

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



FACULTÉ DES SCIENCES
APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE
CIVIL

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

Spécialité :
Génie Civil
Option :
structure

Présenté par : MEKAOUI Ahmed
SELAI Fatima

THEME

**Modélisation par éléments finis en 2D et 3D
des poutres métalliques dans le domaine non-linéaire:
Etude comparative**

Soutenu publiquement le Juin 2023 devant le jury composé de :

M. KRIM Abdallah
M.B.DJEBLI Benyagoub
M. REBAHI Abderezak
M. KERROUM Nadir

Président
Encadreur
Examineur
Examineur

Année Universitaire : **2022/2023**

Remerciement

❖ *Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon Dieu, le Clément et le Miséricordieux, qui nous a donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

❖ *Nous exprimons notre profonde reconnaissance à notre encadreur:*

Mr DJEBLI Benyagoub, pour son temps qu'il nous a accordé, son aide scientifique, ainsi que ses précieux conseils.

❖ *Nous remercions également Mr Mostafa et Mr Abdelaziz pour leurs aides et leurs générosités, on leur souhaite beaucoup succès*

❖ *Enfin nos remerciements vont à toutes les personnes qui, de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement.*

*Merci à tous,
MEKAOUI.A. Et SELAI.F*

DÉDICACE

- *Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mon père, puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde*
- *A ma chère mère.*
- *A mes sœurs et mes frères*
- *Mes collègues de travail à l' APC de Takhemaret*
- *A tous mes amis*

SELAI.F

DÉDICACE

*Je dédie ce mémoire
à mes chers parents, mon père et ma mère, pour tous leurs
sacrifices, amour, tendresse, soutien et prières tout au long de
mes études, à notre superviseur **Dr Djebli Ben Yacoub**,
à mes frères, à leur soutien et encouragement, à mes sœurs, à
leurs encouragements constants à l'épouse et à mes enfants,
en particulier mon collègue Abdelhak et Mustafa et ma
collègue Fatima, à tous les membres de ma famille pour leur
soutien tout au long de ma carrière universitaire, j'espère que
ce travail sera en soutien à mon cheminement de carrière.*

Mekaoui.A

Résumé

Les poutres métalliques de sections transversales en profilés IPE, sont considérées principalement comme élément fléchi efficace du fait qu'elles transmettent les forces qui lui sont appliquées sur leurs supports par l'intermédiaire des moments fléchissant et des efforts tranchant, et économique du fait que leurs sections transversales en double T permettent de concentrer la matière là où elle est la plus nécessaire. Elles sont les plus couramment utilisées comme éléments porteurs en construction métallique.

Cependant, sous l'effet d'un chargement progressif, les déformations deviennent très grandes et provoquent la ruine de la poutre par la formation d'un mécanisme (formation de la rotule plastique).

Le calcul au dimensionnement concernant la prédiction de la charge de ruine des ossatures suite à des déformations de flexion excessive est d'une grande importance dans la conception, particulièrement dans des systèmes de plancher et des ponts piétonniers.

Dans ce travail de mémoire, une modélisation numérique par éléments finis est privilégiée afin de prédire le comportement des poutres métalliques de sections transversales en profilés IPE, ainsi les charge ultime associées.

A cet effet, un modèle numérique de référence en éléments finis massifs en trois dimensions a été mis en évidence en utilisant le logiciel CAST3M après avoir le validé par rapport à un essai expérimental disponible dans la littérature. Celui-ci, servira de base de comparaison pour les résultats de deux nouveaux modèles numériques en éléments finis quadratique à deux dimensions et en élément coques à trois dimensions; 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 non linéaire des poutres métalliques

Mots clés : poutres métalliques; charge de ruine ; Modélisation numérique ; modèle numérique de référence; simulation numérique ; comportement non-linéaire.

ملخص

تعتبر العوارض المعدنية ذات المقاطع العرضية المصنوعة من مقاطع IPE في المقام الأول عنصرا مرنا فعالا لأنها تنقل القوى المطبقة عليها على دعاماتها عن طريق لحظات الانحناء والقوى الحادة ، واقتصادية لأن المقاطع العرضية المزدوجة تسمح بتركيز المادة حيث تشتد الحاجة إليها. يتم استخدامها بشكل شائع كعناصر حاملة في الإنشاءات المعدنية. ومع ذلك ، تحت تأثير التحميل التدريجي ، تصبح التشوهات كبيرة جدا وتتسبب في تدمير الحزمة من خلال تشكيل آلية (تشكيل مفصل الكرة البلاستيكية). يعد الحساب القائم على الأبعاد للتنبؤ بحمل الخراب للإطارات بسبب تشوهات الانحناء المفرطة ذا أهمية كبيرة في التصميم ، لا سيما في أنظمة الأرضيات وجسور المشاة. في عمل الذاكرة هذا ، ...

Abstract

The hot rolled steel I section beams are considered mainly as an efficient inflected element because they transmit the forces which are applied to it on their supports by means of the bending moments and shear forces, and economical because their I sections allow material to be concentrated where it is most needed. They are most commonly used as load-bearing elements in metal construction.

However, under the progressive loading effect, the deformations become very large and cause the beam fail by the mechanism formation (plastic hinge formation).

The design calculation concerning failure load prediction of structures due to excessive bending deformation is of high importance, especially in floor systems and pedestrian bridges. For this purpose, a numerical reference model in massive finite elements in three dimensions was highlighted using the CAST3M software after having validated it against an experimental test available in the literature. This will serve as a basis for comparison for the results of two new numerical models in two-dimensional quadratic finite elements and three-dimensional shell elements; the aim of which is to be able to demonstrate the influence of the flexibility of the preselected support in terms of construction and execution time for numerical analysis on the non-linear behaviour of metal beams

Key words: Steel beams; failure load; Numerical model; numerical reference model; Numerical simulation; Non-linear behavior.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

Remerciement	2
<i>Dédicace</i>	3
Résumé	5
ملخص.....	6
Abstract	7
INTRODUCTION GENERALE	2
Contexte de l'étude	2
Plan général	3
Chapitre 1	4
Revue de la littérature	4
1.1. Introduction	5
1.2. Historique	5
1.3. Travaux de recherches menées sur le comportement non-linéaire des structures	7
1.4. Conclusion	11
Chapitre 2	12
Présentation de logiciel Cast3M	12
2.1. Introduction	13
2.2. Présentation de logiciel	13
2.2.1. Introduction	13
2.2.2. Environnement Et Langage	14
2.2.3. Organisation d'un calcul	14
2.2.3.3. Traitement des résultats	15
Phase1. Définition du modèle mathématique	15
2.2.4. Possibilité offertes par Cast3m	17
2.3. Modélisation	18
2.3.1. Introduction	18
2.3.2. Comportement mécanique élastique	18
2.4. Conclusion	20
Chapitre 3	21
Modèle numérique de référence	21
3.1. Introduction	22
3.2. Conditions aux limites et chargement	22

3.3. Modélisation linéaire	23
3.3.1 Comportement linéaire de la poutre métallique	23
3.3.2 Loi de comportement	25
3.3.3 Comparaison des résultats	25
3.4. Modélisation non-linéaire	26
3.4.1 Loi de comportement non-linéaire de la poutre métallique	26
3.4.2 Validation du modèle numérique	26
3.5. Conclusion	27
Chapitre 4	28
Etude comparative et présélection du support numérique adéquat	28
4.1. Introduction	29
4.2. Analyse numérique non-linéaire	29
4.2.1. Influence de la portée de la poutre	30
4.2.2. Influence de la section de la poutre	41
4.2.3. Influence de la nuance de l'acier	45
4.3. Conclusion	48
Conclusion Générale	49
Références bibliographique	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre II : Présentation de logiciel Cast3M

Fig.2.1. Organigramme du modèle de calcul

Fig.2.2. Noyau de calcul, pré et post traitements du noyau de calcul

Fig. 2.6. Déformation de la poutre.

Fig. 2.3 . Chargement de la poutre.

Fig. 2.4 . Maillage de la poutre

Chapitre III : Modèle numérique de référence

Figure 3.1. Poutre chargée par deux moments d'extrémité

Figure 3.2. Diagramme de contrainte

Figure 3.3. Diagramme des moments fléchissant et des efforts tranchants

Figure 3.4. Évolution contrainte – déformation

Figure 3.5. Déformation verticale de la poutre métallique « CUB8 ».

Fig.3.6. Loi de comportement de l'acier

Fig.3.7. schéma statique de la poutre en double Té

Fig.3.8. comparaison des résultats d'une poutre à section en double Té

Chapitre IV : Etude comparative et présélection du support numérique adéquat

Fig.4.1. Modèle de référence (CUB8)

Fig.4.2. Poutre modélisée en élément (COQ4)

Fig.4.3. Poutre modélisée en élément (COQ4)

Figure 4.4 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée $L = 4\text{m}$

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

Figure 4.6 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée $L = 5\text{m}$

Figure 4.7 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée $L = 4\text{m}$

Figure 4.8 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée $L = 4.5\text{m}$

Figure 4.9 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée $L = 5\text{m}$

Figure 4.10 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée $L = 4\text{m}$

Figure 4.11 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée $L = 4.5\text{m}$

Figure 4.12 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée $L = 5\text{m}$

Figure 4.13 Charge ultime (F_u) en fonction de (L)

Figure 4.14 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S235

Figure 4.15 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S275

Figure 4.16 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S355

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre III Modèle numérique de référence

Tableau.3.1. Valeurs de la flèche de la poutre en acier

Chapitre IV Etude comparative et présélection du support numérique adéquat

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

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

Tableau 4.3. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de portée 5m

Tableau 4.4. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de portée 4m

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

Tableau 4.6. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de portée 5m

Tableau 4.7. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de portée 4m

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERAL

INTRODUCTION GENERALE

Contexte de l'étude

Le problème mécanique que pose la réalité quotidienne concerne des corps, au temps le dire, qui n'ont jamais des formes simples et pour lesquelles on peut espérer des solutions analytiques simples, il devient alors nécessaire de recourir à une pratique plus systématique de la décomposition en morceaux déformables ou modélisation. En conséquence, la méthode des éléments finis est généralement considérée comme l'outil le plus puissant à l'analyse linéaire dans la conception des structures, même si, pour des raisons pratiques (résistance, esthétique...), on limite souvent le domaine de fonctionnement normal des structures à des déplacements faibles, de sorte que des calculs linéaires suffisent à prédire leur comportement, cependant, il ne doit pas être perdu de vue que les structures réelles ont un comportement en général non-linéaire.

La méthode des éléments finis 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 métalliques fabriquées en profilé IPE, tout en veillant à ce que ce modèle ne soit pas trop complexe au détriment du temps de calcul. Dans cette étude, et en premier lieu, un modèle massif en éléments cubiques (CUB8) représentant le modèle réel dit le **modèle de référence** a été validé par un essai expérimental. Ce modèle de référence qui par la suite et en deuxième lieu, servira de base de comparaison pour les résultats de deux nouveaux modèles numériques proposés à savoir le modèle en élément quadratique à deux dimensions (QUA8) et le modèle en élément coques à trois dimensions (COQ4) ; dont le but de pouvoir mettre en évidence

INTRODUCTION GENERALE

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 non-linéaire des poutres métalliques fabriquées en profilé IPE, car le modèle **de référence**, bien que pertinent pour caractériser le comportement de ces poutres métalliques, ne permet pas de réaliser des calculs à l'avantage d'un temps de calcul conséquent.

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 propose une revue de littérature sur les travaux de recherche rapportés aux problèmes des poutres métalliques dans le domaine non-linéaire.

Le deuxième chapitre porte sur la présentation et la description du logiciel Cast3m utilisé dans notre travail pour la modélisation en éléments finis.

Le troisième chapitre met en évidence un modèle numérique de référence au travers d'un calibrage de résultats par rapport à un essai expérimental disponible dans la littérature, porté sur l'étude du comportement non-linéaire des poutres métalliques.

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 non-linéaire des poutres métalliques.

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

Chapitre 1

Revue de la littérature

1.1. Introduction

Le développement de la plasticité dans les éléments d'une structure (poutres) a été effectué dans le but de calculer leurs comportement jusqu'à la ruine. L'objectif principal du calcul plastique est la prédiction de la charge de ruine des ossatures suite à des déformations de flexion excessive. Il est donc nécessaire d'examiner en détail le comportement des poutres fléchies jusqu'à la ruine et déterminer la résistance ultime en flexion des poutres.

Dans ce contexte, et en premier lieu, un bref rappel historique sur les travaux en plasticité est donné. En deuxième lieu, un bilan (présentation chronologique) sur quelques travaux de recherches disponibles mené sur des poutres et des portiques, est présenté et donne des informations sur le comportement non linéaire et le calcul plastique introduisant la notion de rotule plastique pour mieux dimensionner ce type de structures.

1.2. Historique

Un bref rappel historique sur les travaux en plasticité est donné ci -après. On peut diviser ces travaux en trois grandes périodes :

Première période : les premiers travaux.

Les premiers travaux notoires sur la plasticité ont été réalisés en France avec la proposition de TRESCA en 1864 du premier critère de plasticité suivi par SAINTVENANT en 1870 qui développa théoriquement les propositions de TRESCA. En 1912, VON MISES en proposa un autre et ces deux critères sont encore utilisés de nos jours.

La possibilité de formation de 'rotules plastiques' dans les barres a été suggérée par Kazinczy en 1914 en Hongrie et par Kist en 1917 en Hollande. Kazinczy effectua des essais sur des poutres bi -encastrées et lia le nombre de sections plastifiées à la ruine de la poutre par formation d'un mécanisme.

Des études furent entamées dans plusieurs pays dont l'Allemagne, la Grande Bretagne, la France, les USA et l'URSS.

Des tests sur des portiques en acier furent réalisés à l'université de Bristol (Grande Bretagne) entre 1936 et 1939. Des études théoriques développées parallèlement aux états unis permirent de jeter les principes de bases du calcul plastique dès 1940.

Deuxième période : les travaux en Grande Bretagne.

A partir de 1943, l'équipe composée de Lord Baker, Horne, Roderick, Heyman et Neal conduisirent une série d'essais à l'université de Cambridge. Leurs conclusions furent incorporées dans les règles anglaises BS 449 publiées en 1948. Les propriétés plastiques de l'acier furent prises en compte dans la vérification des structures et permirent le calcul à la ruine de certaines structures : un bâtiment calculé en plasticité fut construit en 1952.

Troisième période : période actuelle.

Depuis 1950, les recherches théoriques se sont intensifiées et ont abouti à des résultats concrets. Deux centres furent principalement actifs :

- l'université de Cambridge en Grande Bretagne sous la direction de Lord Baker.
- l'université de Lehigh aux USA avec Beedle.

De nombreux essais sur des structures de grandeurs réelles furent effectués. Les développements théoriques permirent à Horne dès 1950 d'énoncer les principes fondamentaux du calcul plastique des ossatures.

L'utilisation du calcul plastique se répandit surtout dans les pays anglo-saxons où dès 1961, les USA disposaient de recommandations permettant le calcul plastique et des structures multi étagées étaient calculées sur cette base. En Grande Bretagne 90% des portiques à âme brisée à un niveau sont maintenant conçus grâce aux méthodes plastiques.

En France, la commission des recherches sur la plasticité en acier présidée par DUTHEIL publia dès 1947 une étude sur l'adaptation plastique dans les poutres. Cette commission affirmait qu'il n'était plus possible d'ignorer la phase plastique et recommandait des études systématiques pour aboutir à une technique fondée sur une considération plus précise des propriétés réelles du matériau.

Les règles françaises CM66 autorisèrent seulement une plastification partielle des solives et des poutres grâce à l'introduction d'un coefficient d'adaptation plastique. Les règles CM66 furent complétées par l'additif 80 (les CM80) qui définit le domaine d'application du calcul en plasticité des constructions en acier.

Le calcul plastique des sollicitations ainsi que la vérification de la résistance plastique des sections est maintenant consacré dans le nouveau règlement européen de calcul et de

vérification des ossatures « l'Eurocode 3 ».

1.3. Travaux de recherches menées sur le comportement non-linéaire des structures

En 1998, Seung-EockKim et Wai-FahChen [1] ont effectué une analyse numérique par éléments finis en introduisant la notion de rotule plastique sur un nombre requis d'éléments d'une poutre soumise à un chargement transversal réparti. Une des particularités des méthodes d'analyse numérique est de modéliser avec précision un membre (poutre) à un ou deux éléments en tenant compte des non-linéarités matérielles et géométriques pour l'efficacité de calcul.

Ils ont trouvé qu'un modèle à deux éléments est adéquat pour prédire la résistance avec précision. D'où ils ont conclu que l'analyse numérique par éléments finis utilisant la notion de rotule plastique est efficace dans un tel calcul.

En 2008, un travail de recherche rapporté par Chi KinLu [2] met l'accent sur les effets des non-linéarités matérielles des poutres mixtes avec recours à la méthode introduisant la notion de la rotule plastique. De nombreuses combinaisons de sections en acier et en béton forment des sections mixtes arbitraires. Deuxièmement, les propriétés des matériaux des poutres mixtes varient remarquablement à travers leurs sections transversales de l'acier ductile au béton fragile. Troisièmement, le béton est faible en traction, de sorte que les changements de la section mixte dépendent de la distribution de la charge. A cet effet, l'approche par l'analyse inélastique en zone plastique peut évaluer la résistance des éléments, en tenant compte des non-linéarités matérielles pour chaque fibre à travers la section mixte.

En conséquence, de nombreux chercheurs adoptent généralement l'approche par l'analyse numérique inélastique des structures mixtes en zone plastique. D'autre part, la méthode introduisant la notion de rotule plastique décrit intégralement le comportement de matériau non linéaire d'une section mixte globale.

Par conséquent, les propriétés adaptées à utiliser dans la rigidité des rotules plastiques sont nécessaires pour représenter le comportement du matériau à travers toute une section mixte arbitraire. Du point de vue de l'efficacité numérique et de convergence, la méthode introduisant la notion de rotule plastique est supérieure à la méthode de la zone plastique.

Par conséquent, à la base de l'approche par la notion de rotule plastique, la façon d'incorporer les non-linéarités de matériau d'une section mixte arbitraire dans la formulation

de rigidité de rotule plastique devient un objectif principal du présent document. Le comportement non linéaire de différents types de poutres mixtes est étudié dans ce travail, y compris deux poutres mixtes simplement appuyées, une poutre mixte en porte-à-faux et une poutre mixte continue à deux travées.

En 2009, BorisŠtok et MiroslavHalilovič ont effectué analyse [3] sur la flèche des poutres de section rectangulaire soumises à l'effet d'un chargement spécifique (uniforme), résultant une répartition quadratique du moment de flexion et supposant un comportement élasto-plastique sans écrouissage. Dans le cadre d'une approche à faible déformation et à faible déplacement, des solutions analytiques sont dérivées, qui permettent d'effectuer des analyses élasto-plastiques des poutres sous une forme analytique limitée. En conséquence, le tracé de l'évolution de la réponse élasto-plastique montre clairement une propagation de la zone plastique à travers le volume, c'est-à-dire sa propagation le long de l'axe longitudinal de la poutre dès le début de plastification (formation de la première rotule) dans la section transversale jusqu'à ce que la ruine commence à apparaître dans la structure (son effondrement).

En 2010, Ji Bin et Chen Wanji ont présenté une solution analytique en théorie élasto-plastique de contrainte [4] pour les poutres en flexion pure sous petite déformation. Cette solution considère les effets de la déformation élastique et de la déformation plastique, et donne implicitement la relation entre le moment de flexion et la courbure. Cette solution s'avère plus efficace dans les matériaux à fort écrouissage plastique ou à faible déformation plastique. De plus, les résultats numériques montrent que la solution peut être utilisée pour prédire les effets de taille dans les tests micro-courbure et pour mesurer leur paramètre de longueur de matériau.

En 2010, Y.WenQ et Y.Zeng ont présenté une nouvelle approche par une analyse non linéaire en éléments finis sur les portiques plans, en utilisant le concept de raideur sécante incrémentale [5]. Ces portiques sont soumis à l'effet des charges externes monotones croissantes. Pour décrire le comportement élasto-plastique d'un élément typique poutre, un ensemble de coefficients de plasticité dits multiplicateurs de charge sont introduits progressivement sur un historique de charge incrémentielle, influençant sur les propriétés de rigidité élastique jusqu'à l'apparition de la ruine. La méthode proposée est développée pour fournir la précision des approches de plasticité distribuée, tout en maintenant l'efficacité de calcul des méthodes introduisant la notion de rotule plastique. Afin de maintenir l'équilibre

pendant la déformation plastique, chaque membre (composante) est isolé séparément, les effets propageant la plasticité sont automatiquement pris en compte. Il convient de noter que la matrice de rigidité des éléments constituant la structure (portique) de la présente étude est explicitement formulée, ce qui rend les intégrations numériques inutiles. L'efficacité du processus de la solution est proposée selon un schéma d'itération directe basé sur la raideur sécante incrémentale. La procédure de la solution converge rapidement lors de l'analyse incrémentale-itérative. La présente méthode a été implémentée dans un programme informatique à éléments finis utilisant FORTRAN. Les résultats des exemples numériques ont démontré que la présente approche semble être fiable et efficace pour prédire la réponse inélastique des portiques plans.

L'analyse par calcul plastique (Plastic Design Analysis « PDA ») est un développement récent, cas d'une procédure spécifique de calcul basée sur le déplacement latérale des cadres rigide en acier. La PDA est une dérivée de la méthode classique d'analyse et de calcul plastique (Plastic Analysis and Design « PAD »). Cette dernière (PAD) ne peut qu'estimer le chargement ultime en cas de ruine, tandis que PDA a été développé pour répondre à des problèmes de conception importants tels que les effets P-delta, formation séquentielle des rotules et déplacements latéraux au début de ruine (effondrement). Ceci est obtenu tout d'abord par une liaison de la rigidité globale des cadres de la structure au déplacement cible le plus critique, ensuite à la demande en capacité imposée aux éléments du cadre.

À cet effet, en 2012, une méthode pratique de prévision de la formation des rotules plastiques [6], est introduite dans ce travail de recherche. L'analyse par calcul plastique (PDA), tel que présentée dans cette recherche, est basée sur plusieurs concepts de calcul complémentaires ainsi sur de nouvelles formules qui n'apparaissent pas dans la littérature auparavant

En 2013, Jian et YingWu ont présenté dans un travail de recherche [7] l'aspect théorique et la mise en œuvre numérique de nouveaux éléments finis dotés de rotules plastiques encastrées pour l'analyse des poutres de Timoshenko et d'Euler-Bernoulli en cas de rupture. D'une part, de manière similaire au modèle de rotule encastrée, la rotule plastique est décrite par un modèle cohésif entre les résultantes de contrainte et les déplacements. D'autre part, le champ de contrainte dans l'élément est évalué à partir d'une relation constitutive (loi de comportement) de la section transversale comme dans le modèle de rotule plastique classique. Le point crucial est l'introduction d'un champ de déformation inélastique cohérent

dépendant à la fois du schéma d'interpolation (pas simplement la longueur caractéristique) des éléments finis de base et du mode de rotule concerné. De plus, la condition de continuité de traction est fortement appliquée.

En se basant sur la thermodynamique, un modèle multi surface modélisant la rotule plastique et une loi de comportement non-linéaire pour la section transversale de la poutre ont été ensuite établies. En particulier, les déplacements sont considérés comme des variables internes et peuvent être déterminés au niveau du point de l'apparition de la rotule plastique. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'introduire la perte correspondante à la raideur élastique, les degrés de liberté supplémentaires ou la concentration statique au niveau de l'élément comme dans le modèle de rotule encastree. Outre les caractéristiques citées ci-dessus, la méthode proposée définit également un cadre très pratique pour sa mise en œuvre numérique.

Des éléments finis standards (poutres / barres) et les algorithmes bien développés pour les modèles de matériaux inélastiques peuvent être employés avec des modifications mineures. Plusieurs exemples numériques représentatifs sont présentés, vérifiant que le modèle proposé tient compte de la taille et de la finesse du maillage, ceci est dû à sa résolution correcte par la notion de rotule plastique des points de vue cinématique et statique.

Les méthodes pratiques courantes pour l'analyse plastique des structures en acier sont principalement basées sur la notion des rotules plastiques ou sur la notion des rotules plastiques modifiées. Ces méthodes sont simples et pratiques mais elles ont quelques inconvénients. Le principal défaut de ces méthodes est de considérer la concentration des effets non linéaires en un seul point et de négliger la plastification progressive du matériau. En 2015, une recherche [8] s'est concentrée sur les effets de propagation de la plasticité dans la section et la longueur de l'élément. La méthodologie proposée utilise une section variable dans la région plastique de l'élément. Les résultats de cette méthode sur des cas pratiques sélectionnés sont présentés et comparés aux solutions exactes ainsi qu'aux résultats d'autres méthodes. La comparaison montre que la méthode proposée est plus précise, plus facile et plus efficace à mettre en œuvre.

1.4. Conclusion

Dans ce chapitre une présentation chronologique très limitée a été présentée sur l'étude numérique par éléments finis du comportement des structures (poutres) dans le domaine non-linéaire.

C'est pourquoi nous avons effectué une étude numérique comparative dans le chapitre 4, permettant de choisir le support numérique fiable et souple en termes de temps de construction et d'exécution dont le but de traduire de façon satisfaisante le comportement réel des poutres métalliques fabriquées de différents profilés en IPE dans le domaine non-linéaire.

L'étude numérique est effectuée à l'aide du logiciel Cast3m dont sa présentation faisant l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2

Présentation de logiciel Cast3M

2.1. Introduction

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 tel que Cast3m [9] constitue un outil extrêmement efficace dont l'utilisation permet de résoudre une immense variété de problèmes. Il s'agit d'un véritable outil, aux multiples facettes, qui permet de se concentrer sur les véritables problèmes de l'ingénieur.

L'objectif de ce travail est de prouver l'efficacité du logiciel utilisé (Cast3m) [9] pour un tel calcul mécanique. Dans ce chapitre nous allons commencer par une présentation générale du logiciel en donnant un aperçu global sur l'organisation d'un calcul mécanique (mené sur ce logiciel), ensuite nous exposons la modélisation en éléments finis afin d'estimer le comportement mécanique élastique d'une poutre métallique.

2.2. Présentation de logiciel

2.2.1. Introduction

Cast3m [9] est un logiciel de calcul de structures basé sur la méthode des éléments finis. Il a été développé au Département de Mécanique et Technologie (DMT) du Commissariat à l'Energie Atomique de France (CEA). La principale particularité de Cast3m, est de permettre à l'utilisateur d'adapter ses calculs selon les problèmes qu'il doit résoudre.

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

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

Contrairement à de nombreux codes de calcul, Cast3m [9] ne fonctionne pas en « boîte noire » ; il donne à l'utilisateur la connaissance du problème effectivement posé et des méthodes employées pour le résoudre. Cast3m [9] comprend un ensemble de processus élémentaires (bibliothèque d'opérateurs) que l'utilisateur peut enchaîner pour définir et résoudre ses problèmes.

2.2.2. Environnement Et Langage

Le logiciel Cast3m [9] fonctionne sur tout ordinateur PC ou compatible utilisant Windows (95 / 98 / ME / NT / 2000 / XP.....). Afin de convertir les informations en entités informatiques par le programme, il faut disposer d'une interface. C'est le langage GIBIANE qui va permettre de communiquer directement avec le programme.

2.2.3. Organisation d'un calcul

2.2.3.1. Préparation du modèle de calcul

Le modèle de calcul représente l'ensemble des données que doit préparer l'utilisateur pour décrire les caractéristiques complètes du problème à analyser. Il peut être décrit par le schéma suivant de la figure 2.1 :

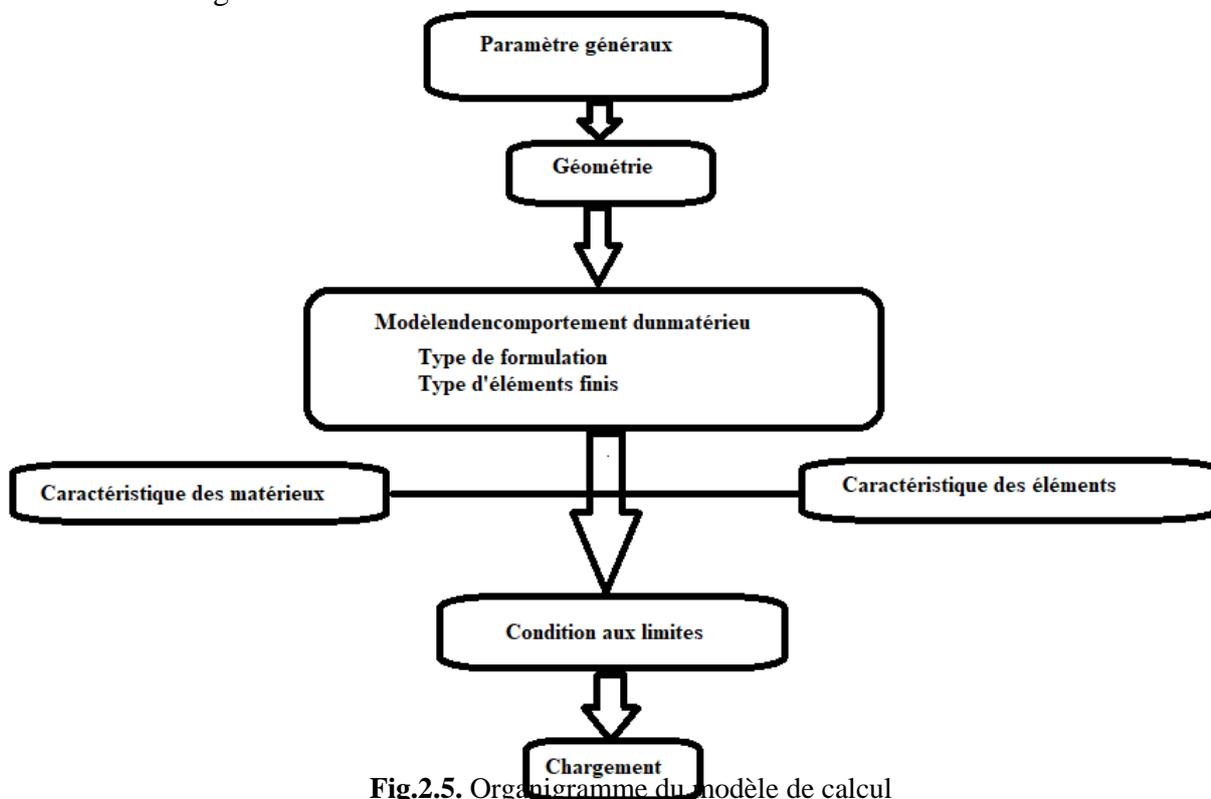


Fig.2.5. Organigramme du modèle de calcul

- 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.

2.2.3.2. Résolution du système d'équation

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

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

Par exemple : pour une analyse statique linéaire (calcul de la flèche) la résolution sera sur le

système : $\overline{\overline{K}} \cdot \overline{\overline{u}} = \overline{\overline{F}}$.

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

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

2.2.3.3. Traitement des résultats

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

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

Phase1. Définition du modèle mathématique

- Discrétisation géométrique du domaine étudié ;
- définition des données caractérisant le modèle, parmi lesquelles figurent : le type d'analyse (déformations ou contraintes planes, axisymétrie, etc ...), le type d'éléments (poutres, coques, etc ...), les propriétés du matériau, les caractéristiques géométriques

qui ne peuvent être déduites des maillages et des conditions aux limites ;

Phase2. Résolution du problème discrétisé

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

Phase3. Analyse et post-traitement des résultats

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

Les programmes de calcul classiques sont rigoureusement structurés selon cette logique (voir figure. 2.2), chaque phase étant associée à un module déterminé du code :

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

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

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

réfier dans les zones n'offrant que peu d'intérêt.

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

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

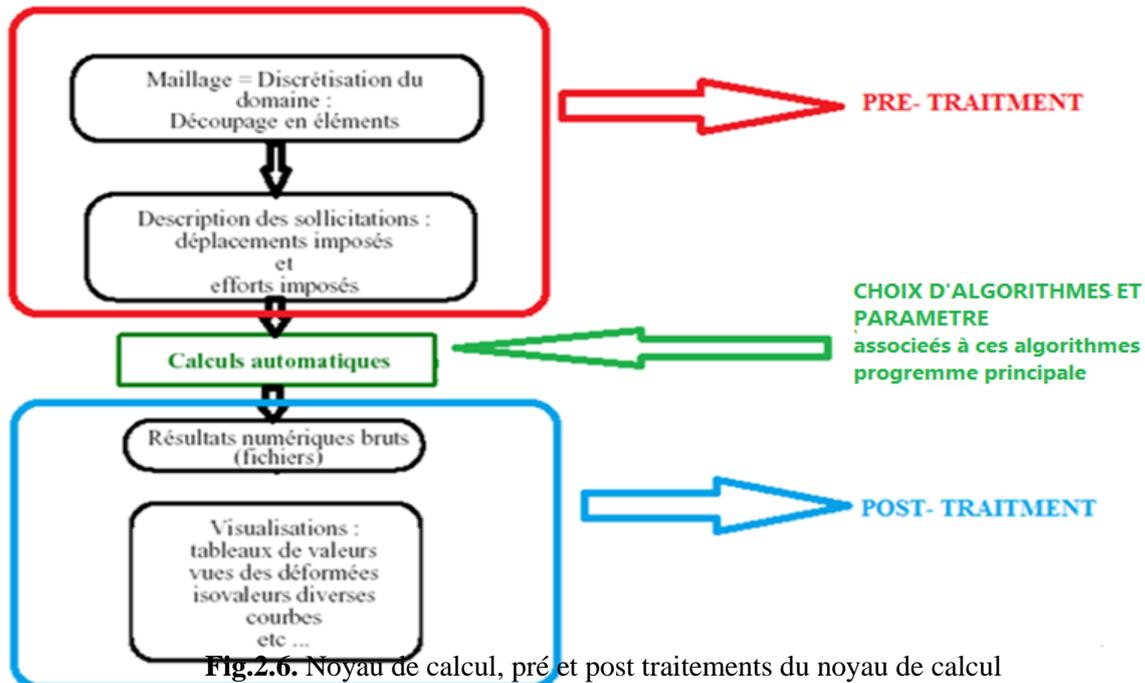


Fig.2.6. Noyau de calcul, pré et post traitements du noyau de calcul

2.2.4. Possibilité offertes par Cast3m

Notion de procédures : La structure adoptée dans Cast3m [9] offre, avant toute chose, la possibilité d'élaborer des procédures qui sont, en quelque sorte, des opérateurs de niveau supérieur, appelant à leur tour des opérateurs élémentaires. Ces procédures sont créées pour répondre à des besoins divers :

- En premier lieu, il est possible d'utiliser les mêmes données pour plusieurs opérateurs, ce qui permet de les regrouper facilement et de les retrouver à l'aide d'une seule instruction.
- En second lieu, dans le cas de problèmes assez complexes ou répétitifs, il peut être gênant pour l'utilisateur d'avoir à définir chaque fois explicitement des opérations très standardisées.
- Enfin, pour des utilisations par des personnes peu familiarisées avec la méthode des éléments finis, il est bon de pouvoir revenir à un fonctionnement en « boîte noire » du

programme. Ceci revient à masquer tout le détail des opérations élémentaires par une seule procédure.

Les procédures présentent les caractéristiques suivantes :

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

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

2.3. Modélisation

2.3.1. Introduction

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

2.3.2. Comportement mécanique élastique

Afin d'avoir une bonne estimation du comportement mécanique élastique par la modélisation des poutres ou de leurs sections par éléments finis, menée sur le logiciel Cast3m [9] en deux dimensions (2D) ; un type de calcul est décrit :

2.3.2.1. Calcul mécanique linéaire d'une poutre

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

2.3.2.1.1. Etapes de calcul

➤ Hypothèse de modélisation

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

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

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

➤ Modélisation

La géométrie d'une poutre est récupérée directement de la modélisation mécanique 2D. La figure 2.3 montre une poutre (à section rectangulaire) de longueur 3m et de hauteur 0.5m ainsi définie et maillée. Il est à signaler que la troisième dimension (largeur de la poutre) est prise en compte dans notre programme et elle est égale à 0.2m.

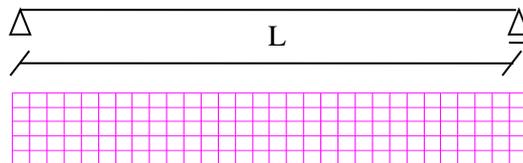


Fig. 2.7 . Maillage de la poutre.

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

➤ Conditions limites

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

➤ Chargement

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

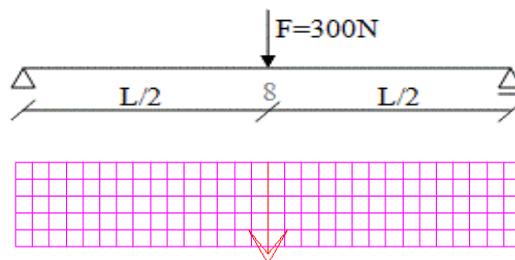


Fig. 2.8 . Chargement de la poutre.

2.3.2.1.2. Caractéristique du matériau

La poutre est en acier et de caractéristiques mécaniques suivantes :

Module d'Young : 210 000 MPa

Coefficient de Poisson : 0,3

Masse volumique : 7800 Kg/m²

2.3.2.1.3. Résultats

➤ Exemple de champ de contrainte

On obtient une cartographie des contraintes comme celle présentée ci-après (figure 2.5)



Fig.2.9 . Champ de contrainte.

➤ Exemple de déformée

On obtient la déformée correspondante comme présentée ci-après (figure 2.6).

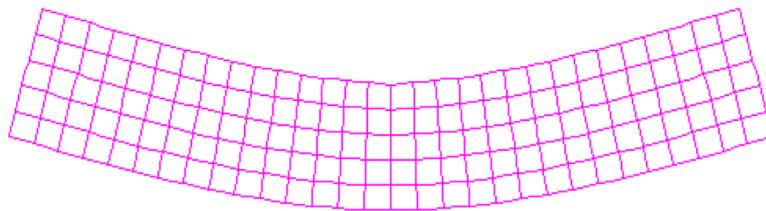


Fig. 2.6. Déformation de la poutre.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par décrire le code de calcul cast3m permettant d'étudier la flexion simple d'un élément (une poutre) à l'état élastique par la méthode des éléments finis.

Dans le chapitre qui suit , nous allons développer un modèle numérique appelé modèle de référence à la base du modèle réel en utilisant le logiciel cast3m , celui-ci servira de base de comparaison pour les résultats des nouveaux modèle numérique proposés dans le dernier chapitre , dont le principe est de mettre en évidence l'influence de la souplesse en termes de temps de construction et de d'exécutions du supports présélectionne sur le comportement non-linéaire des poutres métalliques .

Chapitre 3

Modèle numérique de référence

3.1. Introduction

Après avoir donné au chapitre précédent un aperçu sur la présentation du logiciel Cast3m [9], nous décrivons dans ce troisième chapitre les détails de l'étude numérique par éléments finis en utilisant ce code de calcul (Cast3m).

Ce chapitre présente donc, pour les poutres métalliques, un modèle de référence 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 métalliques dans le domaine non-linéaire.

Le modèle de référence décrit ci-après, s'appuie sur un modèle numérique de base en éléments finis *massifs (volumiques)* en trois dimensions (CUB8) qui est à son tour validé par un essai expérimental. Celui-ci, 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

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'élément 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.

3.2. 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 les ce types de sections sont introduits dans les nœuds de la structure et le chargement du modèle est réalisé par déplacement imposé monotone croissant. Le calcul élasto-plastique s'effectue par la procédure incrémentale PASAPAS de Cast3m [9]. Pour présélectionner le type d'élément finis à utiliser comme référence dans la modélisation de la poutre nous analysons le comportement linéaire de cette dernière, sollicitée en flexion simple.

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

3.3. Modélisation linéaire

3.3.1 Comportement linéaire de la poutre métallique

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

- **Essai de flexion pure**

Considérons un essai de flexion pure réalisé sur une poutre de section symétrique comme le montre la figure 3.1.

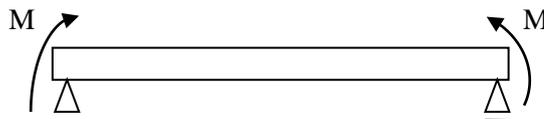


Figure 3.1. Poutre chargée par deux moments d'extrémité

Compte tenu de la répartition des contraintes dans la section (figure 3.2) ; si toutes les fibres d'une section de la poutre subissent une contrainte inférieure à f_y , la section est dans le domaine élastique.

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

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

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

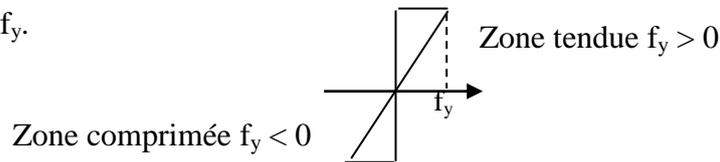


Figure 3.2. Diagramme de contrainte

- **Essai de flexion simple**

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

Les diagrammes des moments de flexion et des efforts tranchants sont représentés sur la figure 3.3 ci- dessous, où le moment maximal apparait dans la section centrale ($x=l/2$)

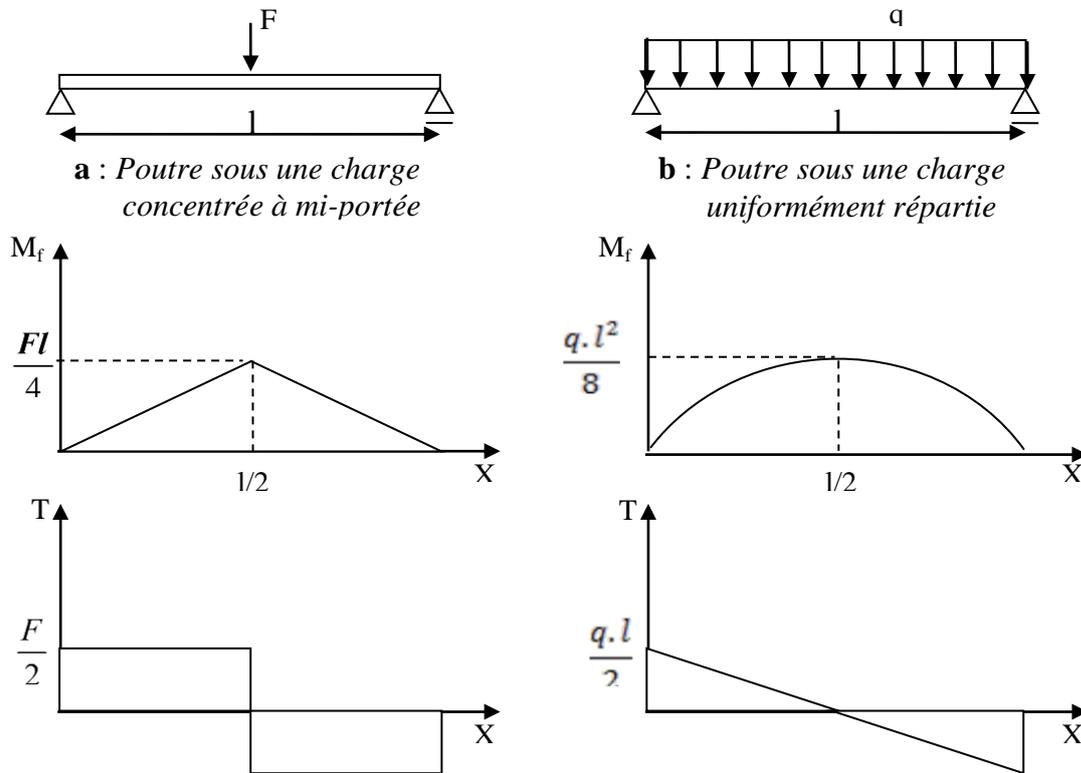


Figure 3.3. Diagramme des moments fléchissant et des efforts tranchants

• **Modélisation**

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

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

$$v \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} + \frac{1}{GA_s} \cdot \frac{dT}{dx} \tag{3.1}$$

• **Évolution de la flèche en milieu de la poutre**

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

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

$$v = \frac{F_0 \cdot l^3}{48 \cdot EI} + \frac{M_{cmax}}{G \cdot A_s} \tag{3.2}$$

- Cas d'une charge uniformément répartie :

$$v = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot EI} + \frac{M_{qmax}}{G \cdot A_s} \tag{3.3}$$

3.3.2 Loi de comportement

Le matériau utilisé de la poutre métallique considérée dans cette étude est un matériau à un comportement élastique. Il est parfaitement défini par son module de Young et de sa limite élastique.

La relation contrainte – déformation (figure 3.4) traduit le comportement du matériau. Le modèle le plus connu est celui de HOOKE qui est la base de l'élasticité.

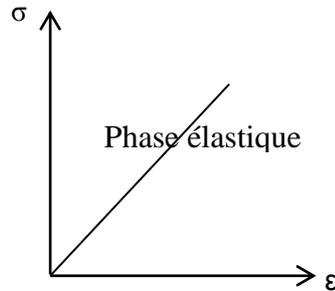


Figure 3.4. Évolution contrainte – déformation

3.3.3 Comparaison des résultats

Une étude comparative a été réalisée entre le modèle numérique de base en éléments finis *massifs (volumiques)* en trois dimensions (3D) et le modèle théorique (voir ci-dessus)

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

La poutre est modélisée en utilisant un élément cubique à 8 nœuds (CUB8).

Charge uniformément répartie	Charge concentrée à mi-portée
AMPLITUDE 7.06E+02	AMPLITUDE 1.90E+02

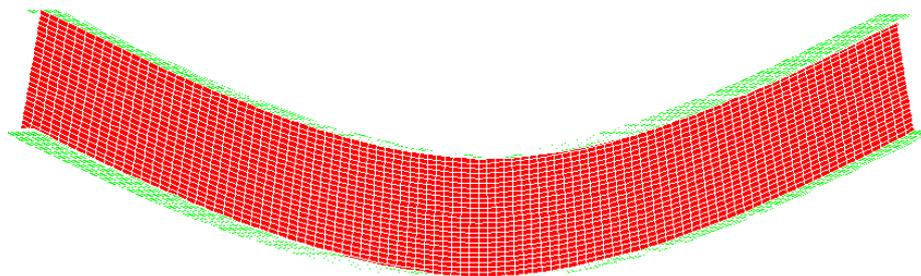


Figure 3.5. Déformation verticale de la poutre métallique « CUB8 ».

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

Tableau.3.1. Valeurs de la flèche de la poutre en acier

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

A partir des résultats obtenus selon le tableau 3.1 ; on constate que l'écart en pourcentage est très petit (inférieur à 5%).

3.4. Modélisation non-linéaire

3.4.1 Loi de comportement non-linéaire de la poutre métallique

Le matériau acier est modélisé à l'aide d'une loi de comportement de type bilinéaire élasto-plastique parfaite sans écrouissage (figure 3.6) basée sur le critère tridimensionnel des contraintes de Von Mises. Les caractéristiques mécaniques de l'acier sont définies comme suit : $E = 210 \text{ GPa}$ et $\nu = 0.3$.

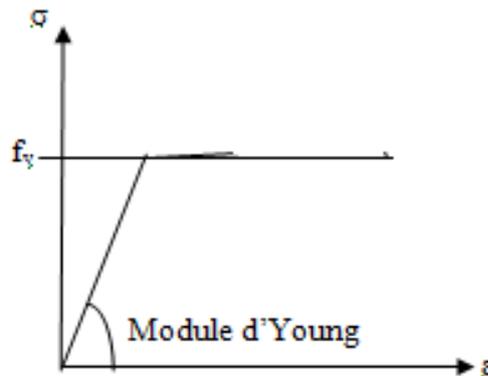


Fig.3.6. Loi de comportement de l'acier

3.4.2 Validation du modèle numérique

Afin de confirmer la fiabilité du modèle numérique de base en éléments finis *massifs* (CUB8), nous analysons le comportement non linéaire d'une poutre métallique de section en double T simplement appuyées, sollicitées en flexion par l'application d'une force transversale en milieu de travée.

La validation du modèle éléments finis repose sur les résultats d'un essai expérimental évoqué en littérature [8], réalisé sur une poutre en acier.

Il s'agit d'une poutre console en acier de 6m à section en double T fabriquée en HEA340, représentée sur la figure 3.7

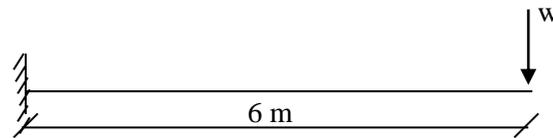


Fig.3.7. schéma statique de la poutre en double T

Cette poutre isostatique est soumise à une flexion 2 points où le chargement est introduit par un seul vérin hydraulique. La valeur mesurée de la limite d'élasticité de l'acier est 235.E6.

L'essai expérimental a été simulé avec Cast3m dans. Une comparaison des résultats en termes de charge ultime et de flèche à l'extrémité de la poutre est donnée en Figure 3.8.

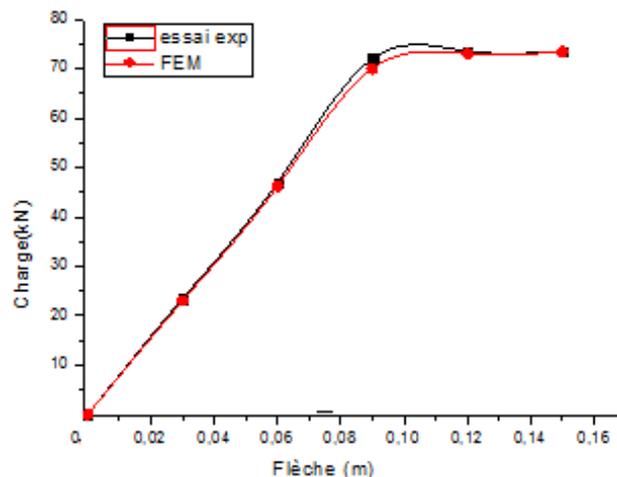


Fig.3.8. comparaison des résultats d'une poutre à section en double T

D'après les deux courbes de la figure 3.8, il est à remarquer qu'un résultat comparable est obtenu entre la solution expérimentale et la solution numérique utilisant le modèle numérique de base en éléments finis *massifs* (CUB8).

3.5. Conclusion

Grâce au modèle de référence 3D (CUB8), 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 métalliques en double Te.

La particularité de la modélisation 3D (CUB8), 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 métalliques en double Te fabriquées en différents profilés IPE.

Chapitre 4

**Etude comparative et présélection
du support numérique adéquat**

4.1. Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons présenté un modèle numérique simulant les poutres métalliques fabriquées en profilé IPE, dit modèle de référence en éléments massifs (*volumiques*) en trois dimensions (CUB8).

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

Dans ce chapitre, nous allons justifier le choix des éléments finis résultant d'une analyse comparative entre deux nouveaux modèles numériques proposés en éléments à deux et à trois dimensions (2D, 3D) et le modèle de référence en éléments massifs (CUB8). Le pourquoi de ce choix, peut être privilégié par le fait que la mise en œuvre d'une modélisation volumique (massif) en 3D serait beaucoup trop lente.

Dans ce contexte, et afin de mettre en évidence l'influence de la souplesse en termes de temps de construction et d'exécution de ces deux nouveaux supports sur le comportement des poutres métalliques fabriquées en profilé IPE, à savoir le modèle en un élément quadratique à deux dimensions (QUA8) et le modèle en un élément coques à trois dimensions (COQ4), une étude numérique a été menée dans le domaine non-linéaire.

4.2. Analyse numérique non-linéaire

Une analyse non-linéaire a été effectuée sur le comportement non-linéaire des différentes configurations de poutres métalliques fabriquées en profilé IPE, à savoir la poutre modélisée en élément CUB8 qui représente le modèle de référence (Figure 4.1) la poutre modélisée en élément COQ4 (Figure 4.2) et la poutre modélisée en élément QUA8 (Figure 4.3).

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

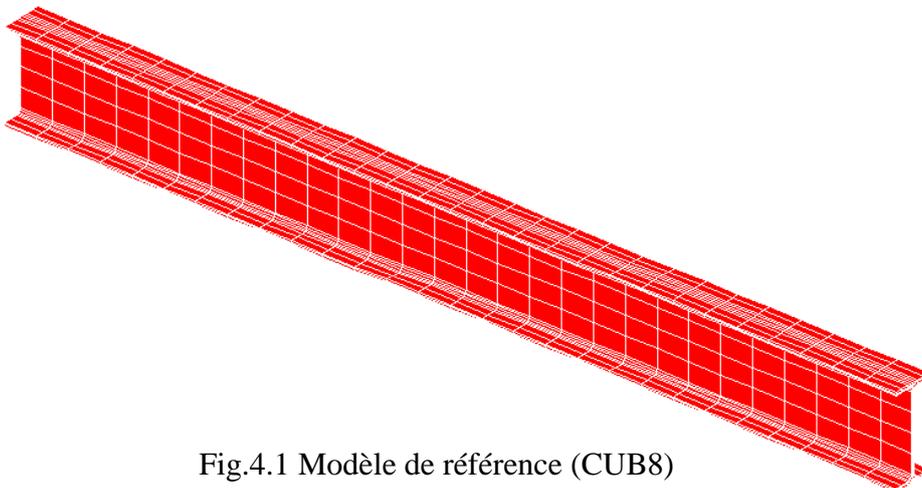


Fig.4.1 Modèle de référence (CUB8)

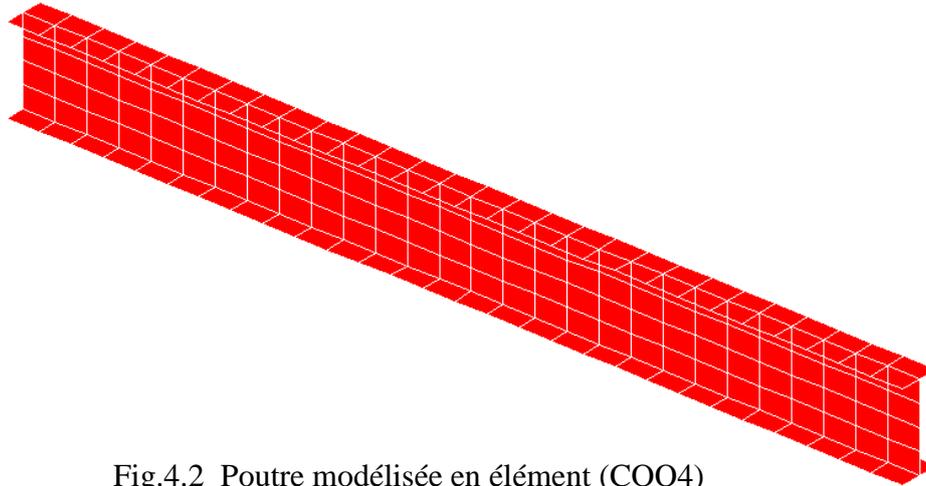


Fig.4.2 Poutre modélisée en élément (COQ4)

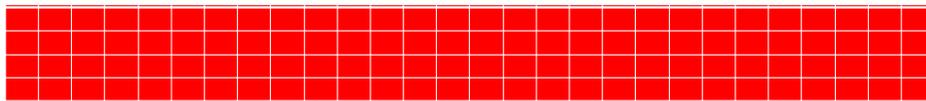


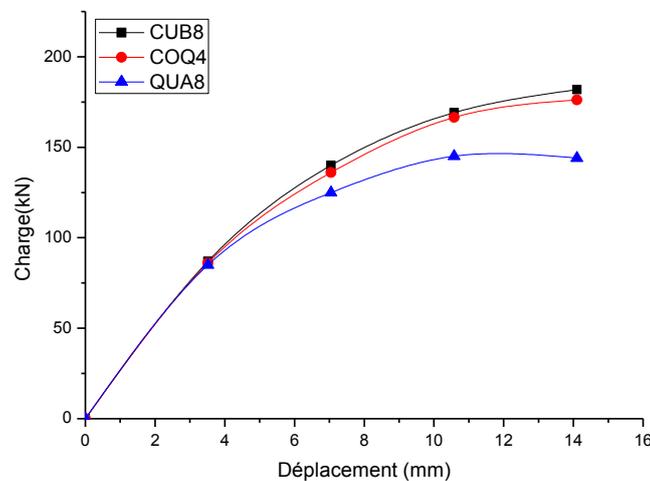
Fig.4.3 Poutre modélisée en élément (COQ4)

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

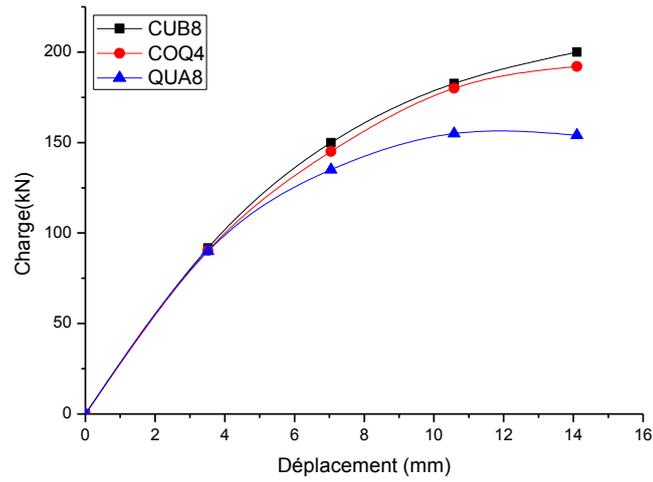
4.2.1. Influence de la portée de la poutre

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.

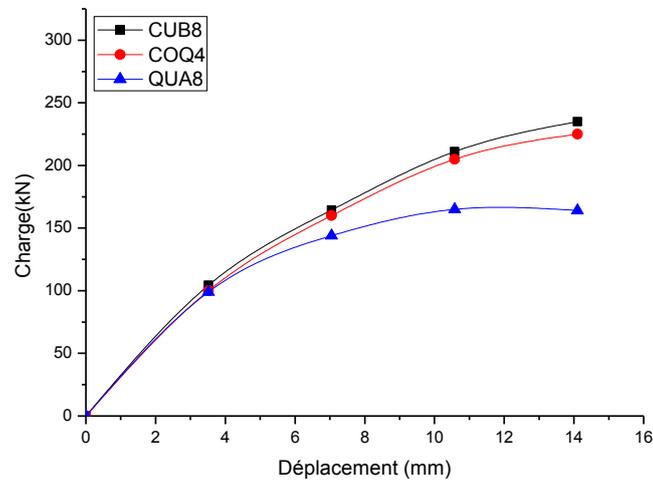
Les graphes des figures ci-dessous (figures 4.4 à 4.12) montrent le comportement non-linéaire des configurations de poutres étudiées pour des portées différentes (L = 4m, L=4.5m et L = 5m).



a- Poutres de nuance d'acier S235

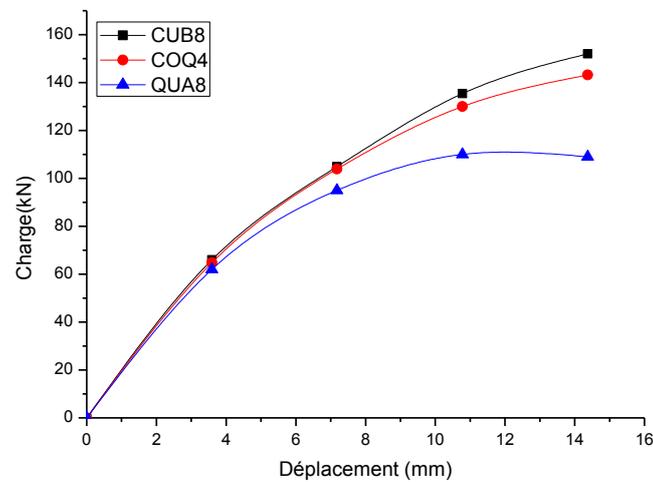


b- Poutres de nuance d'acier S275

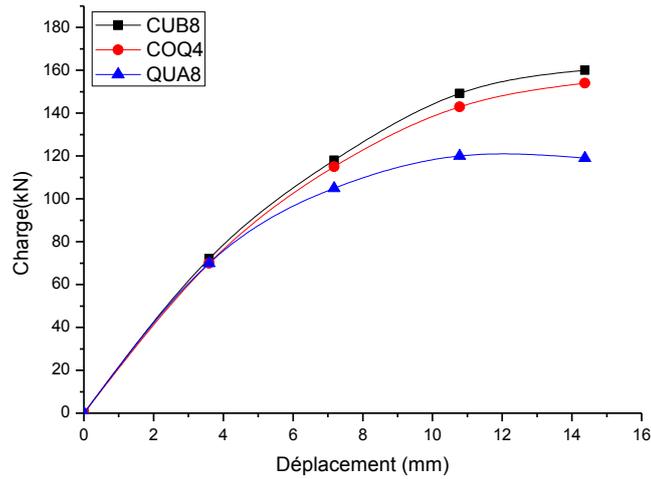


c- Poutres de nuance d'acier S355

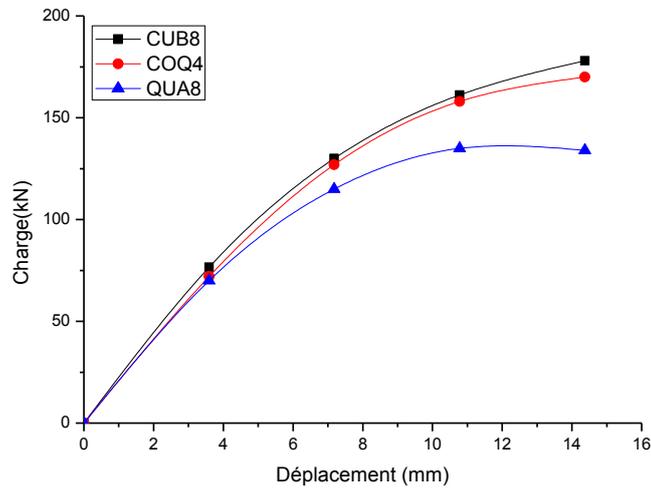
Figure 4.4 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée $L = 4m$



a- Poutres de nuance d'acier S235

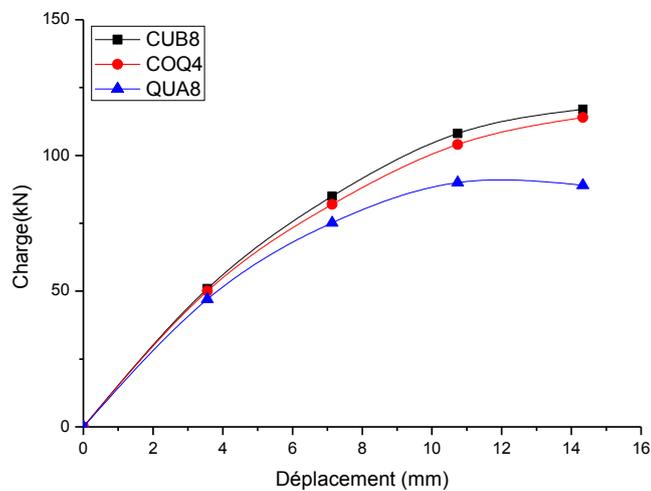


b- Poutres de nuance d'acier S275

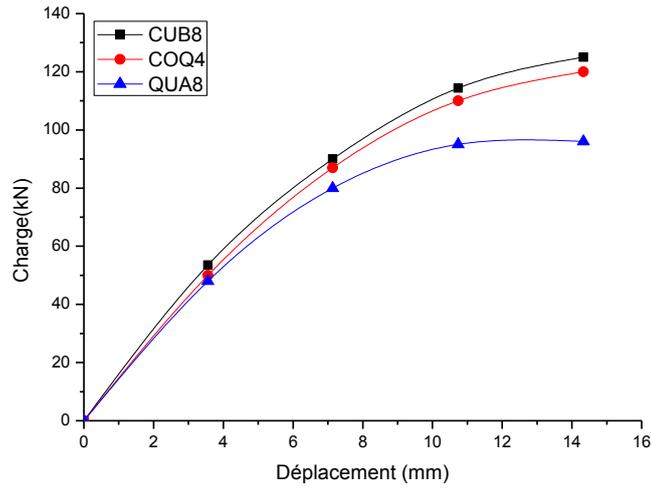


c- Poutres de nuance d'acier S355

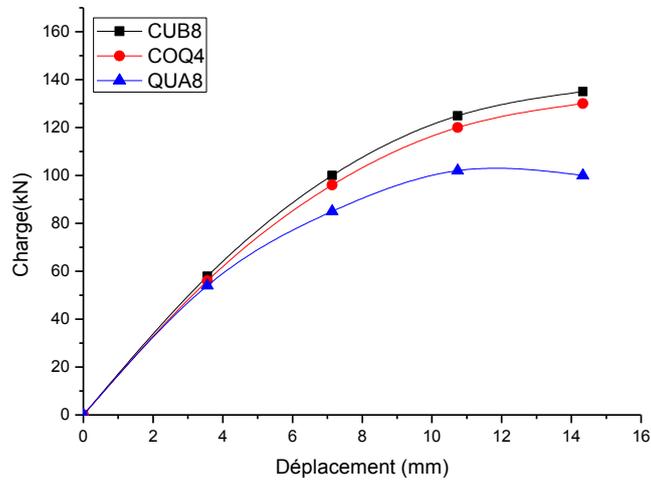
Figure 4.5 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée $L = 4.5m$



a- Poutres de nuance d'acier S235



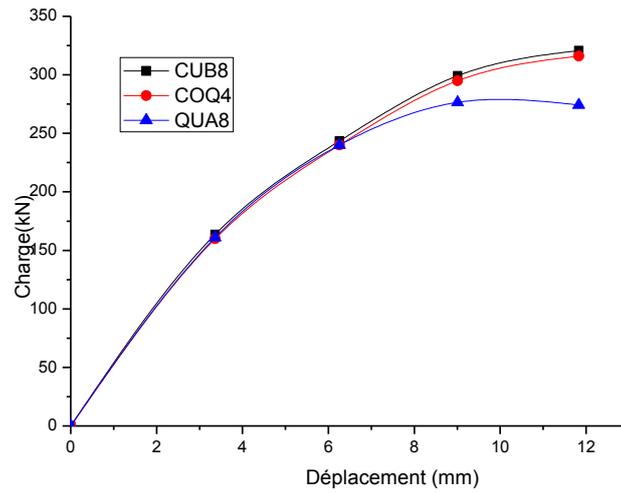
b- Poutres de nuance d'acier S275



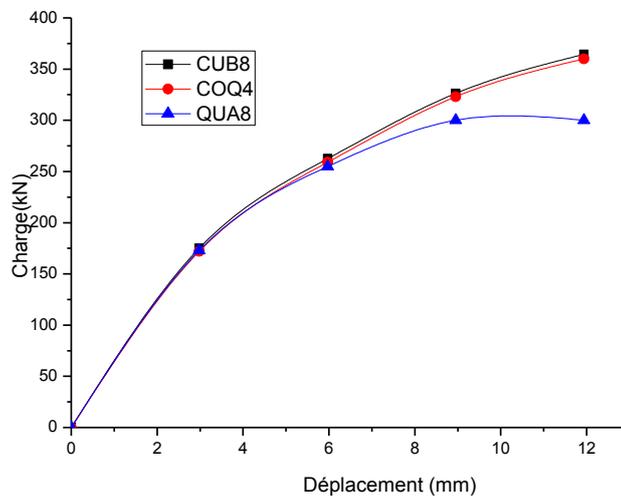
c- Poutres de nuance d'acier S355

Figure 4.6 Comportement non-linéaire des poutres en IPE400 de portée $L = 5m$

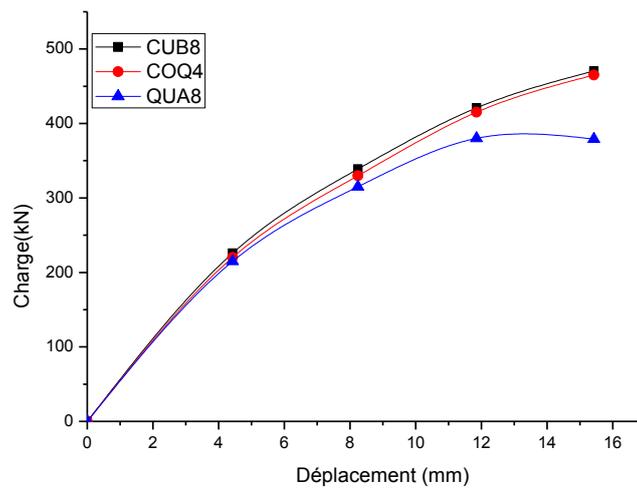
D'après les courbes des figures (4.4 à 4.6), il est à constater que les résultats obtenus par le modèle (COQ4) concordent bien avec ceux obtenus par le modèle de référence (CUB8) à l'état plastique que ceux obtenus par le modèle (QUA8), alors qu'à l'état élastique, les résultats obtenus par les deux modèles (COQ4 et QUA8) sont presque de même écart de différence par rapport aux résultats obtenus par le modèle de référence (CUB8).



a- Poutres de nuance d'acier S235

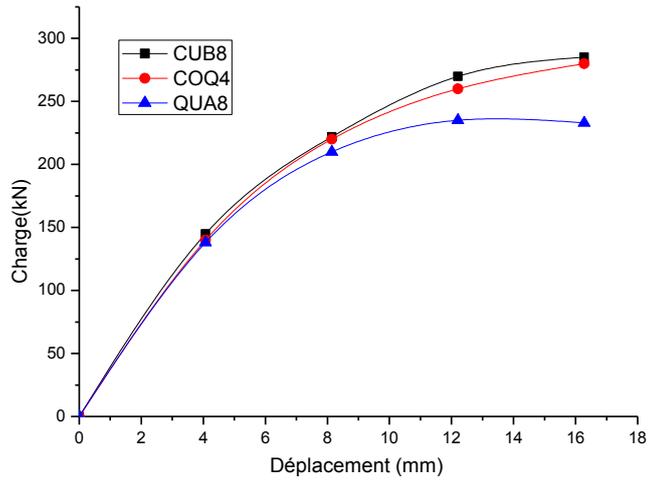


b- Poutres de nuance d'acier S275

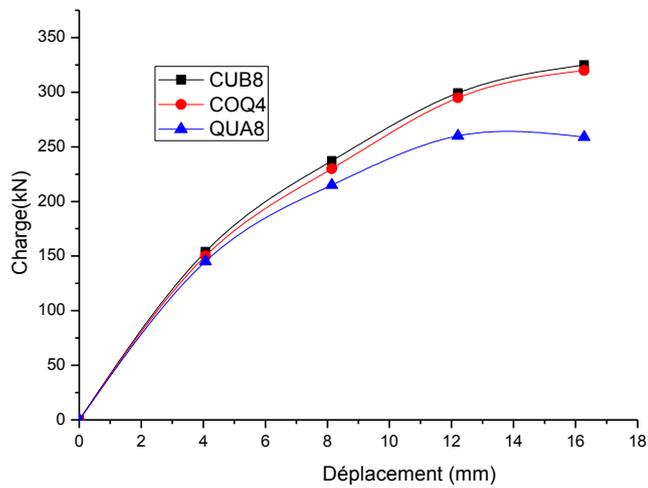


c- Poutres de nuance d'acier S355

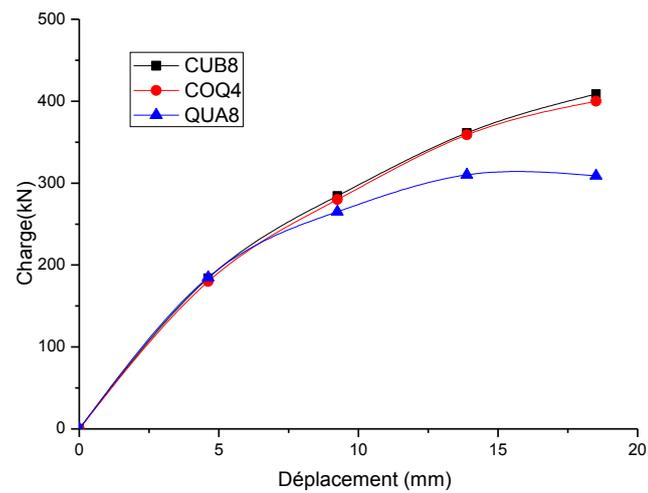
Figure 4.7 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée $L = 4m$



a- Poutres de nuance d'acier S235

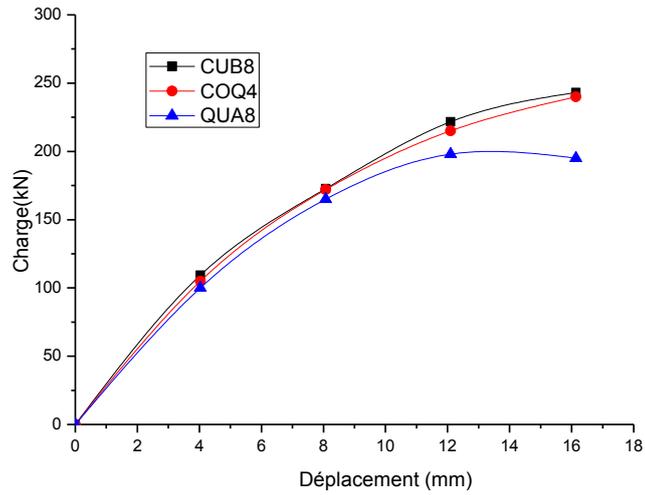


b- Poutres de nuance d'acier S275

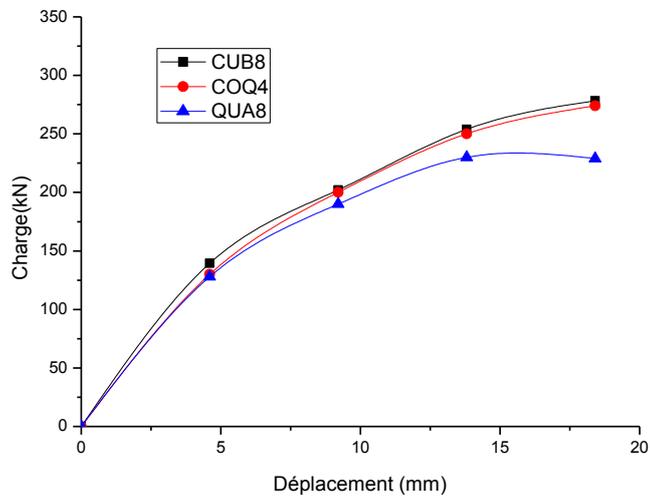


c- Poutres de nuance d'acier S355

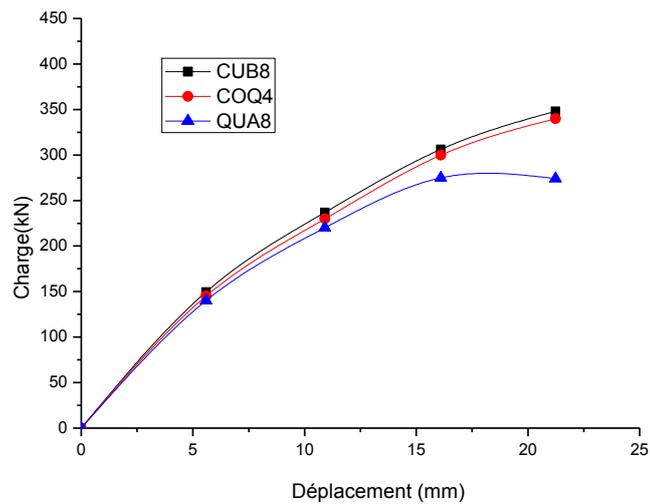
Figure 4.8 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée $L = 4.5m$



a- Poutres de nuance d'acier S235



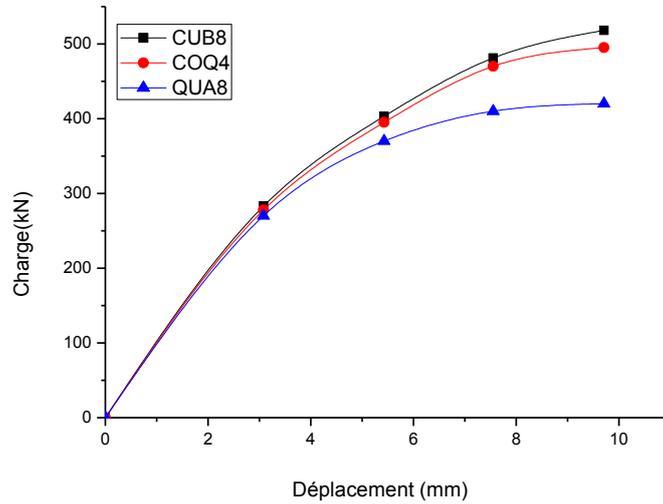
b- Poutres de nuance d'acier S275



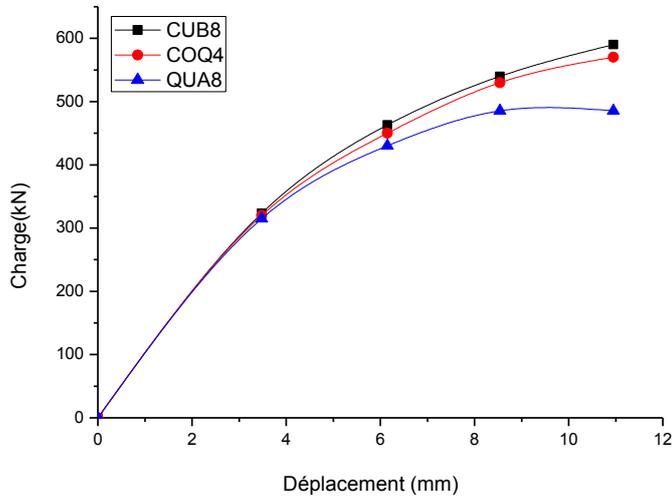
c- Poutres de nuance d'acier S355

Figure 4.9 Comportement non-linéaire des poutres en IPE500 de portée $L = 5m$

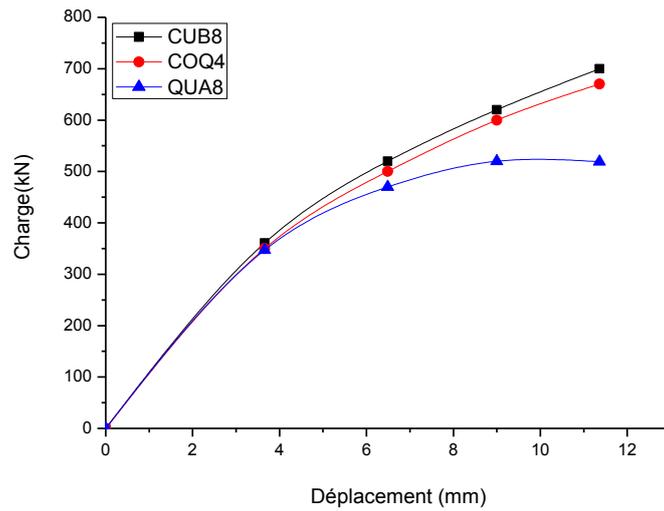
D'après les courbes des figures (4.7 à 4.9), il est à observer que les résultats obtenus par le modèle (COQ4) concordent bien avec ceux obtenus par le modèle de référence (CUB8) à l'état élasto-plastique, par contre les résultats obtenus par le modèle (QUA8) concordent bien avec ceux obtenus par le modèle de référence (CUB8) qu'à l'état élastique.



a- Poutres de nuance d'acier S235

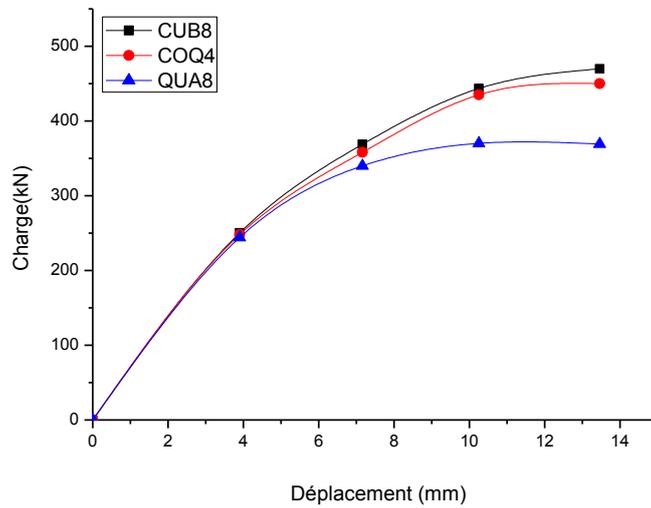


b- Poutres de nuance d'acier S275

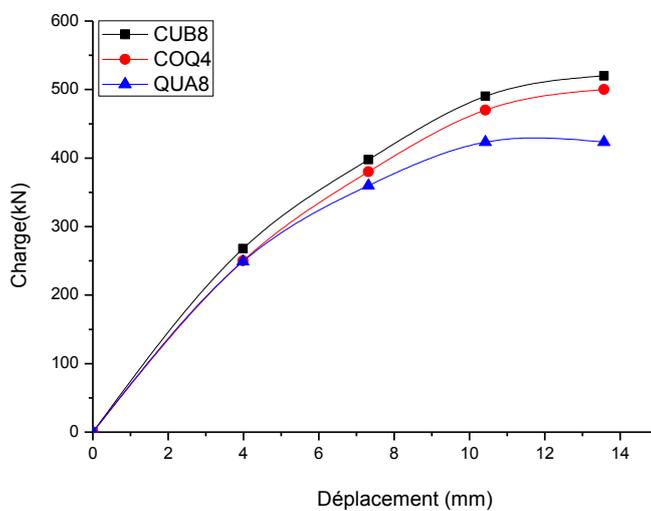


c- Poutres de nuance d'acier S355

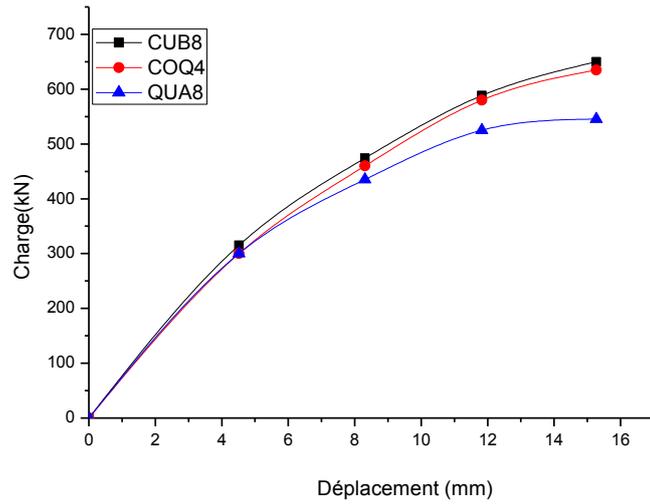
Figure 4.10 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée $L = 4m$



a- Poutres de nuance d'acier S235

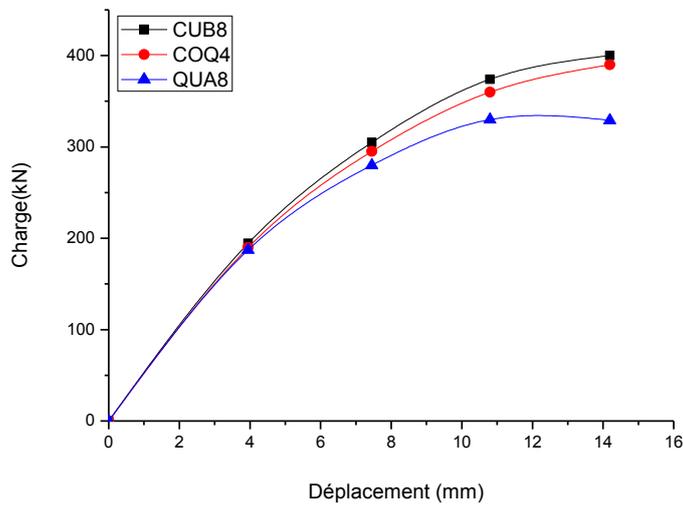


b- Poutres de nuance d'acier S275

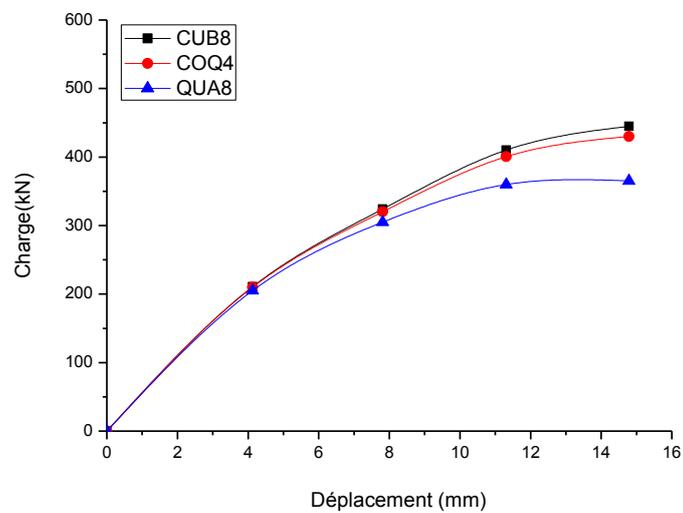


c- Poutres de nuance d'acier S355

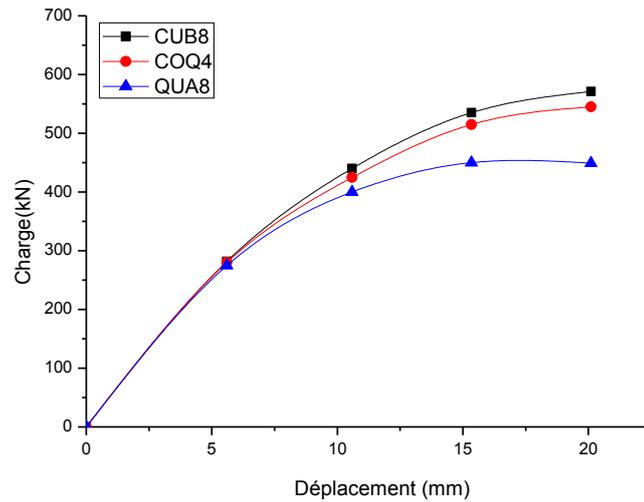
Figure 4.11 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée $L = 4.5m$



a- Poutres de nuance d'acier S235



b- Poutres de nuance d'acier S275



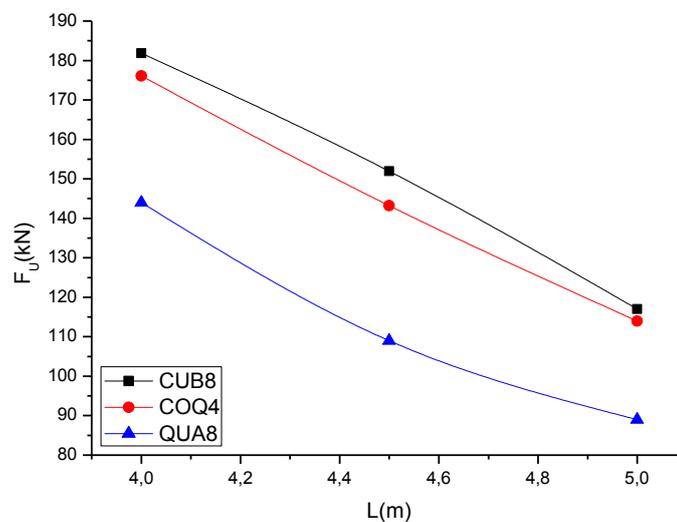
c- Poutres de nuance d'acier S355

Figure 4.12 Comportement non-linéaire des poutres en IPE600 de portée $L = 5m$

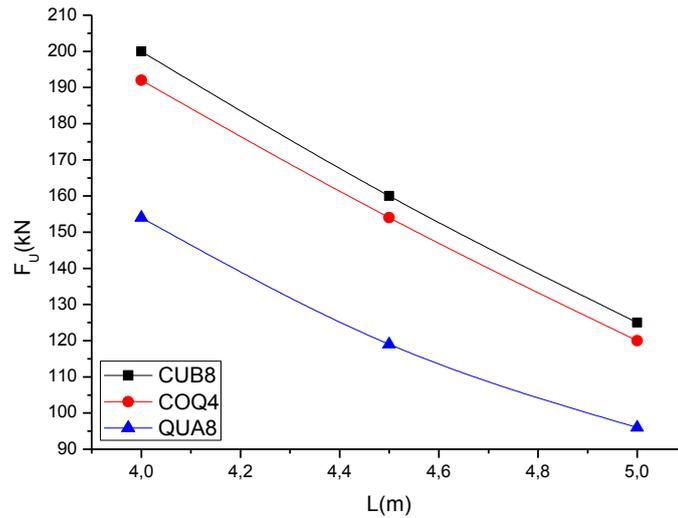
D'après les courbes des figures (4.10 à 4.12), il est à remarquer qu'à l'état elasto-plastique les résultats obtenus selon le modèle (COQ4) sont plus proches que ceux obtenus selon le modèle (QUA8) par rapport aux résultats obtenus selon le modèle de référence (CUB8).

En d'autres termes l'écart de différence entre le modèle (QUA8) et le modèle de référence (CUB8) est plus important que l'écart de différence entre le modèle (COQ4) et le modèle de référence (CUB8).

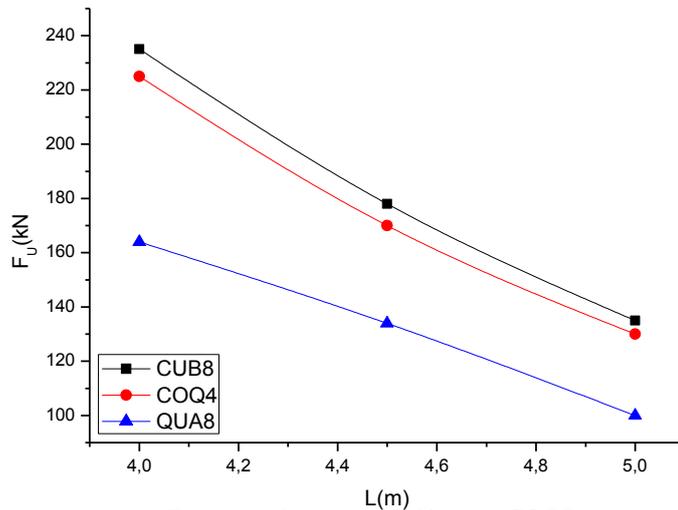
Pour une meilleure analyse sur l'influence de la portée de la poutre vis-à-vis le modèle numérique modélisant celle-ci, une comparaison de résultats est établie dans la figure (4.13), entre les valeurs de la charge ultime obtenus (F_u) en fonction des hauteurs croissantes (L/H) pour le cas d'une poutre fabriquée en IPE400 pour différentes nuances d'acier.



a- Poutres de nuance d'acier S235



b- Poutres de nuance d'acier S275



c- Poutres de nuance d'acier S355

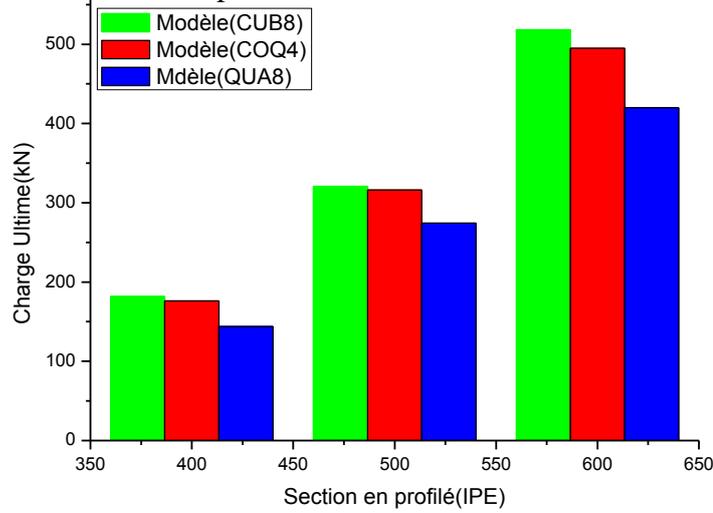
Figure 4.13 Charge ultime (F_u) en fonction de (L)

A partir des graphes donnés dans la figure 4.13, il est bien clair que les valeurs de la charge ultime obtenues selon le modèle (COQ4) se concordent bien avec celles obtenues selon le modèle de référence (CUB8), par contre les valeurs de la charge ultime obtenues selon le modèle (QUA8) ont un écart de différence très important par rapport à celles obtenues selon le modèle de référence (CUB8).

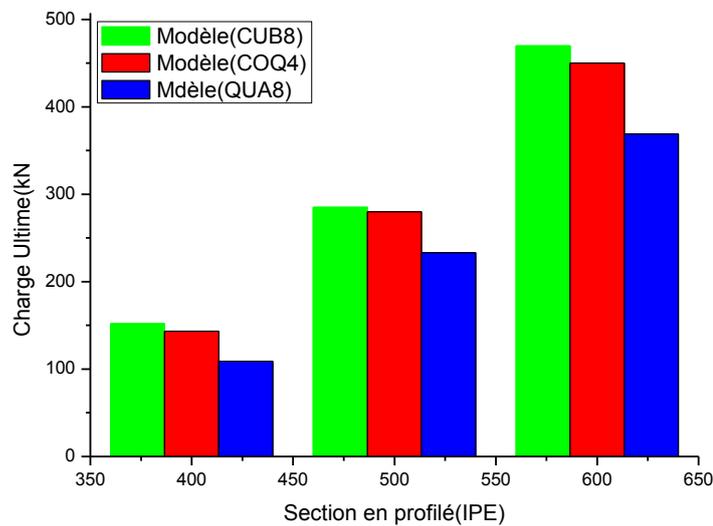
4.2.2. Influence de la section de la poutre

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.

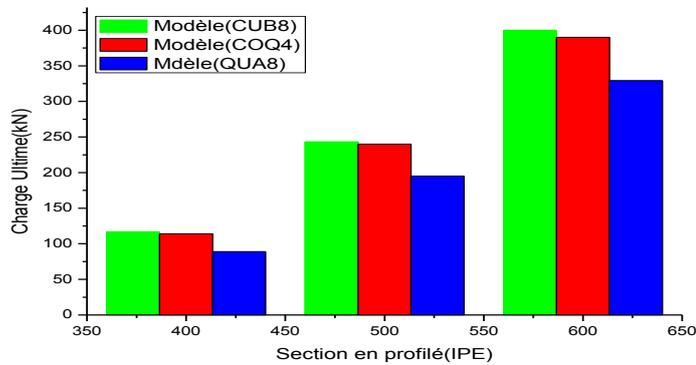
Les histogrammes des figures (4.14 à 4.16) ci-dessous représentent la valeur de la charge ultime en fonction de différents profilés d'acier de nuances différentes des poutres de différentes portées.



a- Poutres de de portée L = 4m

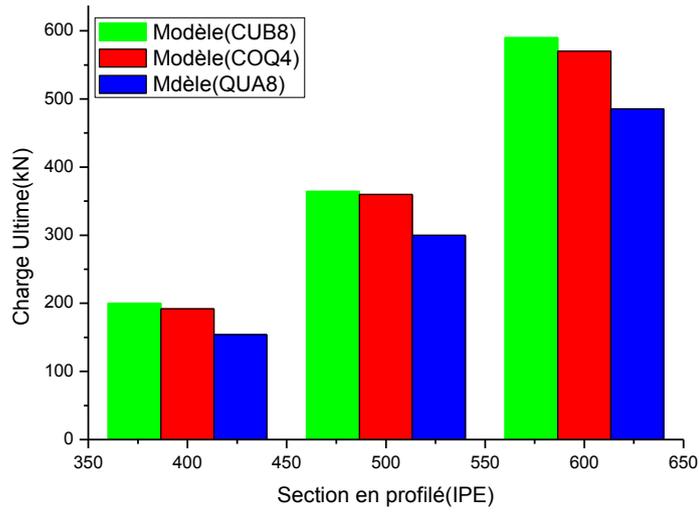


b- Poutres de de portée L = 4.5m

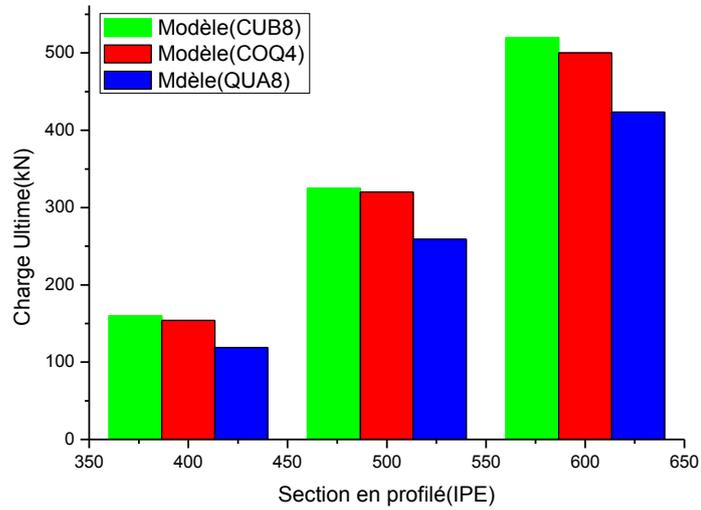


c- Poutres de de portée L = 5m

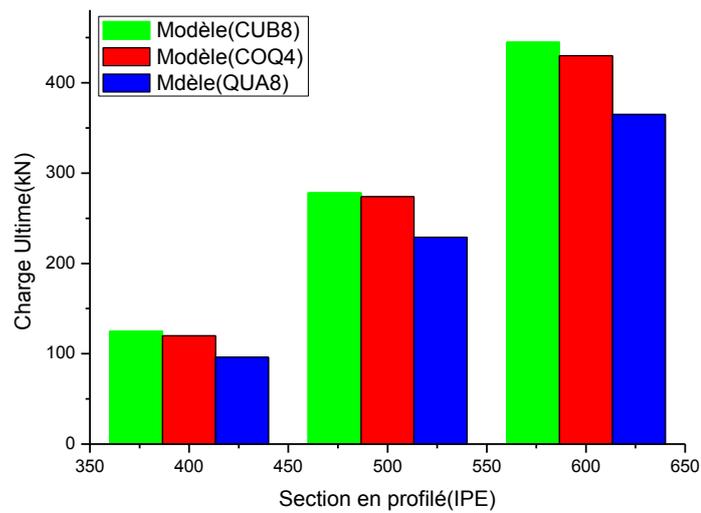
Figure 4.14 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S235



a- Poutres de de portée $L = 4m$

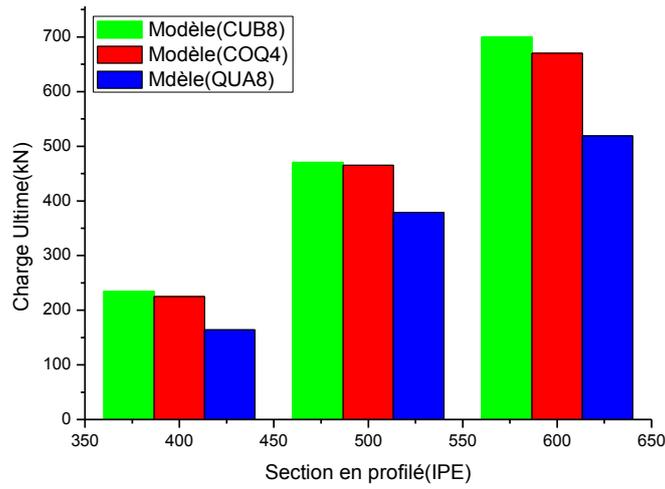


b- Poutres de de portée $L = 4.5m$

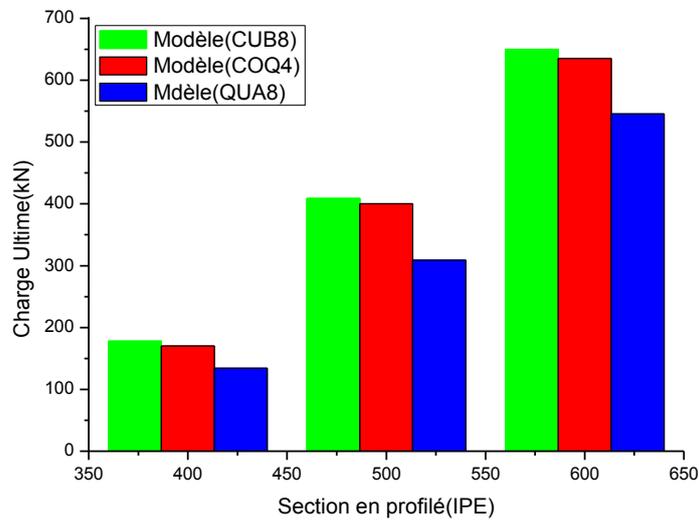


c- Poutres de de portée $L = 5m$

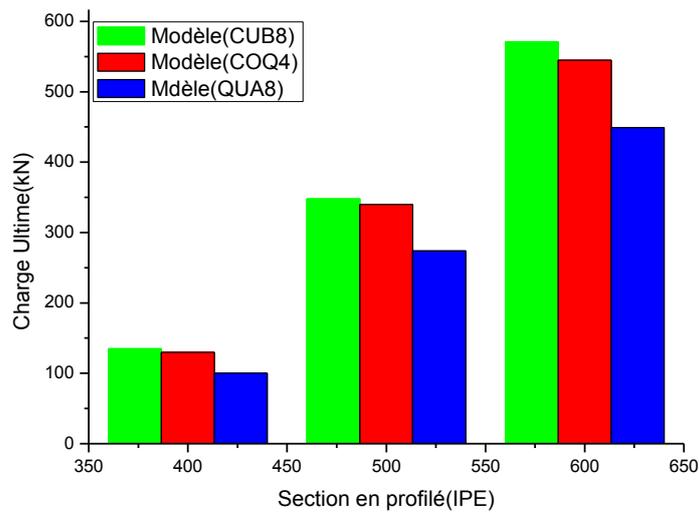
Figure 4.15 Charge ultime en fonction des profilés IPE de nuance d'acier S275



a- Poutres de de portée L = 4m



b- Poutres de de portée L = 4.5



c- Poutres de de portée L = 5m **figure 4.16** 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 (4.14, 4.15 et 4.16) représentée ci-dessus, que les résultats obtenus par le modèle (COQ4) s'accordent mieux avec ceux obtenus par le modèle de référence (CUB8), par contre les résultats obtenus par le modèle (QUA8) ne se rapprochent pas avec ceux obtenus par le modèle de référence (CUB8).

Il est également à constater que les valeurs de la charge ultime correspondantes aux poutres de différentes portées, fabriquées en profilés de grande section (voir IPE600) sont plus importantes que celles fabriquées en profilés de faible section (voir IPE400).

4.2.3. 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 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_{COQ}/F_{CUB}	F_{QUA}/F_{CUB}
	Modèle de réf. (CUB8)	Modèle (COQ4)	Modèle (QUA8)		
S235	181,83	176,1	144	0.97	0.79
S275	200	192	154	0.96	0.77
S355	235	225	164	0.96	0.70

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

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F_{COQ}/F_{CUB}	F_{QUA}/F_{CUB}
	Modèle de réf. (CUB8)	Modèle (COQ4)	Modèle (QUA8)		
S235	151,97	143,24	109	0.94	0.72
S275	160	154	119	0.96	0.74
S355	178	170	134	0.95	0.75

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

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F_{COQ}/F_{CUB}	F_{QUA}/F_{CUB}
	Modèle de réf. (CUB8)	Modèle (COQ4)	Modèle (QUA8)		
S235	117	114	89	0.97	0.76
S275	125	120	96	0.96	0.77
S355	135	130	100	0.96	0.74

Tableau 4.3. 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 fabriquées en profilé IPE400 pour différentes nuances d'acier et de différentes portées ; l'écart maximal de différence entre le modèle de référence (CUB8) et le modèle (COQ4) est d'orde 6%, alors que celui entre le modèle de référence (CUB8) et le modèle (QUA8) est d'orde 30%.

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F_{COQ}/F_{CUB}	F_{QUA}/F_{CUB}
	Modèle de réf. (CUB8)	Modèle (COQ4)	Modèle (QUA8)		
S235	320,8	316	274,32	0.98	0.85
S275	364,45	360	300	0.99	0.82
S355	470,35	465	379	0.99	0.81

Tableau 4.4. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de portée 4m

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F_{COQ}/F_{CUB}	F_{QUA}/F_{CUB}
	Modèle de réf. (CUB8)	Modèle (COQ4)	Modèle (QUA8)		
S235	285,13	280	233	0.98	0.82
S275	325,06	320	259	0.98	0.80
S355	408,63	400	309	0.98	0.76

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

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F_{COQ}/F_{CUB}	F_{QUA}/F_{CUB}
	Modèle de réf. (CUB8)	Modèle (COQ4)	Modèle (QUA8)		
S235	243,2	240	195	0.99	0.80
S275	278,31	274	229	0.98	0.82
S355	348	340	274	0.98	0.79

Tableau 4.6. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de portée 5m

D'après les valeurs obtenues selon les tableaux (4.4 à 4.6) ci-dessus, il à constater que pour des poutres fabriquées en profilé IPE500 pour différentes nuances d'acier et de différentes portées ; l'écart maximal de différence entre le modèle de référence (CUB8) et le modèle (COQ4) est d'orde 2%, alors que celui entre le modèle de référence (CUB8) et le modèle (QUA8) est d'orde 24%.

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F_{COQ}/F_{CUB}	F_{QUA}/F_{CUB}
	Modèle de réf. (CUB8)	Modèle (COQ4)	Modèle (QUA8)		
S235	518.34	495	420	0.95	0.81
S275	590	570	485,5	0.97	0.82
S355	700	670	519	0.96	0.74

Tableau 4.7. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de portée 4m

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F_{COQ}/F_{CUB}	F_{QUA}/F_{CUB}
	Modèle de réf. (CUB8)	Modèle (COQ4)	Modèle (QUA8)		
S235	469,77	450	369	0.96	0.78
S275	520	500	423,42	0.96	0.81
S355	650	635	545,6	0.98	0.84

Tableau 4.8. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de portée 4.5m

nuance de l'acier	Charge Ultime F (kN)			F_{COQ}/F_{CUB}	F_{QUA}/F_{CUB}
	Modèle de réf. (CUB8)	Modèle (COQ4)	Modèle (QUA8)		
S235	400	390	329	0.97	0.82
S275	445	430	365	0.97	0.82
S355	571	545	449	0.95	0.79

Tableau 4.9. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de portée 5m

D'après les valeurs obtenues selon les tableaux (4.7 à 4.9) ci-dessus, il à constater que pour des poutres fabriquées en profilé IPE400 pour différentes nuances d'acier et de différentes portées ; l'écart maximal de différence entre le modèle de référence (CUB8) et le modèle (COQ4) est d'orde 5%, alors que celui entre le modèle de référence (CUB8) et le modèle (QUA8) est d'orde 26%.

On peut aussi conclure d'après les résultats obtenus selon les tableaux représentées ci-dessus (4.1 à 4.9), que la charge ultime augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la nuance d'acier quel que soit la portée de la poutre et quel que soit le nuance de l'acier du profilé en IPE envisagé pour sa fabrication .

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 fabriquées en profilé IPE dans le domaine non linéaire de type élasto- plastique, nous avons mené dans ce chapitre une étude comparative entre deux nouveaux modèles numériques proposés en éléments à deux et à trois dimensions (QUA8, COQ4) et le modèle de référence en éléments massifs (CUB8), modélisant des poutres représentatives de cas envisageables.

Le modèle de référence en éléments massifs (CUB8) 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 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 (COQ4) 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 métalliques en double Te fabriquées en différents profilés IPE.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les objectifs principaux de notre travail étaient, d'une part d'élaborer un modèle numérique simple et fiable pour prédire le comportement dans le domaine non linéaire des poutres métalliques de sections différentes en profilés IPE sous l'effet d'un chargement transversal appliquée à mi-portée et d'autre part de mener une analyse numérique dans le domaine non linéaire afin de présélectionné un nouveau support numérique mettant en évidence l'influence de sa souplesse en termes de temps de construction et d'exécution sur le comportement des poutres métalliques fabriquées en profilé IPE

Un modèle numérique de référence en éléments finis massifs en trois dimensions (CUB8) a été développé dans la première partie de ce mémoire pour prédire le comportement des poutres métalliques de différentes sections en profilé IPE symétriques dans le domaine élasto-plastique, soumises à l'effet de charges transversales. Ce modèle numérique de référence a été validé par une comparaison reposant sur les résultats d'essais expérimentaux évoqués en littérature.

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

Une analyse numérique basée sur le logiciel d'éléments finis Cast3m a été menée pour justifier le choix des éléments finis résultant d'une analyse comparative entre deux nouveaux modèles numériques proposés en éléments à deux et à trois dimensions (QUA8, COQ4) et le modèle de référence en éléments massifs (CUB8). Le pourquoi de ce choix, peut être privilégié par le fait que la mise en œuvre d'une modélisation volumique (massif) en 3D serait beaucoup trop lente.

Grâce au modèle 3D (COQ4) présélectionné, nous avons pu mettre en évidence l'influence de la souplesse de ce support en termes de temps de construction et d'exécution sur le comportement non-linéaire des poutres métalliques fabriquées en différentes profilé IPE.

En résumé, le travail entrepris a permis de montrer la fiabilité du modèle numérique en trois dimensions, représentatif de la réalité et suffisamment souple, élaborer dans le sens de permettre à bien mener des analyses numériques dans le domaine non linéaire pour prédire le comportement mécanique des poutres métalliques de sections en profilé IPE.

Références bibliographique

Références bibliographique

- [1] S. EockKim et W. FahChen 1998. “A sensitivity study on number of elements in refined plastic-hinge analysis”, J. Computers & Structures, Volume 66, Issue 5, Pages 665-673
- [2] C. KinIn 2008 “ Inelastic finite element analysis of composite beams on the basis of the plastic hinge approach” , Engineering Structures, Volume 30, Issue 10, Pages 2912-2922
- [3] B. Štok et M. Halilovič 2009 “Analytical solutions in élasto-plastic bending of beams with rectangular cross section”, Applied Mathematical Modelling. Volume 33, Issue 3, Pages 1749-1760
- [7] J.Bin et C.Wanji 2010 “ A new analytical solution of pure bending beam in couple stress elasto-plasticity: Theory and applications”, International Journal of Solids and Structures, Volume 47, Issue 6, Pages 779-785
- [5] Y.WenQ et Y.Zeng 2010 “ A novel approach to élasto-plastic finite element analysis of beam structures using the concept of incremental secant stiffness” ,Finite Elements in Analysis and Design , Volume 46, Issue 11, Pages 982-991
- [6] M.Grigoriana et C.Grigorianb 2012 “ Recent developments in plastic design analysis of steel moment frames” , Journal of Constructional Steel Research, Volume 76, Pages 83-92
- [7] Jian et Y.Wu 2013 “ New enriched finite elements with softening plastic hinges for the modeling of localized failure in beams” , Computers & Structures, Volume 128, Pages 203-218
- [8] D. Ehsan, A. Sajad, M. T. Fariborz, G. Aastha, M. Rasoul 2015 “ New Practical Approach to Plastic Analysis of Steel Structures” , Periodica Polytechnica Civil Engineering, 59(1), pp. 27–35
- [9] CEA (Commissariat à l’Energie Atomique) « CAST3M Web site », <http://www.cast3m.cea.fr>