire le moment de résistance plastique $M_{apl,Rd}$ dont la valeur peut être tirée de tableaux de produits sidérurgiques lorsqu'un profilé laminé est utilisé.

B- section sous moment négatif

Une section mixte sous moment de flexion négatif résiste au niveau du profilé en acier et des barres d'armatures comprises à l'intérieur de la largeur participante b_{eff}^- de dalle (sur appui intermédiaire), la dalle est fissurée sur toute son épaisseur et l'axe neutre plastique se trouve dans le profilé : deux cas sont envisagés selon que l'axe neutre se trouve dans la semelle ou dans l'âme.

1^{er} Cas - Axe neutre situé dans la semelle en acier

Désignons par f_s la résistance plastique des barres d'armature :

$$f_s = \frac{A_s \times f_{sk}}{\gamma_s} \dots \dots \dots (2.26)$$

f_{sk} : contrainte limite élastique des armatures en traction.

γ_s : coefficient partiel de sécurité pour les armatures.

Le cas considéré ici se produit lorsque :

$$f_a > f_c \quad \text{et} \quad f_a - f_s \leq 2b_f \times t_f \times \frac{f_y}{\gamma_a} \dots \dots \dots (2.27)$$

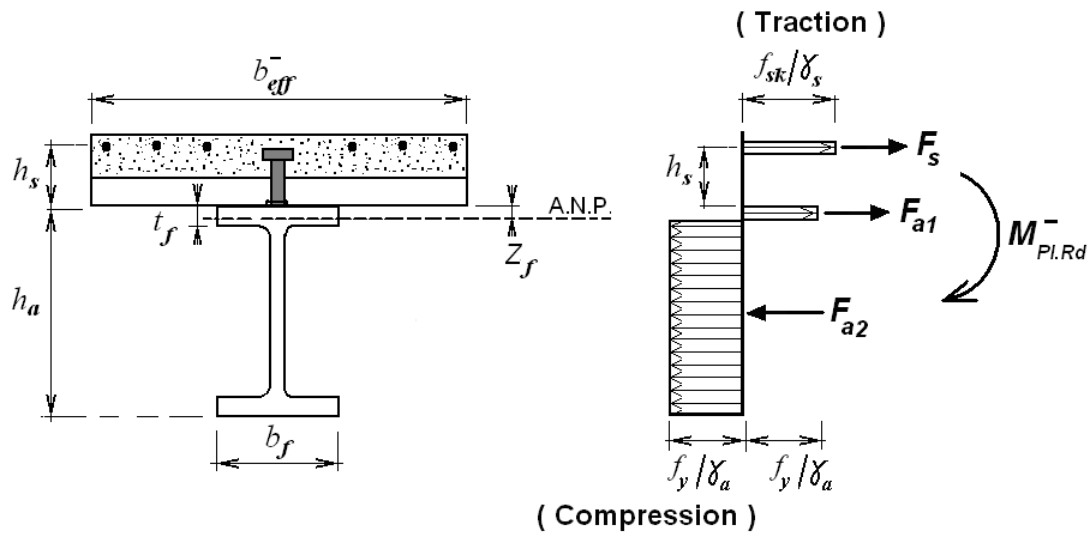


Figure 2.6 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans la semelle (flexion négative).

L'épaisseur Z_f de semelle en traction est donnée par la condition d'équilibre :

$$f_a = f_s + 2b_f \times Z_f \times \frac{f_y}{\gamma_a} \dots \dots \dots (2.28)$$

D'où :

$$Z_f = \left(\frac{f_a - f_s}{2b_f \times \frac{f_y}{\gamma_a}} \right) \dots \dots \dots (2.29)$$

et le moment résistant, pris au niveau de la nappe d'armatures par :

$$M_{pl,Rd}^- = f_a \left(\frac{h_a}{2} + h_s \right) - (f_a - f_s) \left(\frac{Z_f}{2} + h_s \right) \dots \dots \dots (2.30)$$

2^{ème} Cas - Axe neutre situé dans l'âme

Ce cas se produit lorsque :

$$f_a > f_s \quad \text{et} \quad f_a - f_s > 2b_f \times t_f \times \frac{f_y}{\gamma_a} \dots \dots \dots (2.31)$$

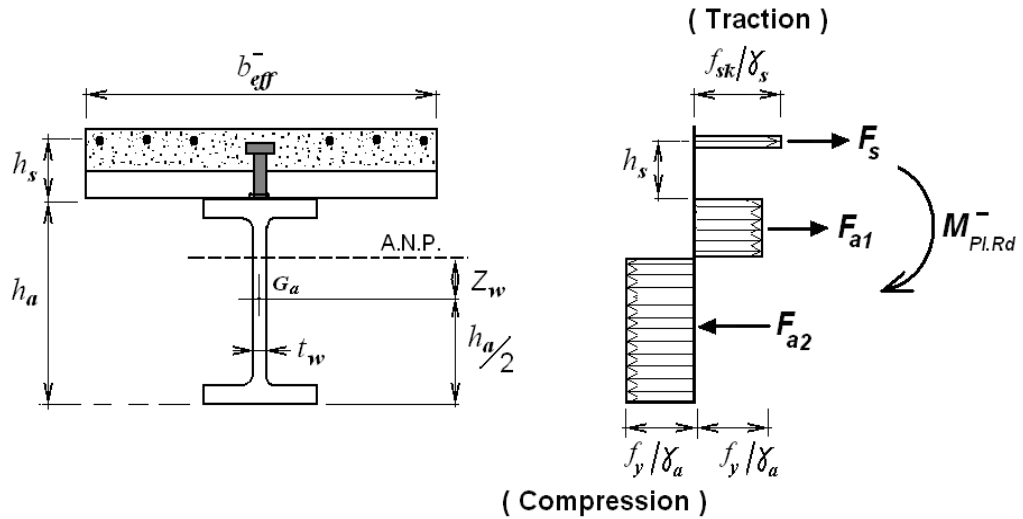


Figure 2.7 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans l'âme (flexion négative).

La hauteur d'âme en compression Z_w située au-dessus du centre de gravité du profilé est donnée par :

$$Z_w = \frac{f_s}{2t_w \frac{f_y}{\gamma_a}} \dots \dots \dots (2.32)$$

et le moment résistant, pris au centre de gravité du profilé, par :

$$M_{pl,Rd}^- = M_{apl,Rd} + f_s \left(\frac{h_c}{2} + h_s \right) - \frac{f_s^2}{4t_w \times \frac{f_y}{f_a}} \dots \dots \dots (2.33)$$

2.2.3-Dimensionnement plastique de la connexion

Pour une poutre mixte à connexion complète, La méthode implique que les sections de poutre puissent être plastifiées (classe 1 ou 2). Elle est basée (en connexion complète) sur le calcul de l'effort total de cisaillement longitudinal V_{lf} exercé sur chaque « longueur critique » de poutre. Une longueur critique est définie comme la longueur entre deux sections critiques successives.

• **Dimensionnement plastique de la connexion de poutres simplement appuyées**

On considère le cas d'une poutre isostatique simplement appuyée (figure 2.8), soumise à une charge répartie ou à une charge concentrée.

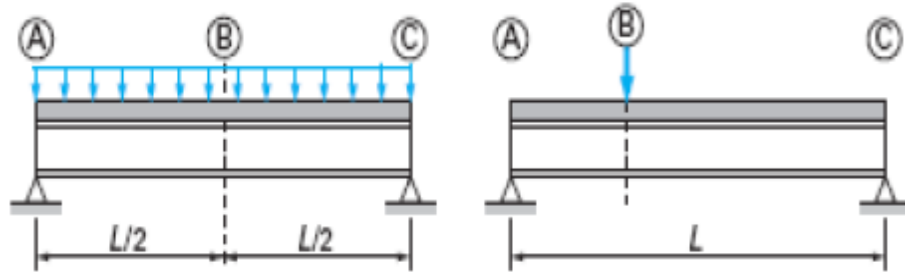


Figure 2.8 : longueurs critiques de poutres simplement appuyées [8].

Le moment de résistance plastique $M_{pl,Rd}^+$ pouvant être atteint dans la section critique intermédiaire, l'effort V_{lf} sur chaque longueur critique (AB comme BC) est donné par :

$$V_{lf} = \min \left(\frac{A_a \times f_y}{\gamma_a}, \frac{0,85 \times b_{eff} \times h_c \times f_{ck}}{\gamma_a} \right) \dots \dots \dots (2.34)$$

Les connecteurs étant ductiles, chaque connecteur est capable de reprendre un effort de cisaillement égale à sa résistance de calcul P_{Rd} .

Le nombre de connecteurs (N_f) par longueur critique $L_{cr}^{(AB)}$ nécessaire pour obtenir une connexion complète est donné par :

$$N_f^{(AB)} = N_f^{(BC)} = \frac{V_{lf}}{P_{Rd}} \dots \dots \dots (2.35)$$

2.2.4-Calcul du moment résistant plastique en connexion partielle

Lorsque le nombre de connecteurs N est inférieur à N_f sur une longueur critique, la poutre est dit " connexion partielle ", où N_f représente le nombre de connecteurs requis pour que la connexion de la longueur critique soit complète, et N le nombre de connecteurs effectivement utilisé dans la même longueur critique. Il en résulte que l'effort total de cisaillement longitudinal, transféré par la connexion sur la longueur critique concernée au stade de résistance ultime, n'a que la valeur réduite :

$$V_l^{(red)} = NP_{Rd} < V_{lf} \dots \dots \dots (2.36)$$

De même, le moment résistant que peut maintenant présenter la section critique B a une valeur réduite, soit :

$$M_{Rd}^{+(red)} < M_{pl,Rd}^+ \dots \dots \dots (2.37)$$

Chapitre 2 : Etude Dimensionnement des poutres mixtes selon L'EUROCODE4

Pour déterminer $M_{Rd}^{+(red)}$, il est admis de pouvoir le considérer comme un moment réduit de résistance plastique $M_{pl,Rd}^{+(red)}$ (en sections de classe 1 ou 2), en distinguant alors deux A.N.P, l'un dans la dalle et l'autre dans le profilé.

Une méthode simplifiée de dimensionnement, plaçant en sécurité, consiste à utiliser la droite ac au lieu de courbe convexe abc. Elle conduit à la relation linéaire :

$$M_{pl,Rd}^{+(red)} = M_{apl,Rd} + \frac{N}{N_f} (M_{pl,Rd}^+ - M_{apl,Rd}) \dots \dots \dots (2.38)$$

Lorsque le degré de connexion η est trop faible, la courbe abc précédente (ou sa simplification ac), la ruine se produisant alors par rupture des connecteurs (dont on exige une trop grande ductilité) et non plus par formation d'une rotule plastique en section critique. C'est la raison pour laquelle l'eurocode 4 (clause 6.1.2) impose un degré de connexion minimal, fonction de la portée de la poutre et de la géométrie de la section mixte :

A- En présence d'une dalle pleine

- pour les profilés en acier à ailes égales :

$$(N / N_f)_{\min} = 0,4 \quad \text{Si } L \leq 5m \quad \dots \dots \dots (2.39)$$

$$(N / N_f)_{\min} = 0,25 + 0,03L \leq 1 \quad \text{Si } L > 5m$$

-pour les profilés en acier dont l'aire de l'aile intérieure ne dépasse pas trois fois l'aire de l'aile supérieure :

$$(N / N_f)_{\min} = 0,4 + 0,03L \leq 1 \quad \text{Si } L \leq 20m \dots \dots \dots (2.40)$$

B - En présence d'une dalle mixte (avec $b_0 / h_p \geq 2$ et $h_p \leq 60mm$)

Connectée avec des goujons soudés (pour $d = 19$ ou 20 mm et $h \geq 76$ mm) et le profilé en acier étant à ailes égales.

$$(N / N_f)_{\min} = 0,4 \quad \text{Si } L \leq 10m \quad \dots \dots \dots (2.41)$$

$$(N / N_f)_{\min} = 0,04L \leq 1 \quad \text{Si } L > 10m$$

Où, L présente la portée de la poutre (si elle est simplement appuyée à ses extrémités) ou la portée de la travée de la poutre concernée (dans le cas d'une poutre continue).

2.2.5-Dimensionnement des armatures transversales de la connexion

La dalle doit être renforcée transversalement à l’axe de la poutre au moyen de barres d’armature en quantité suffisante pour reprendre les sollicitations tangentes apportées par les connecteurs, de manière à éviter une ruine prématurée par cisaillement longitudinal du béton.

On désigne par A_e la section d’armatures transversales par unité de longueur de poutre, définie par l’intersection de toute surface potentielle de rupture par cisaillement dans la dalle comme le montre la figure (2.10), la valeur de A_e va dépendre évidemment de la disposition des connecteurs et des armatures :

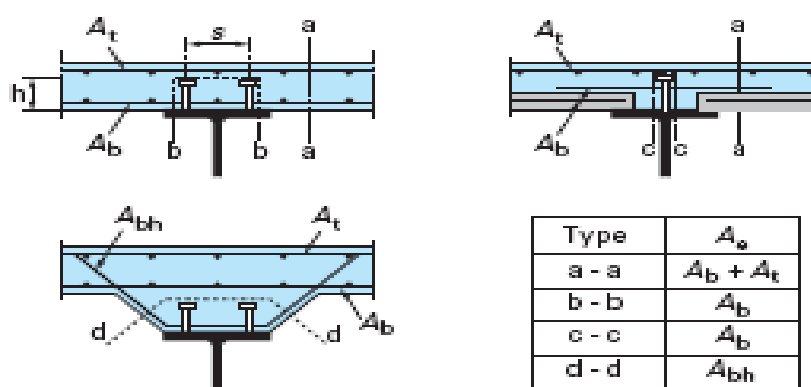


Figure 2.9 : Définition de la section A_e des barres d’armature transversale pour diverses surfaces de rupture [4].

On désigne par L_s , la longueur de la ligne d’intersection de cette surface de rupture avec la section droite de la dalle, représentée à la figure III.9, pour la surface de rupture de type b-b du cas de dalle pleine de la figure :

$$L_s = 2h + s + d' \dots\dots\dots(2.42)$$

Avec :

- h : hauteur totale d’un goujon.
- d' : diamètre de sa tête.
- s : entraxe des deux goujons.

2.2.6-Résistance des sections mixtes à l’effort tranchant

Chapitre 2 : Etude Dimensionnement des poutres mixtes selon L'EUROCODE4

En pratique, on suppose que l'effort tranchant n'est repris seulement que par l'âme en acier, comme si la section n'était pas mixte. La condition à satisfaire par l'effort tranchant de calcul V_{sd} , dans une section sollicitée essentiellement par ce type d'effort, est donc :

$$V_{sd} \leq V_{pl,Rd} \dots \dots \dots (2.43)$$

La résistance plastique $V_{pl,Rd}$ étant donnée par :

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_a} \dots \dots \dots (2.44)$$

A_v est l'aire du profilé métallique seul sollicité en cisaillement (cf. article 5.4.6 de l'EC3) :

$$A_v = A_a - 2b_f \times t_f + (t_w + 2r)t_f \dots \dots \dots (2.45)$$

Où r est le rayon des congés.

2.2.7-Vérification des poutres mixtes à l'état limite ultime

Les vérifications à l'état limite ultime des poutres mixtes doivent être effectuées quant aux points suivants :

- * la résistance des sections transversales critiques au moment de flexion et au cisaillement vertical,
- * la résistance au cisaillement longitudinal,
- * la résistance de l'âme au voilement par cisaillement et à la compression locale sous charges transversales,

2.2.8-Vérification des poutres mixtes à l'état limite de service

La vérification d'une poutre mixte de bâtiment à l'état limite de service porte essentiellement sur le contrôle des flèches, de fissuration du béton et éventuellement des vibrations (pour des portées importantes).

Calcul des flèches

Les valeurs admissibles de flèches adoptées par l'Eurocode 4 sont identiques à celles données par l'Eurocode 3 pour les bâtiments en acier. Ces valeurs admissibles sont généralement satisfaites si les valeurs du rapport de la hauteur totale de la section mixte des poutres à leur portée se situent dans les intervalles suivants :

- Les poutres simplement appuyées : 15 à 18 pour les poutres maîtresses, 18 à 20 pour les poutres secondaires (solives).

Chapitre 2 : Etude Dimensionnement des poutres mixtes selon L'EUROCODE4

- Les poutres continues : 18 à 22 pour les poutres maîtresses, 22 à 25 pour les poutres secondaires.

Le calcul de la flèche d'une poutre mixte simplement appuyée de portée L soumise à une charge P uniformément répartie et présentant une connexion complète, la flèche est donnée par la formule bien connue :

$$\delta_f = \frac{5PL^4}{384E_a I_b} \dots \dots \dots (2.46)$$

I_b : moment d'inertie de la section mixte homogénéisée

E_a : le module d'élasticité de l'acier des profilés.

Remarque:

En connexion partielle, l'augmentation des flèches peut ne pas être négligeable et dépend du mode de construction. Pour calculer la flèche amplifiée δ , on peut proposer la formule suivante, selon l'Eurocode 4 :

$$\delta = \delta_f + k(\delta_a - \delta_f)(1 - N / N_f) \dots \dots \dots (2.47)$$

avec $\frac{N}{N_f} \geq 0,40$ et où :

δ_f : la flèche de la poutre mixte en connexion complète.

δ_a : la flèche de la poutre en acier seule sous les mêmes charges.

δ : la flèche réelle.

k : est un coefficient de mode de construction (0,3 pour une construction non étayée et 0,5 pour une construction étayée).

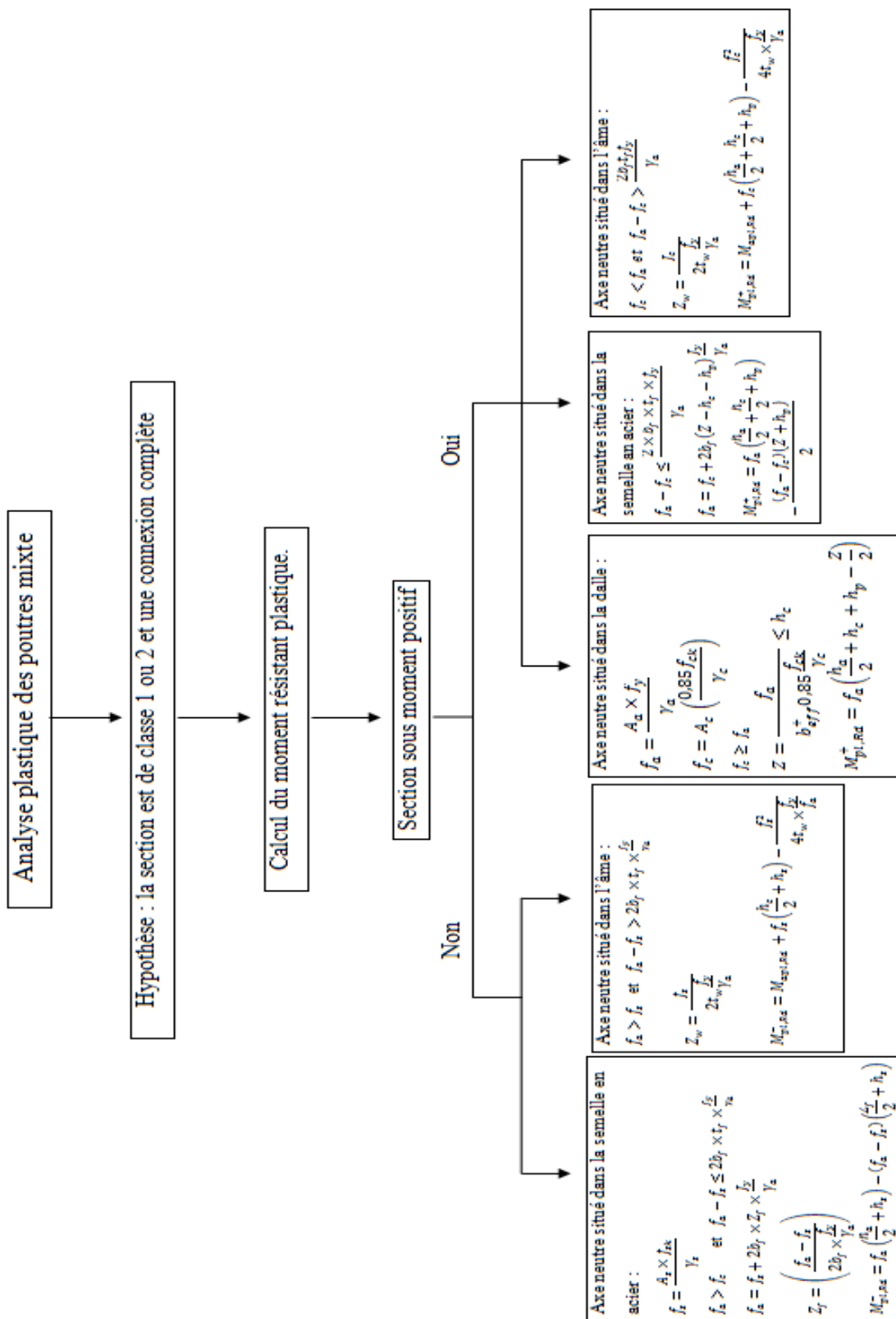


Figure 2.10 : organigramme de calcul plastique des poutres mixtes.

Chapitre3: Exemple d application Effet du degre de connexion sur le comportement des poutres mixtes

***** Chapitre 3 *****
***** Exemple d'application *****
Effet du degré de connexion sur le comportement des poutres mixtes

Introduction

Dans ce chapitre on effectue une étude paramétrique pour mettre en évidence l'effet du degré de connexion sur le comportement des poutres mixtes à travers d'un exemple d'application.

3.1- Description des poutres mixtes

les caractéristiques géométriques et les propriétés matérielles des poutres mixtes choisies pour cette étude sont présentées dans le Tableau 3.1. Pour plus de simplification, on a choisi, aussi, le cas d'une charge uniformément répartie.

Tableau 3.1 : Caractéristiques géométriques et mécaniques des poutres mixtes étudiées

Caractéristiques géométriques et mécaniques communes	Poutre mixte N°	Degré de connexion η
<u>Travée</u> : $L_b = 6000\text{mm}$ <u>Dalle de béton</u> : Epaisseur de la dalle, $h_c = 100\text{ mm}$ Largeur effective de la dalle : $b_{eff} = 1500\text{ mm}$ Résistance du béton à la compression, $f_{ck} = 20\text{ N/mm}^2$ Module d'élasticité du béton $E_c = 30000\text{ N/mm}^2$ <u>Poutre métallique</u> : Profilé IPE300 (Nuance S235) Limite élastique, $f_y = 235\text{ N/mm}^2$ Module d'élasticité de l'acier $E = 210000\text{ N/mm}^2$ <u>Barres d'armature</u> : Limite élastique, $f_{sy} = 500\text{ N/mm}^2$ Module d'élasticité de l'acier $E = 210000\text{ N/mm}^2$ <u>Goujons connecteurs</u> : $f_y = 350\text{ N/mm}^2$, $f_u = 450\text{ N/mm}^2$ $d = 19\text{mm}$, $h = 80\text{mm}$	PM1	36 goujons $\eta = 100\%$
	PM2	27 goujons $\eta = 75\%$
	PM3	18 goujons $\eta = 50\%$
	PM4	Sans connecteurs $\eta = 0\%$

Les quatre poutres mixtes PM1, PM2, PM3, PM4 ne diffèrent que par le degré de connexion. Le dimensionnement de la connexion selon les règles de l'Eurocode 4, conduirait à utiliser 36 connecteurs dans la poutre PM1 pour assurer une connexion complète, 27 connecteurs dans la poutre PM2 pour une connexion partielle de 75% et 18 connecteurs dans la poutre PM3 pour une connexion partielle de 50%. Par contre, dans la dernière poutre PM4, il n'existe pas des connecteurs et le degré de connexion est pris égal à zéro.

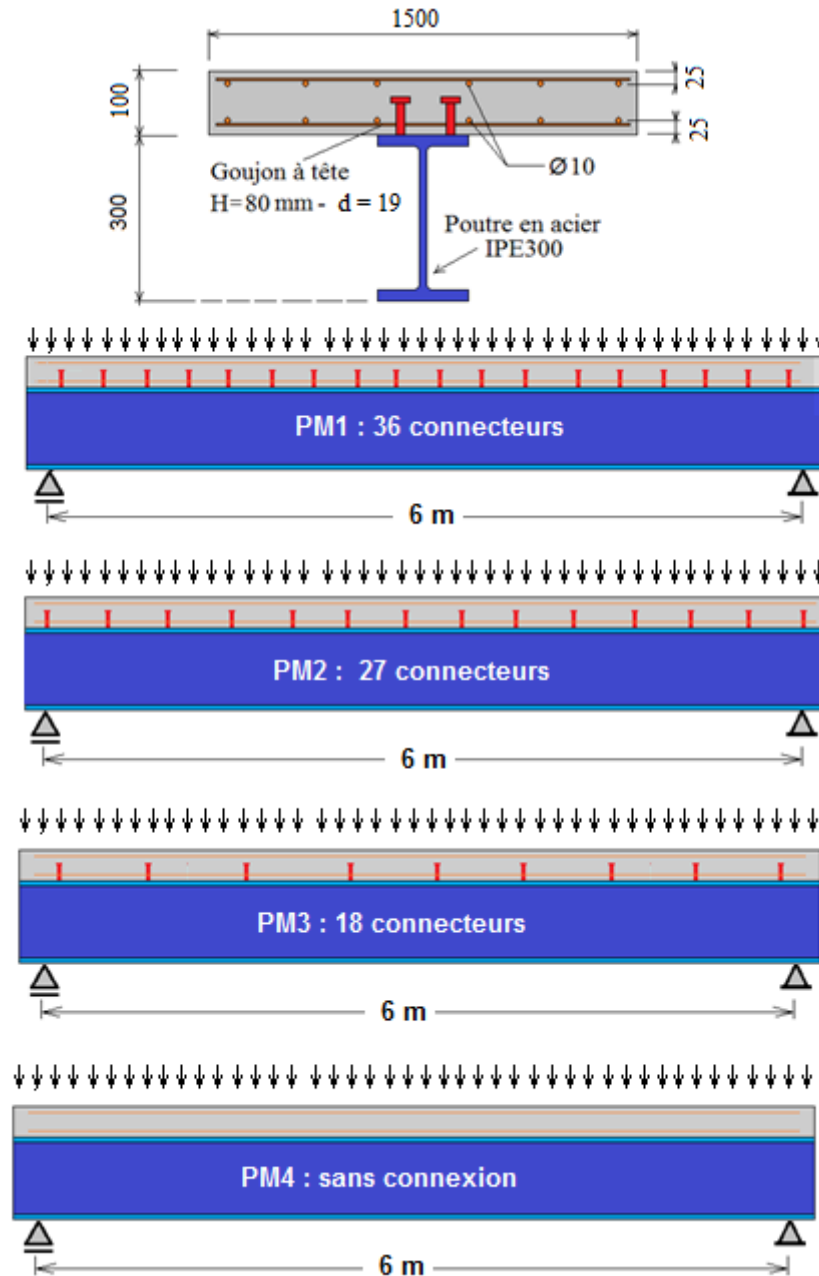


Figure 3.1. Dimensions des poutres mixtes étudiées

3.2- Etude de la poutre mixte PM1

3.2.1- Largeur participante de la dalle:

La largeur participante de la dalle est la plus petite des deux valeurs suivantes:

$$b_{eff} = \min \left(2 \frac{l_0}{8}, b \right) \quad \text{Avec } l_0 = l = 6 \text{ m}$$

D'où:

$$b_{eff} = \min \left(2 \frac{6}{8} = 1,5 \text{ m} ; 3 \text{ m} \right)$$

$$b_{eff} = 1,5 \text{ m}$$

Chapitre3: Exemple d application Effet du degre de connexion sur le comportement des poutres mixtes

3.2.2- Position de l'axe neutre plastique

$$f_a = \frac{A_a \times f_y}{\gamma_a}$$

$$f_a = \frac{5381 \times 235}{1,1}$$

$$f_a = 1149,577 \times 10^3 \text{ N}$$

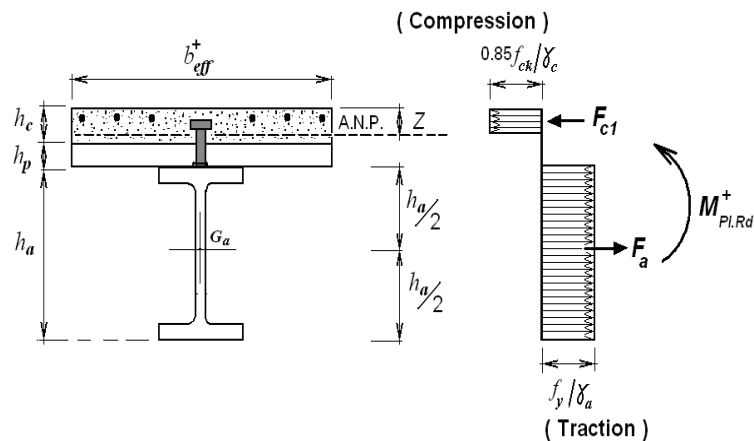
$$f_c = A_c \left(\frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} \right)$$

$$f_c = h_c \times b_{eff} \left(\frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} \right)$$

$$f_c = 100 \times 1500 \left(\frac{0,85 \times 20}{1,5} \right)$$

$$f_c = 1700 \times 10^3 \text{ N}$$

$f_c = 1700 \times 10^3 \text{ N} > f_a = 1149,577 \times 10^3 \text{ N}$ donc l'axe neutre se trouve dans la dalle de béton.



La cote z de l'axe neutre plastique (A.N.P) par rapport à la face supérieure de la dalle est donnée par:

$$z = \frac{f_a}{b_{eff}^+ 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c}} \leq h_c$$

$$z = \frac{1149,577 \times 10^3}{1500 \times 0,85 \times \frac{20}{1,5}}$$

$$z = 67,62 \text{ mm} < h_c = 100 \text{ mm}$$

$$z_b = h - z = 400 - 67,62 = 332,38 \text{ mm.}$$

3.2.3- Moment résistant plastique

Le moment résistant plastique développé par la section mixte est :

$$M_{pl,Rd}^+ = f_a \left(\frac{h_a}{2} + h_c + h_p - \frac{Z}{2} \right)$$

$$M_{pl,Rd}^+ = 1149,577 \times 10^3 \left(\frac{300}{2} + 100 + 0 - \frac{67,62}{2} \right)$$

$$M_{pl,Rd}^+ = 249 \times 10^6 \text{ N. mm} = 249 \text{ KN. m}$$

3.2.4- Chargement de la poutre et sollicitations

Charge permanente G

- dalle en béton : $24 \times 3,0 \times 0,1 = 7,200 \text{ kN/m}$
 - poutre en acier : IPE 300 = $0,422 \text{ kN/m}$
 - finitions et cloisons: $1,5 \times 3,0 = 4,500 \text{ kN/m}$
- G = 11,922 kN/m

Surcharge d'exploitation

les poutres choisies seront utilisées dans les planchers d'une salle des fêtes.

$$\text{Q} = 5,0 \times 3,0 = 15 \text{ kN/m}$$

Combinaison des charges et surcharges

E.L.U. $P_{ult} = 1,35 G + 1,5 Q = 38,59 \text{ kN/m}$

E.L.S. $P_{ser} = G + Q = 26,92 \text{ kN/m}$

Sollicitations

Le moment sollicitant de la poutre mixte:

$$M_{sd} = \frac{p_{ult} \times l^2}{8} = \frac{38,59 \times 6^2}{8}$$

$$M_{sd} = 173,655 \text{ KNm.}$$

L'effort tranchant Vsd :

$$V_{sd} = \frac{p_{ult} \times l}{2} = \frac{38,59 \times 6}{2}$$

$$V_{sd} = 115,77 \text{ KN}$$

3.2.5- Vérifications à E.L.U.

3.2.5.1- Vérification de résistance à la flexion

Chapitre3: Exemple d application Effet du degre de connexion sur le comportement des pouters mixtes

Il faut vérifier que : $M_{Sd} \leq M_{pl,Rd}^+$

$$M_{pl,Rd}^+ = 249 \text{ KN.m} \geq M_{Sd} = 173,655 \text{ KNm.}$$

La condition de résistance à la flexion est vérifiée.

3.2.5.2-Vérification à l'effort tranchant

$$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_a}$$

A_v : l'aire de cisaillement

$$A_v = A_a - 2b_f \times t_f + (t_w + 2r)t_f = 5381 - 2 \times 150 \times 10.7 + (7.1 + 2 \times 15) \times 10.7$$

$$A_v = 2567,97 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{2567,97 \left(\frac{235}{\sqrt{3}} \right)}{1,1}$$

$$V_{pl,Rd} = 316,74 \text{ KN}$$

Donc:

$$V_{pl,Rd} = 316,74 \text{ KN} \geq V_{Sd} = 115,77 \text{ KN} \quad \text{La condition du cisaillement est vérifiée.}$$

3.2.6- Dimensionnement de la connexion

Le dimensionnement de la connexion est réalisé en supposant une connexion complète.

- Résistance d'un connecteur au cisaillement, P_{Rd}

$$P_{Rd} = \min(P_{Rd}^{(1)}, P_{Rd}^{(2)})$$

avec

$$P_{Rd}^{(1)} = 0,8 f_u \frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{\gamma_v}$$

$$P_{Rd}^{(2)} = 0,29 \alpha \times d^2 \sqrt{f_{ck} \times E_{cm}} \frac{1}{\gamma_v}$$

$$\gamma_v = 1,25$$

$$\begin{cases} \alpha = 1 \text{ pour } \frac{h}{d} > 4 \\ \alpha = 0,2 \left(\frac{h}{d} + 1 \right) \text{ pour } 3 \leq \frac{h}{d} \leq 4 \end{cases}$$

Chapitre3: Exemple d application Effet du degre de connexion sur le comportement des pouters mixtes

$$\frac{100}{19} = 5,26 \text{ Donc } \alpha = 1$$

$$P_{Rd} = \min \left(0,8 \times 450 \frac{\pi \times 19^2}{4} \frac{1}{1,25} ; 0,29 \times 1 \times 19^2 \sqrt{20 \times 30000} \frac{1}{1,25} \right)$$

$$P_{Rd} = \min(81,6KN ; 64,87KN)$$

Donc :

$$P_{Rd} = 64,87KN.$$

• Nombre de connecteurs

$$V_{lf} = \min \left(\frac{A_a \times f_y}{\gamma_a} ; \frac{0,85 \times b_{eff} \times h_c \times f_{ck}}{\gamma_a} \right)$$

$$V_{lf} = \min \left(\frac{5381 \times 235}{1,1} = 1150 \times 10^3 N ; \frac{0,85 \times 1500 \times 100 \times 20}{1,1} = 2318 \times 10^3 N \right) = 1150KN$$

D'où le nombre de goujons nécessaire pour obtenir une connexion complète dans la longueur critique :

$$N_f \geq \frac{V_{lf}}{P_{Rd}} = \frac{1150}{64,87} = 17,7$$

Soit N= 18 goujons sur la demi-longueur de la poutre, c'est-à-dire **36** goujons sur toute la portée de la poutre mixte.

En pratique, on peut adopter un espacement uniforme de **350** mm entre rangées successives de goujons, en plaçant 2 goujons par rangée. Cet espacement est bien inférieur à 6 fois l'épaisseur de la dalle, ainsi qu'à 800 mm; par ailleurs, $d < 2,5t_f = 2,5 \times 10,7 = 26,75$ mm, la semelle supérieure ne sera donc pas l'objet d'une déformation excessive lors du soudage.

3.2.7- Vérification de la flèche à E.L.S.

La flèche de la poutre mixte vaut:

$$\delta_f = \frac{5 P_{ser} L^4}{384 E_a I_b}$$

$$P_{ser} = G + Q = 26,92 \text{ kN/m} , L = 6000 \text{ mm}$$

$$E_a = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_c = 30000 \text{ N/mm}^2 \text{ pour un béton C20/25}$$

$$I_b = I_a + A_a (Z_b - Z_a)^2 + \frac{b_{eff}^+ x^3}{3n}$$

$$n = \frac{E_a}{E_c} = \frac{210000}{30000} = 7$$

Chapitre3: Exemple d application Effet du degre de connexion sur le comportement des poutres mixtes

$$x = \frac{n A_a}{b_{eff}^+} \left[-1 + \sqrt{1 - \frac{2 b_{eff}^+}{n A_a} (Z_a - h)} \right]$$

$$x = \frac{7 \times 5380}{1500} \left[-1 + \sqrt{1 - \frac{2 \times 1500}{7 \times 5380} (150 - 400)} \right] = 89,7mm.$$

$$Z_b = h - x = 400 - 89,7 = 310,3mm$$

$$I_b = 83,56 \times 10^6 + 5381(310,3 - 150)^2 + \frac{1500 \times 89,7^3}{3 \times 7}$$

$$I_b = 189,82 \times 10^6 mm^4$$

$$\delta_f = \frac{5}{384} \frac{26,92 \times 6000^4}{210000 \times 189,82 \times 10^6} = 11,4 mm$$

$$\delta_f = 11,4 mm \leq \frac{L}{300} = \frac{6000}{300} = 20 mm.$$

La condition de la flèche est vérifiée.

3.3- Etude des poutres mixtes PM2, PM3, PM4

3.3.1- Moment résistant plastique réduit $M_{pl,Rd}^{+(red)}$ en fonction du degré de connexion $\frac{N}{N_f}$

Lorsque le nombre de connecteurs N est inférieur à N_f , la poutre mixte est dit " en connexion partielle ". Il en résulte que le moment résistant de la poutre mixte n'a que la valeur réduite :

$$M_{pl,Rd}^{+(red)} = M_{apl,Rd} + \frac{N}{N_f} (M_{pl,Rd}^+ - M_{apl,Rd})$$

avec $M_{apl,Rd}$: moment résistant plastique du profilé métallique,

$$M_{apl,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_a = 628400 \times 235 / 1.1 = 134,25 kN.m$$

❖ Pour la poutre mixte PM2 ($\frac{N}{N_f} = 75\%$)

$$M_{pl,Rd}^{+(red)} = 134,25 + 0,75(249 - 134,25) = 220,3 kN.m$$

❖ Pour la poutre mixte PM3 ($\frac{N}{N_f} = 50\%$)

$$M_{pl,Rd}^{+(red)} = 134,25 + 0,50(249 - 134,25) = 191,6 kN.m$$

❖ Pour la poutre mixte PM4 ($\frac{N}{N_f} = 0$)

$$M_{pl,Rd}^{+(red)} = M_{apl,Rd} = 134,25 kN.m$$

Chapitre3: Exemple d application Effet du degre de connexion sur le comportement des poutres mixtes

La Figure 3.2 présente l'évolution du moment résistant $M_{pl,Rd}^{+(red)}$ de la poutre mixte en fonction du degré de connexion N / N_f . Cette relation se traduit par une courbe linéaire.

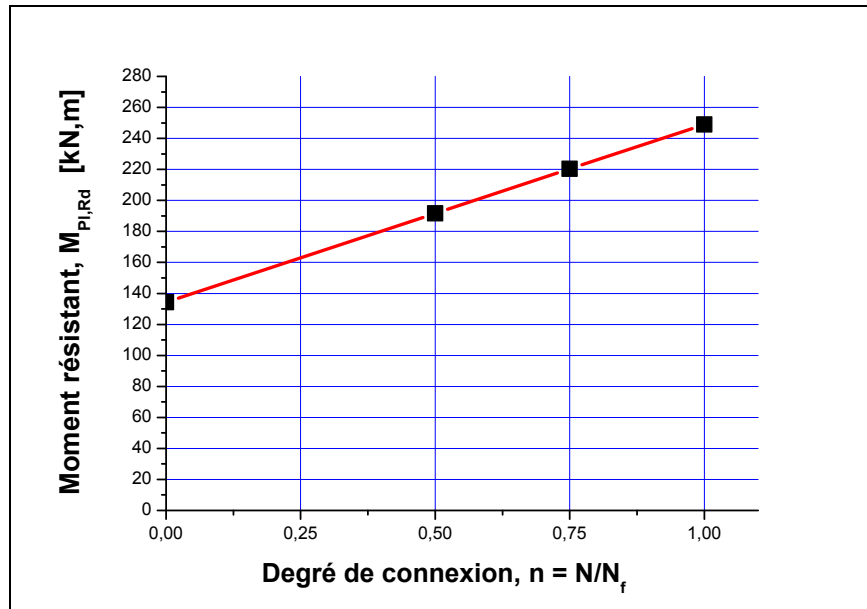


Figure 3.2. Moment résistant réduit en fonction du degré de connexion

- Pour $\eta = 1$, on est en connexion complète, le moment résistant réduit $M_{Rd}^{+(red)}$ devient égal à $M_{pl,Rd}^+$.
- Pour $\eta = 0$ (l'absence de connecteurs), le moment résistant réduit $M_{Rd}^{+(red)}$ de devient égal à $M_{apl,Rd}^+$, moment de résistance plastique du profilé métallique seul.

3.3.2- Flèche de la poutre mixte δ en fonction du degré de connexion $\frac{N}{N_f}$

En connexion partielle, on peut calculer la flèche δ en fonction du degré de connexion $\frac{N}{N_f}$ à l'aide de la formule suivante, proposée par l'Eurocode 4 :

$$\delta = \delta_f + k(\delta_a - \delta_f)(1 - N / N_f) \dots\dots\dots(2.47)$$

avec $\frac{N}{N_f} \geq 0,40$ et où :

δ_f : la flèche de la poutre mixte **PM1** en connexion complète, $\delta_f = 11,4mm$

δ_a : la flèche de la poutre en acier seule sous les mêmes charges,

Chapitre3: Exemple d application Effet du degre de connexion sur le comportement des poutres mixtes

$$\delta_a = \frac{5 P_{ser} L^4}{384 E_a I_a} = \frac{5 \times 26.92 \times 6000^4}{384 \times 210000 \times 83.56 \times 10^6} = 25.9\text{mm}$$

δ : la flèche réelle.

k : est un coefficient de mode de construction (0,3 pour une construction non étayée et 0,5 pour une construction étayée).

❖ Pour la poutre mixte PM2 ($\frac{N}{N_f} = 75\%$)

$$\delta = 11,4 + 0,5(25,9 - 11,4)(1 - 0,75) = 13.2 \text{ mm}$$

❖ Pour la poutre mixte PM3 ($\frac{N}{N_f} = 50\%$)

$$\delta = 11,4 + 0,5(25,9 - 11,4)(1 - 0,50) = 15 \text{ mm}$$

❖ Pour la poutre mixte PM4 ($\frac{N}{N_f} = 0$)

$$\delta = \delta_a = 25,9 \text{ mm}$$

La Figure 3.3 illustre la variation de la flèche en fonction d'un degré de connexion.

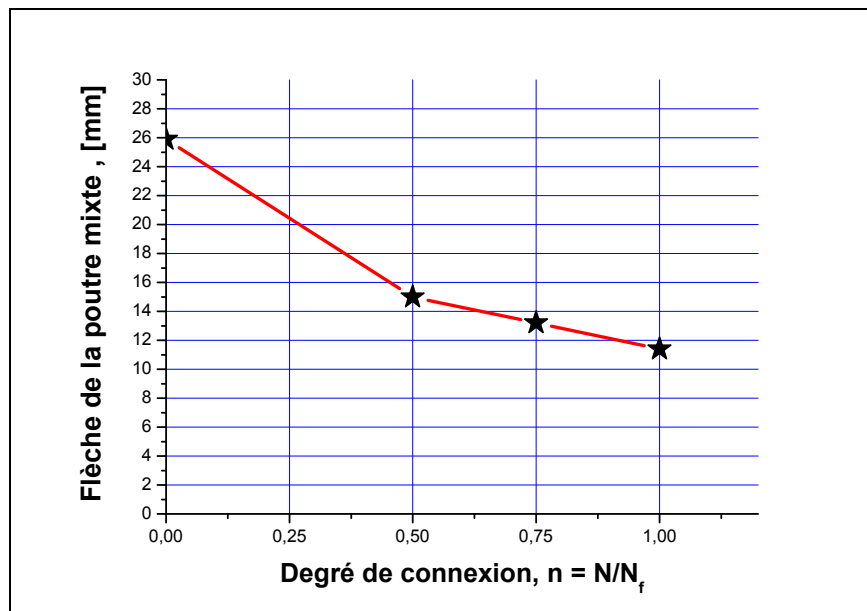


Figure 3.3. Variation de la flèche en fonction du degré de connexion

CONCLUSION GENERALE :

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude des poutres mixtes avec une connexion partielle.

A partir de cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- La connexion mécanique de la dalle sur la poutrelle est essentielle pour garantir une collaboration en flexion. Elle est le plus souvent réalisée par soudure électrique de goujons à tête. En alternative aux goujons soudés, il existe d'autres types de connecteurs, dont des équerres à clouées ne nécessitant aucune soudure, mais présentant une résistance moindre, ainsi que différents types de butées;
- La classification des connecteurs selon leurs capacité de déformation est importante, car des connecteurs rigides n'autorisent pas une redistribution des efforts rasants, tandis que des connecteurs ductiles permettent une connexion partielle dans les poutres de bâtiment en raison de leur flexibilité qui permet une telle redistribution;
- la résistance des sections transversales d'une poutre mixte aux états limites ultimes doit être vérifiée pour toute section critique de la poutre, qu'elle soit simplement appuyée sur deux appuis, ou continue sur plusieurs appuis. Dans le cas courant d'une poutre simplement appuyée à ses extrémités et chargée de manière uniforme, il suffit en pratique de vérifier que le moment pondéré appliqué M_{sd} reste inférieur au moment ultime résistant $M_{pl,Rd}$.
- L'effort tranchant est supposé repris entièrement par l'âme du profilé métallique. La résistance ultime à l'effort tranchant doit être supérieure à la valeur pondérée agissante.
- A l'état limite de service, il convient de vérifier les flèches, la fissuration du béton, et la fréquence propre de vibration;

- Des connecteurs et des armatures transversales sont à prévoir au-dessus de la poutre afin de transmettre l'effort de cisaillement longitudinal entre la dalle et la poutrelle à l'état limite ultime, en négligeant l'adhérence naturelle entre acier et béton.
- Pour les poutres mixtes avec connexion complète et partielle les capacités de l'acier et du béton ont été bien exploitées, c'est-à-dire, toute la poutre métallique ou une partie importante de celle-ci est plastifiée et toute la dalle, ou une partie importante de celle-ci est comprimée, avant la rupture des connecteurs. Tandis que, pour les poutres mixtes avec une connexion partielle, on a remarqué une légère réduction du moment résistant à ELU et une petite augmentation de la flèche de la poutre mixte à **ELS**.

Perspectives :

Comme Perspectives, nous proposons les thèmes suivant :

- Réalisation des essais expérimentaux sur les poutres mixtes.
- Préparation des programmes d'informatique pour le calcul automatique des poutres mixtes.

- Construction mixte acier-béton Calcul des poutre mixtes par Jean–Marie ARIBERT
- Construction mixte acier-béton Généralités Caractéristiques des matériaux par Jean–Marie ARIBERT
- Thèse de DOCTORAT Présentée par Loubna BOUAZAoui
CONTRIBUTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE ET THEORIQUE
DE STRUCTURES MIXTES ACIER-BETON ASSEMBLEES PAR
COLLAGE
- Mémoire magester par AMIRAoui AKRAM caractérisation de la
connexion acier beton dans la structure mixte



تم بحمد الله