

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie civil

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : GENIE CIVIL

Spécialité : Structures

Par

- Bahri Abdessamad
- Slimani Houssemeddine

Analyse par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle (Eurocode 4 + ANSYS)

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. NOUI AMMAR</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. MAZOZ AIDA</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. DJOUDI LARBI</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. NABIL ABDEMEZIANE</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Dédicace

Je tiens avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents pour leur soutien, leur patience et leur encouragement durant mon parcours scolaire.

A l'ensemble des étudiants de la promotion master STRECTURE de l'année 2021/ 2022 et toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

A tous les membres de ma famille et toutes personnes qui porte le nom BAHRI et SLIMANI, et a tous qui ont participé à ma réussite.

Mes chers Rafik , Houcine , Saad , Mes frère Abdel basset , Abasse , Saadane , Bassem .

Remerciement

Nous tenons à remercier en premier lieu dieu qui nous a éclairé notre chemin pour achever ce modeste travail.

Tout d 'abord ce travail ne sera pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de DR Mazouz Aida 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 tous, nos professeurs qui ont enseigné durant nos études à la faculté des Génie Civil.

Nous tenons à remercier tous nos collègues d'études, particulièrement notre promotion.

ملخص

في مشروع التخرج هذا، قدمنا نموذجًا ثنائي الأبعاد للعناصر المحدودة لتحليل سلوك شعاع الخرسانة الفولاذي المركب باتصال جزئي باستخدام برنامج ANSYS. يتم التحقق من صحة النموذج المقترح من خلال مقارنة النتائج العددية مع تلك التجريبية للحزمة المركبة التي تم اختبارها في INSA Rennes في فرنسا. تم إجراء دراسة بارامترية لتسليط الضوء على تأثير الاتصال الجزئي على سلوك الانحناء للحزم المركبة المدعومة ببساطة. تتعلق النتائج التي تم الحصول عليها بتطور الانحراف في منتصف المدى، والانزلاق في الواجهة الخرسانية الفولاذية وتوزيع الضغوط وفقًا لارتفاع المقطع العرضي للحزمة المركبة. **كلمات مفتاحية:** شعاع مركب، الانحناء، مسند، الصلب والخرسانة، موصلات، وتد، العناصر النهائية.

Résumé :

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons présenté un modèle d'éléments finis bidimensionnel pour analyser le comportement d'une poutre mixte acier-béton avec une connexion partielle en utilisant le logiciel ANSYS. La validation du modèle proposé est faite par comparaison des résultats numériques avec ceux expérimentaux d'une poutre mixte testée à INSA de Rennes en France.

Une étude paramétrique est effectuée pour mettre en évidence l'effet de la connexion partielle sur le comportement en flexion des poutres mixtes simplement appuyées. Les résultats obtenus concernent l'évolution de la flèche à mi-travée, le glissement à l'interface acier-béton et la répartition des contraintes suivant la hauteur de la section transversale de la poutre mixte.

Les mots clés : Poutre mixte, Flexion, Appuyées, Acier-béton, Connecteurs, Goujons, Travée, Éléments finis.

Abstract

In this graduation project, we presented a two-dimensional finite element model to analyze the behavior of a composite steel-concrete beam with a partial connection using ANSYS software. The validation of the proposed model is made by comparing the numerical results with those experimental of a composite beam tested at INSA Rennes in France.

A parametric study is carried out to highlight the effect of the partial connection on the bending behavior of simply supported composite beams. The results obtained concern the evolution of the deflection at mid-span, the slip at the steel-concrete interface and the distribution of the stresses according to the height of the cross section of the composite beam.

Keywords: composite beam, Bending, Supported, Steel-concrete, Connectors, Studs, span, Finished elements.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	2
Chapitre 1 :	6
Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton).....	6
1.1- Définitions.....	6
1.2- Poutres mixtes	6
1.3- Historique de calcul des poutres mixtes.....	7
1.4- Importance de la connexion (effet de la connexion).....	9
1.4.1- Sans connexion.....	9
1.4.2- Avec connexion.....	9
1.5- Types de connecteurs	10
1.5.1- Connecteur en goujon à tête.....	10
1.5.2- Connecteur en équerre clouée façonnée à froid.....	11
1.5.3- Connecteurs en butées.....	12
1.6- Classification des connecteurs selon leur capacité de glissement.....	12
1.7- Connexion totale et partielle	13
1.8- Résistance des connecteurs au cisaillement	13
1.8.1- Goujons à tête soudés en présence d'une dalle pleine.....	13
1.8.2- Goujons à tête soudés en présence d'une dalle mixte	14
1.9- Caractéristique géométriques des sections transversales	14
1.9.1- Largeur participante de la dalle de béton (b_{eff}).....	14
1.9.2- Classification des sections transversales	16
Figure 1.13- Courbe de comportement moment-rotation correspondant à chaque classe....	16
1.10- Caractéristiques Des Matériaux	17
1.10.1- Béton.....	17
1.10.2. Acier de construction	18
1.10.3-Aciers d'armature.....	18
Chapitre 2:.....	21
Dimensionnement des poutres mixtes selon l'EUROCODE 4	21
2.1- Analyse élastique des poutres mixtes [17].....	21

2.1.1- Hypothèses de calcul	21
2.1.2- Coefficient d'équivalence ($n = EaEc$).....	21
2.1.3- Caractéristiques géométriques de la section mixte homogénéisée	22
A- Section en travée (moment positif).....	23
B- Section sur appui (moment négatif).....	23
2.1.4- Vérification des contraintes normales de flexion	24
2.1.5- Dimensionnement élastique de la connexion	25
A - Calcul élastique de la connexion	25
B - Nombre de connecteurs(N).....	25
C - Espacement des connecteurs(e)	26
2.2- Analyse plastique des poutres mixtes [17].....	28
2.2.1- Hypothèses de calcul.....	28
2.2.2- Calcul du moment résistant plastique en connexion complète	28
A- section sous moment positif.....	28
B- section sous moment négatif.....	32
2.2.3-Dimensionnement plastique de la connexion	34
2.2.4-Calcul du moment résistant plastique en connexion partielle	35
A- En présence d'une dalle pleine	35
B - En présence d'une dalle mixte (avec $b_0 / h_p \geq 2$ et $h_p \leq 60\text{mm}$)	36
2.2.5-Dimensionnement des armatures transversales de la connexion	36
2.2.6-Résistance des sections mixtes à l'effort tranchant	37
2.2.7-Vérification des poutres mixtes à l'état limite ultime	38
2.2.8-Vérification des poutres mixtes à l'état limite de service	38
Chapitre3:	42
Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle.....	42
3.1- Introduction.....	42
3.2- Etapes de la modélisation par éléments finis d'une structure quelconque.....	42
3.3- Système de poutre mixte simplement appuyée.....	43
3.4- Modèle d'éléments finis	44
3.4.1- Types d'éléments finis utilisés.....	44
3.4.2- Maillage et conditions aux limites.....	45
3.4.3- Modélisation des matériaux	46
3.4.3.1- Modèle du Béton	46

3.4.3.2- Modèle de l'acier	46
3.4.3.3- Modélisation du comportement des connecteurs.....	47
3.4.4- Application des charges et critères de rupture	48
3.5- Validation du modèle proposé	48
3.6- Effet du degré de connexion.....	52
.....	53
A : Courbes (charge-flèche).....	56
B : Glissement à l'interface (acier-béton).....	57
C : Distribution des contraintes dans la section transversale	58
3.7- Conclusion	59
Conclusion générale	62
Références bibliographiques.....	64

Liste de figure

Figure 1.1- Exemples d'éléments mixtes (acier-béton)	05
Figure 1.2- Poutre mixte (acier- béton)	05
Figure 1.3- Effet de la connexion acier-béton	08
Figure 1.4- Différents types de connecteurs.	09
Figure 1.5- Connecteur en goujon à tête	10
Figure 1.6- Différents types de goujons soudés	10
Figure 1.7- Connecteur en équerre clouée	10
Figure 1.7- Connecteurs en butées	11
Figure 1.8- Classification des connecteurs selon leur capacité de glissement	12
Figure 1.9- Goujon soudé	13
Figure 1.10- Goujon soudé avec dalle mixte	13
Figure 1.11- Largeur participante de la dalle pour une poutre mixte	14
Figure 1.12- Travées équivalentes pour la détermination de la largeur participante	15
Figure 1.13- Courbe de comportement moment-rotation correspondant à chaque classe	16
Figure 1.14- Diagramme (contrainte-déformation) des aciers S235 et S355	17
Figure 1.15- Diagramme contrainte-déformation d'un acier d'armature.	18
Figure 2.1-Convention adoptée pour une section mixte en travée et sur appui [3]	21
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).	27
Figure 2.4 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans la semelle (Flexion positive).	28
Figure 2.5 : distributions plastique des contraintes avec axe neutre dans l'âme (flexion positive).	29
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 [8].	32
Figure 2.10 : Définition de la section A_e des barres d'armature transversale pour diverses surfaces de rupture [14]	34
Figure 2.11 : Organigramme de calcul plastique des poutres mixtes.	37
Figure 3-1 : Système de poutre mixte simplement appuyée	40
Figure 3.2- Maillage et conditions aux limites	42
Figure 3.3- Modèle du béton	42
Figure 3.4- Modèle de l'acier	43
Figure 3.5- Élément ressort non-linéaire (COMBIN39)	44

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Principales caractéristiques des bétons de masse volumique normale 16

Tableau II.1 : Caractéristique géométriques de la section mixte homogénéisée [7].

Tableau 3.1- Caractéristiques de la poutre mixte (P14) 45

Tableau 3.2- Caractéristiques des modèles de poutres mixtes (CB) 50

Tableau 3.3- Résultats d'analyse par éléments finis 54

Tableau 1.1 : Principales caractéristiques des bétons de masse volumique normale

Tableau II.1 : Caractéristique géométriques de la section mixte homogénéisée [7].

Tableau 3.1- Caractéristiques de la poutre mixte (P14)

Notations

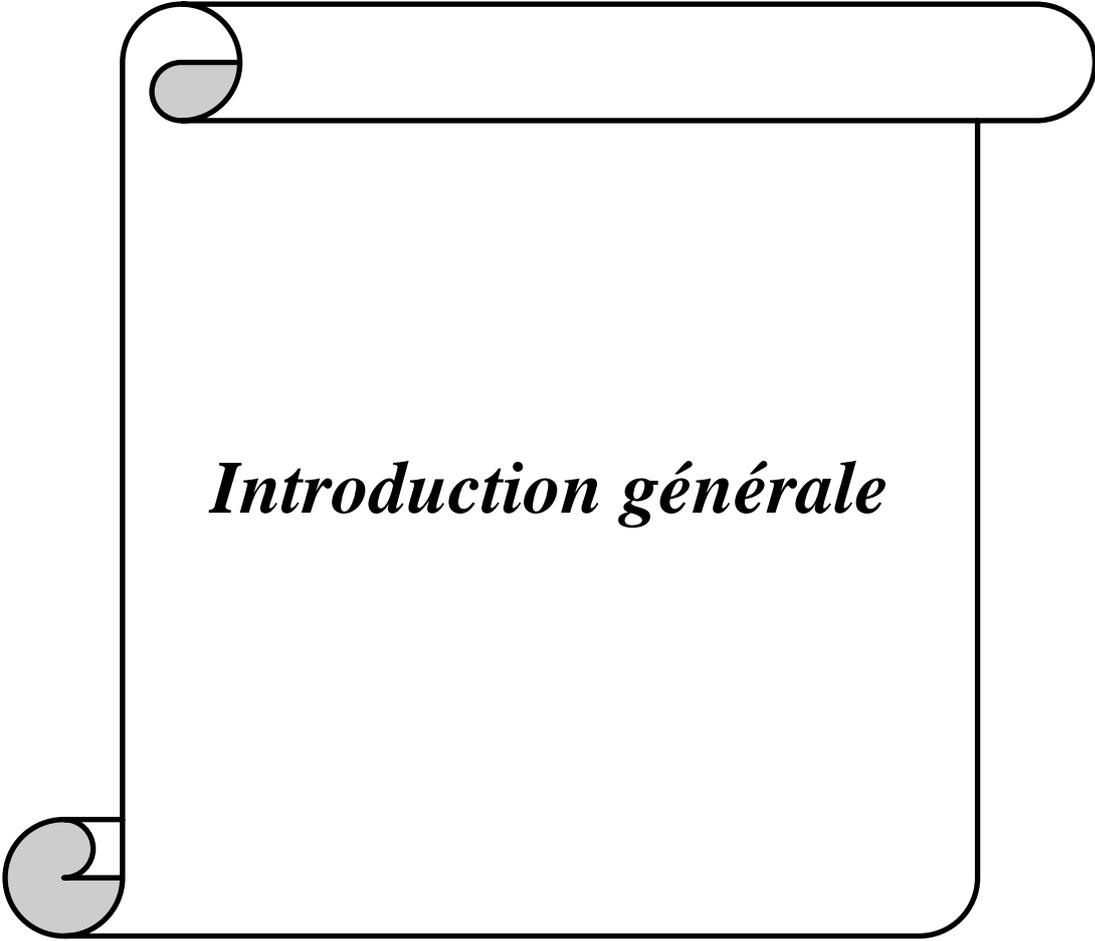
Majuscules :

- A_a : aire de la section transversale du profilé métallique ;
- A_c : aire de la section transversale de la dalle en béton ;
- A_m : aire de la section mixte homogénéisée ($A_m = A_a + \frac{A_c}{n}$)
- A_s : aire totale des armatures longitudinales tendues de la dalle en béton ;
- A_{sc} : aire de l'âme cisailée du connecteur en « I », $A_{sc} = t_w L_I$
- B_I : largeur du connecteur en « I » ;
- E_a : module d'élasticité longitudinal de l'acier de construction ;
- E_c : module d'élasticité longitudinal du béton ;
- E_s : module d'élasticité longitudinal de l'acier d'armatures ;
- H_I : hauteur du connecteur ;
- I_a : moment d'inertie du profilé métallique ;
- I_m : moment d'inertie de la section mixte homogénéisée ;
- L_I : longueur du connecteur en « I », en (mm),
- $M_{apl.Rd}$: moment résistant plastique de la poutre métallique ;
- $M_{pl.Rd}^+$: moment résistant plastique de la poutre mixte sous une flexion positive ;
- $M_{pl.Rd}^-$: moment résistant plastique de la poutre mixte sous une flexion négative ;
- $M_{pl.Rd}^{(red)}$: moment résistant plastique réduit de la poutre mixte avec une connexion partielle ;
- N : nombre de connecteurs effectivement utilisé dans la poutre mixte ;
- N_f : nombre de connecteurs nécessaire pour que la connexion soit complète ;
- P_u : résistance ultime du connecteur au cisaillement ;
- S : glissement du connecteur à l'interface (acier-béton) ;
- S_c : moment statique de la dalle par rapport à l'axe neutre de la section mixte ;
- S_u : capacité de glissement du connecteur à l'interface (acier-béton) ;

V : effort tranchant dans la section considérée ;
 V_{lf} : effort de cisaillement longitudinal à l'interface acier-béton ;

Minuscules :

b_{eff} : largeur participante de la dalle de béton ;
 e : espacement entre deux connecteurs ;
 f_{ck} : résistance caractéristique du béton à la compression (sur éprouvette cylindrique) ;
 f_t : résistance du béton à la traction ;
 f_u : résistance ultime en traction et en compression de l'acier ;
 f_y : limite d'élasticité de l'acier ;
 l : longueur de répartition des connecteurs ;
 n : coefficient d'équivalence ($n = E_a / E_c$) ;
 t_f : épaisseur de la semelle du connecteur en « I » ;
 t_w : épaisseur de l'âme du connecteur en « I » ;
 v_{el} : effort rasant par unité de longueur ;
 ε_y : déformation élastique ;
 ε_u : déformation ultime en traction et en compression ;
 ν : coefficient de Poisson ;
 η : degré de connexion, $\eta = N / N_f$.



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

1- Généralités

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 [1] :

- 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.

2- Problématique

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.

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, quel que 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.

Introduction générale

- 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.

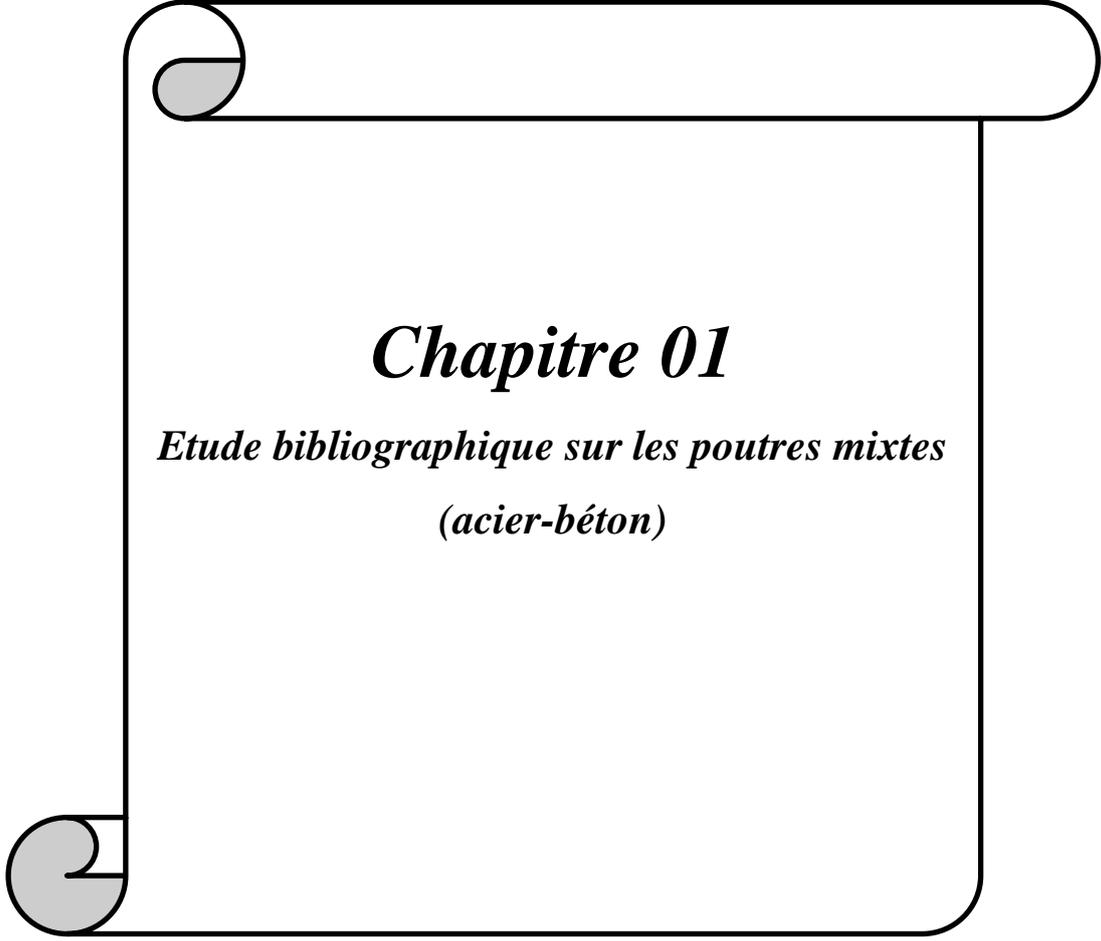
4- Contenu de manuscrit

- 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. Ensuite, 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, la modélisation par éléments finis d'une poutre mixte acier-béton simplement appuyée en utilisant le logiciel ANSYS pour mettre en évidence, 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.

Introduction générale

Remarque : L'analyse numérique par ANSYS est faite dans le laboratoire de Matériaux et Mécanique des Structures à l'université de M'sila sous la direction du Professeur TITOU MESSAOUD.



Chapitre 01

***Etude bibliographique sur les poutres mixtes
(acier-béton)***

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

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) [2] :

- 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).

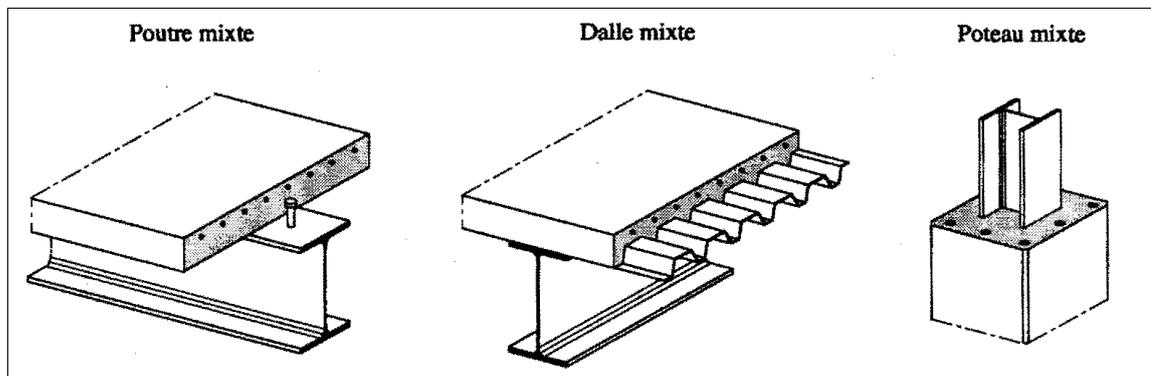


Figure 1.1- Exemples d'éléments mixtes (acier-béton)

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 [3] (Figure 1.2).

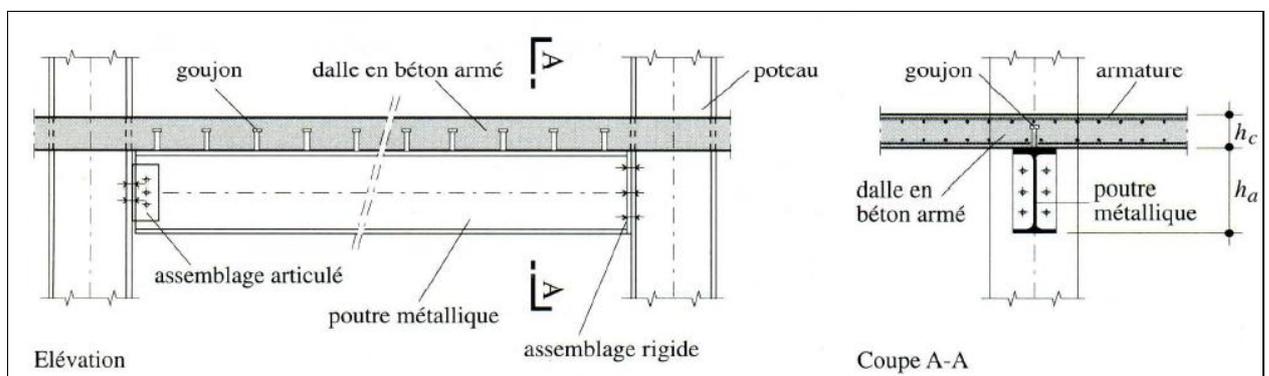


Figure 1.2- Poutre mixte (acier- béton)

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

1.3- Historique de calcul des poutres mixtes

La première approche a été proposée en 1912 par Andrews [4]. 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 [4].

En 1951, Newmark [5] 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 [5].

De 1964 à 1972, Chapman [6] 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 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 [7], [8]. 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 la liaison acier-béton est discrétisée et la courbe charge-glissement est décomposée en plusieurs droites [4].

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

En 1978, Hallam a proposé un modèle prenant en compte une loi de comportement du connecteur dépendante de l'histoire du chargement [9]. Un modèle de ce type a été développé par Seddik et Behr [10] au LCPC pour le cas des matériaux élastiques-plastiques.

En 1982, un modèle a été développé par Aribert et Labib [11]. Ce modèle a été repris ensuite par Aribert et Abdel-Aziz [12]. 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.

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. 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 [13].

En 2001, Seracino et al. ont introduit le concept du point focal de l'interaction partielle fondé sur la théorie classique linéaire élastique de l'interaction partielle de Newmark [5]. 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.

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

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].

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.

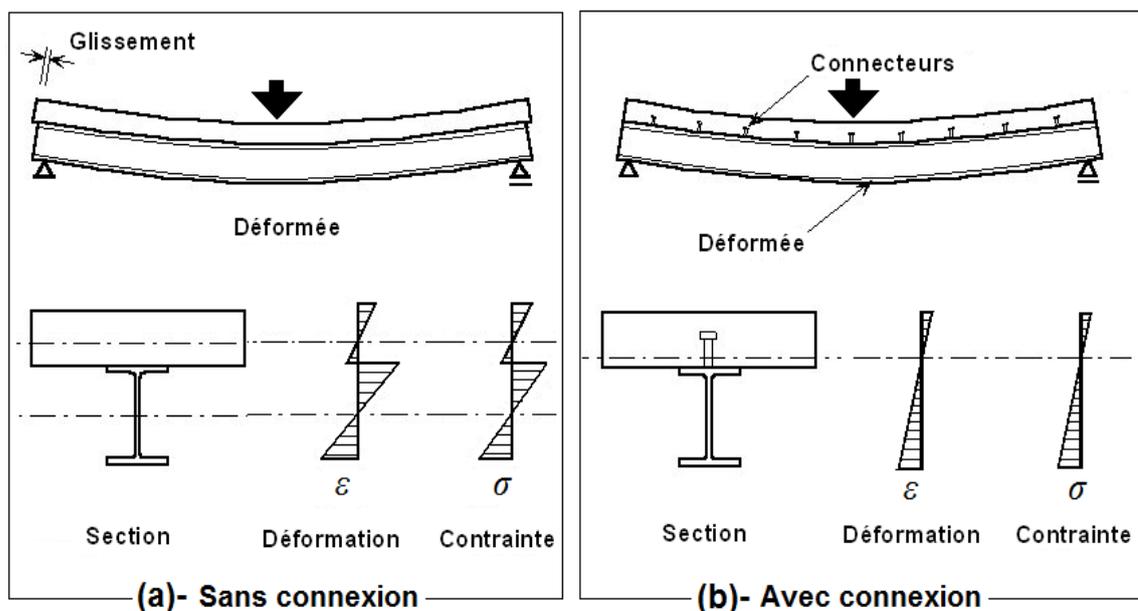


Figure 1.3- Effet de la connexion acier-béton

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (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 [1] (Figure I.4).

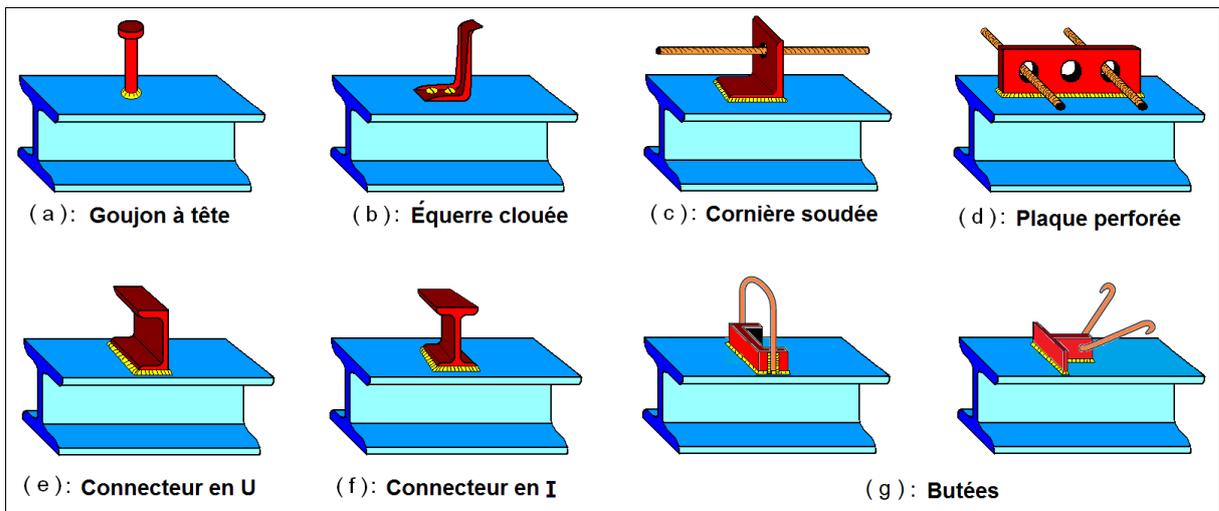


Figure 1.4- Différents types de connecteurs.

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.

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

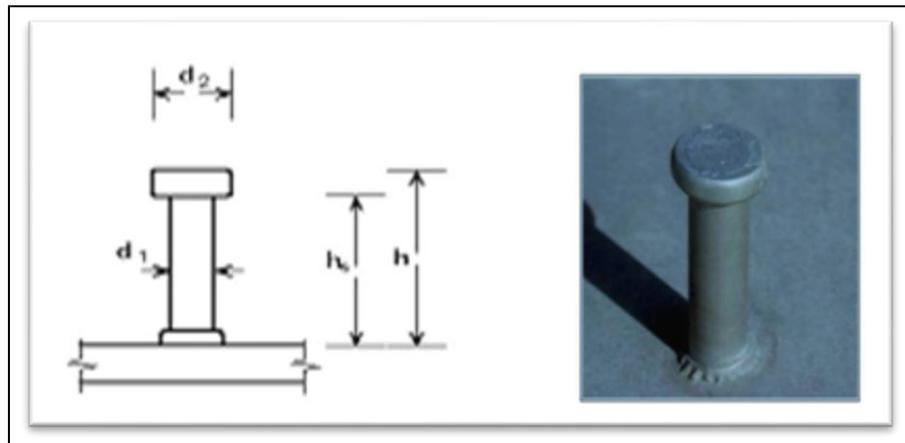


Figure 1.5- Connecteur en goujon à tête

La première utilisation des goujons est due à Viest, Siess et Newmark [5]. Au départ, ils étaient soudés manuellement jusqu'à l'apparition du système industriel proposé et commercialisé par Nelson Stud Welding (Figure 1.6).

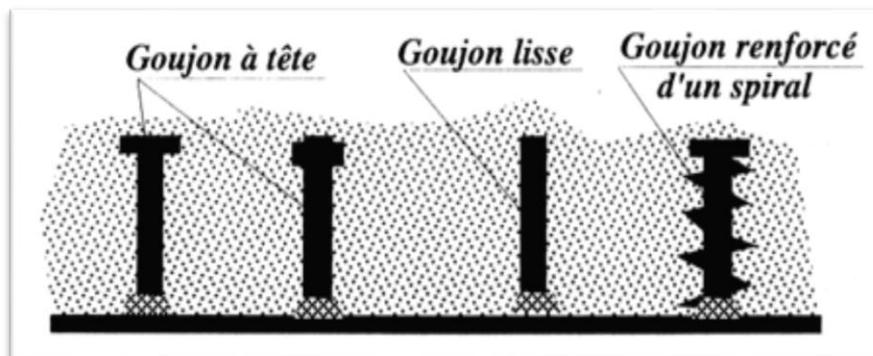


Figure 1.6- Différents types de goujons soudés

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.

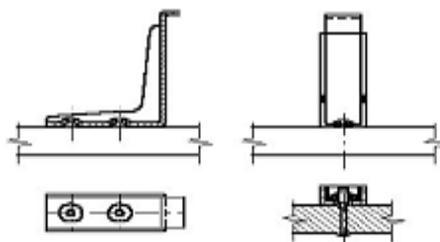


Figure 1.7- Connecteur en équerre clouée

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

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.

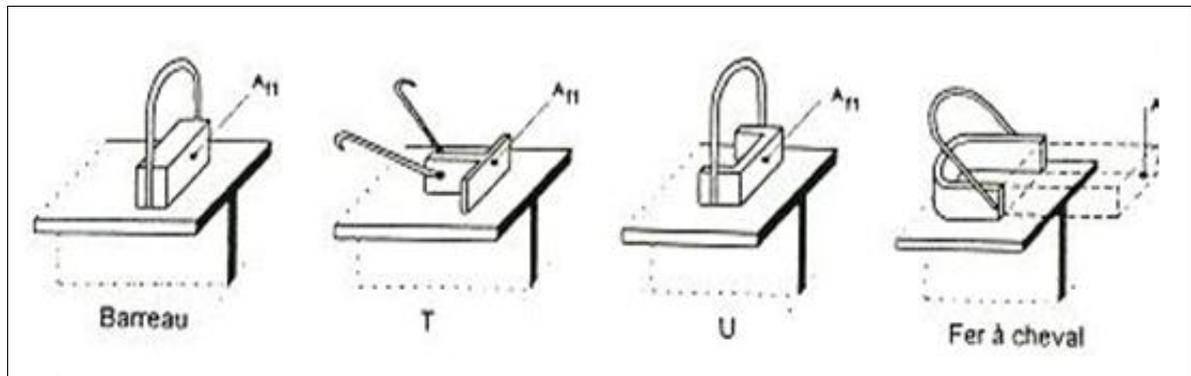


Figure 1.7- Connecteurs en butées

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.

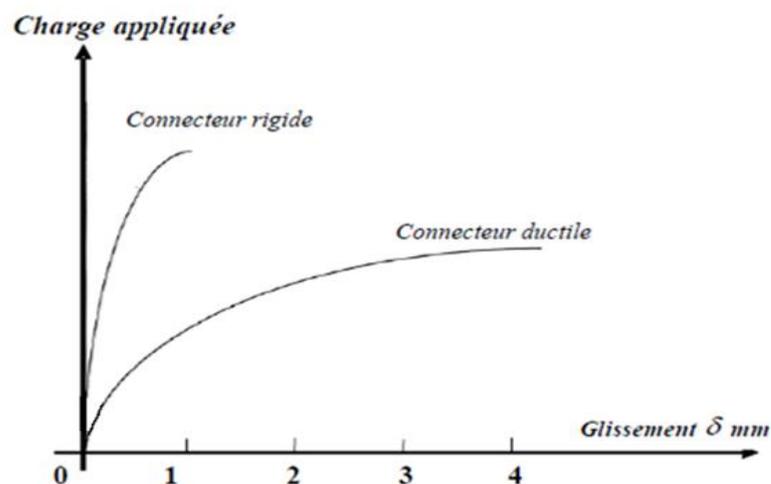


Figure 1.8- Classification des connecteurs selon leur capacité de glissement

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

1.7- Connexion totale et partielle

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 [14] 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) :

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

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

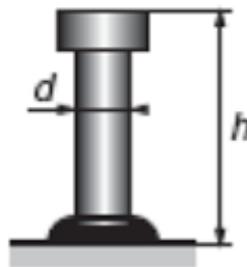


Figure 1.9- Goujon soudé

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.

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

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).

$\alpha = 0.2 [(h/d) + 1]$ 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).

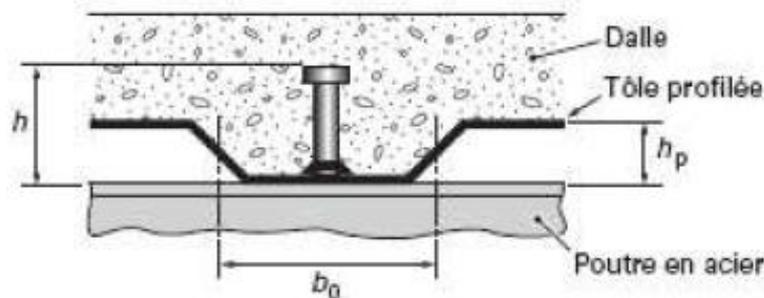


Figure 1.10- Goujon soudé avec dalle mixte

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

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

largeur participante (b_{eff}) de la dalle qui permet de supposer une distribution uniforme des contraintes normales sur cette largeur.

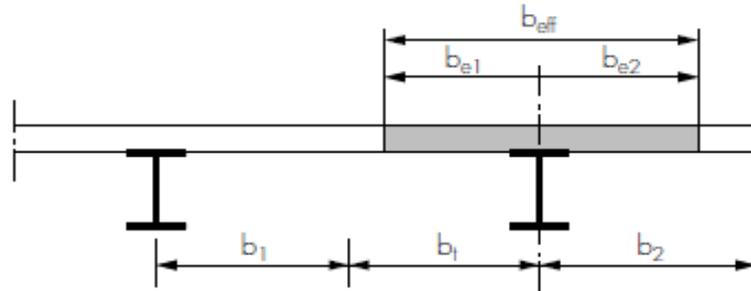


Figure 1.11- Largeur participante de la dalle pour une poutre mixte

Aussi l’Eurocode 4 [1] 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 :

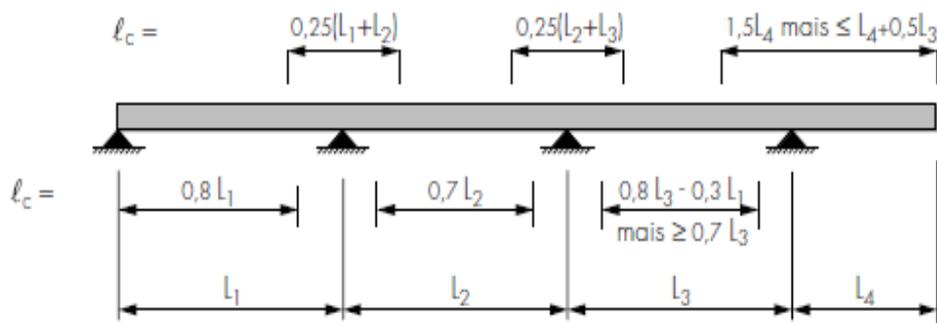


Figure 1.12- Travées équivalentes pour la détermination de la largeur participante

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-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) [15] :

- 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.

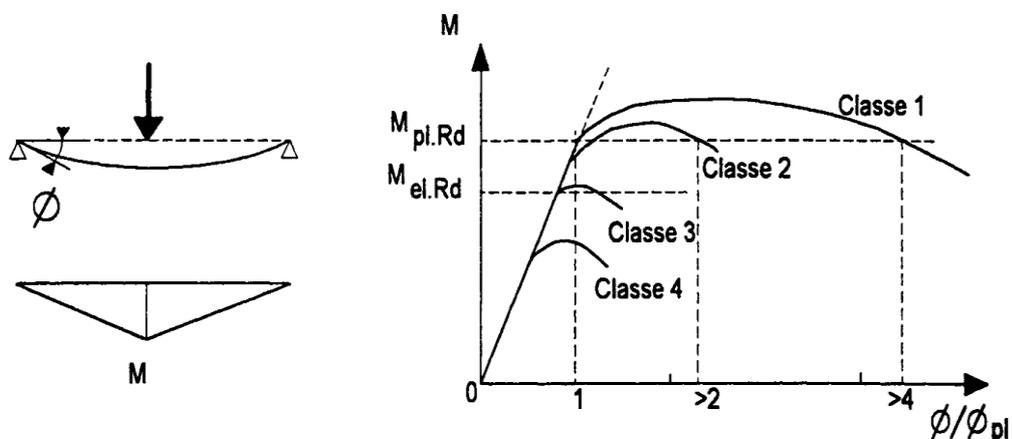


Figure 1.13- Courbe de comportement moment-rotation correspondant à chaque classe

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

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.

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 $f_{ck}/ f_{ck, cube}$.

Pour les bétons de masse volumique normale ($\rho=2400kg/m^3$) L'Eurocode 2 [16] 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.

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-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 admit un comportement parfaitement linéaire du matériau jusqu'à la limite d'élasticité.

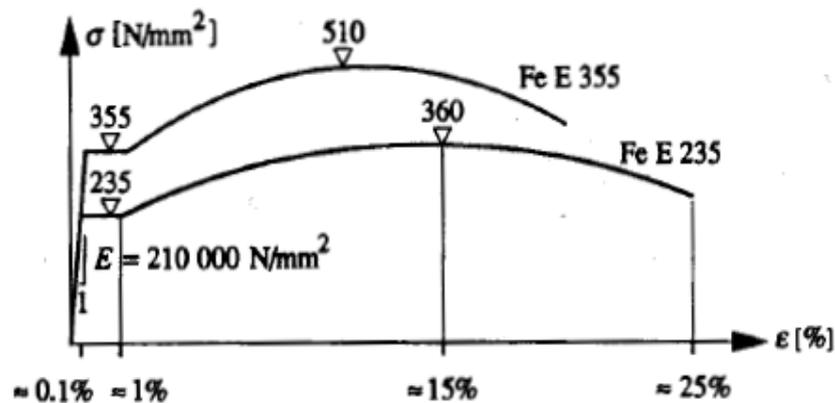


Figure 1.14- Diagramme (contrainte-déformation) des aciers S235 et S355

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

Chapitre 1 :

Etude bibliographique sur les poutres mixtes (acier-béton)

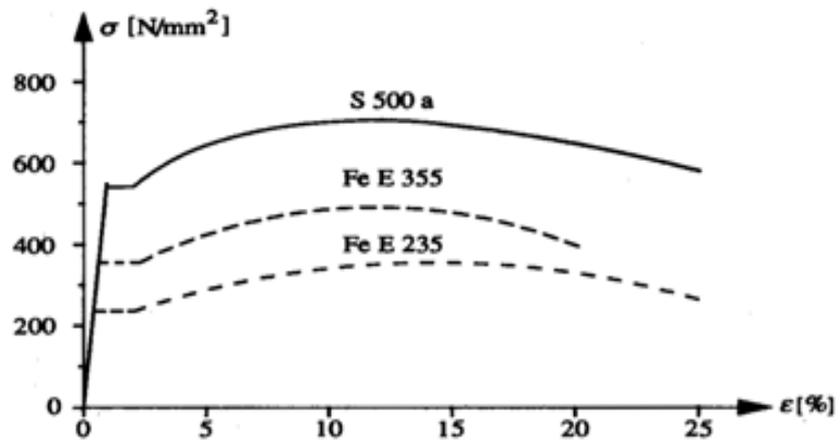


Figure 1.15- Diagramme contrainte-déformation d'un acier d'armature.



Chapitre 02

***Dimensionnement des poutres mixtes selon
l'EUROCODE 4***

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

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

2.1- Analyse élastique des poutres mixtes [17]

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 caractéristiques 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 [14] (§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).

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

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

Avec :

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

Selon l'Eurocode 2 [16] (§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).

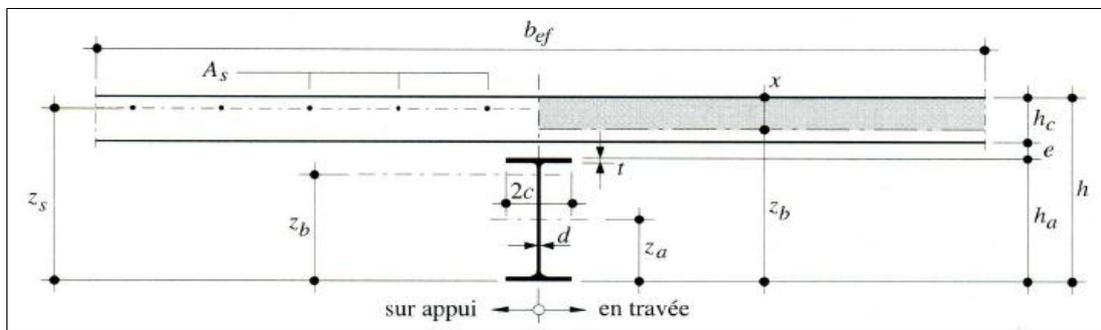


Figure 2.1-Convention adoptée pour une section mixte en travée et sur appui [3]

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.

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

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 :

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

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

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

B- Section sur appui (moment négatif)

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

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

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

$$S_a = A_a \times Z_a$$

$$S_s = A_s \times Z_s ; S_b = A_b \times Z_b = (A_a + A_s)Z_b \quad \text{Par équilibre :} \quad S_b = S_a + S_s$$

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 [7].

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

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

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

* 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.

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

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 d'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 examinée (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.

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

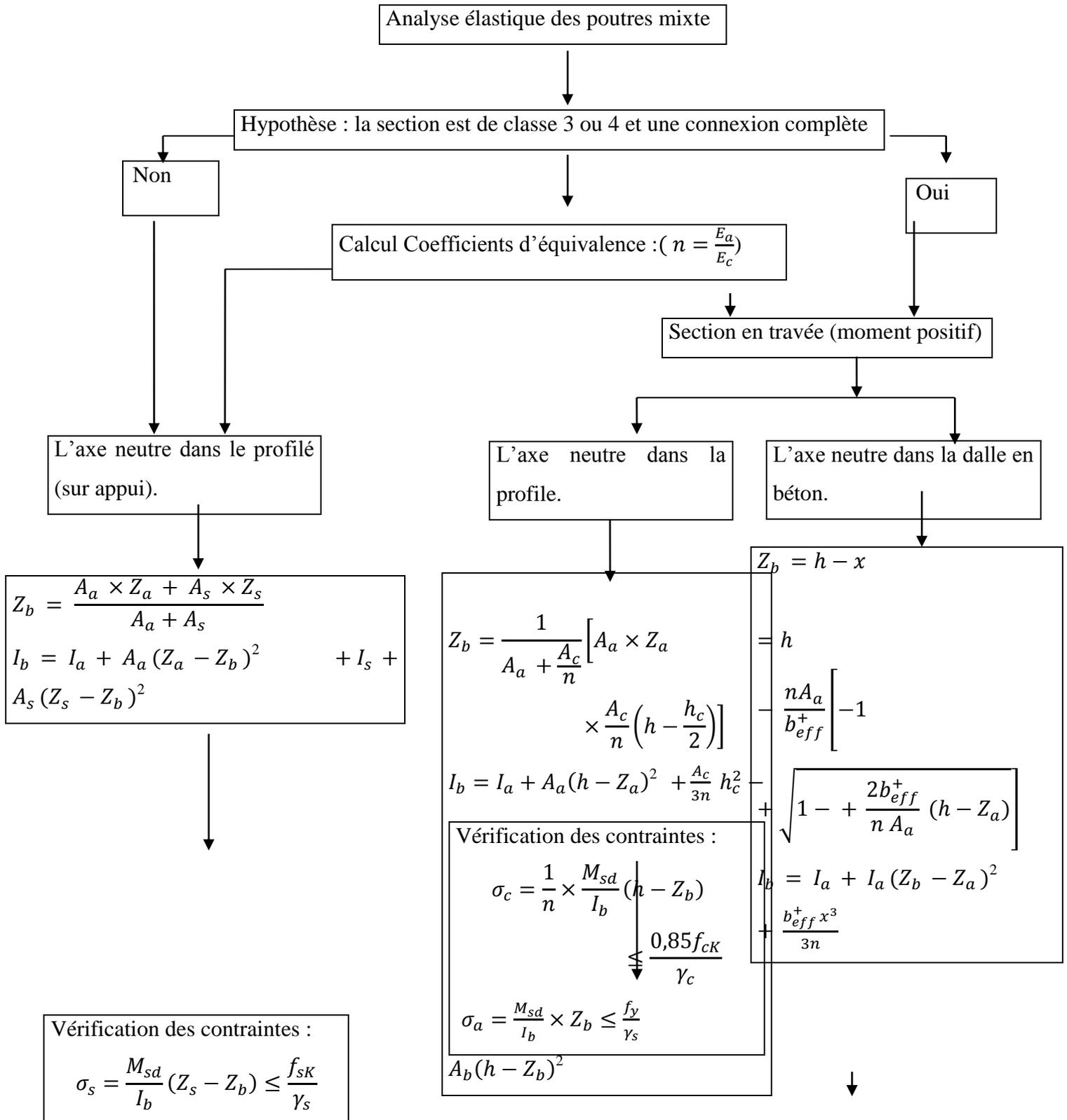
C - Espacement des connecteurs(e)

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 :

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

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

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



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

Figure 2.2 : organigramme de calcul élastique des poutres mixtes.

2.2- Analyse plastique des poutres mixtes [17]

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 $0,85f_{ck} / \gamma_c$, (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 $h_p=0$.

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.

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

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 :

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

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

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

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

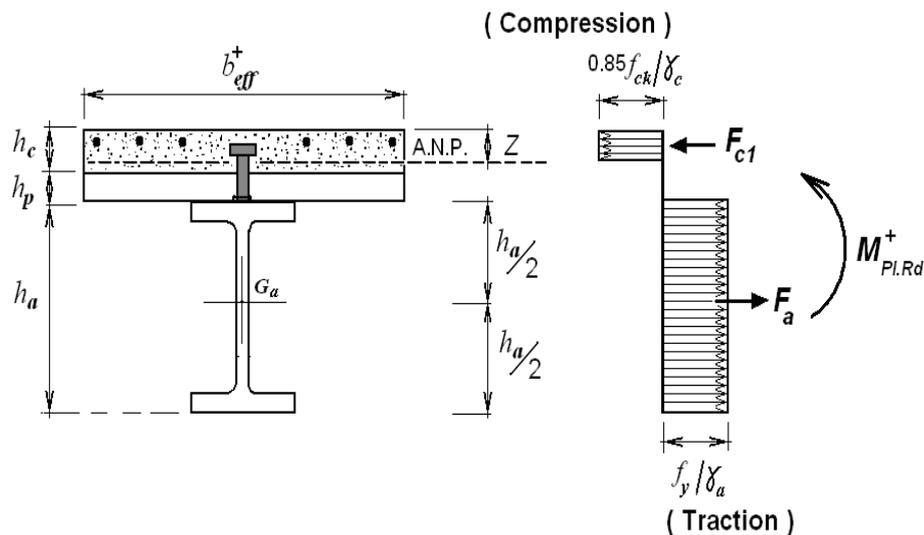


Figure 2.3 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans la dalle (flexion positive).

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

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

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:

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

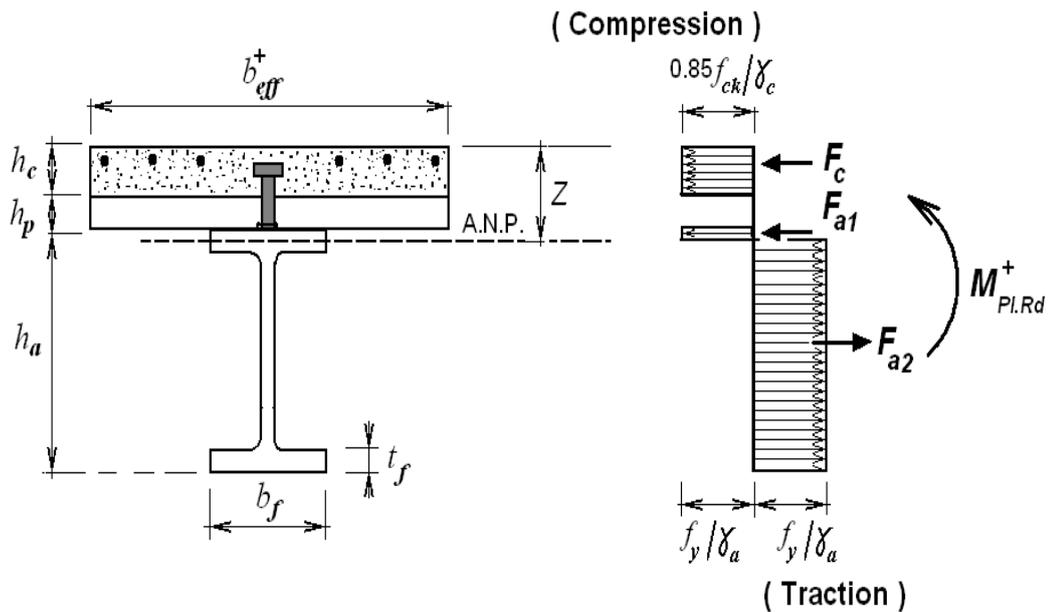


Figure 2.4 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans la semelle
(Flexion positive).

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 :

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

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

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

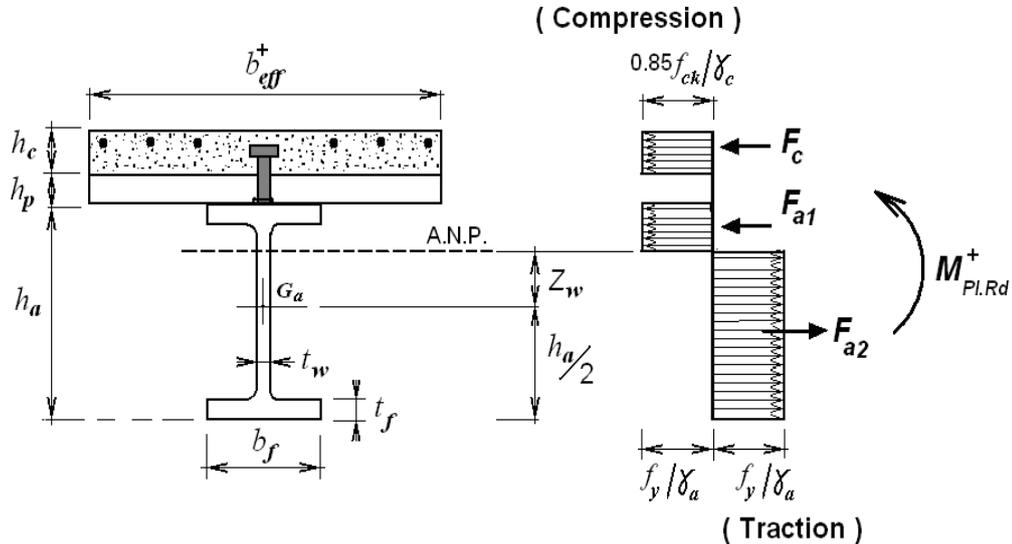


Figure 2.5 : distributions plastique des contraintes avec axe neutre dans l'âme (flexion positive).

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 :

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

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 :

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

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

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 :

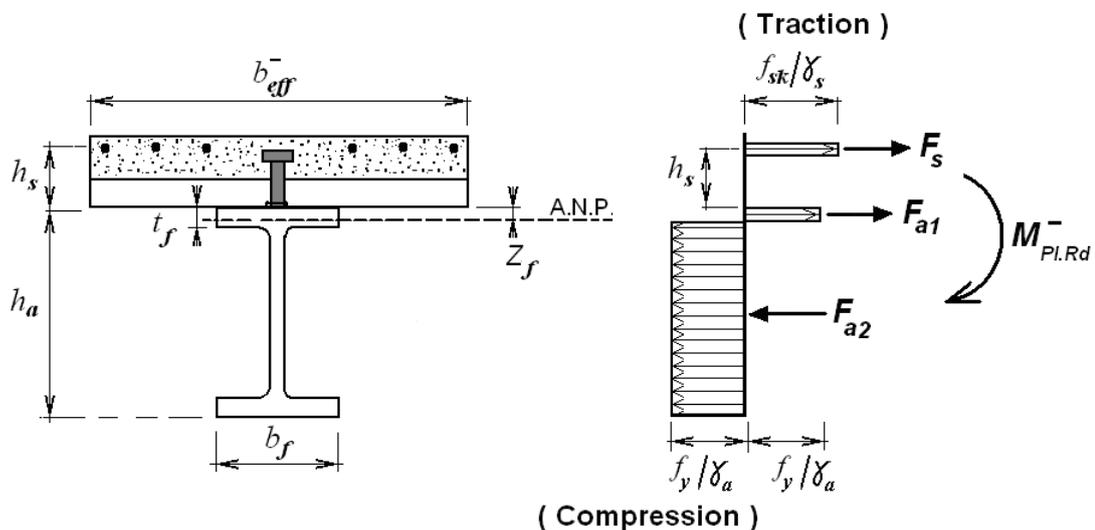
$$f_s = \frac{A_s \times f_{sk}}{\gamma_s} \dots \dots \dots (2.26)$$

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 :

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



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

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 :

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

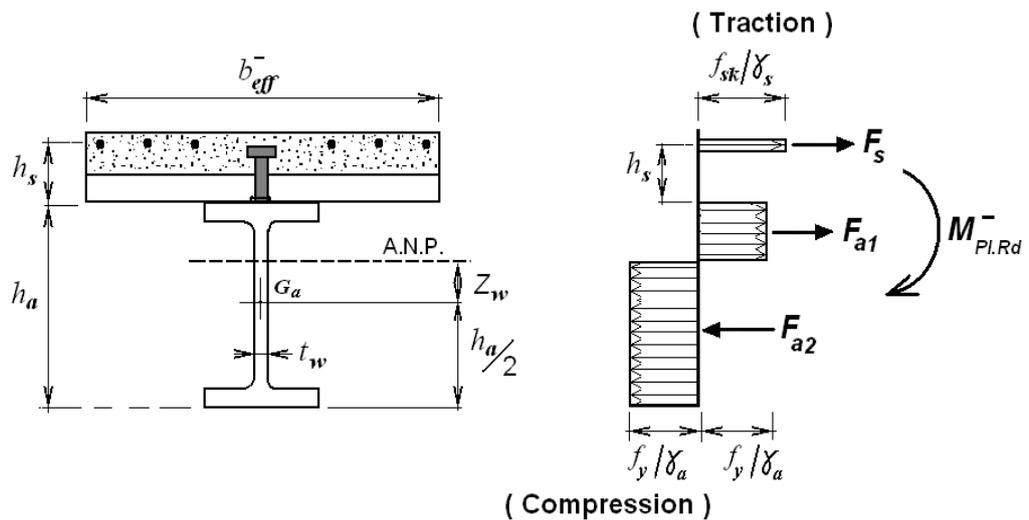


Figure 2.7 : Distribution plastique des contraintes avec axe neutre dans l'âme (flexion négative).

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

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

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

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.

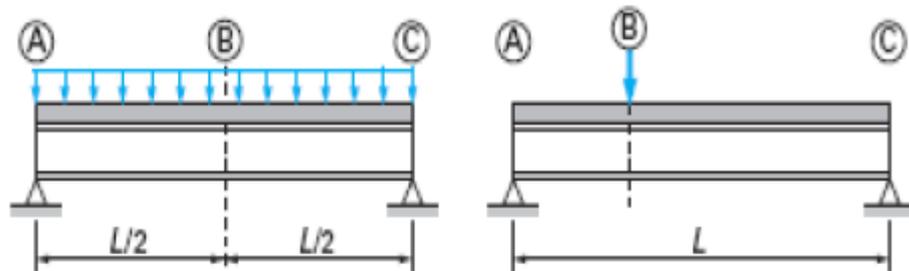


Figure 2.8 : longueurs critiques de poutres simplement appuyées [8].

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 :

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

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

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

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 dite " 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 :

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

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) [14] 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 :

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

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

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

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

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

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, La 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 :

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

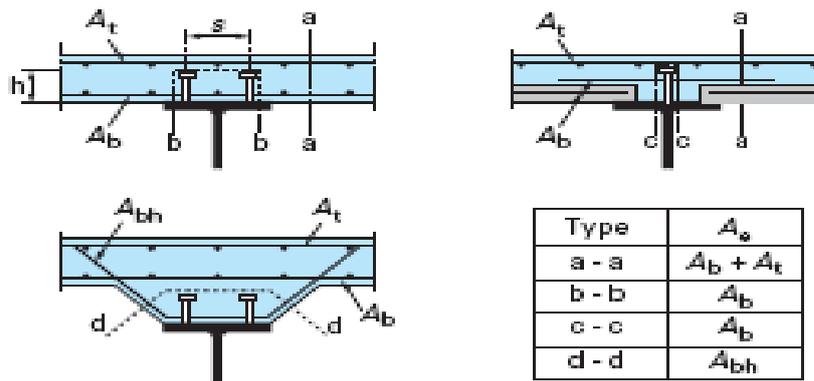


Figure 2.10 : Définition de la section A_e des barres d'armature transversale pour diverses surfaces de rupture [14]

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 2.10, 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 goudon.
- d' : diamètre de sa tête.
- s : entraxe des deux goudons.

2.2.6-Résistance des sections mixtes à l'effort tranchant

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.

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

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).
- 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 du profilé.

Remarque :

Chapitre 2 : **Dimensionnement des poutres mixtes selon l'EUROCODE 4**

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).

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

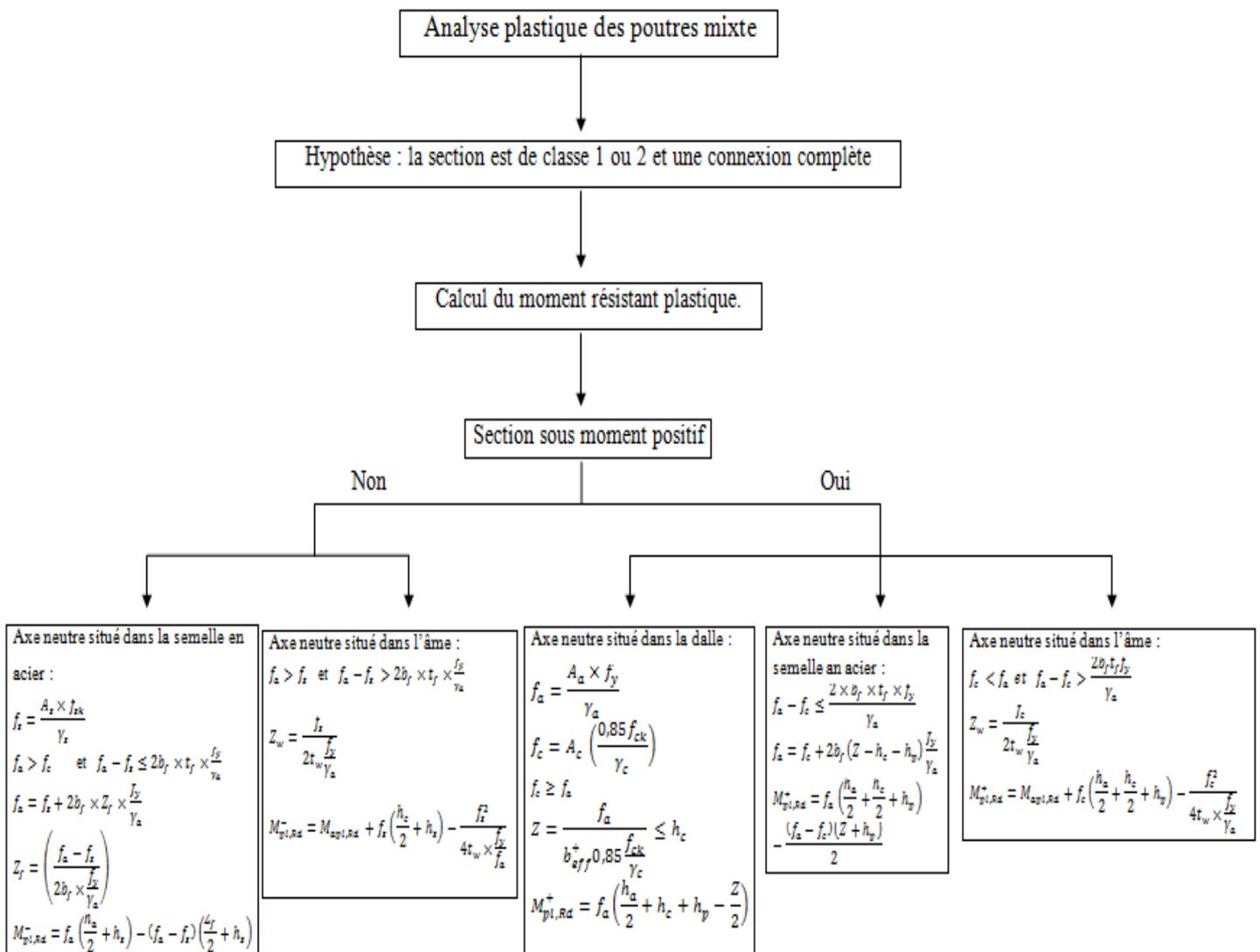
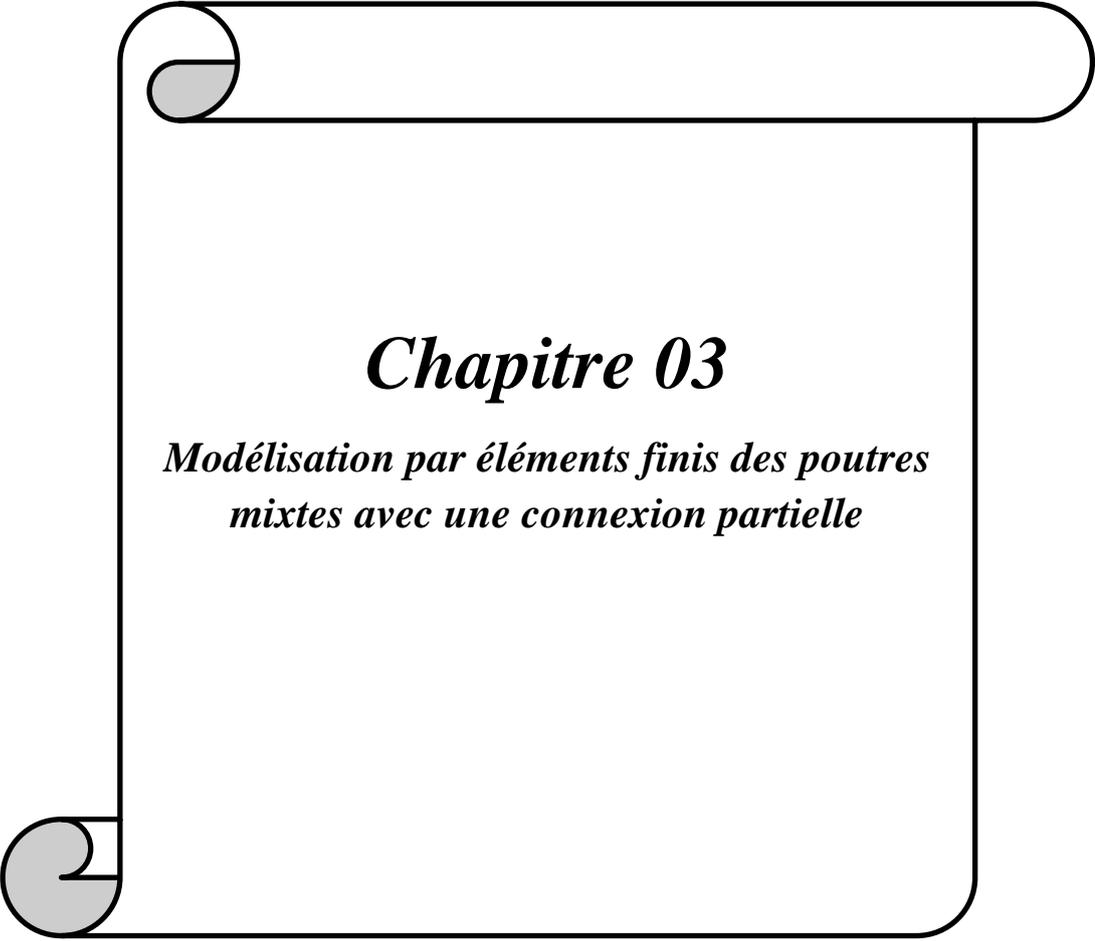


Figure 2.11 : Organigramme de calcul plastique des poutres mixtes



Chapitre 03

***Modélisation par éléments finis des poutres
mixtes avec une connexion partielle***

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

3.1- Introduction

Les modèles mono-dimensionnels développés par Arizumi et Hamada [18], Aribert et Abdel-Aziz [12] donnent des résultats satisfaisants pour le comportement global des poutres mixtes, mais, ils ne peuvent pas fournir des résultats concernant le comportement local, par exemple la distribution des contraintes et des déformations dans tous les points de la section mixte, l'évolution des fissures dans la dalle de béton, et la localisation des zones de plastification dans le profilé d'acier. Cependant, les modèles bi-dimensionnels (2D) et tri-dimensionnels (3D) peuvent simuler des structures plus complexes et peuvent fournir tous les détails de comportement. Mais à cause de la complexité des modèles tri-dimensionnels (difficulté de maillage, occupation de grand espace de mémoire, problèmes de convergence numérique, temps de résolution important, difficulté d'interprétation des résultats), nous avons choisi pour notre étude la modélisation bidimensionnelle car elle est simple et plus pratique.

Dans ce chapitre on présente un modèle d'éléments finis bidimensionnel en utilisant le code ANSYS [19] pour l'analyse du comportement des poutres mixtes simplement appuyées avec une connexion partielle. La validation du modèle proposé se fait par comparaison des résultats numériques avec des résultats expérimentaux tirés de la littérature.

Une étude paramétrique s'effectue ensuite pour mettre en évidence les effets du nombre et de l'espacement des connecteurs « goujons à tête » sur le comportement en flexion des poutres mixtes simplement appuyées. Les résultats obtenus concernent l'évolution de la flèche à mi-travée, le glissement à l'interface acier-béton et la répartition des contraintes suivant la hauteur de la section transversale de la poutre mixte en fonction du chargement.

3.2- Etapes de la modélisation par éléments finis d'une structure quelconque

D'une manière générale, la modélisation par éléments finis comporte les étapes qui seront

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

Citées ci-dessous. Il est à noter que chaque étape dépend de celui qui le précède.

- 1) Définition des caractéristiques géométriques du modèle
- 2) Choix des types d'éléments finis à utiliser pour la modélisation.
- 3) Définition des propriétés mécaniques des matériaux.
- 4) Définition du maillage des éléments finis.
- 5) Discrétisation de la géométrie du modèle.
- 6) Introduction des conditions aux limites et des charges.
- 7) Choix des paramètres pour l'analyse non linéaire (nombre d'incrémentations, nombre maximal d'itération, critères de Convergences, etc.)
- 8) Exécution du calcul
- 9) Exploitation des résultats.

3.3- Système de poutre mixte simplement appuyée

Le système étudié est une poutre mixte simplement appuyée. La section de la poutre mixte est constituée d'une poutre en acier de profilé en « I » connectée à une dalle pleine en béton armé à l'aide de connecteurs « goujons à tête » soudés sur la semelle supérieure de la poutre métallique et ancrés dans la dalle en béton (Fig. 3-1).

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

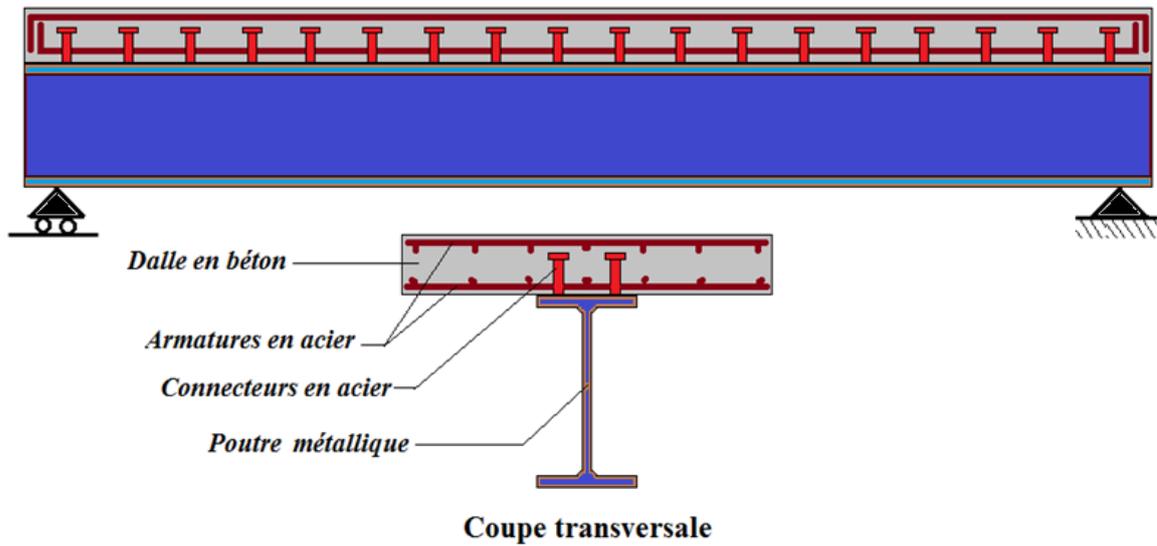


Figure 3-1 : Système de poutre mixte simplement appuyée

3.4- Modèle d'éléments finis

Le système de poutre mixte présenté à la (Fig.3-1) est simulé par une modélisation bidimensionnelle en utilisant le code d'éléments finis ANSYS [19]. Les parties constituant ce système sont la dalle en béton, la poutre métallique, les barres d'armature et les connecteurs. Afin d'obtenir une simulation correcte, toutes ces parties doivent être modélisées en tenant compte leur non-linéarité matérielle.

3.4.1- Types d'éléments finis utilisés

- La dalle en béton est modélisée par des éléments plans quadrilatéraux à quatre nœuds (PLANE42) avec une épaisseur qui correspond à la largeur effective b_{eff} de la dalle.
- Les barres d'armatures sont modélisées de manière discrète par des éléments barres à deux nœuds (LINK1) en supposant une adhérence parfaite avec le béton. Par conséquent, les nœuds des éléments LINK1 sont attachés aux nœuds coïncidents des éléments PLANE42, c'est-à-dire, les deux matériaux partagent les mêmes nœuds.
- Pour la poutre métallique, on utilise des éléments plans quadrilatéraux à quatre nœuds (PLANE42) en prenant en compte la différence d'épaisseur entre âme et semelle, pour

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

l'âme on prend l'épaisseur (t_w), pour les semelles on prend la largeur (b_f) comme épaisseur de l'élément fini plan.

- Les connecteurs sont modélisés par des éléments ressorts non-linéaires appelés (COMBIN39) qui sont attachés aux nœuds de la face supérieure de la poutre métallique et aux nœuds de la face inférieure de la dalle en béton en respectant leurs positions réelles.
- Afin de transmettre les charges de la dalle en béton à la poutre métallique, on fait le couplage des nœuds qui sont situés en coïncidence à l'interface acier-béton. Cet arrangement empêche le chevauchement ou la séparation des nœuds à l'interface de liaison acier-béton tout en permettant leur glissement relatif.

3.4.2- Maillage et conditions aux limites

Le maillage doit reproduire la géométrie de la poutre mixte en respectant la position réelle des connecteurs. Le degré de raffinement du maillage est choisi en prenant en considération le temps d'analyse et la fidélité des résultats. La Fig.3.2 présente le maillage et les conditions aux limites adoptées pour le modèle bidimensionnel proposé. Par symétrie, on ne représente que la moitié de la structure modélisée en respectant les conditions aux limites suivantes :

- Les nœuds de la dalle en béton et les nœuds de la poutre métallique par lesquels passe l'axe de symétrie sont bloqués horizontalement (dans la direction X).
- Le nœud situé au niveau de l'appui simple est bloqué verticalement dans la direction Y.

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

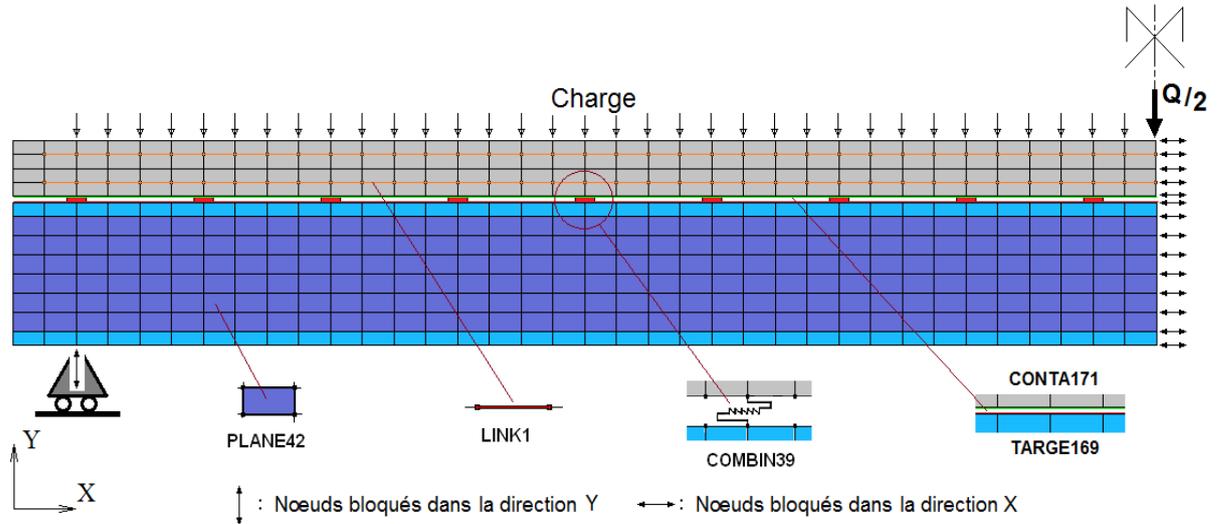


Figure 3.2- Maillage et conditions aux limites

3.4.3- Modélisation des matériaux

3.4.3.1- Modèle du Béton

Le modèle utilisé pour le béton est de forme multilinéaire en compression et bilinéaire en traction en admettant que le béton tendu résiste encore après sa fissuration en considérant qu'à partir de la résistance maximale à la traction (f_t) la courbe devient horizontale afin d'éviter les problèmes de convergence numérique car la non-linéarité matérielle dans l'ANSYS n'accepte pas un gradient négatif dans la courbe contrainte-déformation (Figure 3.3).

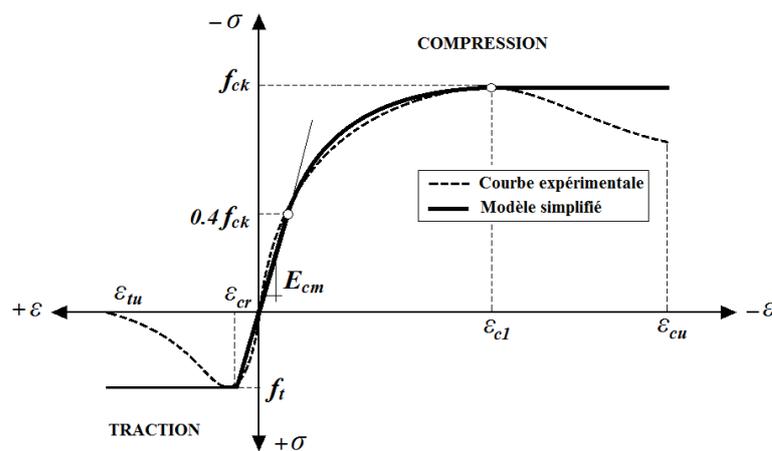


Figure 3.3- Modèle du béton

3.4.3.2- Modèle de l'acier

Le modèle utilisé pour l'acier de la poutre métallique et l'acier des barres d'armature est un modèle élasto-plastique bilinéaire, symétrique en traction et en compression par rapport à

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

l'origine (Figure 3.4). L'utilisateur doit, donc, introduire comme données les valeurs suivantes :

- Le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν ,
- La limite d'élasticité f_y et la résistance ultime en traction et en compression f_u ,
- La déformation élastique ε_y et la déformation ultime en traction et en compression ε_u .
- L'écrouissage est pris en compte par un module d'élasticité $E_h = \frac{|f_u - f_y|}{|\varepsilon_u - \varepsilon_y|}$

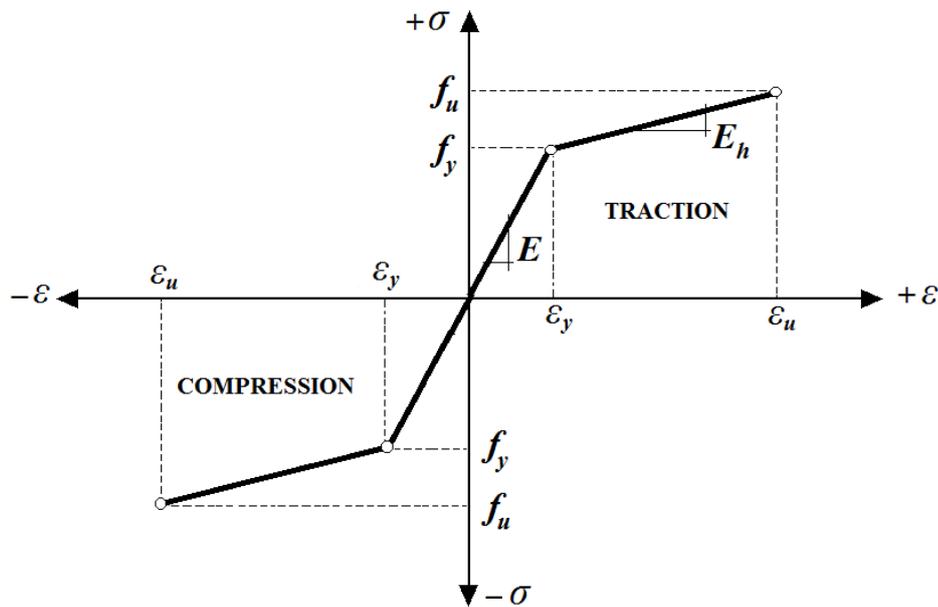


Figure 3.4- Modèle de l'acier

3.4.3.3- Modélisation du comportement des connecteurs

L'élément fini COMBIN39 est un élément ressort défini par deux nœuds et une courbe (force-déplacement). Il est utilisé comme élément uni-axial de traction-compression avec deux degrés de liberté à chaque nœud, translations dans les directions X et Y. La géométrie de cet élément et la localisation des nœuds sont montrées dans la Figure 3.5. Les points de coordonnées $(F1, D1)$, $(F2, D2)$ et (FN, DN) représentent la force appliquée et le déplacement correspondant. Dans notre modèle, ils représentent la charge appliquée sur un connecteur « goujon à tête » et le glissement correspondant dont leurs valeurs sont tirées des résultats des essais de push-out sur des connecteurs en « goujons à tête ».

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

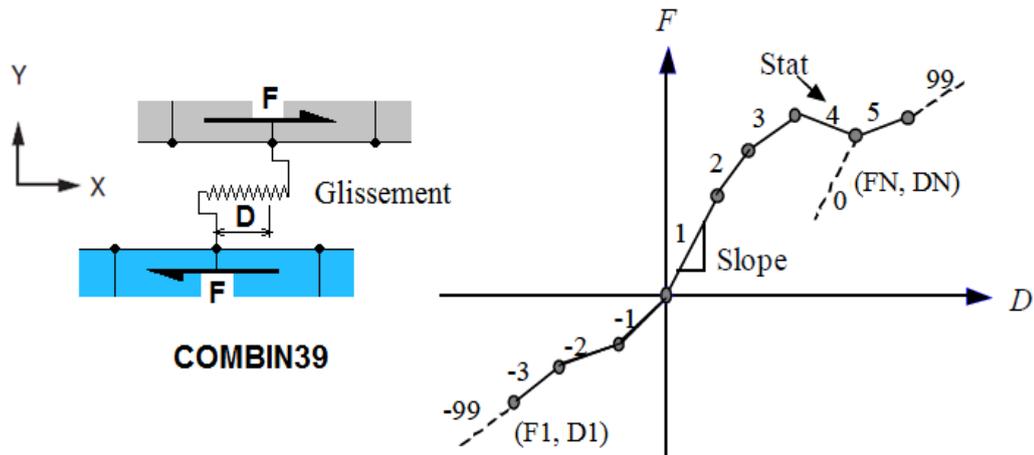


Figure 3.5- Elément ressort non-linéaire (COMBIN39)

3.4.4- Application des charges et critères de rupture

Les charges sont appliquées aux nœuds de la face supérieure de la dalle en béton par manière incrémentale et croissante jusqu'à la rupture de la poutre mixte qui se produit par l'une des causes suivantes ou par la combinaison de celles-ci :

- Ecrasement du béton en compression à des déformations ultimes ϵ_{cu} ;
- Plastification de l'acier du profilé à des déformations ultimes ϵ_{au} ;
- Rupture des connecteurs par cisaillement lorsque le glissement maximal dépasse leur capacité de glissement S_u .

3.5- Validation du modèle proposé

Pour s'assurer de la bonne représentativité du modèle proposé, on présente ici les résultats d'analyse numérique en les comparant à ceux obtenus expérimentalement de la poutre mixte simplement appuyée (P14) testée par Aribert et Abdel Aziz [12]. La (Fig.3-6) présente la poutre mixte isostatique (P14). Sa section transversale est constituée :

- D'une poutre en acier de profilé IPE 400,
- D'une dalle en béton de dimension 800×100, armée par deux nappes d'armature de 5φ10 (le taux d'armature est égal à 1%),

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

- Les connecteurs utilisés sont des goujons à tête de 19mm de diamètre et de 80mm de hauteur, 9 paires de goujons régulièrement répartis sont utilisés pour assurer une connexion partielle avec un degré de connexion de 41%.

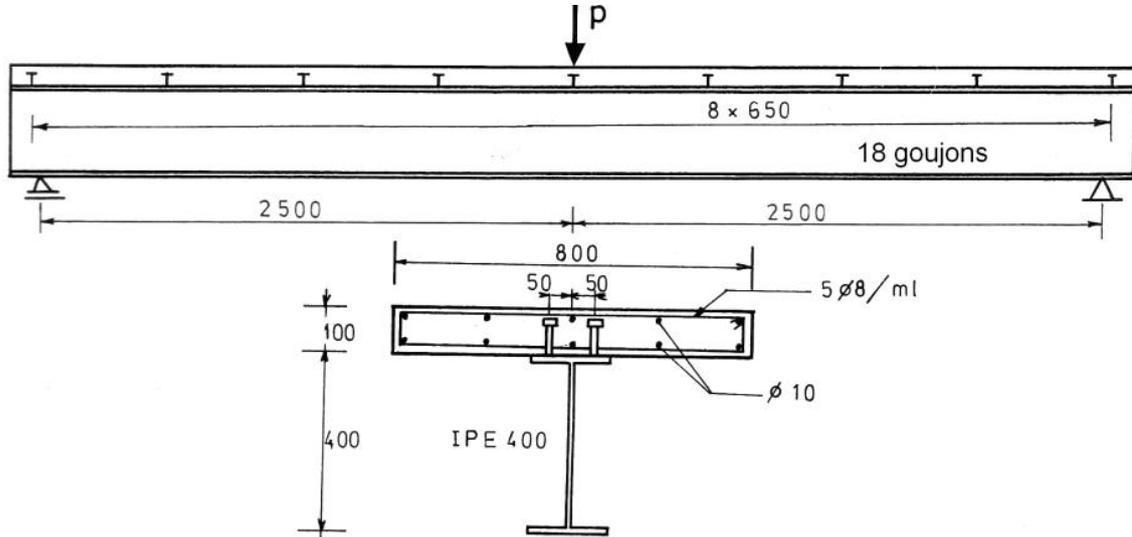


Figure 3.6- Poutre mixte simplement appuyée (P14)

Les caractéristiques géométriques et les propriétés des matériaux constituant la poutre mixte (P14) sont rassemblées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1- Caractéristiques de la poutre mixte (P14)

Caractéristiques géométriques	Propriétés des matériaux
<u>Dalle en béton :</u> - Epaisseur = 100mm - Largeur = 800mm	$f_{ck} = 34.7 \text{ N/mm}^2$ $f_t = 3.02 \text{ N/mm}^2$ $E_c = 33163 \text{ N/mm}^2$ $\nu_c = 0.2$ $\varepsilon_{c1} = 0.0026$ $\varepsilon_{cu} = 0.0040$ $\varepsilon_{cr} = f_t/E_c$ $\varepsilon_{tu} \approx 10\varepsilon_{cr}$
<u>Poutre métallique :</u> - Type de profilé : IPE 400 - Aire = 8446 mm ² - Hauteur = 400 mm	$E_a = 210000 \text{ N/mm}^2$ $\nu_a = 0.3$ f_y - semelles : 245 N/mm ² , âme : 260 N/mm ² f_u - semelles : 361 N/mm ² , âme : 372 N/mm ² $\varepsilon_u = 80\varepsilon_y$ - semelles : 0.0933, âme : 0.0991

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

- Largeur (semelle) = 180 mm - Epaisseur (semelle) = 13.5mm - Epaisseur (âme) = 8.6 mm	E_{ah} - semelles : 1258 N/mm^2 , âme : 1145 N/mm^2
<u>Barres d'armature :</u> - Nappe sup. : $5\text{Ø}10= 393\text{mm}^2$ - Nappe inf. : $5\text{Ø}10= 393\text{mm}^2$	$E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$ $\nu_s = 0.3$ $f_{sy} = 370 \text{ N/mm}^2$ $f_{su} = 375 \text{ N/mm}^2$ $\varepsilon_{su} = 25\varepsilon_{sy} = 0.044$ $E_{sh} = 118 \text{ N/mm}^2$
<u>Connecteurs :</u> Nombre de goujons = 18 - Diamètre x Hauteur = 19 mm x 80 mm Distribution des goujons : uniforme en deux rangés Espacement des connecteurs = 650 mm, - Degré de connexion = 41 % Courbe (charge-glissement) : $\alpha = 0.8$, $\beta = 0.7\text{mm}^{-1}$ Résistance du connecteur, $P_u = 130\text{kN}$ - Glissement maximal : $S_u = 6\text{mm}$	

A cause de la symétrie, on ne présente que la moitié de la poutre mixte étudiée, la (Fig. 3- 7) présentes les types d'éléments finis utilisés, le maillage et les conditions aux limites.

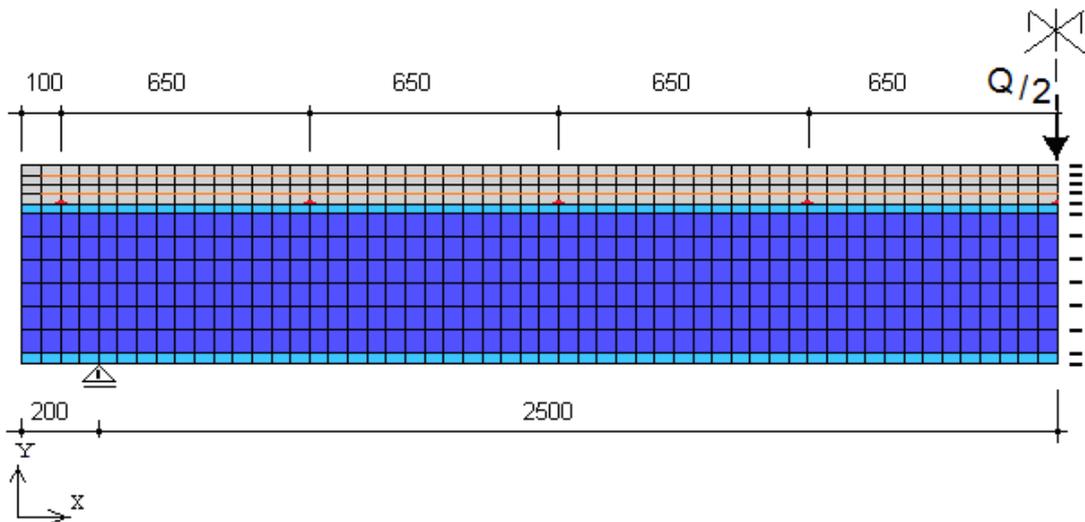


Figure 3.7- Maillage et conditions aux limites de la poutre (P14)

Les Figures 3.8 et 3.9 montrent la comparaison entre les résultats numériques et ceux obtenus expérimentalement. La Figure 3.8 est relative à l'évolution de la flèche en fonction du chargement et la Figure 3.9 concerne la distribution du glissement à l'interface acier-béton le

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

long de la poutre mixte. A partir de cette comparaison, on a remarqué une bonne concordance entre les courbes numériques et expérimentales.

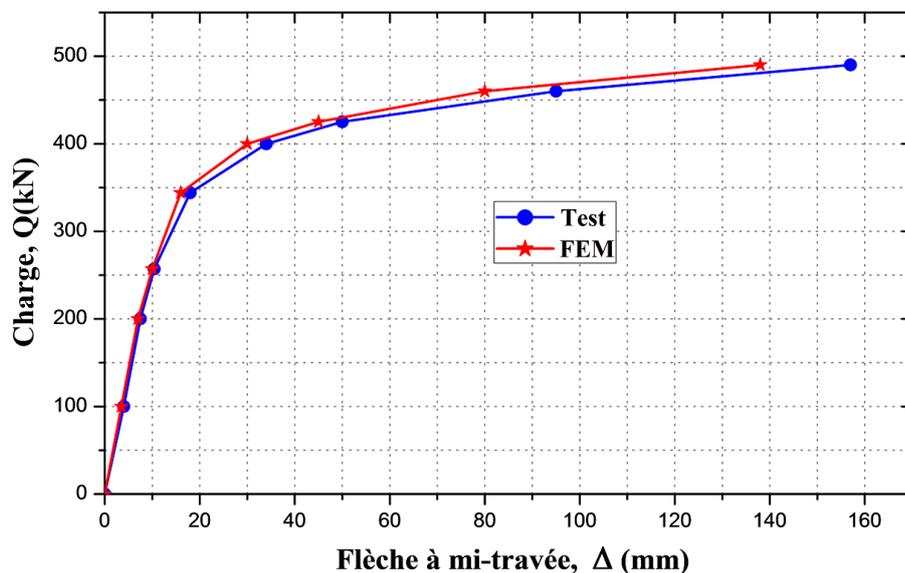


Figure 4.8- Courbes (charge-flèche) pour la poutre mixte (P14)

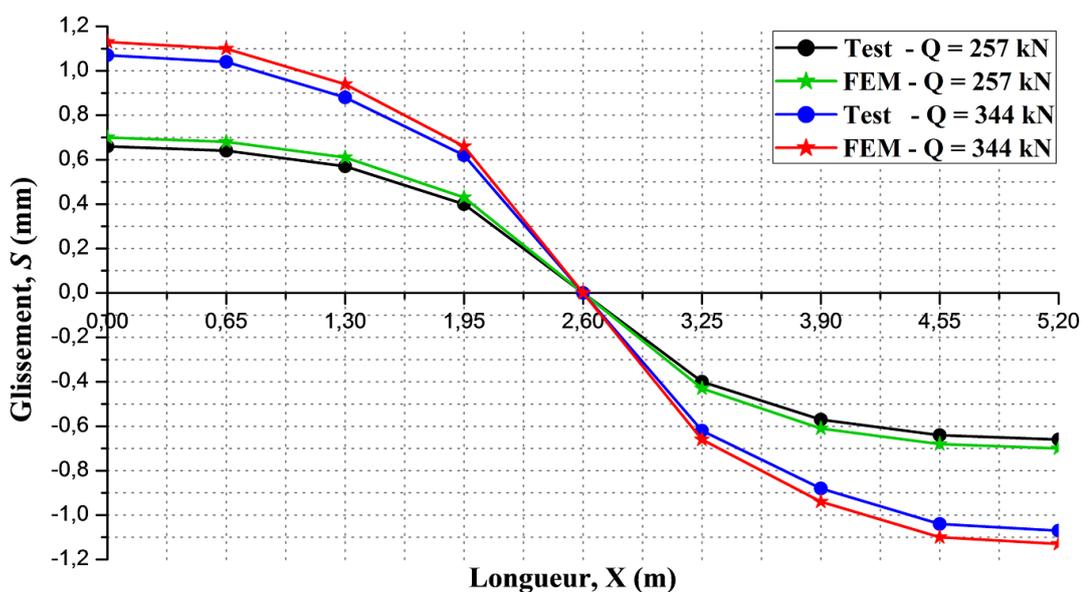


Figure 3.9- Distribution du glissement le long de la poutre (P14)

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

La forme déformée indiquée à la figure 3.10 montre clairement l'apparition d'un glissement relatif à l'extrémité de la poutre mixte.

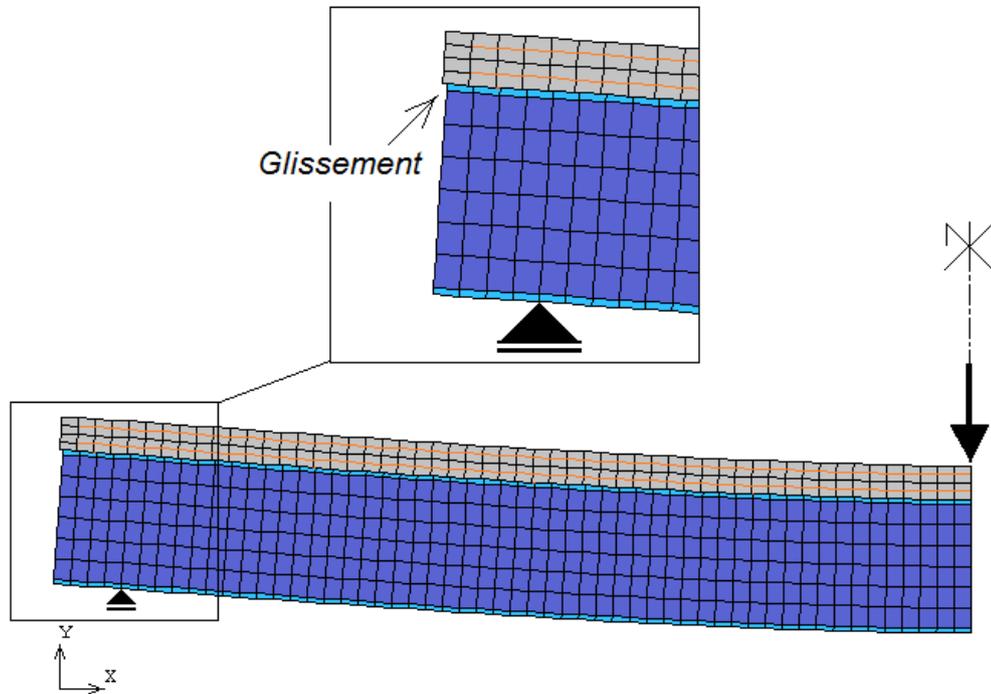


Figure 3.10- Forme déformée de la poutre mixte (P14)

3.6- Effet du degré de connexion

Le modèle bidimensionnel, validé dans les paragraphes précédents, est appliqué ici pour l'analyse du comportement en flexion de quatre (4) poutres mixtes avec des connecteurs en « goujons à tête » ne différant que par le degré de connexion. Chaque poutre mixte, d'une portée de 4.8 mètres, est soumise à une charge concentrée (Q) à mi-travée (Figure 3-11). La section transversale est constituée d'un profilé métallique en IPE 300 et d'une dalle en béton de dimensions $800 \times 120 \text{ mm}^2$ avec deux nappes d'armature de $6\text{Ø}10$.

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

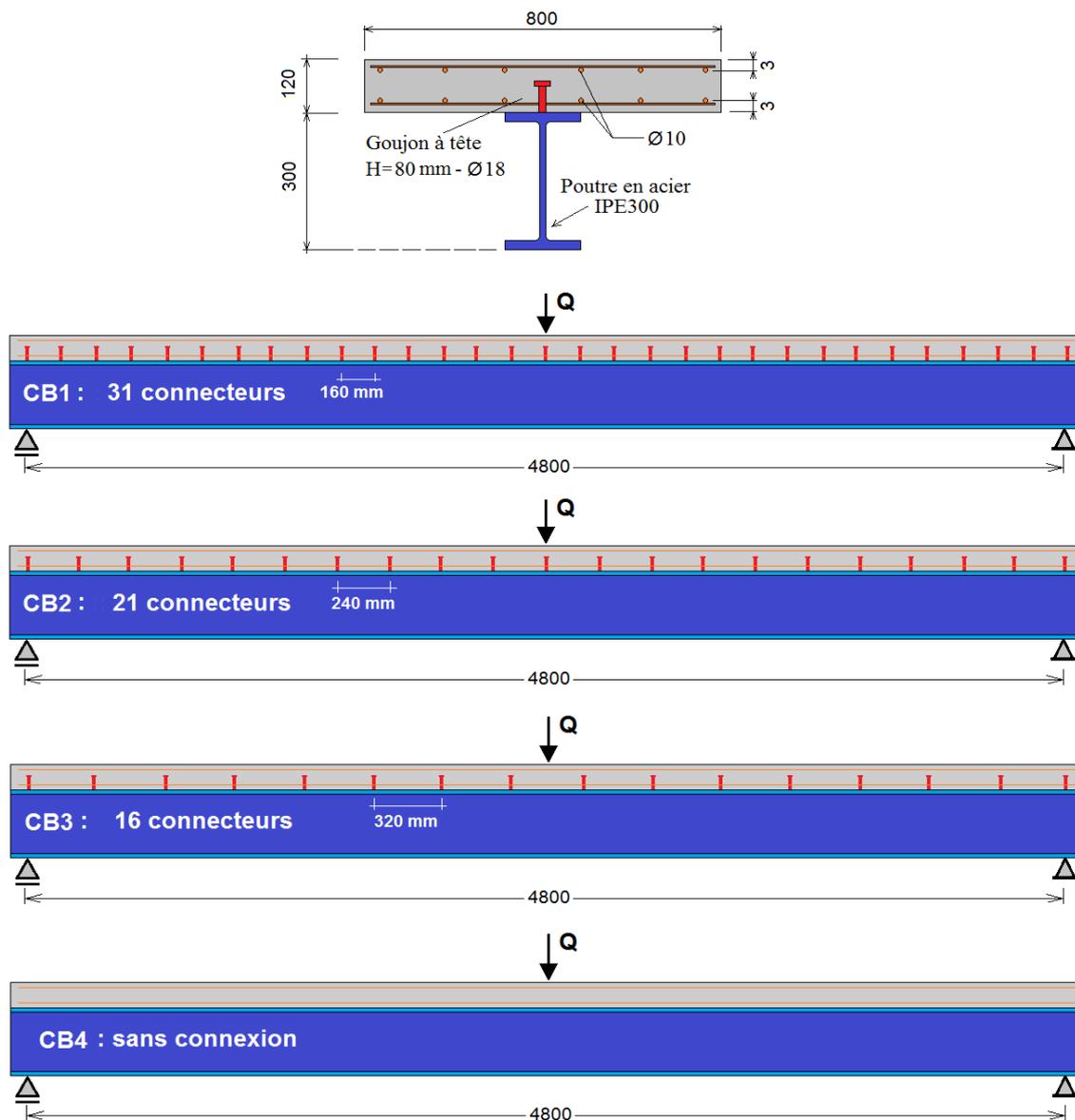


Figure 3.11- Dimensions des poutres mixtes analysées

La connexion entre l'acier et le béton est assurée par des connecteurs en « goujons à tête » de 19 mm de diamètre et de 80 mm de hauteur.

En se basant sur la résistance ultime de chaque connecteur en « goujons à tête » déterminée par des essais de push-out ($P_u = 74.75$ kN), le dimensionnement de la connexion selon les règles de l'Eurocode4 [12], conduirait à utiliser 31 connecteurs dans la poutre CB1 pour assurer une connexion complète, 21 connecteurs dans la poutre CB2 pour une connexion partielle de 67% et 16 connecteurs dans la poutre CB3 pour une connexion partielle de 50%. Par contre, dans la dernière poutre CB4, il n'existe pas des connecteurs et le degré de connexion est pris égal à zéro.

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

Les caractéristiques géométriques et les propriétés matérielles des poutres mixtes analysées sont données au tableau 3-2.

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

Tableau 3.2- Caractéristiques des modèles de poutres mixtes (CB)

Caractéristiques identiques Des modèles de poutres mixtes C <i>B</i> <i>i</i>	Modèle C <i>B</i> <i>i</i>	Connexion (acier-béton)		
		Nombre de Connecteurs N	Espacement (mm)	Degré de connexion η
<p><u>Travée</u> : $L_b = 4800\text{mm}$</p> <p><u>Dalle de béton</u> : $h_c = 120\text{ mm}$ $b_{eff} = 800\text{mm}$</p> <p>$E_c = 29750.6\text{N/mm}^2$, $\nu_c = 0.2$</p> <p>$f_{ck} = 19.347\text{ N/mm}^2$ $f_{ct} = 2.16\text{ N/mm}^2$</p> <p><u>Poutre métallique</u> : IPE300 (S 275)</p> <p>$E_a = 210000\text{ N/mm}^2$, $\nu_a = 0.3$, $f_y = 275\text{ N/mm}^2$</p> <p>$f_u = 410\text{ N/mm}^2$, $\varepsilon_u = 0.05$</p> <p><u>Barres d'armature</u> :</p> <p>$E_s = 200000\text{ N/mm}^2$, $\nu_s = 0.3$, $f_{sy} = 400\text{ N/mm}^2$</p> <p>$f_u = 600\text{ N/mm}^2$, $\varepsilon_{su} = 0.05$</p> <p><u>Connecteurs en « Goujons à tête »</u> :</p>	CB1	31	160	100%
	CB2	21	240	67%
	CB3	16	320	50%
	CB4	0	-	0

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

$P_u = 74.75 \text{ kN}, S_u > 6 \text{ mm}$				
--	--	--	--	--

Les résultats obtenus concernent l'évolution de la flèche à mi-travée, le glissement à l'interface acier-béton et la répartition des contraintes suivant la hauteur de la section transversale de la poutre mixte en fonction du chargement.

A : Courbes (charge-flèche)

La figure 3-12 montre les courbes d'évolution de la flèche à mi-travée en fonction du chargement pour chacune des quatre poutres analysées, et ceci jusqu'au stade de la rupture.

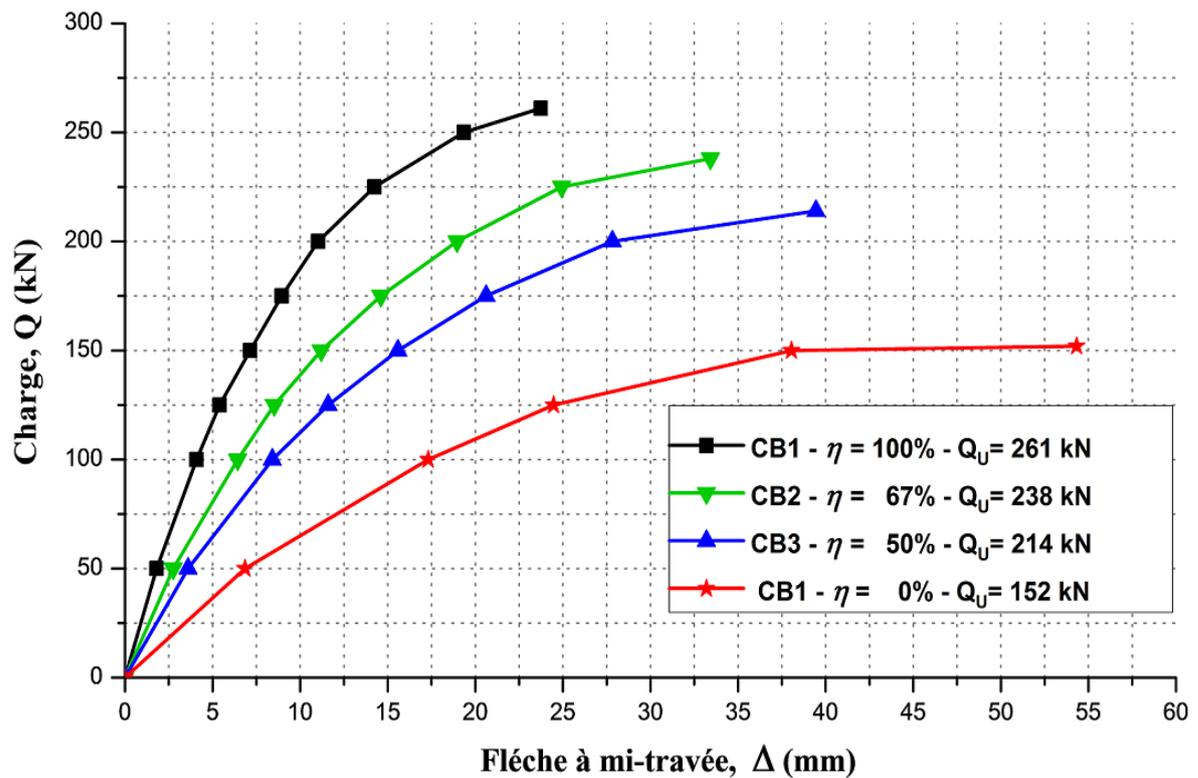


Figure 3.12- Courbes (charge-flèche)

On constate que la réduction du degré de connexion entraîne une diminution de la capacité de chargement et une augmentation des flèches. La poutre mixte CB1 à connexion complète est plus résistante mais présente, en revanche, une capacité de déformation réduite vis-à-vis de celles des autres poutres. Les courbes des poutres mixtes CB2 et CB3 à connexion partielle restent proches l'une de l'autre. Contrairement aux poutres mixtes précédentes, la poutre CB4

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

sans connexion présente une faible capacité de chargement et une flèche excessive qui a dépassé la flèche admissible fixée à $L/300$ à l'état limite de service.

B : Glissement à l'interface (acier-béton)

La figure 3-13 montre la distribution du glissement à l'interface acier-béton le long de la poutre mixte pour les différents degrés de connexion au voisinage des charges de rupture. Cette figure indique que les valeurs de glissement sont maximales près de l'appui et faibles à mi-travée.

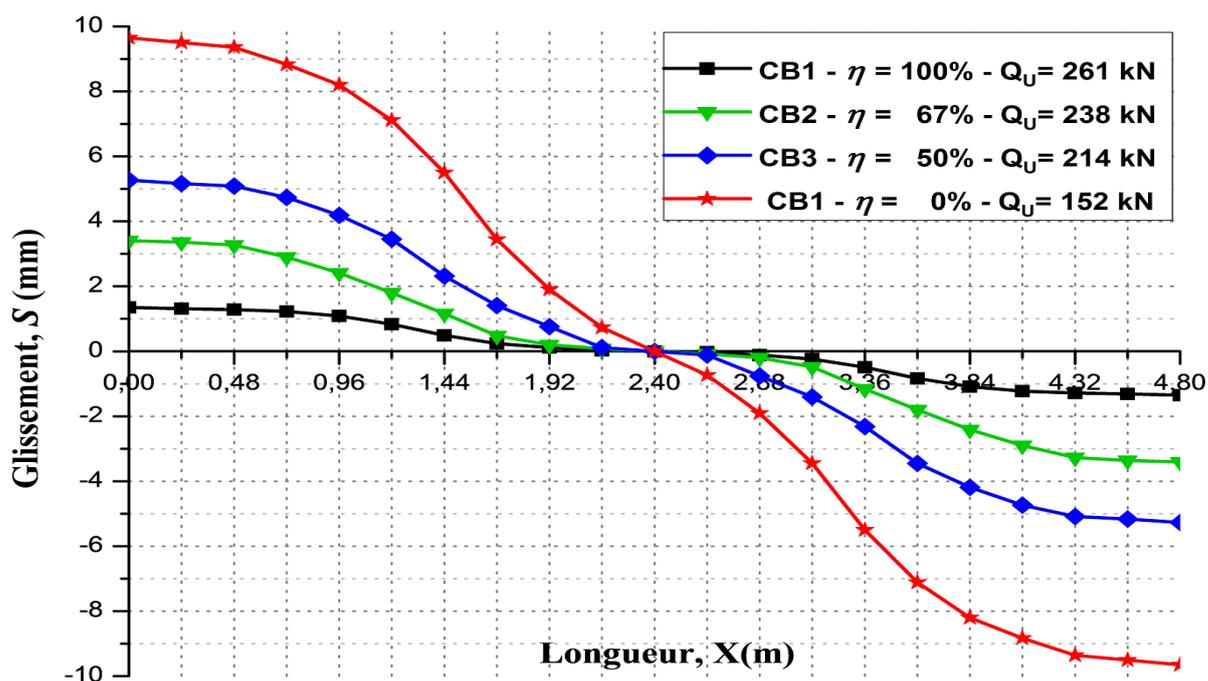


Figure 3.13- Distribution du glissement à l'interface acier-béton

Par comparaison entre les résultats des trois premières poutres mixtes analysées, on a remarqué une augmentation des glissements chaque fois qu'il y a une réduction du degré de connexion, mais, ces glissements n'ont pas pu produire la rupture des connecteurs car les glissements maximaux correspondant aux charges ultimes restent toujours inférieurs à la capacité de glissement des connecteurs. Le glissement le plus élevé est obtenu à l'extrémité de la poutre mixte CB3 avec un degré de connexion de 50%, $S_{\max} = 5,271$ mm, cette valeur est inférieure à la capacité de glissement du connecteur « goujon à tête » déterminée par des essais de push-out. Tandis que pour la poutre mixte CB4 sans connexion, le glissement est relativement important.

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

C : Distribution des contraintes dans la section transversale

A l'échelle globale, la figure 3-14 montre la forme déformée avec la distribution des contraintes normales de flexion dans chacune des poutres mixtes analysées.

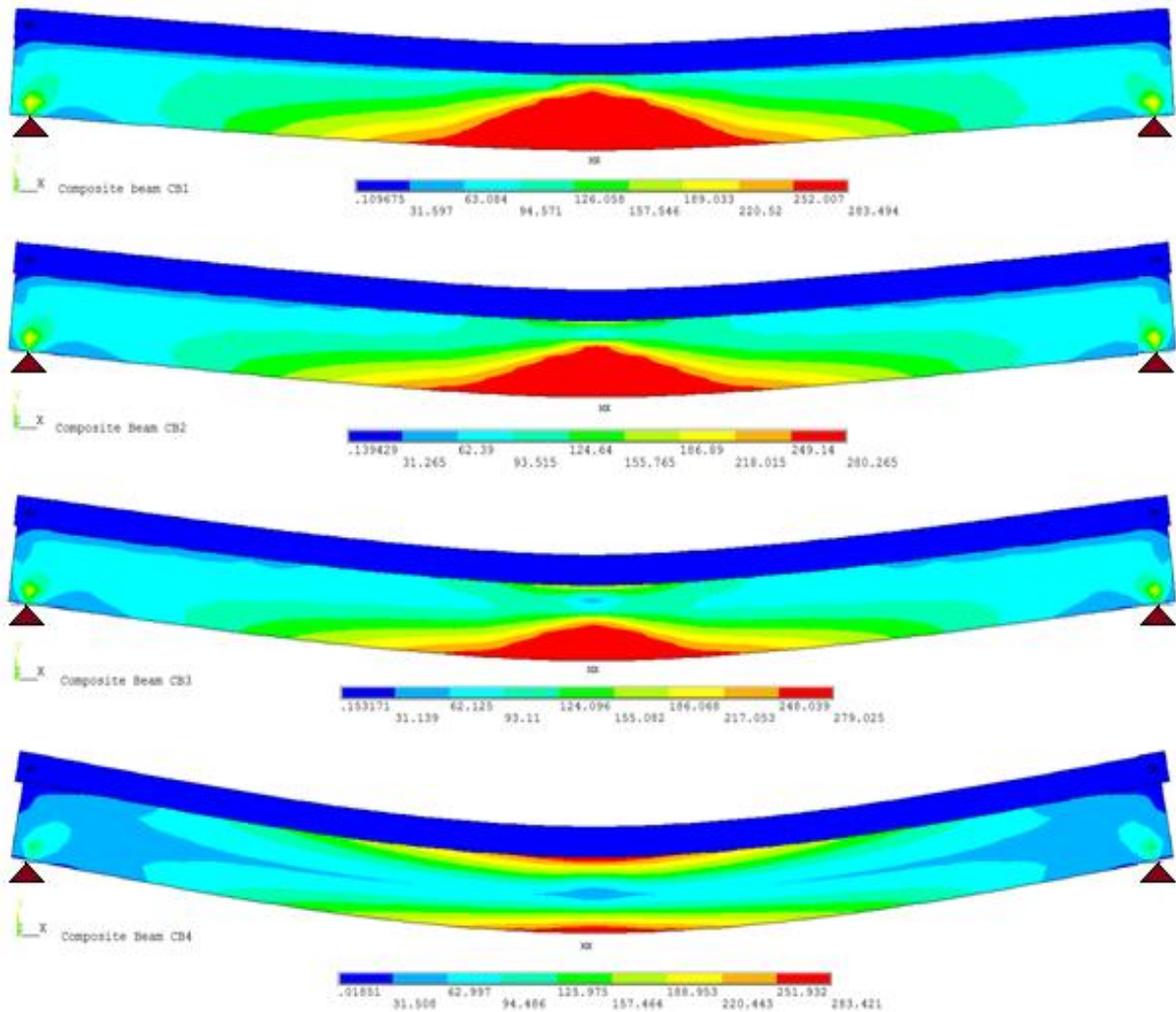


Figure 3.14- Déformée et Distribution des contraintes normales

D'après cette figure, une concentration des contraintes maximales est apparue à mi-travée des poutres mixtes. Ceci confirme l'observation expérimentale que la rupture des poutres mixtes simplement appuyées se produit par un écrasement du béton comprimée de la dalle et plastification de la partie inférieure de la poutre métallique à mi-travée.

Pour les poutres mixtes CB1, CB2 et CB3, la distribution des contraintes normales dans la section critique démontrent que 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

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

connecteurs. Tandis que, pour la poutre mixte CB4 (sans connexion), on a remarqué une distribution triangulaire des contraintes normales affirmant un comportement élastique de la poutre métallique avec une fissuration du béton de la dalle pour une faible capacité de chargement.

3.7- Conclusion

Le modèle numérique nous a permis d'obtenir la capacité de chargement (charge ultime), l'évolution de la flèche à mi-travée, le glissement à l'interface acier-béton et la répartition des contraintes suivant la hauteur de la section transversale de la poutre mixte en fonction du chargement. Le tableau suivant récapitule les principaux résultats obtenus.

Tableau 3.3- Résultats d'analyse par éléments finis

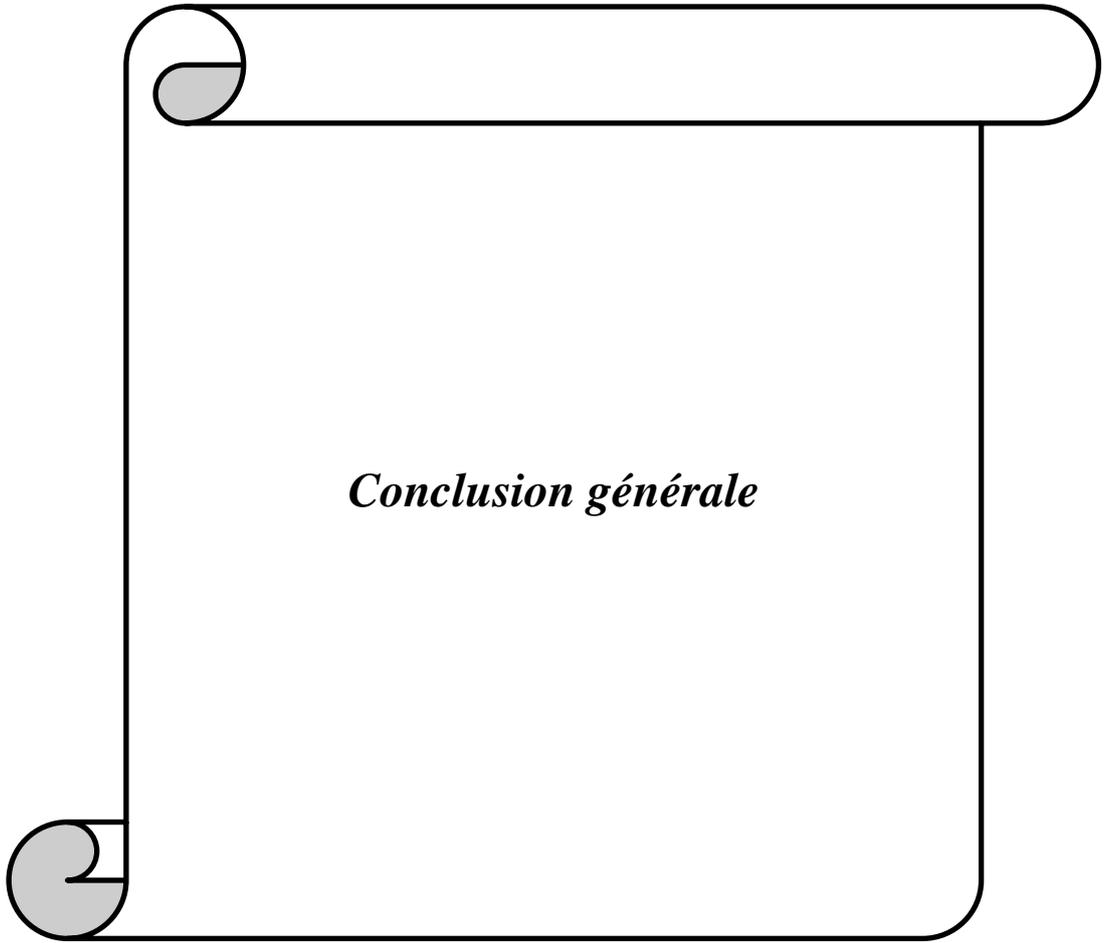
Modèle CBi	Degré de connexion H	Charge ultime Q_u (kN)	Flèche à mi-travée Δ (mm)	Glissement maximal S_{max} (mm)	Contrainte maximale σ_x (N/mm ²)
CB1	100%	261	8.952	1.352	397.521
CB2	67%	238	12.483	3.408	361.507
CB3	50%	214	14.706	5.271	335.281
CB4	0	152	17.635	9.653	285.402

- ❖ La réduction du degré de connexion entraîne une diminution de la capacité de chargement et une augmentation des flèches des poutres mixtes.
- ❖ La réduction du degré de connexion mène à une augmentation des glissements, mais ces glissements n'ont pas pu produire la rupture des connecteurs car les glissements maximaux correspondant aux charges ultimes restent toujours inférieurs à la capacité de glissement des connecteurs en goujon à tête.
- ❖ 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

Chapitre3:

Modélisation par éléments finis des poutres mixtes avec une connexion partielle

mixtes (sans connexion), on a remarqué une distribution triangulaire des contraintes normales affirmant un comportement élastique de la poutre métallique avec une fissuration du béton de la dalle pour une faible capacité de chargement.



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce Travail de fin d'étude avait pour objectif la modélisation par éléments finis des poutres mixtes simplement appuyées avec une connexion partielle pour mettre en évidence l'effet du nombre et l'espacement des connecteurs sur leur comportement en flexion.

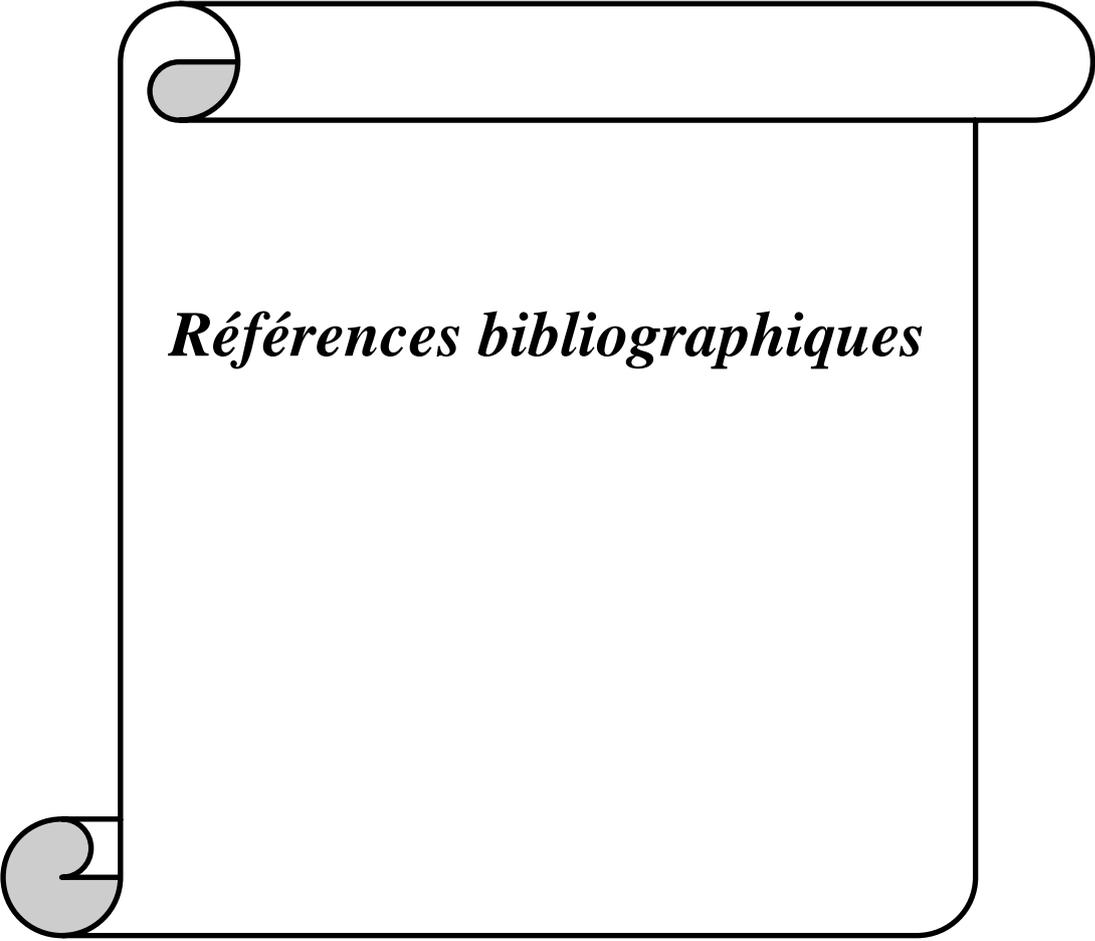
A la lumière de ce qui précède, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ❖ La réduction du degré de connexion entraîne une diminution de la capacité de chargement et une augmentation des flèches des poutres mixtes.
- ❖ La réduction du degré de connexion mène à une augmentation des glissements, mais ces glissements n'ont pas pu produire la rupture des connecteurs car les glissements maximaux correspondant aux charges ultimes restent toujours inférieurs à la capacité de glissement des connecteurs en goujon à tête.
- ❖ 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 (sans connexion), on a remarqué une distribution triangulaire des contraintes normales affirmant un comportement élastique de la poutre métallique avec une fissuration du béton de la dalle pour une faible capacité de chargement.

Perspectives :

Comme Perspectives, nous proposons les thèmes suivants :

- ❖ Analyse des poutres mixtes continues avec une connexion partielle,
- ❖ Réalisation des essais expérimentaux sur les poutres mixtes.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] MAZOZ Aida (2015) - Développement du système de connexion dans les poutres mixtes (acier-béton). Thèse de doctorat, Université de Mostaganem.
- [2] MANFRED A. HIRT ET ROLF BEZ, - Construction métallique. Volume 10 : Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement. Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [2] MANFRED A. HIRT ET ROLF BEZ, -Construction métallique-volume 10 : Notation fondamentales et méthodes de dimensionnement -, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [3] MANFRED A-H. et CRISINEL M., (2001) -Charpentes métalliques, conception et dimensionnement des halles et bâtiments-, volume 11, école polytechnique fédérale de Lausanne, p714.
- [4] Trouillet P. - « Comportement local de connecteurs acier/béton sollicités au cisaillement –Etude bibliographique ». Rapport des laboratoires de ponts et chaussées, Série : Ouvrages d’art OA-3, LRPC de Nancy, 1987.
- [5] Newmark K. -«Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction ». Proceeding, Society for experimental stress analysis, 1951, Vol.9, n°1, pp.75-92.
- [6] Chapman J. C., Balakrishnan S. - “Experiments on composite beams”. The Structural Engineering, n°11, Vol 42, 1964.
- [7] Yam L.C.P. and Chapman J.C. -« The inelastic behaviour of simply supported composite beams of steel and concrete ». Proc.Inst.Civil.Engrs, 1968 (41), pp.651-683.
- [8] Yam L.C.P. and Chapman J.C. -« The inelastic behaviour of continuous composite beams of steel and concrete ». Proc.Inst.Civil.Engrs, 1972 (53), pp.487-501.
- [9] Hallam M. - “The behaviour of stud shear connectors under repeated loading”. The Institut of Engineers Austr. CE 20, n°1, Civil Eng. Transport, pp.28-36, 1978.

Références bibliographiques

- [10] SEDDIK R. “Connexion par arceaux”. Thèse de Docteur- Ingénieur Université Pierre et Marie Curie- Paris VI, 1980.
- [11] ARIBERT J. M., LABIB A. G.- “Modèle de calcul élastoplastique de poutres mixtes à connexion partielle”. Construction Métallique, N° 4, 1982.
- [12] 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.
- [13] ARIBERT J-M., ALEXANDRE J., BARAKA S, 1996- Construction métallique et mixte acier-béton-calcul et dimensionnement selon les Eurocodes 3 et 4, Eyrolles.
- [14] Eurocode 4 - « Conception et dimensionnement des structures mixtes acier-béton. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments ». Comité Européen de Normalisation, CEN, 2006.
- [15] Eurocode 3,-Calcul des structures en acier-, partie 1.1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. ENV 1993-1-1.
- [16] Eurocode 2 - « Calcul des Structures en béton. Partie 1-1 : Règles Générales et Règles pour les bâtiments ». Comité Européen de Normalisation, CEN, 2005.
- [17] TITOU MESSAOUD et MAZOZ AIDA (2016) - Développement du système de connexion (acier-béton) dans les poutres mixtes. Projet CNEPRU 2013-2016, Univ. de M’sila.
- [18] Arizumi Y. and Hamada S. « Elastic-plastic analysis of composite beams with incomplete interaction by finite element method ». Computers & Structures, 1981, Vol.4, N°5, pp.453-462.
- [19] Titoum Messaoud (2017) – Modélisation des structures par éléments finis en utilisant le logiciel ANSYS.