



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Génie de la Construction

Présenté par :

MENAOUI IMANE

OUALI HOURIA

Sujet du mémoire

**CONTRIBUTION DE LA FLECHE ADDITIONNELLE SUR LA
FLECHE TOTALE DES POUTRES CELLULAIRES MIXTES:
ETUDE ANALYTIQUE ET PARAMETRIQUE**

Soutenu publiquement le 06/2017 devant le jury composé de :

Mr, D.I. KLOUCHE	Président
Mr, B. DJEBLI	Rapporteur
Mr, M. MIMOUNI	Examineur
Mr, A.B. BENYAMINA	Examineur
Mr, G. ABADA	Examineur

PROMOTION : 2016-2017

Remerciements

*Avant tout propos, nous remercions **ALLAH** le tout puissant qui nous a donné la sagesse et la santé de faire ce modeste travail.*

*Nous remercions tout particulièrement Monsieur **B.DJEBLI** qui par sa patience, son expertise et ses directives, nous a permis de persévérer dans la bonne voie jusqu'au couronnement final.*

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon travail.

Merci à toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, la source de tendresse, ma raison de vivre, à ma très chère mère **Kheira**.*

*A qui m'encourager et faciliter le chemin de réussite mon cher père **Tahar**.*

A toutes ma famille, mes cousins et cousines.

A mes chères amis et collègues.

Et en fin à tout qui m'aider de réussir ce travail.

MENAOUI IMANE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mon rayon de soleil, ma princesse, mon bijou, ma raison de vivre
à ma très chère maman FATIMA.

A mon bijou précieux mon cher père AHMED.

A toutes ma famille, ma sœur et mes frères.

A mes chers amis et collègues.

En fin à tout qui m'aider de réussir ce travail.

Ouali Houria

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement mécanique des poutres cellulaires mixtes à savoir la contribution de la flèche additionnelle due au cisaillement sur la flèche totale. Pour ce faire, un modèle numérique a été choisi dans cette recherche pour proposer des solutions adéquates.

Des approches analytiques disponibles dans la littérature, visant à caractériser la flèche globale de ces poutres sont proposées en première partie. En deuxième partie une étude numérique est consacrée sur comportement mécanique linéaire des poutres cellulaires mixtes à savoir l'influence de la flèche additionnelle sur la flèche totale.

Le modèle utilisé dans la simulation numérique est intégré dans un modèle tridimensionnel développé en utilisant le code de calcul Cast3m. Des éléments coque sont utilisés pour modéliser la poutre métallique et la dalle en béton armé, les connecteurs (goujons) sont représentés par des éléments poutre.

Cette étude a permis d'une part de valider le modèle numérique dans le domaine linéaire d'autre part de mettre en évidence l'influence de la flèche additionnelle sur la flèche totale des poutres cellulaires mixtes.

Mots clés : poutres cellulaires mixtes, flèche additionnelle, modèle numérique, simulation numérique, modèle tridimensionnel, domaine linéaire.

الملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة السلوك الميكانيكي للروافد المختلطة ذات الفتحات الدائرية وكذا الانحناء الإضافي الذي يسببه القطع بالنسبة للانحناء الكلي. في هذا البحث تم اختيار برنامج رقمي من اجل فرض حلول معقولة.

مقالات علمية قد نشرت في هذا المجال. تظهر الانحناء الكلي لهذه الروافد وهذا ما تطرقنا له في المرحلة الأولى. أما في المرحلة الثانية تطرقنا إلى دراسة رقمية تركز على السلوك الميكانيكي الخطي لهذه الروافد من حيث تأثير الانحناء الإضافي على الانحناء الكلي.

لقد تم دمج المحاكاة الرقمية لهذا النموذج مع نموذج متطور ثلاثي الأبعاد وهذا باستعمال برنامج الحساب Cast3m. لنمذجة الروافد المعدنية وبلاط الخرسانة المسلحة من خلال هذه الدراسة استطعنا إثبات

النموذج الرقمي في المجال الخطي ومن جهة أخرى توضيح تأثير الانحناء الإضافي على الانحناء الكلي للروافد المختلطة ذات الفتحات الدائرية

الكلمات الدالة: الروافد المختلطة ذات الفتحات الدائرية، الانحناء الإضافي، النموذج الرقمي، المحاكاة الرقمية، نموذج ثلاثي الأبعاد، المجال الخطي.

Abstract

The main aim of this work is to study the mechanical behavior of mixed cellular beams, the contribution of the additional deflection due to shear with respect to the total deflection. To do this, numerical model has been chosen in this research to propose appropriate solutions.

Analytical approaches available in the literature to characterize the global deflection of these beams are proposed in the first part. In the second part a numerical study is devoted to the linear mechanical behavior of the mixed cellular beams, the influence of the additional deflection on the total deflection.

The model used in numerical simulation is integrated in a three-dimensional model developed using the Cast3m computation code. Shell elements are used to model the metal beam and the reinforced concrete slab; the connectors (studs) are represented by beam elements.

This study allowed validating the numerical model in the linear domain on the other hand to highlight the influence of the additional deflection on the total deflection of the mixed cellular beams.

Key words: mixed cellular beams, additional deflection, numerical model, numerical simulation, three-dimensional model, linear domain.

Table de matières

RESUME	i
ملخص	ii
ABSTRACT	iii
TABLE DE MATIERES	iv
LISTE DES FIGURE ET DES TABLEAUX	vii
NOTATIONS	xi
INTRODUCTION	1
 Chapitre 1 : Revue de la littérature	
1.1. Introduction.....	07
1.2. Bilan des premières études menées sur les poutres alvéolaires.....	07
1.3. Travaux de recherches sur les poutres mixtes avec ouvertures d'âmes.....	11
1.4. Conclusion.....	22
 Chapitre 2 : Etude analytique sur la contribution de la flèche additionnelle	
2.1. Introduction.....	24
2.2. Méthode existantes pour le calcul de la flèche.....	26
2.3. Comparaison des résultats obtenus par les méthodes théoriques.....	28
2.4. Contribution de la flèche additionnelle à la flèche totale.....	31
2.5. Conclusions.....	33
 Chapitre 3 : Présentation De Logiciel (CAST3M)	
3.1. Introduction.....	35
3.2. Présentation du logiciel.....	35
3.2.1. Introduction.....	35
3.2.2. Environnement et langage.....	36
3.2.3. Organisation d'un calcul.....	36
3.2.3.1. Préparation du modèle de calcul.....	36
3.2.3.2. Résolution du système d'équations.....	37
3.2.3.3. Traitement des résultats.....	37
3.2.4. Possibilité offertes par Cast3m.....	40
3.3. Modélisation.....	41
3.3.1. Introduction.....	41
3.3.2. Comportement mécanique élastique.....	41
3.3.2.1. Calcul mécanique linéaire d'une poutre.....	41
3.3.2.1.1. Etapes de calcul.....	42
3.3.2.1.1.1. Hypothèse de modélisation.....	42
3.3.2.1.1.2. Modélisation.....	42
3.3.2.1.1.3. Conditions limites.....	42
3.3.2.1.1.4. Chargement.....	43
3.3.2.1.2. Caractéristiques du matériau.....	43
3.3.2.1.3. Résultats.....	43
3.3.2.1.3.1. Exemple de champ de contrainte.....	43
3.3.2.1.3.2. Exemple de déformée.....	44
3.4. Conclusion.....	44
 Chapitre 4 : Modélisation mécanique linéaire et choix d'élément fini	
4.1. Introduction.....	46
4.2. Étude du comportement linéaire.....	46
4.2.1. Comportement linéaire de la poutre métallique.....	46
4.2.2. Comportement linéaire de la dalle.....	49

4.2.3. Loi de comportement	50
4.3. Choix du type d'éléments.....	50
4.4. Comparaison des résultats	51
4.4.1. Poutre métallique.....	51
4.4.2. Dalle en béton.....	54
4.4.3. Connexion en goujon	60
4.5. Modélisation de base	60
4.5.1. Conditions aux limites et chargement	61
4.5.2. Application du modèle numérique à la poutre mixte	62
4.6. Conclusion.....	65
Chapitre 5: étude comparative et paramétrique	
5.1. Introduction	67
5.2. Calibrage des résultats analytiques avec le modèle numérique	67
5.3. Influence du nombre d'ouvertures sur la contribution de la flèche additionnelle.....	70
5.4. Influence du type de profilé sur la contribution de la flèche additionnelle.....	72
5.5. Influence de l'espacement entre ouvertures	74
5.6. Influence de l'épaisseur de la dalle sur la contribution de la flèche additionnelle.....	75
5.7. Conclusion.....	77
CONCLUSION GENERAL.....	78
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	81

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Introduction

Figure I.1. Ouvertures rectangulaires isolées dans une poutre mixte	02
Figure I.2. Poutre cellulaire munie d'ouvertures circulaires régulière	03
Figure I.3. Géométrie d'une poutre cellulaire	03

Chapitre 1 : Revue de la littérature

Figure 1.1. Mécanisme de ruine par flexion Vierendeel	09
Figure 1.2. Courbe d'interaction	10

Chapitre 2 : Etude analytique sur la contribution de la flèche additionnelle

Figure 2.1. Caractéristiques élastiques d'une poutre mixte ajourée	25
Figure 2.2. Déformation due au cisaillement vertical à l'ouverture	25
Figure 2.3. Rapports de flèche (f_i/f_4) en fonction de (L/ H)	29
Figure 2.4. Contribution de la flèche additionnelle à la flèche totale.....	32

Chapitre 3 : Présentation de logiciel (CAST3M)

Figure 3.1. Organigramme du modèle de calcul	36
Figure 3.2. Noyau de calcul, pré et post traitements du noyau de calcul	40
Figure 3.3. Maillage de la poutre	42
Figure 3.4. Chargement de la poutre	43
Figure 3.5. Champ de contrainte	43
Figure 3.6. Déformation de la poutre	44

Chapitre 4 : Modélisation mécanique linéaire et choix d'élément fini.

Figure 4.1. Poutre chargée par deux moments d'extrémité	47
Figure 4.2. Diagramme de contrainte	47
Figure 4.3. Diagramme des moments fléchissant et des efforts tranchants	48
Figure 4.4. Hypothèses cinématiques de Kirchhoff-Love.....	49
Figure 4.5. Évolution contrainte – déformation	50
Figure 4.6. Déformation verticale de la poutre métallique « COQ4 »	52
Figure 4.7. Déformation verticale de la poutre métallique « CUB8 »	52
Figure 4.8. Flèches de la poutre métallique.....	53
Figure 4.9. Géométrie de la dalle	54
Figure 4.10. Partie du modèle de la dalle en éléments finis « Armatures en Éléments Barres» ..	55
Figure 4.11. Partie du modèle de la dalle en éléments finis « Armatures en couches d'acier Equivalentes »	55
Figure 4.12. Comparaison de la réponse charges-flèche.....	56
Figure 4.13. Champ de déplacements verticaux.....	57
Figure 4.14. Champ de déplacements verticaux.....	58
Figure 4.15. Flèches de la dalle « Charge uniformément répartie	59
Figure 4.16. Champ de déplacements verticaux.....	59
Figure 4.17. Flèches de la dalle Charge concentrée à mi- portée.....	60
Figure 4.18. Maillage et schéma de la section du modèle numérique utilisé.....	61
Figure 4.19. Application du chargement mécanique sur une poutre mixte.....	62
Figure 4.20. Configuration de la poutre P1	62
Figure 4.21. Configuration de la poutre P2	63
Figure 4.22. Courbe charge – flèche à mi- portée de P1	64

Figure 4.23. Courbe charge – flèche à mi- portée de P2 64

Chapitre 5 : Etude paramétrique.

Figure 5.1. Rapports de la flèche (f_{MEF}/f) en fonction (L / H) 69

Figure 5.2. Contribution de f_{add} en fonction du nombre d'ouvertures (1CC)..... 71

Figure 5.3. Contribution de f_{add} en fonction du nombre d'ouvertures (2CC)..... 71

Figure 5.4. Contribution de f_{add} en fonction du nombre d'ouvertures (CUR)..... 72

Figure 5.5. Contribution de f_{add} pour différentes épaisseurs de la dalle (1CC)..... 76

Figure 5.6. Contribution de f_{add} pour différentes épaisseurs de la dalle (2CC)..... 76

Figure 5.7. Contribution de f_{add} pour différentes épaisseurs de la dalle (CUR)..... 77

Liste de tableaux

Chapitre 2 : Etude analytique sur la contribution de la flèche additionnelle.

Tableau 2.1. Caractéristiques géométriques des poutres.....	30
Tableau 2.2. Poutre avec 9 ouvertures	30
Tableau 2.3. Poutre avec 14 ouvertures	30

Chapitre 4 : Modélisation mécanique linéaire et choix d'élément fini.

Tableau 4.1. Valeurs de la flèche de la poutre en acier.....	51
Tableau 4.2. Caractéristiques mécaniques du béton et de l'acier	55
Tableau 4.3. Valeurs de la flèche de la dalle.....	60
Tableau 4.4. Caractéristiques mécaniques de la dalle, profilé et goujons.....	63

Chapitre 5 : Etude paramétrique.

Tableau 5.1. Valeurs de la flèche des poutres cellulaires soumises à une charge uniformément répartie.....	69
Tableau 5.2. Valeurs de la flèche des poutres cellulaires soumises à une charge concentrée à mi- portée	70
Tableau 5.3. Valeurs de la flèche des poutres cellulaires soumises à deux charges concentrées symétrique	70
Tableau 5.4. Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (IPE) « 1CC ».....	73
Tableau 5.5. Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (IPE) « 2CC ».....	73
Tableau 5.6. Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (IPE) « CUR ».....	73
Tableau 5.7. Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (w) « 1CC ».....	74
Tableau 5.8. Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (w) « 2CC ».....	75
Tableau 5.9. Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (w) « CUR ».....	75

Notations

A_r : Aire de cisaillement de la section mixte sans évidement

$D_{\text{éq}}$: Raideur de flexion équivalente

E_a : Module d'élasticité de l'acier

E_b : Module d'élasticité du béton

GA_r : Rigidité de cisaillement de la section en acier sans évidement

H : Hauteur de la poutre métallique cellulaire

I : Moment d'inertie d'une poutre métallique

I_b : Moment d'inertie de la section en béton

I_{Th} : Moment d'inertie du Té supérieur de la section mixte homogénéisée par rapport à l'acier, passant par son centre de gravité

L : Portée de la poutre

L_{eff} (L_d) : Largeur de la dalle efficace (participante)

$M_{o,Rd}$: Moment de résistance d'une poutre au milieu de l'ouverture

M_{el} : Moment élastique

M_{max} : Moment de flexion maximum

M_{Sd} : Moment fléchissant de calcul au centre de l'ouverture

P : Charge verticale appliquée

Q : Effort rasant dans le goujon (résistance du goujon pour un glissement γ_c)

R : Rayon de l'ouverture

V : Effort tranchant global au droit de l'ouverture

$V_{o,Rd}$: Résistance au cisaillement

V_{ht} : Effort tranchant repris par le Té supérieur de la section mixte homogénéisée

V_{Sd} : Effort tranchant de calcul au centre de l'ouverture.

a : Distance entre le support d'appui et le point d'application de la charge la plus proche

a_x : Taux de ferrailage

b_f : Largeur de la semelle

d_o : Diamètre de l'ouverture

e : Entraxe d'ouvertures adjacentes

epd : Epaisseur de la dalle

e_s : Distance des nappes à la surface moyenne

f_{vie} : Flèche due à l'effet de Vierendeel au niveau de l'ouverture

f_y : Limite d'élasticité (les indices f et w font référence à la semelle et l'âme respectivement)

h : Hauteur d'une poutre métallique à âme pleine

h_c : Hauteur d'un goujon

j : Nombre d'ouvertures du support à mi- portée de la poutre

k : Facteur approprié selon les conditions d'appui et le type de chargement

l_o : Longueur d'une ouverture rectangulaire

n : Nombre total des ouvertures le long de la poutre

q : Charge uniformément répartie

t_f : Epaisseur de la semelle

t_w : Epaisseur d'âme

w : Largeur du montant d'âme

Δ_s : Flèche additionnelle due à l'ouverture dans chaque T \acute{e}

σ : contrainte normale

γ : Angle de glissement

δ_{add} : Flèche additionnelle totale à mi- portée de la poutre mixte avec ouvertures d'âme

δ_b : Flèche à mi- portée de la poutre mixte non perforée (acier) due à la flexion pure

ε : Déformation

v : Flèche à mi- portée d'une poutre métallique

Introduction générale

Introduction générale :

La spécificité d'une poutre mixte est due à l'association mécanique de deux matériaux de natures et de propriétés différentes, l'acier et le béton, par l'intermédiaire d'une connexion située à l'interface des matériaux et qui permet d'accroître à la fois la résistance à la flexion et encore plus la rigidité. Afin de pouvoir bénéficier d'une flexibilité d'utilisation de la surface de plancher, les concepteurs d'immeubles de bureaux ont recours à des systèmes mixtes incluant des poutres de grande portée présentant nécessairement une grande hauteur, les équipements techniques étant incorporés dans la zone structurale du plancher.

L'espace disponible pour les équipements techniques notamment les conduits de ventilation peut alors se trouver restreint, ce qui génère une augmentation de la hauteur d'étage, et donc du coût de construction. L'usage de poutres en acier présentant des ouvertures d'âme rectangulaires, hexagonales, circulaires, oblongues, sinusoïdales permet de pallier ce problème d'espace [1, 2] : le passage des canalisations à l'intérieur des ouvertures réduit considérablement l'épaisseur des planchers, d'où l'intérêt croissant de la part des concepteurs pour ce type de poutre, en plus de leur aspect esthétique.

Ces poutres en acier sont réalisées soit par découpage d'ouvertures dans l'âme de la poutre (Ouvertures isolées), notamment pour les ouvertures rectangulaires (voir Figure I.1.), soit en découpant et en ressoudant deux poutres en acier laminé à chaud à âme pleine (voir Figure I.2.). Ceci permet d'obtenir une poutre jusqu'à 2 fois plus légère qu'une poutre à âme pleine de même portée sous le même chargement. Elle peut être connectée au ne dalle en béton pour constituer une poutre mixte.



Figure I.1. Ouvertures rectangulaires isolées dans une poutre mixte [2]



Figure I.2. Poutre cellulaire munie d'ouvertures circulaires régulières [2]

Habituellement, la partie comprimée en béton d'une poutre mixte étant très résistante, la semelle supérieure en acier n'est dimensionnée que pour la phase de construction, puisque sa contribution à la résistance globale est faible. Le rôle négligeable de la membrure supérieure permet donc d'optimiser le rendement d'une section mixte en utilisant deux profils différents dans la poutre ajourée en acier (Figure I.3). L'inertie de la section dissymétrique ainsi formée peut être nettement supérieure à celle des profils de base [3].

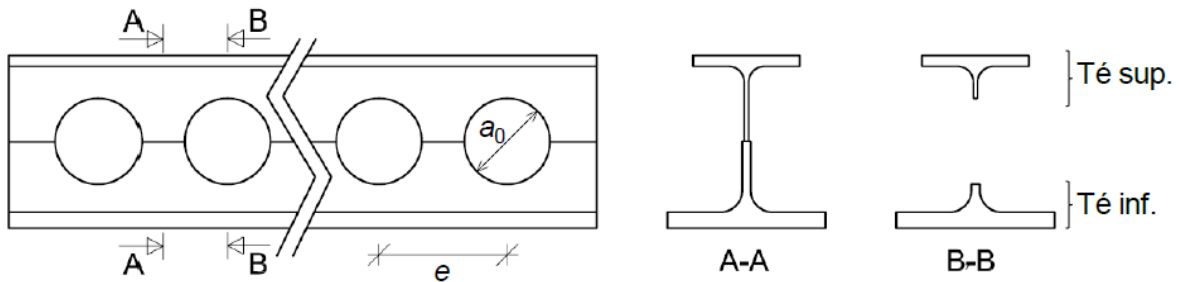


Figure I.3. Géométrie d'une poutre cellulaire

Cependant, malgré la complexité du comportement mécanique de ces poutres, peu de travaux leur ont été consacrés, sur tout que la technologie de fabrication fait évoluer les formes de façon continue.

L'application de la théorie des poutres Vierendeel à la partie ajourée de la poutre est une méthode très souvent utilisée, bien que l'origine de cette application reste inconnue. La démarche habituelle pour évaluer le comportement mécanique des poutres à ouverture(s) d'âme, se base sur une combinaison des approches numériques et expérimentales [1, 4].

En général, les essais permettent de calibrer les modèles numériques et réduire ainsi les coûts relatifs à des études purement expérimentales.

A ce jour, un tel type de configuration (poutres cellulaires mixtes) sort du domaine codifié, n'étant visé par aucune norme européenne. L'amendement A2 de l'eurocode3 [5], publié par l'Afnor, comporte une annexe N informative qui traite uniquement des poutres en acier avec ouvertures dans les âmes. En revanche, il n'est pas prévu, dans l'immédiat, que l'eurocode4 [6] comporte une annexe de contenu similaire consacrée aux poutres cellulaires mixtes. Ainsi aucune indication sur le calcul de la flèche ni sur la contribution de la flèche additionnelle d'une poutre cellulaire mixte n'est donnée par cette norme [6].

La principale motivation du travail présenté dans ce mémoire est de montrer le rôle que peut jouer la contribution de la flèche additionnelle sur les flèches totales développées, existantes dans la littérature.

Dans ce contexte, un modèle numérique a été développé en utilisant le code de calcul CAST3M [7] qui est un outil général avec de larges possibilités de calcul linéaire, dont le but de représenter d'une façon relativement fidèle le comportement linéaire à savoir l'étude de la contribution de la flèche additionnelle sur les flèches totales des poutres cellulaires mixtes à travées simples. Les validations et applications du modèle MEF présentées dans ce document permettent de montrer l'intérêt de l'analyse linéaire de ce type de poutres.

Le document est organisé en 5 chapitres :

- le **chapitre 1** est une présentation générale sur les principales études de recherches consacrées aux problèmes des poutres ajourées connectées à des dalles en béton pour constituer des poutres ajourées mixtes.
- le **chapitre 2** est consacré au ne étude analytique sur la contribution de la flèche additionnelle due à l'effet du cisaillement sur la flèche totale des poutres mixtes cellulaires.
- le **chapitre 3** est une présentation générale du logiciel, à la base duquel un modèle numérique a été développé pour mener notre étude paramétrique.
- le **chapitre 4** est consacré au développement d'un modèle MEF tri dimensionnel pour l'analyse linéaire, à savoir l'étude de la contribution de la flèche additionnelle sur la flèche totale des poutres cellulaires mixtes.
- le **chapitre 5** est dédié à l'étude paramétrique à savoir l'effet du nombre d'ouvertures, du type de profilé, de l'espacement entre les ouvertures et de l'épaisseur de la dalle sur la

contribution de la flèche additionnelle sur la flèche totale des poutres cellulaires mixtes.

En fin, on achève ce travail de recherche par une conclusion générale portant sur les différents aspects traités dans ce mémoire de master.

Chapitre 1

Revue de la littérature

1.1. Introduction :

Les planchers dans les bâtiments à ossature métallique sont en général constitués à partir d'une poutre en acier connectée à une dalle en béton ou une dalle mixte à bac collaborant. Le fonctionnement mixte permet en effet d'optimiser l'exploitation structurelle des matériaux béton et acier. Dans de nombreuses applications, notamment pour les bâtiments de bureaux à plateaux libres de grandes portées, les concepteurs recherchent pour ces planchers l'épaisseur total la plus faible possible et donc prévoient dans les âmes des poutres des ouvertures destinées à permettre le passage des multiples réseaux nécessaires à l'équipement du bâtiment.

Dans ce contexte, en premier lieu, une présentation chronologique des études menées sur les poutres munies de larges ouvertures est donnée dans le paragraphe suivant et présente les premières observations de ruines spécifiques à ce genre de poutres communément appelées poutres alvéolaires (ouvertures hexagonales) ou poutres cellulaires (ouvertures circulaires) ; en suite en deuxième lieu, un bilan sur quelques travaux de recherches disponibles est présenté et donne des informations sur le comportement et le calcul pour mieux dimensionner ce type de poutres dites « poutres mixtes alvéolaires ».

1.2. Bilan des premières études menées sur les poutres alvéolaires:

D. Kerdal et D.A. Nethercot [8] puis S. Demirdjian [9] et K.D. Tsavdaridis [10] présentèrent les premiers travaux de divers chercheurs datant de l'après-guerre. Les recherches décrites par Kerdal et Nethercot [8] ont permis d'identifier 6 principaux modes de ruine des poutres alvéolaires. Ils sont principalement liés à la géométrie de la poutre globale, à l'élanement de l'âme, aux dimensions de l'ouverture, au type de chargement, aux conditions aux limites (maintiens anti-déversement) et à la position des ouvertures (dans le cas d'ouvertures isolées). Les modes de ruine sont de nature commune avec les poutres à âmes pleines (ruines globales) ou de nature spécifique aux poutres à ouvertures d'âmes (ruines locales). Ces modes peuvent être synthétisés ci-après en tant que locaux (mettant en jeu des sections locales autour de l'ouverture) ou globaux (mettant en jeu la section globale de la poutre) :

- Modes de ruine locaux : ces modes mettent en jeu les sections locales autour de l'ouverture.

Trois modes distincts ont pu être observés :

- Flexion Vierendeel, correspondant à la flexion locale des sections en té aux coins de l'ouverture due au transfert de cisaillement autour de l'ouverture.
 - Flambement du montant intermédiaire (poutres alvéolaires) par cisaillement horizontal ou par compression directe liée à un chargement ponctuel.
 - Rupture de la soudure du montant intermédiaire (poutre alvéolaire formée à partir d'un profilé laminé à chaud). Cette rupture de soudure est associée au cisaillement horizontal du montant. Les essais de M.U.Husain et W.G.Speirs [11] ont permis de mettre en évidence ce mode de ruine.
- Modes de ruine globaux :
- Flexion globale, dans le cas où l'ouverture critique se situe en zone de flexion pure.
Dans ce cas, les membrures inférieure et supérieure de l'ouverture se plastifient par traction ou compression.
 - Cisaillement global, ce mode peut survenir dans le cas où l'ouverture se situe en zone de fort cisaillement et de faible longueur. Des ruines par cisaillement direct des sections des membrures supérieures et inférieures au droit de l'ouverture critique ont été observées.
 - Déversement global qui, sans maintien adéquat, constitue souvent le mode de ruine principal de ces poutres car la présence des ouvertures dans l'âme des poutres diminue de manière importante leur rigidité torsionnelle [8].

Les premières études expérimentales citées par Kerdal et Nethercot [8] puis Demirdjian [9] et Tsavdaridis [10] peuvent être attribuées aux chercheurs M.D. Altifillisch, B.R. Cooke et A.A. Toprac [12]. Les études expérimentales ont été menées sur des poutres alvéolaires (ouvertures de forme hexagonale régulièrement réparties sur la longueur de la poutre). Ces essais se composaient de 3 poutres bi-appuyées en flexion 4 points. Deux modes de ruine ont pu être observés, une ruine par flexion globale avec plastification des membrures supérieure et inférieure par effort axial ainsi qu'une ruine par flexion locale des coins de l'ouverture liée au cisaillement global de l'ouverture (voir Figure 1.1). Ces essais furent les premiers à identifier une flexion locale des membrures de l'ouverture la plus sollicitée, phénomène communément appelé flexion Vierendeel. Cette flexion locale des membrures supérieure et inférieure de l'ouverture critique est illustrée sur la Figure 1.1 avec la formation de 4 rotules plastiques aux 4 coins de l'ouverture hexagonale.

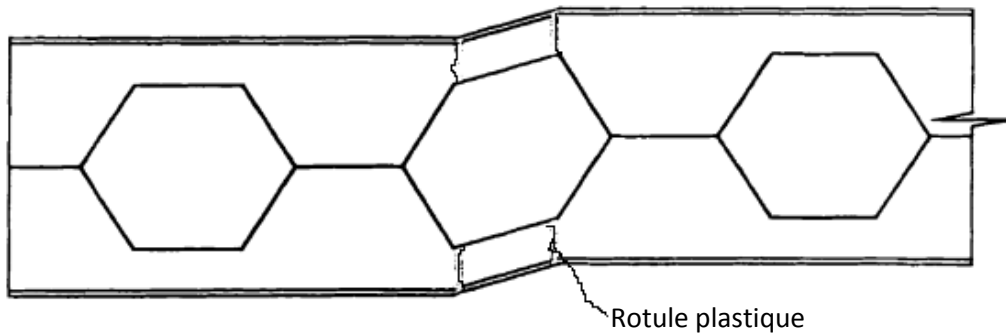


Figure 1.1. Mécanisme de ruine par flexion Vierendeel [9]

L'observation de la ruine a montré une plastification d'un coin de l'ouverture en premier ; ensuite arrive la ruine finale avec l'observation d'un voilement par compression du coin opposé. Ces premières observations mettent ainsi en évidence deux points importants. Tout d'abord, l'existence d'une flexion locale des membrures liée au transfert de cisaillement autour d'une ouverture (la flexion ou effet Vierendeel) et la caractérisation d'une résistance supplémentaire liée au schéma cinématique de ruine par formation successive de rotules plastiques.

A.A. Toprac, et B.R. Cooke [13] ont effectué des études sur 9 poutres alvéolaires jusqu'à la ruine. L'objectif principal était d'étudier le comportement à la ruine de ces poutres. Certains essais se sont terminés par déversement global et n'ont pas pu être exploités du fait que ce mode ne faisait pas partie des phénomènes étudiés. De la même façon que précédemment, il a pu être observé une ruine par plastification dans un coin de l'ouverture critique située en zone de fort cisaillement. Dans le cas des poutres pour lesquelles les ouvertures critiques étaient situées en zone de flexion pure, la ruine était caractérisée par la plastification en compression et traction des membrures supérieure et inférieure de l'ouverture.

D'autres études expérimentales ont été menées par A.N. Sherbourne [14] visant à étudier l'interaction entre la flexion et le cisaillement en observant le mode de ruine ainsi que l'influence des conditions de chargement. Ces études sont les prémices des recherches effectuées notamment par R.G. Redwood [15] et plus tard par K.F. Chung et al. [16][17] qui cherchent à caractériser la résistance des ouvertures en fonction des rapports entre le moment sollicitant et le moment résistant, et entre l'effort tranchant sollicitant et l'effort tranchant résistant de l'ouverture considérée. La Figure 1.2 donne l'allure de la courbe tirée de l'équation d'interaction simplifiée fournie par la référence [16] (Equation 1.1). La figure présente la courbe d'interaction des rapports $M_{Sd} / M_{o,Rd}$ et $V_{Sd} / V_{o,Rd}$ (avec M_{Sd} , V_{Sd} les efforts de

flexion et de cisaillement globaux au niveau de l'ouverture et $M_{o,Rd}$ et $V_{o,Rd}$ les résistances de la section perforée à la flexion et l'effort tranchant). Les études numériques ont montré que la résistance réelle de l'ouverture est souvent sous-estimée (de l'ordre de 10 à 15 % dans les gammes d'ouvertures testées par les auteurs [16]).

$$\left(\frac{V_{Sd}}{V_{o,Rd}}\right)^{2.5} + \left(\frac{M_{Sd}}{M_{o,Rd}}\right)^{2.5} \leq 1 \quad 1.1$$

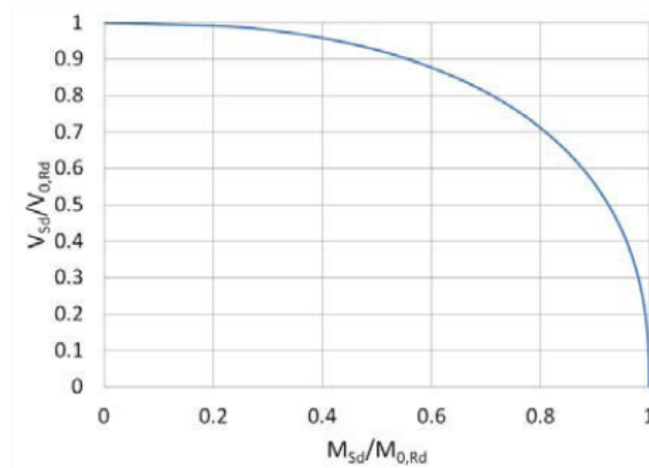


Figure 1.2. Courbe l'interaction entre la flexion et le cisaillement

En 1967 P. Halleux [18] proposa des résultats expérimentaux sur 5 poutres alvéolaires. A. Bazile et J. Texieren [19] en 1968 et M.U.Husain et W.G.Speirs [11] en 1971, ont fait plusieurs essais mettant en évidence le flambement du montant intermédiaire entre deux ouvertures proches des appuis (où le cisaillement est élevé). Les auteurs relient ce mode de ruine au fait que les ouvertures de ces poutres alvéolaires avaient un faible espacement qui impliquait des montants intermédiaires élancés [9]. Ces diverses études expérimentales ont permis de formuler les premières conclusions théoriques sur le comportement à l'état ultime des poutres munies d'ouvertures isolées ou régulièrement réparties (poutres alvéolaires).

En 2012 S.durif [20] a développé une approche analytique permettant de définir la charge ultime d'une nouvelle forme de poutre cellulaire à ouvertures sinusoïdales. Cette nouvelle forme d'ouverture implique de nouveaux modes de ruine. De ce fait, en vue de développer ce modèle de calcul analytique adapté à cette nouvelle forme d'ouverture, une campagne d'essais expérimentaux a été menée sur des poutres cellulaires à ouvertures sinusoïdales à grande échelle ($\approx 10\text{m}$).

Au travers de ces études expérimentales sur trois configurations de poutre, il a été montré que le principal mode de ruine est lié à la flexion Vierendeel. En effet, la flexion locale des membrures de l'ouverture la plus sollicitée engendre soit la formation de 4 rotules plastiques aux 4 coins de l'ouverture, soit l'instabilité locale des parois d'âme comprimées.

En parallèle, une étude numérique par éléments finis tenant compte des non linéarités géométriques et matérielles a été menée. Elle a permis de développer et de valider le modèle de calcul analytique adapté à cette nouvelle forme d'ouverture.

Les modèles numériques et analytiques développés ont montré de bonnes qualités de prédiction de la résistance des poutres à ouvertures sinusoïdales.

En 2013 F.Erdal [21] a effectué des études sur des poutres cellulaires conçus d'une manière optimale jusqu'à la ruine. L'objectif principal était d'étudier le comportement à la ruine de ces poutres en menant des essais expérimentaux sur douze poutres cellulaires afin de prédire la capacité portante ultime et enfin, il a réalisé une analyse par éléments finis sur le flambement et prédire les charges critiques de toutes les poutres cellulaires testées expérimentalement. Les résultats d'analyse par éléments finis sont ensuite comparés avec les résultats de tests expérimentaux pour chaque poutre cellulaire testée.

1.3. Travaux de recherches sur les poutres mixtes avec ouvertures d'âmes :

En 1980, D.M. Todd et P.B. Cooper [22] ont présenté une analyse sur la détermination de la résistance ultime par les diagrammes d'interaction moment - effort tranchant des poutres mixtes avec des ouvertures rectangulaire non renforcées dans l'âme.

Cette analyse est développée pour tout type de poutre comportant une ouverture d'âme isolée, concentrique ou excentrique en faisant varier les dimensions (la hauteur et la longueur) de l'ouverture.

Dans cette analyse, seul le mécanisme de ruine par la formation des rotules plastiques au droit de l'ouverture est pris en considération, l'écroutissage et la contribution de la dalle au cisaillement sont considérés comme négligés.

Les résultats analytiques indiquent que la résistance de flexion d'une section mixte avec une ouverture d'âme est plus importante que celle d'une section qui n'est pas mixte, et que la variation des dimensions de l'ouverture ainsi que l'excentricité de cette dernière peuvent avoir un effet significatif sur la résistance ultime.

La comparaison des résultats analytiques avec les résultats expérimentaux disponibles montre que l'évaluation de la charge ultime obtenue analytiquement n'est pas conforme à celle obtenue expérimentalement. Cette anomalie est due du fait que l'écroutissement et de la contribution au cisaillement de la dalle ne sont pas pris en compte dans cette analyse.

En 1982, C. M. Donoghue [23] a développé une méthode générale pour l'analyse et le calcul des poutres mixtes acier-béton avec des ouvertures d'âme à mi- portée.

Cette approche est basée sur des calculs de la résistance ultime en tenant compte d'une poutre mixte à connexion partielle avec la présence des renforcements dans l'âme.

En 1982, W.C. Clawson et D. Darwin [24] ont fait une recherche expérimentale sur l'étude des poutres mixtes avec des ouvertures rectangulaires de tailles fixes (avec une hauteur d'ouverture égale à 60% de celle de la section métallique et une longueur d'ouverture égale à deux fois la hauteur de la section métallique) dans l'âme. Les dimensions de la dalle en béton étant constantes.

Les essais ont été effectués sur six poutres mixtes et une seule poutre métallique à sections à larges ailes (W14x34, W18x45 et W18x46) afin d'étudier leur résistance par les diagrammes d'interaction moment - effort tranchant en faisant varier la position des ouvertures allant de 0.9 à 10m.

Les résultats obtenus montrent que :

- Les ouvertures d'âme réduisent la résistance des poutres mixtes.
- Pour des efforts tranchants importants les poutres ruinent par plastification de l'acier au-dessous de l'axe neutre et par fissuration du béton.
- Pour des efforts tranchants d'une moyenne à faible intensité les poutres ruinent par la formation des rotules plastiques dans l'acier au-dessous de l'ouverture, accompagnée d'une fissuration diagonale de traction dans la dalle.
- Le béton contribue non seulement à la résistance à la flexion, mais également à la résistance au cisaillement des poutres mixtes au niveau des ouvertures d'âme.

En 1982, W.C. Clawson et D. Darwin [25] ont présenté un modèle de calcul sur la résistance des poutres mixtes acier-béton avec des ouvertures d'âme de forme rectangulaires concentriques ou excentriques et non renforcées. Ce modèle inclut la contribution de la dalle à la résistance au cisaillement aussi bien qu'à la résistance à la flexion. L'acier (section métallique) est représenté par un modèle de comportement élasto-plastique sans écroutissement.

Des comparaisons qui ont été faites avec des résultats d'essai montrent que ce modèle s'avère généralement fiable pour la prédiction de la résistance des poutres dans les essais.

La contribution de la dalle à la résistance au cisaillement au niveau de l'ouverture doit être incluse pour obtenir un modèle fiable.

En 1983, R. G. Redwood et G. Poubouras [26] ont décrit des essais sur de poutres mixtes constituées d'une poutre en acier comportant de grandes ouvertures d'âme connectée à une dalle mixte à bac collaborant. Une attention spéciale est portée au transfert de cisaillement entre la dalle et la poutre métallique tout près de l'ouverture, ainsi qu'aux charges de service (en phase de construction) sur la poutre avant que l'action mixte ne soit atteinte. Pour un rapport d'effort tranchant - moment fléchissant maximum (élevé), la résistance d'une poutre mixte dépend du nombre de connecteurs le long d'une ouverture ; tenant compte de cet aspect une théorie a été présentée. La résistance d'une poutre mixte est peu affectée lorsque les charges de service (en phase de construction) représentent au plus 60% de la résistance de la section en acier (action non-mixte) à l'ouverture.

En 1988, D. Darwin et R.C. Donahey [27] ont présenté des procédures sur le calcul de la résistance des poutres mixtes avec des ouvertures d'âme non renforcées, assemblées avec des dalles pleines et des dalles à bacs en acier (les nervures des bacs peuvent être parallèles ou perpendiculaires aux poutres).

Ces procédures prévoient une formulation générale pour déterminer la résistance maximale au cisaillement pur et une solution directe pour déterminer la résistance sous l'effet de la flexion et du cisaillement. Elles sont plus faciles à utiliser et donnent des résultats performants. En outre, l'effet combiné de flexion et de cisaillement est estimé par un facteur de résistance égale à 0.85.

En 1988, R.C. Donahey et D. Darwin [28] ont réalisé quinze essais jusqu'à la ruine de poutres mixtes avec ouvertures d'âme assemblées à des dalles à bacs en acier (les nervures des bacs peuvent être parallèles ou perpendiculaires aux poutres). Ils ont étudié les effets du rapport moment-cisaillement, du nombre et de l'endroit des connecteurs, de l'orientation du bac en acier et de son épaisseur.

La dalle en béton contribue de manière significative à la résistance au cisaillement et à la résistance à la flexion des poutres au droit des ouvertures d'âme. Les charges portantes sont déterminées par la ruine de la dalle (la ruine autour des connecteurs se produit dans les dalles avec les nervures transversales, alors que la ruine au cisaillement longitudinal se produit dans

les dalles avec les nervures longitudinales). La résistance à l'ouverture est plus grande que celle du connecteur de cisaillement au-dessus de l'ouverture et dans la zone d'appui (entre l'ouverture et l'appui).

En 1990, D. Darwin et W. K. Lucas [29] ont présenté une approche unifiée sur le calcul de la résistance maximale à la flexion et au cisaillement des poutres métallique et mixtes avec des ouvertures d'âme renforcées ou non renforcées. La résistance de la poutre mixte au niveau de l'ouverture d'âme peut être déterminée par un diagramme d'interaction moment – effort tranchant sous l'effet de la flexion et de cisaillement. Une comparaison a été faite avec les résultats expérimentaux de 50 poutres métalliques et de 35 poutres mixtes afin de déterminer les facteurs de résistance. Cette procédure prévoit une équation simple pour déterminer la résistance maximale de cisaillement au niveau des ouvertures d'âme pour tous les types de poutres considérés.

L'exactitude de cette procédure donne des résultats plus performants par rapport à d'autres techniques de calcul existantes. Des facteurs de résistance de 0.90 et de 0.85 sont recommandés pour les poutres métalliques et les poutres mixtes respectivement.

En 1992, le comité de tâche des critères de conception pour les structures mixtes acier – béton (voir l'ASCE) [30] a proposé un commentaire complémentaire aux "spécifications proposées en construction métallique pour le calcul des poutres avec ouvertures d'âme."

Les procédures sont basées sur la méthode de calcul aux états limites « LRFD » (load and resistance factor design) afin de déterminer le moment de flexion maximum, l'effort de cisaillement maximum et l'interaction moment-effort tranchant.

Le moment de flexion nominal maximum est calculé en utilisant des procédures conformes de la résistance pour les deux types de sections (mixtes et métalliques), tenant compte de la perte du matériau dans l'âme.

La détermination de l'effort de cisaillement nominal maximum est basée sur le mécanisme de ruine rendu par la formation de quatre rotules aux coins de l'ouverture.

L'approche du calcul est généralement identique pour les deux types de poutres mixtes et métalliques à sections épaisses, comportant des ouvertures d'âme de formes rectangulaires et circulaires avec ou sans renforcement.

En 1992, P.H. Dayawansa [31] a donné une méthode de calcul simplifiée fiable sur la détermination de la flèche élastique des poutres métalliques et des poutres mixtes avec ouvertures d'âme. Cette approche est basée sur des recherches expérimentales indiquant que

la flèche différentielle à travers une ouverture d'âme peut être significatif et que la plastification locale débute autour des ouvertures même pour des charges de service.

En 1992, R.M.Lawson, K.F. Chung et A.M. Price [32] ont présenté un résumé sur des résultats obtenus par trois essais de chargement sur des poutres mixtes de 10m de portée.

Ces essais ont été effectués en premier lieu sur une poutre mixte sans ouvertures (dite de contrôle) et en deuxième lieu sur des poutres avec cinq ouvertures rectangulaires de différentes tailles et en différents endroits.

Les résultats obtenus montrent que la ruine des poutres évidées est prise au niveau de chaque ouverture sous l'effet d'un chargement progressif effective. Ces résultats d'essais ont été comparés ensuite avec les résultats obtenus par les recommandations d'application des différentes expressions dans la publication (SCI publication 068) sur le calcul des poutres mixtes avec ouvertures d'âmes. L'écart entre les essais et la méthode de calcul est estimé par un facteur modèle dans l'ordre de 1.04 à 1.47.

La poutre mixte de contrôle (sans ouvertures) a été également observé à la ruine et des résultats ont été comparés avec ceux obtenus par la méthode de BS59.50 [33]: Partie 3.Ceci a donné un facteur modèle de 1.04.

En 1992, S.H.Cho et R.G.Redwood [34] ont décrit neuf essais importants sur l'étude des poutres mixtes comportant des ouvertures d'âme en considérant des mécanismes de ruine par lesquels la dalle contribué (participe) à la résistance au cisaillement verticale.

En particulier, les essais ont été étudiés en adoptant une analogie à un treillis dans lequel les goujons au cisaillement sont considérés comme étant des membrures verticales de traction, et les pannes diagonales (inclinées) de compression agissent dans le béton.

Les paramètres étudiés incluent les configurations typiques du goujon, la largeur de la dalle et les détails des goujons dans la région de trou.

La prédiction de la résistance faite par cette analogie est également basée sur des analyses publiées précédemment et sur des résultats d'essais résumés pour un total de 44 essais recueillis à partir de plusieurs sources. Une bonne concordance est démontrée pour les deux théories entre les charges de ruine observées expérimentalement et les charges de ruine prédites analytiquement.

Cette analogie permet d'avoir une compréhension plus claire sur le comportement des deux types de dalles « les dalles pleines et les dalles avec bac en acier à nervures ».

En 1993, K.S.Kim, Y.S.Yang, S.H.Choi et P.J.Kim [35] ont fait une étude expérimentale sur la résistance ultime des poutres mixtes avec ouvertures d'âme renforcées (une poutre métallique perforée, une poutre mixte, deux poutres mixtes perforées et deux poutres mixtes perforées avec renforcement d'ouvertures).

Pour un rapport moment-effort tranchant égal à 330 et une hauteur d'ouverture égale à 70% de la hauteur de la poutre métallique. Ils ont déduit les conclusions suivantes :

1. la dalle en béton dans la poutre mixte peut augmenter énormément la résistance de la poutre.
2. pour des ouvertures renforcées, la résistance ultime des poutres mixtes avec ouverture d'âme renforcées peut être assimilée à celle des poutres mixtes sans ouverture d'âme.
3. la résistance ultime des poutres mixtes avec ouverture d'âme est influencée par la longueur d'ouverture.

En effet, en 1993, R. Redwood et Soon Ho Cho [36] se sont limités sur un certain nombre d'études sur des poutres métalliques et des poutres mixtes comportant des ouvertures de grandes dimensions dans les âmes. Ils ont présenté une méthode d'analyse générale appropriée à la conception de ce type de poutres.

Les valeurs théoriques comparent bien avec les résultats expérimentaux. De plus, ils ont fait une étude récapitulée sur les détails du renforcement des ouvertures.

En 1996, E.H. Fahmy [37] a présenté une méthode analytique sur la résistance ultime des poutres mixtes acier-béton avec des ouvertures rectangulaires concentriques ou excentriques non renforcées dans l'âme. Dans cette analyse une connexion complète a été supposée exister entre la poutre métallique et la dalle de béton. Ainsi les ruines par flambement et par instabilité ne sont pas prises en considération.

Les résultats obtenus montrent une bonne concordance suite à une comparaison faite avec les résultats d'essais disponibles dans la littérature.

Il a également présenté une étude sur les effets de l'excentricité, de la hauteur et de la longueur de l'ouverture ainsi que sur la résistance de la poutre mixte.

En 1998, G.S. Veríssimo et R. H. Fakury [38] ont présenté une procédure de calcul les poutres mixtes avec une ou plusieurs ouvertures d'âme. Les ouvertures peuvent être circulaires ou rectangulaires, concentriques ou excentriques.

Cette procédure permet d'identifier les situations dans lesquelles les ouvertures ont besoin d'être renforcé et donc de calculer les dimensions de ce renforcement.

Elle est toujours applicable aux poutres mixtes à connexion complète ou à connexion partielle avec dalle pleine ou dalle avec bac collaborant, en considérant bien sûr la contribution du béton à la résistance au cisaillement.

En 1998, M.A. Benitez, D. Darwin et R.C. Donahey [39] ont présenté des procédures pour le calcul de la flèche des poutres mixtes avec des ouvertures d'âme.

Au début, et afin de vérifier les hypothèses de modélisation, une comparaison a été faite entre les données expérimentales et les recommandations pour l'application pratique de l'analyse matricielle en se servant d'une formulation de la matrice de rigidité.

Les résultats obtenus par cette comparaison ont été utilisés pour développer une méthode de calcul pour estimer la flèche maximale des poutres avec ouvertures d'âme ainsi une expression pour le calcul de la flèche au niveau de l'ouverture.

Cette procédure démontre que, dans la plupart des cas, une seule ouverture d'âme a souvent moins d'influence sur la flèche totale. Cependant, il y a des cas importants où l'effet peut être significatif.

Dans cette procédure, les déplacements dus au cisaillement (l'effet de l'ouverture) ont été pris en compte afin d'éviter toute erreur possible.

La méthode de la matrice de rigidité et toutes formes d'équations appropriées à ce type de calcul donnent des évaluations raisonnables de la flèche totale et de la flèche au niveau de l'ouverture.

En 1999, des formulations [40] ont été proposées sur le calcul des poutres mixtes et des poutres métalliques comportant des ouvertures de formes rectangulaires et circulaires, avec ou sans renforcement. Les procédures de base de calcul consistent en la détermination du moment de flexion maximum, de l'effort de cisaillement maximum et de l'interaction moment-effort tranchant. En tenant compte du facteur de résistance on peut prévoir si les efforts appliqués seront supportables.

La taille et le positionnement des ouvertures d'âmes peuvent réduire au minimum leurs effets sur la résistance au cisaillement et à la flexion des poutres mixtes.

En 2000, RG Redwood [41] a étudié le comportement des poutres alvéolaires mixtes en décrivant l'effet de l'action mixte par comparaison avec celui des poutres métalliques. Il a

démontré que l'exploitation de la résistance à la flexion et de la résistance au cisaillement peut être prévue, mais que l'amélioration de la résistance au cisaillement ne peut être atteinte que si certaines conditions sont remplies.

Le rôle de la connexion partiel a été souligné ainsi le besoin d'un complément d'informations concernant la prédiction du flambement de l'âme dans les poutres alvéolaires mixtes est identifié.

En 2001, K. F. Chung and R. M. Lawson [42] ont présenté une méthode de calcul détaillé pour être utilisée dans l'Eurocode 4 [6] sur les poutres mixtes avec de grandes ouvertures dans l'âme.

D'ailleurs, l'ingénieur et le bureau d'étude sont souvent confrontés aux calculs de ce type de poutres, à cet effet ils ont présenté également des informations générales sur le dimensionnement des ouvertures en fonction de l'utilisation de la résistance au cisaillement et la résistance à la flexion des poutres mixtes. En outre, l'effet de ces ouvertures sur la flèche est estimé par un facteur simple qui dépend de la taille et de la position des ouvertures.

Par conséquent, des tableaux sont présentées avec des règles générales bien détaillées afin d'aider les ingénieurs à dimensionner des poutres mixtes avec de grandes ouvertures de formes rectangulaires ou de formes circulaires.

En 2002, E.H. Fahmy et A. Hassanein [43] ont élaboré un modèle analytique pour étudier le comportement des poutres mixtes avec des ouvertures d'âme en utilisant la méthode des différences finies. Ces poutres sont assemblées avec des dalles pleines et des dalles à bacs en acier (les nervures des bacs peuvent être parallèles ou perpendiculaires aux poutres). La non-linéarité du matériau, et le glissement à l'interface entre la poutre en acier et la dalle en béton sont prises en compte.

Dans cette analyse la contribution de la dalle à la résistance au cisaillement et la variation de la résistance au cisaillement le long d'ouverture sont inclus. Ainsi le flambement des montants et l'instabilité de la poutre ne sont pas pris en compte dans ce modèle.

Afin de valider la fiabilité du modèle, une comparaison a été faite entre les résultats obtenus avec les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature, en considérant l'influence de la longueur, la hauteur ainsi que de l'excentricité de l'ouverture sur le comportement et la résistance de ces poutres. Un bon accord a été obtenu entre les résultats analytiques et expérimentaux.

En 2003, J. W. Park, C. H. Kim et S. C. Yang [44] ont réalisé une série d'essais sur les poutres mixtes avec ouvertures d'âme assemblées avec les dalles à nervures transversales (nervures orientées transversalement par rapport aux poutres). Ils ont étudié l'influence de la largeur de la dalle sur la résistance (diagrammes d'interaction moment - effort tranchant) et le mode de ruine.

Le mode de ruine des dalles en béton dépend de leurs largeurs. Dans les poutres avec une dalle de grande largeur la ruine se produit autour des connecteurs à l'extrémité où le moment fléchissant est prédominant, alors que la fissure diagonale de traction se produit dans une dalle qui a une largeur étroite.

Un modèle de résistance a donc été développé sur la base des résultats d'essai. La résistance maximale au cisaillement est égale approximativement à la somme de la résistance au cisaillement de la poutre métallique et de celle de la dalle en béton. La contribution au cisaillement de la dalle en béton est prise égale à la plus petite valeur calculée entre la résistance au cisaillement de la dalle et la résistance d'arrachement des goujons.

Le modèle de la résistance proposé est comparé aux résultats d'essai ainsi qu'avec d'autres modèles de résistance. Les résultats obtenus montrent que le modèle proposé est facile à utiliser et donne une prédiction satisfaisante de la résistance.

En 2005, K.F Chung, Ko CH et AJ Wang [45] ont proposé une approche unifiée d'un calcul basée sur l'analyse plastique pour les poutres métalliques et les poutres mixtes avec de grandes ouvertures rectangulaires dans l'âme.

En outre, un choix des modèles éléments finis a été établi après avoir effectué des essais, et une comparaison a été menée entre cette méthode « modèles éléments finis » et la méthode de calcul proposée.

Il a été démontré que cette méthode de calcul a été proposée pour prédire d'une manière satisfaisante les charges ultimes des poutres mixtes avec des ouvertures rectangulaires dans l'âme tout en considérant le mécanisme de ruine « Vierendeel ».

En 2006, D. Bitar et all [1-46] ont développé un nouveau modèle analytique de calcul permettant d'une part, de mieux appréhender la résistance à l'instabilité des montants de poutres cellulaires et mixtes acier-béton et d'autre part, d'évaluer correctement la flèche de telles poutres. Ce modèle analytique couvre un domaine très large de variation de paramètres géométriques (diamètre et espacement) et mécanique (acier de haute limite d'élasticité). Une

étude d'évaluation du nouveau modèle par rapport aux modèles existant [47-48] permet en fin de ce travail de mettre en évidence l'impact des améliorations apportées.

Des règles de conception ont été élaborées par Lawson et al [2] pour le Fonds de Recherche pour le charbon et l'acier 2006 pour aider au dimensionnement des poutres en acier laminées à chaud munies d'ouvertures utilisées en construction mixte.

Parmi ces méthodes, une approche unifiée a été développée pour le calcul de la flèche maximale des poutres en acier et mixtes comportant des ouvertures circulaires et rectangulaires ; valable aussi pour les poutres cellulaires possédant une section symétrique.

L'expression de cette flèche s'exprime comme combinaison de deux termes : le premier terme correspond à la flèche due à la flexion globale (pure) de la poutre mixte non ajourée et le deuxième terme correspond à la flèche due à l'effet Vierendeel. Ce deuxième terme comporte un facteur représentant l'effet combiné de la répartition de moment et de cisaillement sur la longueur de la poutre.

En 2006, R.M. Lawson, J. Lim, S.J. Hicks et W.I. Simms [3] ont fait une étude sur la conception des poutres cellulaires mixtes non symétriques et les poutres avec grandes ouvertures d'âme. Ils ont montré que l'asymétrie de la section transversale des poutres cellulaires mixtes développe un moment de flexion additionnel dans le montant dû à l'interaction entre les ouvertures quand l'espacement entre ces dernières est petit. En outre, le développement des efforts internes locaux influence sur la distribution des contraintes (résistance) dans chaque Té. Une méthode de calcul a été présentée en tenant compte d'une asymétrie importante dans la section transversale ainsi de l'influence du type d'ouvertures ovales ou rectangulaires.

Le montant flambe suite au développement d'un moment de flexion local sous l'effet du cisaillement quand l'espacement entre ces ouvertures est petit. Des équations simplifiées ont été présentées pour la détermination du flambement du montant, cette dernière a été calibrée ensuite avec les résultats d'analyse par éléments finis. Cette analyse par éléments finis a été également développée pour le cas des sections asymétriques avec des ouvertures renforcées. Des solutions fiables sont présentées afin de permettre au concepteur de calculer l'effort de cisaillement maximum agissant sur la poutre quand sa résistance est limitée par la flexion ou le flambement du montant.

Pour le cas des ouvertures longues, des efforts d'arrachement (décrochage « pull-out ») importants peuvent se produire dans les connecteurs au bord de l'ouverture. Une fois combiné

avec des effets de second ordre possibles dus au déplacement produit par l'effet de cisaillement à travers l'ouverture, il est nécessaire de limiter la valeur des efforts mixtes locaux dus au moment de vierendeel qui peut être considéré dans le calcul.

En outre, ils ont présenté une expression approximative [3] pour le calcul de la flèche maximale des poutres cellulaires mixtes sous l'effet des charges transversales concentrées ou uniformément réparties. L'augmentation de la flèche représente l'effet combiné de la flexion et du cisaillement dû à l'influence des ouvertures. Généralement, pour les poutres cellulaires mixtes, l'influence de la variation de la rigidité à la flexion de la section mixte perforée est dominante.

En 2006, W. Ramm et C. Kohlmeyer [49] ont étudié la résistance au cisaillement portant « shear-bearing » de la dalle en combinaison avec les connecteurs. Quatre modes de ruine différents ont été observés d'après dix-sept essais effectués sur les poutres mixtes avec grandes ouvertures d'âmes sous l'effet d'un grand cisaillement vertical. La résistance à la traction des goujons dans la région de l'ouverture montre qu'une grande partie de cisaillement vertical est reprise par la dalle à l'aide des trois goujons les plus proches de l'extrémité de l'ouverture où le moment fléchissant est prédominant et qu'une quantité considérable de cisaillement vertical est transmise au-dessus de l'ouverture à l'aide des têtes des goujons puisqu'elles agissent comme une sorte d'un renforcement au cisaillement.

En 2011, M. Gizejowski et W. Salah [50] ont étudié des poutres alvéolaires (crénelées) mixtes par différentes techniques de la méthode des éléments finis en décrivant le comportement dans le plan en utilisant l'analyse géométrique linéaire et le comportement de distorsion hors-plan en utilisant l'analyse géométrique non linéaire, les deux techniques se sont appliquées pour tracer la performance de poutres mixtes continues.

En 2013, P.O. Martin, M. Couchaux, O. Vassart et A. Bureau [51] ont fait une étude sur le comportement statique des poutres Angelina. Dans ce contexte, ils ont présenté des résultats de 4 essais (3 en acier et 1 mixte) et d'environ 280 simulations numériques par éléments finis (en acier et mixte) conduits pour déterminer les modes et charges de ruines sous l'effet combiné d'une flexion et d'un cisaillement. Ils présentent ensuite le modèle de calcul analytique en détail permettant la vérification de la résistance des poutres en tenant compte de l'effet Vierendeel, ce modèle pouvant être utilisé dans les limites géométriques et mécaniques du domaine d'application défini en préambule. Finalement, une comparaison des charges maximales issues de ce nouveau modèle avec celles provenant des essais ou des calculs par élément finis permet d'évaluer la sécurité et la précision des formulations proposées.

En 2013, B. Djebli et al [52] ont développé une nouvelle approche analytique permettant d'évaluer correctement la flèche des poutres cellulaires mixtes acier-béton sous l'effet d'un chargement vertical. L'expression de cette flèche s'exprime comme la somme de deux termes : le premier terme correspond à la flèche due à la flexion globale (pure) de la poutre mixte cellulaire, le deuxième terme correspond à la flèche due au cisaillement (l'effet de Vierendeel au niveau de l'ouverture). Une étude d'évaluation de ce nouveau modèle analytique par rapport aux modèles existant [2,3 et 42] permet en fin de ce travail de mettre en évidence l'impact des améliorations apportées.

1.4. Conclusion :

Dans ce chapitre une présentation chronologique des études menées sur les poutres métalliques alvéolaires ainsi les poutres mixtes avec ouvertures d'âmes a été présentée.

Cette revue a montré que les méthodes présentées sur le calcul des flèches des poutres avec ouvertures ne sont pas assez précises et surtout ont souvent un caractère empirique qui ne donnent aucune information en particulier sur la participation de la flexion des ouvertures dans le calcul de la flèche des poutres mixtes cellulaires. C'est pourquoi il nous a paru très intéressant de consacrer tout un chapitre (chap2) pour présenter une méthode très simple en proposant un modèle analytique pour le calcul de la flèche maximale des poutres mixtes cellulaire étant donné que les poutres cellulaires sont actuellement disponibles sur le marché car leur utilisation est relativement courante dans le domaine de la construction. Ainsi des modèles éléments finis ont été décrits afin de mener des analyses numériques dans les domaines linéaire et non linéaire pour prédire le comportement mécanique (à savoir la stabilité et la résistance) des poutres mixtes cellulaires.

Chapitre 2

Etude analytique sur la
contribution de la flèche
additionnelle

2.1. Introduction :

Une méthode courante d'intégration des équipements techniques consiste à utiliser des ouvertures découpées dans l'âme des poutres en I - poutres d'origine, comme les poutres cellulaires. Ces poutres sont faites de profilés laminés à chaud découpés selon un certain profil et reconstitués par soudage pour former un profilé de hauteur supérieure comportant une série d'ouvertures régulières. Le profilé peut être dissymétrique quant aux dimensions des "Tés" formés à partir des profilés en I découpés. Historiquement, la poutre alvéolaire à ouvertures hexagonales était la première de ce type. La construction moderne utilise maintenant des poutres appelées cellulaires avec des ouvertures circulaires [53]. Les poutres cellulaires sont conçues pour agir de manière mixte avec la dalle de plancher.

Ce type de poutres qui peuvent être esthétique donnent plus de flexibilité au concepteur de fournir des planchers libres de grandes portées qui peuvent aider à réduire le coût final de la structure. Cependant, la présence des ouvertures dans l'âme conduit à une réduction de la rigidité flexionnelle et par conséquent à l'augmentation des déplacements verticaux globaux. En effet, l'aptitude au service concernant le comportement sous l'effet des charges de services, soulève des questions telles que la maîtrise des flèches, car la vérification de la flèche à la flexion sous l'effet d'un chargement vertical (Benitez et al et Dougherty) [39],[54] est d'une grande importance dans la conception. Cependant, la dernière version de l'Eurocode4 [6] ne donne aucune indication sur le calcul de la flèche d'une poutre mixte. Bien que les normes européenne de l'Eurocode3 [5], [55] donne des formules pour le calcul de la flèche des poutres métalliques perforées.

Un certain nombre d'études [2], [3], [4] et [52] ont été réalisées pour le calcul de la flèche des poutres mixtes avec ouvertures d'âmes. Cette flèche est influencée par la flexion globale de la poutre ainsi que par les déformations engendrées par l'effort tranchant de l'âme au niveau de l'ouverture. Les formules qui ont été développés sur le calcul de la flèche seront présentées dans la section suivante.

Dans ce contexte, nous allons montrer l'influence de la flèche additionnelle due à l'effet du cisaillement sur la flèche totale des poutres mixtes cellulaires.

Dans le cas de poutres munies d'ouvertures dans les âmes, les principales exigences consistent à calculer :

- la flèche additionnelle due à la perte de rigidité de flexion provoquée par l'ouverture.
- la flèche par cisaillement additionnelle due aux effets de la flexion Vierendeel au

niveau des ouvertures.

Le comportement en service est établi au moyen des propriétés élastiques, en prenant en compte l'effet de la suppression d'une partie de l'âme sur les flèches. Pour la flexion pure, la rigidité élastique est définie sur la figure 2.1.

Lors d'essais effectués sur des poutres munies d'ouvertures, on observe peu de divergence sur la courbe charge-flèche jusqu'à ce qu'on soit proche de la ruine, et donc la plastification locale n'est pas importante en ce qui concerne le comportement en service global.

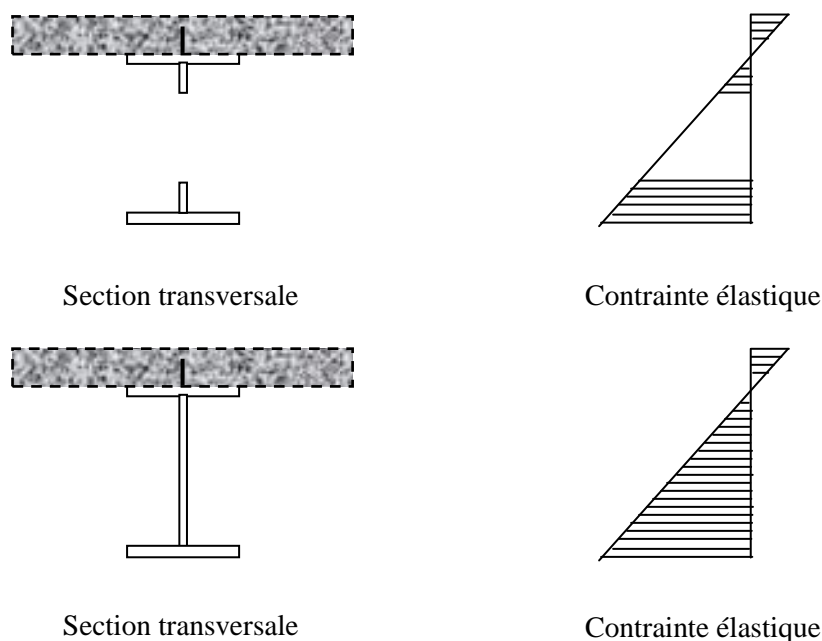


Figure 2.1. Caractéristiques élastiques d'une poutre mixte ajourée

L'influence des ouvertures sur la flèche correspond à la contribution de la flexion et du cisaillement à la fois. En générale, l'augmentation de la flèche de la poutre mixte correspond à la déformation de cisaillement (Δ_{sup}) de la partie supérieure de la section mixte homogénéisée (Té supérieur) comme l'indique la figure 2.2.

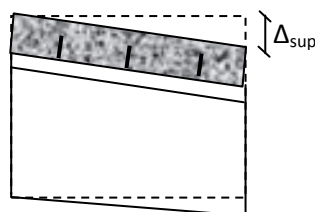


Figure 2.2. Déformation due au cisaillement vertical à l'ouverture

2.2. Méthode existantes pour le calcul de la flèche :

Dans ce paragraphe, on présente différentes méthodes existantes pour le calcul de la flèche maximale des poutres mixtes cellulaires.

La flèche maximale des poutres mixtes avec ouvertures d'âme est donnée par :

$$\delta = \delta_b + \delta_{add} \quad (2.1)$$

δ_b : la flèche due à la flexion pure.

δ_{add} : la flèche additionnelle due à l'effet de cisaillement.

- Chung and Lawson [43] ont présenté une approche sur la détermination de la flèche maximale des poutres mixtes avec de grandes ouvertures dans l'âme. La présence des ouvertures entraîne une augmentation de la flèche due aux effets élastiques provoqués par les variations locales de la rigidité à la flexion et au cisaillement le long de la portée de la poutre.

La flèche additionnelle totale δ_{add} à mi- portée d'une poutre mixte avec une série d'ouvertures régulières par rapport à la flèche de la poutre mixte pleine δ_b est donnée par:

$$\delta_{add} = 0.2 \frac{d_o}{H} \delta_b \quad (2.2)$$

- Lawson et al [3] ont présenté une expression approximative pour le calculer de la flèche maximale des poutres mixtes cellulaires sous l'effet des charges transversales concentrées ou uniformément réparties. L'augmentation de la flèche représente l'effet combiné de la flexion et du cisaillement dû à l'influence des ouvertures. Généralement, pour les poutres cellulaires mixtes, l'influence de la variation de la rigidité à la flexion de la section mixte perforée est dominante.

La flèche additionnelle δ_{add} à mi- portée d'une poutre mixte cellulaire, par rapport à la flèche δ_b de la poutre mixte non perforé, peut être calculée approximativement comme suite:

$$\delta_{add} = \frac{0,2 \cdot n \cdot t_w \cdot d_o \cdot H^2}{I_b \cdot L} \delta_b \quad (2.3)$$

- Des règles de conception [2] donnent une approche unifiée a été développée pour le calcul de la flèche maximale des poutres en acier et mixtes comportant des ouvertures circulaires et rectangulaires ; valable aussi pour les poutres cellulaires possédant une section symétrique.

L'expression de cette flèche s'exprime comme combinaison de deux termes : le premier terme correspond à la flèche due à la flexion globale (pure) δ_b de la poutre mixte non ajourée et le deuxième terme correspond à la flèche δ_{add} due à l'effet de Vierendeel. Ce deuxième terme comporte un facteur représentant l'effet combiné de la répartition de moment et de cisaillement sur la longueur de la poutre.

Pour des ouvertures multiples de dimensions similaires, la flèche additionnelle est donnée par:

$$\frac{\delta_{add}}{\delta_b} = 0,5 \cdot n \cdot k_o \left(\frac{l_o}{L}\right) \left(\frac{d_o}{L}\right) \quad (2.4)$$

$k_o = 1.0$ pour une poutre mixte avec ouvertures raidies,

$k_o = 1.5$ pour une poutre mixte avec ouvertures non raidies,

$k_o = 1.5$ pour une poutre métallique avec ouvertures raidies,

$k_o = 2.0$ pour une poutre métallique avec ouvertures non raidies,

l_o : longueur de l'ouverture. Pour les ouvertures circulaires, $l_o = 0.5d_o$

Le facteur 0.5 représente l'effet combiné de la répartition de moment et de cisaillement sur la longueur de la poutre.

- une nouvelle approche analytique a été développée [52] permettant d'évaluer correctement la flèche des poutres cellulaires mixtes acier-béton sous l'effet d'un chargement vertical. L'expression de cette flèche s'exprime comme la somme de deux termes : le premier terme correspond à la flèche due à la flexion globale (pure) δ_b de la poutre mixte cellulaire, le deuxième terme correspond à la flèche δ_{add} due au cisaillement (l'effet de Vierendeel au niveau de l'ouverture).

$$\delta_{add} = \frac{2 \cdot R^3}{3 \cdot E_a \cdot I_{Th}} \cdot V_{ht} \sum_{j=1}^i j \quad (2.5)$$

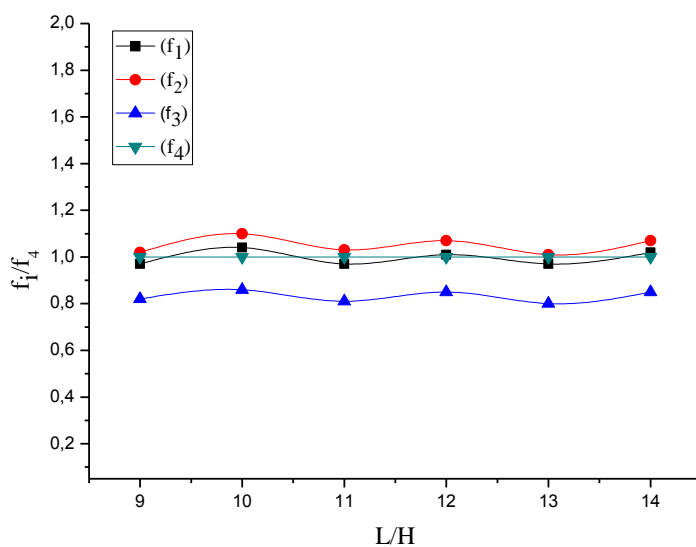
2.3. Comparaison des résultats obtenus par les méthodes théoriques :

Une comparaison de résultats est établie dans les graphes de la figure 3, entre les valeurs de la flèche maximale obtenues par les solutions analytiques (f_1 , f_2 , f_3 et f_4) donnés respectivement par Chung et Lawson [43], Lawson et al [3], règles de conception [2] et Djebli et al [52] dont celle-ci (f_4) est prise comme référence. Cette comparaison est effectuée en fonction de différentes valeurs des rapports (Longueur / Hauteur) variant entre 9 à 14 qui correspondent aussi bien au nombre des ouvertures dans la poutre.

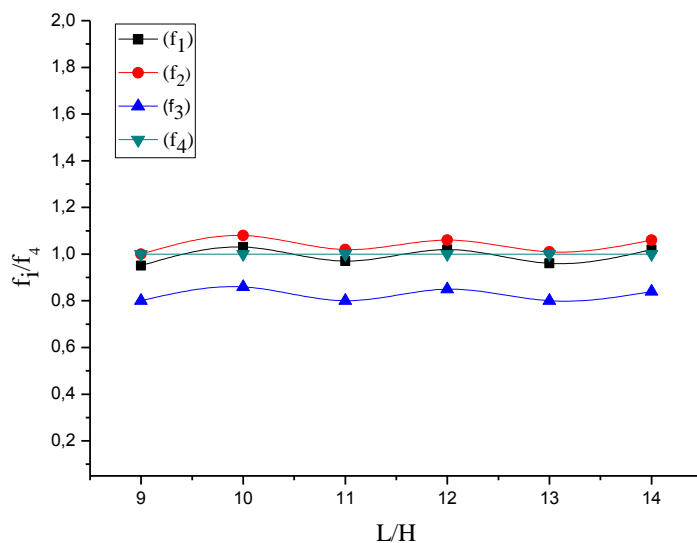
Un type de profilé IPE400 a été utilisé dans cette comparaison; ce choix peut être envisageable pour toutes les sections IPE, car quelle que soit la section IPE choisie, les courbes présentent la même évolution.

Les poutres étudiées dans notre analyse ce sont des poutres simplement appuyées sous l'effet de chacun des deux types de chargement (charge uniformément répartie et une charge concentrée à mi-portée de la poutre).

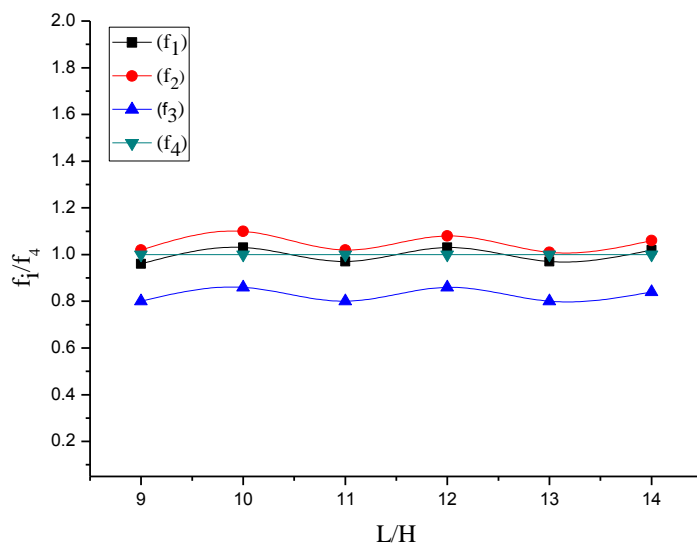
L'épaisseur de la dalle en béton a été prise égale à 120 mm.



a) Cas d'une charge uniformément répartie



b) Cas d'une charge concentrée à mi- portée de la poutre



c) Cas de deux charges concentrées symétriques

Figure 2.3. Rapports de flèche (f_i/f_4) en fonction de (L/H)

A partir des résultats donnés dans les graphes de la figure 2.3, il est bien à remarquer que les valeurs des flèches maximales (f_1 , f_2 et f_4) sont presque de même ordre de grandeur, tandis que celles de la flèche (f_3) sont environ de 20% plus grandes que celles obtenues par l'approche analytique prise comme référence (f_4).

Pour une meilleure analyse de comparaison entre les résultats analytiques, les flèches de deux poutres mixtes cellulaires simplement appuyées dont les propriétés géométriques énumérées dans le tableau 1 sont calculées en utilisant l'approche proposée (f_4) comme référence.

Les valeurs obtenues sont comparées à des valeurs analytiques de la flèche (f_i) obtenues en utilisant les trois approches existantes (f_1, f_2 et f_3).

Toutes les flèches ont été calculées pour une charge (non pondérée) correspondant à la valeur de la flèche obtenue par l'approche proposée (f_4) qui ne devrait pas dépasser la valeur limite de flèche (condition de la flèche : $f_{th} \leq L/250$).

Les caractéristiques géométriques de la section et des ouvertures sont données dans le tableau 2.1. L'acier utilisé est de nuance S235.

Les valeurs de la flèche totale des deux poutres avec un nombre différent d'ouvertures sous l'effet de la charge typique limite de service pour chaque cas (une charge uniformément répartie, une charge concentrée à mi- portée de la poutre et deux charges concentrées positionnées d'une manière symétrique) sont présentées dans les tableaux 2.2 et 2.3.

Nombre d'ouvertures	L (m)	L _{eff} (m)	H (mm)	b _f (mm)	t _f (mm)	t _w (mm)	d ₀ (mm)	e (mm)	w (mm)	e _{Pd} (mm)
9	4.5	1.125	498	160	11.5	7.5	375	500	125	120
14	7.0	1.750								

Tableau 2.1. Caractéristiques géométriques des poutres

Méthodes de flèche	Charge uniformément répartie q=206.18KN/m		Charge concentrée à mi- portée de la poutre F=571.42KN		Deux charges symétriques concentrées F=339KN	
	f _i (cm)	f _i / f ₄	f _i (cm)	f _i / f ₄	f _i (cm)	f _i / f ₄
f ₁	1.69	0.94	1.67	0.93	1.69	0.94
f ₂	1.82	1.01	1.80	1.00	1.80	1.00
f ₃	1.41	0.78	1.39	0.77	1.41	0.78
f ₄	1.80	1.00	1.80	1.00	1.80	1.00

Tableau 2.2. Poutre avec 9 ouvertures

Méthodes de flèche	Charge uniformément répartie q=59.4KN/m		Charge concentrée à mi- portée de la poutre F=258.68KN		Deux charges symétriques concentrées F=145.8KN	
	f _i (cm)	f _i / f ₄	f _i (cm)	f _i / f ₄	f _i (cm)	f _i / f ₄
f ₁	2.61	0.93	2.60	0.93	2.60	0.93
f ₂	2.75	0.98	2.74	0.98	2.75	0.98
f ₃	2.16	0.77	2.15	0.77	2.15	0.77
f ₄	2.80	1.00	2.80	1.00	2.80	1.00

Tableau 2.3. Poutre avec 14 ouvertures

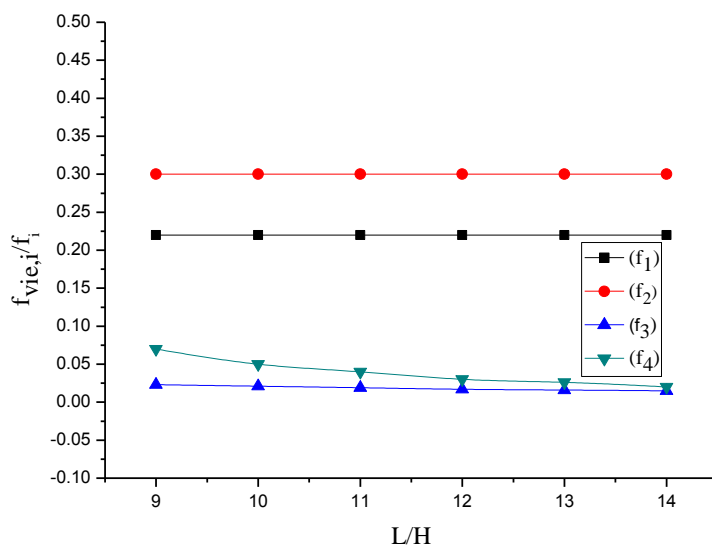
D'après les tableaux 2.2 et 2.3, il est bien remarqué que les valeurs de la flèche (f_4) sont à peu près identiques à celles des flèches (f_1) et (f_2), alors que celles de la flèche (f_3) sous-estiment plus de 20% les valeurs de la flèche de référence (f_4).

2.4. Contribution de la flèche additionnelle à la flèche totale :

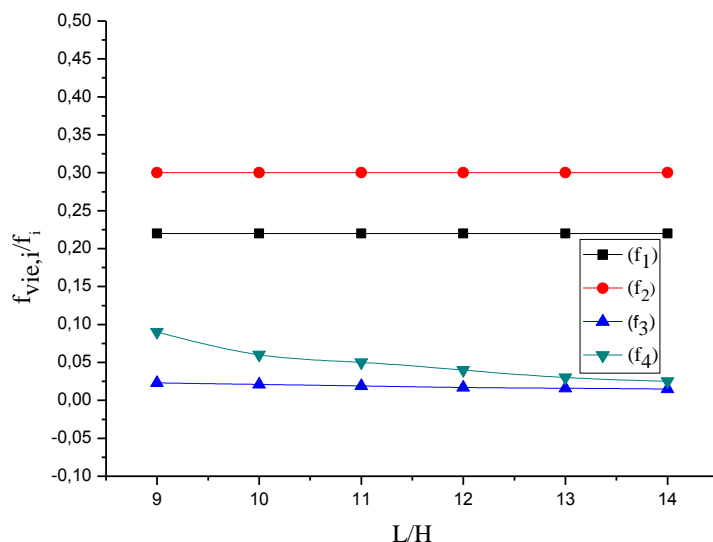
Dans ce paragraphe, il s'est avéré très utile de montrer le rôle que peut jouer l'influence de la flèche additionnelle due à l'effet du cisaillement sur la flèche totale des poutres mixtes cellulaires étudiées précédemment.

Pour cela, trois cas ont été étudié (figure 2.4), à savoir la contribution de cette flèche additionnelles due à l'effet du cisaillement au niveau de l'ouverture (effet Vierendeel).

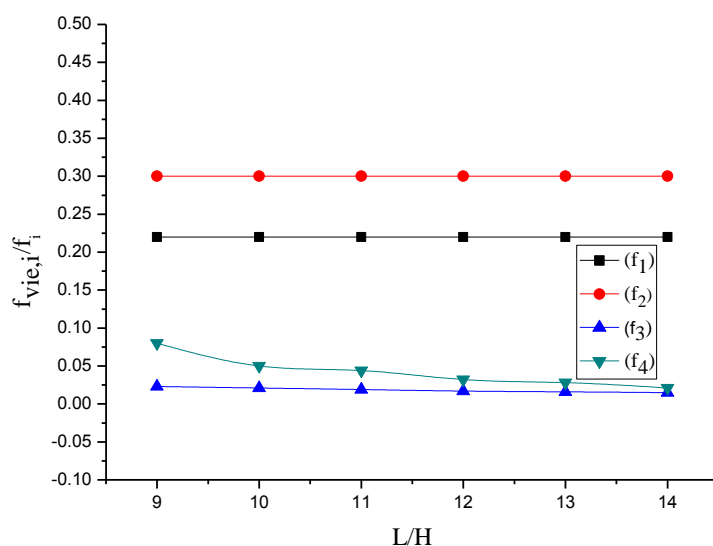
Cette étude a été effectuée sur deux poutres mixtes cellulaires simplement appuyées avec un profilé (IPE400), en faisant varier le nombre d'ouvertures, sous l'effet de chacun des trois types de chargement (une charge uniformément répartie, une charge concentrée à mi-portée de la poutre et deux charges concentrées positionnées d'une manière symétrique).



a) Cas d'une charge uniformément répartie



b) Cas d'une charge concentrée à mi- portée



c) Cas de deux charges concentrées symétriques

Figure 2.4. Contribution de la flèche additionnelle à la flèche totale

A partir des résultats obtenus selon les graphiques représentés ci-dessus, il est bien constaté que la contribution de la flèche additionnelle ($f_{vie,i}$) due au cisaillement par rapport à la flèche totale est presque de même ordre de grandeur (22%, 30% et 2%) pour chacune des trois premières méthodes (f_1 , f_2 et f_3) respectivement, que ce soit la poutre est de courte ou de longue portée, alors que la contribution de la flèche additionnelle ($f_{vie,4}$) due au cisaillement par rapport à la flèche totale (f_4) est donc plus grande pour le cas des poutres mixtes cellulaires de courte portée et intermédiaires que pour le cas des poutres longues. Pour le cas des poutres mixtes cellulaires de courte portée (poutres avec 9 ouvertures d'âme), la flèche additionnelle

$(f_{\text{vie},i})$ contribue d'environ 7 à 9% à la flèche totale tandis que pour le cas des poutres de longue portée (poutres avec 14 ouvertures d'âme) il est bien remarqué que cette contribution diminue très rapidement d'environ 2%.

2.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, une étude analytique a été menée ci-dessus afin de prédire l'influence de la flèche additionnelle due à l'effet du cisaillement sur la flèche totale d'une poutre mixte cellulaire symétrique soumise à l'effet d'une charge transversale. Pour atteindre les buts de ce chapitre, les points suivants sont abordés :

- Les méthodes analytiques produisant les flèches maximales (f_1 , f_2 et f_4) donnent des valeurs presque de même ordre de grandeur, tandis que la méthode analytique donnant la flèche maximale (f_3) est environ de 20% plus grandes que celle obtenue par l'approche analytique prise comme référence (f_4),
- la contribution de la flèche additionnelle ($f_{\text{vie},i}$) due au cisaillement par rapport à la flèche totale est presque de même ordre de grandeur pour chacune des trois premières méthode (f_1 , f_2 et f_3) respectivement, que ce soit la poutre est de courte ou de longue portée,
- la contribution de la flèche additionnelle ($f_{\text{vie},4}$) due au cisaillement par rapport à la flèche totale (f_4) est donc plus grande pour le cas des poutres mixtes cellulaires de courte portée et intermédiaires que pour le cas des poutres longues.

Dans le chapitre 2 ,l'approche analytique prise comme référence (f_4), va nous servir de base afin de mener une étude paramétrique sur l'influence de la flèche additionnelle ($f_{\text{vie},i}$)due au cisaillement par rapport à la flèche totale (f).Nous allons donc, dans le chapitre 4, apporter une attention particulière au choix du maillage et des lois de comportement afin de pouvoir élaborer un modèle numérique fiable, représentatif de la réalité et suffisamment souple pour cette étude.

Chapitre 3

Présentation De Logiciel
(CAST3M)

3.1. Introduction :

Dans ce type d'approche, où la précision de l'analyse dépend directement des maillages et des éléments utilisés, les utilisateurs ont pris l'habitude de vérifier qu'il était suffisamment fini pour conduire à des résultats fiables. Un logiciel tel que **Cast3m** constitue un outil extrêmement efficace dont l'utilisation permet de résoudre une immense variété de problèmes. Il s'agit d'un véritable outil, aux multiples facettes, qui permet de se concentrer sur les véritables problèmes de l'ingénieur.

L'objectif de ce travail est de prouver l'efficacité du logiciel utilisé (**Cast3m**) pour un tel calcul mécanique linéaire. Dans ce chapitre nous allons commencer par une présentation générale du logiciel en donnant un aperçu global sur l'organisation d'un calcul mécanique (mené sur ce logiciel), ensuite nous exposons la modélisation en éléments finis afin d'estimer le comportement mécanique élastique d'une poutre métallique.

3.2. Présentation du logiciel :

3.2.1. Introduction :

Cast3m est un logiciel de calcul de structures basé sur la méthode des éléments finis. Il a été développé au Département de Mécanique et Technologie (DMT) du Commissariat à l'Energie Atomique de France (CEA). La principale particularité de **Cast3m**, est de permettre à l'utilisateur d'adapter ses calculs selon les problèmes qu'il doit résoudre.

Ce code de calcul présente un système complet intégrant non seulement des fonctions de calculs proprement dites mais également des fonctions de construction de modèle (pré-processeur) et de traitement de résultats (post- processeur). Il traite différents problèmes à savoir :

- La mécanique statique et dynamique avec des comportements en :
 - Elasticité linéaire classique.
 - Plasticité et la viscoplasticité.
- Thermique.
- thermo- mécaniques couplées.

Contrairement à de nombreux codes de calcul, **Cast3M** ne fonctionne pas en « boîte noire » ; il donne à l'utilisateur la connaissance du problème effectivement posé et des méthodes employées pour le résoudre. **Cast3M** comprend un ensemble de processus élémentaires

(bibliothèque d'opérateurs) que l'utilisateur peut enchaîner pour définir et résoudre ses problèmes.

3.2.2. Environnement et langage :

Le logiciel **Cast3m** fonctionne sur tout ordinateur PC ou compatible utilisant Windows (95 / 98 / ME / NT / 2000 / XP.....). Afin de convertir les informations en entités informatiques par le programme, il faut disposer d'une interface. C'est le langage GIBIANE qui va permettre de communiquer directement avec le programme.

3.2.3. Organisation d'un calcul :

3.3.3.1. Préparation du modèle de calcul :

Le modèle de calcul représente l'ensemble des données que doit préparer l'utilisateur pour décrire les caractéristiques complètes du problème à analyser. Il peut être décrit par le schéma suivant de la figure 3.1:

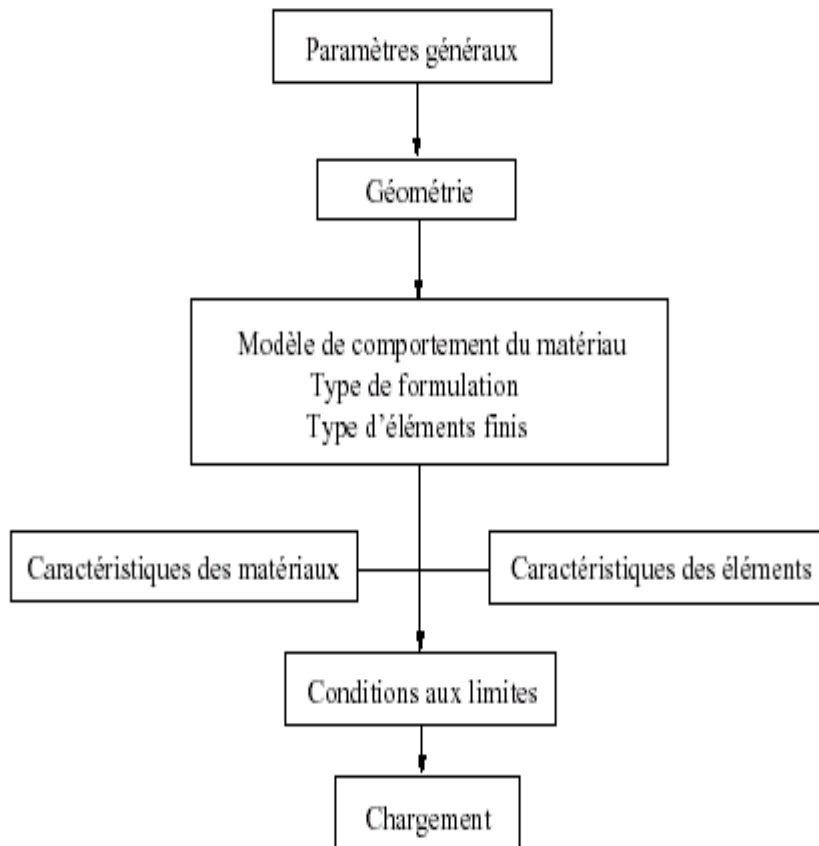


Figure 3.1. Organigramme du modèle de calcul.

- Les paramètres généraux sont définis avec les options générales de calcul.
- La géométrie représente la forme discrétisée du domaine à étudier.
- Le modèle associe au maillage une loi de comportement du matériau, la formulation éléments finis ainsi que le type d'éléments utilisés.
- Les caractéristiques des matériaux définissent les propriétés physiques des matériaux : module d'Young, coefficient de Poisson, masse volumique, (pour un calcul non linéaire, on ajoute la limite élastique du matériau f_y).
- Les caractéristiques des éléments sont relatives à certaines données supplémentaires selon les types d'éléments choisis qui ne peuvent se déduire de la géométrie. Par exemple, pour les coques il est nécessaire d'indiquer leur épaisseur, pour les poutres leur section et leur différentes inerties.
- Les conditions aux limites doivent s'ajouter à la matrice de rigidité.
- Application des chargements externes.

3.3.3.2. Résolution du système d'équations :

Une fois réalisée la préparation du modèle de calcul, on peut constituer le système

$\overline{\overline{M}} \cdot \overline{\overline{u}} + \overline{\overline{C}} \cdot \overline{\overline{u}} + \overline{\overline{K}} \cdot \overline{\overline{u}} = \overline{\overline{F}}$ et le résoudre. Il faut donc dans un premier temps calculer les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité.

Par exemple : pour une analyse statique linéaire (calcul de la flèche) la résolution sera sur le système : $\overline{\overline{K}} \cdot \overline{\overline{u}} = \overline{\overline{F}}$.

Pour une analyse modale (calcul des modes propres), le système à résoudre devient :

$$\overline{\overline{K}} - \omega^2 \overline{\overline{M}} = 0.$$

3.3.3.3. Traitement des résultats :

Il s'avère indispensable de traiter les résultats d'une analyse effectuée avec **Cast3m**. Ce traitement permet le calcul de grandeurs dérivées plus faciles à appréhender ou une visualisation en vue d'une meilleure interprétation des résultats. Deux groupes d'opérateurs sont disponibles à cet effet, l'un étant réservé au post-traitement des données et l'autre à la représentation graphique. Il est ensuite possible de sauvegarder les résultats en vue de les restituer dans des calculs ultérieurs.

Toute analyse générique effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis peut, en réalité, se scinder en 3 phases successives, chacune d'entre elles pouvant, à son tour, être subdivisée en une série de processus élémentaires. Les phases en question peuvent être décrites comme suit:

Phase 1. Définition du modèle mathématique :

- discrétisation géométrique du domaine étudié ;
- définition des données caractérisant le modèle, parmi lesquelles figurent: le type d'analyse (déformations ou contraintes planes, axisymétrie, etc. ...), le type d'éléments (poutres, coques, etc. ...), les propriétés du matériau, les caractéristiques géométriques qui ne peuvent être déduites des maillages et des conditions aux limites ;

Phase 2. Résolution du problème discrétisé :

- calcul des matrices de rigidité et de masse de chaque élément fini ;
- assemblage des matrices de rigidité et de masse de la structure complète ;
- application des chargements externes ;
- application des conditions aux limites ;
- résolution du système d'équations linéaires d'équilibre.

Phase 3. Analyse et post-traitement des résultats :

Les résultats peuvent être, soit des quantités locales comme les déplacements, les contraintes, les déformations, soit des quantités globales, telles que l'énergie de déformation ou encore la déformation maximale.

Les programmes de calcul classiques sont rigoureusement structurés selon cette logique (voir Figure 3.2), chaque phase étant associée à un module déterminé du code :

1. un pré- processeur pour la définition du modèle complet, qui transmet les données au programme de calcul proprement dit, dès que ces dernières sont élaborées ;
2. le programme de calcul qui, dès que la sélection d'une procédure de résolution est donnée, envoie une série de processus que l'utilisateur est contraint d'utiliser en « boîte noire » ;
3. un post-processeur qui, dès qu'il a reçu les résultats de ces processus, procède aux traitements nécessaires.

Il apparaît toutefois clairement qu'une structure de ce type exclut toute intervention, de la part de l'utilisateur, dans l'une quelconque de ces phases et ce, dans l'intention d'apporter des modifications répondant à ses propres besoins. Pourtant, une grande souplesse d'utilisation peut s'avérer très utile lorsque les problèmes que l'utilisateur se propose de résoudre sont variés et localisés en différents points processeur de résolution. Ainsi, l'utilisateur pourra se heurter à de grandes difficultés lorsqu'il s'agira de modéliser de la façon la plus adaptée aux nécessités de l'analyse, la géométrie de la structure, généralement constituée de plusieurs parties très complexes.

En outre, la discrétisation exige de distribuer les éléments d'une certaine façon : afin de rentabiliser au mieux les coûts de l'analyse, il convient en effet de densifier les éléments dans les zones les plus particulièrement exposées à de brusques variations de la fonction inconnue et, au contraire, de les raréfier dans les zones n'offrant que peu d'intérêt.

Il peut également s'avérer extrêmement difficile de rassembler, c'est-à-dire de rendre compatibles entre elles, au sein d'une même structure, plusieurs formulations mathématiques différentes (poutres, coques, solides, ...) se rapportant à diverses parties de la même structure, ou, encore, de définir des types particuliers de conditions aux limites ou de chargement.

Dans le cadre d'une analyse, il peut, par conséquent, s'avérer très intéressant de pouvoir définir pas à pas la séquence la plus adaptée des processus élémentaires présents dans les différentes phases en les concaténant et en fournissant, à chaque fois, les données requises.

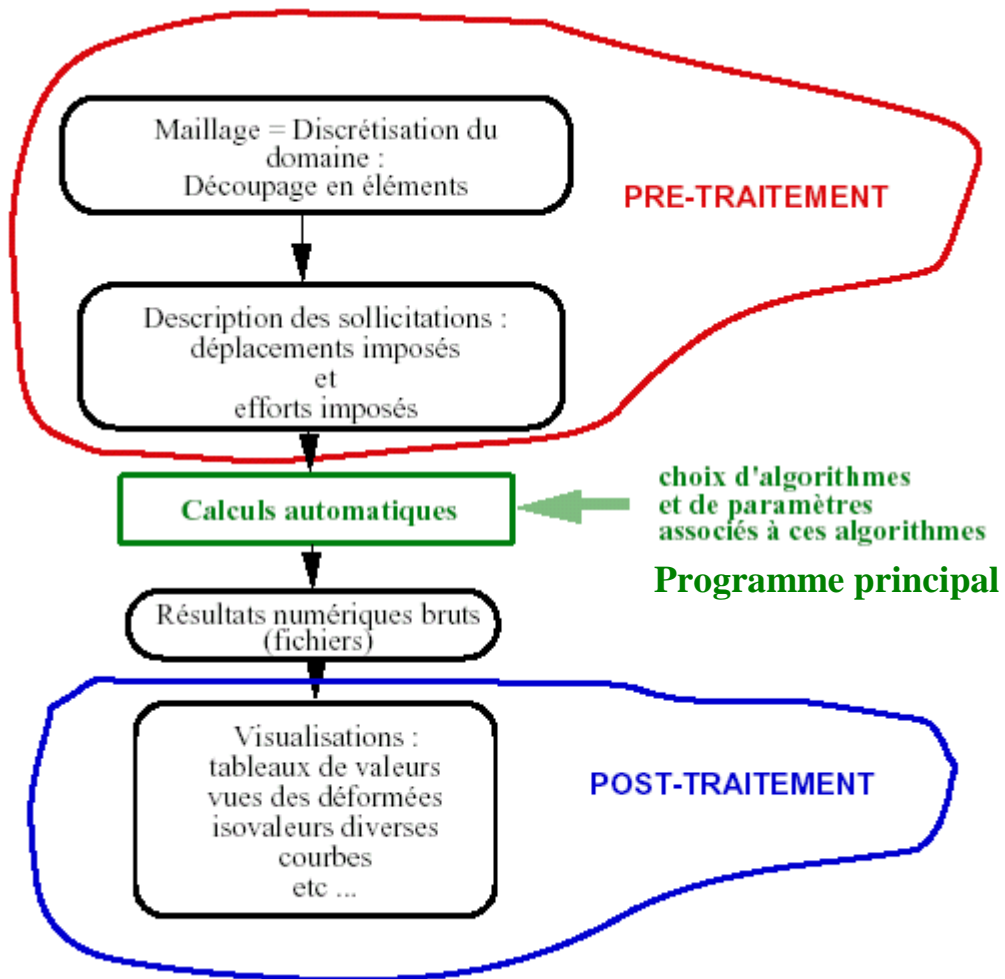


Figure 3.2. Noyau de calcul, pré et post traitements du noyau de calcul.

3.2.4. Possibilités offertes par Cast3m :

Notion de procédures: La structure adoptée dans **Cast3M** offre, avant toute chose, la possibilité d'élaborer des procédures qui sont, en quelque sorte, des opérateurs de niveau supérieur, appelant à leur tour des opérateurs élémentaires. Ces procédures sont créées pour répondre à des besoins divers:

- En premier lieu, il est possible d'utiliser les mêmes données pour plusieurs opérateurs, ce qui permet de les regrouper facilement et de les retrouver à l'aide d'une seule instruction.
- En second lieu, dans le cas de problèmes assez complexes ou répétitifs, il peut être gênant pour l'utilisateur d'avoir à définir chaque fois explicitement des opérations très standardisées.

- En fin, pour des utilisations par des personnes peu familiarisées avec la méthode des éléments finis, il est bon de pouvoir revenir à un fonctionnement en « boîte noire » du programme. Ceci revient à masquer tout le détail des opérations élémentaires par une seule procédure.

Les procédures présentent les caractéristiques suivantes :

- Elles peuvent être utilisées comme les opérateurs élémentaires.
- Une procédure peut en appeler d'autres et peut s'appeler elle-même.
- Une procédure peut être constituée d'autres procédures.
- La séquence d'opérateurs élémentaires contenue dans une procédure est toujours visible.

Toutes ces caractéristiques permettent à l'utilisateur de programmer lui-même les processus nécessaires à la résolution de ses propres problèmes. Il peut, en outre, écrire et tester très rapidement de nouveaux algorithmes sans tomber dans les difficultés liées à la programmation proprement dite.

3.3. Modélisation :

3.3.1. Introduction :

Actuellement, l'outil informatique et les logiciels de dimensionnement font largement appel à des modélisations conduisant à gérer des ensembles d'hypothèses qu'il était difficile de prendre en compte dans le passé. Depuis de nombreuses années les ingénieurs de bureau d'études confrontés à des problèmes de dimensionnement pour lesquels le prototype réel et la structure elle-même utilisent comme modèles de connaissance des modèles éléments finis.

3.3.2. Comportement mécanique élastique :

A fin d'avoir une bonne estimation du comportement mécanique élastique par la modélisation des poutres ou de leurs sections par éléments finis, menée sur le logiciel **Cast3m** en deux dimensions (2D); un type de calcul est décrit :

3.3.2.1. Calcul mécanique linéaire d'une poutre :

Le but de ce calcul est de voir sur un exemple très simple l'enchaînement des étapes nécessaires à un calcul par éléments finis par **Cast3m**. Pour cela on veut calculer la déformée d'une poutre simplement appuyée, avec une charge concentrée au milieu (à mi- portée).

3.3.2.1.1. Etapes de calcul :

3.3.2.1.1.1. Hypothèse de modélisation :

Mécaniquement, les deux hypothèses de calcul, qui peuvent être utilisées en deux dimensions (2D), tenant compte du comportement d'une section sont :

- L'hypothèse de déformation plane, qui traduit que la section est empêchée de se déplacer transversalement.
- L'hypothèse de contrainte plane, qui autorise par contre un déplacement transversal.

La modélisation en deux dimensions (2D) n'est donc pas tout à fait exacte mais très suffisante pour notre étude car la mise en œuvre d'une modélisation en trois dimensions (3D) serait beaucoup trop lente.

3.3.2.1.1.2. Modélisation :

La géométrie d'une poutre est récupérée directement de la modélisation mécanique 2D. La figure 3.3 montre une poutre (à section rectangulaire) de longueur 3m et de hauteur 0.5m ainsi définie et maillée. Il est à signaler que la troisième dimension (largeur de la poutre) est prise en compte dans notre programme et elle est égale à 0.2m.

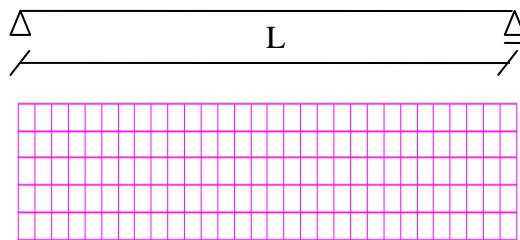


Figure 3.3. Maillage de la poutre.

Le maillage est réalisé avec des éléments quadrangulaires de taille moyenne 100 mm . Ce qui donne environ 150 éléments.

3.3.2.1.1.3. Conditions limites :

Les conditions de blocage des déplacements au niveau des appuis sont appliquées.

3.3.2.1.1.4. Chargement :

Pour le calcul mécanique, le chargement est défini par un vecteur force de valeur (300N) et appliqué à mi-portée de la poutre.

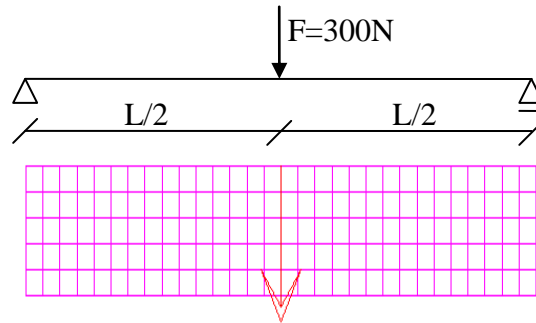


Figure 3.4. Chargement de la poutre.

3.3.2.1.2. Caractéristiques du matériau :

La poutre est en acier et de caractéristiques mécaniques suivantes :

Module d'Young : 210 000 MPa

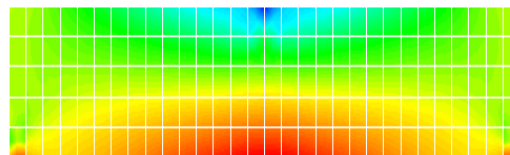
Coefficient de Poisson : 0,3

Masse volumique : 7800 Kg/m³

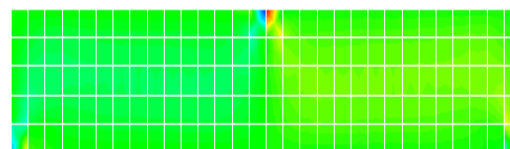
3.3.2.1.3. Résultats :

3.3.2.1.3.1. Exemple de champ de contrainte :

On obtient une cartographie des contraintes comme celle présentée ci-après (Figure 3.5).



a- Contraintes normales.



b- Contraintes tangentielles.

Figure 3.5. Champ de contrainte.

3.3.2.1.3.2. Exemple de déformée:

On obtient la déformée correspondante comme présentée ci-après (Figure 3.6).

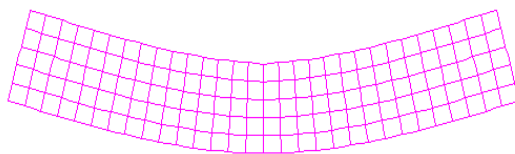


Figure 3.6. Déformation de la poutre.

3.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons commencé par décrire le code de calcul **Cast3m** permettant d'étudier la flexion simple d'un élément (une poutre) à l'état élastique par la méthode des éléments finis.

Dans le chapitre qui suit, nous allons développer un modèle numérique en utilisant le logiciel **Cast3m**, dont le traduire de façon satisfaisante la contribution de la flèche additionnelle sur la flèche totale des poutres cellulaires mixtes ; celle-ci fait objet dans le chapitre 5.

Chapitre 4

Modélisation mécanique linéaire et choix d'élément fini

4.1. Introduction :

Après avoir donné une présentation générale du logiciel au chapitre précédent, nous décrivons dans ce quatrième chapitre les détails de l'étude numérique par éléments finis en utilisant le logiciel (Cast3m) [7].

En premier lieu, une analyse sur le comportement élastique (linéaire) sera traitée afin de présélectionner le type d'élément finis à utiliser dans la modélisation.

En deuxième lieu, nous justifions le choix des éléments finis en trois dimensions (3D) résultant d'une analyse comparative entre des éléments *coques* et des éléments *massifs* (*volumiques*). Dans ce contexte, nous donnons des résultats obtenus par des programmes réalisés en utilisant les relations qui régissent la théorie de la flexion pour chacun des composants d'une poutre mixte sous forme des courbes chargement-déplacement (chacun des composants de la poutre mixte sera testé séparément), et ce, afin de choisir l'élément convenable à retenir avant de procéder à la validation du modèle pour les poutres cellulaires mixtes.

En fin, et en troisième lieu, nous procédons à la validation des résultats obtenus selon la nouvelle approche analytique décrite précédemment sur le calcul de la flèche des poutres cellulaires mixtes.

4.2. Étude du comportement linéaire :

Pour présélectionner le type d'élément finis à utiliser dans la modélisation de la poutre mixte nous analysons le comportement linéaire de chacun des composants de la poutre mixte simplement appuyée, sollicitée en flexion par l'application d'une force transversale en milieu de travée.

Pour cela, nous allons dans ce qui suit apporter une attention particulière au choix du maillage et de la loi de comportement afin de pouvoir élaborer un modèle numérique fiable, représentatif de la réalité et suffisamment souple pour une étude de flèche.

4.2.1. Comportement linéaire de la poutre métallique :

La théorie linéaire souvent adoptée pour les poutres est une théorie dite du premier ordre où le champ de déplacement varie linéairement dans le sens vertical, sans variation d'épaisseur, en incluant l'influence des déformations de cisaillement transversal. Cette théorie est basée sur l'hypothèse des sections droites. Elle est généralement associée au nom de Timoshenko.

- **Essai de flexion pure :**

Considérons un essai de flexion pure réalisé sur une poutre de section symétrique comme le montre la figure 4.1.

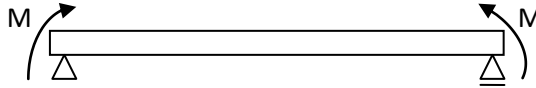


Figure 4.1. Poutre chargée par deux moments d'extrémité

Compte tenu de la répartition des contraintes dans la section (figure 4.2) ; si toutes les fibres d'une section de la poutre subissent une contrainte inférieure à f_y , la section est dans le domaine élastique.

Compte tenu de l'hypothèse de symétrie, les fibres les plus éloignées de la fibre moyenne sont situées à une distance $\pm h$ de cette dernière.

Si la valeur maximale de la contrainte est f_y ; le moment correspondant est le moment élastique M_{el} .

Donc $M_{el} = (I/h) f_y$

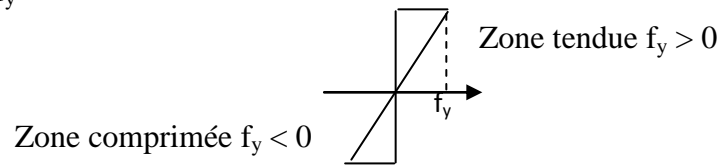


Figure 4.2. Diagramme de contrainte

- **Essai de flexion simple :**

Étudions le cas de d'une poutre sur deux appuis simples à section en I. cette poutre est chargée une fois à mi- portée par une force ponctuelle F et deuxième fois par une charge uniformément répartie.

Les diagrammes des moments de flexion et des efforts tranchants sont représentés sur la figure 4.3 ci- dessous, où le moment maximal apparait dans la section centrale ($x=l/2$).

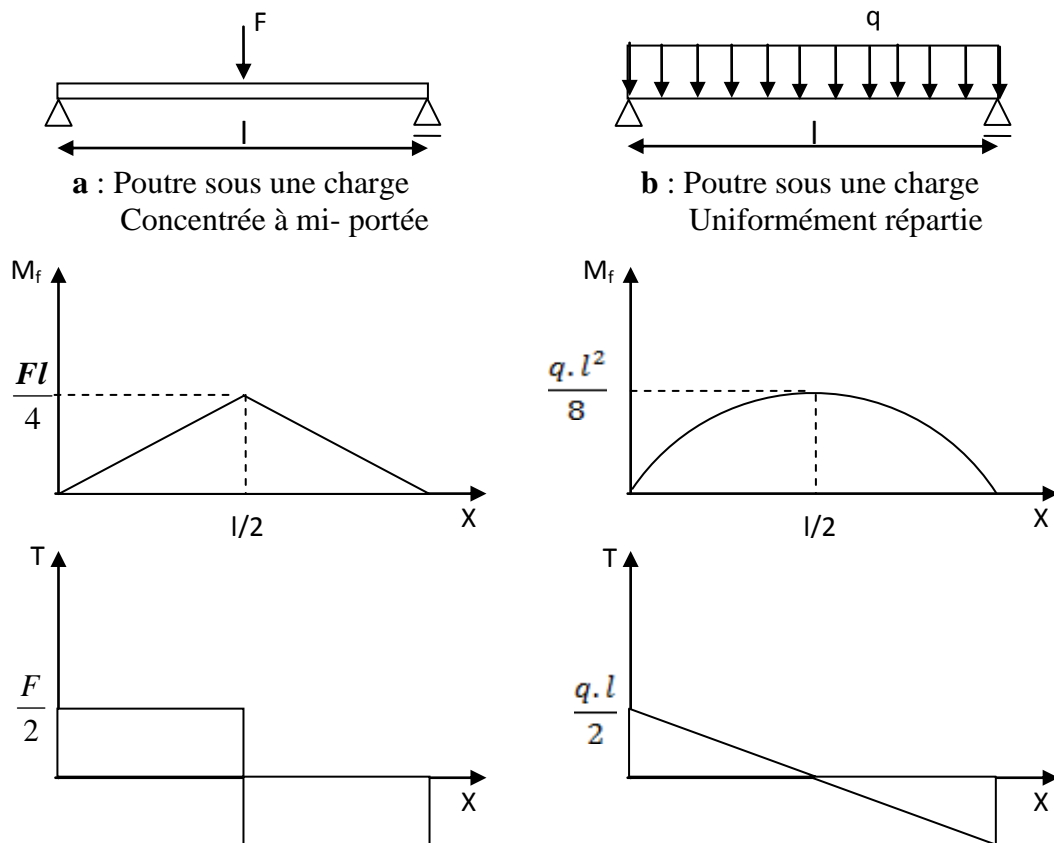


Figure 4.3. Diagramme des moments fléchissant et des efforts tranchants

- **Modélisation :**

Pour étudier l'évolution élastique nous adoptons la loi de comportement élastique obtenue en flexion simple en tenant compte des effets de l'effort tranchant.

D'où en superposant les courbures provoquées par le moment fléchissant et l'effort tranchant, on obtient l'équation différentielle complète de l'élastique ; qui s'écrit :

$$v \frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} + \frac{1}{GA_r} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

- **Évolution de la flèche en milieu de la poutre :**

Dans la phase élastique la flèche à mi- portée de la poutre est donnée par l'expression :

- Cas d'une charge concentrée à mi- portée de la poutre :

$$v = \frac{F_0 \cdot l^3}{48 \cdot EI} + \frac{M_{cmax}}{G \cdot A_r} \quad (4.2)$$

- Cas d'une charge uniformément répartie :

$$v = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot EI} + \frac{M_{qmax}}{G \cdot A_r} \quad (4.3)$$

4.2.2. Comportement linéaire de la dalle :

L'étude du comportement linéaire de la dalle correspond à une analyse mécanique d'une plaque ayant un comportement linéaire.

D'où la théorie linéaire souvent adoptée pour les plaques est une théorie dite du premier ordre où le champ de déplacement varie linéairement dans le sens vertical, sans variation d'épaisseur, en négligeant l'influence des déformations de cisaillement transversal. Cette théorie est basée sur l'hypothèse des sections droites. Elle est généralement associée au nom de Kirchhoff-Love.

Les hypothèses cinématiques de Kirchhoff-Love supposent que tout segment matériel normal à la surface moyenne de la plaque, reste après déformation, normal à la surface moyenne déformée et de même longueur (voir figure 4.4).

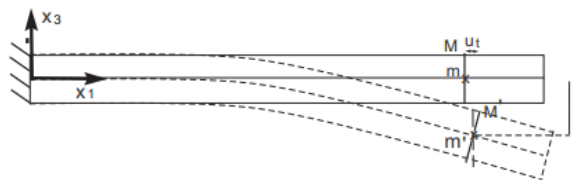


Figure 4.4. Hypothèses cinématiques de Kirchhoff-Love

L'expression de la flèche d'une dalle (carrée) en béton armé appuyée simplement sur les quatre côtés, est donnée par :

$$w_{max} = 0.0116 \frac{F \cdot a^2}{D_{\acute{e}q}} \quad (4.4)$$

$$D_{\acute{e}q} = \frac{E_b h^3}{12(1-\nu_b^2)} + 2 E_a e_s^2 a_x \quad (4.5)$$

Avec :

$D_{\text{éq}}$: raideur de flexion équivalente [56]

a_x : Taux de ferrailage

e_s : distance des nappes à la surface moyenne.

4.2.3. Loi de comportement :

Les matériaux utilisés de la poutre mixte considérée dans cette étude sont des matériaux à un comportement élastique, assimilable à chacun des composants (poutre en acier, dalle en béton et les goujons). Ils sont parfaitement définis par leurs modules de Young et de leurs limites élastiques.

La relation contrainte – déformation (figure4.5) traduit le comportement du matériau. Le modèle le plus connu est celui de HOOKE qui est la base de l'élasticité.

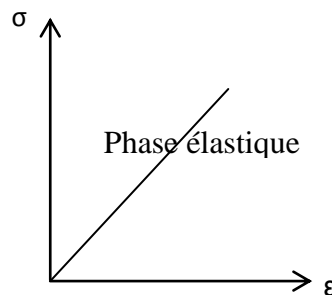


Figure 4.5. Évolution contrainte – déformation

4.3. Choix du type d'éléments :

Afin de choisir l'élément adéquat pour modéliser les poutres mixte, une étude comparative entre deux types d'éléments finis « élément COQ4 et élément CUB8 » a été faite en trois dimensions (3D) sur le comportement linéaire de chacun des composants de la poutre mixte simplement appuyée.

La modélisation en trois dimensions (3D) permet de réaliser des calculs exhaustifs mais souvent au détriment d'un temps de calcul conséquent.

Par conséquent, la modélisation est plus approximative dans le cas tridimensionnel que dans le cas bidimensionnel: autrement dit, les maillages 3D sont souvent plus grossiers que les maillages 2D.

D'un point de vue purement numérique, le modèle ne doit pas cependant être trop complexe au détriment du temps de calcul.

4.4. Comparaison des résultats :

Nous avons réalisé une étude numérique comparative afin de pouvoir choisir le support géométrique le plus adapté (coques ou massifs). Les essais numériques ont été réalisés sur chacun des composants de la poutre mixte séparément.

4.4.1. Poutre métallique :

Il s'agit d'une poutre métallique en IPE300, simplement appuyée, 6 m de portée.

La poutre est modélisée en utilisant les deux éléments suivants :

- Modèle COQ4 (éléments coques à 4 nœuds).
- modèle CUB8 (éléments cubiques à 8 nœuds).

Le récapitulatif des résultats obtenus sur le calcul des flèches maximales, est donné dans le tableau suivant :

Type d'élément fini	Flèches max (mm)					
	Charge uniformément répartie			Charge concentrée à mi-portée		
	Théorie	Castem	Ecart %	Théorie	Castem	Ecart %
CUB8	3.16	3.15	0.32	0.85	0.84	1.18
COQ4	3.16	3.12	1.26	0.85	0.83	2.35

Tableau 4.1. Valeurs de la flèche de la poutre en acier.

A partir des résultats obtenus selon le tableau 4.1 ; on constate que l'écart en pourcentage pour le cas de l'élément fini « CUB8 » est inférieur à celui pour le cas de l'élément fini « COQ4 ». On note aussi que la différence d'écart est très petite et par suite, la modélisation en éléments finis « COQ4 » est très suffisante pour notre étude car la mise en œuvre d'une modélisation en éléments finis « CUB8 » serait beaucoup trop lente par rapport à la précédente.

Afin de confirmer le choix de l'élément fini « COQ4 », une étude sur la déformée de la poutre métallique a été faite pour deux types de chargement (charge uniformément répartie et charge concentrée à mi- portée), voir les deux figures de la déformée (4.6 et 4.7) ainsi la figure 4.8 de la flèche.

- *Éléments coques « COQ4 »*

Charge uniformément répartie	Charge concentrée à mi-portée
3.12	0.83

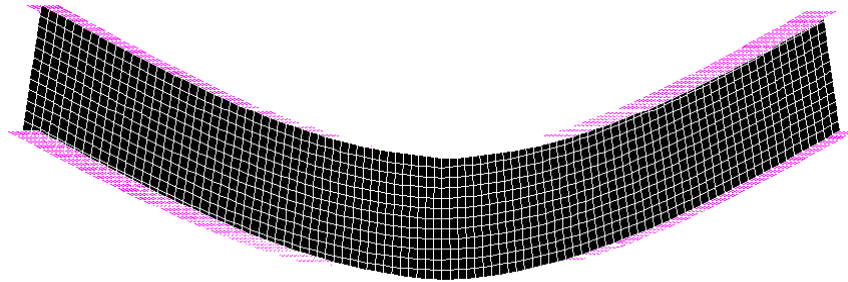


Figure 4.6. Déformation verticale de la poutre métallique « COQ4 »

- *Éléments volumiques « CUB8 »*

Charge uniformément répartie	Charge concentrée à mi-portée
3.15	0.84

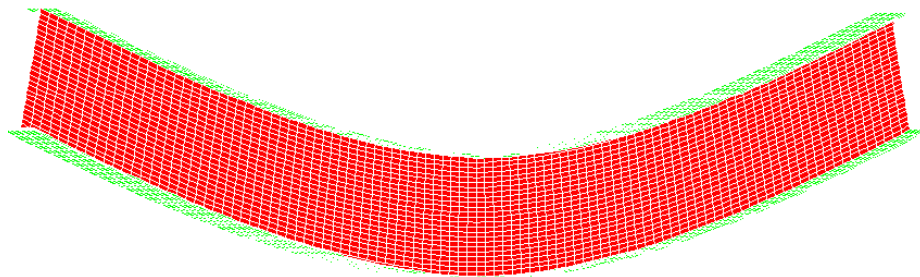
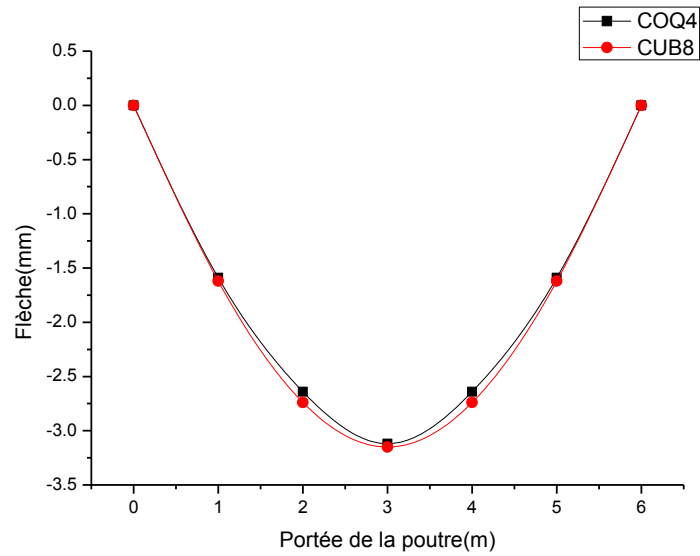
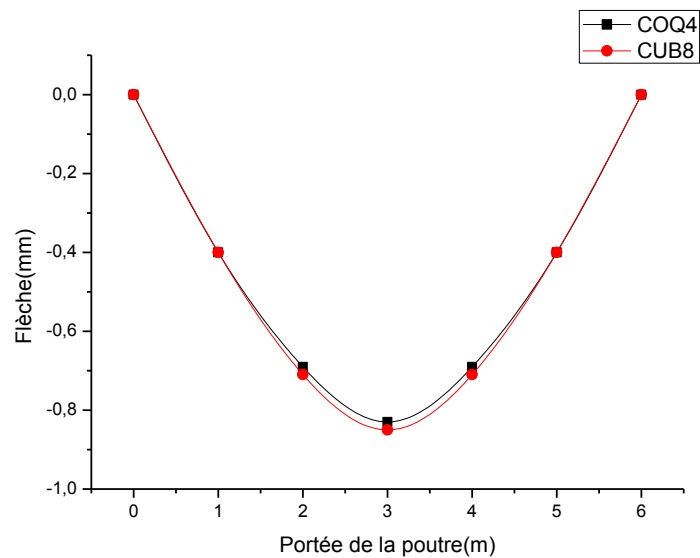


Figure 4.7. Déformation verticale de la poutre métallique « CUB8 ».



Charge uniformément répartie



Charge concentrée à mi- portée

Figure 4.8. Flèches de la poutre métallique

Les résultats sont très proches et permettent de confirmer qu'une modélisation en éléments finis « COQ4 » reste suffisante pour déterminer la flèche de la poutre métallique.

4.4.2. Dalle en béton:

La modélisation numérique volumique (massif en 3D) du matériau béton armé nécessite la modélisation de ses deux constituants pris séparément ainsi que l'interface entre eux. La modélisation des armatures dans la masse du béton peut se faire selon deux approches: Pour l'une les armatures sont prises comme une couche d'acier d'épaisseur équivalente. Dans l'autre cas, les barres sont prises comme des éléments discrets.

La modélisation 3D (*massifs*) permet quant à elle de réaliser des calculs exhaustifs mais souvent au détriment d'un temps de calcul conséquent.

Dans le cadre de ce contexte nous allons justifier le choix des éléments finis résultant d'une analyse comparative entre des éléments *coques* et des éléments *massifs*. Le pourquoi de ce choix, peut être privilégié par le fait que la mise en œuvre d'une modélisation volumique (massif en 3D) serait beaucoup trop lente.

Tout d'abord, nous proposons une modélisation volumique (massif en 3D) et simulation numérique pour les deux cas de description d'armatures d'une dalle pleine en béton armé, en utilisant le logiciel CAST3M. Sous l'hypothèse de la parfaite adhérence entre l'acier et le béton les éléments finis des armatures et du béton sont superposés.

Cette dalle est simplement appuyée le long de son contour, elle est soumise à l'action d'une charge appliquée au centre par une colonne carrée (figure 4.9).

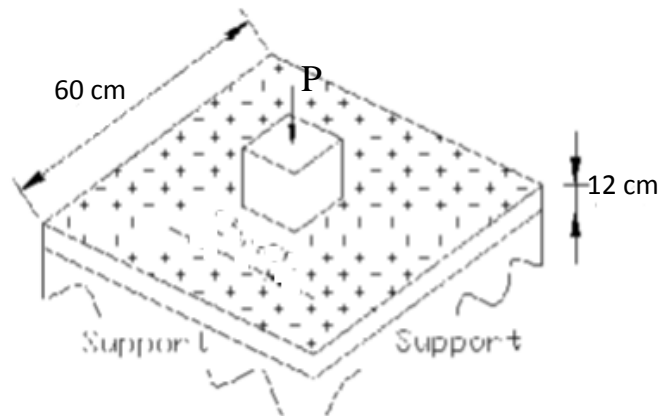


Figure 4.9. Géométrie de la dalle

Les caractéristiques mécaniques du béton et de l'acier des armatures sont données dans le Tableau 4.2.

Béton	Module d'élasticité	28000 MPa
	Coefficient de Poisson	0.2
	Masse volumique	2300 Kg.m ⁻³
Acier	Module de Young	200000 MPa
	Coefficient de Poisson	0.3
	Masse volumique	7850 Kg.m ⁻³
	Taux de ferrailage	1.1 %

Tableau 4.2. Caractéristiques mécaniques du béton et de l'acier

Dans la modélisation multicouche ; la dalle est discrétisée par empilement de trois couches de béton et deux couches pour l'acier à travers son épaisseur (éléments volumiques CUB8). Dans la modélisation discrète le béton reste un multicouche, tandis que l'acier est discrétisé à l'aide des barres (éléments poutres à 2 nœuds).

Pour la description des armatures deux représentations sont possibles :

- Selon l'approche discrète les aciers sont modélisés par des éléments linéiques (éléments poutres à deux nœuds) (figure 4.10) ne résistant qu'à la traction ou à la compression. Ils sont alors connectés aux éléments représentant le béton. [57], [58].

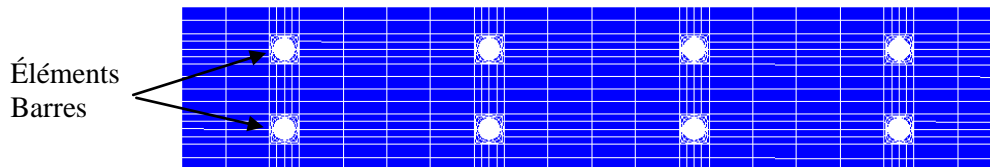


Figure 4.10. Partie du modèle de la dalle en éléments finis « Armatures en Éléments Barres »

- Dans la représentation couche ; l'acier est représenté par des couches (figure 4.11) dont l'épaisseur résulte d'une homogénéisation du pourcentage d'acier dans chaque direction de ferrailage. [57] ;

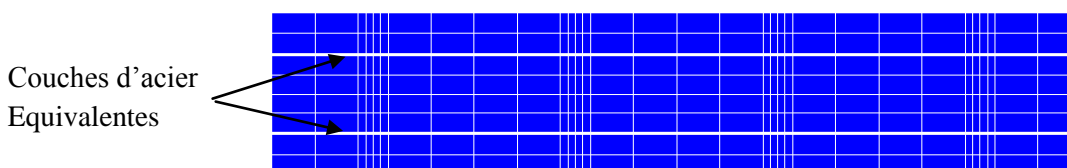


Figure 4.11. Partie du modèle de la dalle en éléments finis « Armatures en couches d'acier Equivalentes »

La bonne simulation obtenue, en comparaison avec les résultats analytiques, permet de montrer les particularités de chaque approche de modélisation d'acier sur le comportement numérique de la dalle en béton armé.

Sur la figure 4.12 on compare la réponse obtenue par les deux modélisations ; on remarque une rigidité légèrement supérieure dans le modèle discret par rapport à celle dans le modèle multicouche (figure 4.13). Bien que ce dernier offre une confrontation acceptable à la théorie (maximum de 9 % de différence par rapport à l'analytique).

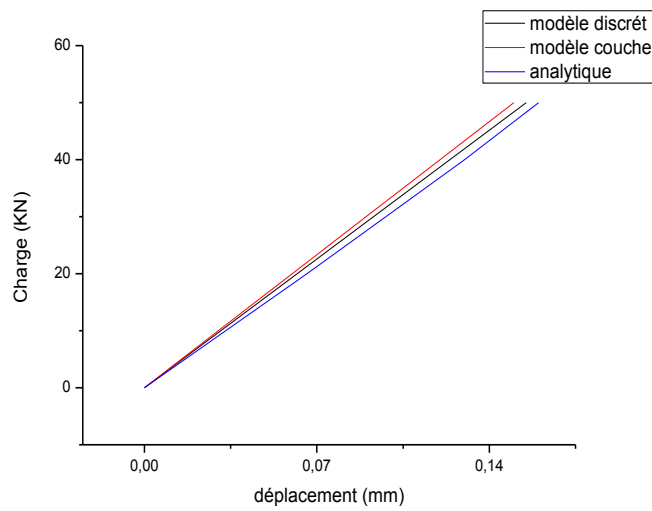
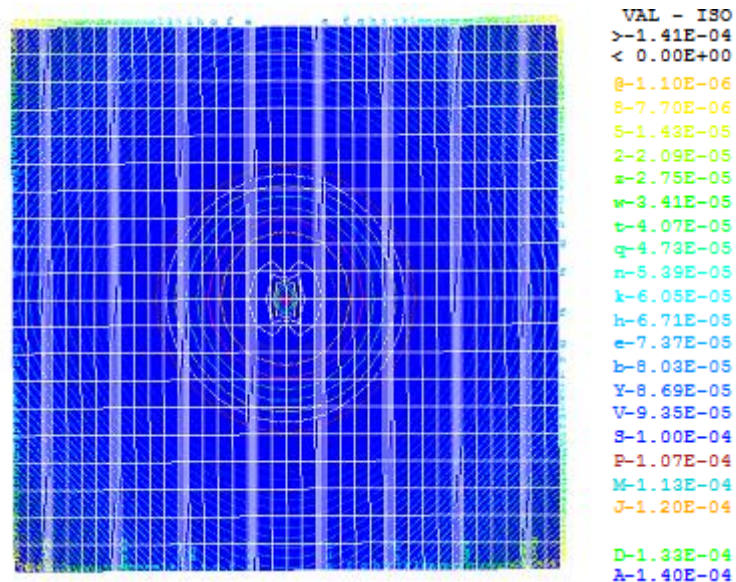


Figure 4.12. Comparaison de la réponse Charge-Flèche

Modèle couche



Modèle discret

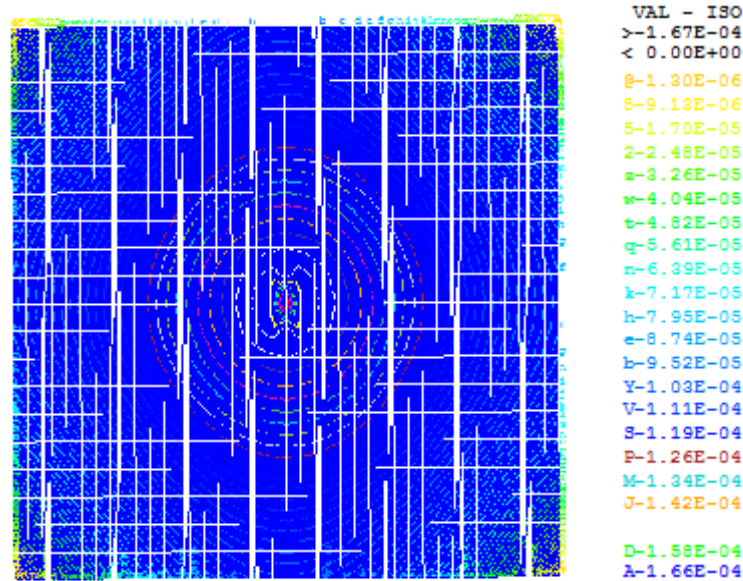


Figure 4.13. Champ de déplacements verticaux

D'un point de vue purement numérique, on veut que le modèle ne soit pas trop complexe au détriment du temps de calcul.

Dans ce contexte, nous allons dans ce qui suit apporter une attention particulière au choix du maillage afin de pouvoir élaborer un modèle numérique fiable, représentatif de la réalité et suffisamment souple pour le calcul de la flèche.

Pour cela, nous avons réalisé une étude numérique comparative afin de pouvoir choisir le support géométrique le plus adapté (coques ou massifs). Les essais numériques ont été réalisés sur une dalle isolée de type standard : 12 cm d'épaisseur, 6 m de portée, et simplement appuyée et soumise une fois à une charge uniformément répartie et une autre fois à une charge concentrée à mi- portée.

Le calcul a été réalisé avec 2 types d'éléments pour modéliser la dalle : soit des éléments solides à 8 nœuds (CUB8), soit des éléments de coque à 4 nœuds (COQ4 multicouches). Bien que tous les résultats soient présentés, nous avons finalement arrêté notre choix sur des éléments de type coque, en raison du caractère onéreux d'un calcul avec des éléments solides.

Le récapitulatif des résultats obtenus sur le calcul des flèches maximales, est donné dans le tableau suivant :

Type d'élément fini	Flèches (mm)		
	COQ4	CUB8	Ecart %
Charge uniformément répartie	3.8	3.7	2.7
Charge concentrée à mi- portée	1.12	1.08	3.7

Tableau 4.3. Valeurs de la flèche de la dalle

A partir des résultats obtenus selon le tableau 4.3 ; on constate que l'écart en pourcentage pour le cas de l'élément fini « CUB8 » est inférieur à celui pour le cas de l'élément fini « COQ4 ». On note aussi que la différence d'écart est d'ordre 2.7% (3.7%) et par suite, on peut adopter la modélisation en éléments finis « COQ4 » qui est très suffisante pour notre étude car la mise en œuvre d'une modélisation en éléments finis « CUB8 » serait beaucoup trop lente par rapport à la précédente.

Afin de confirmer le choix de cet élément fini « COQ4 », une étude sur le calcul de la flèche de la dalle au travers de sa portée a été faite pour deux types de chargement (charge uniformément répartie et charge concentrée à mi- portée), à cet effet le champ de déplacement vertical est représenté par les deux figures (4.14 et 4.16) ainsi la variation de la flèche est représenté par les deux figures (4.15 et 4.17).

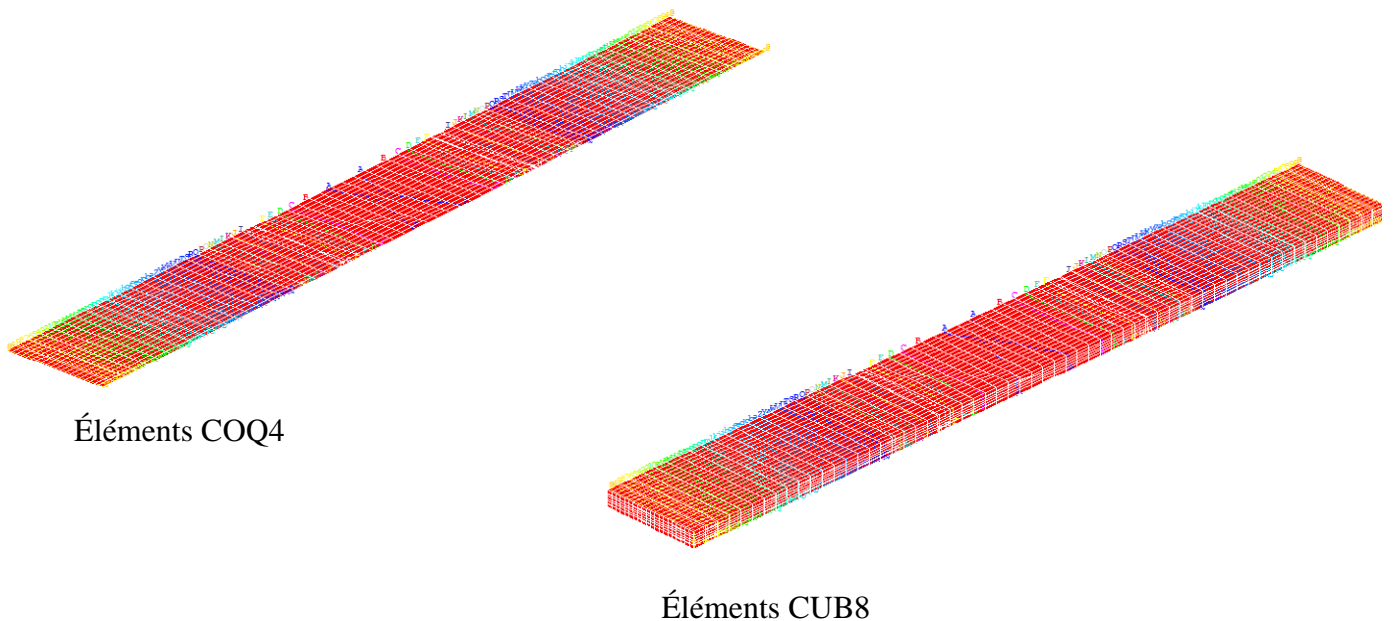


Figure 4.14. Champ de déplacements verticaux

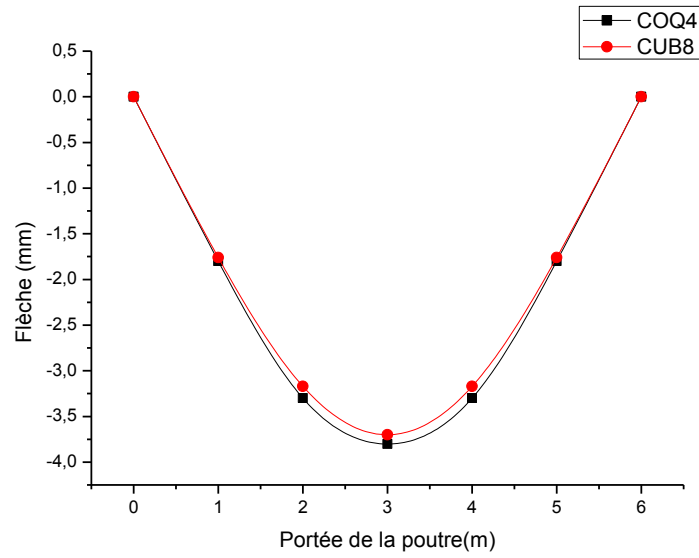
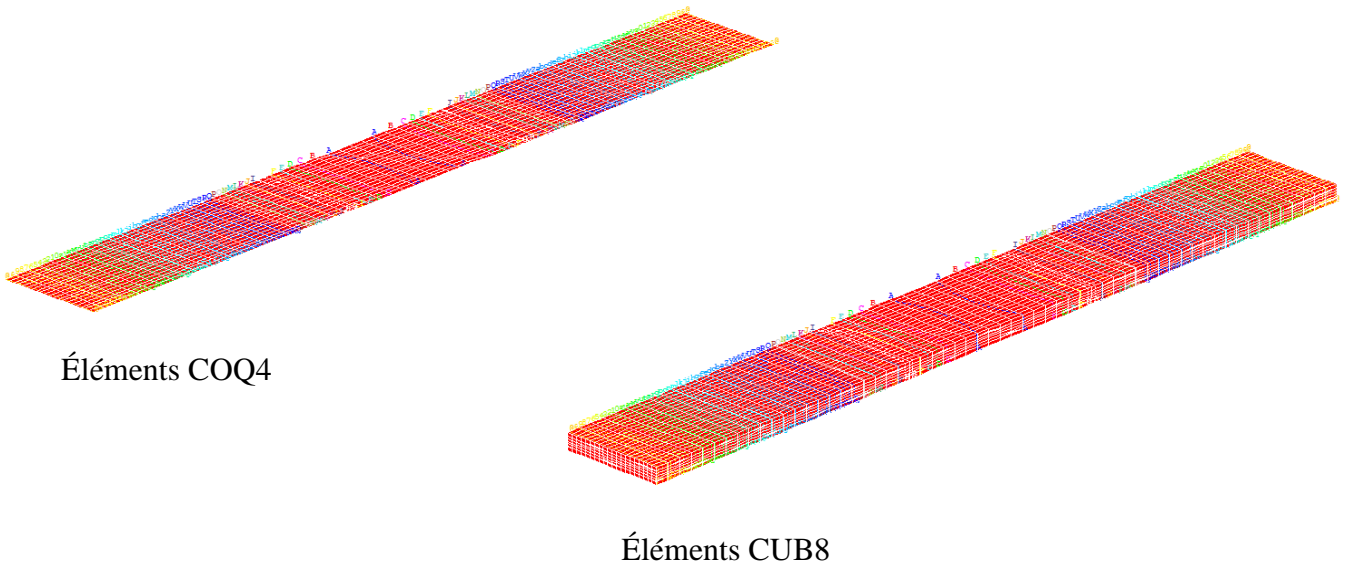


Figure 4.15. Flèches de la dalle

« Charge uniformément répartie »



Éléments COQ4

Éléments CUB8

Figure 4.16. Champ de déplacements verticaux

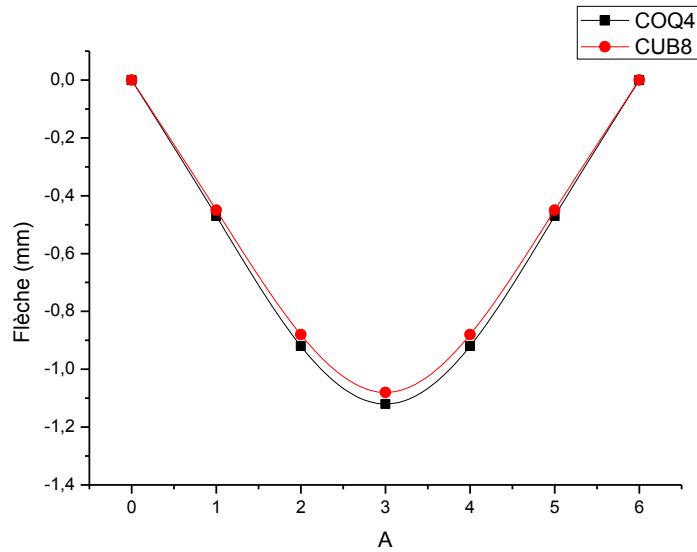


Figure 4.17. Flèches de la dalle

Charge concentrée à mi- portée

De même on peut conclure pour la dalle en béton armé, que les résultats sont très proches entre eux et permettent de confirmer qu'une modélisation en éléments finis « COQ4 » reste toujours suffisante pour déterminer la flèche.

4.4.3. Connexion en goujon :

La connexion est discrétisée au niveau de chaque couple de nœuds adjacents appartenant à la dalle et à la semelle supérieure de la poutre. Les connecteurs sont représentés par des éléments élastiques de type poutre à 2 nœuds, dont le module d'Young correspond à celui de l'acier. Chaque goujon donc à un comportement élastique.

Plusieurs formes de base de connecteurs utilisées dans la construction mixte sont présentées dans la littérature, notre étude portant essentiellement sur la forme la plus courante, à savoir le goujon soudé.

4.5. Modélisation de base :

Avant de procéder à la validation du modèle pour le calcul de la flèche des poutres cellulaires mixtes, nous allons assembler les modèles partiels décrits ci-dessus pour développer le modèle MEF 3D de la poutre mixte dans le domaine élastique. Pour nous assurer du bon fonctionnement de ce modèle, nous l'appliquons au cas de deux poutres mixtes simplement appuyées, l'une testée expérimentalement [59] et l'autre testée numériquement [60].

Le maillage du modèle MEF utilisé est présenté sur la figure suivante :

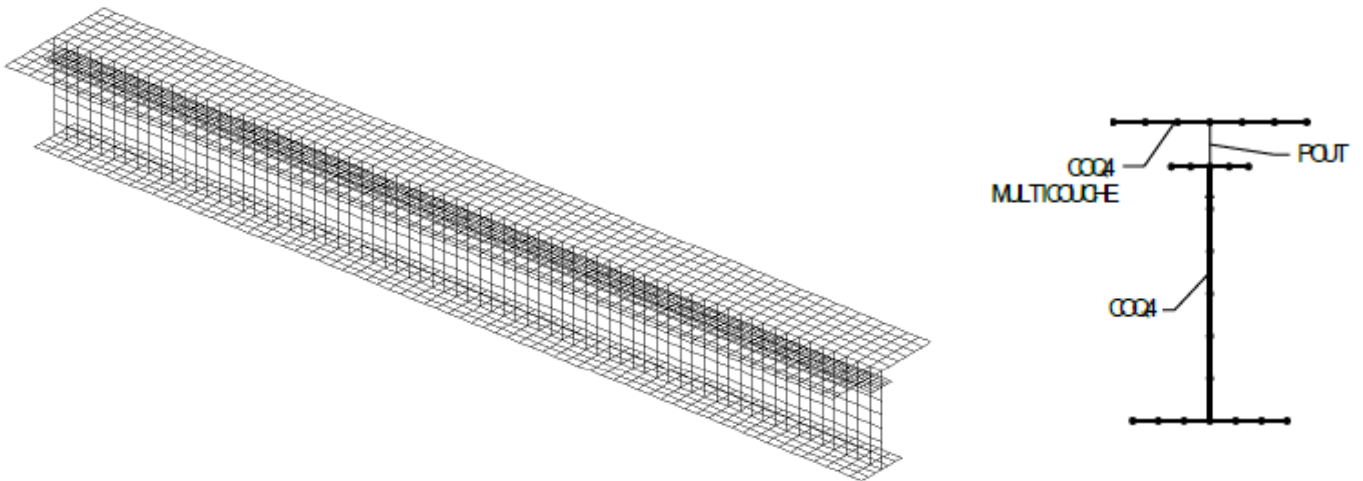


Figure 4.18. Maillage et schéma de la section du modèle numérique utilisé

Le maillage des coques est réalisé dans le plan moyen du profilé métallique et de la dalle. La dalle est divisée en trois couches de béton et deux couches qui représentent les nappes d'armature. Les éléments de connexion sont définis entre les nœuds adjacents de la dalle et de la poutre métallique.

4.5.1 Conditions aux limites et chargement :

Les appuis sont représentés par des conditions aux limites sur toute la largeur de la semelle. L'appui simple des poutres est modélisé en bloquant les déplacements verticaux de la semelle inférieure en acier à la section correspondante. Par ailleurs, pour éviter un déversement de la poutre, un maintien latéral « continu » est appliqué le long de la jonction âme – semelle (supérieure et inférieure) en bloquant les déplacements latéraux au droit de chaque montant.

Le chargement tient compte du poids propre qui, dans le modèle Cast3M, est appliqué sous forme de force linéique le long de la jonction de l'âme et de la semelle supérieure en acier, que la poutre soit mixte ou non. Les charges ponctuelles éventuelles sont également appliquées sous forme de charges linéiques, sur la largeur de la semelle supérieure en acier (figure 4.19).

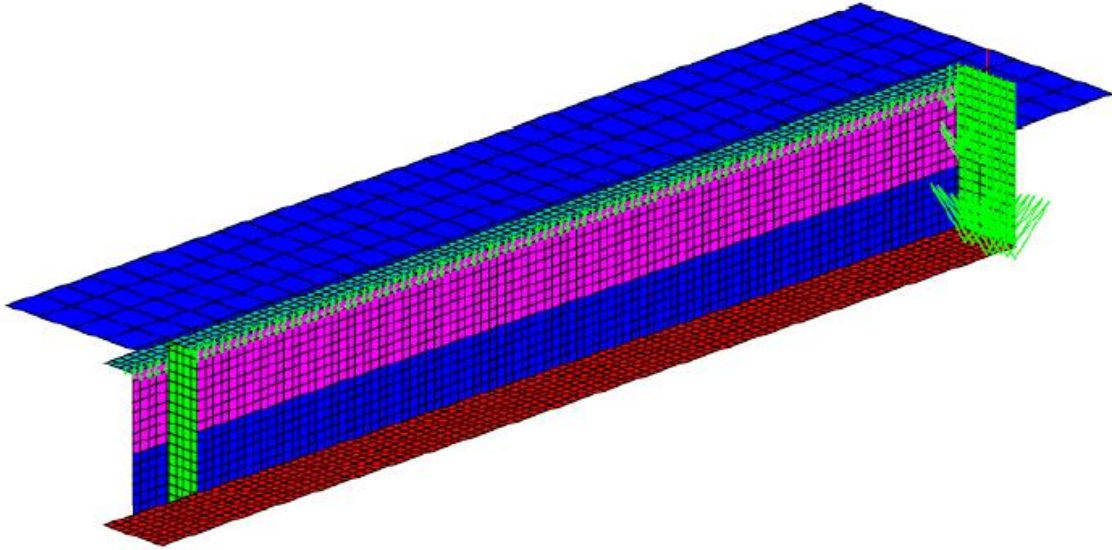


Figure 4.19. Application du chargement mécanique sur une poutre mixte

4.5.2. Application du modèle numérique à la poutre mixte :

Pour s'assurer de la bonne représentativité du modèle par élément finis précédent, on présente ici les résultats de calcul de deux poutres mixtes différentes, la première dénommée P1 testée expérimentalement [60] et la deuxième dénommée P2 testée numériquement [61], en les comparant à ceux obtenus avec le programme Cast3m.

La première poutre P1 est une poutre isostatique, d'une portée L de 5 m. Constituée d'un IPE 400 connecté à une dalle en béton armé sans bac collaborant, d'une largeur b de 800 mm et d'une épaisseur h_c de 100 mm, par 2 files de goujons régulièrement espacés, de type Nelson (hauteur 80 mm, diamètre 19 mm) (voir figure 4.20). Le ferrailage est constitué de deux nappes longitudinales de 5 barres $\Phi 10$, et de cadres transversaux $\Phi 8$ placés tous les 200 mm.

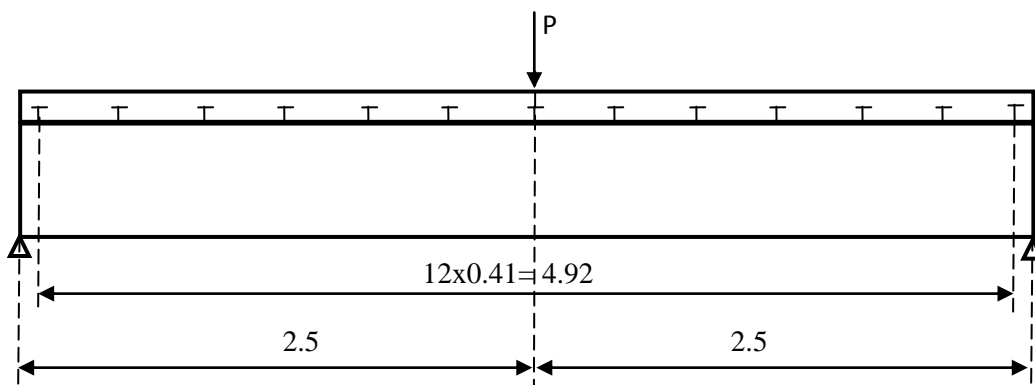


Figure 4.20. Configuration de la poutre P1

La deuxième poutre P2 est une poutre isostatique de longueur 5 mètres, constituée d'un IPE 400 avec une charge concentrée P au milieu de la travée ; la connexion de cette poutre, très partielle et espacée, n'est assurée que par 9 paires de goujons de type Nelson (hauteur 80 mm, diamètre 19 mm) régulièrement réparties sur la poutre, chaque paire de goujons étant placée dans une même section transversale de poutre (voir figure 4.21). La dalle est une dalle pleine en béton armé, d'une largeur de 800 mm et d'une épaisseur de 100 mm. Le ferrillage est constitué de deux nappes de 3.93cm^2 chacune.

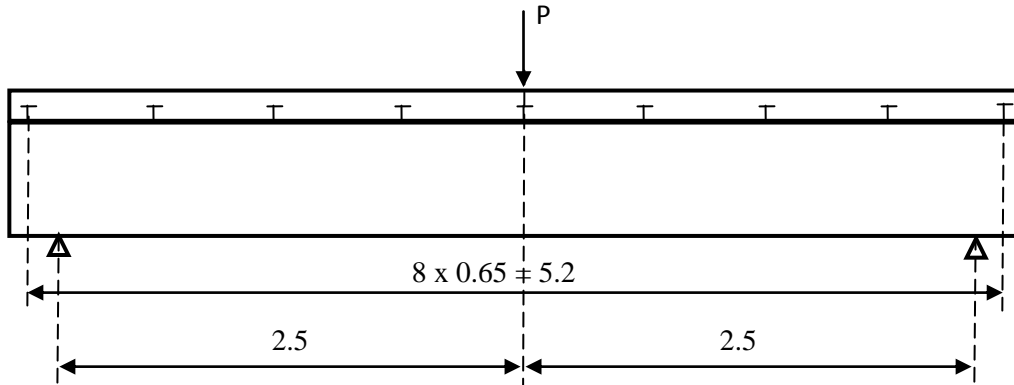


Figure 4.21. Configuration de la poutre P2

Les caractéristiques mécaniques des matériaux des poutres mixtes testées sont rappelées en Tableau 4.4. Il faut noter que le ferrillage n'est pas modélisé. Ces caractéristiques sont décrites ci-après :

Béton	Module d'élasticité	28000 MPa
	Coefficient de Poisson	0.2
	Masse volumique	2300 Kg.m^{-3}
Armatures	Module de Young	200000 MPa
	Coefficient de Poisson	0.3
	Masse volumique	7850 Kg.m^{-3}
Acier	Module de Young	210000 MPa
	Coefficient de Poisson	0.3
	Masse volumique	7850 Kg.m^{-3}
Connexion	Module de Young	210000 MPa
	Coefficient de Poisson	0.3
	Masse volumique	7850 Kg.m^{-3}

Tableau4.4. Caractéristiques mécaniques de la dalle, profilé et goujons

Les figures (4.22 et 4.23) ci-après montrent la courbe de variation de la flèche en fonction du chargement concentré P calculée par Cast3m et les essais expérimentaux [60] et numérique [61] respectivement, les courbes obtenues par les deux modèles s'avèrent être en bonne concordance (bonne estimation de la rigidité) quel que soit le chargement.

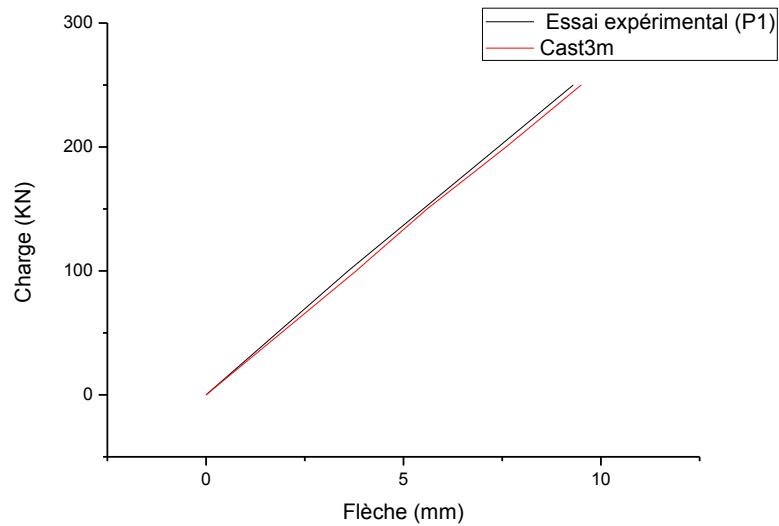


Figure 4.22. Courbe charge – flèche à mi- portée de P1

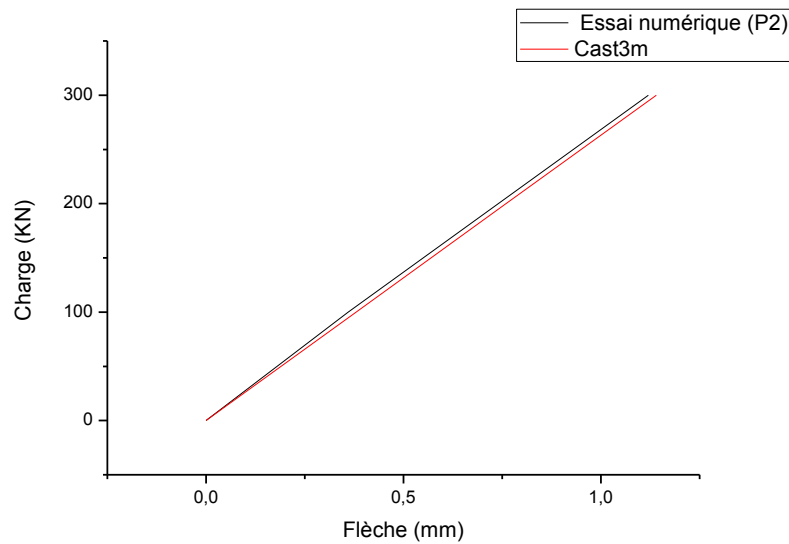


Figure 4.23. Courbe charge – flèche à mi- portée de P2

La bonne concordance des résultats a permis l'utilisation de ce modèle élément fini pour la calibration du modèle analytique décrit précédemment dans le paragraphe suivant.

4.6. Conclusion :

Le modèle volumique 3D (*CUB8*), bien que pertinent pour caractériser le comportement en service des poutres mixtes, ne permet pas de réaliser des calculs à l'avantage d'un temps de calcul conséquent.

Grâce au modèle 3D, développé ci-haut après avoir assemblé les modèles partiels (*COQ4*), (acier seul, béton) décrits dans ce chapitre, nous avons pu mettre en évidence l'influence de la souplesse du support sur le comportement en service des poutres mixtes et évaluer la flèche des poutres cellulaires mixtes.

Après avoir validé le modèle numérique linéaire décrit ci-dessus, des applications sont menées en vue d'une analyse numérique dans le domaine linéaire à savoir la contribution de la flèche additionnelle sur la flèche totale des poutres mixtes cellulaires sur appuis simples dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Etude paramétrique

5.1. Introduction :

Dans le chapitre précédent nous avons défini un modèle par élément finis en utilisant le logiciel Cast3m, ainsi nous l'avons validé avec les méthodes analytiques pour le calcul de la flèche maximale des poutres métalliques à âmes pleine. Dans ce chapitre nous allons exploiter ce modèle dans l'intention de mener une étude paramétrique dans le domaine linéaire à savoir l'influence de la flèche due au cisaillement sur la flèche totale des poutres cellulaires mixtes soumises à l'effet d'une charge transversale.

Dans La présence des ouvertures engendre une augmentation de la flèche sur la longueur de l'ouverture. A cet effet, notre analyse s'oriente donc vers l'étude de la flèche et des déformations engendrées par l'effet de cisaillement au niveau des ouvertures des poutres métalliques cellulaires.

Dans ce contexte, Nous étudierons alors, des poutres cellulaires isostatiques, chargées soit par une ou deux charges ponctuelles, soit par une charge uniformément répartie. Chacune des différentes configurations considérées est illustrée par des figures dans chaque exemple.

Les étapes suivantes seront suivies :

- Dans la première étape, nous présentons une validation des résultats théoriques avec les résultats numériques.
- Dans la deuxième étape, nous présentons une étude paramétrique sur l'effet de la flèche additionnelle sur la flèche totale, en faisant varier le nombre d'ouvertures, types de profilé, l'espacement entre ouvertures et l'épaisseur de la dalle.

5.2. Calibrage des résultats analytiques avec le modèle numérique:

Une comparaison de résultats est établie dans la figure 5.1, entre les valeurs de la flèche maximale (f_4) décrite par l'approche analytique prise comme référence de base[52] et celles obtenues par la solution numérique (f_{MEF}) en utilisant le logiciel Cast3m.

Cette comparaison est effectuée en fonction de différentes valeurs des rapports (Longueur / Hauteur) variant entre 9 à 14 qui correspondent aussi bien au nombre des ouvertures dans la poutre.

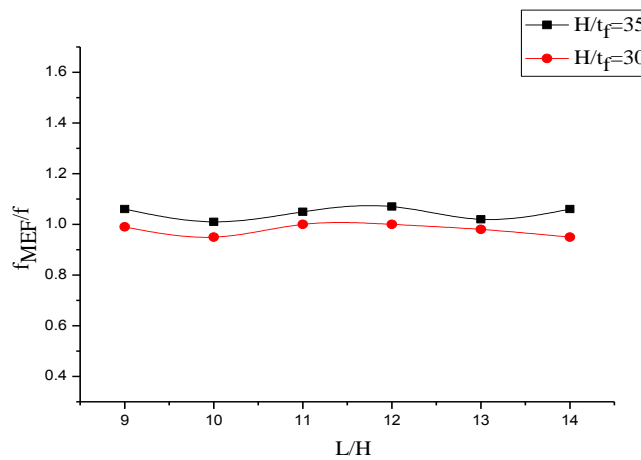
Deux types de profilés IPE400 et IPEA550 ont été utilisée dans cette comparaison dont les valeurs de rapports (Hauteur / épaisseur de la semelle) sont égales respectivement à 30 et 35;ce

choix peut être envisageable pour toutes les sections IPE, car quelle que soit la section IPE choisie, les courbes présentent la même évolution.

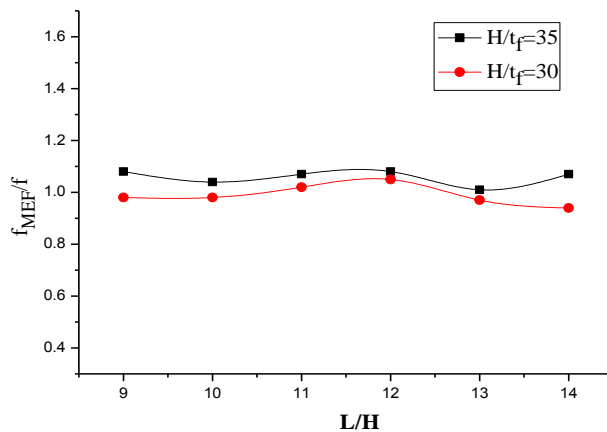
Les poutres étudiées dans notre analyse sont des poutres simplement appuyées sous l'effet de chacun des trois types de chargement (charge uniformément répartie, une charge concentrée à mi- portée de la poutre et deux charges concentrées symétriques).

L'épaisseur de la dalle en béton a été prise égale à 120 mm.

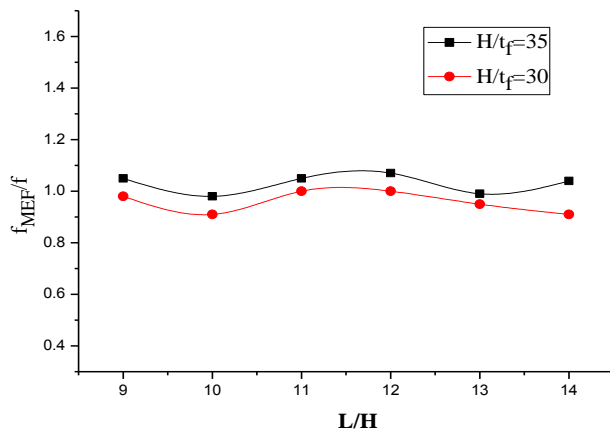
Toutes les flèches ont été calculées pour une charge (non pondérée) correspondant à la valeur de la flèche obtenue par l'approche proposée (f_4) qui ne devrait pas dépasser la valeur limite de flèche (condition de la flèche : $f_4 \leq L/250$).



a) Cas d'une charge uniformément répartie



b) Cas d'une charge concentrée à mi- portée de la poutre



c) Cas de deux charges concentrées symétriques

Figure 5. 1. Rapports de la flèche (f_{MEF}/f) en fonction (L / H)

À partir des résultats donnés dans la figure 1, il est bien remarqué que les valeurs de la flèche maximale obtenues par l'approche analytique proposée selon la référence [52] sont proches à celles obtenues par la solution numérique (f_{MEF}).

Les valeurs de la flèche maximale des poutres métalliques cellulaires sont présentées dans les tableaux 5.1, 5.2 et 5.3 avec plus de détails.

L/H	IPE400				IPE A 550			
	Charge (kN/m)	f_{MEF} (cm)	f (cm)	f_{MEF}/f	Charge (kN/m)	f_{MEF} (cm)	f (cm)	f_{MEF}/f
9	219.512	2.30	2.16	1.06	210.219	2.86	2.88	0.99
10	175.182	2.42	2.40	1.01	170.213	3.05	3.20	0.95
11	125.714	2.78	2.64	1.05	122.648	3.53	3.52	1.00
12	103.971	3.10	2.90	1.07	102.400	3.85	3.84	1.00
13	78.195	3.17	3.12	1.02	76.753	4.07	4.15	0.98
14	66.932	3.56	3.36	1.06	65.979	4.28	4.48	0.95

Tableau 5.1. Valeurs de la flèche des poutres cellulaires soumises à une charge uniformément répartie

Les résultats obtenus selon le tableau 5.1, montre que l'écart de différence entre les valeurs analytiques et les valeurs obtenues numériquement peut atteindre 7% et 5% respectivement pour IPE400 et IPEA550.

L/H	IPE400				IPE A 550			
	Charge (kN)	f_{MEF} (cm)	F (cm)	f_{MEF}/f	Charge (kN)	f_{MEF} (cm)	f (cm)	f_{MEF}/f
9	727.273	2.33	2.16	1.08	920.128	2.82	2.88	0.98
10	645.161	2.50	2.40	1.04	833.333	3.13	3.20	0.98
11	512.621	2.84	2.64	1.07	661.654	3.60	3.52	1.02
12	464.516	3.14	2.90	1.08	605.678	4.03	3.84	1.05
13	378.641	3.16	3.12	1.01	492.891	4.02	4.15	0.97
14	348.910	3.60	3.36	1.07	457.143	4.20	4.48	0.94

Tableau 5.2. Valeurs de la flèche des poutres cellulaires soumises à une charge concentrée à mi- portée

Les résultats obtenus selon le tableau 5.2, montre que l'écart de différence entre les valeurs analytiques et les valeurs obtenues numériquement peut atteindre 8% et 6% respectivement pour IPE400 et IPEA550.

L/H	IPE400				IPE A 550			
	Charge (kN)	f_{MEF} (cm)	f (cm)	f_{MEF}/f	Charge (kN)	f_{MEF} (cm)	f (cm)	f_{MEF}/f
9	432.866	2.28	2.16	1.05	552.783	2.81	2.88	0.98
10	411.664	2.35	2.40	0.98	534.224	2.92	3.20	0.91
11	287.582	2.79	2.64	1.05	373.277	3.54	3.52	1.00
12	274.286	3.11	2.90	1.07	358.878	3.85	3.84	1.00
13	205.263	3.08	3.12	0.99	268.387	3.95	4.15	0.95
14	196.491	3.49	3.36	1.04	258.959	4.10	4.48	0.91

Tableau 5.3. Valeurs de la flèche des poutres cellulaires soumises à deux charges concentrées symétriques.

Les résultats obtenus selon le tableau 5.3, montre que l'écart de différence entre les valeurs analytiques et les valeurs obtenues numériquement peut atteindre 7% et 9% respectivement pour IPE400 et IPEA550.

5.3. Influence du nombre d'ouvertures sur la contribution de la flèche additionnelle :

Nous allons montrer dans ce qui suit l'influence du nombre d'ouvertures sur la contribution de la flèche additionnelle des poutres cellulaires mixtes, en faisant augmenter à chaque fois le nombre des ouvertures (9 à 14 ouvertures), sous l'effet de trois types de charges différents (charge uniformément répartie, une charge concentrée à mi- portée de la poutre et deux charges concentrées symétriques), voir figures 5.2, 5.3 et 5.4.

Le type de profilé utilisé dans cette étude est un IPE400 avec un espacement entre ouvertures estimé de 15mm, et l'épaisseur de la dalle en béton a été prise égale à 120 mm.

➤ **Cas d'une charge concentrée à mi-portée de la poutre :**

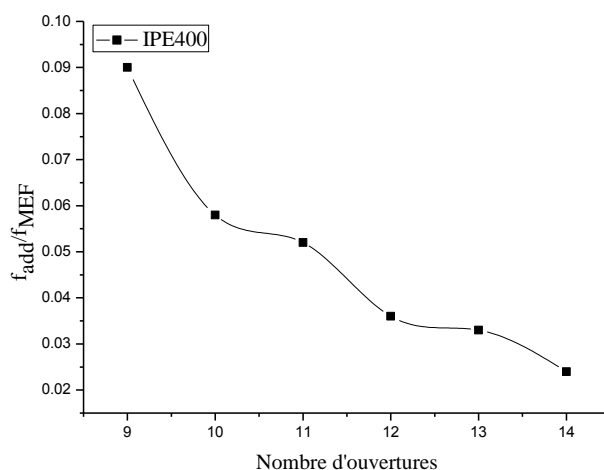


Figure 5. 2. Contribution de f_{add} en fonction du nombre d'ouvertures (1CC)

A partir des résultats obtenus selon le graphique représenté ci-dessus, il est bien constaté que pour le cas des poutres mixtes cellulaires de courte portée (poutres avec 9 ouvertures d'âme), la flèche additionnelle (f_{add}) contribue d'environ 9% à la flèche totale tandis que pour le cas des poutres de longue portée (poutres avec 14 ouvertures d'âme) il est bien remarqué que cette contribution diminue très rapidement d'environ 2,4%.

➤ **Cas de deux charges concentrées symétriques :**

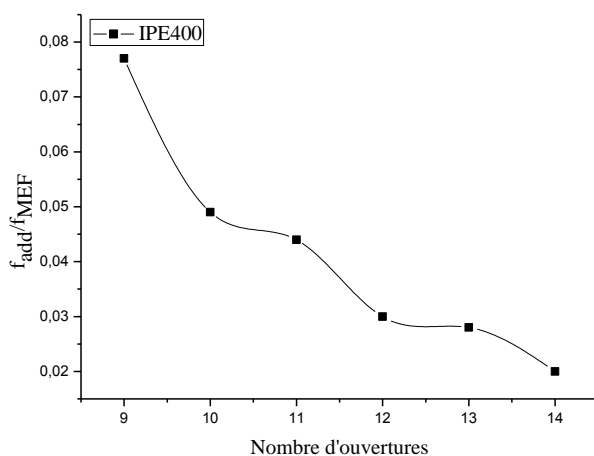


Figure 5. 3. Contribution de f_{add} en fonction du nombre d'ouvertures (2CC)

A partir les résultats obtenus selon le graphique représenté ci-dessus, il est bien constaté que pour le cas des poutres mixtes cellulaires de courte portée (poutres avec 9 ouvertures d'âme), la flèche additionnelle (f_{add}) contribue d'environ 7.7% à la flèche totale tandis que pour le cas

des poutres de longue portée (poutres avec 14 ouvertures d'âme) il est bien remarqué que cette contribution diminue très rapidement d'environ 2%.

➤ **Cas d'une charge uniformément répartie :**

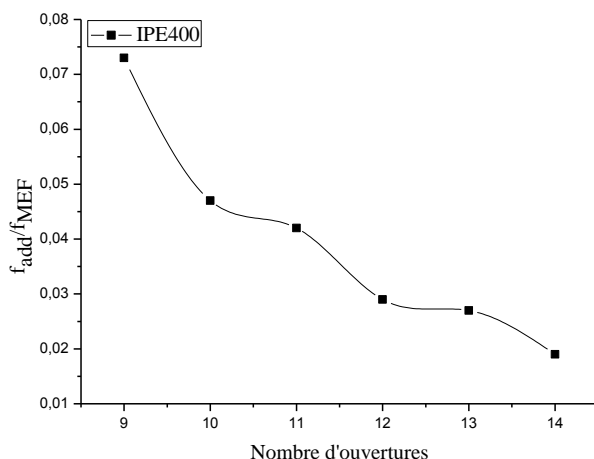


Figure 5. 4. Contribution de f_{add} en fonction du nombre d'ouvertures (CUR)

A partir des résultats obtenus selon le graphique représenté ci-dessus, il est bien constaté que pour le cas des poutres mixtes cellulaires de courte portée (poutres avec 9 ouvertures d'âme), la flèche additionnelle (f_{add}) contribue d'environ 7,3% à la flèche totale tandis que pour le cas des poutres de longue portée (poutres avec 14 ouvertures d'âme) il est bien remarqué que cette contribution diminue très rapidement d'environ 1,9%.

La contribution de la flèche additionnelle (f_{add}) due au cisaillement par rapport à la flèche totale est donc plus grande pour le cas des poutres mixtes cellulaires de courte portée et intermédiaires que pour le cas des poutres longues.

5.4. Influence du type de profilé sur la contribution de la flèche additionnelle :

Dans ce paragraphe, une comparaison a été faite entre la contribution des flèches additionnelles dans les poutres cellulaires mixtes 'acier-béton' en fonction du nombre d'ouvertures pour différents types de profilés (IPE400 et IPE500).

Les poutres étudiées sont soumises à l'effet de chacun des trois types de charges différents (charge uniformément répartie, une charge concentrée à mi- portée de la poutre et deux charges concentrées symétriques), voir tableaux 5.4, 5.5 et 5.6.

➤ **Cas d'une charge concentrée à mi- portée de la poutre :**

Nombre d'ouvertures	IPE400	IPE500
	f_{add}/f_{MEF}	f_{add}/f_{MEF}
09	0.090	0.048
10	0.058	0.030
11	0.052	0.027
12	0.036	0.018
13	0.033	0.017
14	0.024	0.012

Tableau 5.4.Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (IPE) « 1CC »

D'après les valeurs obtenues selon le tableau 5.4, il est à remarquer pour le cas d'une charge concentrée à mi- portée de la poutre, que plus la section (IPE) est plus grande et moins importante, elle est la contribution de la flèche additionnelle par rapport à la flèche totale.

➤ **Cas de deux charges concentrées symétriques :**

Nombre d'ouvertures	IPE400	IPE500
	f_{add}/f_{MEF}	f_{add}/f_{MEF}
09	0.077	0.041
10	0.049	0.026
11	0.044	0.023
12	0.030	0.016
13	0.028	0.014
14	0.020	0.010

Tableau 5.5.Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (IPE) « 2CC »

De même pour le cas de deux charges concentrées symétriques selon le tableau 5.5, il est à remarquer que plus la section (IPE) est plus grande et moins importante, elle est la contribution de la flèche additionnelle par rapport à la flèche totale.

➤ **Cas d'une charge uniformément répartie :**

Nombre d'ouvertures	IPE400	IPE500
	f_{add}/f_{MEF}	f_{add}/f_{MEF}
09	0.073	0.039
10	0.047	0.024
11	0.042	0.022
12	0.029	0.015
13	0.027	0.014
14	0.019	0.001

Tableau 5.6.Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (IPE) « CUR »

De même pour le cas d'une charge uniformément répartie selon le tableau 5.6, on constate que plus la section (IPE) est plus grande et moins importante, elle est la contribution de la flèche additionnelle par rapport à la flèche totale.

5.5. Influence de l'espacement entre ouvertures :

Dans cette étude et afin de montrer le rôle que peut jouer l'espacement entre ouvertures sur la contribution de la flèche additionnelle par rapport à la flèche totale des poutres cellulaires mixtes.

Dans ce cas, deux poutres cellulaires mixtes avec un espacement entre ouvertures différent (10mm, 12mm et 15mm), sous l'effet de chacun des trois types de charges différents (charge uniformément répartie, une charge concentrée à mi- portée de la poutre et deux charges concentrées symétriques) ont été étudiée, voir tableaux 5.7, 5.8 et 5.9.

Le type de profilé utilisé dans cette étude est un IPE400, et l'épaisseur de la dalle en béton a été prise égale à 120 mm.

➤ Cas d'une charge concentrée à mi- portée de la poutre :

Nombre d'ouvertures	W= 10mm	W= 12mm	W= 15mm
	f_{add}/f_{MEF}	f_{add}/f_{MEF}	f_{add}/f_{MEF}
09	0.117	0.107	0.090
10	0.078	0.069	0.058
11	0.071	0.062	0.052
12	0.048	0.043	0.036
13	0.045	0.040	0.033
14	0.031	0.028	0.024

Tableau 5.7. Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (w) « ICC »

Selon le tableau 5.7, Il est à constater d'après les résultats obtenus de la flèche pour le cas d'une poutre soumise à l'effet d'une charge concentrée à mi- portée, que la contribution de la flèche additionnelle diminue au fur et à mesure avec l'augmentation de l'espacement entre les ouvertures (w).

➤ **Cas de deux charges concentrées symétriques :**

Nombre d'ouvertures	W= 10mm	W= 12mm	W= 15mm
	f_{add}/f_{MEF}	f_{add}/f_{MEF}	f_{add}/f_{MEF}
09	0.101	0.091	0.077
10	0.066	0.058	0.049
11	0.060	0.053	0.044
12	0.041	0.036	0.030
13	0.038	0.033	0.028
14	0.027	0.024	0.020

Tableau 5.8.Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (w) « 2CC »

De même selon le tableau 5.8, pour le cas d'une poutre soumise à l'effet de deux charges concentrées symétriques, nous remarquons que la contribution de la flèche additionnelle diminue au fur et à mesure avec l'augmentation de l'espacement entre les ouvertures (w).

➤ **Cas d'une charge uniformément répartie :**

Nombre d'ouvertures	W= 10mm	W= 12mm	W= 15mm
	f_{add}/f_{MEF}	f_{add}/f_{MEF}	f_{add}/f_{MEF}
09	0.098	0.089	0.073
10	0.063	0.056	0.047
11	0.057	0.051	0.042
12	0.039	0.034	0.029
13	0.036	0.032	0.027
14	0.026	0.023	0.019

Tableau 5.9.Rapports de flèche (f_{add}/f_{MEF}) pour différents (w) « CUR »

De même d'après les résultats obtenus de la flèche selon le tableau 5.9, pour le cas d'une poutre soumise à l'effet d'une charge uniformément répartie, nous remarquons que la contribution de la flèche additionnelle est inversement proportionnelle avec l'augmentation de l'espacement entre les ouvertures (w).

5.6. Influence de l'épaisseur de la dalle sur la contribution de la flèche additionnelle :

Dans ce paragraphe, nous allons montrer l'influence de l'épaisseur de la dalle sur la contribution de la flèche additionnelle par rapport à la flèche totale des poutres cellulaires mixtes, soumises à l'effet de chacun des trois types de charges différents (charge uniformément répartie, une charge concentrée à mi- portée de la poutre et deux charges concentrées symétriques).

On compare entre les valeurs obtenues du rapport de la flèche additionnelle sur la flèche totale (f_{add}/f_{MEF}) pour différentes épaisseurs de la dalle (10cm, 12cm et 16cm) pour le même type de profilé IPE400 (voir figures 5.5, 5.6 et 5.7).

➤ **Cas d'une charge concentrée à mi- portée de la poutre :**

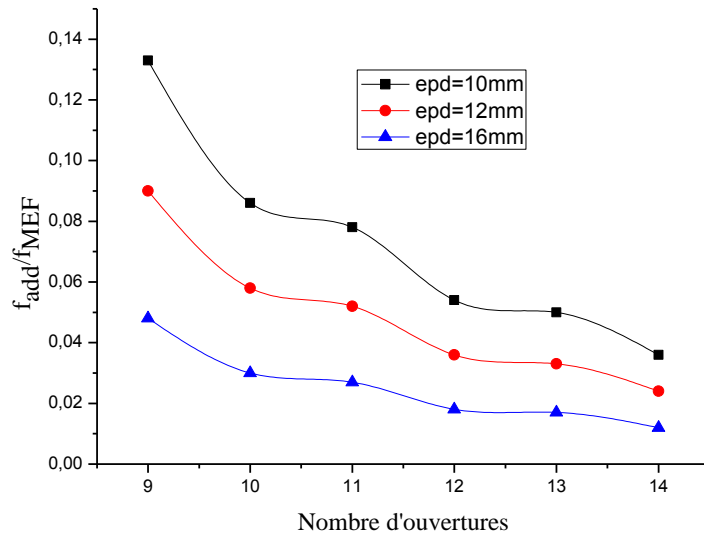


Figure 5. 5. Contribution de f_{add} pour différentes épaisseurs de la dalle (1CC)

A partir des résultats obtenus selon le graphique représenté ci-dessus (figure 5.5), il est bien constaté pour le cas d'une charge concentrée à mi- portée de la poutre, que plus l'épaisseur de la dalle augmente et moins elle est la contribution de la flèche additionnelle.

➤ **Cas de deux charges concentrées symétriques:**

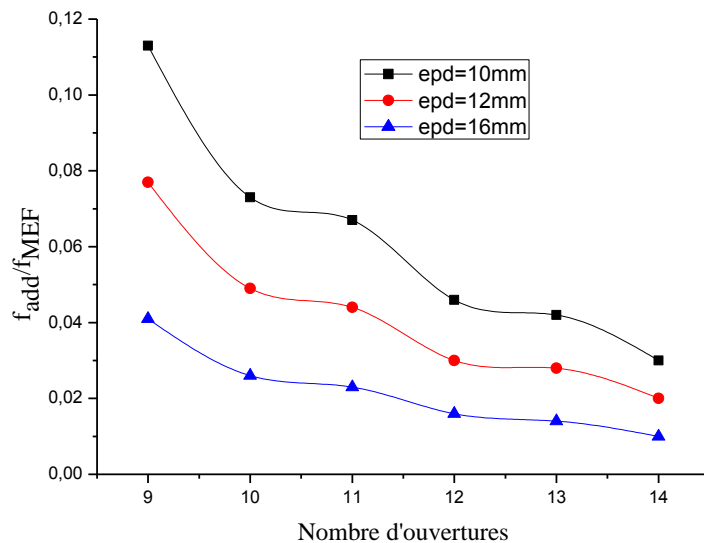


Figure 5. 6. Contribution de f_{add} pour différentes épaisseurs de la dalle (2CC)

De même pour le cas de deux charges concentrées symétriques selon la figure 5.6, il est à remarquer que plus l'épaisseur de la dalle augmente et moins elle est la contribution de la flèche additionnelle.

➤ **Cas d'une charge uniformément répartie :**

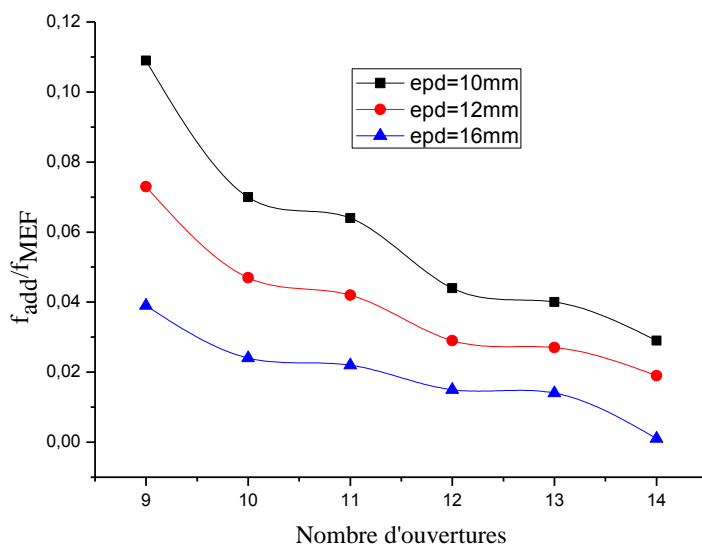


Figure 5. 7. Contribution de f_{add} pour différentes épaisseurs de la dalle (CUR)

De même pour le cas d'une charge uniformément répartie selon la figure 5.7, on constate que plus l'épaisseur de la dalle augmente et moins elle est la contribution de la flèche additionnelle.

5.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement des poutres cellulaires mixtes à savoir la contribution du cisaillement sur la flèche totale, chargées soit par une force ponctuelle, soit par une charge répartie. Les différentes configurations ont été illustrées.

Concernant les résultats trouvés, nous avons présenté dans un premier lieu une étude comparative, dont on a validé les résultats obtenus numériquement avec ceux obtenus théoriquement, sur le calcul de la flèche maximale des poutres cellulaires mixtes ayant différents profilés.

Nous avons ensuite présenté dans un troisième lieu une étude paramétrique sur l'effet de la flèche additionnelle sur la flèche totale, en faisant varier le nombre d'ouvertures, types de profilé, l'espacement entre ouvertures et l'épaisseur de la dalle.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion :

Les travaux de recherches qui ont été conduits sur le comportement des poutres cellulaires mixtes dans le domaine élastique (vérification basée sur l'analyse des contraintes et le calcul de la flèche) ainsi que dans le domaine plastique (analyse sur la résistance ultime) sur l'étude n'ont pas toujours été traduits en recommandations simples à utiliser dans les règlements qui ont toujours un caractère provisoire. Les poutres avec ouvertures ne peuvent pas être catégorisées en des formats identiques. C'est pourquoi le calcul classique de ce type de poutres qui est basé sur un modèle élastique n'est pas simple à appliquer. En vertu de quoi l'approche numérique a été privilégiée afin de prédire le comportement de ces poutres.

Par conséquent, l'objectif principal de notre travail était, d'une part de mener une étude analytique sur la contribution de la flèche additionnelle et d'autre part d'élaborer un modèle numérique simple permettant le calcul de la flèche totale et d'estimer l'influence de la flèche due au cisaillement des poutres cellulaires mixtes sous l'effet d'un chargement transversal.

Des méthodes analytiques ont été présentées dans ce mémoire pour prédire la flèche totale d'une poutre mixte cellulaire symétrique soumise à l'effet de charges transversales. Cette flèche est l'addition de la flèche due à la flexion globale de la poutre mixte acier-béton ainsi que de la flèche additionnelle engendrée par l'effort tranchant de l'âme au niveau de l'ouverture qui provient de l'effet Vierendeel.

Un modèle numérique basé sur le logiciel d'éléments finis en 3D CASTEM a été développé pour étudier le comportement des poutres cellulaires mixtes à l'état élastique à savoir la contribution de la flèche additionnelle sur la flèche totale. Les poutres en acier ont été modélisées à l'aide d'éléments coques, la dalle en béton armé a été modélisée par des éléments coques multicouches et les connecteurs de type goujons ont été modélisés par des éléments POUTRE. Le modèle numérique élaboré a permis de faire les conclusions suivantes:

- la contribution de la flèche additionnelle due au cisaillement sur la flèche totale est plus importante pour le cas des poutres mixtes cellulaires de courte portée et intermédiaires que pour le cas des poutres longues.
- Plus la section (IPE) est plus grande et moins importante, elle est la contribution du cisaillement au calcul de la flèche totale des poutres cellulaires mixtes.

- la contribution de la flèche additionnelle est inversement proportionnelle avec l'augmentation de l'espacement entre les ouvertures (w).
- la contribution de la flèche additionnelle diminue au fur et à mesure avec l'augmentation de l'épaisseur de la dalle.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D. BITAR, P.O.MARTIN, Y.GALEA, T.DEMARCO, « Poutres cellulaires acier et mixtes : Partie 1, proposition d'un modèle pour la résistance des montants », Revue Construction Métallique (CTICM), n°1, pp.15-39, 2006.
- [2] FONDS DE RECHERCHE POUR LE CHARBON ET L'ACIER, « Ouvertures de grandes dimensions dans les âmes pour l'intégration des équipements techniques dans les planchers mixtes », guide de dimensionnement des poutres mixtes comportant des ouvertures d'âme de grandes dimensions ; juin 2006.
- [3] R.M.LAWSON, J.LIMB, S.J.HICKS, W.I.SIMMS, « Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings », Journal of Constructional Steel Research, Volume 62, Issue 6, pp 614-629, June 2006.
- [4] J.K. WARD, « Design of composite and non composite cellular beams », SCI (The Steel Construction Institute) Publication P100, United Kingdom, 1990.
- [5] ENV 1993-1-1: Eurocode3, « Design of steel structures - Annex N: Openings in webs", European Committee for Standardization, 1993.
- [6] ENV 1994-1-1: Eurocode4, « Design of Composite Steel and concrete Structures », European Committee for Standardization, 1998.
- [7] CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) « CAST3M Website », <http://www-cast3m.cea.fr>
- [8] D. E. KERDAL, D.A. NETHERCOT, « Failure modes of castellated beams », Journal of constructional steel research, vol.4, pp.295-315, 1984.
- [9] S.DEMIRDJIAN, « Stability of Castellated Beam Webs », Thèse de master, McGill University, Monreal, 1999.
- [10] K.D. TSAVDARIDIS, « Structural Performance of perforated steel beams with novel web openings and with partial concrete encasement », Thèse de doctorat, School of Engineering and Mathematical Sciences City University London, 2010.
- [11] M.U. HUSAIN, W.G. SPEIRS, « Failure of castellated beams due to rupture of welded joints », Acier-Stahl-Steel, No. 1, 1971.
- [12] M.D. ALTIFILLISCH, B.R. COOKE, A.A. TOPRAC, « An investigation of open web expanded beams », Welding Research Council Bulletin, Series No.47. pp 77s-88s, 1957.
- [13] A.A. TOPRAC, B.R. COOKE, « An experimental investigation of open-web beams. Welding Research Council Bulletin, New York. Series No.47, pp 1 – 10, 1959.

- [14] A.N. SHERBOURNE, «The plastic behavior of castellated beams », Proc. 2nd Commonwealth Welding Conference. Inst. Of Welding, No. C2, London. pp 1-5, 1966.
- [15] R.G. REDWOOD, « Analyse et dimensionnement des poutres ayant des ouvertures dans les âmes », Revue Construction métallique, n°3, pp.15-27, 1978.
- [16] K.F. CHUNG, TCH. LIU, ACH KO, « Investigation on Vierendeel Mechanism in steel beams with circular web openings », Journal of Constructional Steel Research, vol.5, pp. 467-490, 2001.
- [17] K.F. CHUNG, TCH. LIU, ACH KO, « Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalized moment shear interaction curve », Journal of Constructional Steel Research, vol.59, pp. 1177-1200, 2003.
- [18] P. HALLEUX, « Limit analysis of castellated steel beams », Acier-Stahl-Steel, 325, 133- 144, 1967.
- [19] A. BAZILE, J. TEXIER, « Essais de poutres ajourées (Tests on castellatedbeams) », Constr. Métallique, Paris, France, Vo1.3, pp 12-25, 1968.
- [20] S. DURIF, « Comportement mécanique des poutres cellulaires à ouvertures sinusoïdales-développement d'un modèle analytique adapté -». Laboratoire : Institut Pascal, Clermont Ferrand, France, Thèse de doctorat, 2012.
- [21] F. ERDAL et M. POLAT SAKA, « Ultimate load carrying capacity of optimally designed cellular beams », Journal of Constructional Steel Research 80 (2013) 355–368, 2013.
- [22] D.M. TODD, P.B. COOPER, « Strength of Composite Beams with Web Openings »,Journal of the Structural Division, Vol. 106, No. 2, pp. 431-444, February 1980.
- [23] C.M. DONOGHUE, « Composite Beams with Web Openings: Design » Journal of the Structural Division, Vol. 108, No. 12, pp. 2652-2667, December 1982.
- [24] W.C.CLAWSON, D.DARWIN, « Tests of Composite Beams with Web Openings » Journal of the Structural Division, Vol. 108, No. 1, pp. 145-162, January 1982.
- [25] W.C.CLAWSON, D.DARWIN, « Strength of Composite Beams at Web Openings » Journal of the Structural Division, Vol. 108, No. 3, pp. 623-641, March 1982.
- [26] R. G. REDWOOD, G. POUMBOURAS,« Tests of composite beams with web holes » Can. J. Civ. Eng. 10(4): pp 713–721, 1983.
- [27] D.DARWIN, R.C.DONAHEY, « LRFD for Composite Beams with Unreinforced Web Openings » Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 3, pp. 535-552, March 1988.

- [28] R.C.DONAHEY, D.DARWIN, « Web Openings in Composite Beams with Ribbed Slabs », Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 3, pp. 518-534, March 1988.
- [29] D.DARWIN, W.K.LUCAS, « LRFD For Steel and Composite Beams with Web Openings », Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 6, pp. 1579-1593, June 1990.
- [30] ASCE (Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete), « Commentary on Proposed Specification for Structural Steel Beams with Web Openings (with Design Example) », Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 12, pp. 3325-3349, December 1992.
- [31] P.H.DAYAWANSA, « Elastic Deflection of Steel and Composite Beams with Web Penetrations », Journal of Structural Engineering, Vol. 70, No. 21, 3 November 1992.
- [32] R.M. LAWSON, K.F.CHUNG, A.M.PRICE, « Tests on Composite Beams with Large Web Openings to Justify Existing Design Methods », Journal of the structural engineer, vol. 70, N°1, pp 1-7, January 1992.
- [33] British Standards Institution BS5950: « Structural use of steelwork in building », Part 3 Section 3.1: Code of practice for design of composite beams, 1990.
- [34] S.H. CHO, R.G. REDWOOD, « Slab behaviour in composite beams at openings.2. Tests and verification », Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No.9, pp 2304-2322 SEP 1992.
- [35] K. S. KIM, Y.S. YANG, S.H. CHO, P.J.KIM, « The Behavior of Composite Beams with Reinforced Web Opening according to the Opening Ratio », Korean Journal of Steel Construction , Vol.5, No.3, pp 161-168, 1993.
- [36] R.G. REDWOOD, S.H. CHO, « Design of steel and composite beams with web openings », Journal of Constructional Steel Research, Volume 25, Issues 1-2, Pages 23-41, 1993.
- [37] E. H. FAHMY, « Analysis of composite beams with rectangular web openings », Journal of Constructional Steel Research, Volume 37, Issue 1, Pages 47-62, March 1996.
- [38] G.S.VERISSIMO, R.H.FAKURY, « Design of steel and composite beams with web openings », Journal of Constructional Steel Research, Volume 46, Issues 1-3, Page 207, April-June 1998.
- [39] M.A. BENITEZ, D.DARWIN, R.C. DONAHEY, « Deflections of Composite Beams with Web Openings », Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 10, pp. 1139-1147, October 1998.
- [40] ASCE, « Specifications for Structural Steel Beams with Web Openings », (ASCE 23-97) Journal of Structural Engineering, ASCE, 0-7844-0300-7, 20 pp, 1999.

- [41] R.G. REDWOOD, « **Behaviour of composite castellated beams**», Progress in Structural Engineering and Materials Volume 2, Issue 2, 164-168, April/June 2000.
- [42] K.F. CHUNG, R.M.LAWSON, « Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode4 », Journal of Constructional Steel Research, Volume 57, Issues 2, PP 135-164, January 2001.
- [43] E. H. FAHMY, A. A. HASSANEIN, « Analysis of composite beams with web opening », 4th Structural Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering Montréal, Québec, Canada June 5-8, 2002.
- [44] [J.W. PARK](#), [C.H.KIM](#), [S.C.YANG](#), « Ultimate Strength of Ribbed Slab Composite Beams with Web Openings », Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 6, pp. 810-817, June 2003.
- [45] K. F. CHUNG, C.H.KO, A.J.WANG. « Design of steel and composite beams with web openings - Verification using finite element method », Steel and Composite Structures 5 (2-3): 203-233 Apr-Jun 2005.
- [46] P.O. MARTIN, Y. GALEA, D. BITAR, T. DEMARCO, « Poutres cellulaires acier et mixtes : Partie 2, proposition de nouveaux modèles analytiques de calcul de la flèche », Revue Construction Métallique (CTICM), n°2, pp.15-33, 2006.
- [47] P.O.MARTIN, D. BITAR, Y. GALEA, « Flambement du montant, mise au point d'une méthode de dimensionnement », rapport interne n° 7.013-08 : ACB design optimisation, 2003.
- [48] Y. GALEA, P.O. MARTIN, D. BITAR, « calcul de la flèche, mise au point d'une nouvelle méthode », rapport interne n° 7.013-09 : ACB design optimisation, 2003.
- [49] W.RAMM, C.KOHLMEYER, « Shear-Bearing Capacity of the Concrete Slab at Web Openings in Composite Beams », Composite Construction in Steel and Concrete V. Proceedings of the 5th international conference, July 2004, Kruger National Park, Berg-en-Dal, Mpumalanga, South Africa. American Society of Civil Engineers, pp. 214-225, 2006.
- [50] M.GIZEJOWSKI, W.SALAH, « Numerical Modeling of Composite Castellated Beams », (ASCE) Composite Construction in Steel and Concrete VI: pp. 554-565, 2011.
- [51] P.O. MARTIN, M. COUCHAUX, O. VASSART et A. BUREAU, « Modèle de résistance pour les poutres cellulaires Angelina en acier et mixtes » Revue C.M. N° 1-2013.
- [52] B. DJEBLI, D. E. KERDAL, A. ABIDELAH, « The Total Deflection of Composite Cellular Beams Under Transverse Loading » Arab J SciEng (2014) 39: 6815–6824.
- [53] D. MATEESCO et G. MERCEA, «un nouveau type de poutres ajourées» Revue C.M. N° 3-1981.

- [54] B.K. DOUGHERTY, « Elastic deformation of beams with web openings » J. Struct. Div, ASCE, 106(1), pp. 301-12, 1980.
- [55] ENV 1993-1-1: Eurocode3, « Design of steel structures », European Committee for Standardization, 1998.
- [56] I.G. RAFTOYIANNIS et G.I. IOANNIDIS, « Deflection of Castellated I-Beams under Transverse Loading », Steel Structures 6, pp. 31-36, 2006.
- [57] S. BOUKARI, « Contribution à l'étude des potentialités du béton armé de haute performance par simulation numérique à l'aide des éléments finis », Thèse de Doctorat INSA de Toulouse, France, 2000.
- [58] M. LEMAIRE, « Construction d'un code de calcul par éléments finis. Elaboration d'un modèle de la fissuration et de la plastification de pièces en béton », Thèse de Doctorat INSA de Lyon, France, 1975.
- [59] A.A. KAMAL, « Modélisation et étude expérimentale de poutres mixte acier – béton à connexion partielle ou espacée », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, France, 1986.
- [60] J.M. ARIBERT, E. RAGNEAU et H. XU, « Développement d'un élément fini de poutre mixte acier – béton intégrant les phénomènes de glissement et de semi-continuité avec éventuellement voilement local », Construction Métallique, n°2-1993.