

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun de Tiaret



FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin études en vue de l'obtention du diplôme Master 2

Spécialité : Génie Civil

Option: structure

Présenté par : HAMAMDJI Amine

MAHBOUB Mahfoudh Riadh

Thème

**Modélisation Tridimensionnelle par éléments finis des poutres
mixtes : Étude comparative**

Soutenu Publiquement le mai 2024 devant le jury composé de :

M.KRIM Abdallah
M.B.DJEBLI Benyagoug
M.CHIKH Abdelbaki
M.KERROUM Nadir

Président
Encadrant
Examineur
Examineur

Année Universitaire : 2023 / 2024

Remerciement

En ce jour de conclusion de notre parcours académique, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à ALLAH, le Tout-Puissant, pour nous avoir guidés et soutenus tout au long de cette aventure.

À nos chers parents, véritables piliers de notre réussite, nous adressons nos plus sincères remerciements. Votre amour, votre encouragement constant et votre soutien financier ont été les forces qui ont alimenté notre persévérance.

À nos enseignants, source inépuisable de savoir et de sagesse, nous disons merci. Votre dévouement à l'éducation a été la lumière qui a éclairé notre chemin vers la connaissance. Chacun de vous a contribué à façonner notre pensée critique et à élargir nos horizons.

À notre encadrant, MR, DJEBLI Benyagoub, nous exprimons notre profonde reconnaissance. Votre expertise et vos conseils éclairés ont été les fondations sur lesquelles notre mémoire s'est construite. Votre mentorat a été précieux, et nous sommes honorés d'avoir eu l'opportunité de travailler à vos côtés.

Enfin, à tous ceux qui ont croisé notre chemin au cours de cette aventure académique, merci pour vos encouragements, vos conseils et votre amitié. Chacune de vos contributions a enrichi notre parcours.

Que ce moment de réussite soit partagé avec tous ceux qui ont joué un rôle dans notre éducation. Que nos réalisations soient une source d'inspiration pour les générations à venir.

Avec gratitude,

HAMAMDJI .A Et MAHBOUB .M

Dédicace

Avec une profonde gratitude, je dédie humblement ce travail à mon père et ma mère, gardiens de mon cœur pour leur soutien, leur amour et leurs prières tout au long de mes études.

- ❖ À mes sœurs pour leur encouragement inconditionnel.
- ❖ À mes chers amis pour leur aide.
- ❖ À mon enseignant **MR. DJEBLI Benyagoub** pour ces conseils éclairés et sa patience.
- ❖ À mon collègue **HAMAMDJI Amine** pour son aide et ses efforts.

MAHBOUB.M

Dédicace

- *À mes chers parents, piliers de ma vie et sources infinies d'amour et de soutien.*
- *À mes frères, compagnons de rire et de complicité.*
- *À mon encadrant **MR. DJEBLI Benyagoub** guide précieux dans mon parcours.*
- *À mon cher collègue **MAHBOUB Mahfodh**, pour ta présence et ton soutien dans cette aventure professionnelle.*

Merci pour tout ce que vous êtes et tout ce que vous apportez à ma vie.

HAMAMDJI.A

Résumé

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 rigidité et la résistance de l'élément. Les nombreux avantages structuraux et économiques qui peuvent être tirés de cette association ont été parmi les principaux facteurs qui ont permis le développement de ce type de structures aussi bien dans le bâtiment que dans les ouvrages d'art.

Malgré les avantages que présentent les poutres mixtes, la difficulté de la modélisation numérique de leur comportement réside dans la mise en œuvre d'un tel modèle en éléments finis massifs qui peut être trop complexe et parfois beaucoup trop lente.

La principale motivation du travail présenté dans ce mémoire est de présélectionner un modèle numérique par éléments finis souple en termes de temps de construction et d'exécution, semblant bien convenir à l'étude des comportements mécaniques des poutres mixtes dans le domaine linéaire et le domaine non linéaire, et ce à la base d'un modèle adoptée comme référence validé par rapport à des résultats (expérimental, numérique) disponibles dans la littérature.

Mots clés : *poutre mixte, comportement, modélisation numérique, modèle de référence, domaine linéaire, domaine non linéaire*

Abstract

The specificity of a composite beam is attributed to the mechanical combination of two materials of different natures and properties, steel and concrete, through a connection located at the interface of the materials, which increases both the stiffness and the strength of the element. The numerous structural and economic advantages that can be derived from this combination have been among the main factors that have led to the development of such structures in both building and civil engineering works.

Despite the advantages of composite beams, the challenge in numerically modeling their behavior lies in implementing such a model using massive finite elements, which can be too complex and sometimes excessively slow.

The main motivation of the work presented in this thesis is to preselect a flexible finite element numerical model in terms of construction and execution time, which appears to be suitable for studying the mechanical behaviors of composite beams in both linear and nonlinear domains. This is based on a model adopted as a reference, validated against results (experimental, numerical) available in the literature.

Keywords: *composite beam, behavior, numerical modeling, reference model, linear domain, nonlinear domain*

ملخص

تعود خصوصية العارضة المركبة إلى الجمع الميكانيكي بين مادتين ذات طبيعة وخصائص مختلفة، الصلب والخرسانة، من خلال اتصال يقع على سطح المواد، مما يزيد من صلابة وقوة العنصر. كانت المزايا الهيكلية والاقتصادية العديدة التي يمكن الحصول عليها من هذا الجمع من بين العوامل الرئيسية التي أدت إلى تطوير هذا النوع من الهياكل سواء في مجال البناء أو في أعمال الفنون.

على الرغم من المزايا التي تتمتع بها العوارض المركبة، فإن صعوبة تصميم سلوكها الرقمي تكمن في تنفيذ نموذج باستخدام عناصر محدودة كثيرة، والذي يمكن أن يكون معقدًا للغاية وفي بعض الأحيان بطيئًا للغاية.

الدافع الرئيسي للعمل الذي قدم في هذه المذكرة هو اختيار نموذج رقمي بواسطة العناصر المحدودة مرن من حيث البناء والتنفيذ، والذي يبدو مناسبًا لدراسة السلوك الميكانيكي للعوارض المركبة في المجال الخطي والمجال غير الخطي، استنادًا إلى نموذج تم اعتماده كمرجع وتم التحقق منه بالمقارنة مع النتائج (التجريبية، الرقمية) المتاحة في الدراسة الفنية.

كلمات مفتاحية: عوارض مركبة، سلوك، تمثيل رقمي، نموذج مرجعي المجال الخطي، المجال غير خطي

SOMMAIRE

Contents

Remerciement	
<i>Dédicace</i>	
<i>Dédicace</i>	
<i>Résumé</i>	
<i>Abstract</i>	
<i>ملخص</i>	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
Introduction générale	
INTRODUCTION GENERALE	
Plan général :	

Chapitre I

Généralité sur la construction mixtes

I.1 Introduction:	1
I.2 Définition:	1
I.3 Raisons d'utiliser des structures mixtes :	3
I.4 Différents types d'éléments mixtes :	4
I.4.1 Poteaux mixtes:	4
I.4.2 Dalles mixtes :	6
I.4.3 Poutres mixtes :	11
I.4.3.1 Les différentes formes des poutres mixtes :	13
I.4.3.2 La connexion :	13
I.4.3.3 Modes de connexion :	15
I.4.3.3.1 Connexion complète :	15
I.4.3.3.2 Connexion partiel :	16
I.6 Avantages de la construction mixte :	17
I.6.1 Pour les poteaux mixtes :	18
I.6.2 pour les dalles mixtes :	19
I.6.3 Pour les poutres mixtes :	20
1.7 Inconvénients :	21
1.8 Conclusion :	21

Chapitre II :

Revue de la littérature

II.1 Introduction :	24
II.2 Historique des méthodes de calcul des poutres mixtes :	24

Chapitre 3

Modèle numérique de référence

3.1. Introduction.....	31
3.2. Organisation d'un calcul :	31
3.3. Modélisation linéaire	34
3.3.1 Conditions aux limites et chargement	34
3.3.2 Loi de comportement.....	34
3.3.3 Comparaison des résultats.....	35
3.4. Modélisation non-linéaire	37
3.4.1 Conditions aux limites et chargement	37
3.4.2 Loi de comportement non-linéaire de la poutre mixte	37
3.4.3 Validation du modèle numérique.....	39
3.5. Conclusion	42

Chapitre 4

Présélection du support numérique adéquat

4.1. Introduction.....	43
4.2. Analyse numérique	44
Analyse numérique linéaire.....	45
Analyse numérique non-linéaire.....	47
4.3. Conclusion	63
Conclusion générale :	64
References bibliographiques.....	65

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1- Généralité sur les constructions mixtes

Figure I.1: (a) Poutre non mixte, (b) : et poutre mixte

Figure I.2 : Exemples de sections transversales de poteaux mixtes

Figure I.3 : poteaux mixtes

Figure I.4 : poteau mixte en I

Figure I.5 : Dalle mixte acier-béton

Figure I.6.1 : Liaison mécanique dans les dalles mixtes

Figure I.6.2 : Ancrage d'extrémité dans les dalles mixtes

Figure I.6.3 : Ancrage d'extrémité dans les dalles mixtes

Figure I.7 : Plancher en acier composite mixte

Figure I.8 : Réalisation de coulage d'une dalle mixte

Figure I.9 : Poutre mixte

Figure I.10 : Réalisation des poutres mixtes ajourées

Figure I.11 : Différentes formes de poutres mixtes

Figure I.12 : Exemples de type de profilé métallique

Figure I.13 : Files de goujons soudés sur la semelle supérieure d'une poutre

Figure I.14 : Types de connecteurs de cisaillement

Figure I.15 : types de connexion

Figure I.16 : poteaux enrobés avec du béton

Figure I.17 : La présence des armatures dans la poutre mixte

Chapitre 3- Modèle numérique de référence

Figure III.1 : organigramme du modèle de calcul

Figure III.2. Noyau de calcul, pré et post traitements

Figure III.3. Évolution contrainte – déformation

Figure .III.4. Poutre mixte de référence et sa déformée.

Figure .III.5. Loi de comportement de l'acier

Figure .III.6. Loi de comportement idéalisé du béton

Figure .III.7. Transformation des lois de comportement pour le connecteur

Figure .III.8. Configuration de la poutre mixte

Figure .III.9. Configuration de la poutre mixte

Figure.III.10. Évolution charge - flèche d'une poutre mixte

Figure.III.11. Glissement relatif à l'interface d'une poutre mixte

Chapitre 4- Présélection du support numérique adéquat

Figure. IV.1 Nouveaux modèles numériques proposés

Figure.IV.2 Modèle de référence

Figure.IV.3 Modèle P1

Figure. IV.4 Modèle P2

figure.IV.5 Déformée du modèle de référence

figure.IV.6 Déformée du modèle P1

Figure.IV.7 Déformée du modèle P2

Figure IV.8 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S235

Figure IV.9 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S275

Figure IV.10 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S355

Figure IV.11 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée $L = 4\text{m}$

Figure IV.12 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée $L = 4.5\text{m}$

Figure IV.13 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée $L = 5\text{m}$

Figure IV.14 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée $L = 4\text{m}$

Figure IV.15 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée $L = 4.5\text{m}$

Figure IV.16 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée $L = 5\text{m}$

Figure IV.17 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée $L = 4\text{m}$

Figure IV.18 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée $L = 4.5\text{m}$

Figure IV.19 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée $L = 5\text{m}$

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1-Généralité sur les constructions mixtes

Tableau I.1: Comparaison entre poutre mixte et poutre métallique

Tableau I.2: Comparaison entres éléments mixtes et éléments en béton armé

Chapitre 3- Modèle numérique de référence

Tableau.III.1. Valeurs de la flèche max de la poutre mixte de portée de 5m

Chapitre 4- Présélection du support numérique adéquat

Tableau IV.1. Valeurs de la flèche maximale « Cas d'un chargement uniformément répartie »

Tableau IV.2. Valeurs de la flèche maximale « Cas d'un chargement concentré à mi-portée »

Tableau IV.1. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de portée 4m

Tableau IV.2. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de portée 4.5m

Tableau IV.3. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de portée 5m

Tableau IV.4. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de portée 4m

Tableau IV.5. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de portée 4.5m

Tableau IV.6. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de portée 5m

Tableau IV.7. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de portée 4m

Tableau IV.8. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de portée 4.5m

Tableau IV.9. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de portée 5m

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La modélisation par éléments finis est généralement considérée comme l'outil le plus puissant à l'analyse linéaire et non-linéaire dans la conception des structures. Cette méthode nécessite l'utilisation intensive de l'ordinateur, c'est une méthode très générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes linéaire ou non linéaire, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions.

Dans ce type d'approche, où la précision de l'analyse dépend directement du maillage et des éléments utilisés, les utilisateurs ont pris l'habitude de vérifier qu'il était suffisamment fin pour conduire à des résultats fiables. Un logiciel basé sur la méthode des éléments finis, 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 réaliser une étude comparative entre des modèles numériques afin de choisir le support le plus souple pour l'étude du comportement des poutres mixtes, tout en veillant à ce que ce modèle ne soit pas trop complexe au détriment du temps de calcul.

Dans cette étude, un modèle réel dit le **modèle de référence** détaillé d'une poutre mixte simulant la dalle de béton en éléments coques minces en 3D (COQ4), les connecteurs (goujons) en éléments poutres (POUT) et la poutre métallique en éléments massifs (CUB8) a été validé par rapport à des résultats (expérimental, numérique) disponibles dans la littérature. Ce modèle de référence qui servira de base de comparaison pour les résultats de deux nouveaux modèles numériques proposés, tout en gardant les mêmes modèles numériques précédents simulant la dalle de béton et le connecteurs (goujons) à savoir le modèle dit le **modèle P1** dont les ailes et l'âme sont modélisées par des éléments de coque minces en 3D (COQ4) et le modèle dit **modèle P2** similaire au **modèle P1**, sauf que la semelle est modélisée par des éléments poutres (POUT) au lieu d'éléments de coque ; dont le but de pouvoir mettre en évidence l'influence de la souplesse du support présélectionné en termes de temps de construction et d'exécution en vue d'une analyse numérique sur le comportement dans le domaine linéaire et le domaine non-linéaire des poutres mixtes, car le **modèle de référence**, bien que pertinent pour caractériser le comportement de ces poutres, ne permet pas de réaliser des calculs à l'avantage d'un temps de calcul conséquent.

Introduction

Plan général :

Afin de démontrer la faisabilité et l'intérêt de cette étude numérique en éléments finis, nous proposons de rentrer dans les points essentiels au travers de quatre chapitres :

- Le premier chapitre porte sur une présentation générale de la construction mixte qui permet de spécifier le type de structure,
- Le deuxième chapitre propose une revue générale de littérature sur les principales études et recherches consacrées aux problèmes des poutres mixtes,
- Le troisième chapitre met en évidence un modèle numérique de référence au travers d'un calibrage de résultats par rapport à des résultats (expérimental, numérique) disponibles dans la littérature, porté sur l'étude des deux comportements linéaire et non-linéaire des poutres mixtes,
- Le quatrième chapitre décrit la souplesse du support numérique présélectionné en termes de temps de construction et d'exécution en vue d'une analyse numérique sur l'étude du comportement dans le domaine linéaire et le domaine non-linéaire des poutres mixtes,

Enfin, on achève ce travail par une conclusion générale portant sur les différents aspects traités dans ce mémoire.

Chapitre I

Généralité sur la construction mixtes

I.1 Introduction :

Les éléments mixtes constituent une avancée significative dans le domaine de l'ingénierie structurale, résultant de l'association synergique de matériaux aux propriétés distinctes, à savoir l'acier et le béton, deux substances offrant des avantages complémentaires. Ces éléments mixtes tirent leur spécificité de la connexion mécanique entre ces matériaux positionnée stratégiquement à leur interface, renforçant ainsi la rigidité et la résistance globale de la structure. L'efficacité de cette liaison entre les deux matériaux confère une importante résistance au cisaillement à l'interface des deux matériaux, permettant ainsi à ces derniers de travailler conjointement en flexion car le béton est particulièrement résistant à la compression tandis que l'acier l'est à la traction. Ces avantages ont joué un rôle majeur dans la propulsion du développement de cette catégorie de structures, tant dans le secteur de la construction que dans celui des ouvrages d'art. Actuellement, on observe de nombreuses applications de ce concept dans la construction de ponts routiers et ferroviaires, présentant des portées variant de 30 à 80 mètres, ainsi que dans divers types de planchers utilisés dans des structures telles que les parkings et les immeubles.

I.2 Définition :

Un élément est défini comme mixte lorsque il est composé de deux ou plusieurs matériaux de nature et de propriétés différentes. Dans le domaine du génie civil, un "élément mixte" peut désigner une combinaison de matériaux différents travaillant ensemble pour former un élément structurel. Typiquement, il s'agit d'une combinaison de béton et d'acier. Ces éléments mixtes sont largement utilisés dans la construction de ponts, de bâtiments et d'autres structures où des performances élevées sont nécessaires. L'interaction entre le béton et l'acier permet d'exploiter au mieux les avantages de chaque matériau, offrant ainsi une meilleure résistance et une plus grande capacité de charge.

L'association de l'acier et du béton repose sur des qualités complémentaires de ces deux matériaux complètement différents :

- le béton résiste en compression et l'acier en traction, et aux efforts tranchants.
- Les éléments métalliques sont de faibles épaisseurs et sont aussi relativement élancés ce qui les rend susceptibles aux phénomènes d'instabilités élastiques (voilement,...). Le béton empêche par exemple le voilement des panneaux d'âme des éléments métalliques.
- Le béton assure à l'acier une protection contre la corrosion et l'incendie.
- L'acier augmente la ductilité de la structure.
- La nécessité de travailler avec des grandes portées (plus de 12m) à fait appelle aux structures mixtes surtout pour des constructions (de grande surface sans poteaux intermédiaires).

Dans les constructions mixtes, une précaution supplémentaire est à tenir en compte lors du calcul des assemblages de ces éléments mixtes hautement résistant. Pour cette raison, L'Eurocode-4 à considérer dans ses méthodes avancées que l'assemblage est un élément séparé et qui nécessite une étude particulière.

La construction mixte acier-béton n'est pas récente, elle est connue depuis longtemps, dans ce type de construction, l'objectif principal est de garantir une parfaite cohérence dans le comportement de deux matériaux naturellement distincts. À cette fin, on fait usage de moyens mécaniques tels que des connecteurs de cisaillement. En général, ces dispositifs sont positionnés à l'interface des deux matériaux afin de les amener à fonctionner de manière harmonieuse comme un ensemble intégré.

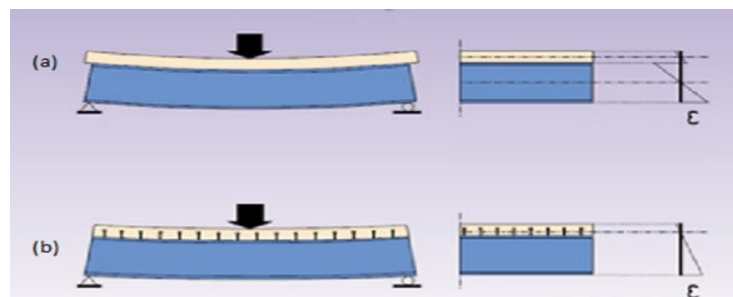


Figure I.2: (a) Poutre non mixte, (b) : et poutre mixte [1]

I.3 Raisons d'utiliser des structures mixtes :

L'utilisation d'éléments mixtes trouve son fondement dans la quête d'optimisation des performances, de réduction des couts, et de réponse à des exigences spécifiques. Cette approche permet de tirer parti des avantages distincts de chaque élément, créant ainsi des structures ou des produits qui offrent des propriétés optimales, que ce soit en termes de résistance, légèreté , flexibilité, ductilité ou d'autres caractéristiques essentielles, tandis que l'adaptation aux contraintes environnementales et l'innovation dans la conception sont également des motivations fréquentes.

Tableau I.3: Comparaison entre poutre mixte et poutre métallique [1]

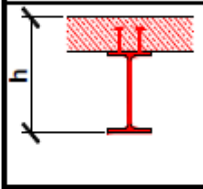
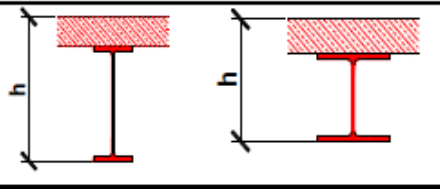

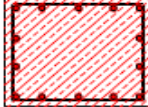
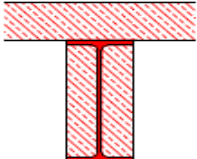
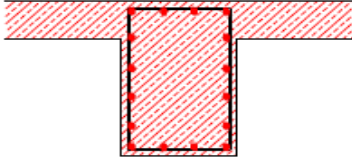
			
	Poutre mixte	Poutre métallique sans connexion au cisaillement	
Section métallique	IPE 400	IPE 550	HE 360 B
Hauteur [mm]	560	710	520
Charge	100%	100%	100%
Poids d'acier	100%	159%	214%
Hauteur totale	100%	127%	93%
Rigidité	100%	72%	46%

Tableau I.4: Comparaison entre éléments mixtes et éléments en béton armé [1]

	Mixte	Béton armé
Poteau		
Dimensions [cm]	70 / 70	80 / 120
Poutre		
Dimensions [cm]	160 / 40	160 / 120

I.4 Différents types d'éléments mixtes :

On distingue trois principaux types d'éléments mixtes :

I.4.1 Poteaux mixtes :

Les poteaux mixtes sont des éléments porteurs verticaux composés principalement d'un profilé métallique associé à un poteau en béton armé ou non armé. Ils sont généralement utilisés dans des situations où des charges normales élevées sont présentes et où l'on souhaite utiliser des sections de faibles dimensions. Du fait qu'ils peuvent être préfabriqués ou préparés en atelier, les poteaux mixtes permettent souvent une réduction significative des délais de construction par rapport à la construction traditionnelle sur place en béton armé.

Le béton ajouté au profilé permet de distinguer deux types de poteaux mixtes :

- Les poteaux enrobés de béton, que ce soit totalement ou partiellement (Figure 1.2).
- Les poteaux remplis de béton (Figure 1.2).

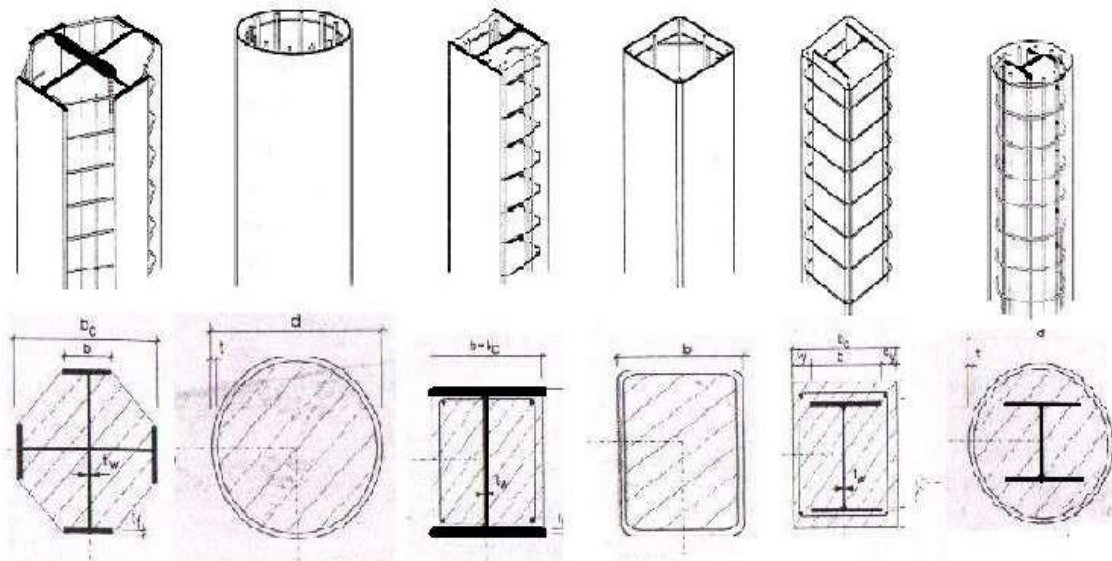


Figure I.2 : Exemples de sections transversales de poteaux mixtes

I.4.1 a) Exemples d'un poteau mixte :



Figure I.3 : poteaux mixtes



Figure I.4 : poteau mixte en I

Les sections métalliques, telles que les profilés laminés en I et souvent en H, ainsi que les tubes rectangulaires ou circulaires, sont appropriées. Les profilés en I peuvent être enrobés partiellement ou totalement, avec uniquement l'espace entre les semelles enrobé. Les sections creuses ont l'avantage de ne pas nécessiter de coffrage supplémentaire lors du bétonnage, ce qui les rend populaires auprès des architectes. De plus, elles offrent une bonne résistance au feu par rapport aux sections en H entièrement enrobées. Pour les charges très élevées, il est possible de placer des sections métalliques à l'intérieur des sections creuses. L'ensemble des types de poteaux mixtes utilisés pratiquement est représenté à la Figure (I.2)

Pour garantir une interaction suffisante entre les éléments métalliques et en béton, il est nécessaire d'installer des connecteurs de cisaillement dans les zones où des charges concentrées sont appliquées, notamment au niveau des planchers ou juste en dessous. Pour les sections laminées, des goujons à tête ou des cornières peuvent être utilisés. Dans le cas de poteaux à section creuse, des boulons sans tête peuvent être insérés à travers des trous et soudés à la surface de la section. Ces boulons satisfont aux exigences de test et permettent également de maintenir un espacement adéquat entre les barres pour faciliter le bétonnage. Cependant, il convient de noter que la soudure de ces connecteurs de cisaillement peut être laborieuse, en particulier lorsque les sections de poteau mixte sont principalement sollicitées en compression ou en flexion (flexion composée).

Les poteaux mixtes ont été employés pour les structures résistantes aux tremblements de terre, piles de pont soumises à l'impact du trafic, colonnes pour soutenir les réservoirs, plateformes de chemins de fer, colonnes dans les gratte-ciel, ... etc. [2].

I.4.2 Dalles mixtes :

Une dalle mixte est constituée d'une tôle d'acier nervurée, profilée à froid, surmontée d'une dalle de béton comportant un treillis d'armature (Figure I-5). De telles dalles sont utilisées dans les structures porteuses de plancher composées de poutrelles métalliques.



Figure I.5 : Dalle mixte acier-béton [3]

Dans ce mode de construction, la tôle nervurée a plusieurs fonctions :

- Plateforme de travail au moment du montage,
- Coffrage de la dalle en béton,
- Armature inférieure de la dalle.

De plus en plus, les dalles en béton armé traditionnelles sont remplacées par des dalles mixtes composées de tôles profilées en acier modernes qui comportent des bossages et des embossages supplémentaires et jouent à la fois le rôle de coffrage permanent lors du coulage du béton et d'armature de traction une fois que le béton ait durci. Finalement, la dalle se comporte comme un élément composite constitué de la tôle profilée en acier et de la partie supérieure en béton, liés de manière à assurer le transfert des efforts de cisaillement horizontaux à l'interface acier-béton.

Il est essentiel d'éviter totalement ou du moins de réduire au minimum tout glissement relatif à cette interface. De même, il convient d'éviter tout détachement vertical entre la tôle profilée en acier et le béton de recouvrement. Le comportement mixte nécessaire peut être réalisé de plusieurs manières et afin d'admettre sur le marché une large variété de produits, actuels ou à venir. , l'Euro code 4 permet de réaliser la connexion par les méthodes suivantes :

1. liaison mécanique par éléments physiques, tels que des attaches, des connecteurs ou des déformations du profil (bossages et embossages) pour fixer ensemble les éléments en acier et en béton.
2. Liaison de frottement qui repose sur la résistance au glissement relatif entre les deux matériaux pour transférer les charges et les contraintes mais elle est incapable de transférer des efforts de cisaillement important
3. par la fixation d'ancrages d'extrémités réalisés au moyen de goujons soudés ou de connecteurs cloués au pistolet ;
4. ancrages d'extrémités par déformation des nervures aux extrémités de la tôle (uniquement en combinaison avec la solution (2)).

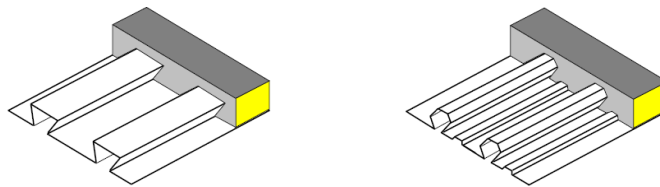


Figure I.6.1: Liaison mécanique dans les dalles mixtes [1]

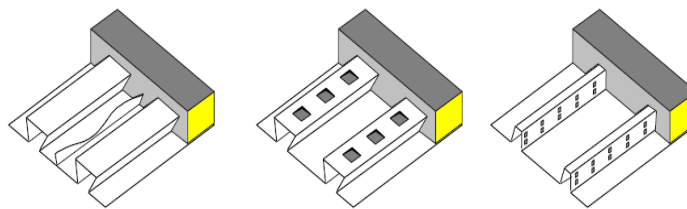


Figure I.6.2 : Ancrage d'extrémité dans les dalles mixtes [1]

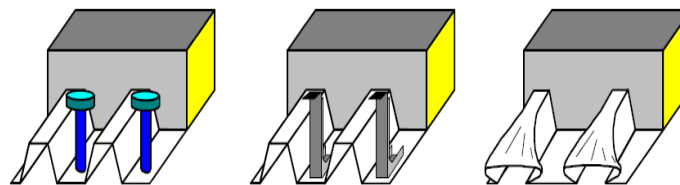


Figure I.6.3 : Ancrage d'extrémité dans les dalles mixtes [1]

Figure I.6 : Types de liaisons acier-béton dans les dalles mixtes [1]

L'utilisation de tôles profilées accélère, sans aucun doute, le montage. Cette solution est également souvent utilisée avec du béton léger afin de réduire le poids propre du plancher. En Grande-Bretagne, par exemple, c'est une pratique courante dans les bâtiments.

Les dalles mixtes sont supportées par des poutres en acier qui normalement, mais pas toujours, agissent de manière mixte avec la dalle. L'espacement de ces poutres et par conséquent la portée des dalles, dépend de la méthode de montage utilisée, comme cela est présenté ci-après :

Si l'espacement des poutres est à peu près de 2,50 m, alors il n'est pas nécessaire de prévoir des étais temporaires pendant la phase de coulage de la dalle. Dans ce cas, la situation de chantier est déterminante pour le dimensionnement du platelage en acier. En raison des faibles portées de la dalle, les contraintes dans la dalle mixte, en situation finale, après que le béton ait durci, sont très faibles. Pour de tels planchers l'on utilise dans la plupart des cas des tôles profilées de formes trapézoïdales ayant une ductilité limitée et une résistance limitée vis à vis du cisaillement horizontal. Pour ces planchers les poids d'acier par m² de dalle sont les plus faibles.

Pour d'autres dispositions de planchers où l'espacement latéral entre les poutres est plus grand, il est nécessaire de prévoir des étais afin de supporter la tôle pendant la phase de bétonnage. En raison de la plus grande portée de la dalle, la dalle mixte qui en résulte est plus sollicitée, les contraintes sont plus importantes et cette situation finale peut être la situation dimensionnante. Dans ce cas la tôle profilée en acier nécessitera une bonne capacité de liaison vis à vis du cisaillement horizontal et les profils à nervures rentrantes sont très fréquemment utilisés. Cela conduit à utiliser plus d'acier par m² de plancher.

La dalle est un élément mixte à deux dimensions horizontales soumis principalement à la flexion dans lequel la tôle profilée :

- Utilisée comme coffrage permanent capable de supporter le béton frais, les armatures et les charges de chantier (Figure I-7).
- Après le durcissement du béton, elle joue le rôle d'une armature inférieure pour la dalle (Figure I-7).

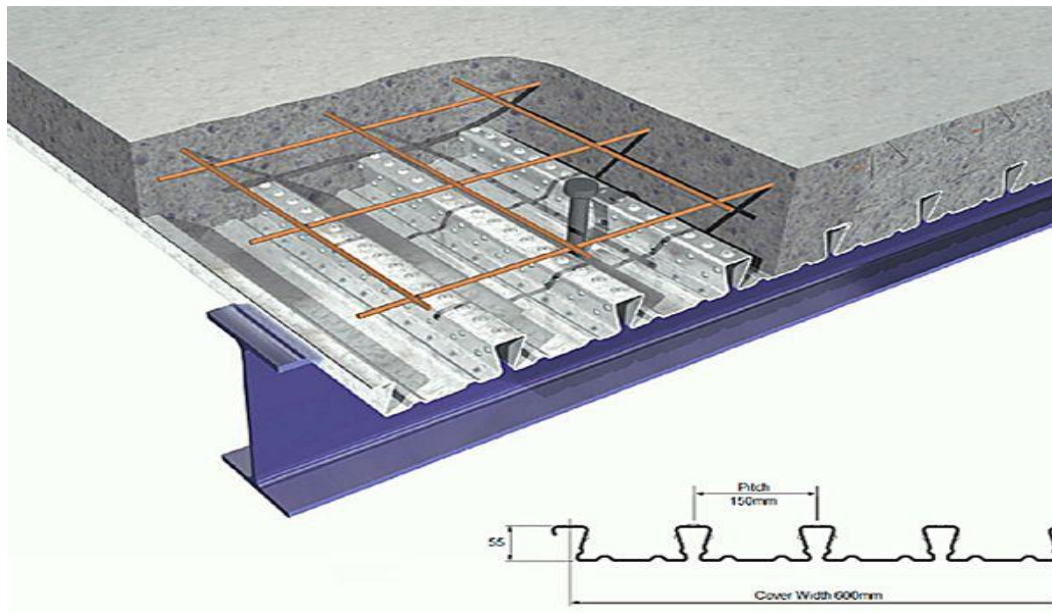


Figure I.7 : Plancher en acier composite mixte

La résistance au cisaillement longitudinal à l'interface acier-béton dépend dans une large mesure des bossages pratiqués dans la tôle d'acier et des connecteurs placés à l'extrémité de la dalle. L'utilisation de méthodes empiriques, partiellement basées sur des résultats d'essais, permet de garantir la résistance au cisaillement adéquate.

I.4.2.1 Exemple d'une Dalle mixte :



Figure I.8 : Réalisation de coulage d'une dalle mixte

I.4.3 Poutres mixtes :

Notre étude se concentre principalement sur ce dernier type d'éléments mixtes, qui sont principalement soumis à des contraintes de flexion. Ils se composent de trois composants une partie en béton, se présentant habituellement sous la forme d'une semelle en béton à la partie supérieure de la section ; un profilé en acier ; une connexion, assurée le plus souvent par des goujons connecteurs. Le rôle principal de ces connecteurs est d'empêcher ou du moins de limiter le glissement éventuel à l'interface entre l'acier et le béton. Il est donc essentiel de mener une étude expérimentale pour évaluer le degré de rigidité de la connexion, ce qui a des répercussions sur l'état limite d'utilisation et sur l'état limite ultime. Ces essais portent d'une part sur la détermination de la résistance au cisaillement de la connexion et d'autre part sur l'évaluation des performances de certains types de connecteurs.

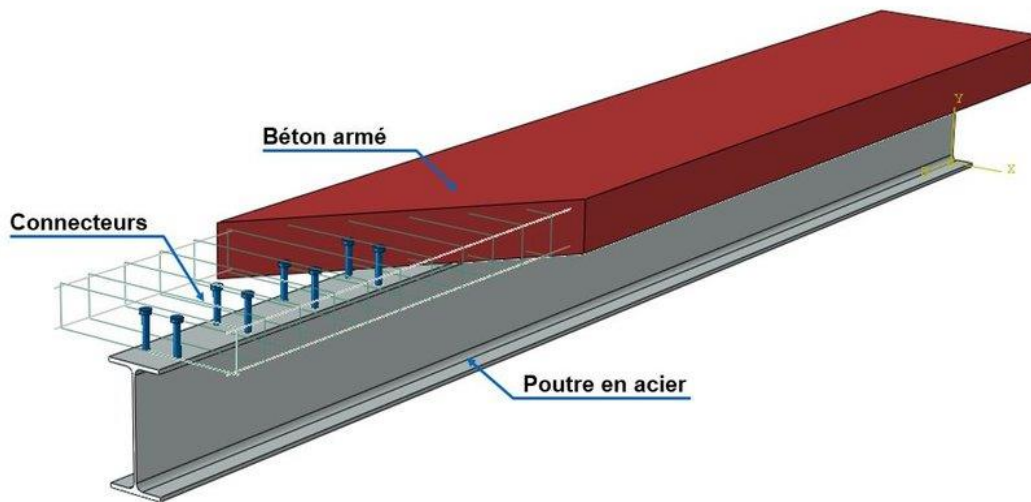


Figure I.9 : Poutre mixte

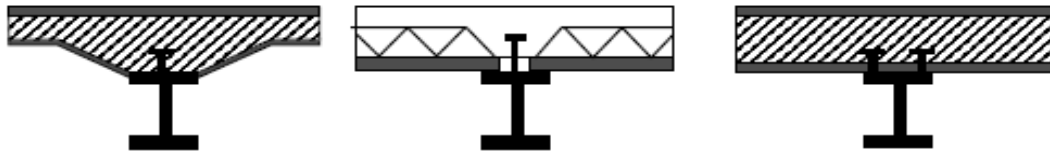
I.4.3 a) Exemple d'une poutre mixte :



Figure I.10 : Réalisation des poutres mixtes ajourées

I.4.3.1 Les différentes formes des poutres mixtes :

Les poutres mixtes peuvent être de la forme illustrée à la (Figure I-9). Il s'agit en général d'un profilé en acier connecté à une dalle de béton. Cette dalle peut être coulée sur un coffrage non permanent ou sur un coffrage permanent, comme par exemple une tôle profilée en acier, ou une série de prédalles [3].



Profilé + dalle coulée
sur coffrage

Profilé + dalle partiellement
préfabriquée

profilé + dalle complètement
préfabriquée

Figure I.11 : Différentes formes de poutres mixtes [4]

Il faut noter que le type de profilé métallique peut varier suivant le type d'application (Figure I.14).

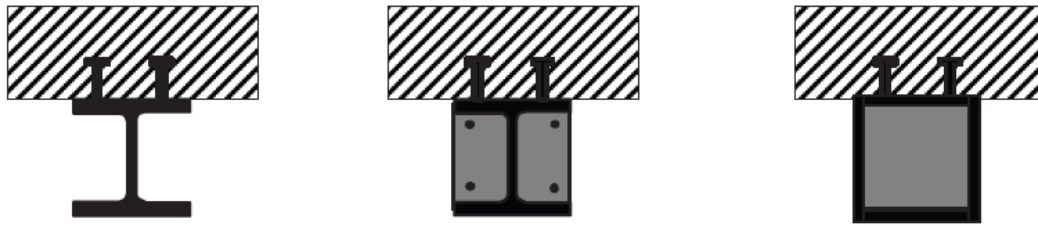


Figure I.12 : Exemples de type de profilé métallique [4]

I.4.3.2 La connexion :

La connexion entre le béton et les composants métalliques d'un élément mixte doit offrir une résistance et une rigidité suffisantes pour permettre le calcul de ces parties comme un seul élément structural.

Le glissement se réfère au déplacement relatif entre les deux matériaux assemblés à l'interface. Ce mouvement, ou soulèvement, entre l'acier et le béton doit être empêché par des éléments, tels que des connecteurs, capables de transférer les efforts de cisaillement ou de traction.

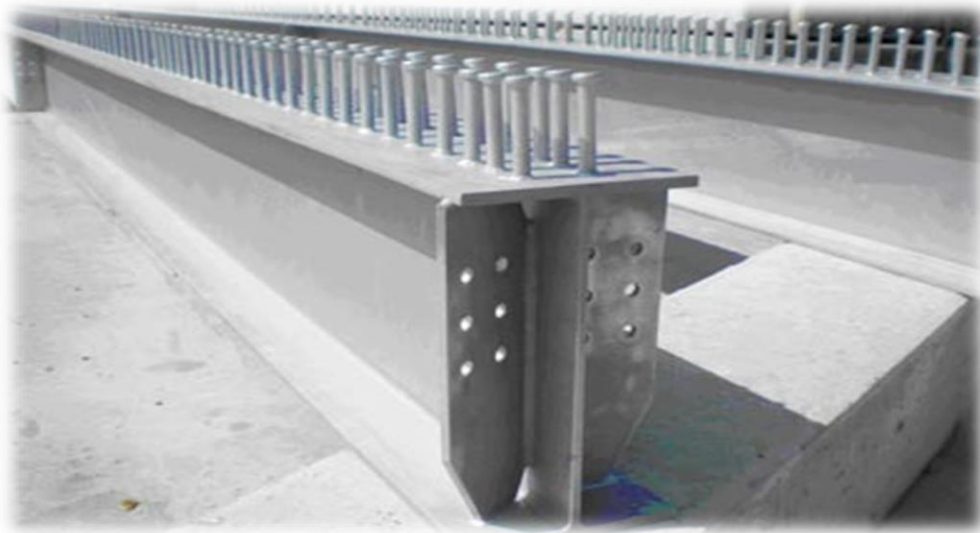


Figure I.13 : Files de goudons soudés sur la semelle supérieure d'une poutre

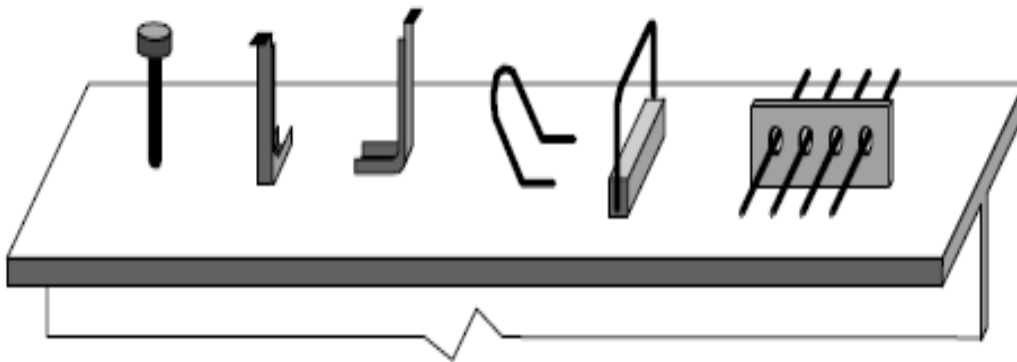
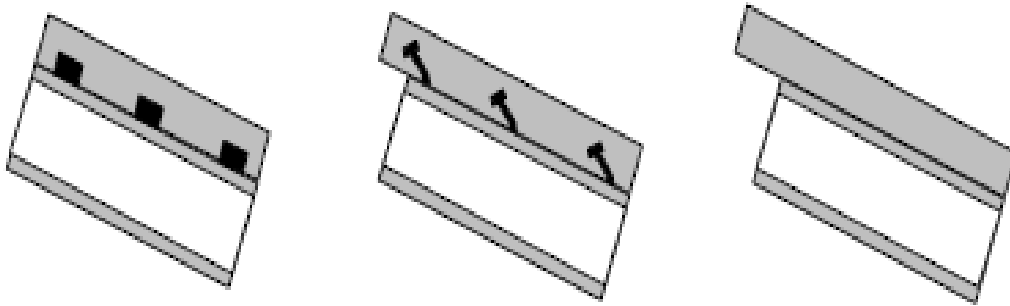


Figure I.14 : Types de connecteurs de cisaillement [1]

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

I.4.3.3 Modes de connexion :

La solidarisation des deux matériaux est obtenue au moyen d'organe de liaison dits « connecteur » fixe sur l'élément métallique dont le rôle est d'empêcher ou du moins de limiter le glissement pour se produire le long de l'interface acier-béton, la connexion entre la dalle de béton et la poutre métallique peut s'effectuer par l'interaction complète dite « connexion complète » ou par interaction partielle dite « connexion partielle ».



Interaction complète

Interaction partielle (incomplète)

Aucune interaction

Figure I.15 : types de connexion [1]

I.4.3.3.1 Connexion complète :

La connexion complète signifie qu'il n'y a aucun glissement entre la dalle en béton et la poutre métallique. En pratique, un certain glissement se produira toujours. Ainsi, le terme "connexion complète" ne sera utilisé que lorsqu'il a été prouvé que les effets du glissement entre le béton et la semelle de la poutre en acier peuvent être négligés sans compromettre la sécurité.

I.4.3.3.2 Connexion partiel :

La connexion partiel implique l'apparition d'un glissement à l'interface entre la dalle en béton et la poutrelle métallique, provoque une discontinuité de déformation qui doit être pris en compte dans les analyses, l'utilisation d'une connexion partiel est intéressent à cause de :

- Quel que soit l'efficacité des connecteurs adoptés où ne pas éviter la présence de certain glissement à l'interface acier-béton aux stade limite ultime d'une poutre sauf dans le cas d'analyse élastique basé sur l'hypothèse de conservation des sections planes là où les effets de glissement sont faible.
- La connexion partiel est imposée par fois par la nature même de la construction ; dalle préfabriqué ou avec une dalle en béton coulé dans un bac en tôle mince nervuré métallique, la connexion à l'interface acier-béton présente presque inévitablement un caractère espacé.

I.5 Matériaux utilisés dans un élément mixte :

Pour réaliser les différents éléments structuraux mixtes, on utilise généralement quatre matériaux de base :

- L'acier de construction ;
- L'acier d'armature ou de renfort ;
- Les tôles profilées en acier ;
- Le béton ;

Ces matériaux sont décrits dans différents codes. Certaines exigences essentielles sont abordées également dans des règlements comme les Eurocode [EC2, EC3, EC4].

Dans les immeubles à plusieurs étages, il est courant d'utiliser une structure en acier conjointement avec du béton, comme par exemple des poutres en acier soutenant des dalles de plancher en béton. Cette approche est également répandue dans la construction de ponts routiers, où l'usage de dalles en béton est préféré. Le choix entre une structure entièrement en acier, en béton armé ou une combinaison des deux dépend des spécificités du projet. Cependant, il est devenu évident que les

ingénieurs conçoivent de plus en plus des systèmes de construction mixtes, alliant l'acier et le béton armé, pour produire des structures plus efficaces par rapport à celles utilisant exclusivement un seul matériau.

Les bâtiments intégrant des éléments en acier ainsi que des éléments mixtes ont suscité un regain d'intérêt dans les années 80, entraînant une prolifération de nouveaux concepts et de configurations constructives.

I.6 Avantages de la construction mixte :

Les constructions mixtes présentent plusieurs avantages selon les différents aspects :

a)-Aspects Architecturaux :

- Des portées importantes (grande surface sans poteaux intérieurs).
- Des épaisseurs réduites (dalles minces).
- Des poteaux plus élancés (un poteau par 2 étages).
- Flexibilité de conception (permettant une grande flexibilité dans la conception des structures, ce qui permet aux ingénieurs et aux architectes d'explorer une variété de formes et de configurations).

b)-Aspects Economiques :

Avec des dimensions plus réduites et une construction plus rapide provient l'intérêt économique des structures mixtes :

- la réduction de la hauteur totale du bâtiment et la hauteur d'étage, donc pour une même hauteur de bâtiment les constructions mixtes offrent plus d'étages.
- Des portées plus grandes permettent de réduire le nombre de poteaux.
- Réduction du poids de la structure (cela peut être particulièrement avantageux dans la construction de grands bâtiments ou de ponts, où la réduction du poids peut conduire à des économies significatives en termes de coûts de construction et de matériaux).

- Construction rapide car les composants en acier peuvent être préfabriqués en usine et assemblés sur site, tandis que la tôle profilée est utilisée comme coffrage (réduisant la durée des travaux, entraînant ainsi moins de salaires et de dépenses pour la main-d'œuvre).

c)-Aspects structuraux :

- L'amélioration sensible de la résistance à l'incendie des éléments métalliques à l'aide de la présence du béton, de ce fait les éléments mixtes peuvent être utilisés sans protection à l'incendie.
- Résistance et rigidité accrues.
- Durabilité et longévité.
- Elles offrent plusieurs possibilités pour faire passer les équipements dans :
 - Les faux plafonds.
 - L'espace entre la retombée et la semelle inférieure d'une poutre mixte.
- Les éléments métalliques et même mixtes des structures mixtes sont fabriqués et contrôlés en usine, ce qui augmente la précision dans la construction.
- Les constructions mixtes ont un excellent comportement aux sollicitations sismiques.
- Les éléments mixtes présentent une rigidité et une capacité de charge plus grande qu'un élément métallique ou un élément en béton armé présentant les mêmes dimensions.

Chaque type d'élément mixte présente un ensemble d'avantages qui sont :

I.6.1 Pour les poteaux mixtes :

- Une amélioration de la résistance au feu.
- Une conservation des dimensions externes de poteau d'étage en étage par l'adaptation du type de profilé en acier aux charges à soutenir (un poteau par 2 étages).
- Augmentation du tenu au flambement.
- Augmentation de la résistance en cas de séisme.

- Plus que la protection au feu, le béton armé enrobant les profilés des poteaux contribue à la reprise des charges verticales [5].

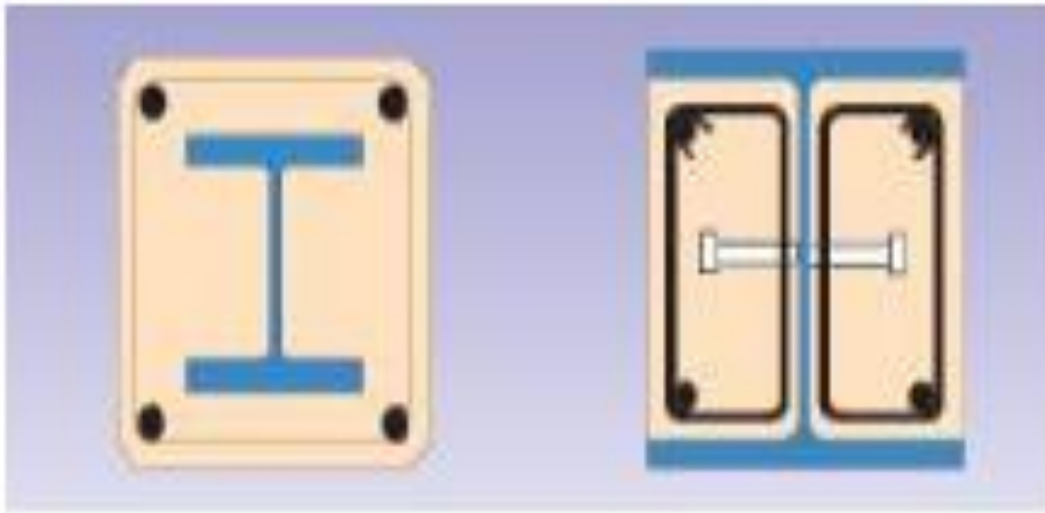


Figure I.16 : poteaux enrobés avec du béton [5]

I.6.2 pour les dalles mixtes :

- Un gain sur le poids total de la structure
- Une rigidité flexionnelle plus importante (flèches plus faibles)
- Une amélioration de la résistance au feu des poutres, surtout si leur semelle est enrobée de béton ou se trouve dans l'épaisseur de la dalle (**Salim-Flor**).
- Une réduction de la hauteur du plancher structurel et, donc, une augmentation de la hauteur utile de chaque étage
- La semelle inférieure de la poutre soumise au feu se relâche progressivement, mais sa perte de résistance est compensée par les armatures situées en bas des chambres du profilé métallique.

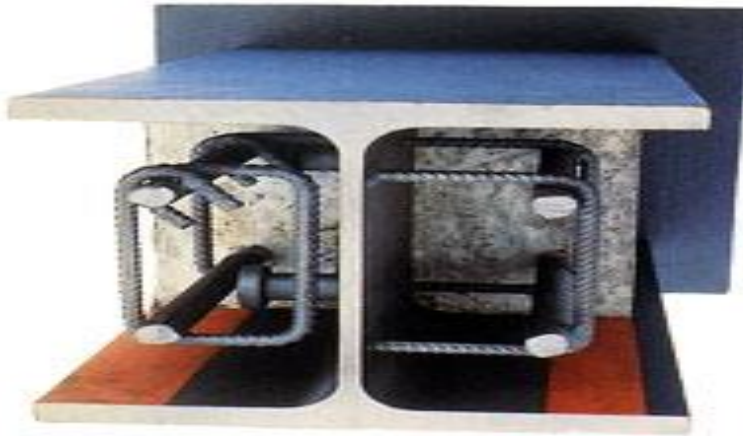


Figure I.17 : La présence des armatures dans la poutre mixte [5]

I.6.3 Pour les poutres mixtes :

- Une amélioration de la résistance au feu, surtout si la semelle des poutres est enrobée de béton ou se trouve dans l'épaisseur de la dalle.
- Une résistance améliorée vis-à-vis de l'instabilité locale (voilement de la semelle du profilé)
- Une rigidité flexionnelle plus importante (flèches plus faibles).
- Les poutres mixtes peuvent être réalisées avec des portées courantes variant de 6 à 16 mètres, mais peuvent dépasser les 20 mètres.
- En cas de nécessiter, elles sont protégées du feu par une peinture intumescente, par un enduit ignifuge projeté ou encore par des panneaux isolants. Cette procédure peut être réalisée en usine. [5]

1.7 Inconvénients :

L'inconvénient principal de la construction mixte est la nécessité de fournir des connecteurs à l'interface acier-béton.

Un autre inconvénient mineur est qu'elle est légèrement plus compliquée comme méthode de construction par rapport aux méthodes traditionnelles et demande une main plus qualifiée.

1.8 Conclusion :

D'une manière générale, la construction mixte (poteaux, poutres ou dalles), ouvre une large porte vers la modernisation et l'industrialisation de la construction ; avec ces avantages elle autorise une grande flexibilité dans la conception globale et locale de la structure ;

Cette flexibilité est obtenue par le large éventail de profilé en acier, tant sur le plan de leur géométrie que sur celui du type d'acier.

De plus, les connexions entre éléments, permettent aux matériaux constituant les éléments de se compléter sous sollicitations, pour faire face aux manques naturels dans les matériaux

Enfin, ce mode de réalisation, de par ses possibilités de combinaison avec le béton, offre de nombreux avantages économiques et techniques (montage rapide et précis, liaisons permettant de créer une structure monolithique...).

Dans cette perspective, on se limite uniquement aux poutres mixtes acier-béton, qui fera l'objet dans notre étude.

Chapitre II :
Revue de la littérature

II.1 Introduction :

Les poutres mixtes acier-béton se forment par l'assemblage de dalles de béton avec une poutre en acier, créant ainsi une structure de support structurale. Initialement privilégiées dans la conception des ponts au début des années 1900, les poutres mixtes ont depuis gagné une popularité croissante dans la construction de bâtiments modernes de grande hauteur au cours des dernières décennies.

Le dimensionnement exact des poutres mixtes est nécessaire en raison de différents avantages qu'offre ce type de poutres dû aux leurs rapports supérieurs portée/hauteur, leurs flèches réduites et leurs rigidités élevées. Cependant, leur performance est très dépendante des caractéristiques charge-glissement des connecteurs de cisaillement.

D'un point de vue structural, le fonctionnement d'une structure mixte, où une poutre métallique est reliée à une dalle en béton armé, est comme suit :

- La dalle, supportant directement les charges, les transmet aux poutres par flexion locale.
- Les poutres, réagissant aux forces de support de la dalle, redistribuent ces charges à leurs propres points d'appui par flexion générale. Le béton lié à l'acier contribue à cette flexion générale.

Dans ce contexte, plusieurs recherches ont été menées pour étudier le comportement et élaborer les méthodes de calcul pour ce type spécifique de poutres.

II.2 Historique des méthodes de calcul des poutres mixtes :

La première approche a été proposée en 1912 par **Andrews** [Trouillet, 1987] [6]. Il considère que l'acier et le béton sont liés par adhérence. Le calcul des sollicitations internes se fait donc suivant les hypothèses classiques de la résistance des matériaux. Cette approche est valable jusqu'à rupture par adhérence. Pour reprendre des sollicitations au-delà de ce seuil, il faut utiliser des connecteurs ponctuels. Le modèle d'Andrews s'avérant inutilisable pour ces niveaux de sollicitations, plusieurs théories élastiques ont été proposées par **Stussi** et **Granholm** [Stussi, 1947], [Granholm, 1949] [7].

En 1951, **NEWMARK** a montré l'existence du glissement le long de l'interface acier- béton. Il envisage un comportement linéaire pour l'acier, le béton et la connexion. Son modèle est satisfaisant pour les charges de service, cependant il s'avère trop approximatif pour des charges élevées du fait de la linéarité de la courbe charge/glissement des connecteurs [8].

En 1964, **CHAPMAN** et **BALAKRISHNAN** [9] ont testés 17 poutres mixtes isostatiques avec divers types de connecteurs en faisant varier l'intensité de la connexion et le mode de chargement. Ses résultats ont incité **BARNARD** et **JOHNSON** 1965 [10] à définir une méthode de calcul analytique de la résistance ultime des poutres mixtes isostatiques. Cette première tentative de calcul plastique des poutres mixtes suppose une connexion complète et un module d'élasticité du béton constant jusqu'à ce que l'acier atteigne sa limite d'élasticité. Selon ces auteurs, le comportement non linéaire du béton n'a qu'une faible influence, et ils préfèrent se concentrer uniquement sur la contribution de l'acier, en utilisant un diagramme élasto-plastique parfait. Des essais supplémentaires sur des poutres hyperstatiques ont confirmé l'efficacité de leur méthode, du moins dans les limites des dimensions des prototypes testés. Cependant, quelques ajustements ont été nécessaires, notamment pour le calcul de la résistance ultime en section soumise à un moment négatif. L'apparition du calcul automatique des structures sur ordinateur a incité **CHAPMAN** à réaliser le premier modèle de calcul de poutres mixtes à connexion partielle en 1968 et 1972 [11], [12]. Il utilise un modèle de comportement élasto-plastique parfait pour l'acier et le béton, ainsi qu'une loi de connexion continue à l'interface des deux matériaux. De plus, il suppose une force d'interaction nulle au niveau des appuis simples des poutres isostatiques et néglige l'impact du glissement à l'interface sur la distribution du moment de flexion pour les poutres hyperstatiques.

En 1967, **ROBINSON, H** [13] : a effectué Une série de tests sur 15 poutres mixtes, comprenant 39 essais de poussée (push-out). L'étude s'est concentrée sur l'influence de la géométrie des nervures sur les caractéristiques de flexion des poutres et la résistance maximale des échantillons en poussée. Les résultats ont montré une amélioration significative de la résistance et de la rigidité des poutres non mixtes. Le mode de rupture du béton dans la tôle d'acier est influencé par les dimensions des nervures, bien que toutes les poutres puissent supporter une charge croissante après l'apparition de fissures. Différents arrangements de connecteurs et tailles de poutres ont été testés, mais aucune de ces variations n'a eu d'impact significatif sur les caractéristiques de flexion des

poutres mixtes. Des essais sur des poutres en acier de haute résistance en forme de I ont également montré une capacité de charge accrue, principalement en raison du retard de fatigue dans les fibres inférieures des poutres. Dans certains cas, la fatigue initiée par un système de charge à deux points a conduit à la rupture du béton dans les nervures de la tôle.

En 1971, Une série d'expériences a été effectuée par **MENZIES, J B** avec une attention particulière sur l'influence de la résistance et de la densité du béton sur les résistances statiques et la fatigue des connecteurs. Des recommandations ont été faites pour étudier les résistances spécifiques, d'étendre la gamme des résistances de béton pour laquelle les forces de connexion sont déterminées [14].

En 1978, **HALLAM** a proposé un modèle prenant en compte une loi de comportement du connecteur dépendante de l'histoire du chargement [15]. Un modèle de ce type a été développé par **SEDDIK** et **BEHR** [16] au LCPC pour le cas des matériaux élastiques-plastiques.

En 1982, un modèle a été développé par **ARIBERT** et **LABIB** [17], [18]. Ce modèle a été repris ensuite par **ARIBERT** et **ABDELAZIZ** en 1985 [19]. Ces auteurs ont supposé un comportement élasto-plastique parfait pour l'acier avec un diagramme contrainte-déformation symétrique en traction et en compression par rapport à l'origine, un comportement parabole rectangle pour le béton ; ils considèrent que le béton en traction n'offre aucune résistance, la liaison à l'interface acier-béton s'effectue de manière discontinue uniquement au droit de chaque connecteur.

En 1989, **ARIBERT** et **BITAR** [20] ont développé une formule sur le calcul de la flèche dans le cas d'une poutre mixte dimensionnée avec une connexion partielle. L'expression de cette formule est proposée dans document d'application national (DAN) français de l'Eurocode4 [4].

En 1992, **Angelo Marcello Tarantino** et **Luigino Dezi** [21] : ont présenté une méthode pour l'analyse viscoélastique des poutres mixtes acier-béton avec connecteurs de cisaillement flexibles. La méthode proposée détermine les effets de la déformation de dispositif de connexion sur la migration des contraintes de la dalle de béton à la poutre en acier, qui se produit avec le temps en raison du fluage, et le retrait d'une partie en béton. La formulation mathématique de ce problème implique les équations d'équilibre, de compatibilité, et des relations constitutives, à savoir, la loi élastique pour la partie en acier et une loi de fluage de type intégrale pour la partie en béton. Ainsi,

le problème est gouverné par un système de trois équations couplées, dont deux sont des équations de type différentielles.

En 1996, **Bin ZHAO** et **ARIBERT** ont développé un modèle de calcul par éléments finis en formulation lagrangienne en prenant le glissement à l'interface comme inconnue [22].

En 1997, **ARIBERT** a présenté une approche analytique de l'influence de la nuance de l'acier du profilé métallique allant de S 235 à S 460 sur le degré minimum de connexion partielle d'une poutre mixte [23].

En 2001, **SERACINO**, **OEHLERS** et **YEO**. [24] ont introduit le concept du point focal de l'interaction partielle fondé sur la théorie classique linéaire élastique de l'interaction partielle. Le modèle permet de prévoir le changement des contraintes dans l'acier et le béton dû à l'interaction partielle. L'idée est de considérer que la distribution des déformations est comprise entre celle de deux déformations limites : la première se produit quand les connecteurs ont une rigidité infinie (l'interaction est totale) la seconde lorsque la rigidité est nulle (il y'a absence d'interaction). Les deux courbes de déformation représentant ces deux cas se coupent en deux points appelés points focaux. La distribution des déformations due à l'interaction partielle est donc obtenue en passant par ces deux points avec une pente qui est préalablement définie par le calcul.

Des développements récents sont en cours pour trouver de nouvelles méthodes de liaison entre la dalle en béton et le profilé métallique. Dans son étude, **LEBET** associe la connexion mécanique à une connexion par adhérence. Quant à **JURKIEWIEZ**, il assure la connexion au moyen d'un procédé constitué de butées horizontales prenant appui sur la partie supérieure de l'âme découpée en forme de créneaux noyés dans la dalle renforcée localement par un frettage [25].

En 2003, **P. GELFI** and **E. GIURIANI** [26] ont examiné l'impact du glissement relatif entre le béton et l'acier à l'interface sur la déformation des poutres mixtes. En présentant une relation entre le glissement maximal et l'incrément de la pente au niveau de l'appui d'extrémité ; ce qui rend possible une évaluation facile et précise de l'incrément (augmentation ou pas) de la flèche. Les résultats ont été confirmés par des résultats numériques et expérimentaux. Une procédure de conception basée sur le contrôle de la déformation, utilisant des relations approximatives pratiques pour l'évaluation de l'incrément de la flèche des poutres mixtes, a été également présentée.

En 2006, **G.S. Veríssimo** & d'autres [27] : ont élaboré une nouvelle conception de connecteur de cisaillement composée d'une nervure en acier dotée d'une forme dentelée. Cette configuration offre une résistance au cisaillement longitudinal et renforce la liaison entre la dalle en béton et le profilé en acier. De plus, les ouvertures découpées dans le connecteur simplifient la disposition des barres transversales de renforcement. L'installation des connecteurs est simple et nécessite seulement une procédure de soudage. En raison de sa capacité de charge, ces connecteurs dentelés peuvent remplacer un groupe de goujons conventionnels. Dans cette étude, ce nouveau modèle de connecteur a été analysé et comparé à d'autres connecteurs existants, en examinant l'impact des différents paramètres géométriques et mécaniques sur sa résistance.

Les résultats ont démontré que ce type de connecteur présente une bonne performance mécanique, associée à des avantages en termes de construction et d'économie.

En 2007, **Jan Bujnak** [28] a réalisé une analyse globale des poutres mixtes acier-béton en utilisant une approche analytique et une modélisation non linéaire. Dans cette analyse, la section mixte est considérée homogène (sans glissement à l'interface entre le profilé en acier et la dalle en béton), et le comportement des matériaux (acier, béton) est supposé linéaire. Il présente deux modèles pour l'analyse des poutres mixtes acier-béton :

Un modèle analytique : Fondé sur la théorie élastique des poutres, ce modèle calcule le glissement et son impact sur les flèches des poutres mixtes simples et continues. Cependant, il est limité à la phase élastique du comportement.

Un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis (MEF) : Ce modèle explore le comportement non linéaire en utilisant des éléments de connexion adaptés pour représenter le comportement des connecteurs acier-béton, comme les goujons. Il est intégré dans un modèle tridimensionnel développé avec le code de calcul Cast3m. Ce modèle utilise des éléments de coque multicouches pour représenter la poutre métallique et la fissuration à travers l'épaisseur de la dalle en béton.

En 2008, **Dr. Khalel I. AZIZ** [29] : a présenté un développement d'une méthode d'analyse de transaction avec une poutre continue composite multicouche pour matériau linéaire et le comportement de connecteur de cisaillement, dans lequel le glissement (déplacement horizontal) et le soulèvement (déplacement vertical) sont pris en considération.

En 2012, **Suhaib Yahya Kasim Al-DARZI et Inas Mahmoud A.H.AI-JUBOORY** [30] : Ont présenté un nouveau type de connecteur de cisaillement « Perfobond » (plaque perforée). Ce nouveau connecteur est testé dans la conception et la construction de six poutres mixtes acier-béton séparées en trois groupes formés à partir de section en acier standard « W4X13 », avec une longueur totale de 1300 mm. La dalle de béton connectée à la section de l'acier à l'aide de trois types de connecteurs de cisaillement mécaniques à savoir ; connecteur goujon et connecteur Perfobond avec trou circulaire régulier en plus le type de connecteur Perfobond avec trou triangulaire nouvellement proposé. Les poutres sont testées expérimentalement avec différents types de chargement pour étudier les effets de type de connecteur sur le comportement de poutre au stade de fatigue en termes de flèche à mi- portée et le glissement aux extrémités des poutres testées. Un modèle tridimensionnel non linéaire en éléments finis est développé avec le logiciel «**ANSYS** » pour simuler la poutre testée jusqu'à la rupture. Les résultats ont montré que les poutres mixtes construites avec des connecteurs Perfobond triangulaires nouvellement proposés ont développé un pourcentage de résistance plus élevé que ceux avec des connecteurs goujon ou le connecteur de Perfobond avec trou circulaire régulier. La modélisation du modèle numériquement a validé par comparaison avec les résultats expérimentaux des différences de résistances ultimes (0,9% à 5,7%) pour les connecteurs Perfobond avec trou circulaire régulière et (11,9% à 19,2%) pour les connecteurs goujon.

En 2014 **Ali Shariati** [31] et d'autres chercheurs ont mené une étude expérimentale visant à analyser le comportement des connecteurs de cisaillement d'angle intégrés dans une dalle de béton à haute résistance (HSC). Huit échantillons push-out ont été soumis à des tests, couvrant diverses configurations géométriques des connecteurs d'angle. En plus de l'aspect expérimental, l'exactitude des équations existantes pour estimer la capacité de charge des connecteurs d'angle dans le HSC a été évaluée. Les résultats indiquent un manque de ductilité dans le comportement des connecteurs de cisaillement d'angle intégrés dans le HSC. Cependant, ces connecteurs présentent une performance satisfaisante en cas de dégradation de la résistance sous charge cyclique.

En 2021 **ARIBERT** [32] a présenté une analyse approfondie du calcul des poutres mixtes en T. Il distingue les approches élastiques et plastiques, exposant les différentes méthodes d'analyse globale et les vérifications des sections à effectuer sous moment fléchissant et sous effort tranchant. En outre, **ARIBERT** a également examiné la vérification des poutres vis-à-vis du risque d'instabilité par déversement en zones de moment négatif, et le dimensionnement de la connexion acier-béton, en particulier avec des connecteurs ductiles permettant d'introduire le concept de connexion partielle. Enfin, il a proposé des perspectives pratiques sur les états limites de service, notamment en ce qui concerne le contrôle des déformations, de la fissuration et des vibrations, offrant ainsi une approche exhaustive pour la conception et la vérification des poutres en T.

Chapitre 3

Modèle numérique de référence

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, un modèle de référence modélisant les poutres mixtes est présenté, qui par la suite, servira de base de comparaison pour les résultats des nouveaux modèles numériques proposés ; dont le principe est de mettre en évidence l'influence de la souplesse en termes de temps de construction et d'exécution de ces nouveaux supports sur le comportement des poutres mixtes dans le domaine linéaire et le domaine non-linéaire.

Le modèle de référence décrit ci-après, s'appuie sur un modèle numérique de base en trois dimensions, en éléments finis massifs (CUB8) modélisant la poutre métallique et en éléments finis minces (COQ4) modélisant la dalle en béton armé. Celui-ci, a été à son tour validé par un essai expérimental.

Deux parties sont traitées dans ce chapitre, la première correspond à une analyse sur le comportement élastique (linéaire) afin de présélectionner le modèle de type d'éléments finis à utiliser comme modèle de référence et en deuxième partie, nous justifions le choix de ce modèle de référence à la base d'une analyse dans le domaine non linéaire.

Avant d'apporter une attention particulière au choix du maillage et de la loi de comportement afin de pouvoir élaborer un modèle numérique de référence fiable, représentatif de la réalité et suffisamment souple pour de telles études de comportement linéaire et non linéaire de telle poutre mixte, un aperçu sur l'organisation d'un calcul à base du logiciel Cast3m [33] est indispensable.

3.2. Organisation d'un calcul :

➤ 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 :

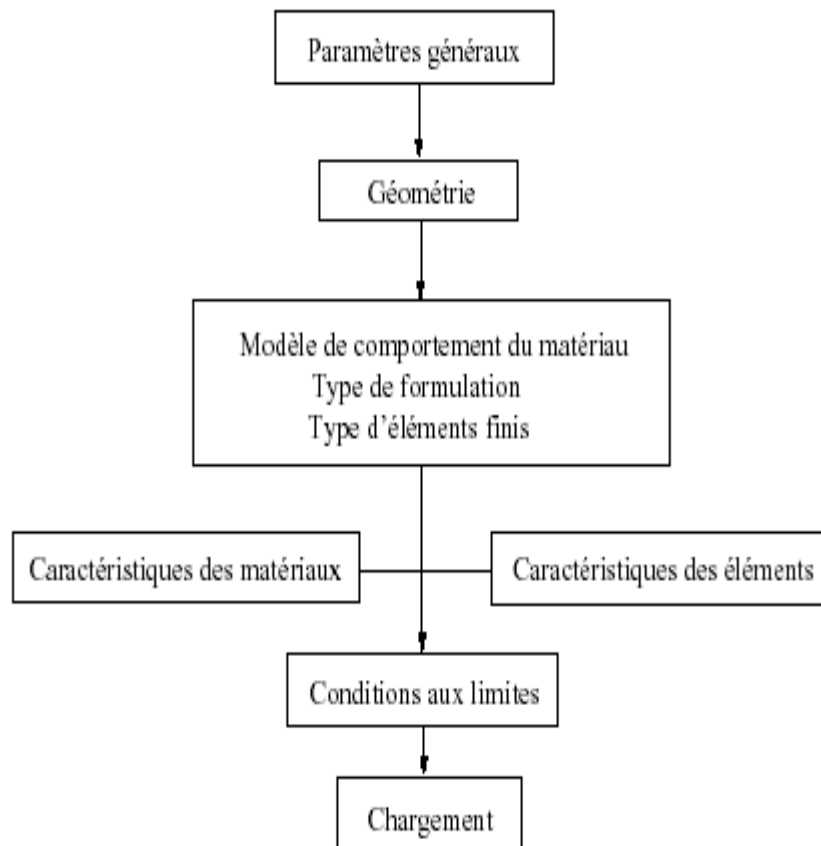


Figure III.1. Organigramme du modèle de calcul

- 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.

➤ **Résolution du système d'équations :**

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

$\overline{M} \cdot \overline{u} + \overline{C} \cdot \overline{u} + \overline{K} \cdot \overline{u} = \overline{F}$ 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 $\overline{K} \cdot \overline{u} = \overline{F}$.

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

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

➤ **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.

Les programmes de calcul par éléments finis classiques sont structurés selon cette logique (voir figure 3.2), chaque étape étant associée à un module du code :

- le préprocesseur pour la définition du maillage et du modèle mathématique.
- le programme de calcul qui envoie une série de processus selon la procédure de calcul choisi par l'utilisateur, celui-ci ne peut maîtriser l'enchaînement des processus.
- La procédure agit comme une boîte noire sur laquelle l'utilisateur n'a aucune possibilité d'intervention.
- le post-processeur qui procède aux traitements nécessaires après avoir reçu les résultats des modules précédents.

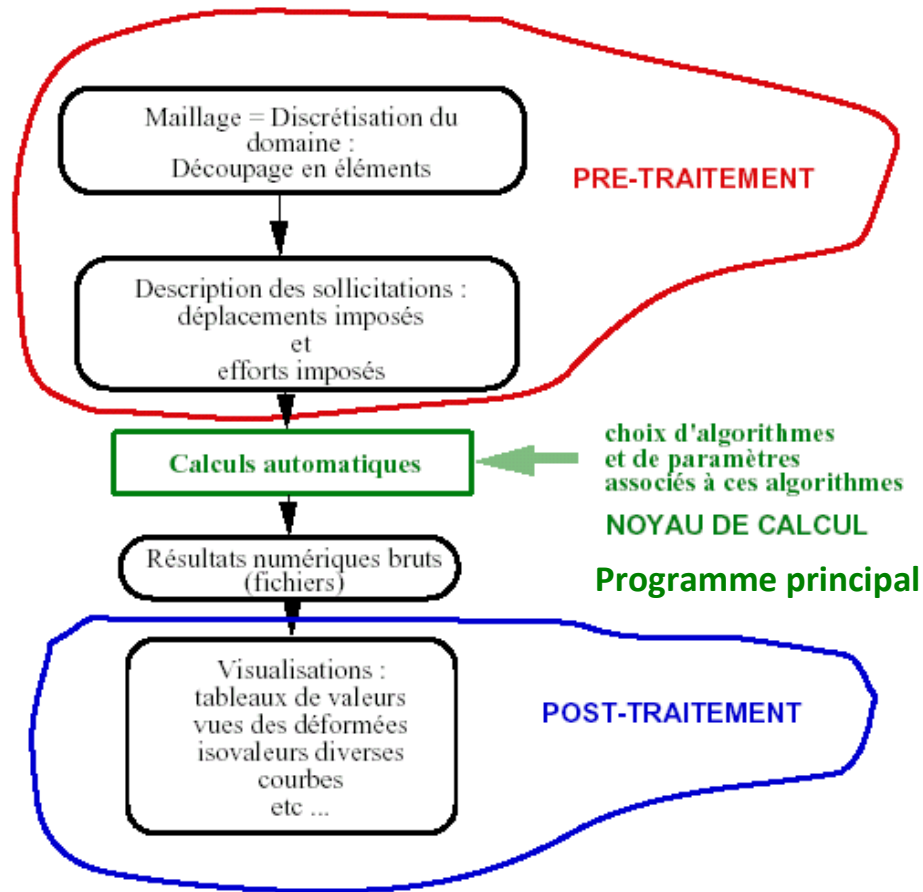


Figure III.2. Noyau de calcul, pré et post traitements

3.3. Modélisation linéaire

3.3.1 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 à la section correspondante.

Les efforts ponctuels pour ce type de sections sont introduits dans les nœuds de la structure.

3.3.2 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.

Le comportement du matériau de chaque composante est traduit par la relation contrainte – déformation (figure 3.3). Le modèle le plus connu est celui de HOOKE qui est la base de l'élasticité.

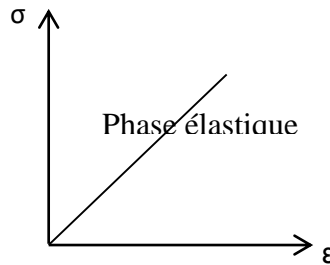


Figure III.3. Évolution contrainte – déformation

3.3.3 Comparaison des résultats

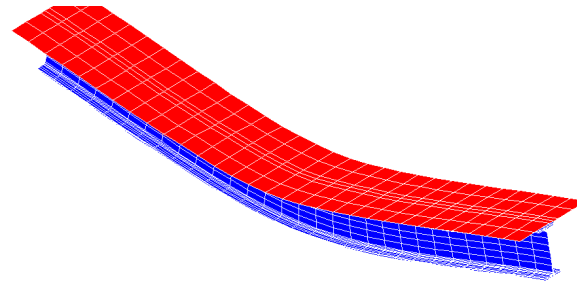
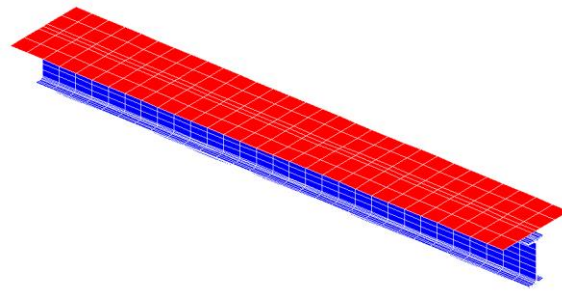
Une étude comparative a été réalisée entre le modèle numérique de base (de référence) en trois dimensions (3D) et le modèle théorique (voir J.M. Aribert [34]).

Il s'agit d'une poutre mixte simplement appuyée, de portée 5m, soumise à l'effet d'une charge uniformément répartie de 10kN/m (ce choix correspond à la situation la plus rencontrée en bâtiment).

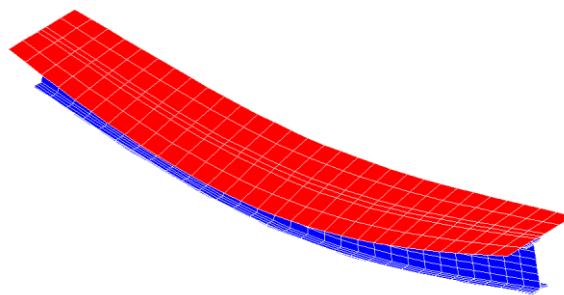
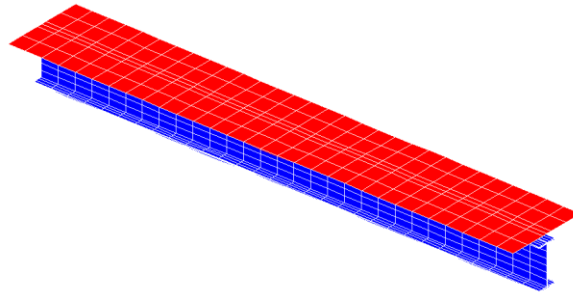
La section de la poutre métallique est en IPE400, les connecteurs sont des goujons de type Nelson (TRW Nelson KB 3/4''-80) de hauteur 80mm et diamètre 19mm, et la dalle (pleine) est en béton armé de 0.8m de largeur et 0.1m d'épaisseur.

La poutre métallique est modélisée en éléments finis massifs (*CUB8*), les goujons sont modélisés en éléments poutre et la dalle en béton armé est modélisée en éléments minces (*COQ4*).

Les matériaux acier et béton ainsi que les connecteurs sont caractérisés par des comportements élastiques linéaires, hypothèse jugée acceptable pour un calcul en E.L.S.



Profilé avec congé de raccordement



Profilé sans congé de raccordement

Figure III.4. Poutre mixte de référence et sa déformée.

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

Tableau. III.1. Valeurs de la flèche max de la poutre mixte de portée de 5m

Profilé de la poutre de référence	Flèches max (mm)					
	Avec congés de raccordement			Sans congés de raccordement		
	Théorie	Cast3m	Ecart %	Théorie	Cast3m	Ecart %
IPE400	1.25	1.167	6.64	1.32	1.214	8.03

D'après les résultats obtenus selon le tableau 3.1 ; il est à constater que l'écart en pourcentage est d'ordre de 7% pour le cas où le profilé comporte des congés de raccordement et il est de 8% pour le cas où le profilé est sans congés de raccordement. Donc, modèle numérique de référence fiable pour un tel calcul en E.L.S.

3.4. Modélisation non-linéaire

3.4.1 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 à la section correspondante.

Le chargement du modèle est réalisé par déplacement imposé monotone croissant. Le calcul élasto-plastique s'effectue par la procédure incrémentale PAS A PAS de Cast3m [33].

3.4.2 Loi de comportement non-linéaire de la poutre mixte

Comme la poutre mixte est formée à partir de trois composants (acier, béton et connecteurs), il est nécessaire de revoir brièvement le comportement de chacun d'eux avant que nous puissions décrire le comportement général de la combinaison.

- **Lois de comportement de l'acier**

Le matériau acier est modélisé à l'aide d'une loi de comportement de type bilinéaire élasto-plastique parfaite sans écrouissage (figure3.5). Les caractéristiques mécaniques de l'acier sont définies comme suit : $E_a = 210$ GPa et $\nu = 0.3$.

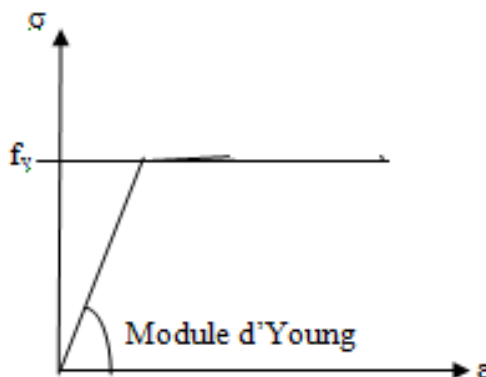


Figure.III.5. Loi de comportement de l'acier

- **Lois de comportement du béton**

La loi de comportement du béton est de type bilinéaire élastique plastique, avec une limite d'élasticité en traction différente de celle en compression (figure3.6). Le module de Young E_b est pris égal aux valeurs mesurées sur un échantillon du béton utilisé. Compte tenu du fonctionnement de la poutre mixte (dalle en compression), cette loi simplifiée constitue une approximation réaliste du comportement du béton.

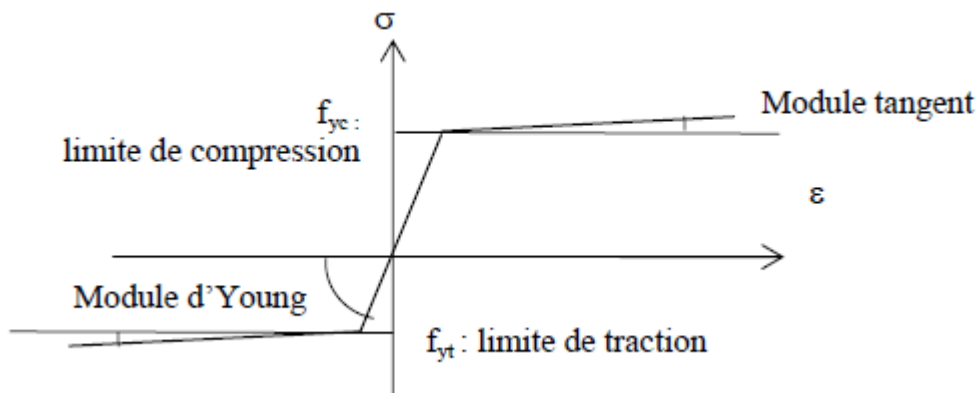
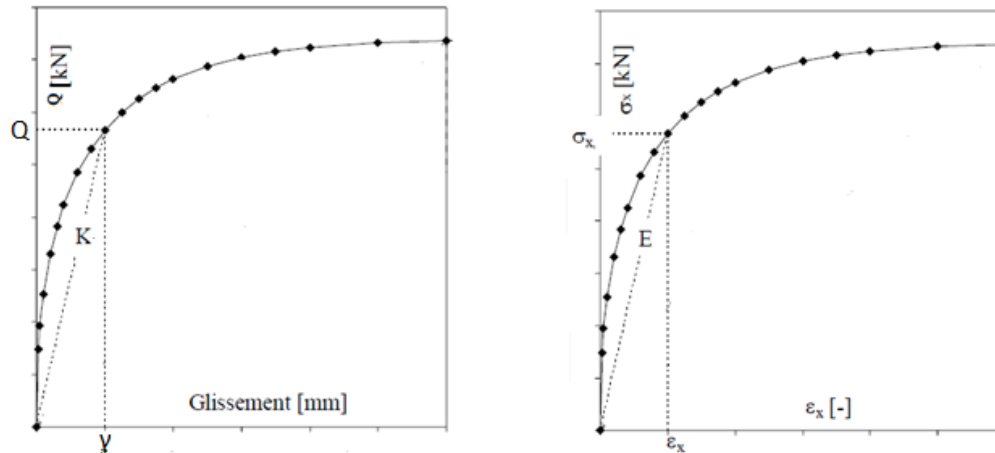


Figure III.6. Loi de comportement idéalisé du béton

- Lois de comportement des connecteurs (goujons)

La loi de comportement des connecteurs est établie à la base d'une équivalence entre le comportement flexionnel de l'élément poutre et le comportement force-glissement réel d'un goujon (figure 3.7).



a) Loi de comportement de type force-glissement

b) Loi de comportement de type σ - ε

Figure III.7. Transformation des lois de comportement pour le connecteur

3.4.3 Validation du modèle numérique

Pour s'assurer de la bonne représentativité du modèle de référence, on présente ici les résultats de deux types d'analyse :

La première analyse repose sur la validation du modèle éléments finis de référence issu des résultats d'un essai expérimental évoqué en littérature [35], il s'agit sur l'étude de l'évolution charge-déplacement d'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 hc de 100 mm, par 2 files de goujons régulièrement espacés, de type Nelson (hauteur 80 mm, diamètre 19 mm) (voir figure 3.8). Le ferrailage est constitué de deux nappes longitudinales de 5 barres $\Phi 10$, et de cadres transversaux $\Phi 8$ placés tous les 200mm.

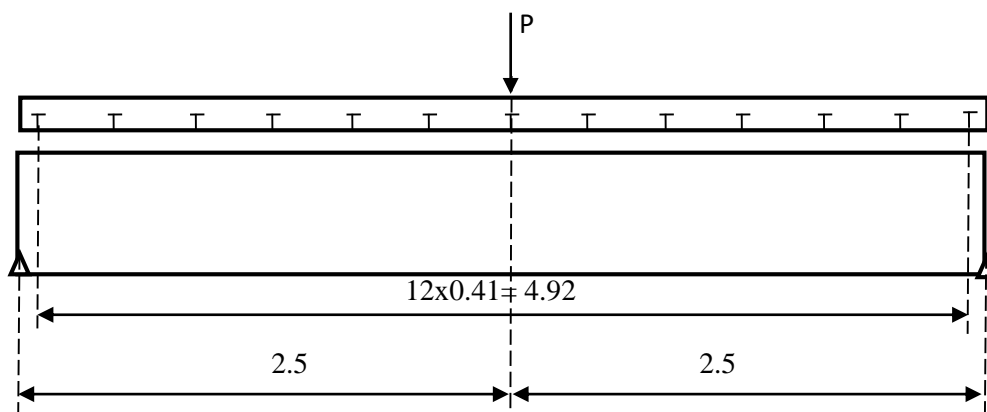


Figure III.8. Configuration de la poutre mixte [35]

La deuxième analyse repose sur la validation du modèle éléments finis de référence issue d'un résultat numérique évoqué en littérature [36], il s'agit sur l'étude du glissement relatif à l'interface acier-béton d'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 3.9). La dalle est une dalle pleine en béton armé, d'une largeur de 800 mm et d'une épaisseur de 100 mm. Le ferrailage est constitué de deux nappes de 3.93cm^2 chacune

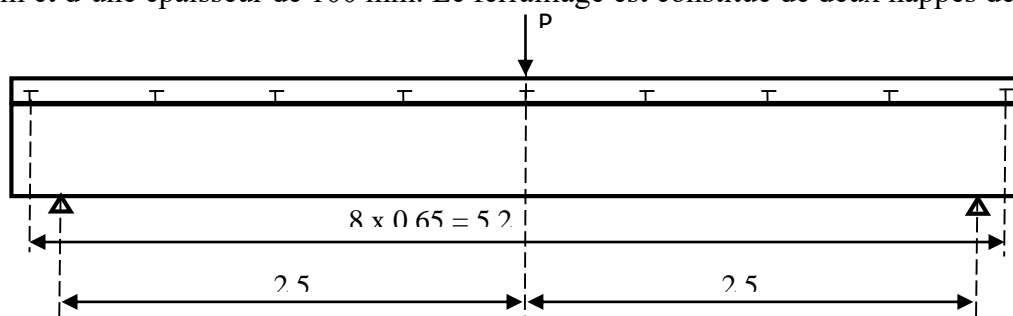


Figure III.9. Configuration de la poutre mixte [36]

La figure III.10 montre la comparaison des résultats en termes de l'évolution charge - flèche à mi- portée de la poutre mixte.

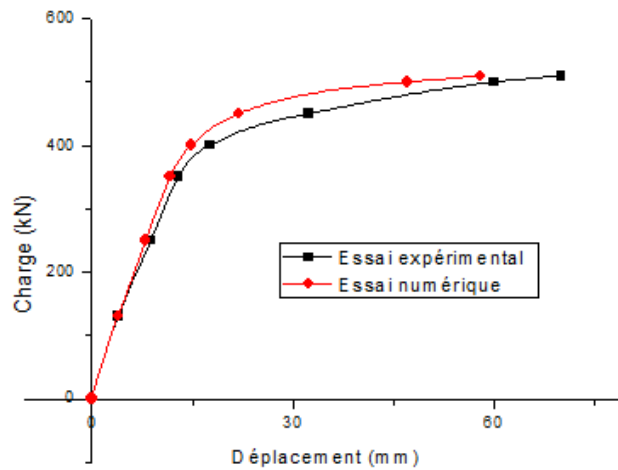


Fig. III.10. Évolution charge - flèche d'une poutre mixte [35]

D'après les deux courbes de la figure 3.10, il est à remarquer qu'un résultat comparable est obtenu entre la solution expérimentale et la solution numérique utilisant le modèle numérique de référence.

La figure 3.11 montre la comparaison des résultats en termes de glissement relatif à l'interface acier -béton de la poutre mixte

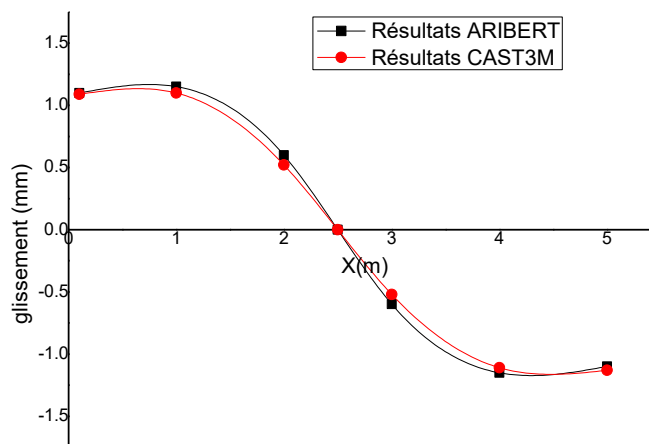


Fig. III.11. Glissement relatif à l'interface d'une poutre mixte [36]

D'après les deux courbes de la figure 3.11, il est à remarquer qu'un résultat comparable est obtenu entre les deux solutions numériques.

3.5. Conclusion

Grâce au modèle de référence 3D, développé ci-haut décrit dans ce chapitre, nous avons pu mettre en évidence l'influence de la souplesse du support sur le comportement des poutres mixtes. La particularité de la modélisation 3D, peut guider dans le chapitre suivant comme référence pour d'autres modèles numériques en termes de temps de construction et d'exécution en vue d'une analyse numérique sur le comportement des poutres mixtes de différentes configurations

Chapitre 4

Présélection du support numérique adéquat

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, et afin de justifier le choix d'un tel modèle numérique par éléments finis dans le sens est de mettre en évidence son influence et sa souplesse en termes de temps de construction et d'exécution sur le comportement des poutres mixtes ; une étude comparative a été menée entre deux nouveaux modèles numériques proposés en éléments à trois dimensions (3D) et le modèle de référence décrit dans le chapitre précédent.

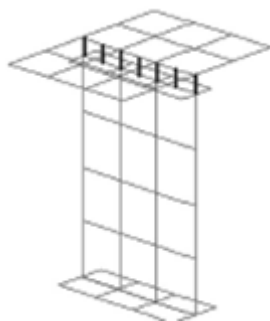
Le modèle de référence, bien entendu, permet de réaliser des calculs exhaustifs mais souvent au détriment d'un temps de calcul conséquent et par fois, être trop complexe au détriment du temps de calcul d'un point de vue purement numérique.

Le pourquoi de ce choix, peut être privilégié par le fait que la mise en œuvre du modèle de référence serait beaucoup trop lente.

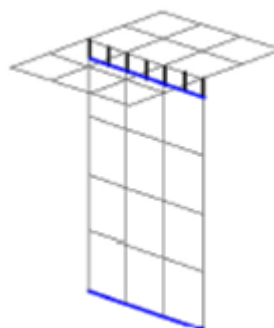
Dans ce contexte, une étude numérique a été menée dans le domaine linéaire et le domaine non-linéaire à la base de différents modèles numériques, en l'occurrence les deux nouveaux modèles numériques proposés et le modèle de référence tout en gardant le même modèle numérique simulant la dalle de béton en éléments coques minces en 3D (COQ4) et le même modèle numérique simulant les connecteurs (goujons) en éléments poutres, alors que la distinction entre les modèles demeure au niveau de la poutre métallique.

Il s'agit donc, de deux modèles numériques simulant la poutre mixte :

- Le modèle P1 est un modèle détaillé d'une poutre en acier. Les ailes et l'âme sont modélisées par des éléments de coque comme le montre la figure 4.1.
- Le modèle P2 est similaire au modèle P1, sauf que la semelle est modélisée par des éléments de poutre au lieu d'éléments de coque, comme le montre la figure 4.1.



Modèle P1



Modèle P2

Fig.IV.1 Nouveaux modèles numériques proposé

4.2. Analyse numérique

Une analyse a été effectuée dans le domaine linéaire et le domaine non-linéaire sur le comportement de différentes configurations de poutres mixtes dont le profilé métalliques est fabriquées en profilé IPE, à savoir le modèle de référence (figure 4.2) et les deux nouveaux modèles numériques proposés (P1 et P2) représentés par les deux figure respectivement (4.3 Et 4.4).

Ces différentes configurations de poutres ont des caractéristiques géométriques et propriétés physiques différentes.

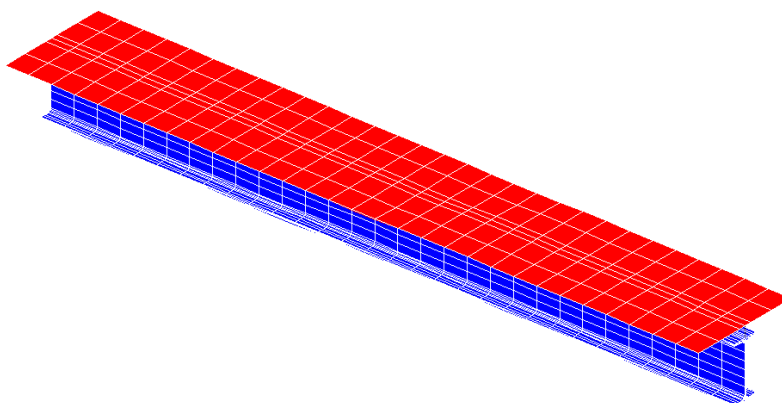


Fig. IV.2 Modèle de référence

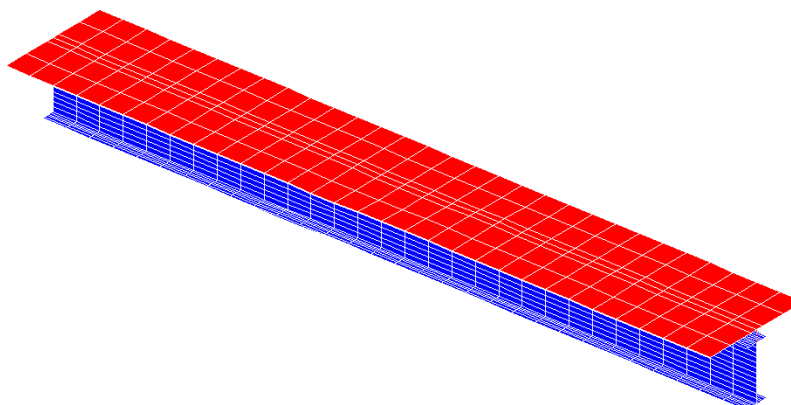


Fig. IV.3 Modèle P1

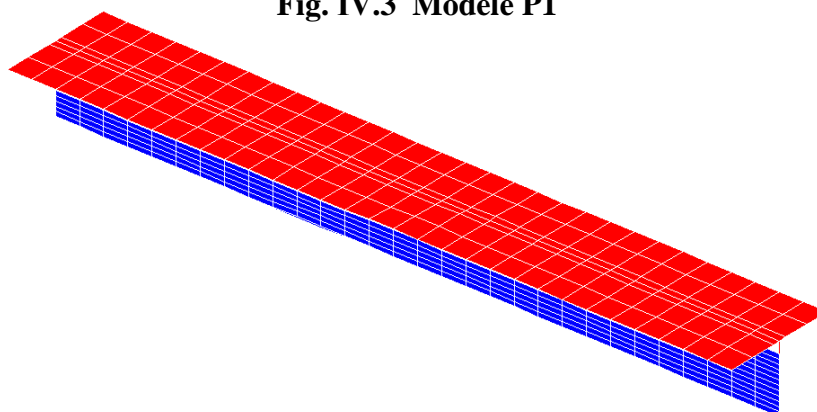


Fig. IV.4 Modèle P2

Analyse numérique linéaire

Dans cette analyse linéaire, une étude a été menée sur le calcul de la flèche maximale des modèles précédents, à savoir le modèle de référence, le modèle P1 et modèle P2 (voir figure 4.5, 4.6 et 4.7).

Il s'agit d'une poutre mixte en différents IPE (400 500 et 600), simplement appuyée, de différentes portées (4m, 4.5m et 5m).

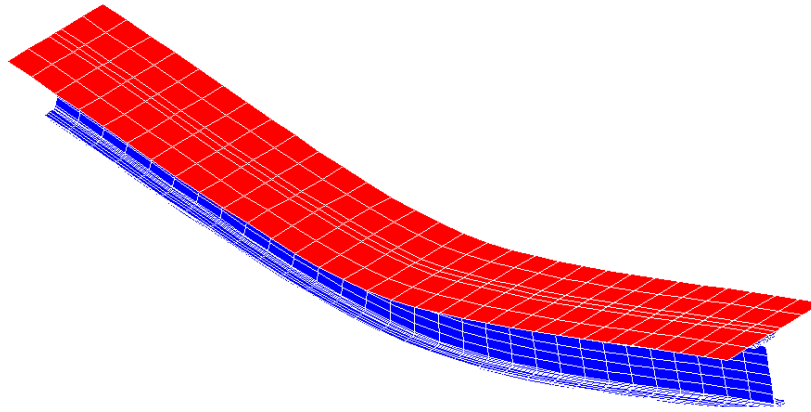


Fig. IV.5 Déformée du modèle de référence

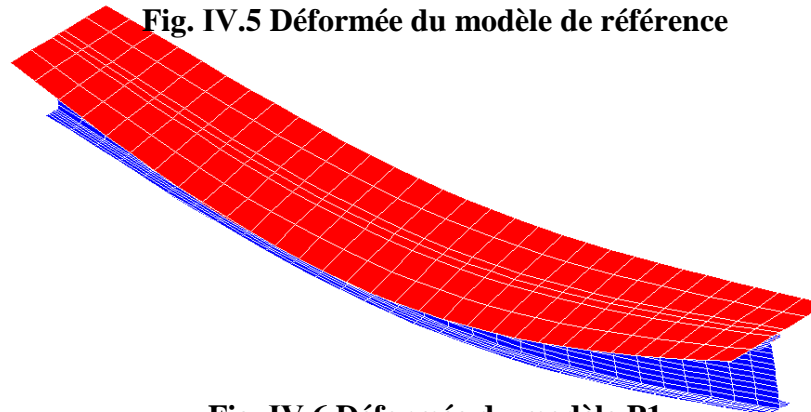


Fig. IV.6 Déformée du modèle P1

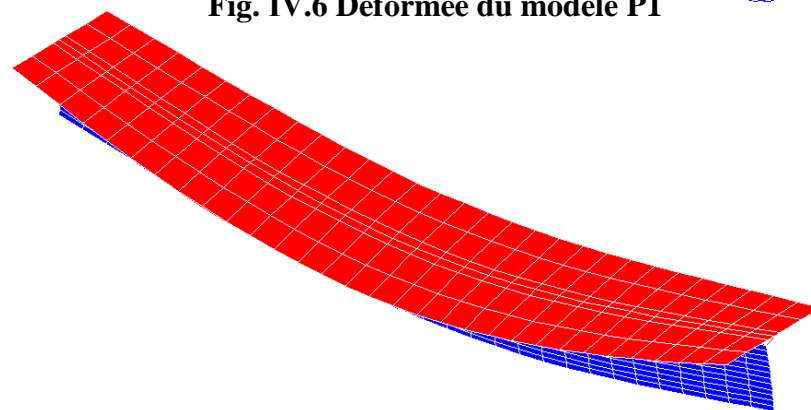


Fig. IV.7 Déformée du modèle P2

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

Profilé	Portée (m)	Flèches max (mm)			$f_{P1}/f_{réf}$	$f_{P2}/f_{réf}$
		Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2		
IPE400	4.00	0.585	0.597	0.563	1.02	0.96
	4.50	0.837	0.843	0.798	1.01	0.95
	5.00	1.167	1.161	1.103	0.99	0.94
IPE500	4.00	0.401	0.449	0.415	1.12	1.03
	4.50	0.553	0.618	0.549	1.12	0.99
	5.00	0.748	0.832	0.735	1.11	0.98
IPE600	4.00	0.312	0.371	0.319	1.19	1.02
	4.50	0.418	0.499	0.423	1.19	1.01
	5.00	0.548	0.659	0.551	1.20	1.005

Tableau IV.1. Valeurs de la flèche maximale « Cas d'un chargement uniformément répartie »

D'après les valeurs obtenues selon le tableaux 4.1 ci-dessus, il à constater que pour des poutres mixtes de différents profilés (IPE400, IPE500 et IPE600) pour différentes et de différentes portées (4.00,4.50 et 5.00) ; l'écart de différence entre le modèle de référence et le modèle P1 est compris entre (1 et 20)%, alors que celui entre le modèle de référence et le modèle P2 est compris entre (0.5 et 6)%, autrement dit, les résultats obtenus par le modèle P2 concordent bien avec ceux obtenus par le modèle de référence que ceux obtenus par le modèle P1.

Profilé	Portée (m)	Flèches max (mm)				
		Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2	$f_{P1}/f_{réf}$	$f_{P2}/f_{réf}$
IPE400	4.00	0.179	0.185	0.175	1.03	0.98
	4.50	0.239	0.243	0.231	1.02	0.97
	5.00	0.311	0.291	0.298	0.93	0.96
IPE500	4.00	0.102	0.124	0.108	1.21	1.06
	4.50	0.133	0.159	0.139	1.19	1.04
	5.00	0.171	0.187	0.176	1.09	1.03
IPE600	4.00	0.065	0.091	0.076	1.40	1.17
	4.50	0.082	0.115	0.095	1.40	1.16
	5.00	0.103	0.133	0.117	1.29	1.13

Tableau IV.2. Valeurs de la flèche maximale « Cas d'un chargement concentré à mi- portée »

D'après les valeurs obtenues selon le tableaux 4.2 ci-dessus, il à constater que pour des poutres mixtes de différents profilés (IPE400, IPE500 et IPE600) pour différentes et de différentes portées (4.00,4.50 et 5.00) ; l'écart de différence entre le modèle de référence et le modèle P1 est compris entre (2 et 40)%, alors que celui entre le modèle de référence et le modèle P2 est compris

entre (2 et 17)%, autrement dit, les résultats obtenus par le modèle P2 concordent mieux avec ceux obtenus par le modèle de référence que ceux obtenus par le modèle P1.

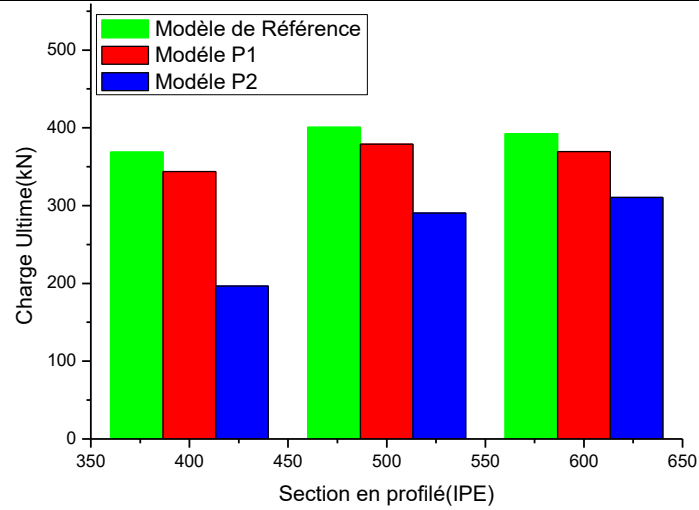
Analyse numérique non-linéaire

Dans cette analyse non-linéaire quelques paramètres ont été étudiés, à savoir l'influence de la section, de la nuance de la poutre et de la portée.

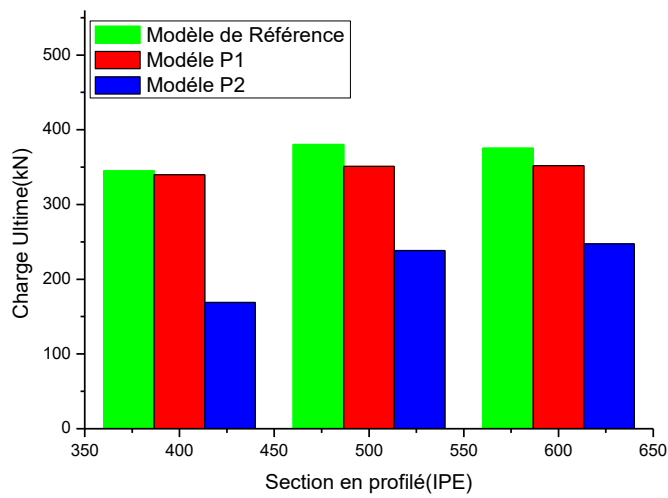
- **Influence de la section de la poutre**

Nous allons montrer dans ce paragraphe l'influence de la section de la poutre sur son comportement à l'état non-linéaire à savoir l'estimation de la charge ultime, en faisant varier la section et garder la même portée pour différentes nuances.

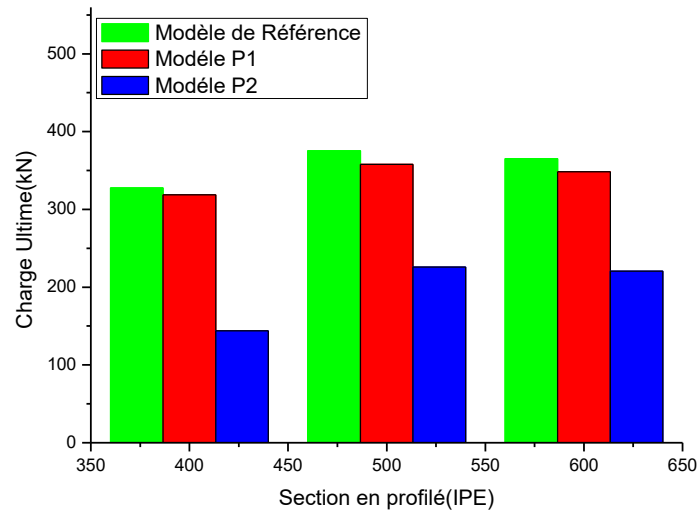
Les histogrammes des figures (4.8, 4.9 et 4.10) ci-dessous représentent la valeur de la charge ultime en fonction de différents profilés d'acier de nuances différentes des poutres de différentes portées.



a- Poutres de de portée $L = 4m$

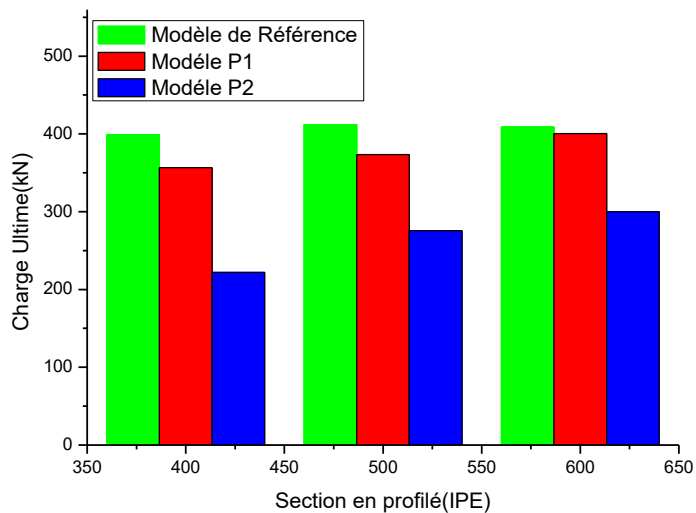


b- Poutres de de portée $L = 4.5m$

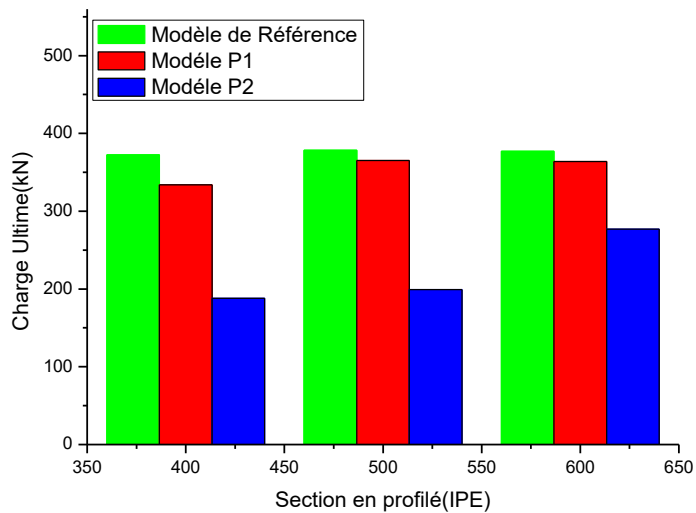


c- Poutres de de portée $L = 5m$

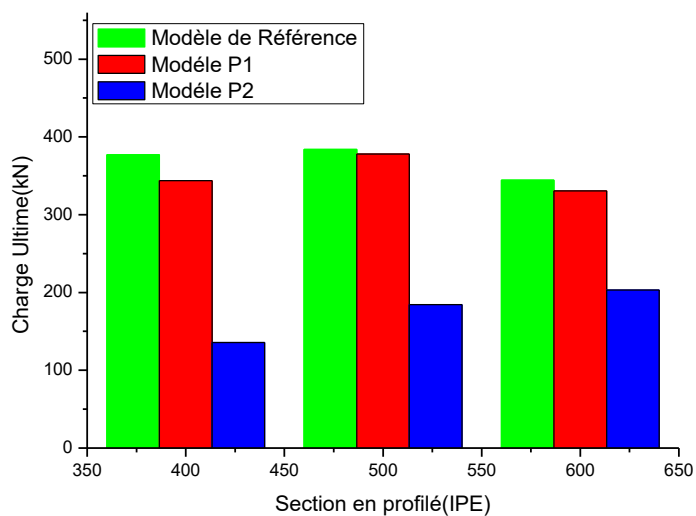
Figure. IV.8 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S235



a- Poutres de de portée L = 4m

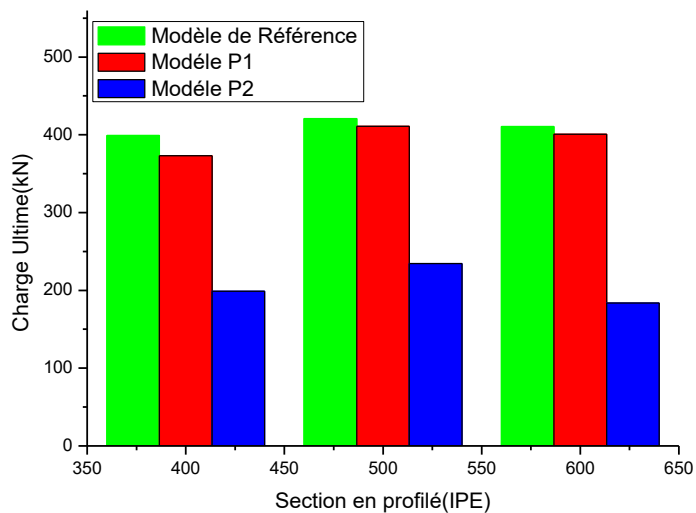


b- Poutres de de portée L = 5m

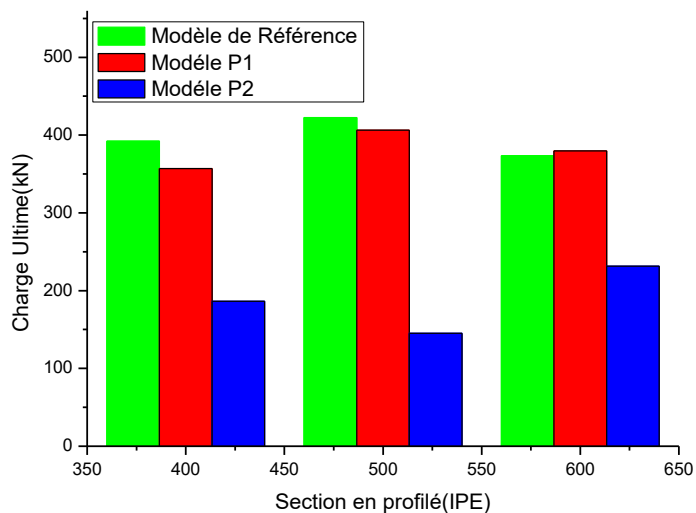


a- Poutres de de portée L = 5m

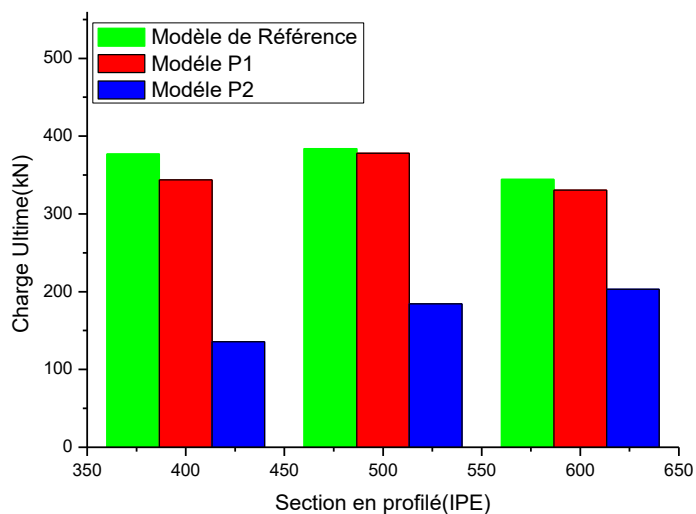
Figure IV.9 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S275



b- Poutres de de portée L = 4m



c- Poutres de de portée L = 4.5



d- Poutres de de portée L = 5m

Figure.IV.10 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S355

On peut conclure donc d'après les résultats obtenus selon les histogrammes des figures (4.8, 4.9 et 4.10) représentée ci-dessus, que les résultats obtenus par le modèle P1 s'accordent mieux avec ceux obtenus par le modèle de référence, par contre les résultats obtenus par le modèle P2 ne se rapprochent pas avec ceux obtenus par le modèle de référence.

- **Influence de la nuance de l'acier**

Dans ce paragraphe il s'est avéré utile de donner une impression sur l'influence de la nuance de l'acier utilisé de la poutre mixte sur son comportement non-linéaire vis-à-vis le modèle utilisé pour sa modélisation en éléments finis, en faisant varier la nuance de l'acier et garder la même portée pour différentes sections (profilés) de la poutre (voir tableaux 4.1 à 4.9)

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			$F_{P1}/F_{réf}$	$F_{P2}/F_{réf}$
	Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2		
S235	368,79	343,69	196,72	0.93	0.53
S275	399,05	366.66	222,05	0.92	0.56
S355	399,17	373,06	198,75	0.93	0.50

Tableau 4.1. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de portée 4m

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			$F_{P1}/F_{réf}$	$F_{P2}/F_{réf}$
	Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2		
S235	345,14	339,96	168,8	0.98	0.49
S275	372,35	334,05	188,11	0.90	0.50
S355	392,31	356,94	186,41	0.90	0.48

Tableau 4.2. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de portée 4.5m

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			$F_{P1}/F_{réf}$	$F_{P2}/F_{réf}$
	Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2		
S235	327,69	318,92	143,77	0.97	0.44
S275	361,16	326,05	164,57	0.90	0.45
S355	377,17	343,92	185,54	0.91	0.49

Tableau IV.3. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de portée 5m

D'après les valeurs obtenues selon les tableaux (4.1 à 4.3) ci-dessus, il à constater que pour des poutres mixtes dont le profilé IPE400 pour différentes nuances d'acier et de différentes portées ;

l'écart maximal de différence entre le modèle de référence et le modèle P1 est d'ordre 10%, alors que celui entre le modèle de référence et le modèle P2 est dans l'ordre de 56%.

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F _{P1} /F _{réf}	F _{P2} /F _{réf}
	Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2		
S235	400,61	378,87	290,52	0.94	0.72
S275	412,02	373,51	275,77	0.91	0.67
S355	421	410.97	234.33	0.98	0.56

Tableau IV.4. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de portée 4m

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F _{P1} /F _{réf}	F _{P2} /F _{réf}
	Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2		
S235	380.35	351.14	238.49	0.92	0.63
S275	378.29	365.29	199.14	0.97	0.53
S355	422,55	406,24	145,08	0.96	0.34

Tableau IV.5. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de portée 4.5m

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F _{P1} /F _{réf}	F _{P2} /F _{réf}
	Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2		
S235	375,24	358,1	225,9	0.95	0.60
S275	371,26	357,01	187,24	0.96	0.50
S355	384,03	377,99	184,5	0.98	0.48

Tableau IV.6. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de portée 5m

D'après les valeurs obtenues selon les tableaux (4.1 à 4.3) ci-dessus, il à constater que pour des poutres mixtes dont le profilé IPE400 pour différentes nuances d'acier et de différentes portées ; l'écart maximal de différence entre le modèle de référence et le modèle P1 est d'ordre 9%, alors que celui entre le modèle de référence et le modèle P2 est dans l'ordre de 66%.

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F _{P1} /F _{réf}	F _{P2} /F _{réf}
	Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2		
S235	392,58	369,33	310,6	0.94	0.79
S275	409,07	400,33	299,87	0.98	0.73
S355	410,65	400,8	183,79	0.98	0.45

Tableau IV.7. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de portée 4m

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			$F_{P1}/F_{réf}$	$F_{P2}/F_{réf}$
	Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2		
S235	375,56	351,86	247,24	0.94	0.66
S275	377,12	363,99	277,02	0.96	0.73
S355	373,33	379,57	231,35	1.02	0.62

Tableau IV.8. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de portée 4.5m

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			$F_{P1}/F_{réf}$	$F_{P2}/F_{réf}$
	Modèle de réf.	Modèle P1	Modèle P2		
S235	365,04	348,44	220,61	0.95	0.60
S275	359,62	348,83	200,54	0.97	0.56
S355	344,46	330,58	203,06	0.96	0.59

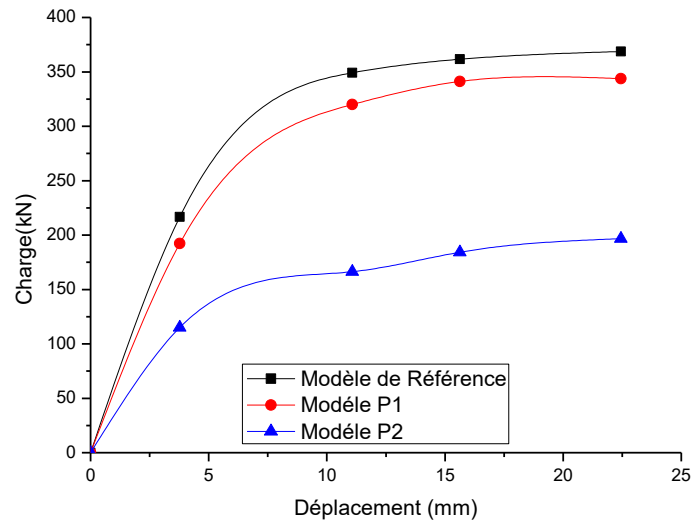
Tableau IV.9. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de portée 5m

D'après les valeurs obtenues selon les tableaux (4.1 à 4.3) ci-dessus, il à constater que pour des poutres mixtes dont le profilé IPE400 pour différentes nuances d'acier et de différentes portées ; l'écart maximal de différence entre le modèle de référence et le modèle P1 est d'orde 8%, alors que celui entre le modèle de référence et le modèle P2 est dans l'orde de 55%.

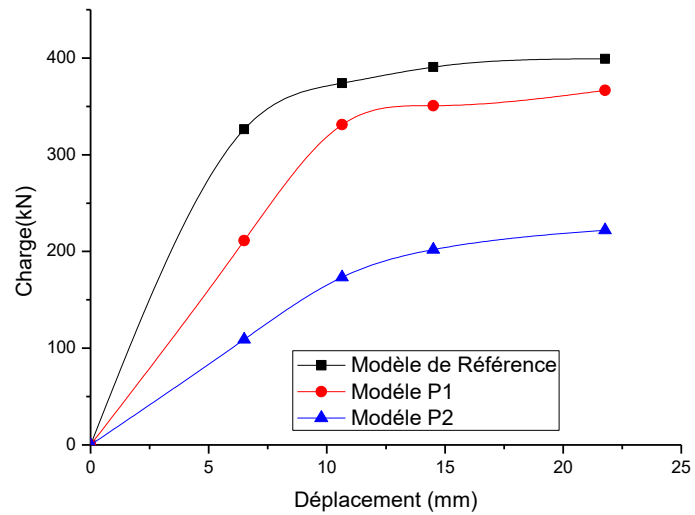
- **Influence de la portée de la poutre**

Dans ce paragraphe, nous allons étudier l'influence de la portée de la poutre en faisant varier la portée et garder la même section (IPE) pour différentes nuances d'acier.

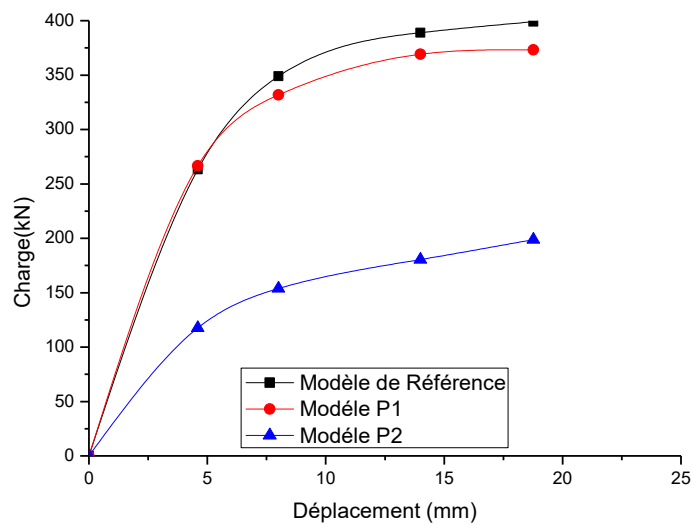
Les graphes des figures ci-dessous (figures 4.11 à 4.19) montrent le comportement non-linéaire des configurations de poutres mixtes étudiées pour des portées différentes ($L = 4m$, $L=4.5m$ et $L = 5m$)



a- Poutres de nuance d'acier S235

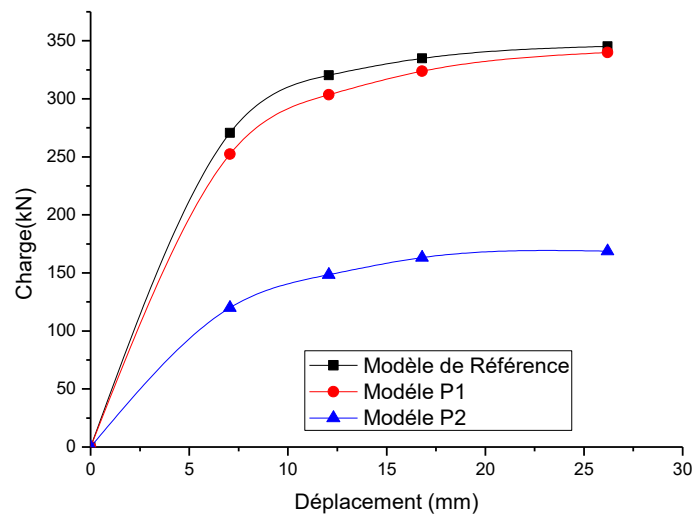


b- Poutres de nuance d'acier S275

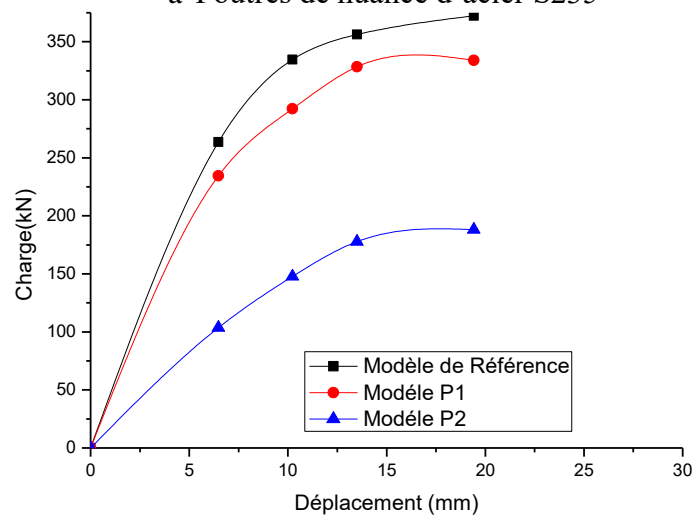


c- . Poutres de nuance d'acier S355

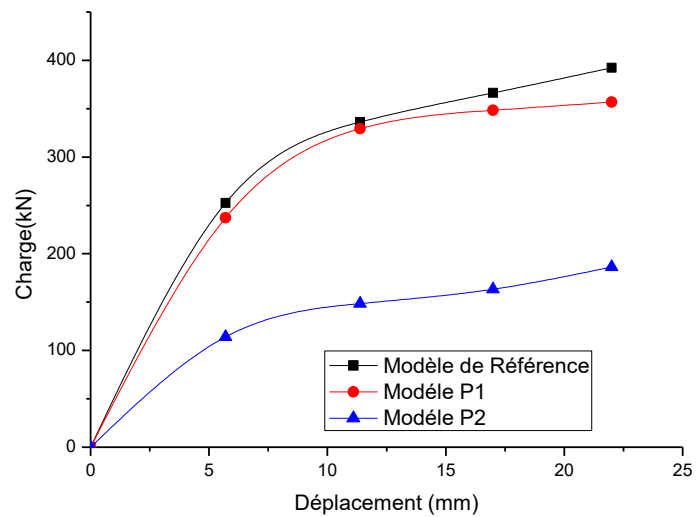
Figure.IV .11 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée L = 4m



a- Poutres de nuance d'acier S235

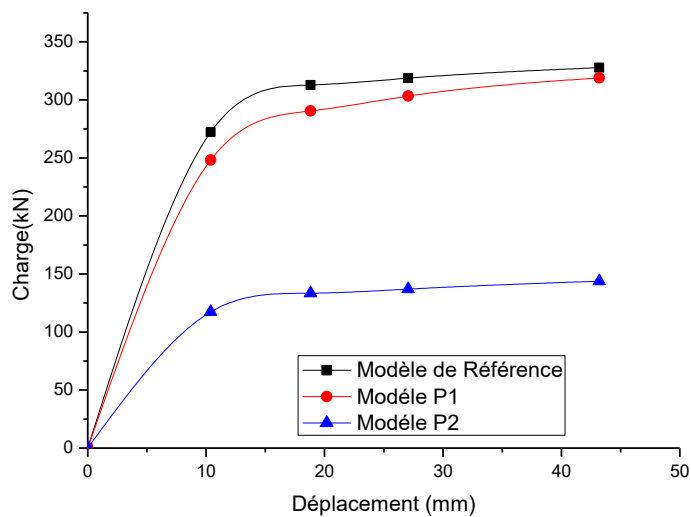


b- Poutres de nuance d'acier S275

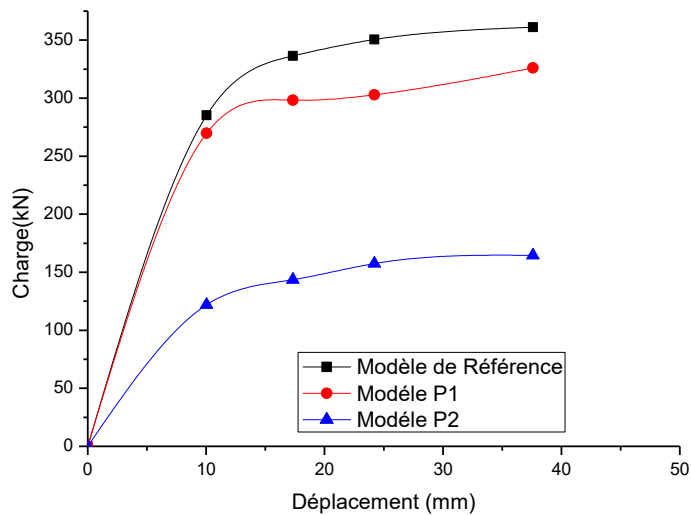


c- Poutres de nuance d'acier S355

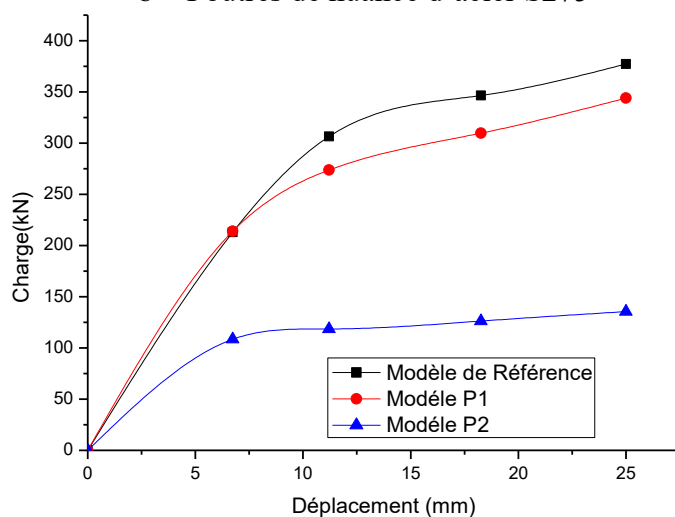
Figure IV.12 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée L = 4.5m



a- Poutres de nuance d'acier S235



b- Poutres de nuance d'acier S275

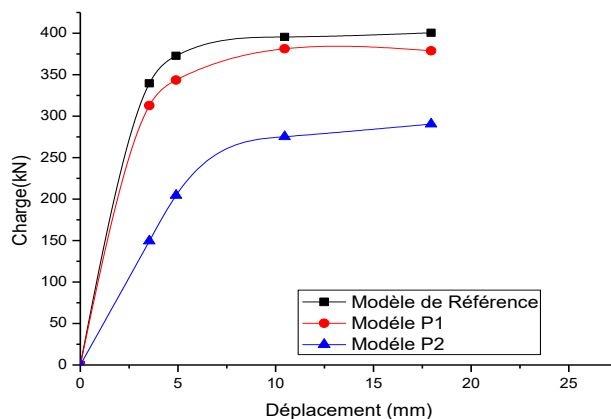


c- Poutres de nuance d'acier S355

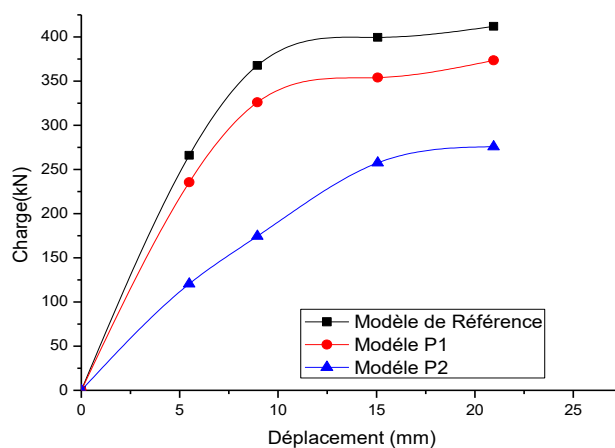
Figure IV.13 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée L = 5m

D'après les courbes des figures (4.11 à 4.13), il est à constater que les résultats obtenus par le modèle P1 concordent bien avec ceux obtenus par le modèle de référence que ceux obtenus par le

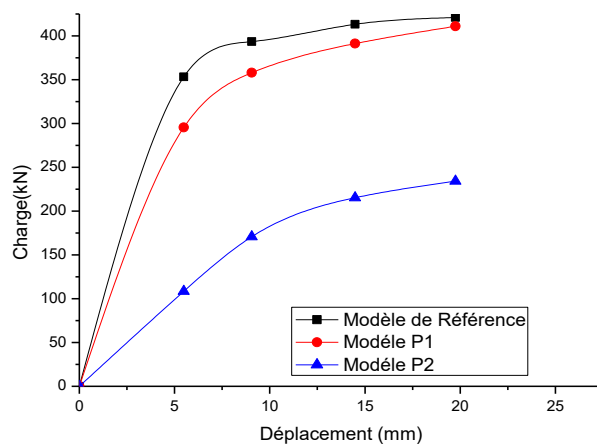
modèle P2



a- poutres de nuance d'acier S235

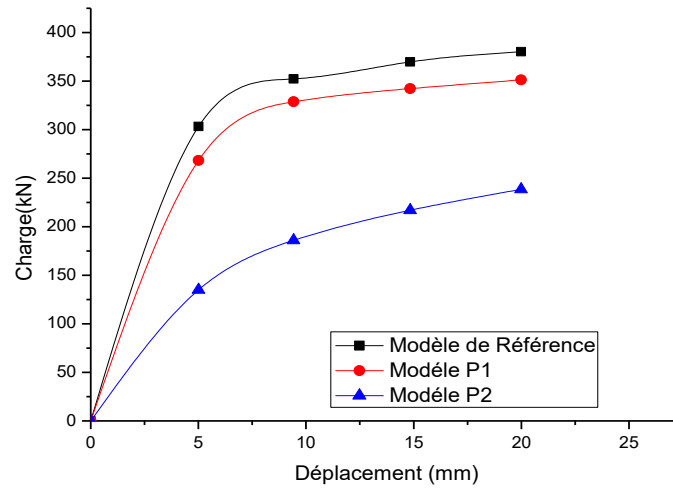


b- Poutres de nuance d'acier S275

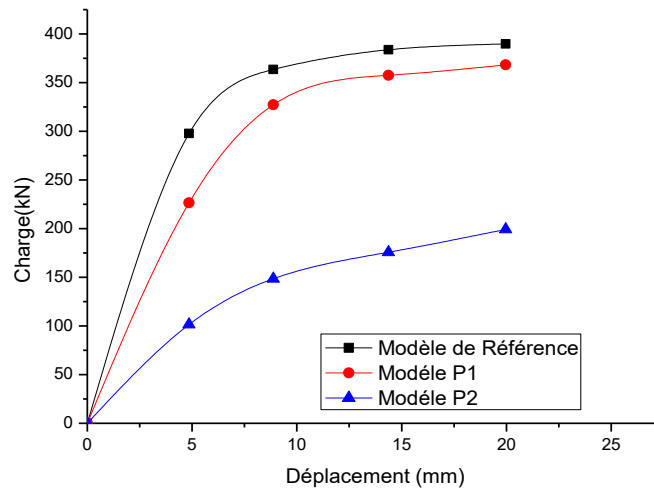


c- Poutres de nuance d'acier S355

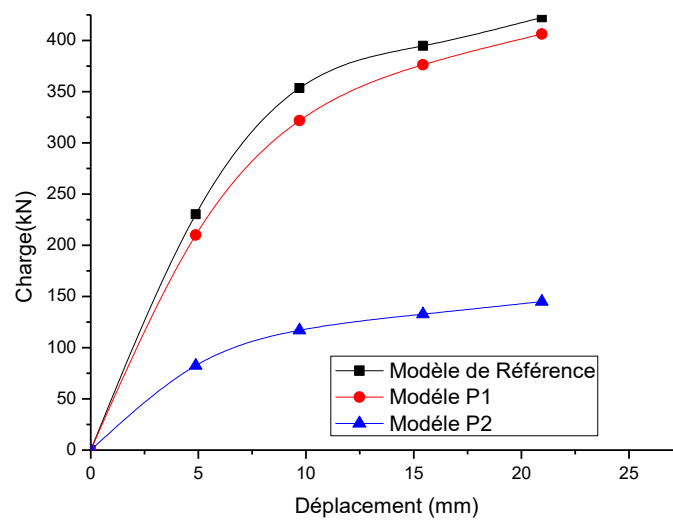
Figure IV.14 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée L = 4m



a- Poutres de nuance d'acier S235

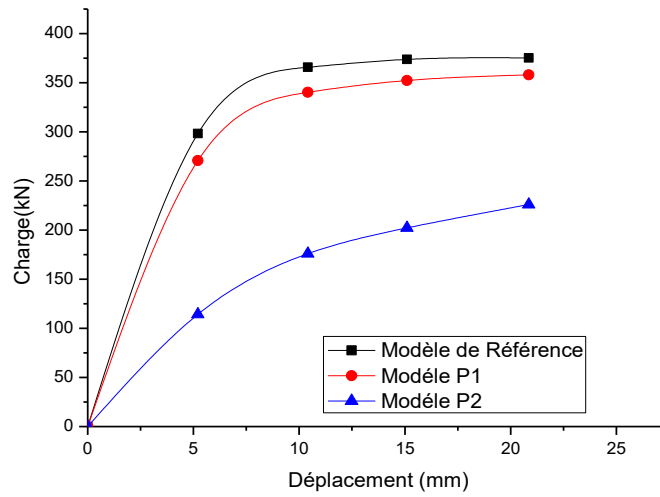


b- Poutres de nuance d'acier S275

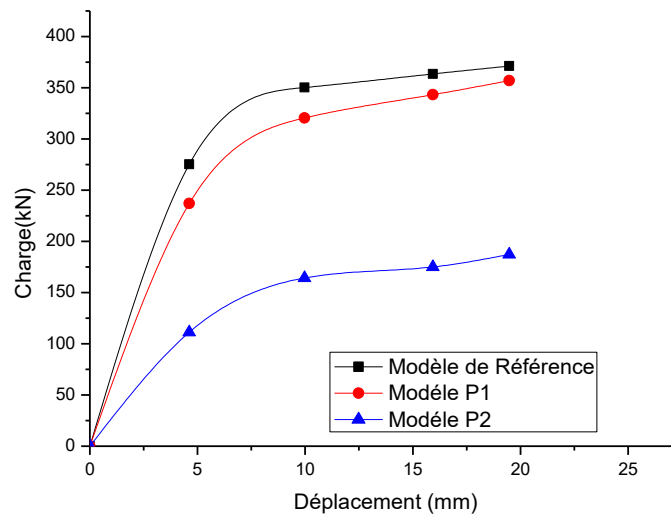


c- Poutres de nuance d'acier S355

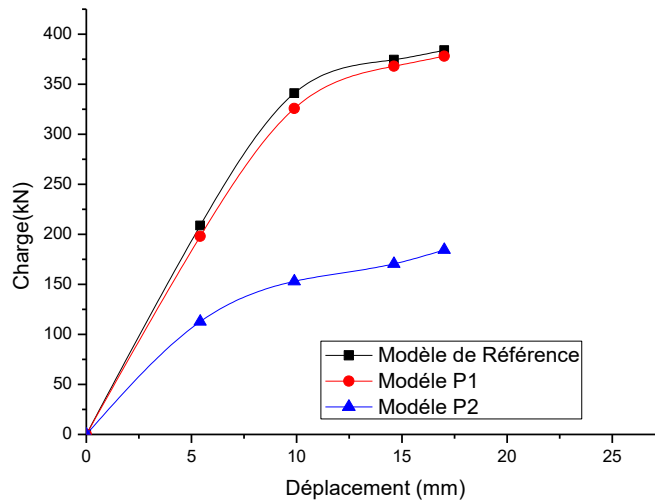
Figure IV.15 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée L = 4.5m



a- Poutres de nuance d'acier S235



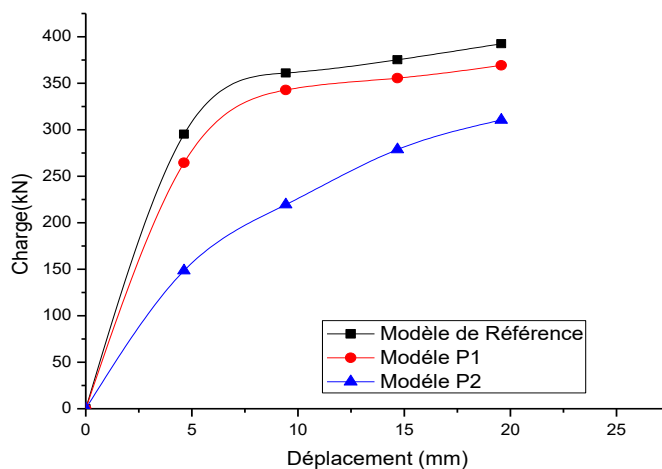
b- Poutres de nuance d'acier S275



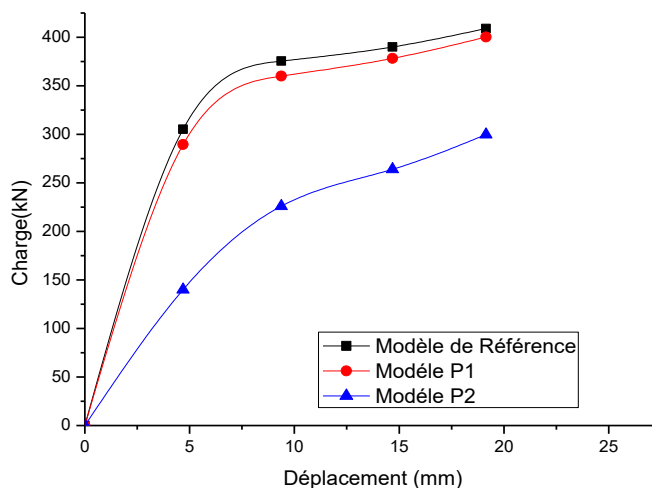
c- Poutres de nuance d'acier S355

Figure IV.16 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée L = 5m

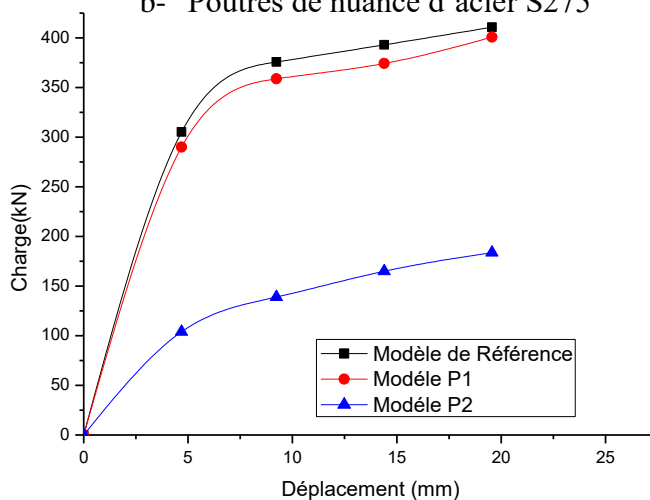
D'après les courbes des figures (4.14 à 4.16), il est à observer que les résultats obtenus par le modèle P1 concordent bien avec ceux obtenus par le modèle de référence, par contre les résultats obtenus par le modèle P2 ne concordent pas avec ceux obtenus par le modèle de référence.



a- Poutres de nuance d'acier S235

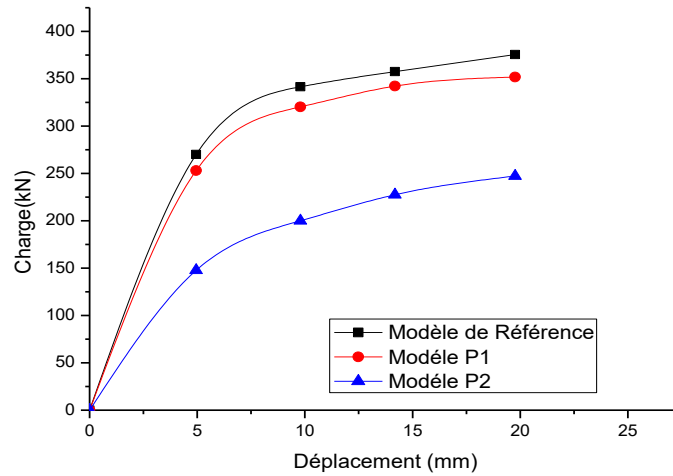


b- Poutres de nuance d'acier S275

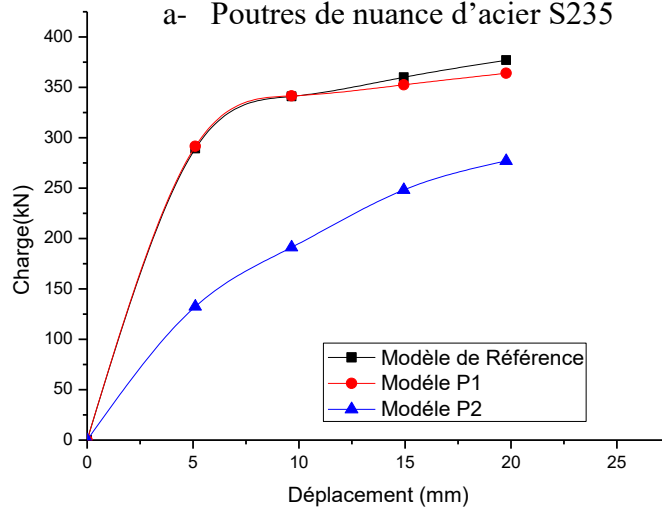


c- Poutres de nuance d'acier S355

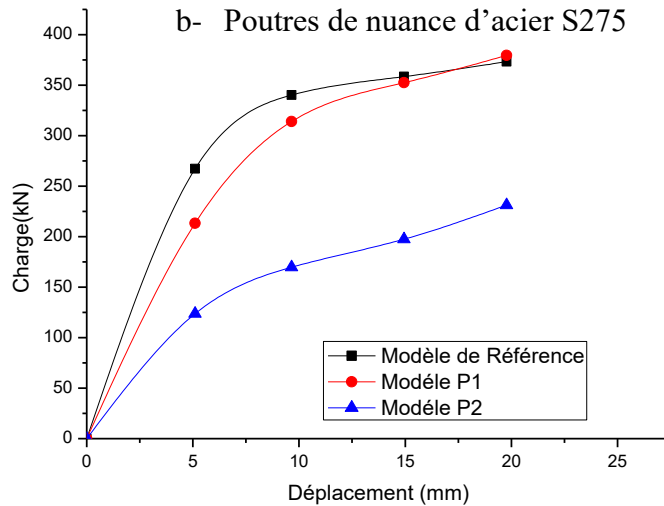
Figure IV.17 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée L = 4m



a- Poutres de nuance d'acier S235

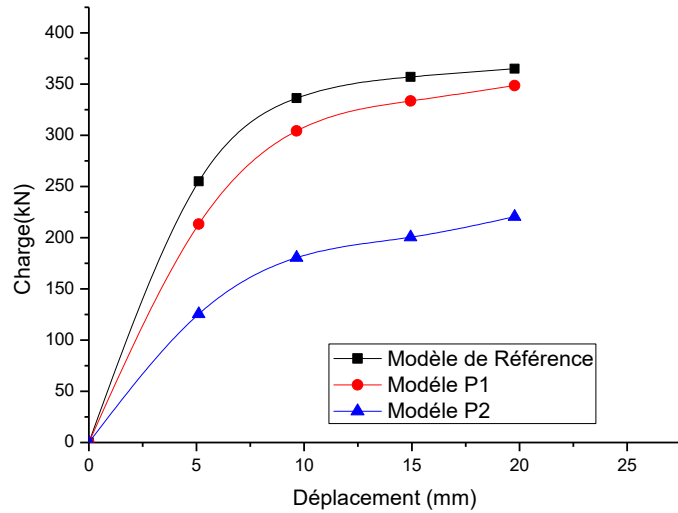


b- Poutres de nuance d'acier S275

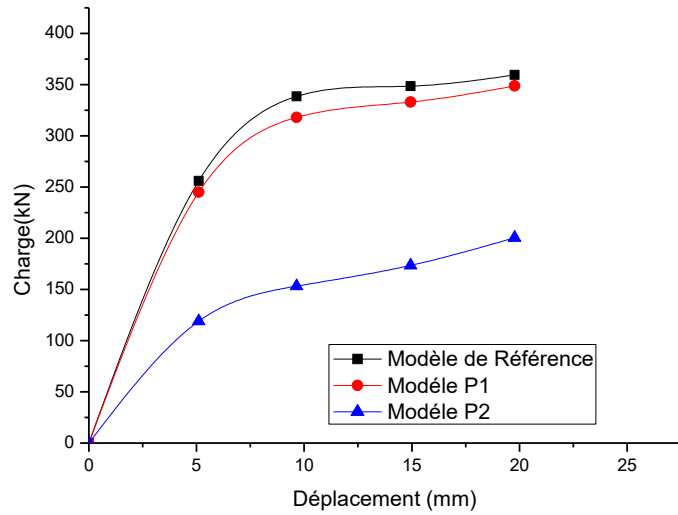


c- Poutres de nuance d'acier S355

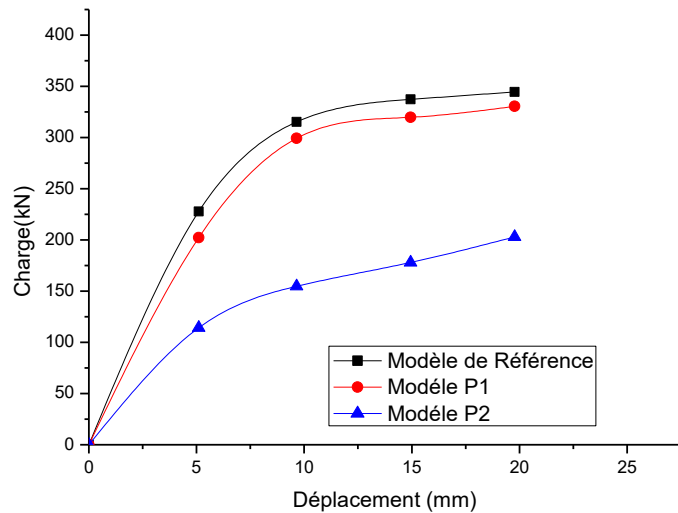
Figure IV.18 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée L = 4.5m



a- Poutres de nuance d'acier S235



b- Poutres de nuance d'acier S2



c- Poutres de nuance d'acier S275

Figure IV.19 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée L = 5m

D'après les courbes des figures (4.17 à 4.19), il est à remarquer que les résultats obtenus selon le modèle P1 sont plus proches que ceux obtenus selon le modèle P2 par rapport aux résultats obtenus selon le modèle de référence.

En d'autres termes l'écart de différence entre le modèle P2 et le modèle de référence est plus important que l'écart de différence entre le modèle P1 et le modèle de référence.

4.3. Conclusion

Grâce au modèle adoptée comme référence dans le chapitre précédent (chap.3),et afin de présélectionner le modèle adopté qui semble bien convenir à l'étude des comportements mécaniques des poutres mixtes dans le domaine linéaire et le domaine non linéaire, nous avons mené dans ce chapitre une étude comparative entre deux nouveaux modèles numériques proposés en éléments à trois dimensions (P1, P2) et le modèle de référence, modélisant des poutres mixtes représentatives de cas envisageables.

Le modèle de référence permet de réaliser des calculs exhaustifs mais souvent au détriment d'un temps de calcul conséquent et par fois, être trop complexe au détriment du temps de calcul d'un point de vue purement numérique

D'après les résultats obtenus :

- Dans le domaine linéaire, vu que les résultats obtenus par le modèle P2 concordent mieux avec ceux obtenus par le modèle de référence que ceux obtenus par le modèle P1 ;il a été conclu que le support numérique P2 a été présélectionné vu l'influence de sa souplesse qui a été mis en évidence en termes de temps de construction.

Dans le domaine non-linéaire, vis-à-vis l'influence de quelques paramètres étudié, à savoir l'influence de la portée, de la section et de la nuance de la poutre, il a été conclu que le support numérique P1 a été présélectionné vu l'influence de sa souplesse qui a été mis en évidence en termes de temps de construction et d'exécution, et ce en vue de mener à bien l'étude du comportement non-linéaire des poutres mixtes en différents profilés IPE.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Les objectifs principaux de notre travail étaient, de présélectionner un nouveau support numérique permettant de mettre en évidence l'influence de sa souplesse en termes de temps de construction et d'exécution sur le comportement des poutres mixtes dans le domaine linéaire et le domaine non linéaire.

A cet effet et afin de justifier le choix des éléments finis, une comparaison a été effectuée entre un modèle dit modèle de référence et deux autres modèles proposés dénommés (P1 et P2) à la base d'une analyse numérique menée sur différentes configurations de poutres mixtes en utilisant le logiciel d'éléments finis **Cast3m**.

Un modèle numérique de référence a été développé dans la première partie de ce mémoire, celui-ci est défini d'une poutre mixte simulant la dalle de béton en éléments coques minces en 3D (COQ4), les connecteurs (goujons) en éléments poutres (POUT) et la poutre métallique en éléments massifs (CUB8). Ce modèle numérique de référence a été validé par une comparaison reposant sur des résultats d'essais expérimentaux évoqués en littérature.

Le modèle P1 est un modèle détaillé d'une poutre en acier dont les ailes et l'âme sont modélisées par des éléments de coque, alors que le modèle P2 est similaire au modèle P1, sauf que la semelle est modélisée par des éléments de poutre au lieu d'éléments de coque.

Le modèle de référence 3D, bien que pertinent pour caractériser le comportement des poutres mixtes, ne permet pas de réaliser des calculs à l'avantage d'un temps de calcul conséquent.

Le pourquoi de ce choix, peut être privilégié par le fait que la mise en œuvre du modèle de référence en 3D serait beaucoup trop lente.

Les deux modèles 3D proposés (P1 et P2) ont été présélectionnés ; dont le sens où le premier modèle P1 a été montré fiable et suffisamment souple en termes de temps de construction et d'exécution pour prédire le comportement mécanique non linéaire des poutres mixtes, alors que le deuxième modèle P2 a été montré représentatif de la réalité pour prédire le comportement mécanique linéaire des poutres mixtes.

Références bibliographiques

References bibliographiques

- [1] Structural Steelwork Eurocodes Development of a Tress-National Approach (S.S.E.D.T.A). S.S.E.D.T.A-2 Final version 2000.
- [2] SHANMUGAM N.E, LAKSHMI B. State of the art report on steel–concrete composite columns. *Journal of Constructional Steel Research* 57 (2001) 1041–1080
- [3] DELINCE D., La construction mixte acier-béton 2ème partie : Vérification des états limites de service selon l’Eurocode 4. Les Dossiers du CSTC – Cahier n° 7 – 4° trimestre 2004 – p1-11
- [4] : Eurocode 4 (EC4). Calcul des structures mixtes acier-béton, Partie-1.1, Règles générales s bâtiments.” DD ENV 1994-1-1.
- [5]: EN 1994-1-1-Eurocode 4: « design of composite steel and concrete structures ». Part 1-1 General rules and rules for building: draft N°2, April 2000.
- [6] : TROUILLET P. - “Comportement local de connecteurs acier/béton sollicités au cisaillement étude bibliographique”. Rapports des laboratoires, Séries : Ouvrages d’art OA-3, 1987.
- [7] Thèse de DOCTORAT « contribution à l’étude expérimentale et théorique de structures mixtes acier-béton assemblées par collage » Loubna BOUZAOU, l’Université de Reims Champagne Ardenne (2005).
- [8]: NEWMARK K. -“Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction”. *Proceeding, society for experimental stress analysis*, 9, n° 1, pp.75-92, 1951.
- [9] CHAPMAN J. C., BALAKRISHNAN S. - “Experiments on composite beams”. *The Structural Engineering*, n°11, Vol 42, 1964.
- [10]: BARNARD P. R., JOHNSON R. P. - “Ultimate strength of composite beams”. *Proc. Institute Civil Engrs*, 1965.
- [11]: CHAPMAN J. C., YAM L.C.P. - “The inelastic behavior of simply supported composite beams steel and concrete”. *Proc. Institute Civil Engrs*, 1968.
- [12]: CHAPMAN J. C., YAM L.C.P. - “The inelastic behavior of simply supported composite beams steel and concrete”. *Proc. Institute Civil Engrs*, Vol 53, Part 2, 1972.

Références bibliographiques

- [13]: ROBINSON, H: tests on composite beams with cellular deck. Journal of the structural division, publisher: American society of civil engineers, 1967-8.
- [14]: MENZIES, J B: cp 117 and shear connectors in steel-concrete composite beams made With normal-density or lightweight concrete. Publisher: institution of structural Engineers issn: 1466-5123, nov 15 1971.
- [15]: HALLAM M. - “The behavior of stud shear connectors under repeated loading”. The Institute of Engineers Austr. CE 20, n°1, Civil Eng. Transport, pp.28-36, 1978.
- [16] : SEDDIK R. - “Connexion par arceaux”. Thèse de Docteur- Ingénieur Université Pierre et Marie Curie- Paris VI, 1980.
- [17] : ARIBERT J. M., LABIB A. G.- “Modèle de calcul élastoplastique de poutres mixtes à connexion partielle”. Construction Métallique, n° 4, 1982.
- [18] ARIBERT J.M, LABIB A.G et RIVAL J.C « étude numérique et expérimentale de l'influence de connexion partielle sur le comportement des poutres mixtes» journées AFPS, thème I, sous thèmes 3, paris, mars 1983.
- [19] : ARIBERT J. M., ABDEL AZIZ K- “Calcul des poutres mixtes jusqu'à l'état limite ultime avec un effet de soulèvement à l'interface acier-béton”. Construction Métallique, n° 4, pp. 3-36, 1985.
- [20] ARIBERT J.M., BITAR D., Optimisation du dimensionnement en connexion partielle de poutres de planchers mixtes réalisés avec un bac en tôle mince nervurée. Revue construction métallique, 1989.
- [21] Angelo Marcello TARANTINO et Luigino DEZI: creep effects in composite beams with flexible shear connectors, struct. eng., 118(8), 2063–2080. 01 august 1992.
- [22] BIN Z., ARIBERT J. M. - “Méthode des éléments finis spécifique aux ossatures mixtes acier/béton avec glissement et grandes déplacement”. Revue européenne des éléments finis. Vol 5, n° 2, 1996.
- [23] ARIBERT J. -M., “Analyse et formulation pratique de l'influence de la nuance de l'acier du profilé sur le degré minimum de connexion partielle d'une poutre mixte”. Construction Métallique, n° 3, pp. 39-55, 1997.
- [24] SERACINO R., OEHLERS D. J., YEO M. F. - “Partial-interaction flexural stresses in composite steel and concrete-bridge beams”. Engineering Structures, n°23, pp 1186-1193, 2001.
- [25] JURKIEWIEZ B., BUZON S. - “Etude expérimentale du procédé de connexion directe par encastrement de l'âme découpée dans le béton fretté”. Rapport de P.N MIKTI, IUT Robert Schuman- Département Génie Civil, 2003.

Références bibliographiques

- [26] P. GELFI and E. GIURIANI. - “influence of slab-beam slip on the Deflection of Composite Beams”. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments Vol. 9, No 5, 475–490 (2003).
- [27] G.S. Veríssimo, J.L.R. Paes, I. Valente, P.J.S. Cruz, R.H. Fakury: design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures.international association for bridge maintenance and safety, 2006.
- [28] Bujnak, J. (2007). Analyse globale de poutres mixtes acier béton : approche analytique et modélisation non-linéaire [Thèse de doctorat, Université de Zilina – Slovaquie]. Récupéré de. <https://theses.hal.science/tel-00718174/>.- le 7/5/2024 9:30
- [29] Khalel I. Aziz: behavior of multi-layer composite continuous beams with partial interaction, Anbar journal for engineering sciences © ajes, vol.1, no.2 / 2008.
- [30] Suhaib Yahya Kasim Al-Darzi et Inas Mahmood A.H.Al-Juboory: experimental and finite element analysis of steel-concrete composite beams, Al-Rafidain engineering vol.20 no. 6 december 2012.
- [31] Ali Shariati, Mahdi Shariati, N.H. Ramli Sulong, Meldi Suhatri, M.M. Arabnejad Khanouki ,Mehrdad Mahoutian: experimental assessment of angle shear connectors under monotonic and fully reversed cyclic loading in high strength concrete, A. Shariati et al. / construction and building materials 52 (2014) 276–283.
- [32] J.M. ARIBERT : Construction mixte acier-béton – Calcul des poutres mixtes de bâtiments - Partie 1 : poutres en T à âme pleine. www.techniques-ingenieur.fr VN2002 (mars 2020) - le /5/2024 22:42 .
- [33] CEA (Commissariat à l’Energie Atomique) « CAST3M Website », <http://www.cast3m.cea.fr>.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] J.M. ARIBERT, «INFLUENCE ÉVENTUELLE DU DEGRÉ DE CONNEXION SUR LA FLÈCHE DE POUTRES MIXTES DE BÂTIMENT»- Revue Construction Métallique, n°2, 2010.