



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil
Option : structure

Présenté par :

Zerguerras Malika

Senouci Djihad Fatima Zohra

THEME

**Evaluation de la charge ultime des poutres métalliques à
âme pleines fabriquées en profilé IPE : Approche analytique
et simulation numérique**

Soutenu publiquement le septembre 2020 devant le jury composé de :

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

Président
Encadreur
Examineur
Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions à Allah, notre créateur de nous avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.

*Comme guise de reconnaissance, j'adresse mes sincères remerciements, mon grand respect et ma noble gratitude à mon encadreur **Dr.DJEBLI Benyagoub** pour son aide, ses encouragements et à l'aide précieuse qu'il m'a apporté en faisant profiter largement des ses connaissances. Je ne serais oublier sa constante disponibilité.*

Nous vifs remerciements aux membres de jury et à son président avec qui nous allons soutenir ce mémoire et juger de sa qualité.

*Toute notre gratitude va à tous les enseignants de l'université **IBN KHALDOUN** qui ont contribué à notre formation, en particulier du département de génie civil.*

Au terme de cette recherche, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail de recherche. Enfin, Je tiens à remercier tous ceux qui, d'une manière ou d'autre, ont participé à ma formation et à la réalisation de ce travail.



Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents mon père et ma mère, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leur prières tous au long de mes études,

A notre Encadreur Dr.DJEBLI Benyagoub,

A mes frères, pour leur appui et leur encouragement,

A mes sœurs, pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Djihad Fatima Zohra



Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents mon père et ma mère, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leur prières tous au long de mes études,

A notre Encadreur Dr.DJEBLI Benyagoub,

A mes frères, pour leur appui et leur encouragement,

A mes sœurs, pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral,

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours
universitaire,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de
votre soutien infailible,*

Merci d'être toujours là pour moi.

Malika

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 Té 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 approche couplée modélisation analytique-numérique est proposé pour le calcul de la charge ultime des poutres métalliques de sections transversales en profilés IPE. Dans cette analyse, le comportement non-linéaire des poutres fléchies a été examiné en détail jusqu'à la ruine en ainsi déterminant la résistance ultime en flexion des poutres.

Le modèle utilisé dans la simulation numérique est intégré dans un modèle tridimensionnel développé en utilisant le code de calcul Cast3m. Des éléments coque (COQ4) sont utilisés pour la modélisation des poutres à sections en double Té.

Ces analyses ont permis d'une part de valider le modèle analytique, d'autre part de mettre en évidence la réduction de la résistance des poutres métalliques dans le domaine non-linéaire.

Mots clés : *poutres métalliques; modèle analytique; simulation numérique ; comportement non-linéaire.*

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.

In this memory work, a coupled approach analytical-numerical modeling is proposed for the ultimate load calculation of hot rolled steel I section beams. In this analysis, the inflected beams behavior was examined in detail until failure, thus determining the ultimate strength in bending of the beams.

The model used in the numerical simulation is integrated into a three dimensional model developed using the Cast3m calculation code. The shell elements are used (COQ4) for modeling I-section beams.

These analyzes allowed, on the one hand, to validate the analytical model, on the other hand to highlight the reduction of the resistance of the steel beams in the non-linear domain.

Key words: *Steel beams; Analytical model; Numerical simulation; Non-linear behavior.*

الملخص

- تعد العوارض المعدنية من نوع (IPE) الأكثر عرضة للتقوس, كونها العنصر الاساسي الناقل للقوى المطبقة على دعامتها بسبب محاور العزم و القوى العرضية. و اقتصادية اذ تركز المادة حيثما تطلبت الضرورة, و لذلك هي الاكثر استعمالا كعناصر حاملة في الانشاءات المعدنية. و مع ذلك فانه تحت تأثير الحمولة التدريجية تصبح التشوهات كبيرة جدا فتدمر العارض عن طريق تشكيل الية (formation de la rotule plastique).
ان حساب الابعاد المتعلق بمعرفة ثقل الهياكل المتعرضة للتشوه (التقوس) يعد ضرورة قصوى في التصميم خاصة في انظمة الارضيات و الجسور.

في هذا البحث نقترح جانب مزدوج للنمذجة التحليلية-الرقمية من اجل حساب القوى القصوى (النهائية) للعوارض المعدنية للأقسام المستعرضة المعرفة (IPE).

في هذه الدراسة تم التحليل الدقيق للسلوك الغير الخطي للعوارض المنحنية (المقوسة) حتى التدمير, و بالتالي تحديد المقاومة النهائية في انحاء العوارض.

النوع المتبع في المحاكاة الرقمية مدمج في نموذج ثلاثي الابعاد الذي تم تطويره باستخدام برنامج CAST3M, العناصر المنتهية (COQ4) لنمذجة الحزم ذات المقطع (IPE).

مكنت هذه التحليلات، من ناحية ، من التحقق من صحة النموذج التحليلي ، من ناحية أخرى لتسليط الضوء على الحد من مقاومة الحزم المعدنية في المجال اللاخطي.

الكلمات المفتاحية : عوارض معدنية -حل تحليلي -محاكاة رقمية -سلوك غير خطي.

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	III
Abstract.....	IV
ملخص	V
Table des matières	VI
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	VIII
Notation.....	IX

Introduction générale

I)	Introduction	2
II)	Analyse plastique	3
III)	Principes de vérification d'une structure	3
IV)	Problématique	4
V)	Objectifs de la recherche	4
VI)	Structure du mémoire	5

Chapitre1 : Revue de la littérature

I)	Introduction	7
II)	Historique	7
1)	Première période : les premiers travaux	7
2)	Deuxième période : les travaux en Grande Bretagne.	8
3)	Troisième période : période actuelle.	8
III)	Travaux de recherches menées sur la plasticité des structures.	9
IV)	Conclusion.....	14

Chapitre 2 : Développement de l'expression Analytique de la Charge ultime

I)	Introduction.	16
II)	Loi de comportement élasto – plastique.....	16
1)	Loi en flexion pure.....	18
2)	Loi en cisaillement pure.....	22
III)	Expression de la flèche :	23
1)	Cas de flexion.....	24
a)	Zone élastique	24
b)	Zone plastique	24
2)	Cas de cisaillement.....	24
a)	Zone élastique	24
b)	Zone plastique	24
IV)	Facteur de forme (f) :	24
V)	Évolution de la flèche en phase plastique	25
a)	Cas de flexion	25
b)	Cas de cisaillement	26
VI)	Charge ultime :.....	27
a)	Cas de flexion	27

b) Cas de cisaillement	27
VII) Conclusions	27

Chapitre 3 : Modélisation mécanique Par Éléments finis

I) Introduction	29
II) Présentation du logiciel	30
1) Introduction	30
2) Environnement et langage	30
3) Organisation d'un calcul	30
a) Préparation du modèle de calcul	30
b) Résolution du système d'équations	32
c) Traitement des résultats	32
III) Modélisation par éléments finis	33
1) Introduction	33
2) Modèle géométrique (Développement d'un modèle numérique)	34
3) Modèles de comportement du matériau	34
4) Conditions aux limites et chargement.....	34
IV) Validation du modèle numérique	35
V) Conclusion.....	38

Chapitre 4 : Analyse numérique

I) Introduction	40
II) Calibrage du modèle analytique par rapport au modèle numérique	40
III) Contribution de l'effet du cisaillement à la charge ultime	47
IV) Étude paramétrique	49
1) Influence des raidisseurs	49
2) Influence de la section de la poutre	54
3) Influence de la portée de la poutre.....	56
4) Influence de la nuance de l'acier	59
V) Conclusion	62

Conclusion Générale	63
----------------------------------	----

Références Bibliographique	66
---	----

Listes des figures

Chapitre 2 : Développement de l'expression analytique de la charge ultime

Figure 1	Diagramme de comportement élastique-plastique.....	16
Figure 2	Répartition des contraintes dans une section plastifiée.....	17
Figure 3	Phase élasto-plastique de flexion et de cisaillement.....	17
Figure 4	État de contrainte en flexion.....	18
Figure 5	Section en double Té.....	19
Figure 6	Poutre chargée à mi-portée.....	20
Figure 7	Diagramme du moment fléchissant	20
Figure 8	Evolution des zones de plastification en flexion simple	20
Figure 9	Zone plastique en flexion simple.....	21
Figure 10	État de contrainte en cisaillement	22

Chapitre 3 : Modélisation mécanique Par Éléments finis

Figure 1	Organigramme du modèle de calcul	31
Figure 2	Noyau de calcul, pré et post traitements du noyau de calcul.....	33
Figure 3	Modélisation des sections métalliques en COQ4	34
Figure 4	Loi de comportement de l'acier.....	34
Figure 5	schémas statiques de la poutre en double Té	35
Figure 6	comparaisons des résultats d'une poutre à section en double Té	36

Chapitre 4 : Analyse numérique

Figure 1	Poutres fabriquées en IPE300 de portée 4m.....	43
Figure 2	Poutres fabriquées en IPE400 de portée 4m.....	43
Figure 3	Poutres fabriquées en IPE500 de portée 4m.....	43
Figure 4	Poutres fabriquées en IPE600 de portée 4m	44
Figure 5	Poutres fabriquées en IPE300 de portée 4.5m.....	44
Figure 6	Poutres fabriquées en IPE400 de portée 4.5m.....	44
Figure 7	Poutres fabriquées en IPE500 de portée 4.5m.....	45
Figure 8	Poutres fabriquées en IPE600 de portée 4.5m.....	45

Figure 9	Poutres fabriquées en IPE300 de portée 5m.....	45
Figure 10	Poutres fabriquées en IPE400 de portée 5m.....	46
Figure 11	Poutres fabriquées en IPE500 de portée 5m.....	46
Figure 12	Poutres fabriquées en IPE600 de portée 5m.....	46
Figure 13	Contribution de l'effet du cisaillement à la charge ultime pour poutre de 4mde longueur	47
Figure 14	Contribution de l'effet du cisaillement à la charge ultime pour poutre de 4.5mde longueur	48
Figure 15	Contribution de l'effet du cisaillement à la charge ultime pour poutre de 5mde Longueur.....	48
Figure 16	Configurations de la poutre étudiée	50
Figure 17	Comportement élasto-plastique pour une nuance de l'acier 235Mpa.....	52
Figure 18	Comportement élasto-plastique pour une nuance de l'acier 275Mpa.....	52
Figure 19	Comportement élasto-plastique pour une nuance de l'acier 355Mpa.....	53
Figure 20	Comportement élasto-plastique pour une nuance de l'acier 460Mpa.....	54
Figure 21	Comportement non-linéaire d'une poutre de nuance d'acier (S235).....	55
Figure 22	Comportement élasto-plastique pour une poutre fabriquée en profilé (IPE300)	57
Figure 23	Comportement élasto-plastique pour une poutre fabriquée en profilé (IPE360)	57
Figure 24	Comportement élasto-plastique pour une poutre fabriquée en profilé (IPE400)	58
Figure 25	Comportement élasto-plastique pour une poutre fabriquée en profilé (IPE450)	58
Figure 26	Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE300 de portée 4m ...	59
Figure 27	Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE300 de portée 5m ...	59
Figure 28	Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE400 de portée 4m ...	60
Figure 29	Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE400 de portée 5m ...	60
Figure 30	Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE500 de portée 4m ...	61
Figure 31	Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE500 de portée 5m ...	61
Figure 32	Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE600 de portée 4m ...	61
Figure 33	Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE600 de portée 5m ...	62

Liste des tableaux

Chapitre 3 : Modélisation mécanique Par Éléments finis

Tableau 1	Caractéristiques géométriques ¹ des poutres de sections IPE	37
------------------	--	----

Tableau 2	Valeurs de la charge ultime	37
------------------	-----------------------------------	----

Chapitre 4 : Analyse numérique

Tableau 1	Caractéristiques géométriques des poutres.....	40
------------------	--	----

Tableau 2	Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée L = 4m	41
------------------	--	----

Tableau3	Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée L = 4.5m	41
-----------------	--	----

Tableau 4	Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée L = 5m	41
------------------	--	----

Tableau 5	Valeurs de la charge ultime d'une poutre de nuance S235	41
------------------	--	----

Tableau 6	Valeurs de la charge ultime d'une poutre de nuance S275	42
------------------	--	----

Tableau 7	Valeurs de la charge ultime d'une poutre de nuance S355	42
------------------	--	----

Tableau 8	Valeurs de la charge ultime d'une poutre de nuance S460	42
------------------	--	----

Tableau 9	Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée égale à 4m.....	50
------------------	--	----

Tableau 10	Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée égale à 4.5m	51
-------------------	---	----

Tableau 11	Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée égale à 5m	51
-------------------	---	----

Notations

A :	A1, A2	Des sections
B :	b	Largeur de la section transversale d'une poutre
C :	c	Exprimé la zone élastique
	C(x)	la zone plastique qui est limitée par une parabole d'équation
	C1, C2	Constante d'intégration
	\bar{C}	La matrice de l'amortissement
E :	E	Module de Young
F :	f_y	La limite d'écoulement
	f	Facteur de forme
	F	La charge appliquée à mi- porté
	F_e	Charge varié dans le domaine élastique
	F_p	Charge varié dans le domaine plastique
	F_{uM}	La charge ultime dans le cas de flexion.
	F_{uT}	La charge ultime dans le cas de cisaillement.
	F_u	La charge ultime total.
	F_{uEF}	La charge ultime par élément fini.
	F_{uTH}	La charge ultime théorique.
H :	h_a	Hauteur de l'âme
	H	Hauteur total
I :	I	Moment d'inertie
	I(c)	Le moment quadratique de la zone élastique
K :	\bar{K}	La matrice de la rigidité
L :	L	La longueur de la poutre

M :

M	Moment élasto-plastique
M_e	Moment de résistance élastique
M_f	Moment de flexion
M_p	Moment de résistance plastique
\bar{M}	La matrice de la masse

T :

t_f	épaisseur de la semelle
t_w	épaisseur de l'âme
T	L'effort tranchant

Y :

$y(x)$	Expression de la flèche
--------	-------------------------

W :

W_p	La somme des moments statiques
\bar{W}	Mode propre

Z :

Z(c)	Le moment statique de la zone élastique
Z(h)	Le moment statique de la section

D'autres caractères

- σ La contrainte normale
- σ_e La contrainte limite
- σ_{xx} La contrainte suivant l'axe xx
- τ_e La contrainte tangentielle

- α L'abscisse de la première section plastifiée
- $\theta(x)$ L'angle de rotation
- χ La courbure élasto-plastique

- χ_e La courbure élastique

INTRODUCTION GENERALE

I) Introduction

Jusqu'ici, on a essentiellement appris à calculer les éléments structuraux selon la méthode élastique, supposant que le milieu était continu et que le matériau obéissait à la loi de Hooke. L'hypothèse de linéarisation matérielle s'est développée dans la théorie de l'élasticité issue des travaux de Cauchy (1822). Elle a été amenée à un grand degré de perfection durant deux siècles environ de recherches. Ceci a permis aujourd'hui de résoudre, grâce aux méthodes numériques de discrétisation (éléments finis), les problèmes très complexes.

Mais le reproche fait à cette théorie est d'être basée sur une loi (droite brisée) qui ne représente absolument pas le comportement réel du matériau pour autant qu'il soit ductile, même faiblement- au-delà du domaine élastique borné par la limite d'élasticité σ_e . Selon le dimensionnement élastique, la ruine d'une structure serait atteinte dès qu'en un point quelconque, la contrainte de compression maximale atteint σ_e ($\sigma_{\max} = \sigma_e$).

Par ailleurs, cette méthode néglige la capacité d'adaptation élasto-plastique des matériaux ductiles que l'expérience montre être très importante et d'ailleurs très variable d'un matériau et d'une structure à l'autre. Elle est actuellement jugée très insuffisante pour mesurer avec précision la résistance ultime des structures employées en Génie Civil et, par suite, leur degré réel de sécurité.

La théorie de la plasticité, dont les premiers progrès importants datent de 1925 est basée sur le milieu continu et le modèle élastique parfaitement plastique. Ce dernier est caractérisé par le palier indéfini de plasticité et le déchargement élastique. Aucun matériau ductile de construction n'obéit rigoureusement à ce modèle ; les aciers au carbone (aciers doux et faiblement alliés) s'en approchent assez fortement (palier étendu, mais comportement discontinu dans ce palier, suivi d'une zone d'écrouissage), tandis que les autres matériaux de construction (aciers alliés, alliages d'aluminium, béton) présentent un comportement plus complexe (absence de palier) ¹.

Néanmoins, ce modèle est bien meilleur que le modèle élastique. Il permet de prédire l'extension progressive des zones plastifiées dans une structure soumise des charges croissantes et aussi, ce qui est d'un grand intérêt, la charge de ruine ou d'effondrement, dite charge limite, de cette structure. A cet effet le concept d'analyse limite a été introduit et qui présente en fait la partie de la théorie de la plasticité vouée au calcul des charges limites.

¹ Analyse des structures et milieux continus : mécanique des structures, François Frey

Le succès de la méthode plastique va en grandissant non seulement les calculs ne sont pas plus compliqués qu'en méthode élastique (ils peuvent être plus simples), mais aussi concordent fort bien avec les expériences menées jusqu'à la ruine sur des structures réelles².

II) Analyse plastique

Dans l'analyse plastique et la conception d'une structure, la charge ultime de la structure dans son ensemble est considérée comme le critère de conception. Le terme plastique est apparu du fait que la charge ultime provient de la résistance de l'acier à l'état plastique. Cette méthode est rapide et fournit une approche rationnelle pour l'analyse de la structure. Elle offre également une économie impressionnante en ce qui concerne le poids de l'acier car les sections requises par cette méthode sont plus petites en taille que celles requises par la méthode d'analyse élastique.

III) Principes de vérification d'une structure

Lorsqu'une structure est vérifiée selon un règlement de calcul en élasticité, on est amené à contrôler que sous les différentes combinaisons de charges :

- La contrainte limite élastique n'est pas dépassée en aucun point de la structure.
- Les déformations (sous charges non pondérées) restent acceptables.
- Aucune instabilité (locale ou globale) ne se produit.
- La capacité de résistance des assemblages n'est pas dépassée.
- Des ruptures par fatigue n'apparaissent pas.

Si nous étudions ces cinq points, nous constatons que le non-respect des critères 2, 3, 4 et 5 entraîne une mise hors service de la structure. Par contre dans le cas de calcul plastique, la structure possède toujours une réserve de résistance plus au moins importante lorsqu'en une section la contrainte devient égale à la contrainte limite élastique (cette réserve de résistance varie avec le degré d'hyperstaticité de la structure).

Les nouvelles approches font donc intervenir la résistance maximale de la structure et effectuent un calcul de ruine.

La ruine de toute structure intervient dès que le chargement atteint ou dépasse une valeur limite qui est la charge de ruine. On doit donc déterminer cette charge de ruine et par conséquent étudier le comportement de la structure, au-delà surtout des limites du domaine élastique. Ce comportement dépendra aussi des caractéristiques du matériau utilisé (On doit

² Analyse des structures et milieux continus : mécanique des structures, François Frey

tout d'abord étudier le comportement du matériau utilisé dans la structure, dans notre cas l'acier).

En résumé une analyse non linéaire judicieusement menée peut à la fois améliorer la sécurité de la structure et réduire son coût.

IV) Problématique

Lorsque les sollicitations dans une structure sont calculées à l'aide d'une analyse globale élastique, il convient de considérer que le matériau a un comportement linéaire quel que soit le niveau de contrainte.

Cependant la structure possèdera toujours une réserve de résistance plus ou moins importante lorsqu'en une de ses sections la contrainte devient égale à la contrainte limite élastique (cette réserve de résistance varie avec le degré d'hyperstaticité de la structure).

L'analyse globale plastique fait intervenir la résistance maximale de la structure. La ruine de la structure interviendra dès que le chargement atteint ou dépasse une valeur limite qui est la charge de ruine. On doit donc déterminer cette charge de ruine et par conséquent étudier le comportement de la structure, au delà des limites du domaine élastique. Ce comportement dépendra aussi des caractéristiques du matériau utilisé.

V) Objectifs de la recherche

Les objectifs assignés au présent mémoire peuvent être classés comme suit :

- Développement d'une approche analytique permettant d'étudier le comportement élasto-plastique des poutres simplement appuyée (soumises à des charges verticales appliquées au milieu de la portée), de section transversale en IPE.
- Développement d'un modèle numérique dans le domaine non-linéaire en utilisant le logiciel CAST3M.
- Validation du modèle numérique développé avec l'approche analytique.
- Déterminer les charges ultimes de différentes poutres à la base du modèle numérique pour le début de plastification des sections et la plastification totale de rotule plastique.

VI) Structure du mémoire

Le plan du mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre présente une revue générale sur les principales études et recherches consacrées aux problèmes des poutres métalliques dans le domaine élasto- plastique.

Le deuxième chapitre de cette recherche consiste sur un développement d'une approche analytique permettant d'étudier le comportement élasto-plastique, ainsi de déduire la charge ultime des poutres simplement appuyées de section transversale en IPE soumises à des charges verticales appliquées au milieu de la poutre.

Le troisième chapitre expose la modélisation des poutres métalliques et le choix d'élément en utilisant le logiciel (Cast3m) basé sur la méthode des éléments finis. En outre, on donne un aperçu sur la présentation de cet outil de calcul.

Le chapitre quatre est réservé pour une analyse numérique à l'état élasto-plastique permettant le calcul de la charge ultime, en exploitant le modèle numérique validé dans le chapitre précédent.

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

Chapitre 1

Revue de la littérature

I) 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.

II) Historique

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

1) 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.

2) 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.

3) 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 ».

III) Travaux de recherches menées sur la plasticité des structures.

En 1998, Seung-EockKim et Wai-FahChen¹ 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 KinIn² 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

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

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, Boris Štok et Miroslav Halilović ont effectué analyse¹ 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 Wanji² ont présenté une solution analytique en théorie élasto-plastique de contrainte pour les poutres en flexion pure sous petite déformation. Cette

¹ B. Štok et M. Halilović 2009 "Analytical solutions in élasto-plastic bending of beams with rectangular cross section", Applied Mathematical Modelling, Volume 33, Issue 3, Pages 1749-1760

² 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

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.Zeng¹ 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. 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

¹ Y.WenQ et Y.Zeng 2010 “ A novel approach to elasto-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

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 plastiques¹, 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 YingWu² ont présenté dans un travail de recherche l'aspect théorique et la mise en œuvre numérique de nouveaux éléments finis dotés de rotules plastiques encastées 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 encastée, 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 établie. 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

¹ M.Grigroriana et C.Grigrorianb 2012 “ Recent developments in plastic design analysis of steel moment frames” , Journal of Constructional Steel Research, Volume 76, Pages 83-92

² 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

élastique, les degrés de liberté supplémentaires ou la concentration statique au niveau de l'élément comme dans le modèle de rotule encastrée. 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 ¹ 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.

¹D. 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

IV) Conclusion.

Dans ce chapitre une présentation chronologique des études menées sur la plasticité des structures (poutres et portiques) en l'occurrence la formation de la rotule plastique, a été présentée.

Le chapitre qui suit est consacré sur le développement d'une approche analytique permettant d'estimer la charge ultime des poutres métalliques de section en IPE. Ainsi des modèles éléments finis ont été décrits afin de mener une analyse numérique dans le domaine non linéaire.

Chapitre 2

Développement de l'expression analytique de la charge ultime

I) Introduction.

Ce chapitre est consacré au développement d'une approche analytique permettant le calcul de la charge ultime des poutres métalliques fabriquées en profilé IPE. Ce développement est basé sur l'étude de l'évolution élasto-plastique de ces poutres¹. La loi de comportement élasto-plastique est obtenue à partir de deux modèles ; le premier correspond à la loi en flexion pure (moment de flexion constant) et le deuxième correspond à la loi en cisaillement pure. L'application de cette loi en flexion simple nous amène à introduire la notion de rotule plastique.

II) Loi de comportement élasto – plastique.

Notre objectif est donc d'exprimer la loi de comportement élasto-plastique en fonction de la loi de comportement du matériau.

Pour simplifier la présentation nous supposons le matériau élasto-plastique parfait. La courbe d'écroutissage du matériau identifiée par un essai de traction est représentée ci-après (module d'élasticité E , limite en traction σ_e).

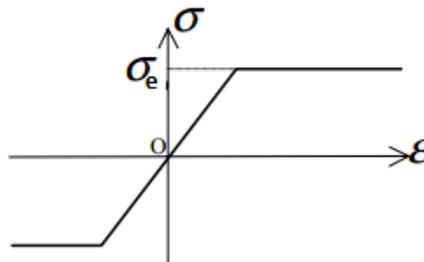


Fig. 1 Diagramme de comportement élastique-plastique

La formation de la rotule plastique correspond au diagramme bi-rectangulaire de contraintes pour une section de forme quelconque. La section étant entièrement plastifiée, les contraintes sont égales à la limite d'écoulement σ_e sur toute sa hauteur (figure 2).

¹ Chakeur. K et Bessas. L « Etude de comportement élasto-plastique des poutres métalliques en flexion simple : développement d'une approche analytique et simulation numérique », mémoire de Master en Génie Civil option Structures, juin 2018.'

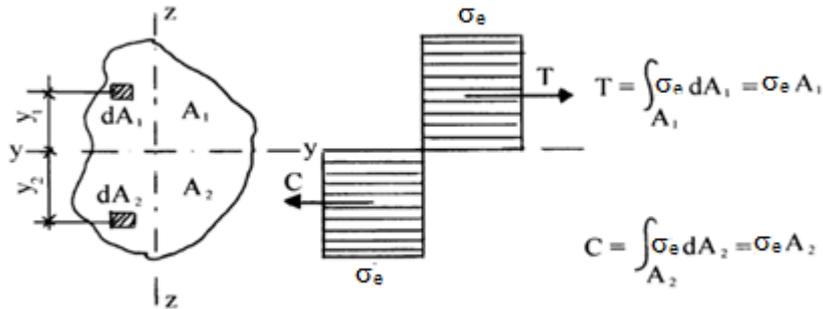


Fig. 2 Répartition des contraintes dans une section plastifiée

Dans le cas où la section est entièrement plastifiée sur toute sa hauteur, la contrainte vaut $+\sigma_e$ dans la partie supérieure de la section et $-\sigma_e$ dans la partie inférieure de la section. Le moment de résistance de la section qui est le moment plastique M_p est égal à:

$$M_p = \int y_1 \sigma_e dA_1 + \int y_2 \sigma_e dA_2 = \sigma_e (\int y_1 dA_1 + \int y_2 dA_2)$$

Les intégrales représentant les moments statique de chaque demi-section, on peut donc réécrire l'expression pour le moment plastique

$$M_p = \sigma_e (S_1 + S_2) = \sigma_e W_p$$

Où W_p qui est la somme des moments statiques de chaque demi-section par rapport à l'axe des aires égales est appelé le module de résistance plastique de la section.

Habituellement, une rotule plastique doit également transmettre une force transversale. Cela signifie que dans la section transversale, en plus des contraintes normales, des contraintes de cisaillement sont présentes.

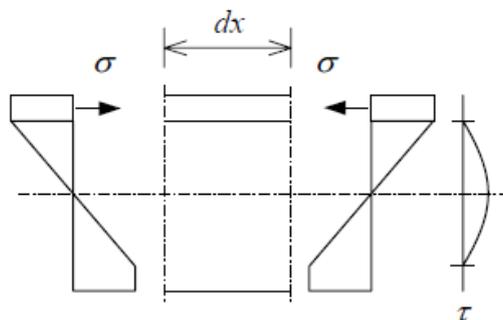


Fig. 3 Phase élasto-plastique de flexion et de cisaillement.

Par conséquent, les contraintes de cisaillement générées par la force transversale ne sont présentes que dans la partie de la section transversale autour de la ligne neutre, qui est la zone où les contraintes de flexion n'ont pas encore atteint la valeur de la limite d'écoulement σ_e .

1) Loi en flexion pure.

Il y a évolution élasto-plastique du matériau à partir des fibres extérieures. Le moment étant uniforme sur la longueur, dans toute section de la poutre, nous obtenons l'état de contrainte représenté ci-dessous.

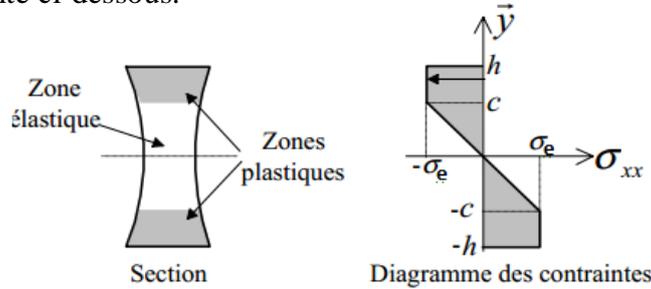


Fig. 4 État de contrainte en flexion

Le matériau étant supposé élasto-plastique parfait au-delà de la cote « c » la contrainte dans la zone plastique est uniforme $\sigma_{xx} = \pm\sigma_e$. Conservons l'hypothèse de Bernoulli pour exprimer h et c en fonction des variables (E, χ) et σ_e .

$$\sigma_{xx} = -\sigma_e$$

$$\sigma_{xx} = -\frac{M}{I} \cdot y = E\epsilon_{xx} \quad \rightarrow \quad -\frac{M}{EI} \cdot y = \epsilon_{xx}$$

Posons,

$$\chi = \frac{M}{EI} \quad \rightarrow \quad \sigma_{xx} = E\epsilon_{xx} = -Ey\chi$$

début de plastification: $y = h \quad \rightarrow \quad h = \frac{\sigma_e}{E\chi_e}$

plastification au dela: $y = c \quad \rightarrow \quad c = \frac{\sigma_e}{E\chi}$

La loi de comportement élasto-plastique $M_f = f(\chi)$ est obtenue en fonction du module d'élasticité E et de limite en traction σ_e :

$$M = M_f = \sigma_e \left(\frac{I(c)}{c} + Z(h) - Z(c) \right)$$

Notons respectivement le moment quadratique de la zone élastique I (c), le moment statique de la zone élastique Z(c) et le moment statique de la section Z(h) :

$$I(c) = 2 \int_0^c y^2 dS$$

$$Z(c) = 2 \int_0^c y dS$$

$$Z(h) = 2 \int_0^h y dS$$

Il est donc possible de modéliser, pour un chargement monotone, le comportement élasto plastique d'une poutre soumise à un moment de flexion uniforme sur sa longueur. Ce modèle construit sur les hypothèses de Bernoulli en élasticité, suppose que les déformations plastiques les respectent aussi.

Etudions la loi de comportement élasto-plastique ($M_f = f(\chi)$) pour le cas d'une section en double T.

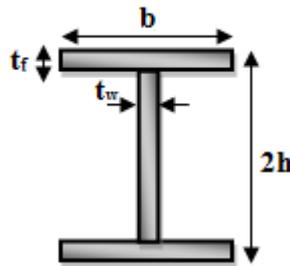


Fig. 5 Section en double T

$$I(h) = \frac{2}{3} t_w \cdot h^3 + 2bt_f h^2 - 2t_w t_f h^2$$

$$I(c) = \frac{2}{3} t_w \cdot c^3 + 2bt_f c^2 - 2t_w t_f c^2$$

$$\frac{I(c)}{c} = \frac{2}{3} t_w \cdot c^2 + 2bt_f c - 2t_w t_f c$$

$$w_p = Z(h) = t_w \cdot h^2 + 2bt_f h - 2t_w t_f h$$

$$Z(c) = t_w \cdot c^2 + 2bt_f h - 2t_w t_f h$$

$$M = \sigma_e \left(-\frac{1}{3} t_w c^2 + t_w \cdot h^2 + 2bt_f h - 2t_w t_f h \right)$$

On sait que :

$$c = h \frac{\chi_e}{\chi}$$

$$M = \sigma_e \left(-\frac{1}{3} t_w h^2 \left(\frac{\chi_e}{\chi} \right)^2 + t_w \cdot h^2 + 2bt_f h - 2t_w t_f h \right)$$

$$M = \sigma_e \left(-\frac{1}{3} t_w h^2 \left(\frac{\chi_e}{\chi} \right)^2 + w_p \right)$$

$$M = M_p - \sigma_e \frac{t_w h^2}{3} \left(\frac{\chi_e}{\chi} \right)^2$$

En pratique, il est rare d'obtenir un état de contrainte constant par morceaux. Cela signifie que les zones plastiques sont réduites à des sections dont la position évolue au cours du chargement.

Étudions le cas d'une poutre sur deux appuis chargée en son centre par une force supposée ponctuelle.

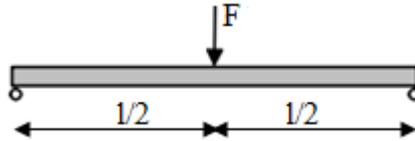


Fig. 6 Poutre chargée à mi-portée

Le diagramme du moment de flexion est représenté sur la figure ci-dessous. Les zones plastiques apparaissent dans la section $x = l/2$ où le moment est maximal. Puis les zones plastiques s'étendent aux sections voisines avec l'augmentation du chargement.

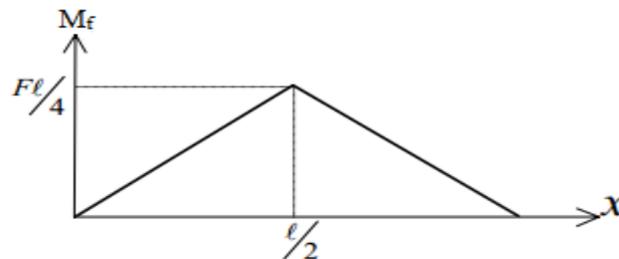


Fig. 7 Diagramme du moment fléchissant

-Modélisation : Pour étudier l'évolution élasto-plastique nous adoptons la loi de comportement élasto-plastique obtenue en flexion pure. De ce fait nous négligeons les effets de l'effort tranchant dans la zone plastique.

Le début de la phase élasto-plastique correspond à : $F_e = 4 \frac{M_e}{l}$

La section $x = l/2$ est complètement plastifiée pour $F_p = 4 \frac{M_p}{l}$

La figure 8 représente l'évolution de la zone plastique selon les phases du chargement

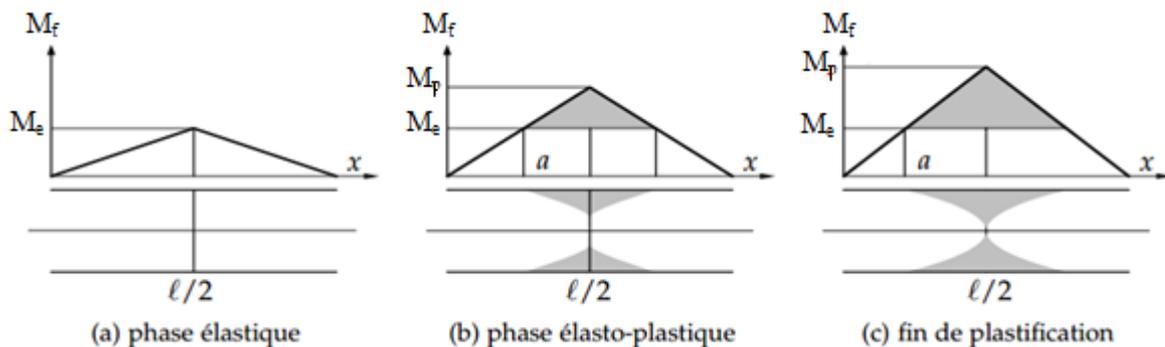


Fig. 8 Evolution des zones de plastification en flexion simple

-Étude de la zone plastique : L'abscisse de la première section plastifiée est simple à exprimer :

$$a = 2 \frac{M_e}{F}$$

La forme de cette zone est définie par la cote « c » avec :

$$c = \frac{\sigma_e}{E\chi}$$

La figure ci-dessous représente la zone plastique qui est limitée par une parabole d'équation $c(x)$ définie pour $F_e < F \leq F_p$.

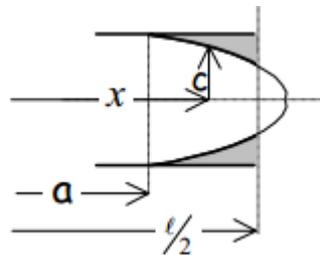


Fig. 9 Zone plastique en flexion simple

posons:

$$\alpha = h \sqrt{\frac{t_w}{W_p}}$$

$$\chi = \alpha \frac{\chi_e}{\sqrt{3 \left(1 - \frac{M}{M_p}\right)}} \quad \rightarrow \quad c = \frac{\sigma_e}{\alpha E \chi_e} \sqrt{3 \left(1 - \frac{M}{M_p}\right)}$$

$$\rightarrow c = \frac{h}{\alpha} \sqrt{3 \left(1 - \frac{F \cdot x}{2 \cdot M_p}\right)}$$

or

$$F_p = 4 \frac{M_p}{l}$$

$$\rightarrow c(x) = \frac{h}{\alpha} \sqrt{3 \left(1 - \frac{2 \cdot F \cdot x}{F_p \cdot l}\right)}$$

-Étude de la déformation en zone élasto-plastique ($a \leq x \leq l/2$) :

$$\chi = \alpha \frac{\chi_e}{\sqrt{3 \left(1 - \frac{M}{M_p}\right)}}$$

2) **Loi en cisaillement pure.**

En absence de la contrainte normale σ , la valeur ultime de la contrainte tangentielle τ_e est donnée par la relation :

$$\tau_e = \frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

Supposons une poutre d'une section en double Te ($t_w \cdot h_a$) et d'une longueur L, soumise à l'effet d'une charge concentrée à mi- portée. L'état de contrainte en cisaillement pur peut être représenté comme l'indique la figure10.

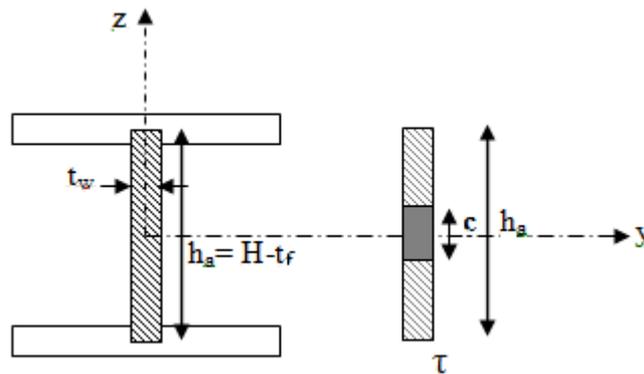


Fig. 10 État de contrainte en cisaillement

La contrainte tangentielle τ de cette poutre est donnée par :

$$\tau_e = \frac{T_e}{t_w z} \rightarrow T_e = \tau_e t_w z$$

$$T_p = \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w h_a$$

$$T = \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w c$$

$$\frac{T}{T_p} = \frac{c}{h_a}$$

Or,

$$T = \frac{F}{2} = \frac{2M}{L} = \frac{M}{M_p} \cdot \frac{2M_p}{L}$$

$$M_p = f_y t_w \frac{h_a^2}{4} \quad \text{et} \quad T_p = \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w h_a$$

D'où ;

$$\frac{T}{T_p} = \frac{M}{M_p} \cdot \frac{2M_p}{LT_p} = \frac{M}{M_p} \cdot \frac{\sqrt{3}h_a}{2L} = \frac{c}{h_a}$$

Donc ;

$$\frac{M}{M_p} = \frac{2L}{\sqrt{3}h_a} \frac{c}{h_a}$$

Sachant que ;

$$\frac{\chi_e}{\chi} = \frac{c}{h_a}$$

$$\frac{M}{M_p} = \alpha' \frac{\chi_e}{\chi} \quad (\text{avec } \alpha' = \frac{2L}{\sqrt{3}h_a} = 1.15 \frac{L}{h_a})$$

$$M = M_p \alpha' \frac{\chi_e}{\chi}$$

D'où,

$$\chi = \alpha' \cdot \chi_e \frac{M_p}{M}$$

III) Expression de la flèche :

Pour obtenir l'expression de la flèche il faut intégrer les relations qui définissent la courbure en fonction de x.

D'où la courbure ce n'est que l'équation différentielle suivante :

$$\chi = \frac{M}{EI} = \frac{d^2y}{dx^2} = v_{,x^2}$$

En intégrant une première fois, on obtient l'équation de l'angle de rotation

$$\theta(x) = \frac{dy}{dx} = \int \frac{M(x)}{EI} dx + C_1$$

En intégrant une seconde fois, il vient

$$y(x) = \int \left[\int \frac{M(x)}{EI} dx + C_1 \right] dx + C_2$$

Où C1 et C2 sont les constantes d'intégration à déterminer à partir des conditions aux limites.

Il faut noter que dans le cas des poutres ayant plusieurs tronçons dont chacun possède sa propre équation du moment, il faut substituer l'expression de M dans chacune des équations différentielles et procéder à l'intégration. Les constantes d'intégration dans ce cas sont déterminées en utilisant les conditions aux appuis des extrémités de la poutre et aux conditions de continuité aux limites des tronçons.

1) Cas de flexion

a) Zone élastique ($x \leq a$)

$$y(x) = \chi_e \left[\frac{1}{6a} x^3 + a \left(\alpha \left(0.8 \sqrt{3 - \frac{1.3l}{a} - \frac{1}{2}} \right) - \frac{1}{2} \right) x \right]$$

b) Zone plastique ($a \leq x \leq l/2$)

$$y(x) = \chi_e \left[0.2a^2 \left(\sqrt[3]{3 - \frac{2.6}{a} x} \right) + 0.8\alpha a \left(\sqrt{3 - \frac{1.3l}{a}} x - a^2(0.5\alpha + 0.38) \right) \right]$$

2) Cas de cisaillement

a) Zone élastique ($x \leq a$)

$$y(x) = \chi_e \left[\frac{1}{6a} x^3 + \left(\frac{3}{2} a\alpha' \left(\ln(a) - \ln\left(\frac{L}{2}\right) \right) - \frac{a}{2} \right) x \right]$$

b) Zone plastique ($a \leq x \leq l/2$)

$$y(x) = \chi_e \left[\frac{3}{2} a\alpha' \left(\ln(x) - \ln\left(\frac{L}{2}\right) - 1 \right) x + a^2 \left(\frac{3}{2} \alpha' - \frac{1}{3} \right) \right]$$

IV) Facteur de forme (f) :

f est un rapport $M_p/M_e (= w_p/w_e)$ qui représente le facteur de forme plastique de la section (Gain dû à la plasticité dans la section). Ce rapport caractérise la réserve vis à vis de la plastification totale d'une section donnée. Plus ce rapport est grand, plus grande est la phase élasto-plastique, autrement dit, un rapport élevé confère une plus grande sécurité par rapport au chargement élastique limite.

a- Pour le cas d'une section en double T :

$$f=1.15$$

b- Pour le cas d'une section rectangulaire :

$$f=1.5$$

V) Évolution de la flèche en phase plastique :

L'évolution de la flèche au milieu de la poutre en phase plastique ($F = F_p$) est donnée par l'expression suivante :

a) **Cas de flexion**

$$\alpha = 2 \frac{M_e}{F_p} = 2 \frac{M_e}{4M_p} l = \frac{l M_e}{2 M_p} = \frac{l}{2 f} = \frac{l}{2.3}$$

$$y\left(\frac{l}{2}\right) = \chi_e [-0.19l^2](0.5\alpha + 0.38) = \frac{M^{max}}{EI_I} [-0.19l^2](0.5\alpha + 0.38)$$

Or,

$$M^{max} = \frac{Fl}{4}$$

D'où,

$$y\left(\frac{l}{2}\right) = \left[-\frac{5}{105} (0.5\alpha + 0.38) \frac{Fl^3}{EI_I} \right]$$

Le début de plastification (formation de la première rotule plastique) se produit pour $c = h$, là où on retrouve M_e (moment de début de plastification) correspondant à ($a = l/2.3$) c'est-à-dire pour ($x \leq a$) ; d'où l'expression de la flèche correspondante est :

$$v(x) = \chi_e \left[\frac{1}{6a} x^3 + a \left(\alpha \left(0.8 \sqrt{3 - \frac{1.3l}{a} - \frac{1}{2}} \right) - \frac{1}{2} \right) x \right]$$

On sait que :

$$\chi_e = \frac{\sigma_e}{Eh}$$

D'où,

$$v(x) = \frac{\sigma_e}{Eh} \left[\frac{x^3}{2.6l} - (0.22\alpha + 0.22)x \right]$$

Or, la flèche maximale est :

$$v\left(\frac{l}{2}\right) = -\frac{(0.11\alpha + 0.062)l^2}{Eh} \sigma_e$$

b) Cas de cisaillement

$$a = 2 \frac{M_e}{F_p} = 2 \frac{M_e}{4M_p} l = \frac{l}{2} \frac{M_e}{M_p} = \frac{l}{2} \frac{1}{f} = \frac{l}{3}$$

$$y\left(\frac{l}{2}\right) = \chi_e \left[-\frac{l^2}{108} (9\alpha' + 4) \right] = \frac{M^{max}}{EI_a} \left[-\frac{l^2}{108} (9\alpha' + 4) \right]$$

Or,

$$M^{max} = \frac{Fl}{4}$$

D'où,

$$y\left(\frac{l}{2}\right) = -\frac{Fl^3}{432EI_a} (9\alpha' + 4)$$

Le début de plastification (formation de la première rotule plastique) se produit pour $c = h$, là où on retrouve M_e (moment de début de plastification) correspondant à ($a = l/3$) c'est-à-dire pour ($x \leq a$) ; d'où l'expression de la flèche correspondante est :

$$y(x) = \chi_e \left[\frac{1}{6a} x^3 + \left(\frac{3}{2} a\alpha' \left(\ln(a) - \ln\left(\frac{L}{2}\right) \right) - \frac{a}{2} \right) x \right]$$

On sait que :

$$\chi_e = \frac{\sigma_e}{E \frac{h_a}{2}} \quad \text{et} \quad a = \frac{L}{3}$$

D'où,

$$v(x) = \frac{\sigma_e}{E \frac{h_a}{2}} \left[\frac{x^3}{2l} + \frac{l}{2} x \right]$$

Or, la flèche maximale est :

$$v\left(\frac{l}{2}\right) = -(0,2\alpha' + 0,042) \frac{l^2}{Eh_a} \sigma_e$$

VI) Charge ultime :

Afin de déterminer l'expression de la charge ultime correspondante à une poutre métallique fabriquée en profilé IPE, une identification a été faite entre l'expression de la flèche obtenue en phase plastique et l'expression de la flèche correspondante au début de la plastification.

a) Cas de flexion

$$F_{uM} = \frac{(0.11\alpha + 0.062) I_I}{0.0238\alpha + 0.018 l. h} \sigma_e$$

b) Cas de cisaillement

$$F_{uT} = \frac{(0.2\alpha' + 0.042) I_a}{0.021\alpha' + 0.009 l. h_a} \sigma_e$$

D'où, la charge ultime totale F_U d'une poutre métallique fabriquée en profilé IPE, due à la flexion et au cisaillement est donnée par l'expression suivante :

$$F_u = F_{uM} + F_{uT}$$

VII) Conclusions

Dans ce chapitre, un modèle analytique a été développé ci-dessus afin de prédire le comportement d'une poutre métallique dans le domaine élasto-plastique.

Ce modèle est basé sur l'étude de la flèche totale à l'état non-linéaire dont le but de déterminer la charge ultime d'une telle poutre métallique fabriquée en profilé IPE, soumise à l'effet d'une charge transversale concentrée à mi portée.

Les résultats obtenus par la méthode analytique seront comparées avec les résultats obtenus numériquement (voir chap.4).

Nous allons donc, dans le chapitre (chap.3) suivant apporter une attention particulière au choix du maillage et des lois de comportement afin de pouvoir élaborer un modèle numérique fiable, représentatif de la réalité et suffisamment souple pour le calcul de la charge ultime des poutres métalliques fabriquée en profilé IPE.

Chapitre 3

Modélisation mécanique Par Éléments finis

I) Introduction :

Le problème mécanique que pose la réalité quotidienne concerne des corps, au temps le dire, qui n'ont jamais des formes simples et pour les quelles 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 prouver l'efficacité du logiciel utilisé (Cast3m) pour un tel calcul mécanique non linéaire. Dans ce chapitre nous allons commencer par une présentation générale du logiciel en donnant un aperçu global sur l'organisation d'un calcul mécanique (mené sur ce logiciel), ensuite nous exposons la modélisation par éléments finis afin d'estimer le comportement mécanique d'une poutre métallique dans le domaine non-linéaire.

II) Présentation du logiciel :

1) Introduction :

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

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

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

2) Environnement et langage :

Le logiciel Cast3m fonctionne sur tout ordinateur PC ou compatible utilisant types de Windows. Afin de convertir les informations en entités informatiques par le programme, il faut disposer d'une interface. C'est le langage GIBIANE qui va permettre de communiquer directement avec le programme.

3) Organisation d'un calcul :

a) 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 1:

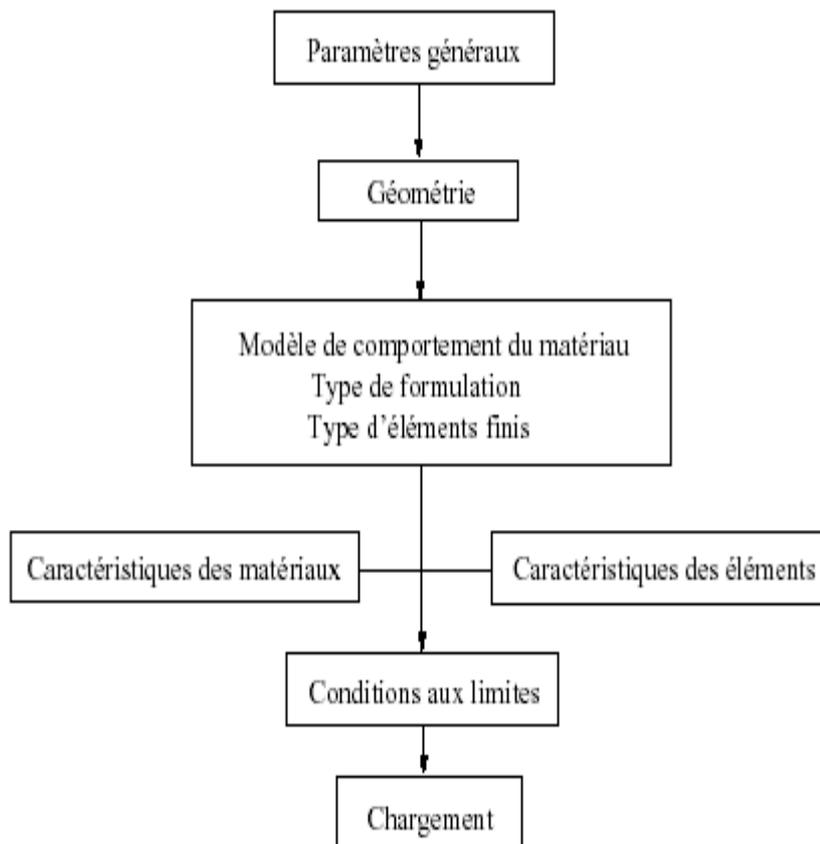


Fig 1: Organigramme du modèle de calcul.

- 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.

b) Résolution du système d'équations :

Une fois réalisée la préparation du modèle de calcul, on peut constituer le système $\overline{\overline{M}} \cdot \overline{\overline{u}} + \overline{\overline{C}} \cdot \overline{\overline{u}} + \overline{\overline{K}} \cdot \overline{\overline{u}} = \overline{\overline{F}}$ et le résoudre. Il faut donc dans un premier temps calculer les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité.

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

Pour une analyse modale (calcul des modes propres), le système à résoudre devient : $\overline{\overline{K}} - \omega^2 \overline{\overline{M}} = 0$.

c) 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 Fig 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.

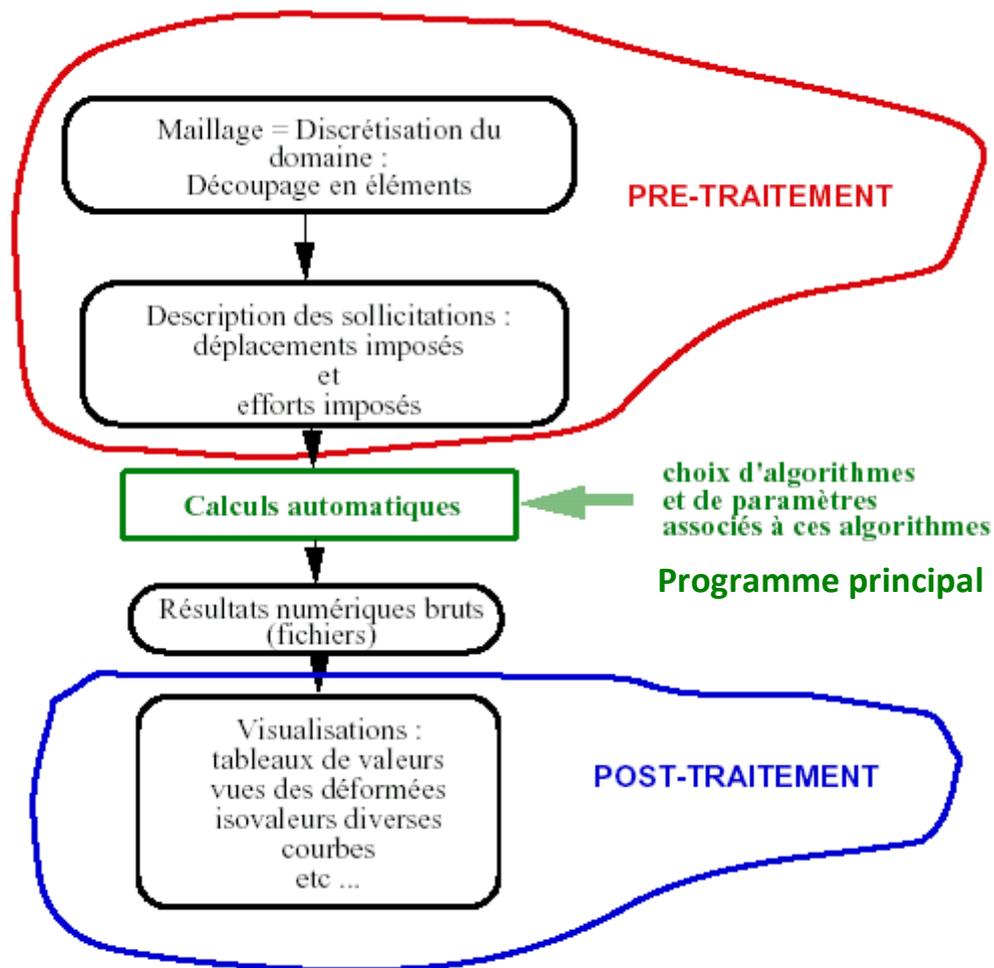


Fig 2 : Noyau de calcul, pré et post traitements

III) Modélisation par éléments finis :

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) Modèle géométrique (Développement d'un modèle numérique)

Le maillage de la poutre métallique du modèle Cast3M est réalisé avec des éléments en trois dimensions (3D) de type coque mince à 4 nœuds COQ4.

Les parois (métalliques) des poutres et de la colonne sont modélisées à l'aide d'éléments coques. Les sections droites sont modélisées en plaçant les éléments coques à la fibre moyenne de chaque plat formant la section (voir figure 3).

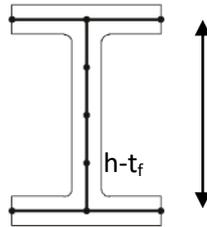


Fig 3 Modélisation des sections métalliques en COQ4

3) Modèles de comportement du matériau

Le matériau acier est modélisé à l'aide d'une loi de comportement de type bilinéaire élasto-plastique parfaite sans écrouissage (figure 4) 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 $\nu = 0.3$.

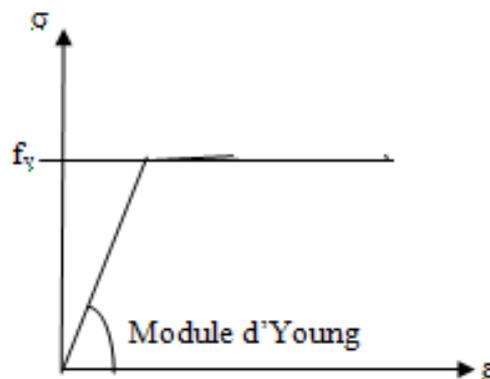


Fig 4 Loi de comportement de l'acier

4) 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. Par ailleurs, pour éviter un déversement de la poutre, un maintien latéral « continu » est appliqué le long de la jonction âme – semelle (supérieure et inférieure) en bloquant les déplacements latéraux au droit de l'âme.

Les efforts ponctuels 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 Cast3M1 [7].

IV) Validation du modèle numérique

Afin de confirmer la fiabilité du type d'élément fini (COQ4) à utiliser dans la modélisation, nous avons effectué deux analyses ; la première sur l'étude du comportement non linéaire à la base de l'évolution charge-déplacement d'une poutre métallique et la deuxième sur la détermination de la charge ultime de deux poutres métalliques.

La validation du modèle éléments finis repose sur les résultats d'essais expérimentaux évoqués en littérature^{2,3}, réalisés sur des poutres de section en double T, sollicitée en flexion par l'application d'une force transversale en milieu de travée.

- La première analyse est effectuée sur une poutre console en acier², de 6m fabriquée en HEA340, représentée sur la figure 5

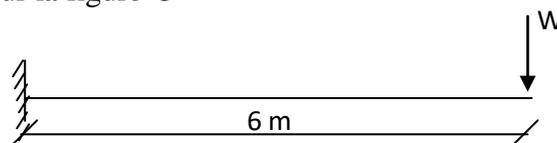


Fig 5 schémas statiques de la poutre en double T

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.

¹M.Grigroriana et C.Grigrorianb 2012 “ Recent developments in plastic design analysis of steel moment frames” , Journal of Constructional Steel Research, Volume 76, Pages 83-92

² Ehsan D., Sajad A. H, Fariborz M. T., Aastha G., Rasou M. “New Practical Approach to Plastic Analysis of Steel Structures” Periodica Polytechnica Civil Engineering 59(1), pp. 27–35, 2015

Ehsan Dehghani, Sajad A. Hamidi, Fariborz M. Tehrani, Aastha Goyal, Rasoul Mirghaderi.

³ Ahmed S. D. Al-Ridha ,1 Ali F. Atshan,2 Kamal Sh. Mahmoud,1 and Qusai Kh. Hameed3 “Effect of Strengthening of Steel Beams with Variable Length by Using Carbon Fiber” Journal of Engineering, Volume 2019, Article ID 1631692, August 2019

L'essai expérimental a été simulés 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 6.

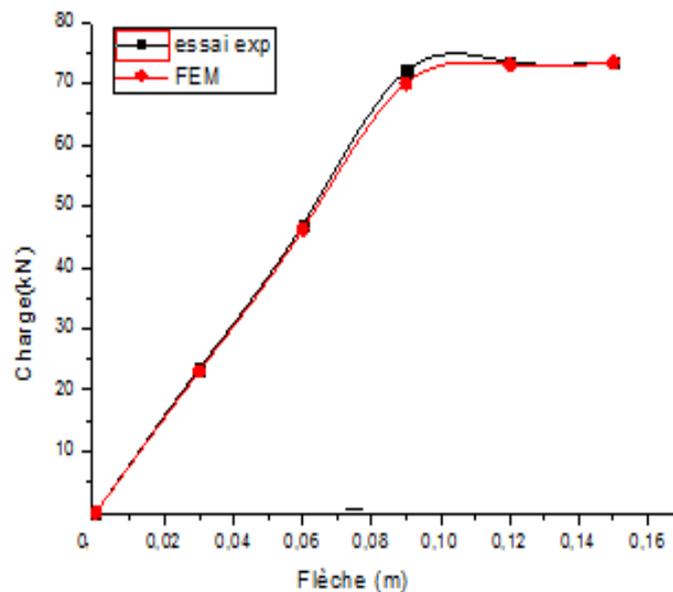


Fig 6 comparaisons des résultats d'une poutre à section en double T

D'après les deux courbes de la figure 6, il est à remarquer qu'un résultat comparable est obtenu entre la solution expérimentale et la solution numérique utilisant l'élément fini (COQ4).

La deuxième analyse est effectuée sur une comparaison entre les valeurs de la charge ultime obtenues numériquement en utilisant l'élément fini (COQ4) par rapport à celles obtenues expérimentalement (voir tableau2) de deux poutres simplement appuyées¹, soumises à une flexion 3 points où le chargement est introduit par un seul vérin hydraulique. Les valeurs mesurées de la limite d'élasticité et de la résistance ultime à la traction de l'acier sont $f_y = 250.106$ MPa et $f_u = 400.106$ MPa respectivement.

Les caractéristiques géométriques des deux poutres sont données dans le tableau1.

¹ Ahmed S. D. Al-Ridha ,1 Ali F. Atshan,2 Kamal Sh. Mahmoud,1 and Qusai Kh. Hameed3 "Effect of Strengthening of Steel Beams with Variable Length by Using Carbon Fiber" Journal of Engineering, Volume 2019, Article ID 1631692, August 2019

Dimensions	L	H	b _f	t _f	t _w	R
	(m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Poutre.1	1.4	100	55	5.7	4.1	7
Poutre.2	1.9					

Tableau 1. Caractéristiques géométriques des poutres de sections IPE

<i>Charge ultime</i>			
	Expérimentale	Numérique	Ecart %
	kN	kN	
Poutre.1	57.5	57.835	0.58
Poutre.2	45	44.623	0.84

Tableau 2. Valeurs de la charge ultime

D’après les résultats présentés dans le tableau 2, il est bien à remarquer qu’une bonne concordance est obtenue entre les valeurs numériques et expérimentales de la charge ultime avec un écart de différence en % d’ordre inférieur à 1%.

Ce type d’éléments fini (COQ4) est retenu dans la modélisation tridimensionnelle des poutres à sections en double T que nous allons étudier dans notre étude paramétrique.

v) Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par décrire le code de calcul Cast3m permettant d'étudier la flexion simple des poutres en élasto-plasticité par la méthode des éléments finis.

Grâce au modèle 3D, développé ci-haut en éléments finis coques minces à quatre nœuds (COQ4), décrits dans ce chapitre, nous avons pu mettre en évidence l'influence de la souplesse du support sur le comportement des poutres métallique de section en double T.

Après avoir validé le modèle numérique décrit ci-dessus avec les essais expérimentaux, des applications sont menées en vue d'une analyse numérique dans le domaine non linéaire afin de prédire la charge ultime de ce type de poutres métalliques

Chapitre 4

Analyse numérique

I) Introduction :

Dans le chapitre précédent nous avons donné une présentation générale du logiciel Cast3m. Nous avons aussi présélectionné l'élément finis convenables (coque à 4 nœuds « COQ4 » pour des sections IPE) afin de mener une étude paramétrique sur les poutres métalliques dans le domaine non-linéaire où nous allons tester ce code de calcul pour divers exemples.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord, valider ce modèle numérique (COQ4) avec l'approche analytique proposée ci-dessus afin de prouver la fiabilité de cette dernière pour l'étude de ce type de poutres métalliques dans le domaine non-linière, en suite, mener une étude paramétrique pour différents cas envisageables

Il s'agit de poutres métalliques à une seule portée de longueurs et sections (profilés en IPE) différentes.

Nous étudierons alors, des poutres isostatiques, chargées par une charge ponctuelle à mi-portée, il est à rappeler que dans le modèle numérique le chargement est réalisé par un déplacement imposé monotone croissant.

II) Calibrage du modèle analytique par rapport au modèle numérique :

Afin de prouver la fiabilité de l'approche analytique proposée dans le chapitre2, il a été question au cours de cette analyse de regarder l'effet du cisaillement dans les poutres métalliques de sections en profilé IPE, et de recueillir quelques informations utiles sur la prise en compte ou non de cet effet dans ce modèle analytique par le baie de l'élancement de la poutre caractérisé par le paramètre ($\lambda = H/L$).

Les caractéristiques géométriques des poutres sont données dans le tableau 1.

Section	H_t (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	r (mm)
IPE400	500	180	13.5	8.6	21
IPE500	500	200	16	10.2	21
IPE600	600	220	19	12	24

Tableau 1. Caractéristiques géométriques des poutres

A cet effet une comparaison est effectuée en premier lieu pour différentes portées en fonction de différentes sections en gardant la même nuance d'acier (S235).

La comparaison de résultats est établie dans les tableaux ci-dessous, entre la valeur obtenue par l'approche analytique proposée à celle obtenue par la solution numérique à partir de la courbe du comportement non-linéaire en utilisant le logiciel Cast3m.

IPE	λ	F_{UM}	F_{UT}	$F_{u_{th}}$	$F_{u_{ef}}$	$F_{UM} / F_{u_{ef}}$	$F_{u_{th}} / F_{u_{ef}}$
300	0.075	122.738	27.339	150.077	150.217	0.820	0.999
400	0.1	252.193	56.828	309.021	303.491	0.830	1.020
500	0.125	427.499	108.980	536.479	458.093	0.930	1.171
600	0.15	628.38	183.967	866.348	632.868	0.993	1.370

Tableau2. Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée $L = 4m$

IPE	λ	F_{UM}	F_{UT}	$F_{u_{th}}$	$F_{u_{ef}}$	$F_{UM} / F_{u_{ef}}$	$F_{u_{th}} / F_{u_{ef}}$
300	0.067	109.100	24.337	133.437	133.359	0.818	1.00
400	0.089	224.172	50.614	274.786	272.842	0.822	1.01
500	0.111	379.999	97.102	477.101	463.220	0.820	1.03
600	0.133	606.560	163.989	770.549	604.051	1.00	1.27

Tableau3. Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée $L = 4.5m$

IPE	λ	F_{UM}	F_{UT}	$F_{u_{th}}$	$F_{u_{ef}}$	$F_{UM} / F_{u_{ef}}$	$F_{u_{th}} / F_{u_{ef}}$
300	0.06	98.190	21.929	120.119	118.884	0.826	1.01
400	0.08	201.755	45.626	247.380	246.314	0.819	1.00
500	0.1	341.990	87.559	429.559	415.343	0.823	1.03
600	0.12	545.904	147.927	639.831	638.157	0.855	1.00

Tableau4. Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée $L = 5m$

D'après les résultats obtenus selon les tableaux ci-dessus, il est bien à remarquer que pour une valeur de l'élanement ($\lambda \geq 0.125$), la charge due à l'effet du cisaillement n'est pas prise en compte dans l'approche analytique proposée ; d'où une bonne concordance s'est obtenue entre les deux méthodes analytique et numérique.

En deuxième lieu, et en se basant sur le domaine d'application du modèle analytique, qui peut se résumer par la condition ($\lambda \geq 0.125$), une comparaison est effectuée pour différentes portées en fonction de différentes nuances en gardant uniquement la section (profilé en IPE600).

Portée	λ	F_{UM}	F_{UT}	$F_{u_{th}}$	$F_{u_{ef}}$	$F_{UM} / F_{u_{ef}}$	$F_{u_{th}} / F_{u_{ef}}$
4	0.15	628.38	183.967	866.348	632.868	0.993	1.370
4.5	0.133	606.560	163.989	770.549	633.051	1.00	1.27
5	0.12	545.904	147.927	639.831	638.157	0.855	1.00

Tableau5. Valeurs de la charge ultime d'une poutre de nuance S235

Portée	λ	F_{UM}	F_{UT}	$F_{u_{th}}$	$F_{u_{ef}}$	$F_{UM} / F_{u_{ef}}$	$F_{u_{th}} / F_{u_{ef}}$
4	0.15	798.530	215.281	10113.81	774,67	1.03	13.060
4.5	0.133	709.805	191.902	901.707	701.25	1.01	1.290
5	0.12	638.824	173.106	811.930	790,09	0.808	1.028

Tableau6. Valeurs de la charge ultime d'une poutre de nuance **S275**

Portée	λ	F_{UM}	F_{UT}	$F_{u_{th}}$	$F_{u_{ef}}$	$F_{UM} / F_{u_{ef}}$	$F_{u_{th}} / F_{u_{ef}}$
4	0.15	1030.83	277.908	1308.7	1010	1.02	1.29
4.5	0.133	916.293	247.728	1164.02	934.5	0.98	1.24
5	0.12	824.664	223.464	1048.13	1023.5	0.81	1.02

Tableau7. Valeurs de la charge ultime d'une poutre de nuance **S355**

Portée	λ	F_{UM}	F_{UT}	$F_{u_{th}}$	$F_{u_{ef}}$	$F_{UM} / F_{u_{ef}}$	$F_{u_{th}} / F_{u_{ef}}$
4	0.15	1335.72	360.107	1695.83	1308.64	1.02	1.30
4.5	0.133	1187.31	321	1508.31	1170,56	1.01	1.28
5	0.12	1068.58	289.559	1358.14	1307,85	0.82	1.04

Tableau8. Valeurs de la charge ultime d'une poutre de nuance **S460**

De même, d'après les résultats obtenus selon les tableaux ci-dessus, et en se basant sur la condition ($\lambda \geq 0.125$), il est à remarquer qu'un bon compromis est obtenu entre les deux méthodes analytique et numérique.

Pour une meilleure analyse sur le calibrage du modèle théorique par rapport au modèle numérique, nous illustrons l'allure du comportement non-linéaire obtenue numériquement comparée avec la valeur de la charge ultime obtenue théoriquement tout en respectant la condition de l'élanement ($\lambda \geq 0.125$).

A cet effet différents cas de configuration de poutres envisageables à savoir celles de différentes portées, fabriquées en différents profilés et de différentes nuances d'acier ont été illustrées selon les figures ci-dessous.

Dans ce paragraphe, une comparaison entre les deux méthodes analytique et numérique est effectuée selon les graphes représentés par les figures (1 à 12). Dans cette comparaison on fait garder la même nuance d'acier (S235) et on fait varier la portée pour différentes sections.

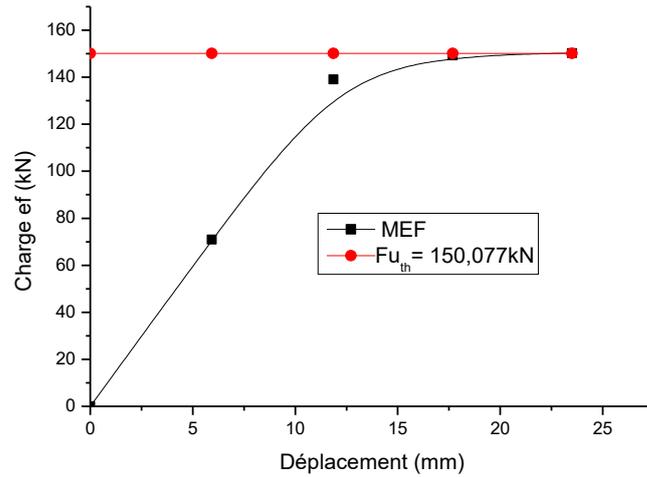


Fig.1 Poutres fabriquées en IPE300 de portée 4m

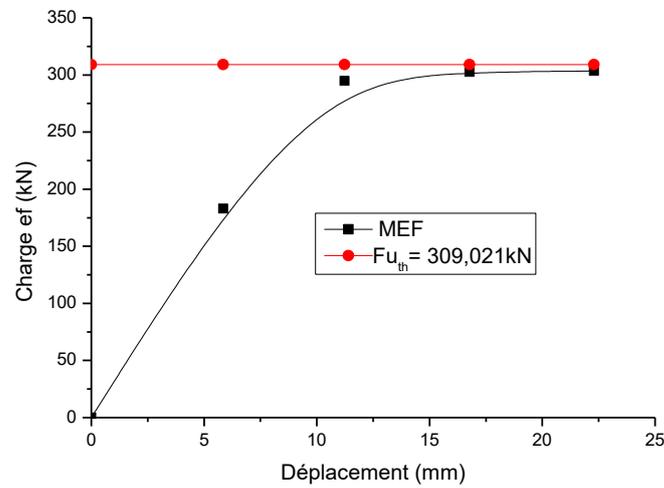


Fig.2 Poutres fabriquées en IPE400 de portée 4m

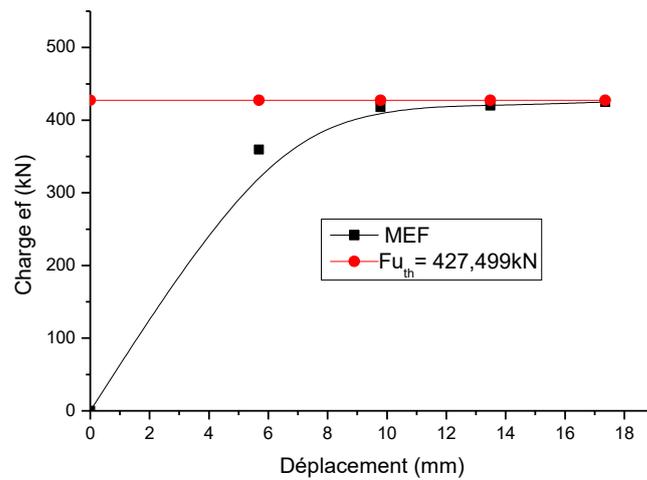


Fig.3 Poutres fabriquées en IPE500 de portée 4m

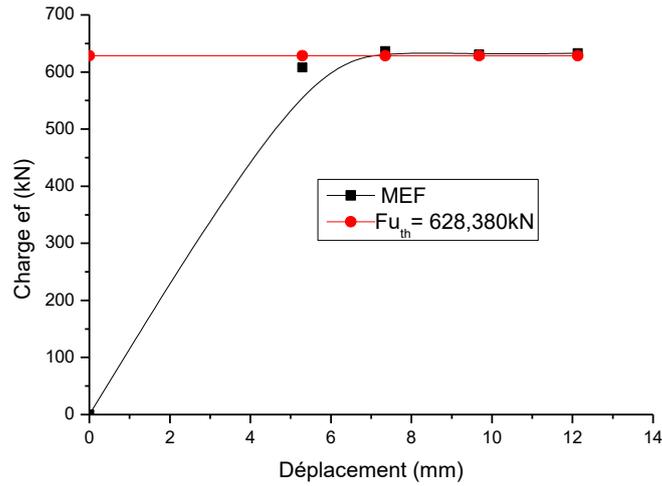


Fig.4 Poutres fabriquées en IPE600 de portée 4m

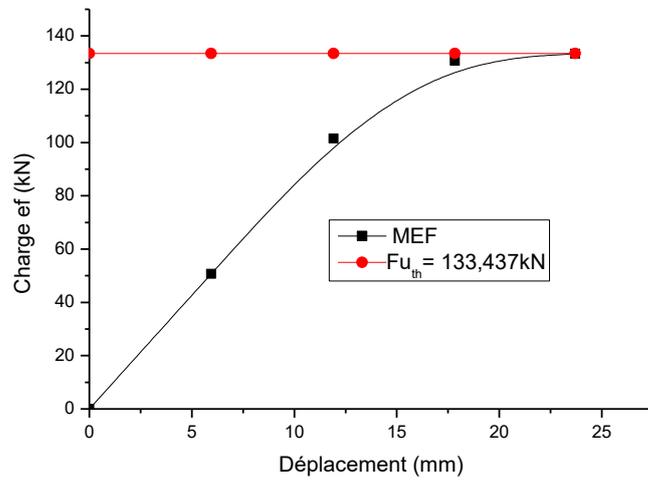


Fig.5 Poutres fabriquées en IPE300 de portée 4.5m

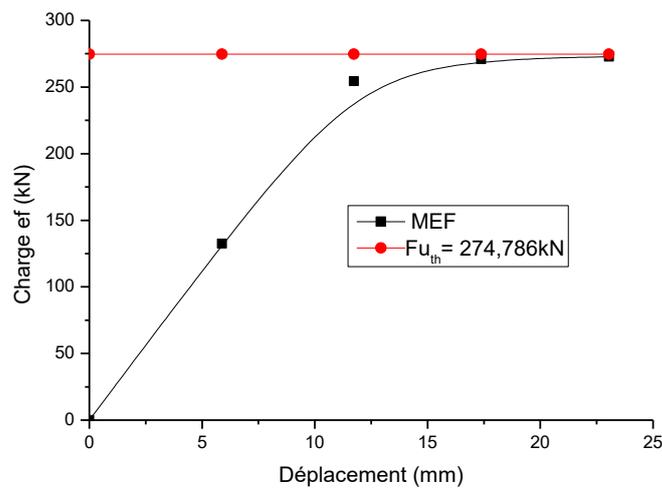


Fig.6 Poutres fabriquées en IPE400 de portée 4.5m

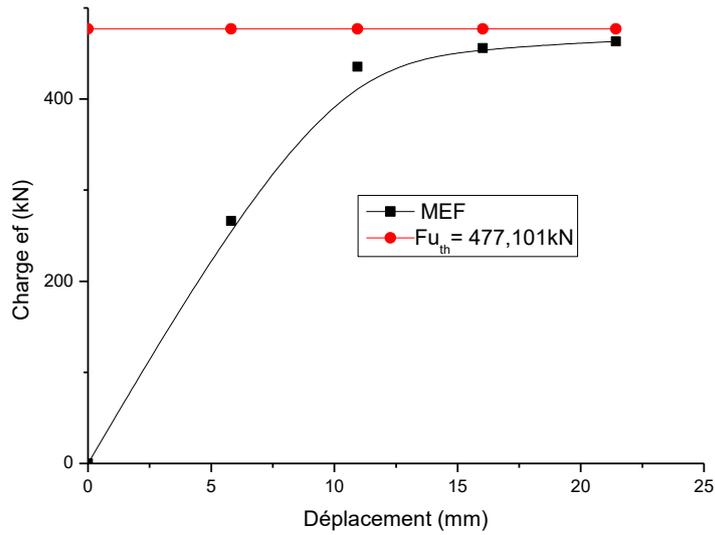


Fig.7 Poutres fabriquées en IPE500 de portée 4.5m

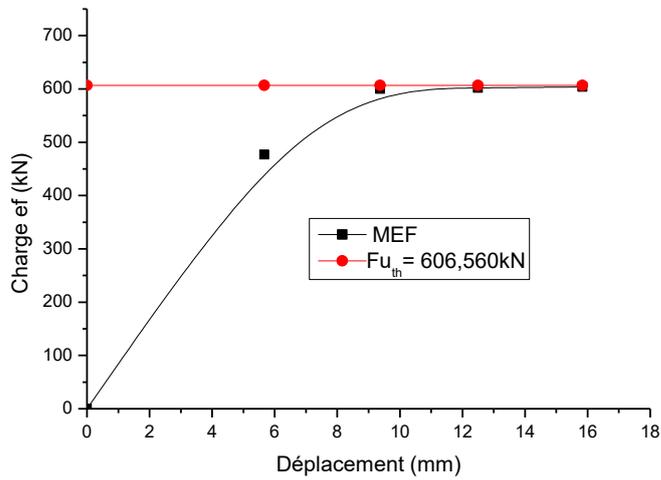


Fig.8 Poutres fabriquées en IPE600 de portée 4.5m

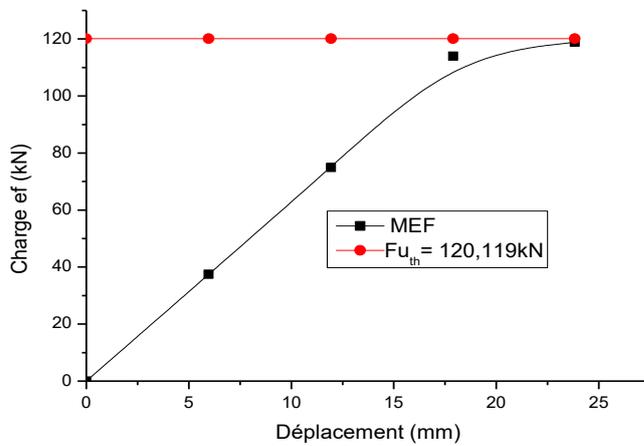


Fig.9 Poutres fabriquées en IPE300 de portée 5m

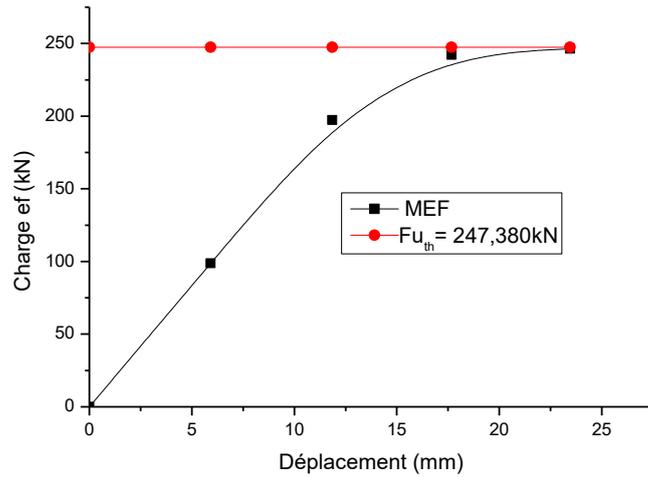


Fig.10 Poutres fabriquées en IPE400 de portée 5m

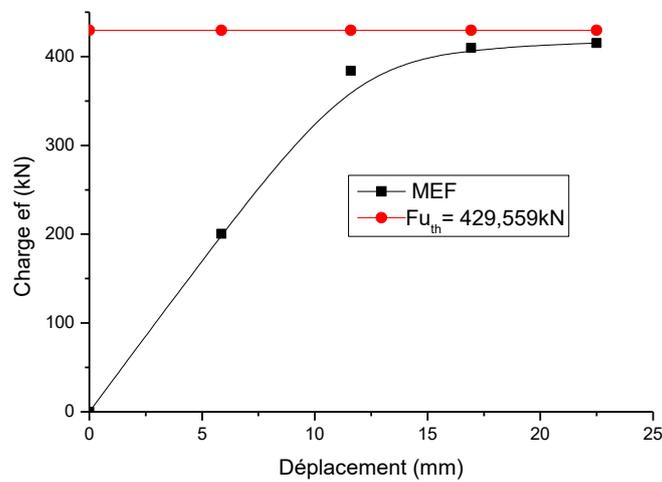


Fig.11 Poutres fabriquées en IPE500 de portée 5m

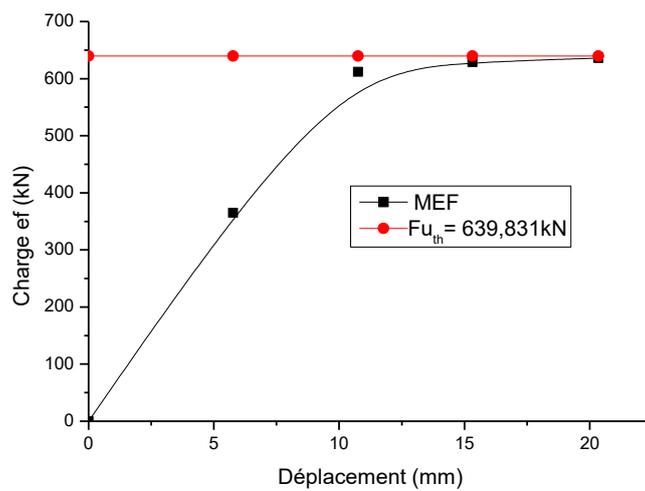


Fig.12 Poutres fabriquées en IPE600 de portée 5m

Un bon compromis est obtenu entre les deux méthodes analytique et numérique selon les graphes représentés par les figures ci-dessus (figures 1 à 12).

III) Contribution de l'effet du cisaillement à la charge ultime :

Dans ce paragraphe, il s'est avéré très utile de montrer le rôle que peut jouer l'influence de l'effet du cisaillement sur la charge ultime des poutres métallique.

Pour cela, trois cas ont été étudiés (figures 13 à 15), à savoir la contribution de cet effet du cisaillement sur la charge ultime.

Cette étude a été effectuée sur des poutres simplement appuyées de différentes valeurs de l'élanement, sous l'effet d'un déplacement imposé à mi-portée de la poutre.

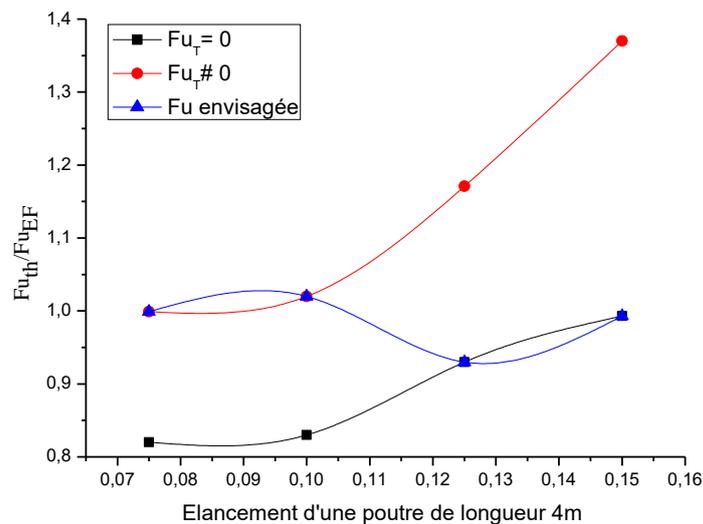


Fig.13 Contribution de l'effet du cisaillement à la charge ultime pour poutre de 4m de longueur

A partir des résultats obtenus selon le graphique représenté ci-dessus, il est bien constaté que pour le cas des poutres métalliques de portée égale à 4m, l'effet du cisaillement (Fu_T) contribue pour une valeur d'élanement d'environ 7,5 à 10% à la charge ultime.

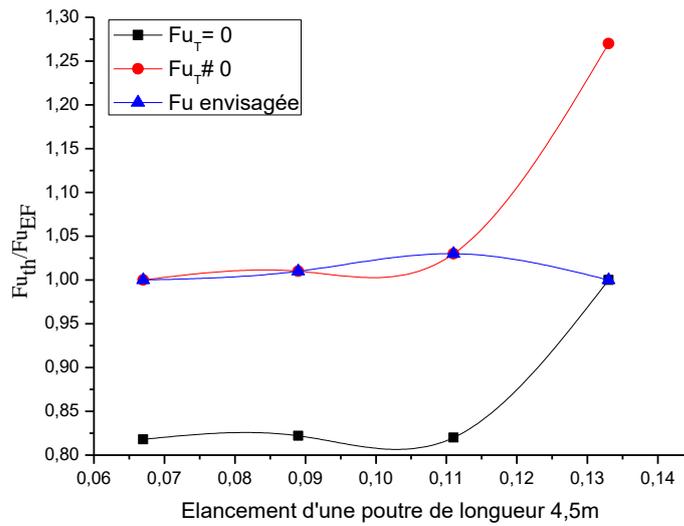


Fig.14 Contribution de l'effet du cisaillement à la charge ultime pour poutre de 4.5mde longueur

A partir des résultats obtenus selon le graphique représenté ci-dessus, il est bien constaté que pour le cas des poutres métalliques de portée égale à 4.5m, l'effet du cisaillement (F_{u_T}) contribue pour une valeur d'élancement d'environ 6.5 à 11% à la charge ultime.

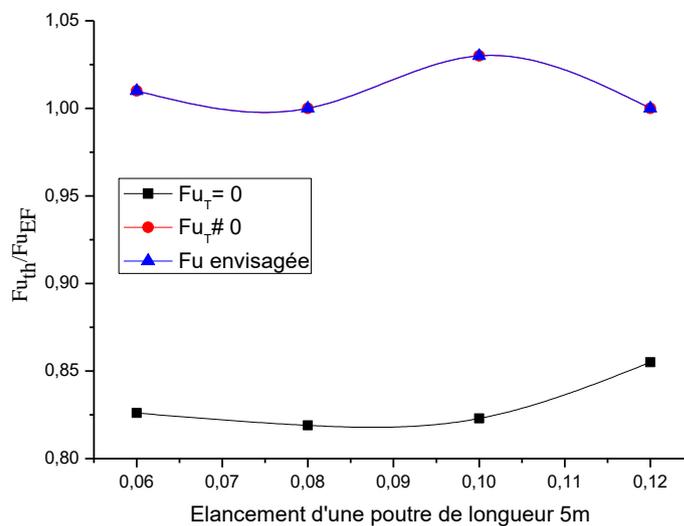


Fig.15 Contribution de l'effet du cisaillement à la charge ultime pour poutre de 5mde longueur

A partir des résultats obtenus selon les graphiques représentés ci-dessus, il est bien constaté que pour le cas des poutres métalliques de portée égale à 5m, l'effet du cisaillement (F_{u_T})

contribue pour une valeur d'élanement d'environ 6 à 12.5% à la charge ultime. Tandis qu'elle ne contribue pas au-delà de cette valeur d'élanement.

La contribution de l'effet du cisaillement (F_{uT}) par rapport à la charge ultime est donc plus importante pour le cas des poutres métalliques de courte portée et intermédiaires (4m et 4.5m) que pour le cas des poutres longues (5m).

IV) Étude paramétrique :

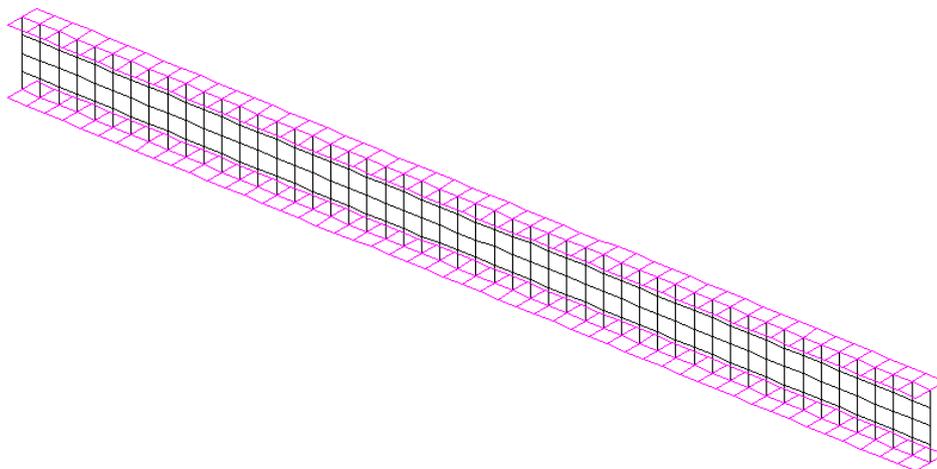
Après avoir validé le modèle numérique avec la méthode analytique proposée ci-dessus, des applications sont menées en vue d'une analyse numérique dans le domaine non-linéaire pour prédire la charge ultime des poutres métalliques de section en profilés IPE sur appuis simples.

A cet effet, une étude paramétrique est menée à savoir l'influence des raidisseurs, de la section, de la portée et de la nuance de la poutre sur le comportement de celle-ci dans le domaine non-linéaire.

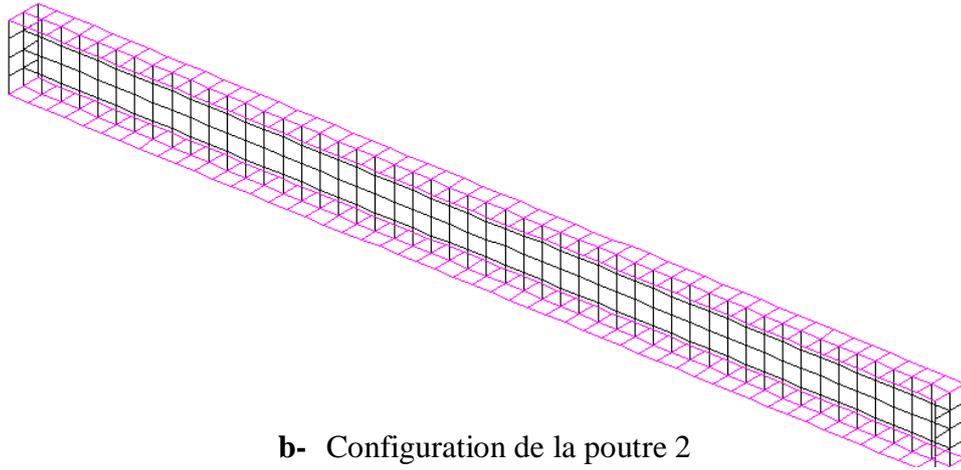
1) Influence des raidisseurs

Nous allons montrer l'influence des raidisseurs sur le comportement d'une poutre de nuance d'acier (S235) à l'état non-linéaire à savoir l'estimation de la charge ultime associée (voir tableaux 9, 10 et 11), en faisant varier la section et garder la même portée.

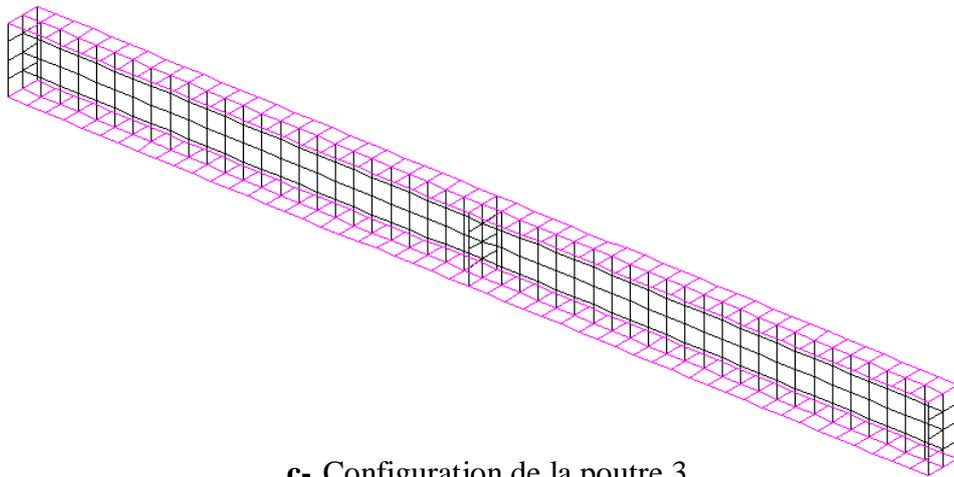
Dans ce contexte, trois configurations de poutres (voir figure 16) ont été étudiées ; poutre 1 sans raidisseurs au niveau des charges concentrées, poutre 2 avec raidisseurs au niveau des appuis et poutre 3 avec raidisseurs au niveau des appuis et à mi portée de la poutre.



a- Configuration de la poutre 1



b- Configuration de la poutre 2



c- Configuration de la poutre 3

Fig.16 Configurations de la poutre étudiée

Sections	charge ultime numérique (kN)			charge ultime analytique (kN)
	poutre 1	poutre 2	poutre 3	
IPE300	149.848	150.217	153.696	150.077
IPE360	240.690	240.695	249.692	242.779
IPE400	303.568	303.491	317.497	309.021
IPE450	391.604	391.587	416.867	411.442

Tableau 9 Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée égale à 4m.

Selon le tableau 9, il est à remarquer que la valeur de la charge ultime est presque de même ordre de grandeur pour les trois configurations de poutres Poutre1, Poutre2 et Poutre3. Il se

peut que les raidisseurs n'aient pas d'influence sur le comportement de la poutre de portée égale à 4m

Sections	charge ultime numérique (kN)			charge ultime analytique (kN)
	poutre 1	poutre 2	poutre 3	
IPE300	132.124	133.359	134.488	133.437
IPE360	214.627	214.638	220.412	215.890
IPE400	272.351	272.842	281.485	274.786
IPE450	354.956	354.967	370.521	365.883

Tableau 10 Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée égale à 4.5m

De même pour le cas de la poutre de portée égale à 4.5m, il est possible que les raidisseurs n'aient pas d'influence sur le comportement de celle-ci. il est bien à remarquer d'après le tableau 10, que la valeur de la charge ultime est presque de même ordre de grandeur pour les trois configurations de poutres Poutre1, Poutre2 et Poutre3.

Sections	charge ultime numérique (kN)			charge ultime analytique (kN)
	poutre 1	poutre 2	poutre 3	
IPE300	119.242	118.884	121.315	120.119
IPE360	191.693	191.717	195.153	194.351
IPE400	244.839	246.314	251.029	247.380
IPE450	321.528	321.543	331.822	329.409

Tableau 11 Valeurs de la charge ultime d'une poutre de portée égale à 5m

De même pour le cas de la poutre de portée égale à 5m, on peut soulever la même remarque selon le tableau 11, c'est-à-dire que la valeur de la charge ultime est presque de même ordre de grandeur pour les trois configurations de poutres Poutre1, Poutre2 et Poutre3. Ainsi on déduit que les raidisseurs n'aient pas d'influence sur le comportement de cette poutre.

Pour une meilleure analyse sur l'influence des raidisseurs envers le comportement de ces poutres, une comparaison des résultats a été faite dans ce paragraphe vis à vis le renforcement de la poutre au niveau du chargement concentrée. Dans ce contexte, nous avons fait une

comparaison entre la résistance des poutres raidées et celle des poutres sans raidisseurs, fabriquées en profilé IPE450 pour différentes nuance de l'acier, en gardant la même portée de 4m

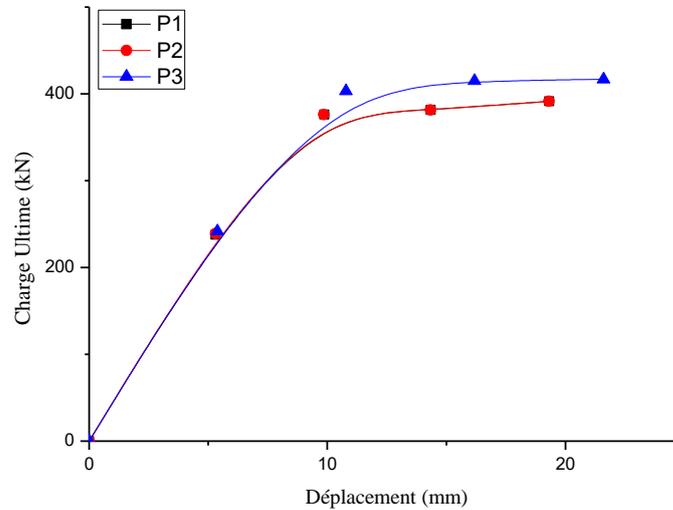


Fig.17 Comportement élasto-plastique pour une nuance de l'acier 235Mpa

Selon les courbes de l'évolution de la charge en fonction du déplacement des poutres à sections en profilé IPE450 représentées dans la figure 17, il est à remarquer que pour une nuance de l'acier égale à 235MPa, les raidisseurs n'ont pas une influence marquante sur le comportement non-linéaire, c'est-à-dire que le comportement des poutres avec raidisseurs est presque le même que celui des poutres sans raidisseurs.

Il est également à constater que la charge ultime est estimée d'une valeur égale à 391.6kN pour la poutre sans raidisseurs P1, tandis que pour les poutres avec raidisseurs la charge ultime est estimée d'une valeur égale à 391.59kN pour la poutre P2 et 416.87kN pour la poutre P3.

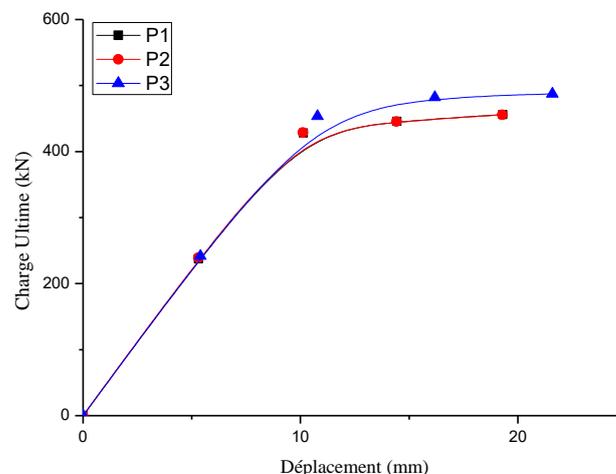


Fig.18 Comportement élasto-plastique pour une nuance de l'acier 275Mpa

De même pour le cas d'acier de nuance égale à 275MPa, il est à remarquer d'après les courbes de l'évolution de la charge en fonction du déplacement des poutres de sections en profilé IPE450 représentées dans la figure 18, que les raidisseurs n'ont pas une influence remarquable sur le comportement non-linéaire, c'est-à-dire que le comportement des poutres avec raidisseurs est presque le même que celui des poutres sans raidisseurs.

Il est également à constater que la charge ultime est estimée d'une valeur égale à 455.6kN pour la poutre sans raidisseurs P1, tandis que pour les poutres avec raidisseurs la charge ultime est estimée d'une valeur égale à 455.76kN pour la poutre P2 et 487.32kN pour la poutre P3.

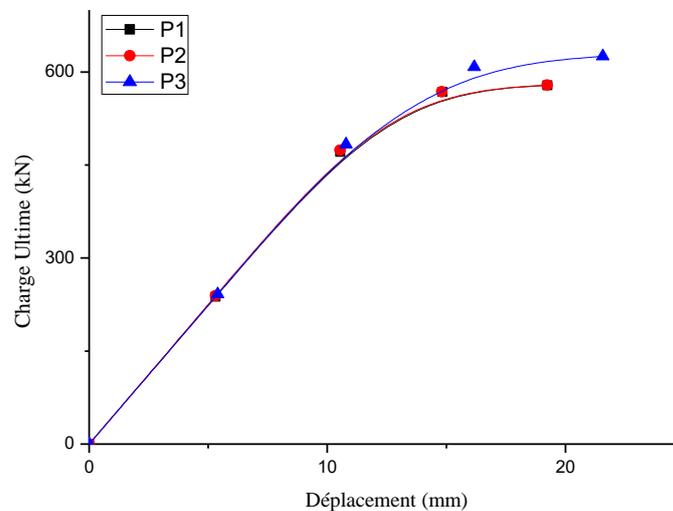


Fig.19 Comportement élasto-plastique pour une nuance de l'acier 355Mpa

De même, la même remarque est soulevée pour le cas d'acier de nuance égale à 355MPa, c'est-à-dire les raidisseurs n'ont pas une influence remarquable sur le comportement non-linéaire d'après les courbes de l'évolution de la charge en fonction du déplacement des poutres de sections en profilé IPE450 représentées dans la figure 19. Autrement dit, le comportement des poutres avec raidisseurs est presque le même que celui des poutres sans raidisseurs.

Il est également à constater que la charge ultime est estimée d'une valeur égale à 578.6kN pour la poutre sans raidisseurs P1, tandis que pour les poutres avec raidisseurs la charge ultime est estimée d'une valeur égale à 578.88kN pour la poutre P2 et 625.55kN pour la poutre P3.

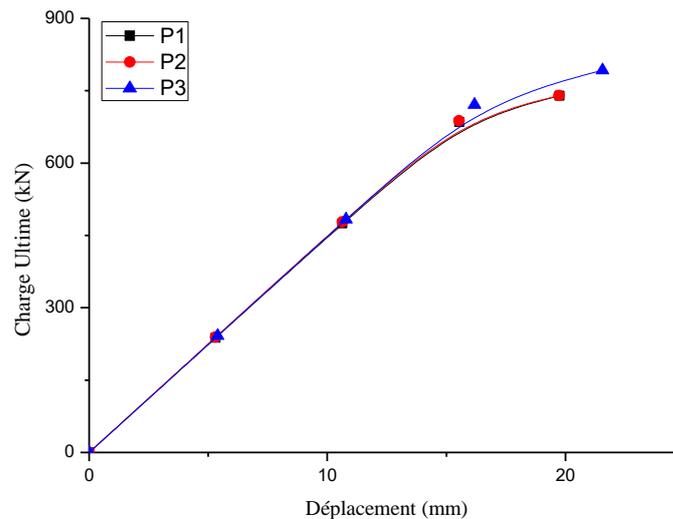


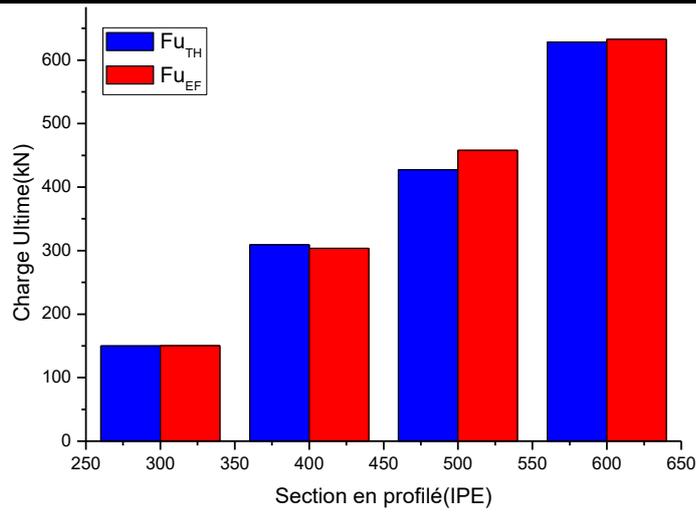
Fig.20 Comportement élasto-plastique pour une nuance de l'acier 460Mpa

De même pour le cas d'acier de nuance égale à 460MPa, il est à remarquer d'après les courbes de l'évolution de la charge en fonction du déplacement des poutres de sections en profilé IPE450 représentées dans la figure 20, que les raidisseurs n'ont pas une influence remarquable sur le comportement non-linéaire, c'est-à-dire que le comportement des poutres avec raidisseurs est presque le même que celui des poutres sans raidisseurs.

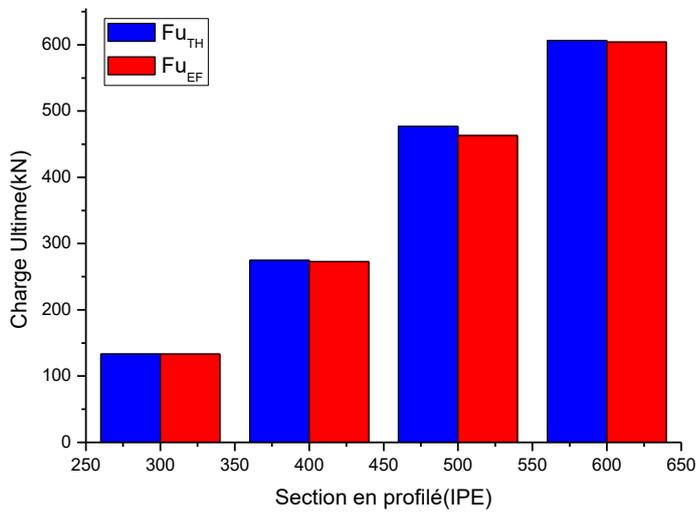
Il est également à constater que la charge ultime est estimée d'une valeur égale à 739.7kN pour la poutre sans raidisseurs P1, tandis que pour les poutres avec raidisseurs la charge ultime est estimée d'une valeur égale à 740.16kN pour la poutre P2 et 792.32kN pour la poutre P3.

2) Influence de la section de la poutre

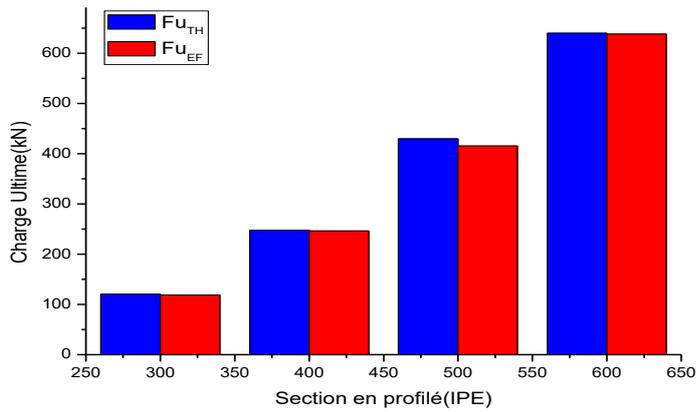
Nous allons montrer l'influence de la section de la poutre sur son comportement à l'état non-linéaire (figure 21) à savoir l'estimation de la charge ultime associée, en faisant varier la section et garder la même portée.



a- Cas d'une poutre de portée égale à 4m



b- Cas d'une poutre de portée égale à 4.5m



c- Cas d'une poutre de portée égale à 5m

Fig.21 Comportement non-linéaire d'une poutre de nuance d'acier (S235)

On peut conclure donc d'après les résultats obtenus selon les graphes de la figure 21 représentée ci-dessus, que plus la section devient plus importante et plus la charge ultime augmente.

Il est également à constater que les valeurs de la charge ultime correspondantes aux poutres de 4m de portée, fabriquées en profilés (IPE300), (IPE400), (IPE500) et (IPE600) sont analytiquement d'ordre 150.077kN, 309.021kN, 427.499 et 628.38kN respectivement et numériquement d'ordre 150.217kN, 303.491kN, 458.093kN et 632.868 respectivement.

pour le cas des poutres de 4.5m de portée, fabriquées en profilés (IPE300), (IPE400), (IPE500) et (IPE600), il est à remarquer que les valeurs de la charge ultime correspondantes sont analytiquement d'ordre 133.437kN, 274.786kN, 477.101kN et 606.56kN respectivement et numériquement d'ordre 133.359kN, 272.842kN, 463.22kN et 604.051kN respectivement.

De même pour le cas des poutres de 5m de portée, fabriquées en profilés (IPE300), (IPE400), (IPE500) et (IPE600), il est à remarquer que les valeurs de la charge ultime correspondantes sont analytiquement d'ordre 120.119kN, 247.38kN, 429.5591kN et 639.831kN respectivement et numériquement d'ordre 118.884kN, 246.314kN, 415.343kN et 638.157kN respectivement.

3) Influence de la portée de la poutre

Nous allons montrer l'influence de la portée de la poutre sur son comportement à l'état non-linéaire, en faisant varier la portée et garder la même section.

Les sections utilisées dans cette étude sont des profilés (IPE300), (IPE360), (IPE400) et (IPE450)

Les graphes des figures ci-dessous (figures 22, 23, 24 et 25) montrent les valeurs obtenus de la charge ultime (F_u) en fonction des hauteurs croissantes (L/H).

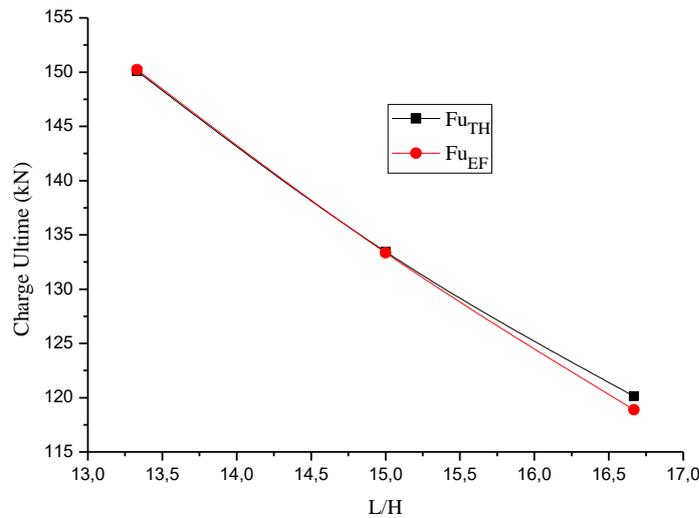


Fig.22 Comportement élasto-plastique pour une poutre fabriquée en profilé (IPE300).

Selon l'évolution de la charge ultime en fonction des hauteurs croissantes (L/H) représenté dans la figure ci-dessous (figure 22) pour une poutre fabriquée en un profilé IPE300, il est à remarquer que la longueur a une influence remarquable sur le comportement non-linéaire, c'est-à-dire plus la portée de la poutre n'est importante et plus la poutre métallique est résistible.

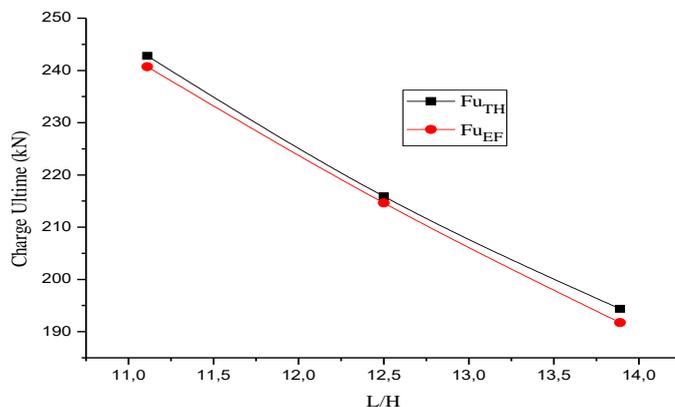


Fig.23 Comportement élasto-plastique pour une poutre fabriquée en profilé (IPE360).

De même, selon l'évolution de la charge ultime en fonction des hauteurs croissantes (L/H) représenté dans la figure ci-dessous (figure 23) pour une poutre fabriquée en un profilé IPE360, il est à remarquer que la longueur a une influence remarquable sur le comportement non-linéaire, c'est-à-dire plus la portée de la poutre est importante et moins elle est résistible la poutre métallique.

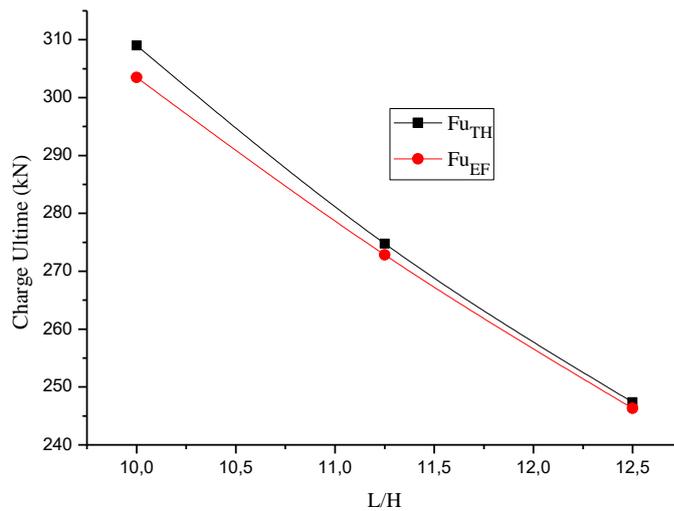


Fig.24 Comportement élasto-plastique pour une poutre fabriquée en profilé (IPE400).

On soulève la même remarque pour le cas d'une poutre fabriquée en un profilé IPE400 selon l'évolution de la charge ultime en fonction des hauteurs croissantes (L/H) représentée dans la figure ci-dessous (figure 24), c'est-à-dire que la longueur a une influence remarquable sur le comportement non-linéaire, en d'autre mot, plus la portée de la poutre est importante et moins elle est résistible la poutre métallique.

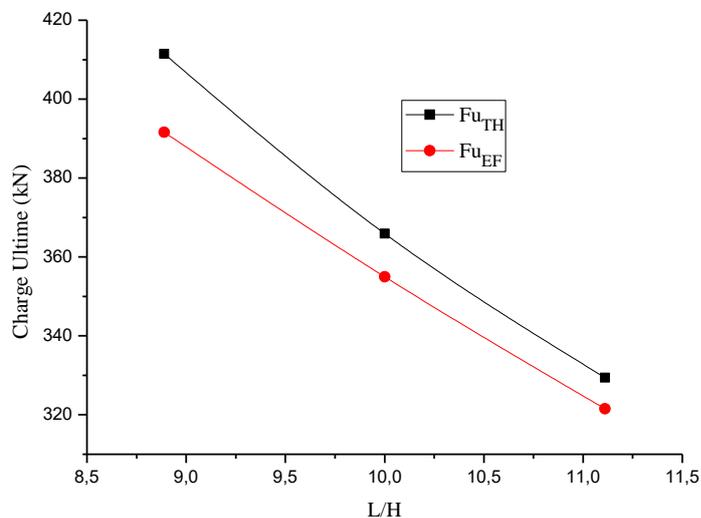


Fig.25 Comportement élasto-plastique pour une poutre fabriquée en profilé (IPE450).

De même, la même remarque est retirée pour le cas d'une poutre fabriquée en un profilé IPE450 selon l'évolution de la charge ultime en fonction des hauteurs croissantes (L/H) représentée dans la figure ci-dessous (figure 25), c'est-à-dire que la longueur a une influence remarquable sur le comportement non-linéaire, autrement dit, plus la portée de la poutre est importante et moins elle est résistible la poutre métallique.

4) 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 à l'état élasto-plastique, en faisant varier la nuance de l'acier et garder la même portée et la même section de la poutre.

Les graphes des figures ci-dessous (figures 26 à 33) représentent la valeur de la charge ultime en fonction du déplacement à mi- portée de la poutre.

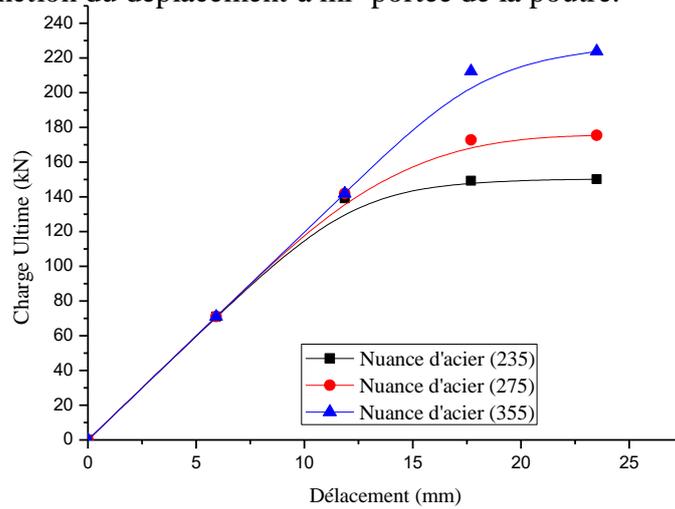


Fig.26 Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE300 de portée 4m

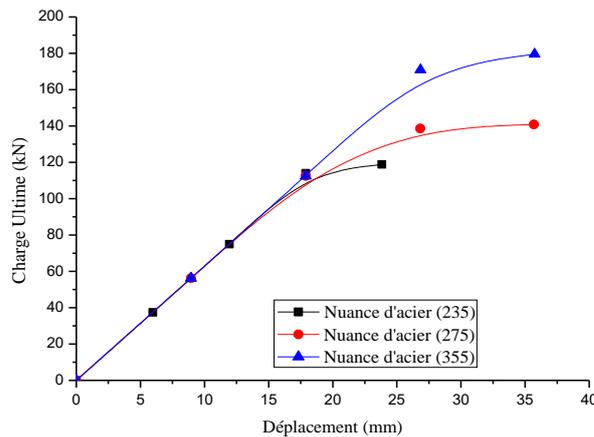


Fig.27 Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE300 de portée 5m

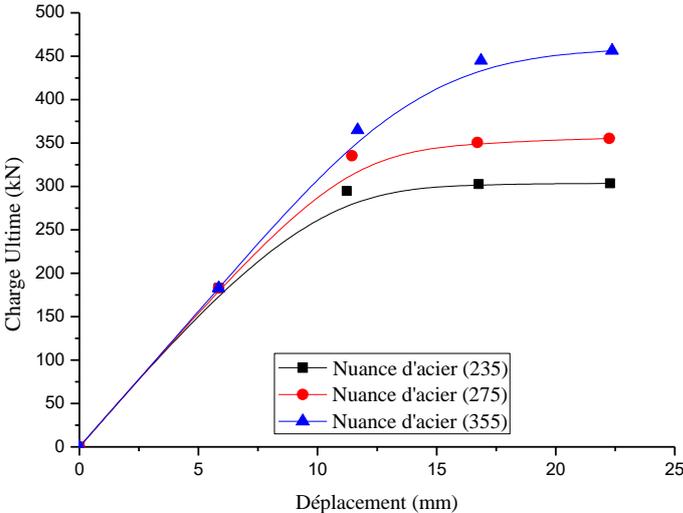


Fig.28 Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE400 de portée 4m

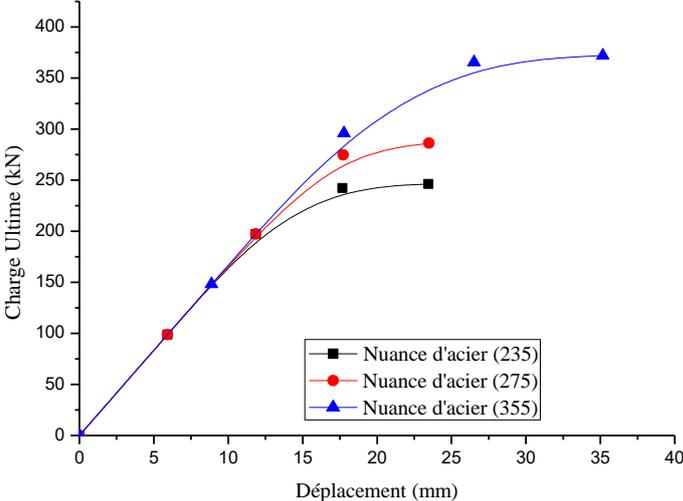


Fig.29 Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE400 de portée 5m

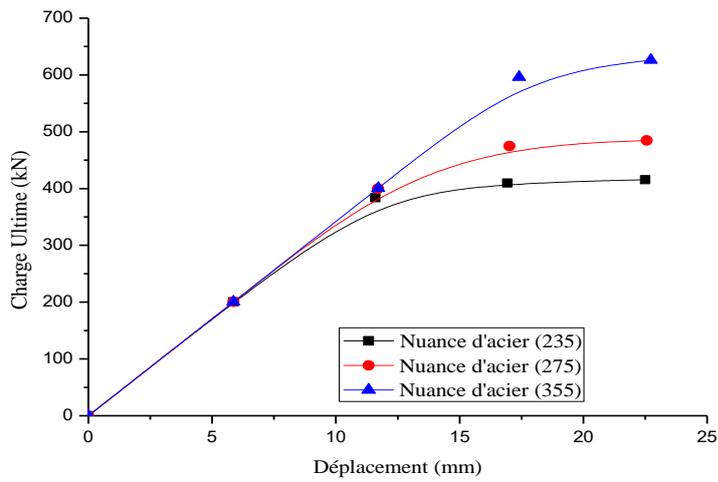


Fig.30 Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE500 de portée 4m

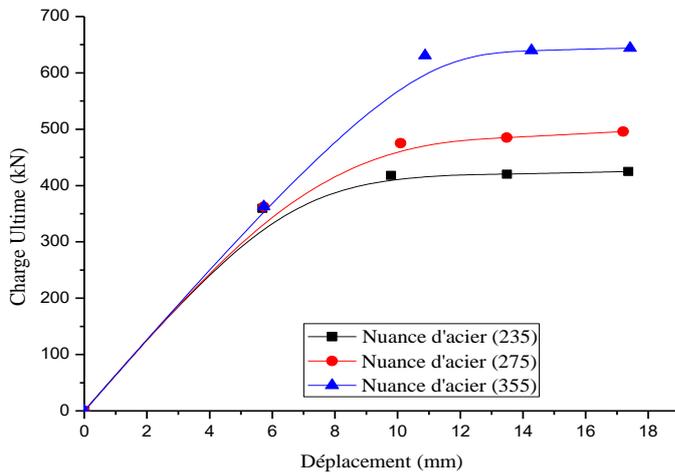


Fig.31 Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE500 de portée 5m

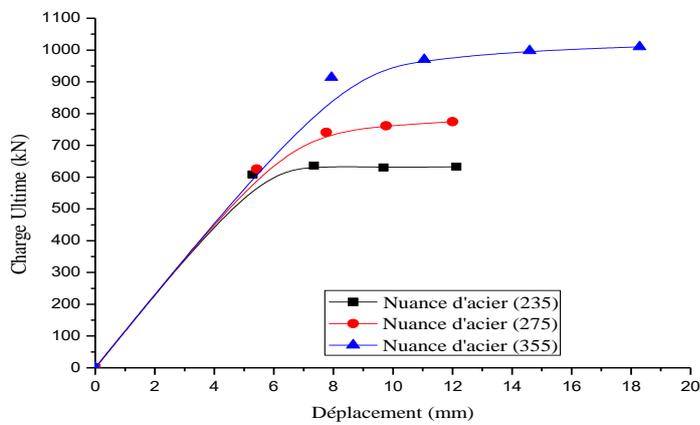


Fig.32 Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE600 de portée 4m

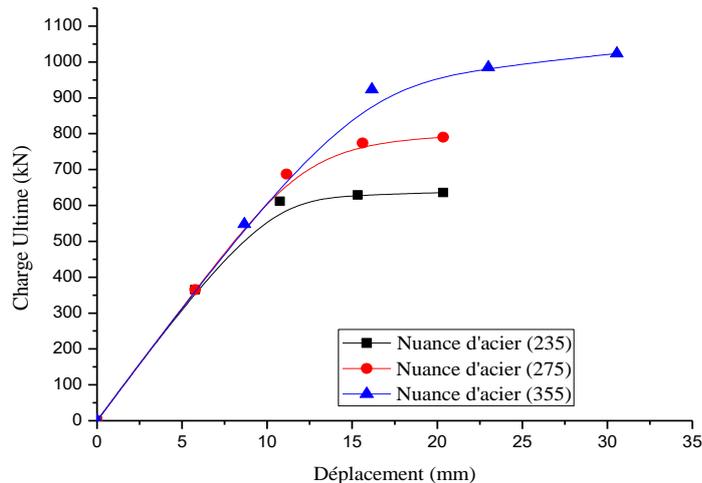


Fig.33 Comportement élasto-plastique d'une poutre fabriquée en IPE600 de portée 5m

D'après les courbes du comportement élasto-plastique des poutres métalliques fabriquées en différents profilés IPE pour différentes nuances de l'acier, voir (figures 26 à 33), il est à remarquer qu'à l'état élastique, le comportement de la poutre représente les mêmes valeurs de grandeur quel que soit la nuance de l'acier, par contre à l'état plastique, il est à constater que plus la nuance de l'acier augmente, et plus la résistance de la poutre est élevée, en d'autres mots la charge ultime augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la nuance de l'acier.

V) Conclusion :

Dans ce chapitre, une analyse numérique non linéaire a été menée afin de prédire le comportement à l'état élasto-plastique à savoir l'estimation de la charge ultime des poutres métalliques fabriquées en profilés IPE.

Cette analyse numérique montre l'application possible d'un modèle MEF 3D à l'étude du comportement non linéaire des poutres métalliques à sections en profilé IPE, ainsi elle permet de représenter l'influence de certains paramètres à savoir la section, la portée et la nuance de l'acier utilisée sur le comportement global de la poutre métallique en étudiant la capacité portante ultime.

Conclusion Générale

Les objectifs principaux de notre travail étaient, d'une part d'élaborer un modèle analytique simple 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 des analyses numériques à la base des modèles reposant sur les résultats d'essais expérimentaux évoqués en littérature.

Une méthode analytique a été présentée dans la première partie de ce mémoire pour prédire la charge ultime à la base d'un calcul de la flèche totale des poutres métalliques de différentes sections en profilé IPE symétriques dans le domaine élasto-plastique, soumises à l'effet de charges transversales.

L'expression déterminant la charge ultime, issue de cette méthode analytique s'exprime en l'addition de la charge ultime due à l'effet du cisaillement à la charge ultime due à la flexion de la poutre.

Cette solution analytique a été validée par une comparaison à des modèles éléments finis, dont la validation de ces derniers, repose sur les résultats d'essais expérimentaux évoqués en littérature.

Une analyse numérique basée sur le logiciel d'éléments finis en 3D CAST3M a été menée pour étudier le comportement des poutres métallique à l'état élasto-plastique. Les poutres en profilé IPE ont été modélisées à l'aide d'éléments coques(COQ4). Une attention particulière a été apportée au choix du maillage et des lois de comportement utilisées.

Le calibrage du modèle analytique par rapport au modèle numérique a montré que l'effet du cisaillement ne contribue dans la solution analytique que pour une valeur de l'élancement ($\lambda < 0.125$).

Le modèle numérique qui a été validé par des études comparatives avec des essais expérimentaux et numériques disponibles ont permis de faire les conclusions suivantes:

- Il se peut que les raidisseurs n'aient pas d'influence sur le comportement de la poutre vis-à-vis le calcul de la charge ultime.
- Plus la section devient plus importante et plus la charge ultime augmente.
- Plus la portée de la poutre n'est importante et plus la poutre métallique est résistible.

- Plus la nuance de l'acier augmente, et plus la résistance de la poutre est élevée, en d'autres mots la charge ultime augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la nuance de l'acier.

En résumé, le travail entrepris a permis de prouver que l'approche analytique proposée peut être facile à appliquer pour prédire la charge ultime à la base d'une étude du comportement mécanique à l'état élasto-plastique des poutres métalliques symétriques de différentes sections et portées avec diverses caractéristiques géométriques, soumises à une charge transversale appliquée à mi- portée.

Ainsi, il 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 bibliographiques

- [1] **François Frey**, Analyse des structures et milieux continus : mécanique des structures.
- [2] **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.
- [3] **C. KinIu** 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.
- [4] **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, Page 1749-176.
- [5] **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.
- [6] **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.
- [7] **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.
- [8] **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.
- [9] **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.

- [10] **Chakeur. K et Bessas. L** « Etude de comportement élasto-plastique des poutres métalliques en flexion simple : développement d'une approche analytique et simulation numérique », mémoire de Master en Génie Civil option Structures, juin 2018.
- [11] **Ehsan D., Sajad A. H, Fariborz M. T., Aastha G., Rasou M.** “New Practical Approach to Plastic Analysis of Steel Structures” *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 59(1), pp. 27–35, 2015. Ehsan Dehghani, Sajad A. Hamidi, Fariborz M. Tehrani, Aastha Goyal, Rasoul Mirghaderi.
- [12] **Ahmed S. D. Al-Ridha ,1 Ali F. Atshan,2 Kamal Sh. Mahmoud,1 and Qusai Kh. Hameed3** “Effect of Strengthening of Steel Beams with Variable Length by Using Carbon Fiber” *Journal of Engineering*, Volume 2019, Article ID 1631692, August 2019.