

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



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil

Option : structure

Présenté par :

GHLAMALLAH Rania Chaimaâ

&

HAMMAZ Ismahen Wafa

Sujet du mémoire :

**Etude comparative vis-à-vis l'effet Vierendeel entre
les poutres cellulaires et les poutres Angelina :
modélisation numérique**

Soutenu publiquement le 17 septembre 2020 devant le jury composé de :

Mr. KERROUM Nadir

Président

Mr. DJEBLI Benyagoub

Encadreur

Mr. REBAHI Abderezek

Examineur

Mr. KRIM Abdallah

Examineur

Année Universitaire : 2019/2020.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Avant de commencer la présentation de ce projet de fin étude, nous profitons l'occasion pour remercier Allah le tout puissant qui nous a donné la santé la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

*Nous remercions chaleureusement notre encadreur **Mr Djebli Benyagoub** pour sa générosité en matière de formation et d'encadrements, nous le remercions également pour son aide, ses conseils, ses encouragements, sa disponibilité et la confiance qu'il nous a fournie tout au long de notre travail.*

Nos profonds remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre humble travail.

*Toute notre gratitude aux enseignants de l'université IBN KHALDOUN qui ont contribué à notre formation en particulier du département de génie civil surtout **Mr Bekki**. Nous tenons également à remercier nos familles, nos amies et toutes les personnes de près ou de loin qui nous ont apporté leurs aides et leur soutien.*

MERCI.

Dédicace

***C'est avec un grand plaisir et une grande fierté que
Je dédie du profond du cœur ce modeste travail :***

A mon **cher Père**, mon super héros

A ma **chère Mère**, ma source de bonheur

***Pour leur amour, leur soutien, leur prière et leurs
encouragements sans eux je n'aurais pas bouté à ce stade
d'étude que dieu les gardes en bonne santé et les protégés***

A ma chère adorable sœur FAIZA.

À mon cher frère AMINE.

Pour leurs encouragements et leur soutien moral.

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection

***A mes tantes que j'adore et mes cousins pour leur
présence à mes coté.***

A ma chère binôme Rania et toute sa famille.

A mes chères amies : Houda, Atika, Samira, Kika.

Pour leur aide et leurs encouragements.

A toute ma famille.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Je Dédie ce travail.

ISMAHEN Wafa



Dédicace

Avec joie, fierté et respect, je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études. Que Dieu, le tout puissant, leur procure bonne santé, bonheur et longue vie.

A mon cher frère Adel et mes chères sœurs Linda et Amene.

A toute ma famille pour leur soutien et encouragements.

A ma chère cousine Nabila.

A mon binôme Ismahen et toute sa famille.

A toutes mes amies : Ikram, Houda, Atika, Nour et malika.

A tous ceux qui me sont chers.

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

Merci d'être toujours là pour moi.

Rania

Résumé

Les poutres à ouvertures d'âmes se présentent, notamment pour les bâtiments de bureaux à plateaux libres de grandes portées, comme une solution très intéressante pour répondre aux différentes contraintes techniques et économiques. En particulier, en permettant le passage dans leurs ouvertures des multiples réseaux nécessaires à l'équipement technique du bâtiment, elles conduisent à réduire très notablement l'épaisseur totale des planchers.

Cependant, la présence des ouvertures dans l'âme provoque un changement du comportement en affectant la résistance de ces poutres.

Ce travail a pour but de mener une analyse numérique sur le comportement de deux types de poutres métalliques à ouvertures d'âmes régulières à savoir les poutres cellulaires et les poutres Angelina, en tenant compte des non-linéarités matérielles et géométriques.

Dans cette étude, un mode de ruine spécifique en l'occurrence l'effet de Vierendeel est examiné à l'aide d'une modélisation par éléments finis.

Cette analyse est destinée, à prédire l'effet Vierendeel au niveau des ouvertures en estimant les charges ultimes des deux types de poutres, dont le but est de montrer laquelle entre ces deux types de poutres, est son mécanisme de Vierendeel est le plus prononcé.

MOTS-CLEFS : *Poutres cellulaires ; poutres Angelina ; comportement non-linéaire ; effet Vierendeel ; modélisation par éléments finis ; charges ultimes.*

Abstract

Steel beams with web openings represent, especially in the office buildings with large free span areas, a quite interesting solution to satisfy the various technical and economical requirements. In particular they lead to a substantial reduction of the floors thickness by allowing pipes and ducts to pass through the openings.

However, the presence of openings in the web causes a change in behavior by affecting the resistance of this type of beams.

The aim of this work is to investigate, through a numerical analysis, the nonlinear behaviour of two types of steel beams with regular web openings, namely cellular beams and Angelina beams, taking into account material and geometric nonlinearities.

In this investigation, specific failure mode which is the Vierendeel effect of cellular beams is examined through a Finite Element modeling.

This analysis is designed to predict the Vierendeel effect by estimating the ultimate loads at the openings, whose purpose to show which between these two types of beams, is its Vierendeel mechanism is most pronounced.

Key-Words: *Cellular beams ; Angelina beams ; Non-linear behavior ; Vierendeel effect ; Finite Element modeling ; ultimate load.*

ملخص

تتمثل الروافد ذات الفتحات في مباني المكاتب مفتوحة التخطيط ذات الامتدادات الكبيرة، وهو حل مثير للاهتمام لتلبية المتطلبات التقنية والاقتصادية المختلفة، على وجه الخصوص من خلال السماح للشبكات المتعددة اللازمة للمعدات التقنية للمبنى بالمرور عبر فتحاتها، فإنها تؤدي إلى انخفاض كبير جدا في سمك الإجمالية للطوابق.

ومع ذلك، فإن وجود فتحات في الرافدة ، تؤدي إلى تغيير في السلوك من خلال التأثير على مقاومة هذا النوع من الروافد الدائرية و روافد أنجلينا ، مع الأخذ في الاعتبار المواد والخصائص الهندسية غير الخطية. في هذه الدراسة، يتم فحص تأثير Vierendeel باستخدام نمودجة العناصر المحدودة. ويهدف هذا التحليل، لمعرفة تأثير Vierendeel في الفتحات من خلال تقدير، الحمولة القصوى من هذين النوعين من الروافد، الذي يهدف إلى إظهار أي بين هذين النوعين من الروافد، تكون فيه آلية Vierendeel أكثر وضوحا.

الكلمات المفتاحية : الروافد ذات الفتحات الدائرية، الروافد Angelina ، سلوك غير خطي، تأثير «Vierendeel» ، نمودجة العنصر المحدود، الحمولة القصوى.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE.

I.1. Introduction.....	9
I.2. Bilan des études menées sur les poutres Cellulaires vis-à-vis l'effet Vierendeel	9
I.3. Bilan des études menées sur les poutres Angelina vis-à-vis l'effet Vierendeel	13
I.4. Conclusion.....	17

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE LOGICIEL CAST3M.

II.1. Introduction.....	18
II.2. Présentation du logiciel.....	18
II.2.1. Introduction.....	18
II.2.2. Historique.....	19
II.2.3. Environnement et langage.....	20
II.2.4. Domaines d'utilisation.....	20
II.2.5. Organisation d'un calcul.....	20
II.2.5.1. Préparation du modèle de calcul.....	20
II.2.5.2. Conditions limites et chargement.....	22
II.2.5.3. Résolution du système d'équations.....	22
II.2.5.4. Traitement des résultats.....	22
II.2.6. Possibilités offertes par Cast3M.....	25
II.3. Calculs non-linéaires.....	26
II.4. Conclusion.....	26

CHAPITRE III : MODÉLISATION MÉCANIQUE ET CHOIX D'ÉLÉMENT FINI.

III.1. Introduction.....	27
III.2. Modèle géométrique (Développement d'un modèle numérique)	27
III.3. Conditions aux limites et chargements.....	28
III.4. Modélisation non-linéaire.....	28
III.4.1. Loi de comportement de l'acier.....	29
III.4.2. Calibrage des résultats.....	30
III.5. Conclusion.....	34

**CHAPITRE IV : ÉTUDE COUPLÉE ANALYTIQUE - NUMERIQUE
SUR L'EFFET « VIRENDEEL ».**

IV.1. Introduction.....	35
IV.2. Plastification locale par l'effet Vierendeel.....	36
IV.2.1. Localisation de la section critique	36
IV.2.2. Analyse numérique	45
IV.2.2.1. Influence de la portée de la poutre sur l'effet Vierendeel	45
IV.2.2.2. Influence du nombre d'ouvertures sur l'effet Vierendeel	51
IV.2.2.3. Influence de la section de la poutre sur l'effet Vierendeel	57
IV.2.2.4. Influence de la nuance de l'acier sur l'effet Vierendeel	62
IV.3. Conclusion.....	64
 CONCLUSION GÉNÉRALE.....	 65

LISTE DES FIGURES

Introduction générale.

Figure.1 : Photographie des poutres avec ouvertures d'âmes régulières.

Figure.2 : Schéma de fabrication d'une poutre cellulaire [3].

Figure.3 : Cinématique d'exécution d'une poutre « Angelina » [2].

Figure.4 : Cinématique de finition de la poutre « Angelina » [2].

Figure.5 : Oxycoupage d'une poutre cellulaire [3].

Figure.6 : Oxycoupage d'une poutre « Angelina » [3].

Figure.7 : Poutre « Vierendeel ».

Chapitre – II –

Présentation de logiciel Cast3M.

Figure II.1 : Logo de logiciel Cast3M [25].

Figure II.2 : Organigramme du modèle de calcul.

Figure II.3 : Noyau de calcul, pré et post traitements du noyau de calcul.

Figure II.4 : Procédures de Cast3M.

Chapitre - III –

Modélisation mécanique et choix d'élément fini.

Figure III.1 : Élément coque COQ4.

Figure III.2 : Modélisation des sections métalliques.

Figure III.3 : Loi de comportement de l'acier.

Figure III.4 : Loi de comportement idéalisé de l'acier.

Figure III.5 : Poutre étudiée expérimentalement [6].

Figure III.6 : Précision du modèle numérique [6].

Figure III.7 : Poutre étudiée expérimentalement [12].

Figure III.8 : Précision du modèle numérique [12].

Figure III.9 : Poutre étudiée expérimentalement [18].

Figure III.10 : Précision du modèle numérique de la poutre AS012.

Figure III.11 : Précision du modèle numérique de la poutre AS018.

Chapitre – IV

Étude couplée Analytique - Numérique sur l'effet « Vierendeel ».

Figure IV.1 : Effet « Vierendeel ».

Figure IV.2 : Section critique en flexion Vierendeel.

Figure IV.3 : Configurations des poutres cellulaires.

Figure IV.4 : Distribution des efforts globaux au droit d'une ouverture sinusoïdale.

Figure IV.5 : Vérification d'une section en té située à l'abscisse x sur un quart d'ouverture.

Figure IV.6 : Classes des sections transversales l'Eurocode 3 [EN3-1-1].

Figure IV.7 : Classification d'une paroi en console suivant l'Eurocode 3 [EN3-1-1].

Figure IV.8 : Classification de l'âme du quart d'ouverture.

Figure IV.9 : Passage de l'ACB à l'« Angelina ».

Figure IV.10 : Section critique en flexion Vierendeel.

Figure IV.11 : Configurations des poutres Angelina.

Figure IV.12 : Déformée des poutres étudiées de portée $L = 7.98\text{m}$.

Figure IV.13 : Comportement non-linéaire des deux poutres étudiées de portée $L = 7.98\text{m}$.

Figure IV.14 : Déformée des poutres étudiées de portée $L = 9.31$.

Figure IV.15 : Comportement non-linéaire des deux poutres étudiées de portée $L = 9.31\text{m}$.

Figure IV.16 : Rapports de charge ultime (F_{uA}/F_{uC}) en fonction de (L/H).

Figure IV.17 : Evolution charge-déplacement local des poutres de même nombre pair d'ouvertures.

Figure IV.18 : Evolution charge-déplacement local des poutres de même nombre impair d'ouvertures.

Figure IV.19 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 comportant 6 ouvertures.

Figure IV.20 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 comportant 7 ouvertures.

Figure IV.21 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 comportant 6 ouvertures.

Figure IV.22 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 comportant 7 ouvertures

Figure IV.23 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 comportant 6 ouvertures.

Figure IV.24 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 comportant 7 ouvertures.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre – III –

Modélisation mécanique et choix d'élément fini.

Tableau III.1 : Caractéristiques géométriques [6].

Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques [12].

Tableau III.3 : Propriétés mécaniques [18].

Tableau III.4 : Caractéristiques géométriques [18].

Chapitre – IV –

Étude couplée Analytique - Numérique sur l'effet « Vierendeel ».

Tableau IV.1 : Valeurs de la flèche pour différentes sections critiques.

Tableau IV.2 : Valeurs de la flèche pour différentes sections critiques.

Tableau IV.3 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de nuance d'acier S235.

Tableau IV.4 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de nuance d'acier S235.

Tableau IV.5 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de nuance d'acier S235.

Tableau IV.6 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de nuance d'acier S275.

Tableau IV.7 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de nuance d'acier S275.

Tableau IV.8 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de nuance d'acier S275.

Tableau IV.9 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de nuance d'acier S355.

Tableau IV.10 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de nuance d'acier S355.

Tableau IV.11 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de nuance d'acier S355.

Tableau IV.12 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de nuance d'acier S460.

Tableau IV.13 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de nuance d'acier S460.

Tableau IV.14 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de nuance d'acier S460.

NOTATIONS

\bar{C} : Matrice d'amortissement.

\bar{M} : Matrice de masse.

\bar{K} : Matrice de rigidité.

$\bar{\omega}$: Pulsation propre.

\bar{u} : Déplacement.

\bar{q} : Vecteur.

\bar{F} : Vecteur des forces.

h : Hauteur total.

tf : Epaisseur de la semelle.

t_w : Epaisseur de l'âme.

b_f : largeur de la semelle.

E : Module de Young.

f_y : Module tangent.

ϵ : Déformation.

σ : Contrainte.

H : Hauteur finale après découpage.

$d0$: Diamètre de l'ouverture circulaire.

e : Entraxe des alvéoles.

w : Longueur du montant.

L : Portée entre les appuis.

P : Charge ultime.

a : Hauteur de l'ouverture sinusoïdale.

b : Longueur de la sinusoïde.

\emptyset : Angle d'inclinaison.

$M_{V,Ed}$: Moment.

N_{sup} : Effort appliqué.

x_{cr} : Distance entre le centre de l'ouverture à la section critique.

Fu_A : Charge ultime de la poutre Angelina.

Fu_C : Charge ultime de la poutre Cellulaire.



Introduction générale

1. Introduction

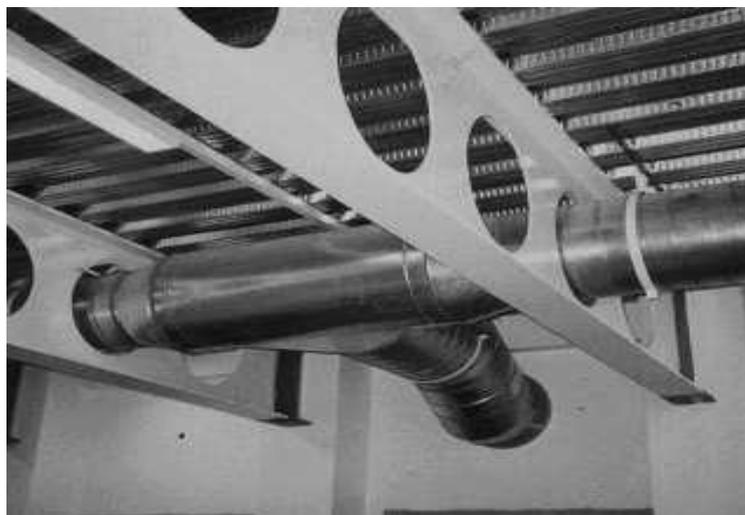
Les poutres métalliques avec ouverture dans l'âme sont de plus en plus répandues dans la construction des bâtiments pour bureaux et appartements vues les avantages qu'elles offrent à savoir l'esthétique en employant judicieusement les propriétés géométriques, la flexibilité en permettant le passage des équipements techniques dans l'âme des poutres au lieu de les faire passer en dessous, la rapidité de mise en œuvre en facilitant la construction ainsi que l'optimisation en augmentant la hauteur libre sous plafond et les grandes portées.

Toutefois, il est à signaler qu'avec cette optimisation, le gain de hauteur est très intéressant, aux niveaux :

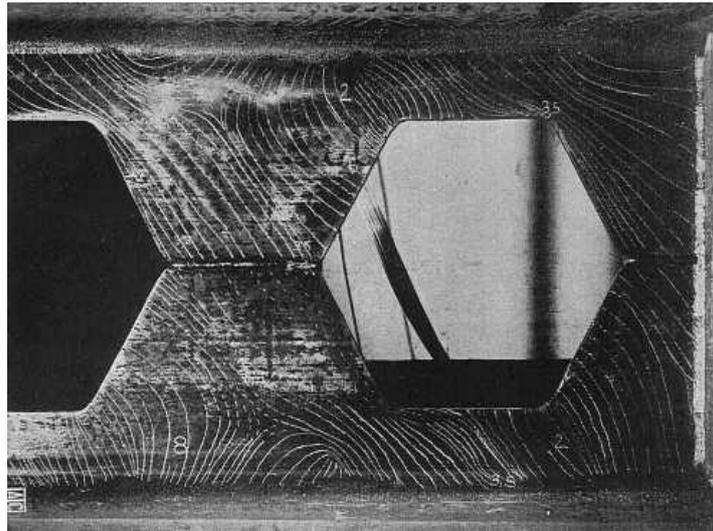
- **Coût de construction** : avec un gain de matière ; les poutres ajourées permettent une économie d'acier, ce qui est particulièrement rentable dans un contexte économique où le coût de l'acier est élevé. De plus, le gain de hauteur permet une économie de matériaux. Enfin, la structure est allégée, et le gain de poids propre engendre encore une économie de matière de la structure globale du bâtiment qui transmet les efforts jusqu'aux fondations.

- **Coût énergétique** : la diminution de hauteur diminue les volumes à chauffer ou à climatiser.

On distingue plusieurs types de poutres avec ouverture selon la géométrie des ouvertures à savoir les poutres cellulaires dont les ouvertures sont circulaires (Voir Figure. 1-a) ou arrondies, les poutres alvéolaires dont les ouvertures sont polygonales (Voir Figure. 1-b), possible d'autres formes de poutres ajourées avec des ouvertures rectangulaires (Voir Figure. 1-c). Il est également de trouver d'autres nouvelles formes géométriques de poutres comportant des ouvertures sinusoïdales appelées poutres Angelina (Voir Figure. 1-d).



(a) Poutres cellulaires à ouvertures circulaires [1].



(b) Poutres alvéolaires [1].



(c) Poutres avec ouvertures rectangulaires [1].



(d) Poutres « Angelina » [2].

Figure.1 : Photographie des poutres avec ouvertures d'âmes régulières.

2. Fabrication

L'optimisation des méthodes de fabrication (oxycoupage, cintrage, etc.) permet actuellement de s'adapter aux exigences des maîtres d'ouvrage afin de garantir une livraison rapide des poutrelles cellulaires ou Angelina.

2.1. Concept

- **Fabrication des poutres cellulaires**

La méthode de fabrication brevetée des poutres cellulaires est basée sur l'utilisation exclusive de poutrelles laminées à chaud. Une double découpe est pratiquée dans l'âme par oxycoupage. Les deux éléments découpés dent à dent (2 Tés) ainsi formés sont ressoudés après décalage d'une demi-onde et il en résulte un accroissement de la hauteur (Figure 2).

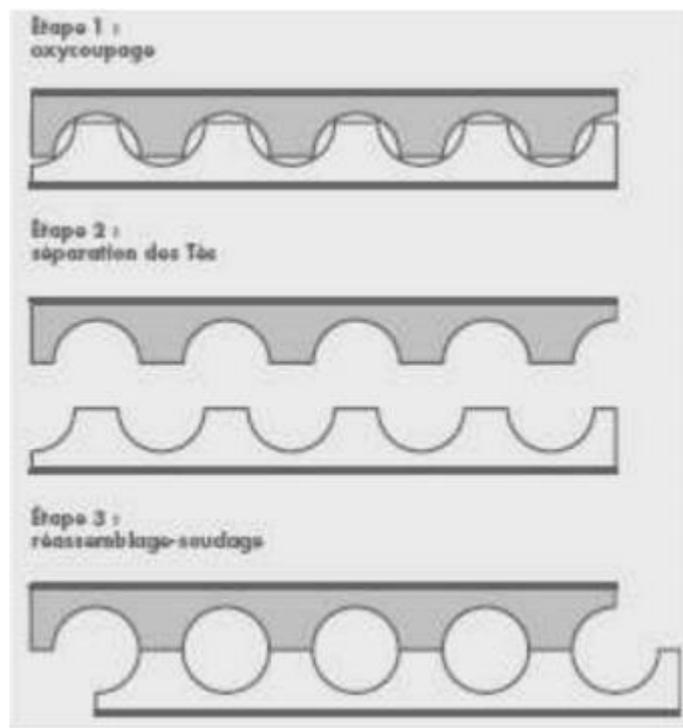


Figure.2 : Schéma de fabrication d'une poutre cellulaire [3].

Cette découpe est optimisée de façon à ce que la quantité de matière éliminée soit la plus faible possible. De plus, elle permet de créer des sections hybrides en soudant deux membrures provenant de deux profilés mères différentes.

- **Fabrication des poutres Angelina**

La forme « Angelina » est obtenue par oxycoupage. La découpe est plus rapide que pour les poutres cellulaires, le tracé étant de longueur plus petite (Figure 3), d'autant plus

qu'un seul passage est nécessaire pour la poutre « Angelina ».

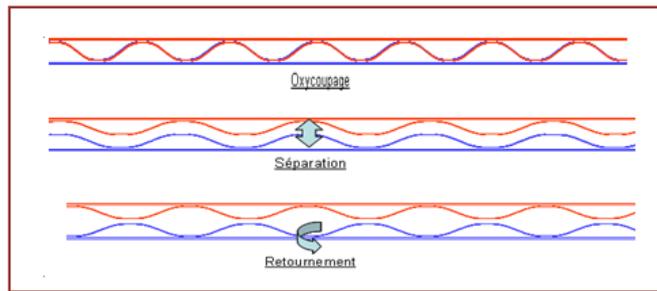


Figure.3 : Cinématique d'exécution d'une poutre « Angelina » [2].

Une fois découpées conformément à la figure 3, les deux parties obtenues sont ensuite séparées ; une partie est retournée et l'ensemble est réajusté et soudé (Figure 4). Ainsi, la perte est minimisée. Toutefois pour des raisons techniques évidentes il n'est pas possible de procéder au retournement de tous les profilés surtout pour des longueurs importantes. On fait glisser la membrure inférieure pour qu'elle se retrouve en face de la membrure supérieure et on soude l'ensemble. Cette fois-ci, les pertes peuvent se révéler très importantes, tout dépend de la longueur du premier montant. En ce qui concerne les soudures, elles sont beaucoup moins importantes pour les « Angelina » puisque le pourcentage d'ouvertures est plus grand.

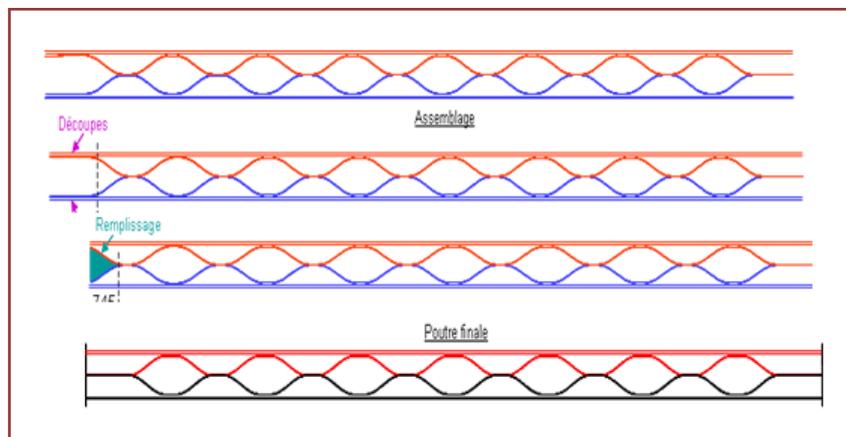


Figure.4 : Cinématique de finition de la poutre « Angelina » [2].

2.2. Opérations de l'oxycoupage d'une poutre

Le produit structurel ainsi obtenu présente un rapport inertie/poids incrémenté. Les programmes de découpe sont pilotés numériquement afin d'assurer un ajustement parfait des alvéoles (Figures 5 et 6). La fabrication en parallèle de poutres permet de réduire les coûts de production.

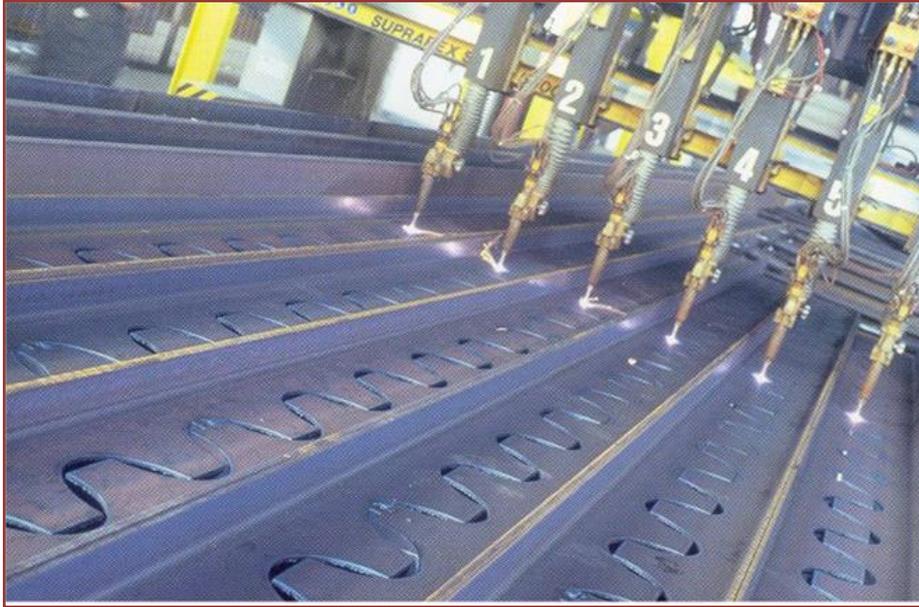


Figure.5 : Oxycoupage d'une poutre cellulaire [3].



Figure.6 : Oxycoupage d'une poutre « Angelina » [3].

3. Fonctionnement des poutres avec ouvertures d'âmes régulières

Les poutres cellulaires fonctionnent comme des poutres échelles, ou poutre Vierendeel. On peut lever l'hyperstaticité interne de la poutre en faisant l'hypothèse de rotule ou point d'inflexion au droit des ouvertures et aussi au milieu des montants. On peut noter que

dans le calcul des efforts internes, le moment interne au milieu des montants pourra être pris en compte.

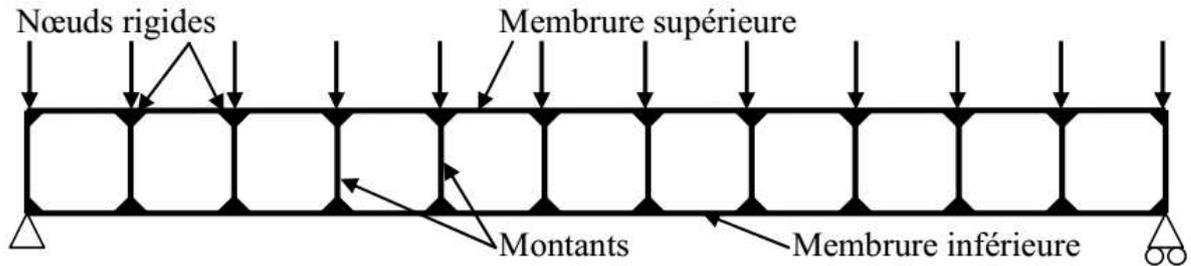


Figure.7 : Poutre « Vierendeel ».

4. Modes de ruine

Malgré les avantages que présentent ces poutres avec ouvertures leur résistance est très affectée par la présence des ouvertures dans l'âme qui doivent être prises en compte lors de la conception et du dimensionnement. Ces ouvertures provoquent un changement du comportement et de la stabilité de ce type des poutres ainsi qu'une diminution de leur résistance.

Plusieurs travaux de recherche ont constaté que la ruine de ce type de poutres peut être atteinte si l'on dépasse l'une des résistances suivantes à savoir la résistance globale à la flexion, au cisaillement et au déversement et la résistance locale des montants et des Tés supérieurs et inférieurs.

L'influence d'ouvertures rapprochées sur le comportement d'une poutre ajourée est complexe. Divers modes de ruine peuvent prédominer, selon :

- Que l'ouverture se situe dans une zone de fort cisaillement ou de forte flexion ;
- La forme des ouvertures, par exemple circulaire, rectangulaire ou oblongue ;
- L'espacement des ouvertures, des effets d'interaction pouvant apparaître dans le montant d'âme situé entre les ouvertures ;
- La position de l'ouverture sur la hauteur de la section ;
- La dissymétrie de la section en ce qui concerne l'aire de la semelle ;
- L'élancement de l'âme, qui influence sur la résistance au voilement.

Les différents modes de ruine pouvant survenir au niveau ou à proximité des ouvertures. Certains modes de ruine sont dus aux effets locaux se produisant autour d'ouvertures uniques, tandis que d'autres sont dus à la ruine du montant d'âme entre les ouvertures rapprochées.

Les principaux modes de ruine sont les suivants :

- Flexion globale de la section transversale perforée ;
- Cisaillement pur de la section transversale perforée ;
- Flexion Vierendeel autour de l'ouverture d'âme ;
- Flambement du Té comprimé.

Pour les poutres comportant des ouvertures d'âme multiples, des modes de ruine supplémentaires doivent être considérés :

- Flambement du montant d'âme entre deux ouvertures adjacentes ;
- Flexion du montant d'âme ;
- Ruine par cisaillement du montant d'âme ou de la soudure du montant d'âme ;
- Flambement par compression de l'âme ;
- Instabilité globale de la poutre provoquée par le déversement.

Ces modes de ruines sont influencés par la géométrie et l'élancement de l'âme, la forme et les dimensions des ouvertures, modes de chargement et les appuis latéraux prévus.

Parmi les modes de ruine locaux les plus préconisés et qui peuvent être survenus pour le cas des poutres cellulaires et « Angelina », on cite la plastification locale par l'effet « Vierendeel ».

5. Objectifs de ce projet

La présence des ouvertures dans une poutre modifie son comportement. Par conséquent, la conception de telles poutres a besoin d'un traitement spécial, afin de respecter les conditions de résistance.

Dans le travail présenté, des informations sur le comportement, l'analyse et la conception des poutres métalliques qui contiennent des ouvertures régulières de formes circulaires (poutres cellulaires) et sinusoïdales (poutres « Angelina ») dans l'âme, ainsi que des détails de ces poutres sont discutées.

L'objectif de ce mémoire est d'une part, de proposer un modèle fiable et performant qui permet de résoudre avec une certaine précision les problèmes liés aux poutres cellulaires et aux poutres « Angelina » et d'autre part, la maîtrise de quelques concepts du logiciel utilisé Cast3m du point de vue mécanique. En outre, une étude couplée analytique-numérique est présentée sur le comportement de ces deux types de poutres dans le domaine non-linéaire afin de montrer lequel type de ces poutres, son effet Vierendeel est le plus marquant.

Ces informations donnent non seulement des conseils valables aux ingénieurs et aux concepteurs des structures métalliques mais également aideraient des chercheurs dans la planification et l'exécution appropriée de futurs programmes de recherche dans ce secteur.

6. Organisation du mémoire

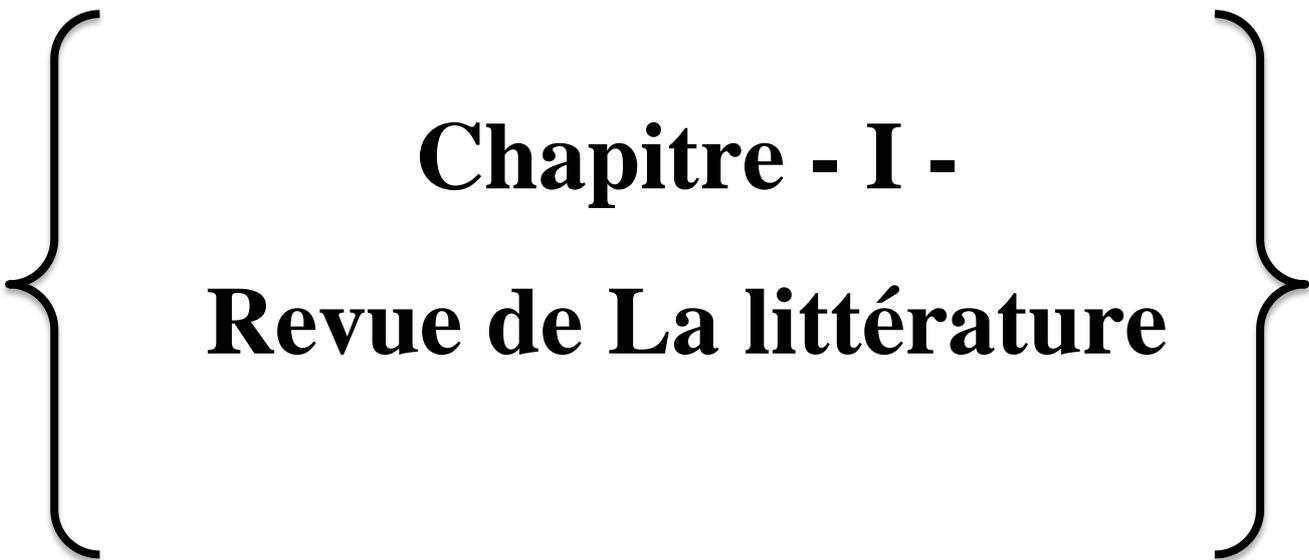
Dans le premier chapitre, on présente une revue générale sur les principales études et recherches consacrées aux problèmes liés aux poutres cellulaires et aux poutres « Angelina ».

Le deuxième chapitre de cette recherche offre un aperçu sur la présentation de l'outil de calcul à savoir le logiciel (Cast3m).

Le chapitre trois expose la modélisation et le choix d'élément en utilisant le logiciel (Cast3m) basé sur la méthode des éléments finis.

Ce dernier est validé et exploité dans le chapitre quatre grâce à une étude couplée analytique- numérique.

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



Chapitre - I -
Revue de La littérature

I.1. Introduction

Pour réduire la hauteur totale des planchers une des solutions pratiquées est de prévoir des ouvertures dans l'âme des poutres afin de permettre le passage des conduits techniques tout en maintenant une épaisseur de plancher minimale, ce procédé permet de réduire la hauteur d'étage et par conséquent la hauteur globale du bâtiment.

Dans ce contexte, en premier lieu, nous présentons une chronologie des études menées sur les poutres cellulaires en l'occurrence les études effectuées sur l'effet Vierendeel; en deuxième lieu, nous présentons un bilan chronologique sur quelques travaux de recherches disponibles qui donne des informations sur le comportement des poutres Angelina.

I.2. Bilan des études menées sur les poutres Cellulaires vis-à-vis l'effet Vierendeel

Plusieurs travaux de recherches ont fourni des informations sur le comportement et le calcul des poutres munies des ouvertures de forme circulaires appelées poutres cellulaires. Parmi ces travaux de recherche, on trouve ceux consacrés à l'étude d'un mode de ruine spécifique provoqué par la présence des ouvertures en l'occurrence l'effet Vierendeel.

En 2001, Chung et al [4] ont proposé une formule empirique déterminant une courbe d'interaction Moment – Cisaillement afin de fournir une règle simple pour la conception pratique de poutres métalliques comportant des ouvertures circulaires centrées à mi-hauteur de l'âme ; cette règle consiste sur l'évaluation du moment résistant de calcul en présence d'un effort tranchant de la section perforée, à l'encontre du mécanisme Vierendeel.

En 2003, Chung et al [5] ont effectué une recherche à base d'éléments finis sur les poutres métalliques avec ouvertures d'âme de différentes formes et tailles (dimensions). Cette recherche vise à étudier l'interaction entre la flexion et le cisaillement en observant le mode de ruine.

Vu que l'effort de cisaillement global provoque à la fois la rupture par cisaillement et le mécanisme " Vierendeel " dans la section perforée, il a été remarqué que l'effet " Vierendeel " agissant dans les sections en T au-dessus et au-dessous de l'ouverture d'âme est le mode le plus prononcé.

De plus, les modes de ruine dans les sections perforées peuvent être facilement évalués en caractérisant la résistance des ouvertures en fonction des courbes d'interactions moments-cisaillements.

En 2006, D. Bitar et al [6] ont développé un nouveau modèle analytique de calcul permettant d'une part, de mieux appréhender la résistance à l'instabilité des montants de poutres cellulaires et mixtes acier-béton et d'autre part, d'évaluer correctement la flèche de telles poutres. Ce modèle analytique couvre un domaine très large de variation de paramètres géométriques (diamètre et espacement) et mécaniques (acier de haute limite d'élasticité). Une étude d'évaluation du nouveau modèle par rapport aux modèles existants [7-8] permet en fin de ce travail de mettre en évidence l'impact des améliorations apportées.

En 2006, des règles de conception ont été élaborées par Lawson et al [9] (fonds de Recherche pour le charbon et l'acier 2006) pour aider au dimensionnement des poutres en acier laminées à chaud munies d'ouvertures utilisées en construction mixte.

Parmi ces méthodes, une approche unifiée a été développée pour le calcul de la flèche maximale des poutres en acier et mixtes comportant des ouvertures circulaires et rectangulaires ; valable aussi pour les poutres cellulaires possédant une section symétrique. L'expression de cette flèche s'exprime comme combinaison de deux termes : le premier terme correspond à la flèche due à la flexion globale (pure) de la poutre mixte non ajourée et le deuxième terme correspond à la flèche due à l'effet Vierendeel. Ce deuxième terme comporte un facteur représentant l'effet combiné de la répartition de moment et de cisaillement sur la longueur de la poutre.

En 2006, R.M. Lawson, J. Lim, S.J. Hicks et W.I. Simms [10] ont fait une étude sur la conception des poutres cellulaires mixtes non symétriques et les poutres avec grandes ouvertures d'âme. Ils ont montré que l'asymétrie de la section transversale des poutres cellulaires mixtes développe un moment de flexion additionnel dans le montant dû à l'interaction entre les ouvertures quand l'espacement entre ces dernières est petit. En outre, le développement des efforts internes locaux influence sur la distribution des contraintes (résistance) dans chaque Té. Une méthode de calcul a été présentée en tenant compte d'une asymétrie importante dans la section transversale ainsi de l'influence du type d'ouvertures ovales ou rectangulaires.

Le montant flambe suite au développement d'un moment de flexion local sous l'effet du cisaillement quand l'espacement entre ces ouvertures est petit. Des équations simplifiées ont été présentées pour la détermination du flambement du montant, cette dernière a été calibrée ensuite avec les résultats d'analyse par éléments finis. Cette analyse par éléments finis a été également développée pour le cas des sections asymétriques avec des ouvertures

renforcées. Des solutions fiables sont présentées afin de permettre au concepteur de calculer l'effort de cisaillement maximum agissant sur la poutre quand sa résistance est limitée par la flexion ou le flambement du montant.

Pour le cas des ouvertures longues, des efforts d'arrachement (décrochage « pull-out ») importants peuvent se produire dans les connecteurs au bord de l'ouverture. Une fois combiné avec des effets de second ordre possibles dus au déplacement produit par l'effet de cisaillement à travers l'ouverture, il est nécessaire de limiter la valeur des efforts mixtes locaux dus au moment de Vierendeel qui peut être considéré dans le calcul.

En outre, ils ont présenté une expression approximative [10] pour le calculer de la flèche maximale des poutres cellulaires mixtes sous l'effet des charges transversales concentrées ou uniformément réparties. L'augmentation de la flèche représente l'effet combiné de la flexion et du cisaillement dû à l'influence des ouvertures. Généralement, pour les poutres cellulaires mixtes, l'influence de la variation de la rigidité à la flexion de la section mixte perforée est dominante.

Le mécanisme Vierendeel est toujours critique dans les poutres en acier perforées avec de grandes ouvertures d'âme isolées, au niveau duquel les efforts de cisaillement et les moments Vierendeel coexistent. Jusqu'à présent, les principaux paramètres connus pour affecter le comportement structurel de telles poutres sont la hauteur de l'ouverture d'âme, la longueur d'ouverture de la section critique du T_e supérieur et la zone d'ouverture d'âme. En 2012, K.D. Tsavdaridis et C. D'Mello [11] ont réalisé une étude numérique par éléments finis (EF) en détail sur quatre sections en acier perforé de tailles différentes comportant onze ouvertures d'âme de formes standard et non standard avec trois tailles différentes, et ceci afin de fournir une méthode de calcul simple pour la pratique. Les différents paramètres géométriques ont été étudiés indépendamment afin de comprendre la signification de leurs effets et de faire progresser les connaissances sur les performances des poutres en acier perforées.

Un modèle EF a été établi, avec la non-linéarité matérielle et géométrique, permettant la redistribution de la charge à travers les ouvertures d'âme et la formation du mécanisme de Vierendeel. La réduction des capacités de cisaillement, due à l'incorporation des moments locaux de Vierendeel agissant sur les T_es supérieurs et inférieurs, a été obtenue directement à partir de l'analyse EF. Après cela, une comparaison des courbes d'interaction cisaillement - moment (V/M) des sections d'acier avec diverses formes et tailles d'ouverture d'âme a été établie et des courbes d'interaction (V/M) généralisées empiriques ont été développées. De

plus, la position précise des rotules plastiques a été déterminée en même temps que la longueur d'ouverture critique et le paramètre Vierendeel.

Ce travail a montré que la forme de l'ouverture d'âme peut également affecter de manière significative le comportement structural des poutres perforées, par opposition à la forme rectangulaire équivalente principalement utilisée jusqu'à présent. De plus, l'effet de la position de l'ouverture d'âme sur la longueur de la poutre perforée a été révélé. L'importance des paramètres qui affectent la performance structurelle de ces poutres est illustrée. Une étude numérique approfondie a conduit à des conclusions utiles et une forme elliptique d'une ouverture d'âme est proposée pour une étude plus approfondie. Le résultat de cette étude est considéré comme pertinent pour des applications pratiques.

En 2013 F.Erdal [12] a effectué des études sur des poutres cellulaires conçues d'une manière optimale jusqu'à la ruine. L'objectif principal était d'étudier le comportement à la ruine de ces poutres en menant des essais expérimentaux sur douze poutres cellulaires afin de prédire la capacité portante ultime et enfin, il a réalisé une analyse par éléments finis sur le flambement et prédire les charges critiques de toutes les poutres cellulaires testées expérimentalement. Les résultats d'analyse par éléments finis sont ensuite comparés avec les résultats de tests expérimentaux pour chaque poutre cellulaire testée.

En 2014, une étude [13] a été menée, pour évaluer la capacité portante basée sur l'effet Vierendeel par le dimensionnement des poutres métalliques munies d'ouverture circulaire, élaboré par la méthode de la SCI P100.

La capacité portante est étudiée en termes d'interactions moments-cisaillements normalisés et comparée à la solution d'analyse par éléments finis. Un total de 120 modèles d'éléments finis non linéaires de poutres cellulaires est utilisé dans cette étude qui couvre diverses tailles de section de poutre et rapports d'ouverture de 0.5 et 0.8.

Il a été constaté que les dimensions des sections en acier affectent moins la forme de la courbe d'interaction EF. Les interactions sont légèrement dégradées pour un rapport d'ouverture important. Une évaluation d'interaction obtenue par la méthode de SCI et la formule de Chung et al est d'ordre de 40 % et 20 % respectivement en comparaison avec l'analyse par EF. À cause de la similarité des interactions EF, une formule empirique est considérée comme une méthode appropriée pour évaluer l'interaction. Cependant, la formule d'interaction disponible peut ne pas fournir une conception rentable.

Pour évaluer l'interaction, cette étude propose une équation quadratique simple. La précision de la formule proposée est validée par rapport aux résultats analytiques en EF et aux

résultats expérimentaux disponibles dans les littératures. La nouvelle formule facilite la conception sûre et rentable de la poutre d'acier perforée basée sur la ruine par l'effet Vierendeel.

Les poutres cellulaires sont devenues de plus en plus populaires en tant que forme structurelle en construction en acier depuis leur introduction. Leur conception sophistiquée et développement de profilé offre une plus grande flexibilité dans la poutre en proportion pour la résistance, la hauteur, la taille et l'emplacement des ouvertures circulaires. Le but de la fabrication de ces poutres est d'augmenter la hauteur globale de la poutre, le moment d'inertie et le module de section, ce qui se traduit par une plus grande résistance et rigidité. L'objectif de cette étude [14] est de mener des analyses par éléments finis (EF) dans le domaine non linéaire des poutres cellulaires qui ont été testées expérimentalement afin de déterminer leurs charges ultimes en comparaison avec les solutions de celles-ci.

I.3. Bilan des études menées sur les poutres Angelina vis-à-vis l'effet Vierendeel

Les demandes architecturales, et parfois techniques, ont mené vers la création de nouvelles formes géométriques de poutres comportant des ouvertures sinusoïdales.

En 2011, des essais à la ruine sont réalisés au LaMI (Université Blaise Pascal) en coopération avec ArcelorMittal sur des poutres de dimensions réelles [15]. Les résultats expérimentaux permettent de comprendre le fonctionnement mécanique de ces poutres et de calibrer les modèles numériques. Le modèle d'éléments finis développé sur le logiciel SAFIR permet d'évaluer les potentiels de développement de la ruine par plastification ou voilement local des parois autour des ouvertures de formes sinusoïdales par flexion Vierendeel. Le modèle numérique validé servira de base à une étude paramétrique qui permettra de développer une nouvelle méthode de calcul analytique généralisable à des formes d'ouvertures variables.

En 2012 S.durif [16] a développé une approche analytique permettant de définir la charge ultime d'une nouvelle forme de poutre cellulaire à ouvertures sinusoïdales. Cette nouvelle forme d'ouverture implique de nouveaux modes de ruine. De ce fait, en vue de développer ce modèle de calcul analytique adapté à cette nouvelle forme d'ouverture, une campagne d'essais expérimentaux a été menée sur des poutres cellulaires à ouvertures sinusoïdales à grande échelle (≈ 10 m).

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

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

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

En 2012 S.Durif et A.bouchair [17] ont réalisé des essais expérimentaux sur des poutres comportant des ouvertures sinusoïdales. D'après l'analyse des résultats expérimentaux obtenus, deux modes de ruine ont été rencontrés qui sont la formation des rotules plastiques au droit de l'ouverture et l'instabilité locale dans la partie sinusoïdale de l'ouverture. Le deuxième mode de ruine est nouveau et n'est couvert par aucun code, car il est directement lié à une forme innovante de poutre développée par ArcelorMittal en l'occurrence la poutre Angelina. Afin d'évaluer la résistance de l'ouverture sinusoïdale, différentes parties autour de celle-ci ont été testées isolément.

Dans ce contexte, un programme expérimental a été effectué pour différents quarts d'ouvertures sinusoïdales, afin d'observer les modes de ruine et de fournir des résultats à utiliser dans la validation du modèle par éléments finis développé dans cette étude. Ensuite, une étude paramétrique a été réalisée, à partir des résultats numériques, dont le but de développer un nouveau modèle analytique basé sur les mêmes hypothèses que celles disponibles pour les poutres à ouvertures hexagonales.

En 2013 S. Durif et all [18] ont réalisé des essais sur trois poutres comportant des ouvertures sinusoïdales de différentes dimensions. Le but était d'observer les modes de ruine provoqués dans ce type de poutres et d'obtenir les valeurs de la résistance ultime. Ces spécimens ont été profondément mesurés, afin d'identifier clairement les modes de ruine locaux de la zone d'ouverture.

Deux modes de ruine spécifiques ont été observés. Pour l'ouverture de grande hauteur, la ruine est atteinte par la formation de quatre rotules plastiques aux coins de la section critique (flexion Vierendeel), ce mode est similaire à celui de l'ouverture rectangulaire. Tandis que, pour les ouvertures de petite dimension, la ruine résulte de l'instabilité locale du panneau comprimé dans les parties sinusoïdales de l'ouverture.

Afin d'effectuer une analyse détaillée sur le comportement de l'ouverture critique, y compris la répartition des contraintes dans ses différentes parties, un modèle numérique a été développé à la base des résultats expérimentaux.

Les résultats expérimentaux ont fourni des informations qualitatives et quantitatives utiles pour comprendre le comportement des poutres comportant des ouvertures sinusoïdales.

Le modèle numérique a montré une bonne précision à la base des résultats expérimentaux. Celui-ci peut être donc, utilisé comme un outil pour générer des résultats complémentaires dont le but de développer un modèle analytique.

En 2013, P.O. Martin et all [19] ont fait une étude sur le comportement statique des poutres Angelina. Dans ce contexte, ils ont présenté des résultats de 4 essais (3 en acier et 1 mixte) et d'environ 280 simulations numériques par éléments finis (en acier et mixte) conduits pour déterminer les modes et charges de ruine sous l'effet combiné d'une flexion et d'un cisaillement. Ils présentent ensuite le modèle de calcul analytique en détail permettant la vérification de la résistance des poutres en tenant compte de l'effet Vierendeel, ce modèle pouvant être utilisé dans les limites géométriques et mécaniques du domaine d'application défini en préambule. Finalement, une comparaison des charges maximales issues de ce nouveau modèle avec celles provenant des essais ou des calculs par élément finis permet d'évaluer la sécurité et la précision des formulations proposées.

En 2014 S. Durif et all [20] ont effectué des analyses expérimentales et numériques sur des spécimens isolés des montants d'âme avec quatre quarts d'ouverture prélevés sur l'ensemble des poutres Angelina. Dans ce contexte, des charges extérieures sont appliquées aux extrémités de deux quarts d'ouvertures pour obtenir des efforts internes bien connus dans les sections transversales le long des quarts analysés.

Les tests expérimentaux ont montré que les modes de ruine sont caractérisés soit par la formation des rotules plastiques dans la partie linéaire, soit par une instabilité locale dans les parties sinusoïdales du quart d'ouverture similaire à celles observées sur l'ensemble des poutres correspondantes.

Un modèle numérique a été développé pour le but de mener une analyse sur le comportement des montants d'âmes en tenant compte des non-linéarités matérielles et géométriques. Le modèle numérique validé en comparaison avec les résultats expérimentaux, prédit bien le mode de ruine et la charge ultime des montants d'âmes isolés. Il peut également être utilisé comme un outil pour développer des études plus approfondies afin de proposer des méthodes de calcul efficaces et fiables.

En 2015 Kumbhar et Jamadar [21] ont mené une étude paramétrique sur les poutres comportant des ouvertures sinusoïdales de différentes tailles dont le but d'optimiser la taille de ces ouvertures. Cette étude a été réalisée théoriquement en appliquant l'Eurocode3 et numériquement par éléments finis (AEF) en utilisant le logiciel « Abaqus » dont le modèle a été validé expérimentalement. Les résultats montrent que, les poutres avec ouverture sinusoïdale de hauteur égale à 0,55 la hauteur totale de la poutre donnent une meilleure résistance.

En 2016 Farhat erdal et all [22] ont effectué une analyse non-linéaire par éléments finis (AEF) des poutres comportant des ouvertures sinusoïdales. Cette étude a été utilisée pour prédire la réponse globale de ces poutres sous l'effet des charges externes croissantes jusqu'à la ruine (prédiction de la capacité portante). La simulation numérique à la base des essais expérimentaux a été faite dont le but de prédire les modes de ruine à savoir le déversement, le flambement par cisaillement et la flexion « Vierendeel » de ces poutres.

En 2016 S.Durif et A.bouchair [23] ont mené des investigations expérimentales et numériques sur des poutres comportant des ouvertures sinusoïdales. Ils ont montré des modes de ruine spécifiques, par rapport aux formes d'ouverture courantes, principalement le flambement local des panneaux autour de l'ouverture.

Une analyse détaillée de la distribution des contraintes autour des ouvertures a permis de comprendre le comportement de ces poutres à l'état limite ultime dans le but de développer un modèle analytique spécifique, car l'application directe des approches analytiques existantes aux poutres à ouvertures sinusoïdales a montré que les prévisions doivent être améliorées. En effet, afin d'obtenir une prédiction précise de la résistance au flambement des parties sinusoïdales de l'âme, le modèle analytique a été modifié.

Dans ce contexte, une approche analytique a été proposée, basée sur les méthodes existantes pour les ouvertures multiples et sur la théorie du flambement des plaques. Une formule a été proposée pour le calcul du coefficient de contrainte critique à travers une méthode simple bien décrite pour tenir compte de la résistance supplémentaire fournie par le montant d'âme intermédiaire au panneau adjacent de l'ouverture.

Cette approche considère de simples plaques rectangulaires équivalentes. Ce modèle analytique a été validé par rapport aux résultats numériques concernant les valeurs du coefficient de contrainte critique obtenues par un calcul eulérien. Ensuite, les résistances ultimes des poutres avec ouvertures sinusoïdales ont été évaluées par une étude comparative

avec la méthode des éléments finis pour différents profils de poutres origines et différentes formes d'ouverture.

En 2017 Vassart et all [24] ont établi une étude sur le comportement des poutres avec des ouvertures sinusoidales. Ils ont réalisé 4 essais expérimentaux et 287 essais numériques sur trois poutres en acier et une poutre mixte.

Une simulation numérique a été effectuée pour prédire les modes de ruine et les charges ultimes associées de ces poutres en flexion simple.

Ainsi, un nouveau modèle analytique a été proposé pour le calcul de la résistance (charge ultime) des poutres comportant des ouvertures sinusoidales en tenant compte de l'effet « Vierendeel ». Ce modèle analytique couvre un domaine très large de variation de paramètres géométriques et mécaniques.

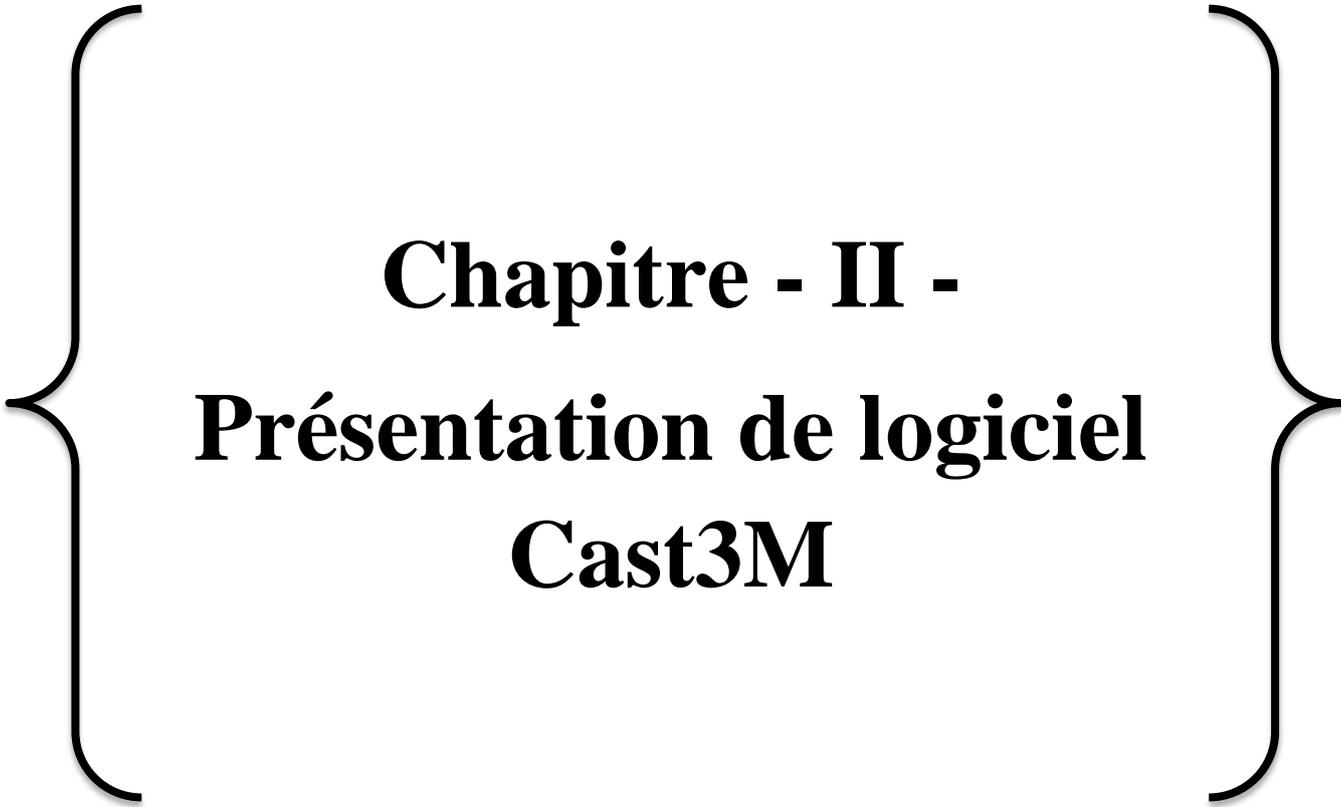
Enfin, une étude d'évaluation du nouveau modèle par rapport aux solutions expérimentales et numériques prises comme référence permet de mettre en évidence l'impact de ce nouveau modèle analytique.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, une présentation chronologique des études menées sur les poutres Cellulaires (comportant des ouvertures circulaires) et Angelina (comportant des ouvertures sinusoidales) a été présentée.

Cette revue donne peu d'information sur le mécanisme de Vierendeel des poutres cellulaires et notamment sur celui des poutres Angelina. C'est pourquoi il nous a paru très intéressant de consacrer tout un chapitre (chapitre IV) à la base d'une analyse numérique pour présenter lequel entre ces deux types de poutres, est son mécanisme de Vierendeel est le plus prononcé.

Ainsi des modèles d'éléments finis ont été décrits afin de mener cette analyse numérique dans les domaines non-linéaires pour prédire le comportement mécanique à savoir l'effet Vierendeel au niveau des ouvertures des deux types de poutres métalliques (poutres cellulaires et poutres Angelina).



**Chapitre - II -
Présentation de logiciel
Cast3M**

II.1. Introduction

Dans ce type d'approche, où la précision de l'analyse dépend directement du maillage et des éléments utilisés, les utilisateurs ont pris l'habitude de vérifier qu'il était suffisamment fin pour conduire à des résultats fiables. Un logiciel tel que Cast3M [25] 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.

Dans ce chapitre, nous allons faire une présentation générale du logiciel en donnant un aperçu global sur l'organisation d'un calcul mécanique (mené sur ce logiciel).

II.2. Présentation du logiciel



Figure II.1 : Logo de logiciel Cast3M [25].

II.2.1. Introduction

Cast3M [25] 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'Énergie Atomique de France (CEA). La principale particularité de Cast3M [25], 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.
- Thermos-mécaniques couplées.

Contrairement à de nombreux codes de calcul, Cast3M [25] ne fonctionne pas en « boîte noire » ; il donne à l'utilisateur la connaissance du problème effectivement posé et des méthodes employées pour le résoudre. Cast3M [25] comprend un ensemble de processus élémentaires (bibliothèque d'opérateurs) que l'utilisateur peut enchaîner pour définir et résoudre ses problèmes.

II.2.2. Historique

Le développement des codes de calcul a évolué de pair avec le matériel informatique. Au départ, les programmes de calcul étaient écrits pour résoudre des problèmes donnés et fonctionnaient généralement en boîte noire.

Trois programmes constituant le noyau du système Cast3M [25] ont été développés au CEA/DMTé il s'agissait d'un programme de maillage, d'un programme de calcul et d'un programme de visualisation des résultats. La multiplicité des problèmes a ensuite conduit à développer des programmes de calcul distincts capables de communiquer entre eux le cas échéant.

Les progrès du matériel informatique ont alors permis de développer de nombreuses fonctions qui réduisaient les temps de préparation des jeux de données. Ainsi, il fallait remettre à niveau tous les codes en répercutant dans chacun les améliorations et corrections effectuées dans l'un d'entre eux. De plus, les jeux de données devenaient de plus en plus compliqués et le post-traitement devait être capable de relire des fichiers différents selon les codes de calcul utilisés. À ces problèmes se sont ajoutés de nouveaux besoins tels que des structures plus complexes mettant en jeu des phénomènes variés et couplés (couplage mécanique-thermique) ou bien intégration des fonctions de maillage dans le processus de calcul (optimisation de forme).

Toutes ces considérations ont conduit à repenser à la base le problème du calcul numérique de manière à développer un code de calcul de nouvelle génération : Cast3M [25].

Contrairement aux anciens codes de calcul, écrits pour résoudre des problèmes donnés et auxquels l'utilisateur doit se plier, Cast3M [25] peut s'adapter aux besoins de l'utilisateur

pour résoudre *ses* problèmes. De plus, Cast3M donne à l'utilisateur la connaissance du problème effectivement posé et des méthodes employées.

II.2.3. Environnement et langage

Le logiciel Cast3M fonctionne sur tout ordinateur PC ou compatible utilisant GNU/Linux, Mac OS, Windows (95 / 98 / ME / NT / 2000 / XP.....). Afin de convertir les informations en entités informatiques par le programme, il faut disposer d'une interface. C'est le langage GIBIANE qui va permettre de communiquer directement avec le programme.

II.2.4. Domaines d'utilisation

- * **Modélisation** : 2D, 3D, poutres, coques, tuyaux, multicouches, éléments joints, etc.
- * **Lois de comportement** :
 - Élastique, linéaire ou non-linéaire, isotrope, cinématique, orthotrope...
 - Plasticité, endommagement, fluage, chocs ...
 - Lois de comportement local et global du béton...
- * **Non-linéarités géométriques** : grands déplacements, grandes déformations, contact, friction, flambage...
- * **Études réalisées** :
 - Analyse statique et dynamique, linéaire ou non-linéaire,
 - Analyse sismique, analyse vibratoire,
 - Flambage Eulerien,
 - Calcul de bifurcations par des méthodes non-linéaires,
 - Calculs thermiques,
 - Couplages thermos-mécaniques.

II.2.5. Organisation d'un calcul

II.2.5.1. Préparation du modèle de calcul

Le modèle de calcul représente l'ensemble des données que doit préparer l'utilisateur pour décrire les caractéristiques complètes du problème à analyser. Il peut être décrit par le schéma suivant de la figure II.2 :

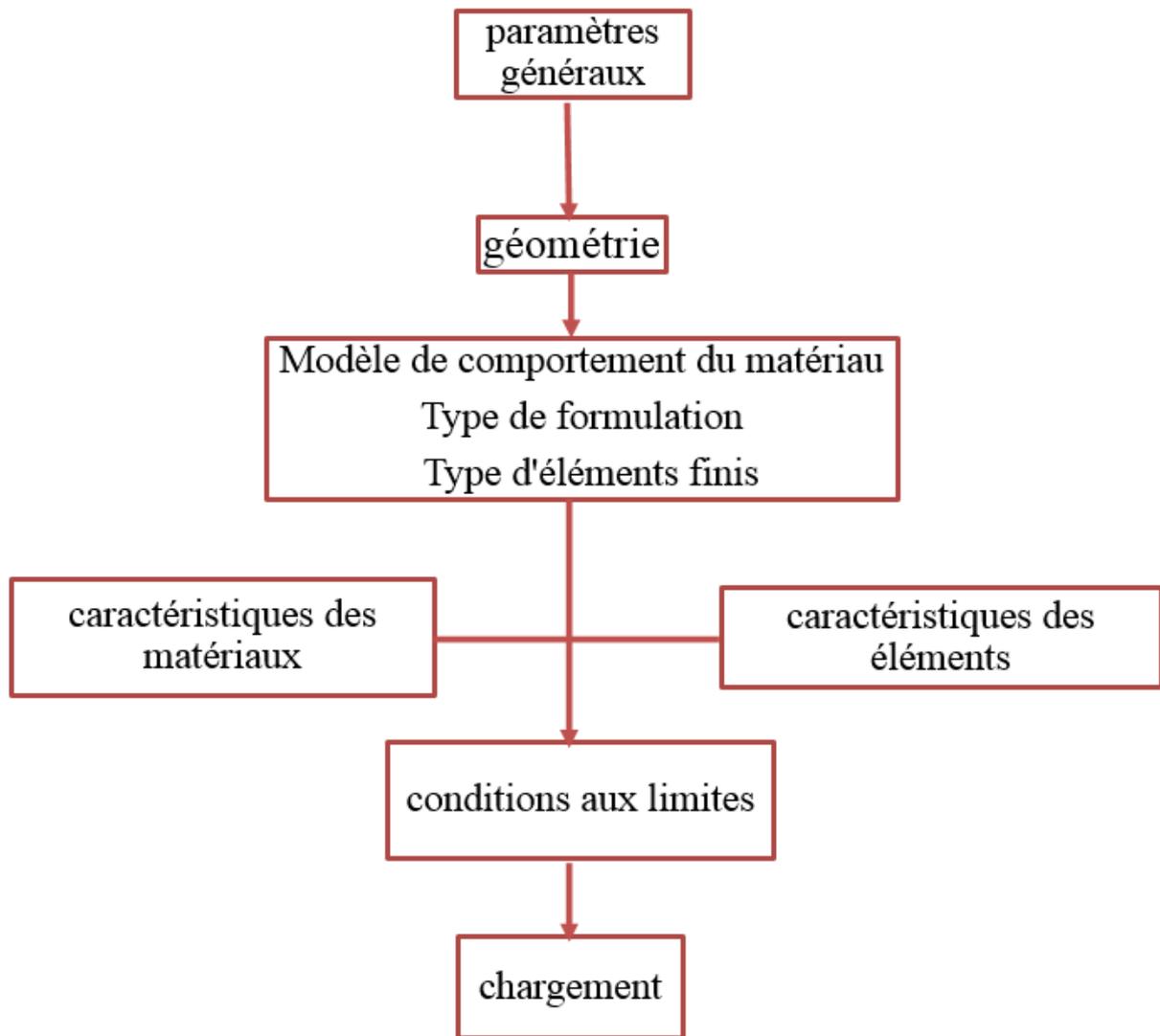


Figure II.2 : Organigramme du modèle de calcul.

- 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 d'éléments finis ainsi que le type d'éléments utilisés.
- Les caractéristiques des matériaux définissent les propriétés physiques des matériaux : module de 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 leurs différentes inerties.

- Les conditions aux limites doivent s'ajouter à la matrice de rigidité.
- Application des chargements externes.

II.2.5.2. Conditions limites et chargement

▪ Conditions limites

Les conditions limites sont traitées dans Cast3M par la méthode des multiplicateurs de Lagrange. Elles s'écrivent sous la forme : $\bar{C} \cdot \bar{u} = \bar{q}$

Elles sont prises en compte dans le système d'équations linéaires d'équilibre en résolvant :

$$\begin{cases} \bar{K} \cdot \bar{u} + \bar{C} \cdot \bar{\lambda} = \bar{F} \\ \bar{C} \cdot \bar{u} = \bar{q} \end{cases}$$

▪ Chargement

La définition du chargement consiste à créer un champ par point correspondant au vecteur du second membre de l'équation : $\bar{K} \cdot \bar{u} = \bar{F}$.

II.2.5.3. Résolution du système d'équations

Une fois réalisée la préparation du modèle de calcul, on peut constituer le système et le résoudre. Il faut donc dans un premier temps calculer les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité.

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

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

$$\bar{K} \cdot \bar{u} = \bar{F}$$

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

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

II.2.5.4. Traitement des résultats

Il s'avère indispensable de traiter les résultats d'une analyse effectuée avec Cast3M. Ce traitement permet le calcul de grandeurs dérivées plus faciles à appréhender ou une visualisation en vue d'une meilleure interprétation des résultats. Deux groupes d'opérateurs sont disponibles à cet effet, l'un étant réservé au post-traitement des données et l'autre à la représentation graphique. Il est ensuite possible de sauvegarder les résultats en vue de les restituer dans des calculs ultérieurs.

Toute analyse générique effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis peut, en réalité, se diviser en 3 phases successives, chacune d'entre elles pouvant, à son tour, être

subdivisée en une série de processus élémentaires. Les phases en question peuvent être décrites comme suite :

Phase1. Définition du modèle mathématique

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

Phase2. Résolution du problème discrétisé

- Calcul des matrices de rigidité et de masse de chaque élément fini.
- Assemblage des matrices de rigidité et de masse de la structure complète.
- Application des chargements externes.
- Application des conditions aux limites.
- Résolution du système d'équations linéaires d'équilibre.

Phase3. Analyse et post-traitement des résultats

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

Les programmes de calcul classiques sont rigoureusement structurés selon cette logique (Voir Figure II.3), chaque phase étant associée à un module déterminé du code :

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

Il apparaît toutefois clairement qu'une structure de ce type exclut toute intervention, de la part de l'utilisateur, dans l'une quelconque de ces phases et ce, dans l'intention d'apporter des modifications répondant à ses propres besoins. Pourtant, une grande souplesse d'utilisation peut s'avérer très utile lorsque les problèmes que l'utilisateur se propose de résoudre sont variés et localisés en différents points du processus de résolution. Ainsi, l'utilisateur pourra se

heurter à de grandes difficultés lorsqu'il s'agira de modéliser de la façon la plus adaptée aux nécessités de l'analyse, la géométrie de la structure, généralement constituée de plusieurs parties très complexes.

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

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

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

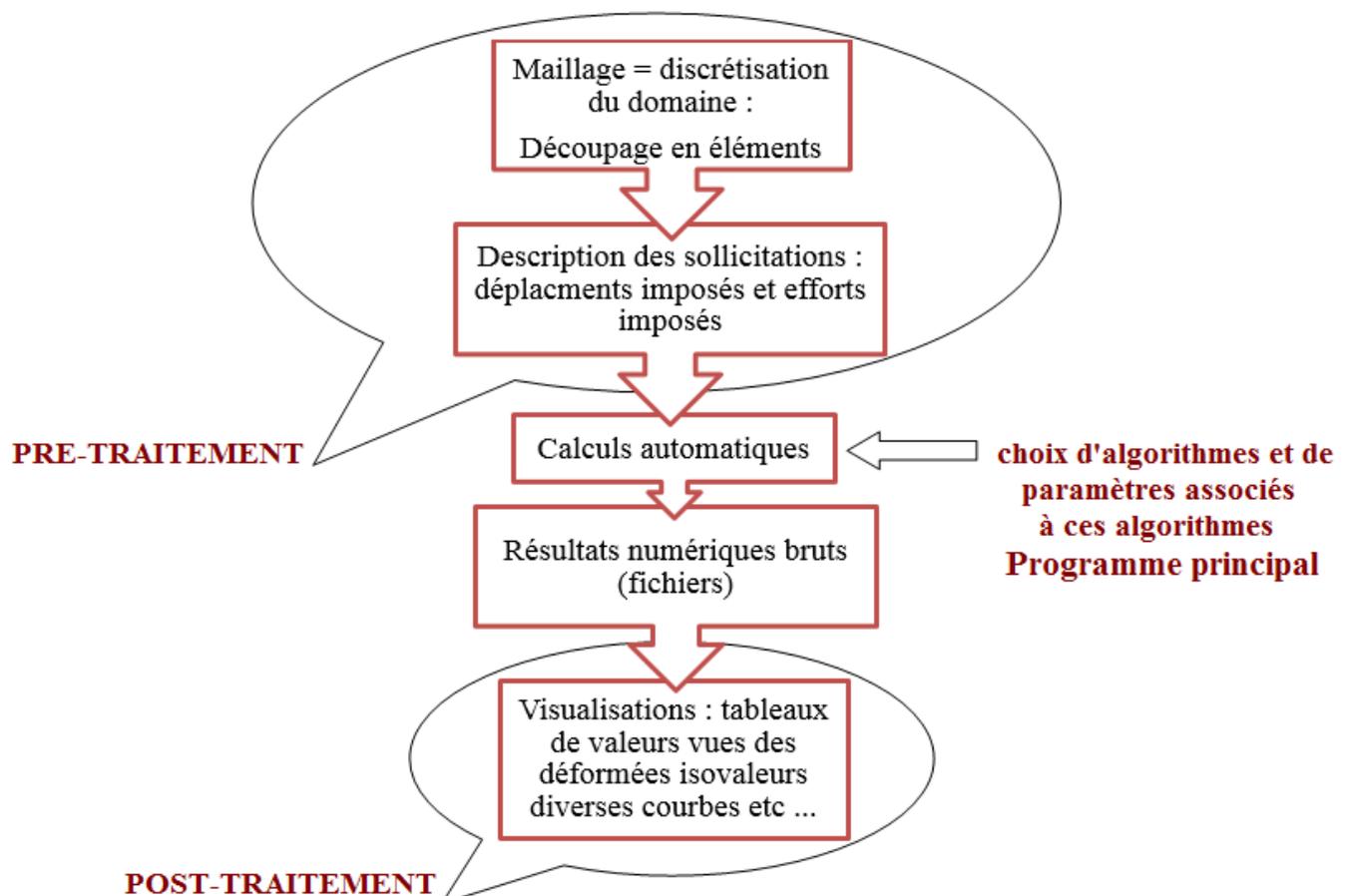


Figure II.3 : Noyau de calcul, pré et post traitements du noyau de calcul.

II.2.6. Possibilités offertes par Cast3M

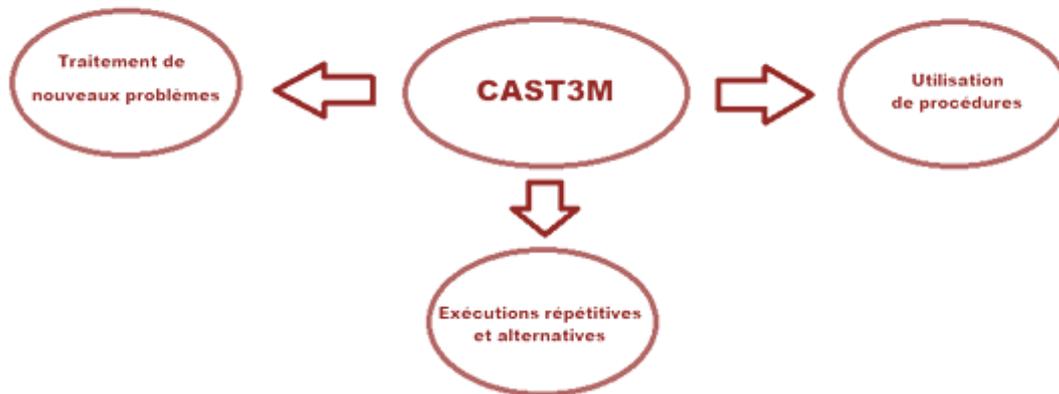


Figure II.4 : Procédures de Cast3M.

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

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

Les procédures présentent les caractéristiques suivantes :

- Elles peuvent être utilisées comme les opérateurs élémentaires.
- Une procédure peut en appeler d'autres et peut s'appeler elle-même.
- Une procédure peut être constituée d'autres procédures.

- La séquence d'opérateurs élémentaires contenue dans une procédure est toujours visible.

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

II.3. Calculs non-linéaires

La procédure PASAPAS est l'opératrice principale de calculs non-linéaires de CAST3M. Cette procédure peut s'utiliser pour des calculs non-linéaires de mécanique ou de thermique ou encore des calculs couplés thermos-mécaniques :

En mécanique, elle effectue un calcul non-linéaire incrémental. La non-linéarité peut provenir soit du matériau (plasticité), soit des grands déplacements, soit des deux à la fois. C'est ça qu'on a besoin pour faire la modélisation mécanique pour prévoir le comportement des poutres cellulaires et les poutres Angelina, à savoir l'influence de l'effet Vierendeel.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation générale sur le code de calcul de logiciel Cast3M.

Dans le chapitre qui suit, nous allons développer un modèle numérique en utilisant le logiciel Cast3M, dont le but de traduire de façon satisfaisante le comportement réel des poutres cellulaires et Angelina dans le domaine non-linéaire à savoir l'étude de l'effet Vierendeel de ces poutres.

**Chapitre - III -
Modélisation mécanique
Et
Choix d'élément fini**

III.1. Introduction

Après avoir donné au chapitre précédent un aperçu sur la présentation du logiciel (Cast3M) [25], nous décrivons dans ce troisième chapitre les détails de l'étude numérique par éléments finis en utilisant ce code de calcul (Cast3M).

D'un point de vue purement numérique, l'intérêt des modèles non-linéaires est de prendre en compte la plasticité (ductilité et écrouissage) du matériau ainsi que la redistribution des contraintes. Néanmoins, le modèle ne doit pas être trop complexe au détriment du temps de calcul.

Dans le cadre de cette recherche, nous allons apporter une attention particulière au choix du maillage et des lois de comportement afin de pouvoir élaborer un modèle numérique non-linéaire fiable, représentatif de la réalité et suffisamment souple pour une étude analytique permettant de prévoir le comportement des poutres cellulaires et les poutres Angelina, à savoir l'influence de l'effet Vierendeel.

Nous présentons ensuite les résultats obtenus à partir d'une simulation numérique effectuée sur des poutres (cellulaires et Angelina) testées expérimentalement afin d'évaluer leur influence sur leurs comportements à l'état non-linéaire.

III.2. Modèle géométrique (Développement d'un modèle numérique)

Dans cette partie, nous proposons les validations des éléments choisis pour représenter la poutre métallique. Le modèle de la poutre métallique est testé en flexion.

Les parois des poutres sont modélisées avec des éléments coques minces à 4 nœuds COQ4 et à 16 degrés de liberté. Les degrés de liberté de ses éléments sont les déplacements u , v et w aux nœuds sommets et une rotation de la normale à la surface moyenne, telle qu'il est illustré sur la figure III.1.

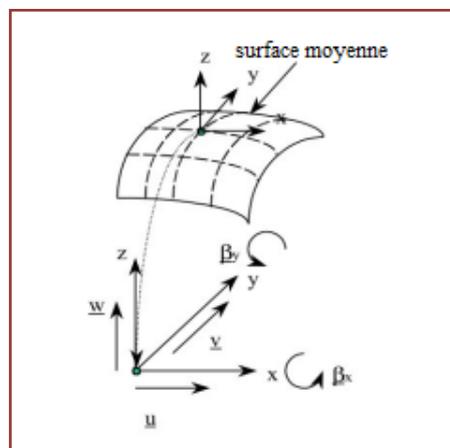


Figure III.1. Élément coque COQ4.

Les sections droites sont modélisées en plaçant les éléments coques à la fibre moyenne de chaque plat formant la section (Voir Figure III.2).

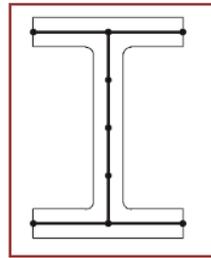


Figure III.2 : Modélisation des sections métalliques.

Ce type de modélisation est envisagé pour représenter la géométrie de la poutre métallique. Cette approche consiste à définir le maillage de la coque dans le plan moyen des semelles. Pour l'exemple, deux sections différentes sont représentées par un modèle dont la hauteur est $(h-t_f)$.

III.3. Conditions aux limites et chargements

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

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 Cast3M [25].

Les conditions aux limites adéquates doivent être appliquées aux nœuds du plan de symétrie, situé à mi- portée (blocage des déplacements longitudinaux).

III.4. Modélisation non-linéaire

D'un point de vue purement numérique, l'intérêt des modèles non-linéaires est de prendre en compte la plasticité (ductilité et écrouissage) du matériau ainsi que la redistribution des contraintes. Néanmoins, le modèle ne doit pas être trop complexe au détriment du temps de calcul.

Nous allons dans ce qui suit apporter une attention particulière au choix du maillage et des lois de comportement afin de pouvoir élaborer un modèle numérique non-linéaire fiable, représentatif de la réalité et suffisamment souple pour une étude paramétrique.

Dans le cadre de ce chapitre, nous proposons un modèle d'éléments finis développé précédemment en utilisant le code Cast3M [25]. Le maillage de la poutre métallique du modèle Cast3M est réalisé avec des éléments de type coque mince à 4 nœuds COQ4.

III.4.1. Loi de comportement de l'acier

Sous sollicitations de tension et de compression, l'acier se comportera linéairement et élastiquement jusqu'aux premières plastifications. Ensuite, il se déformera d'une manière parfaitement plastique jusqu'à apparition des contraintes d'écrouissage. Ce comportement est présenté sur le diagramme de la figure III.3.

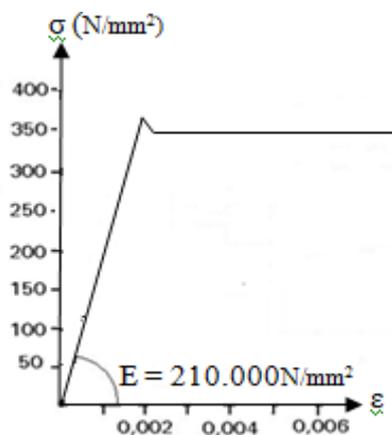


Figure III.3 : Loi de comportement de l'acier.

D'où le tracé de l'idéalisation du comportement de l'acier tel qu'il est supposé pour le dimensionnement des poutres représente une loi de type bilinéaire élastique plastique (Figure III.4) : module de Young $E_a = 210\,000$ MPa.

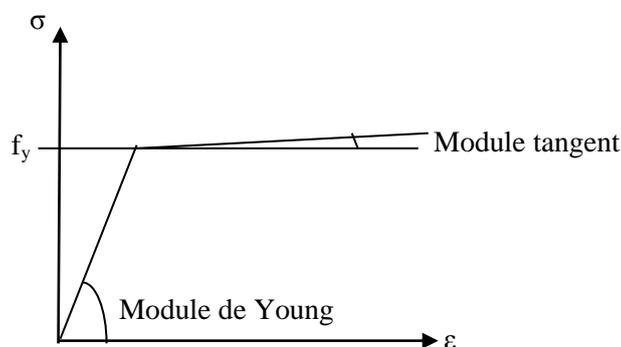


Figure III.4 : Loi de comportement idéalisé de l'acier.

III.4.2. Calibrage des résultats

Afin de confirmer notre choix sur l'élément « COQ4 », nous avons effectué une étude sur l'évolution de la flèche à mi- portée de deux configurations de poutres.

- **Poutres cellulaires**

Il s'agit de deux poutres comportant des ouvertures circulaires régulières testées expérimentalement [26, 12] (Voir Figure III.6 et figure III.8). La première poutre est soumise à l'effet de deux charges concentrées symétriques (Voir Figure III.5) et la seconde poutre est sous l'effet d'une charge concentrée à mi- portée (Voir Figure III.7).

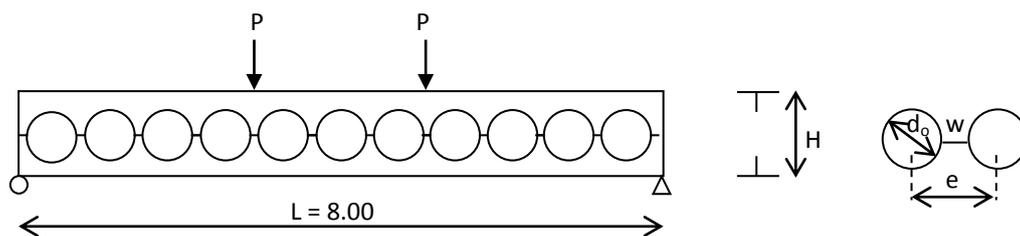


Figure III.5 : Poutre étudiée expérimentalement [26].

Les caractéristiques géométriques de la section et des ouvertures sont données dans le tableau III.1.

Section	Hauteur finale après découpage H (mm)	d_o (mm)	e (mm)	w (mm)
IPEA 450	709	560	700	140

Tableau III.1 : Caractéristiques géométriques [26].

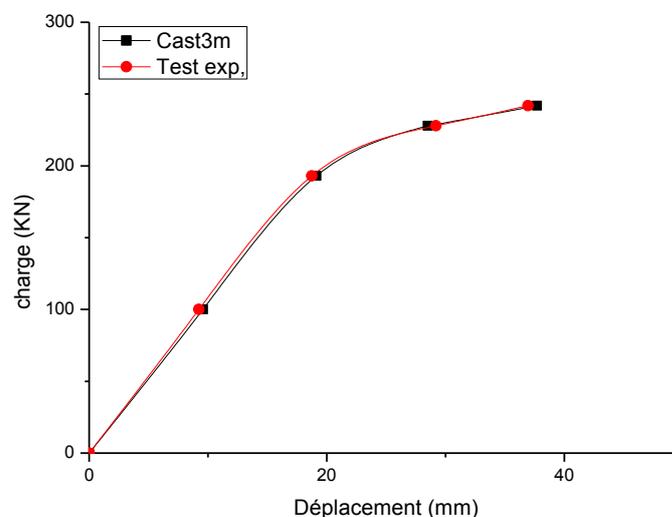


Figure III.6 : Précision du modèle numérique [26].

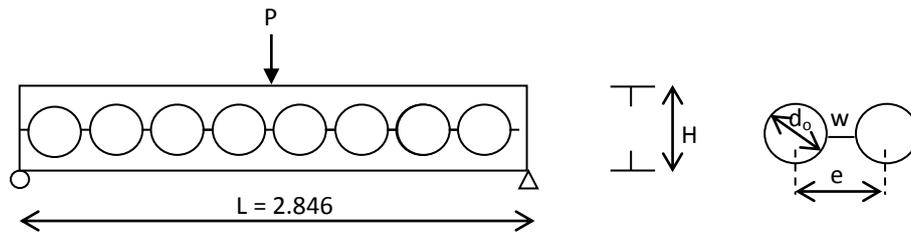


Figure III.7 : Poutre étudiée expérimentalement [12].

Les caractéristiques géométriques de la section et des ouvertures sont données dans le tableau III.2.

Section (mm)	Hauteur finale après découpage H (mm)	d_o (mm)	e (mm)	w (mm)
$b_f = 106$ $t_f = 13.1$ $t_w = 8.7$	355.6	251	345	94

Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques [12].

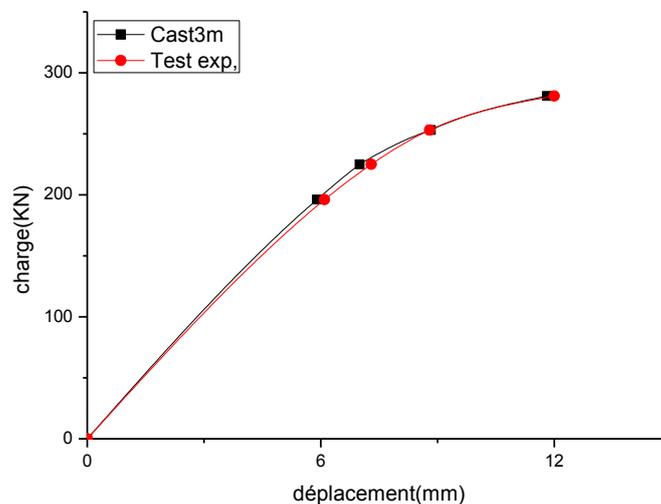


Figure III.8 : Précision du modèle numérique [12].

D'après les deux courbes (Figures III.6 et III.8), la comparaison montre une bonne concordance entre les résultats obtenus numériquement et expérimentalement. Il est à remarquer donc, que la valeur de la hauteur ($h-t_f$) du modèle convient mieux pour ce type de poutre.

- **Poutres Angelina**

Il s'agit de deux poutres comportant des ouvertures sinusoïdales régulières (poutre Angelina) testées expérimentalement [18] (Voir Figure III.10 et Figure III.11). La poutre est soumise à l'effet de deux charges concentrées symétriques (Voir Figure III.9).

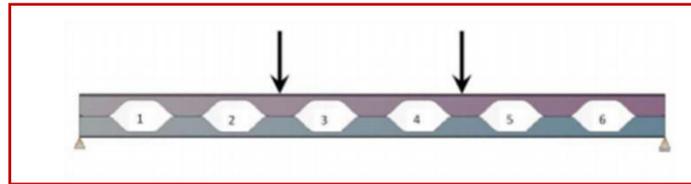


Figure III.9 : Poutre étudiée expérimentalement [18].

Les propriétés mécaniques et les caractéristiques géométriques de la section et des ouvertures sont données dans les deux tableaux III.3 et III.4.

Poutre testée	Limite élastique (MPa)	Résistance ultime (MPa)	Module de young (MPa)
AS012	499	624	450
AS018	468	590	215

Tableau III.3 : Propriétés mécaniques [18].

Poutre testée	Section	Portée entre appuis (m)	Hauteur finale après découpage H (mm)	a (mm)	b (mm)	w (mm)
AS012	IPE 450	10.5	675	450	638	205
AS018	IPE 400	6.7	507.5	215	325	202

Tableau III.4 : Caractéristiques géométriques [18].

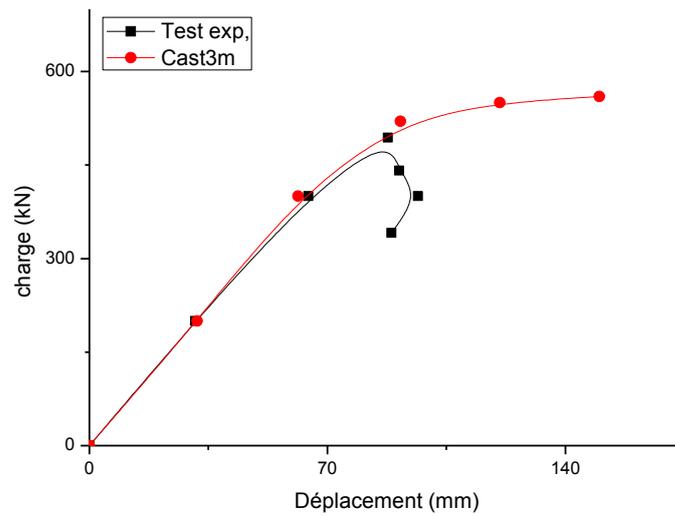


Figure III.10 : Précision du modèle numérique de la poutre AS012.

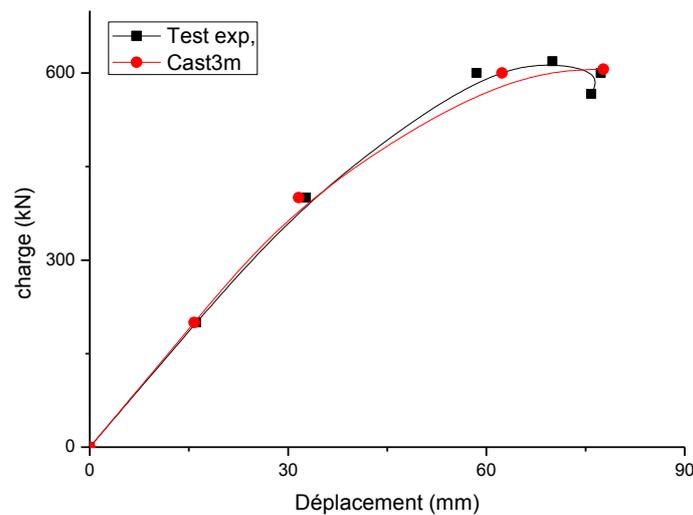


Figure III.11 : Précision du modèle numérique de la poutre AS018.

D'après les deux courbes (Figures III.10 et III.11), la comparaison montre une bonne concordance entre les résultats obtenus numériquement et expérimentalement. Il est à remarquer donc, que la valeur de la hauteur ($h-t_f$) du modèle convient mieux pour ce type de poutre.

III.5. Conclusion

Grâce au modèle 3D, développé ci-haut après en modèles (COQ4), décrits dans ce chapitre, nous avons pu mettre en évidence l'influence de la souplesse du support sur le comportement des poutres cellulaires et les poutres Angelina.

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 le mode de ruine en l'occurrence le mécanisme « Vierendeel » et les charges de ruine correspondantes des poutres cellulaires et Angelina sur appuis simples dans le chapitre suivant.

Chapitre - IV -

**Étude couplée Analytique - Numérique
sur l'effet « Vierendeel »**

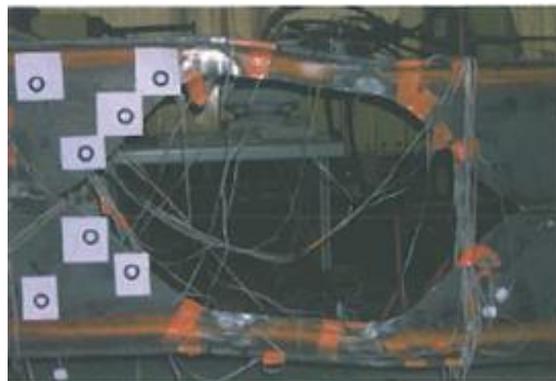
IV.1. Introduction

Un modèle numérique non-linéaire a été défini et validé dans le chapitre précédent par une comparaison avec des résultats expérimentaux. Ce modèle va nous permettre d'étudier le comportement des poutres cellulaires et des poutres Angelina à l'état ultime.

La présence des ouvertures provoque l'apparition d'un mode de ruine spécifique le plus marquant à ce type de poutre qui est la formation de rotule par flexion Vierendeel (Figure IV.1).



Poutre cellulaire [26].



Poutre Angelina [19].

Figure IV.1 : Effet « Vierendeel ».

Notre étude consiste à déterminer la résistance locale au droit des ouvertures des poutres cellulaires et des poutres Angelina, en d'autres termes, estimer la capacité portante ultime associée à ce mode de ruine au niveau des ouvertures en l'occurrence l'effet « Vierendeel » dont le but de mener à bien une étude comparative permettant de déduire dans laquelle des deux types de poutres l'effet Vierendeel est plus marquant.

IV.2. Plastification locale par l'effet Vierendeel

L'objectif de cette étude est de prédire le comportement de ruine de deux configurations pour chacune de ces deux types de poutres (Cellulaires et Angelina), l'une comportant un nombre impair d'ouverture et l'autre comportant un nombre pair d'ouverture, sous l'effet d'un chargement transversal. A cet effet une analyse non-linéaire a été effectuée sur la plastification locale par l'effet Vierendeel.

Il est à noter que le chargement du modèle est réalisé par un déplacement imposé à mi-portée des poutres.

IV.2.1. Localisation de la section critique

Le mécanisme « Vierendeel » est toujours critique dans la section la plus sollicitée au niveau de l'ouverture où le développement d'une rotule plastique est entraîné par ces sollicitations.

- **Poutres cellulaires**

Pour le cas des poutres cellulaires, cette section critique est localisée au niveau des Tés inclinés d'un angle ϕ ($15^\circ < \phi < 25^\circ$) [27] par rapport à l'axe vertical de l'ouverture (Figure IV.2).

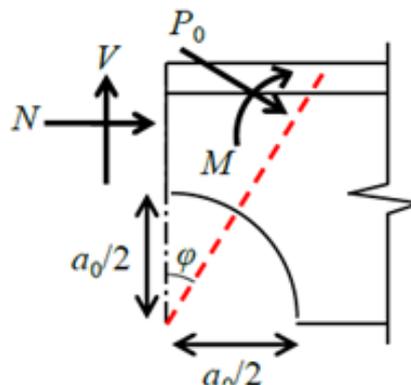
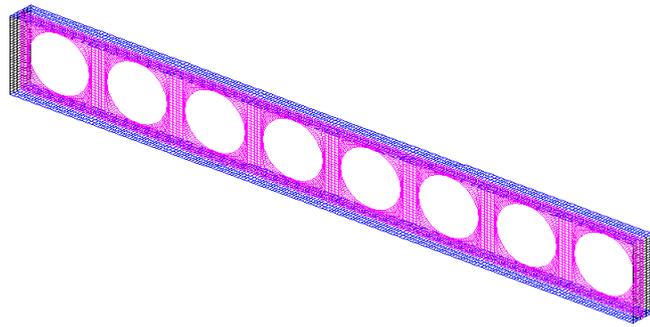
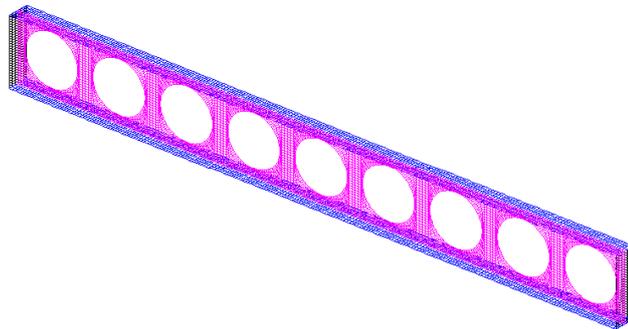


Figure IV.2 : Section critique en flexion Vierendeel.

Afin de confirmer la localisation de la section critique (ϕ variant entre 15° et 25°) au niveau de laquelle l'effet Vierendeel est marquant, une comparaison a été faite pour trois valeurs d'angle d'inclinaison du Té ($\phi = 15^\circ$; $\phi = 20^\circ$ et $\phi = 25^\circ$) au niveau de la quatrième ouverture pour deux configurations des poutres cellulaires (Figure IV.3), l'une comportant 8 ouvertures et l'autre comportant 9 ouvertures, sous l'effet d'un chargement progressif (Voir tableau IV.1).



a- Poutre cellulaire à 8 ouvertures.



b- Poutre cellulaire à 9 ouvertures.

Figure IV.3 : Configurations des poutres cellulaires.

Poutres	Charge ultime (kN)	Angle d'inclinaison (ϕ)		
		15 °	20 °	25°
Poutre avec 8 ouvertures	242.23	17.17	17.29	17.50
Poutre avec 9 ouvertures	192.07	11.91	12.02	12.20

Tableau IV.1 : Valeurs de la flèche pour différentes sections critiques.

D'après les valeurs obtenues dans le tableau IV.1, on remarque que pour les deux configurations des poutres cellulaires, la résistance au cisaillement est plus importante au niveau de la section critique localisée pour la valeur d'angle d'inclinaison ($\phi = 25^\circ$). Elle est de 242.23 kN pour le cas où le nombre d'ouvertures est pair et elle est de 192.07 kN pour le cas où le nombre d'ouvertures est impair ; cela veut dire que les poutres sans ouverture à mi-portée sont plus résistantes que celles avec ouverture à mi-portée.

• Poutres Angelina

Pour le cas des poutres « Angelina », la section critique au niveau des Tés n'est pas connue, elle n'est indiquée par aucun règlement ou norme européenne. Dans ce contexte, il s'est avéré utile de donner un aperçu sur le comportement mécanique de ces poutres dont le but de pouvoir s'orienter vers une telle analyse permettant la localisation de la section critique due à l'effet Vierendeel au niveau des Tés supérieurs de la poutre « Angelina ».

Le comportement mécanique d'une poutre Angelina peut s'apparenter à celui d'une poutre alvéolaire. En effet, l'ouverture sinusoïdale peut s'apparenter à un cercle ou à un hexagone suivant la valeur des paramètres définissant sa géométrie. Ainsi, le même schéma de fonctionnement de poutre échelle s'applique à cette poutre cellulaire. La vérification autour d'une ouverture s'effectue en isolant une partie de celle-ci et en discrétisant les efforts globaux dans ses différents quarts, à partir de l'hypothèse du point d'inflexion au droit de l'ouverture. Ainsi, pour une ouverture soumise à un moment global et un effort tranchant global, les efforts se discrétisent tels que décrits par la figure IV.4.

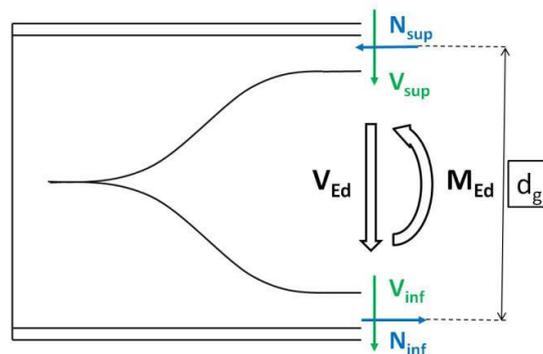


Figure IV.4 : Distribution des efforts globaux au droit d'une ouverture sinusoïdale.

Chaque quart d'ouverture est ensuite vérifié en fonction des sollicitations qui lui sont attribuées. La figure IV.5 présente l'exemple de sollicitations locales du quart d'ouverture de la membrure supérieure de l'ouverture illustrée (Figure IV.4).

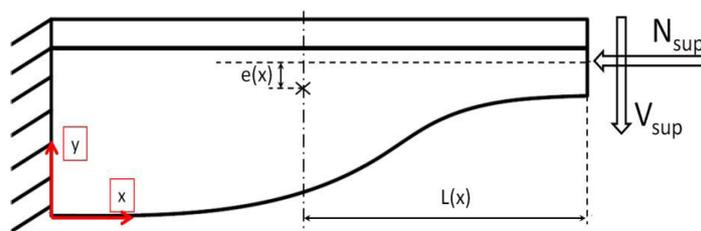


Figure IV.5 : Vérification d'une section en té située à l'abscisse x sur un quart d'ouverture.

Cette forme d'ouverture qui se rapproche de la large ouverture peut être abordée avec les mêmes principes mécaniques. Les modes de ruine attendus pour ce genre de poutre sont :

- Flexion Vierendeel,
- Flexion globale,
- Cisaillement global,
- Cisaillement horizontal du montant.

Le flambement du montant intermédiaire, comme observé sur les poutres alvéolaires ou cellulaires, n'a que peu de chances d'apparaître pour le cas d'ouvertures sinusoïdales. En effet, les études expérimentales et numériques menées sur les poutres cellulaires ont montré que les cas de flambement de montant ne concernaient que les ouvertures peu espacées, avec une faible largeur de montant. Cependant, le processus de conception des poutres à ouvertures sinusoïdales implique un montant large ce qui écarte toute possibilité de flambement de montant à l'identique des poutres cellulaires.

Ce type de poutre propose des tailles d'ouvertures conséquentes, ce qui pose principalement le problème de résistance à la flexion Vierendeel induite par le transfert du cisaillement autour de l'ouverture.

Pour les ouvertures sinusoïdales, comme l'ouverture est plus allongée que le cercle, le choix s'est alors porté sur la vérification des sections verticales suivant leurs abscisses x par pas unitaire.

Chaque section est ainsi sollicitée en flexion composée et la résistance est vérifiée de manière incrémentale, telle que le moment appliqué $M_{V,Ed}$, dans une section en Té donnée, soit inférieur à son moment résistant avec prise en compte de l'effort normal :

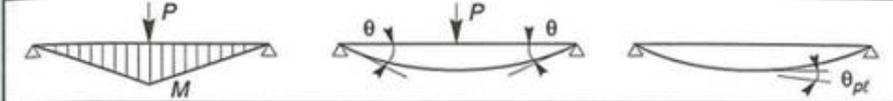
$$M_{V,Ed} = V_{sup} \cdot L(x) - N_{sup} \cdot e(x)$$

Avec, $e(x)$: excentrement des centres de gravité entre le petit Té où est appliqué l'effort N_{sup} et le Té à l'abscisse x considéré.

L'approche de calcul de résistance retenue dans cette étude, s'appuie sur la résistance des sections en Té comme pour les sections circulaires. Pour déterminer la résistance de ces sections, les démarches des Eurocodes sont retenues comme les définitions des classes de sections.

L'Eurocode3 a instauré une classification des sections transversales, en fonction de critères divers :

- Élançement des parois.
- Résistance de calcul.
- Capacité de rotation plastique.
- Risque de voilement local.



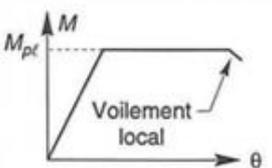
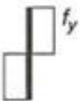
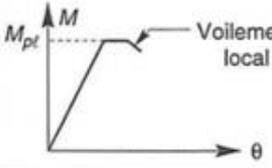
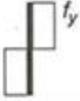
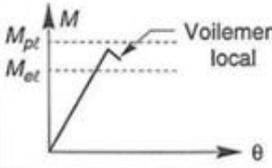
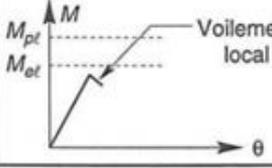
Classe	Modèle de comportement	Résistance de calcul	Capacité de rotation plastique
1		Plastique sur section complète 	Importante
2		Plastique sur section complète 	Limitée
3		Élastique sur section complète 	Aucune
4		Élastique sur section efficace 	Aucune

Figure IV.6 : Classes des sections transversales l'Eurocode 3 [EN3-1-1].

Quatre classes de sections ont été définies, allant de la section 1 (la plus performante) à la section 4 (la plus fragile), soit :

- Classe 1** : sections transversales pouvant atteindre leur résistance plastique, sans risque de voilement local, et possédant une capacité de rotation importante pour former une rotule plastique.
- Classe 2** : sections transversales pouvant atteindre leur résistance plastique, sans risque de voilement local, mais avec une capacité de rotation limitée.

- **Classe 3** : sections transversales pouvant atteindre leur résistance élastique en fibre extrême, mais non leur résistance plastique, du fait des risques de voilement local.
- **Classe 4** : sections transversales ne pouvant atteindre leur résistance élastique, du fait des risques de voilement local.

La résistance de ces sections en T le long d'une ouverture, est vérifiée dans chaque quart d'ouverture. Les résistances des différents Tés analysés sont calculées en s'inspirant des démarches de l'Eurocode 3. Celui-ci s'appuie sur la notion de classes de sections pour calculer les résistances élastiques ou plastiques sous des sollicitations de type flexion ou flexion composée. Cependant, dans l'Eurocode, les parois à bord libre sont celles des semelles des poutres en I ou H ou des âmes des sections en T issues de profilés laminés à chaud. Ainsi, adapter directement le critère de l'Eurocode revient à classifier les parois d'âme le long de l'ouverture comme des parois en console avec un bord attaché à la semelle et un bord libre du côté de l'ouverture (Voir Figure IV.7).

Classe	Paroi comprimée	Paroi fléchie et comprimée				
		Extrémité comprimée	Extrémité tendue			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Pour k_σ , voir l'EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y (N/mm ²)	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Figure IV.7 : Classification d'une paroi en console suivant l'Eurocode 3 [EN3-1-1].

En première approche, l'adaptation des classifications fournies par la norme européenne [EN3-1-1] est décrite à la figure IV.7. Ainsi, le quart d'ouverture est parcouru du plus petit Té, au milieu de l'ouverture, jusqu'au Té le plus grand situé près du montant symbolisé par des hachures sur la figure IV.5. Cependant, sous moment positif (fibres du bord libre comprimées), les sections se retrouvent rapidement de classe 4 (Figure IV.6).

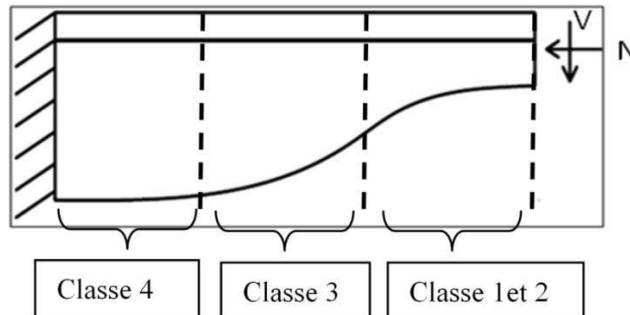


Figure IV.8 : Classification de l'âme du quart d'ouverture.

Il apparaît que la simple application des approches de l'Eurocode au quart d'ouverture considéré peut impliquer une forte sous-estimation de la résistance réelle. En effet, dans cette classification, le maintien hors plan probablement assuré par le montant intermédiaire (représenté par des hachures sur la Figure IV.8) n'est pas pris en compte et chaque té est considéré maintenu seulement au niveau de la semelle de la poutre. Car si les hachures représentent le montant adjacent, il est possible d'imaginer que celui-ci apporte une certaine rigidité hors plan aux sections qui lui sont proches.

Dans le contexte actuel qui consiste sur la localisation de la section critique au niveau de laquelle l'effet Vierendeel est marquant au niveau d'une ouverture sinusoïdale, il nous a paru intéressant d'effectuer une analyse numérique, basant sur l'idée d'une approche par sections angulaires au niveau de la section est de classe 1 et 2. Le pourquoi de cette idée, peut être justifié par le fait que la forme finale d'une poutre « Angelina » a été obtenue après transformation graduelle d'une poutre cellulaire ACB classique (la transformation de l'ouverture circulaire en ouverture sinusoïdale, Voir Figure IV.9).

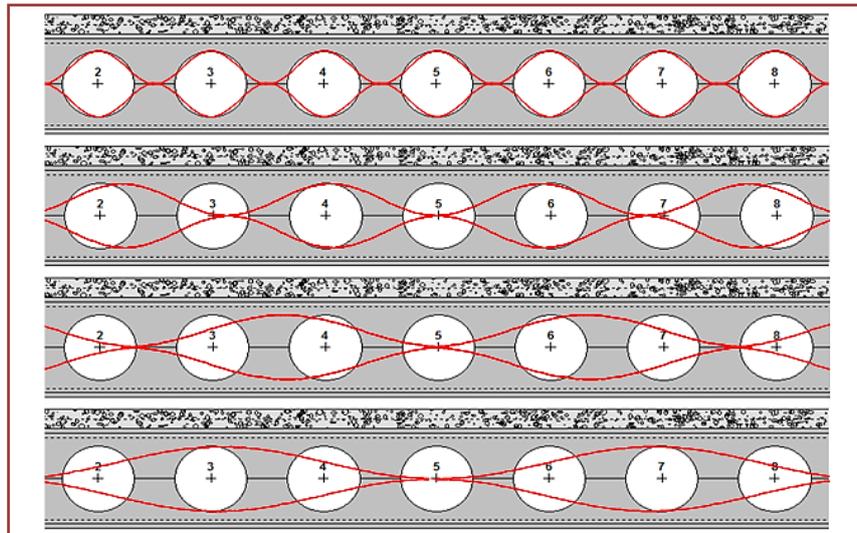


Figure IV.9 : Passage de l'ACB à l' « Angelina ».

Cette étude ne pourra commencer qu'en se basant principalement sur les résultats obtenus par éléments finis. A cet effet nous déterminons tout d'abord l'expression de la distance x_{cr} du centre de l'ouverture à la section critique qui se trouve dans l'endroit de classe 1 et 2, tout en proposant un modèle d'ouverture circulaire équivalente dans le cas d'ouverture sinusoïdale (l'idée d'une approche par sections angulaires), car il est à supposer que la ruine survient pour une position souvent similaire à un angle variant entre 15° et 25° d'après la Figure IV.10.

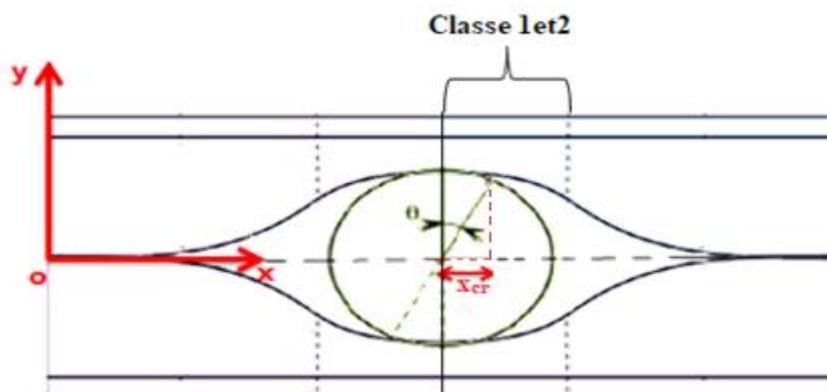
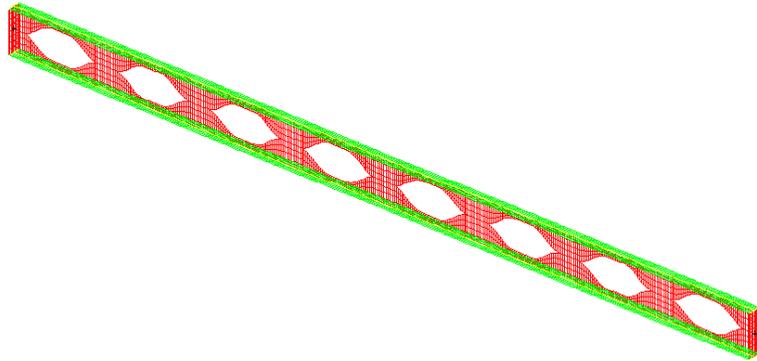


Figure IV.10 : Section critique en flexion Vierendeel.

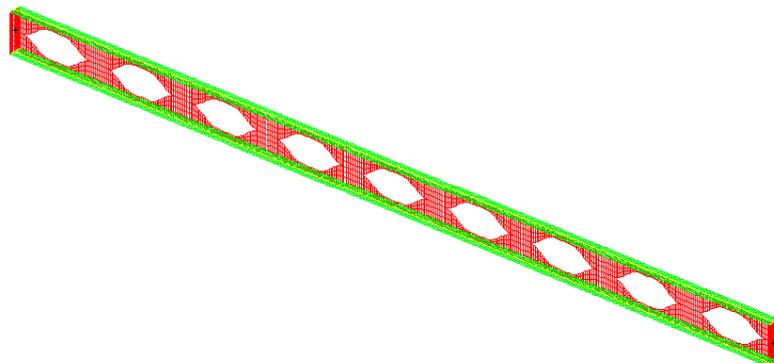
La distance x_{cr} du centre de l'ouverture à la section critique est donnée par l'expression suivante :

$$x_{cr} = \frac{a}{2} \sin \phi$$

Afin de localiser la section critique au niveau de laquelle l'effet Vierendeel est marquant dans la partie où la section est de classe 1 et 2, une comparaison a été faite pour trois valeurs d'angle d'inclinaison du Té ($\phi = 15^\circ$; $\phi = 20^\circ$ et $\phi = 25^\circ$) au niveau de la quatrième ouverture pour deux configurations des poutres Angelina (Figure IV.11), l'une comportant 8 ouvertures et l'autre comportant 9 ouvertures, sous l'effet d'un chargement progressif (Voir tableau IV.2).



a- Poutre Angelina à 8 ouvertures.



b- Poutre Angelina à 9 ouvertures.

Figure IV.11 : Configurations des poutres Angelina.

Poutres	Charge ultime (kN)	Angle d'inclinaison (ϕ)		
		15 °	20 °	25 °
Poutre avec 8 ouvertures	167.27	5.81	5.84	5.87
Poutre avec 9 ouvertures	139.73	5.28	5.30	5.32

Tableau IV.2 : Valeurs de la flèche pour différentes sections critiques.

D'après les valeurs obtenues dans le tableau IV.2, on remarque que pour les deux configurations des poutres Angelina, la résistance au cisaillement est plus importante au niveau de la section critique localisée pour la valeur d'angle d'inclinaison ($\phi = 25^\circ$). Elle est de 167.27 kN pour le cas où le nombre d'ouvertures est pair et elle est de 139.73 kN pour le cas où le nombre d'ouvertures est impair ; cela veut dire que les poutres sans ouverture à mi-portée sont plus résistantes que celles avec ouverture à mi- portée.

IV.2.2. Analyse numérique

Dans cette section une étude comparative a été effectuée entre deux types de poutre, à savoir les poutres Angelina et les poutres cellulaires, afin de montrer dans lequel de ces deux types de poutres l'effet Vierendeel est le plus prononcé.

A cet effet, une analyse non-linéaire a été effectuée sur la plastification locale par l'effet Vierendeel, tout en étudiant quelques paramètres, à savoir l'influence de la portée, du nombre d'ouvertures, de la section et de la nuance de la poutre sur le comportement de celle-ci.

Les deux configurations des poutres étudiées ont des caractéristiques géométriques et propriétés physiques différentes.

IV.2.2.1. Influence de la portée de la poutre sur l'effet Vierendeel

Dans ce paragraphe, nous allons étudier l'influence de la portée de la poutre sur l'effet Vierendeel, en faisant varier la portée et garder la même section (IPE400) pour différentes nuances d'acier.

Cette étude représente la variation de la charge en fonction du déplacement au niveau de la section critique de l'ouverture qui se trouve proche à mi- portée de la poutre pour deux portées différentes ($L = 7.98$ m et $L = 9.31$ m).

Les graphes des figures ci-dessous (Figures IV.13 et IV.15) montrent le comportement non-linéaire de deux configurations de poutres (Figures IV.12 et IV.14), une poutre cellulaire dénommée PC et une poutre Angelina dénommée PA.

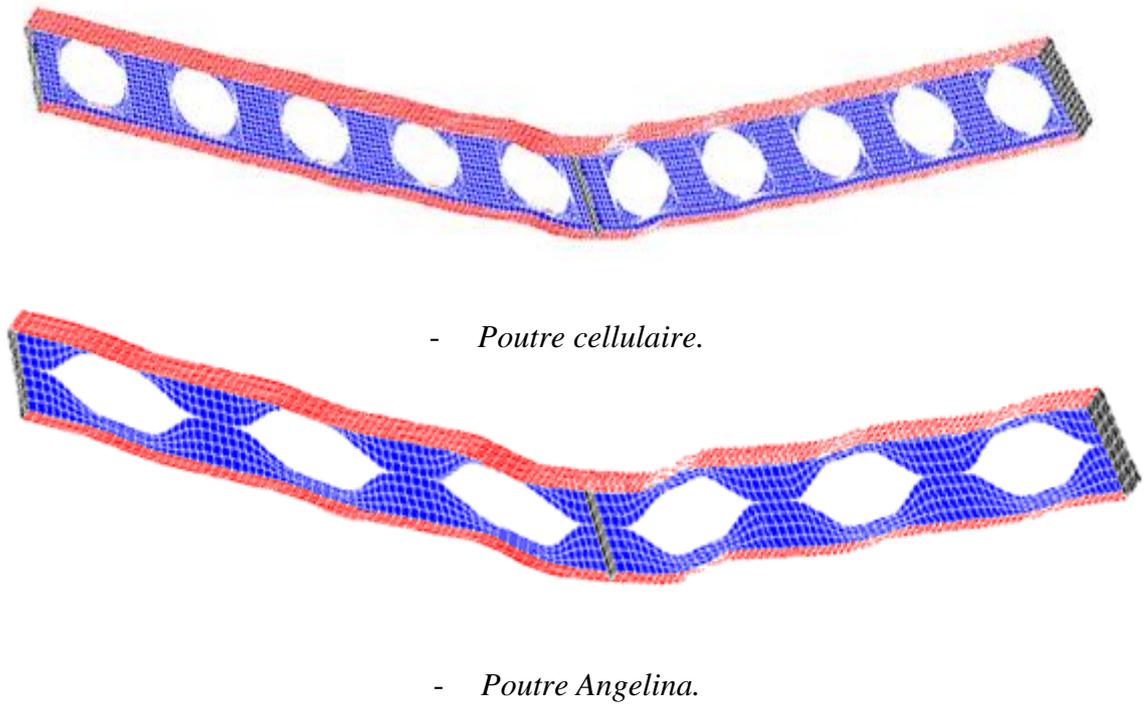
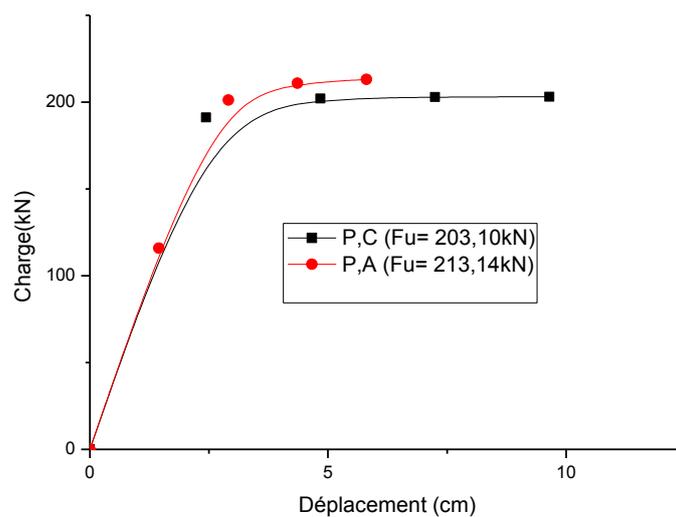
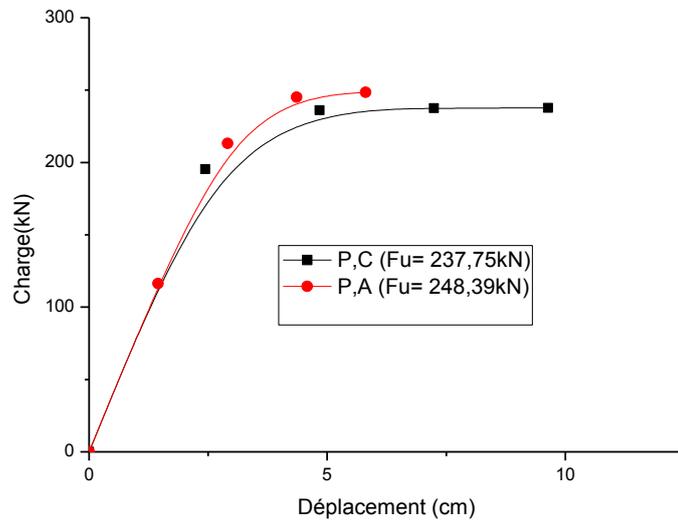


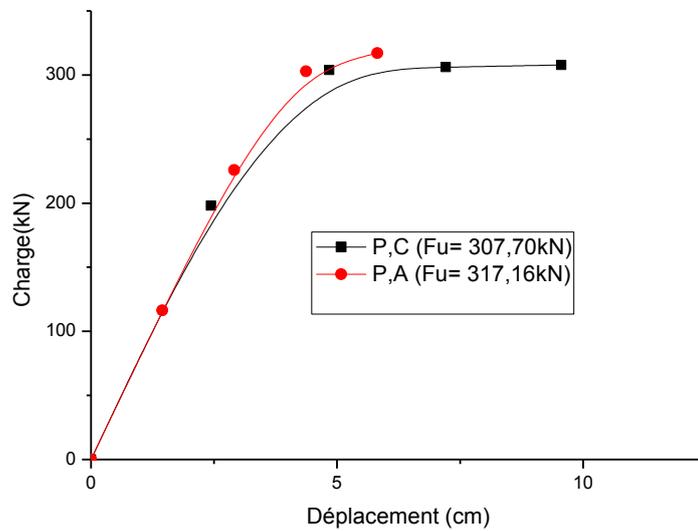
Figure IV.12 : Déformée des poutres étudiées de portée $L = 7.98\text{m}$.



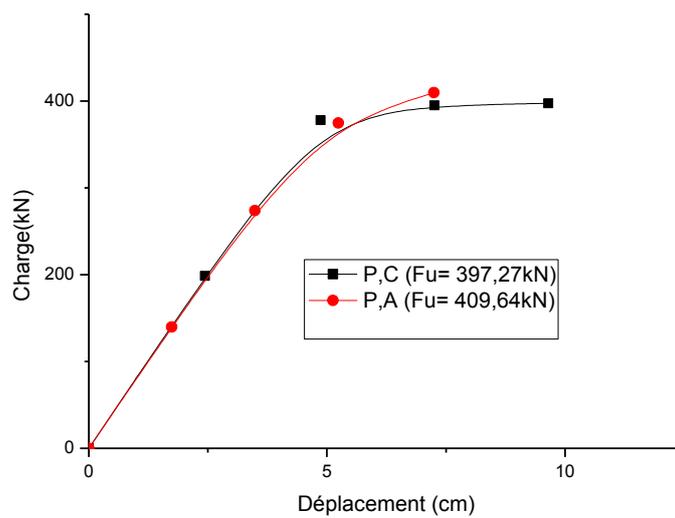
a- Poutres de nuance d'acier S235.



b- Poutres de nuance d'acier S275.



c- Poutres de nuance d'acier S355.



d- Poutres de nuance d'acier S460.

Figure IV.13 : Comportement non-linéaire des deux poutres étudiées de portée $L = 7.98m$.

D'après les résultats obtenus selon les courbes de la figure IV.13, il est à remarquer que la charge ultime produisant ce mode de ruine en l'occurrence la plastification locale par l'effet Vierendeel au niveau de la section critique de l'ouverture centrale (l'ouverture qui se trouve proche à mi- portée de la poutre) de la poutre Angelina (PA) est légèrement grande que celle de la poutre cellulaire (PC), quelle que soit la nuance d'acier envisagée.

Il est également à observer que l'effet Vierendeel, s'est produit sous l'effet des charges ultimes de valeurs proches dont l'écart de différence est d'ordre 3 à 5 %.

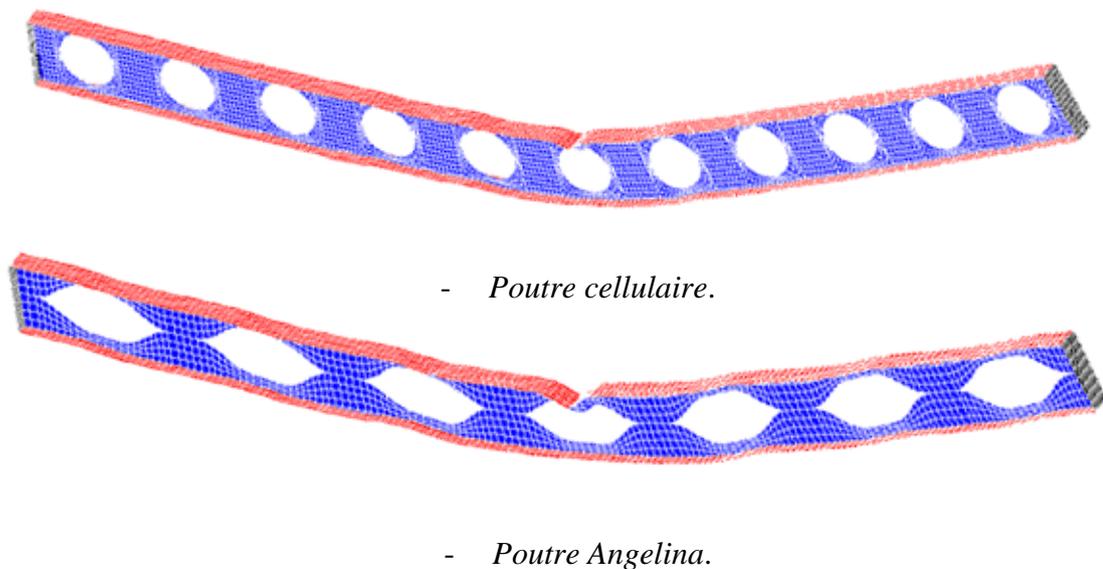
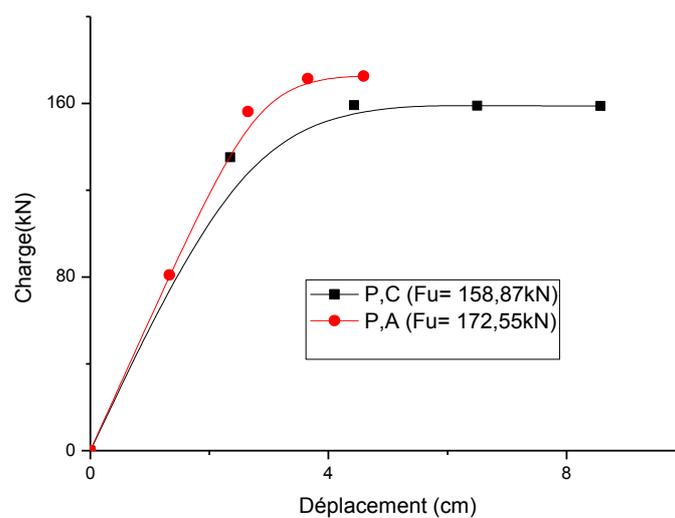
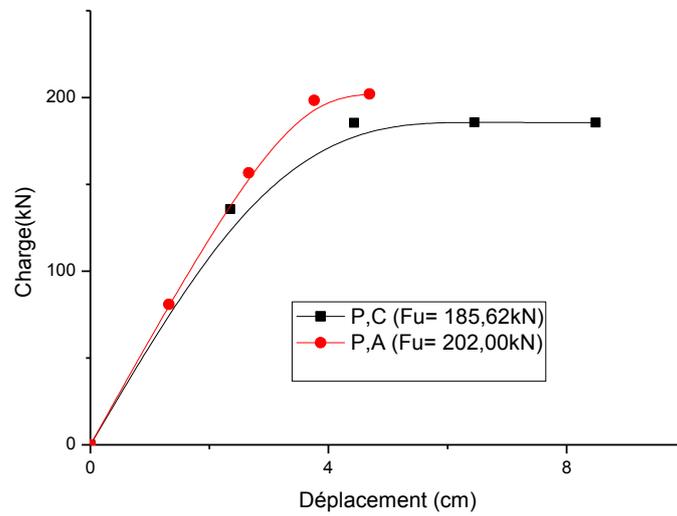


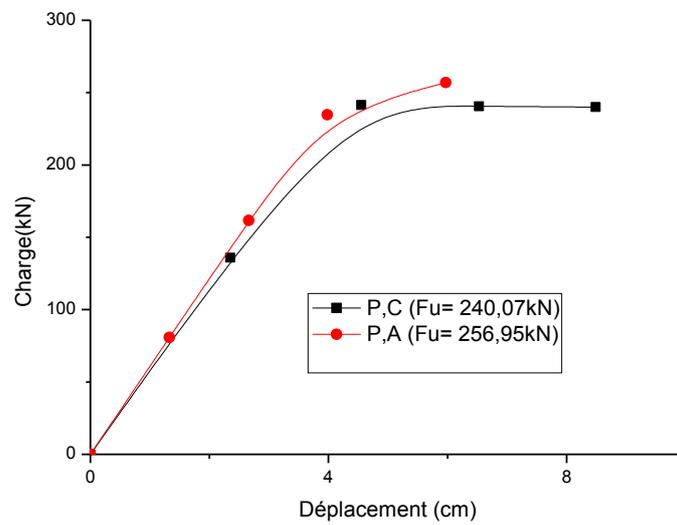
Figure IV.14 : Déformée des poutres étudiées de portée $L = 9.31$.



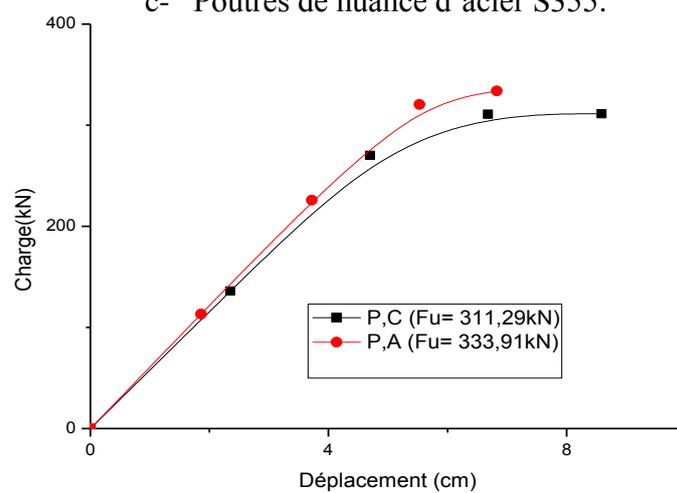
a- Poutres de nuance d'acier S235.



b- Poutres de nuance d'acier S275.



c- Poutres de nuance d'acier S355.



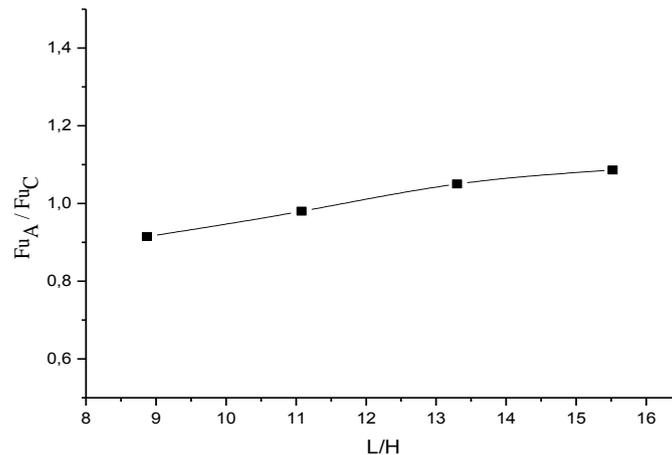
d- Poutres de nuance d'acier S460.

Figure IV.15 : Comportement non-linéaire des deux poutres étudiées de portée L = 9.31m.

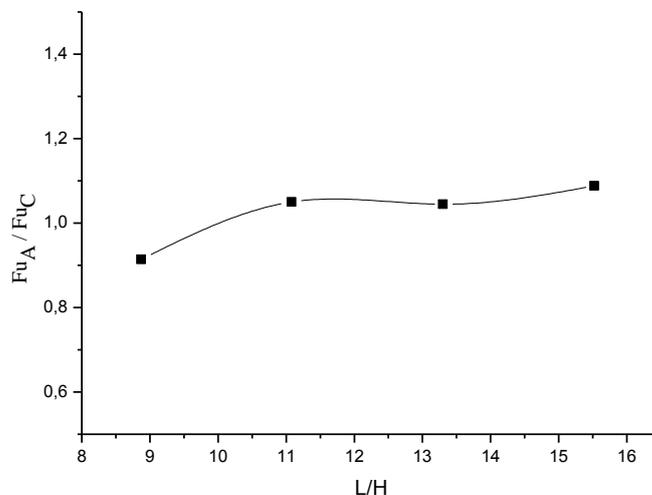
De même d'après les résultats obtenus selon les courbes de la figure IV.15, il est à remarquer que la charge ultime produisant ce mode de ruine en l'occurrence la plastification locale par l'effet Vierendeel au niveau de la section critique de l'ouverture centrale (l'ouverture qui se trouve proche à mi- portée de la poutre) de la poutre Angelina (PA) est légèrement grande que celle de la poutre cellulaire (PC), quelle que soit la nuance d'acier envisagée.

Il est également à observer que l'effet Vierendeel, s'est produit sous l'effet des charges ultimes de valeurs proches dont l'écart de différence est d'ordre 7 à 8 %.

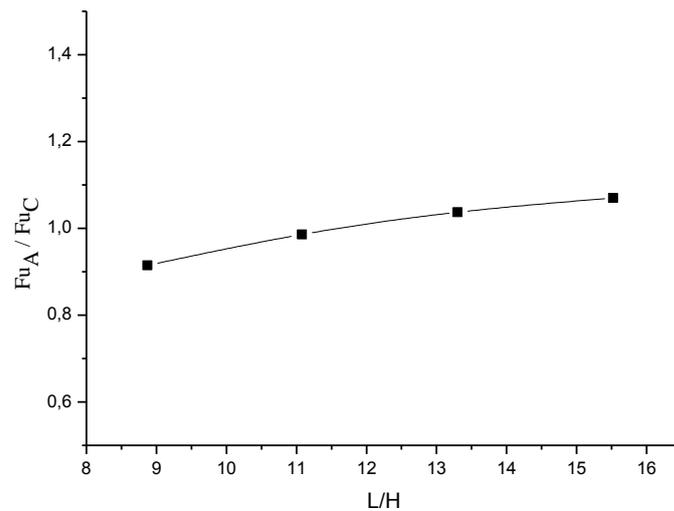
Pour une meilleure analyse sur l'influence de la portée de la poutre vis-à-vis l'effet Vierendeel, une comparaison de résultats est établie dans (les Figures IV.16), entre les valeurs des rapports de la charge ultime obtenus (F_{uA} / F_{uC}) en fonction des hauteurs croissantes (L/H) pour les deux configurations de poutres fabriquées en IPE400 pour différentes nuances d'acier.



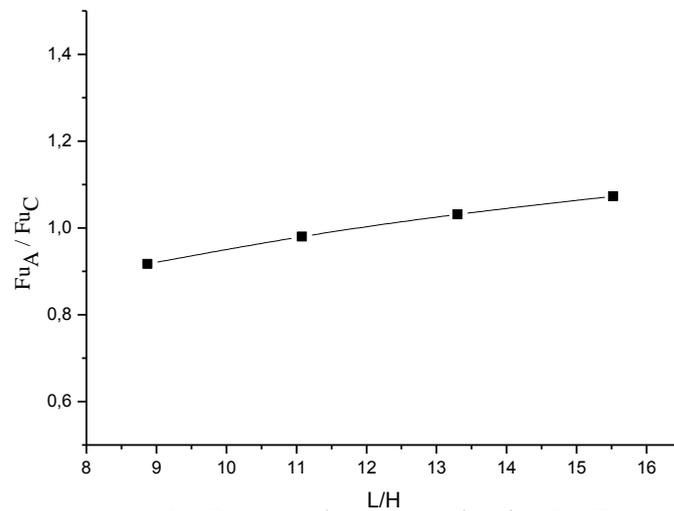
a- Poutres de nuance d'acier S235.



b- Poutres de nuance d'acier S275.



c- Poutres de nuance d'acier S355.



d- Poutres de nuance d'acier S460.

Figure IV.16 : Rapports de charge ultime (F_{uA} / F_{uC}) en fonction de (L / H).

A partir des résultats donnés dans les figures IV.16, il est bien remarqué que les valeurs de la charge ultime obtenues des poutres Angelina sont proches à celles obtenues des poutres cellulaires, il est clair que l'écart de différence maximal est d'environ de 9 %.

IV.2.2.2. Influence du nombre d'ouvertures sur l'effet Vierendeel

Dans cette section, nous avons étudié la plastification locale par l'effet Vierendeel due à l'influence du nombre d'ouvertures des deux configurations des poutres cellulaires et Angelina.

Les mesures numériques sont prises sur la valeur de la charge ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » au niveau de la section critique de l'ouverture qui se trouve proche de la partie centrale des deux configurations de poutres, en faisant varier le nombre d'ouvertures et garder la même section (profilés IPE400, IPE500 et IPE600) pour différentes nuances (Voir tableaux ci-dessous).

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	260,887	214,931
7 Ouvertures	207,7508	179,954
8 Ouvertures	259,08	173,646
9 Ouvertures	198.348	148,584

Tableau IV.3 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de nuance d'acier S235.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	302,243	325,626
7 Ouvertures	291,281	265,478
8 Ouvertures	316.825	255.769
9 Ouvertures	289.328	220.303

Tableau IV.4 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de nuance d'acier S235.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	397,55	481,283
7 Ouvertures	371,01	376,668
8 Ouvertures	385,383	365,763
9 Ouvertures	364,158	307,458

Tableau IV.5 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de nuance d'acier S235.

D'après les valeurs obtenues selon les tableaux (IV.3 à IV.5) ci-dessus, il est à constater que plus le nombre des ouvertures augmente et moins elle est la charge ultime naissant le mécanisme « Vierendeel » dans les deux configurations de poutres de nuance d'acier S235.

Il est également à constater que, l'effet Vierendeel est plus marquant dans les poutres Angelina que dans les poutres cellulaires, celui-ci est interprété par le fait que la charge ultime produisant le mécanisme « Vierendeel » est plus grande dans les poutres cellulaires que celle dans les poutres Angelina.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	305,671	251,013
7 Ouvertures	243,074	210,307
8 Ouvertures	303,245	203,314
9 Ouvertures	229,324	173,68

Tableau IV.6 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de nuance d'acier S275.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	377,892	380,883
7 Ouvertures	341,826	310,037
8 Ouvertures	370.834	299.305
9 Ouvertures	310.517	257.772

Tableau IV.7 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de nuance d'acier S275.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	465,623	564,827
7 Ouvertures	434,254	440,456
8 Ouvertures	450,929	427,856
9 Ouvertures	425,979	360,013

Tableau IV.8 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de nuance d'acier S275.

De même pour le cas des deux configurations de poutres de nuance d'acier S275, il est à constater d'après les valeurs obtenues selon les tableaux (IV.6 à IV.8) ci-dessus, que plus le nombre des ouvertures augmente et moins elle est la charge ultime naissant le mécanisme « Vierendeel ».

Il est également à constater que, l'effet Vierendeel est plus marquant dans les poutres Angelina que dans les poutres cellulaires, celui-ci est interprété par le fait que la charge ultime produisant le mécanisme « Vierendeel » est plus grande dans les poutres cellulaires que celle dans les poutres Angelina.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	379,119	325,039
7 Ouvertures	311,986	273,337
8 Ouvertures	391,448	262,364
9 Ouvertures	295,644	224,125

Tableau IV.9 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de nuance d'acier S355.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	488,076	491,336
7 Ouvertures	440,841	399,21
8 Ouvertures	451.639	392.832
9 Ouvertures	416.122	332.879

Tableau IV.10 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de nuance d'acier S355.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	601,57	726,398
7 Ouvertures	560,471	563,132
8 Ouvertures	581,755	552,343
9 Ouvertures	550,089	462,966

Tableau IV.11 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de nuance d'acier S355.

La même remarque a été soulevée d'après les valeurs obtenues selon les tableaux (IV.9 à IV.11) ci-dessus pour le cas des deux configurations de poutres de nuance d'acier S355, c'est-à-dire, plus le nombre des ouvertures augmente et moins elle est la charge ultime naissant le mécanisme « Vierendeel ».

Il est également à constater que, l'effet Vierendeel est plus marquant dans les poutres Angelina que dans les poutres cellulaires, celui-ci est interprété par le fait que la charge ultime produisant le mécanisme « Vierendeel » est plus grande dans les poutres cellulaires que celle dans les poutres Angelina.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	512.111	419.650
7 Ouvertures	406.422	354.842
8 Ouvertures	506.796	339.66
9 Ouvertures	289.777	382.408

Tableau IV.12 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 de nuance d'acier S460.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	599.536	662.408
7 Ouvertures	574.993	519.826
8 Ouvertures	620.957	508.770
9 Ouvertures	552.741	426.865

Tableau IV.13 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 de nuance d'acier S460.

N ^{bre} d'ouvertures	Charge Ultime engendrant le mécanisme « Vierendeel » (kN)	
	Poutres cellulaires	Poutres Angelina
6 Ouvertures	779.014	942.973
7 Ouvertures	722.438	734.792
8 Ouvertures	751.885	715.949
9 Ouvertures	713.594	602.869

Tableau IV.14 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 de nuance d'acier S460.

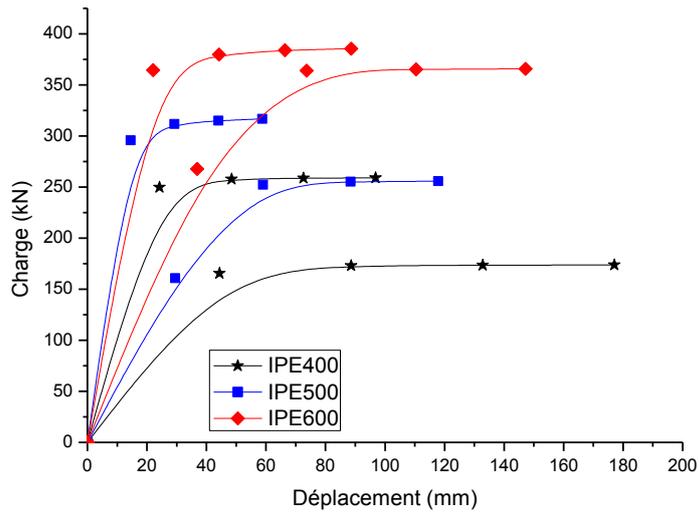
La même remarque a été soulevée d'après les valeurs obtenues selon les tableaux (IV.12 à IV.14) ci-dessus pour le cas des deux configurations de poutres de nuance d'acier S460, c'est-à-dire, plus le nombre des ouvertures augmente et moins elle est la charge ultime naissant le mécanisme « Vierendeel ».

Il est également à constater que, l'effet Vierendeel est plus marquant dans les poutres Angelina que dans les poutres cellulaires, celui-ci est interprété par le fait que la charge ultime produisant le mécanisme « Vierendeel » est plus grande dans les poutres cellulaires que celle dans les poutres Angelina.

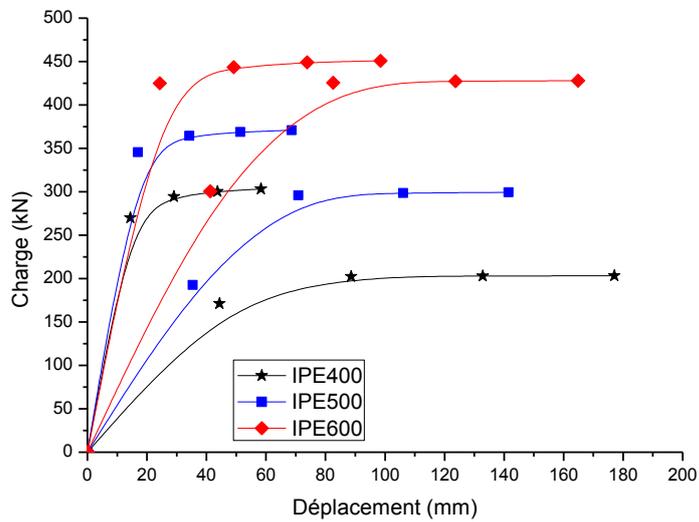
IV.2.2.3. Influence de la section de la poutre sur l'effet Vierendeel

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

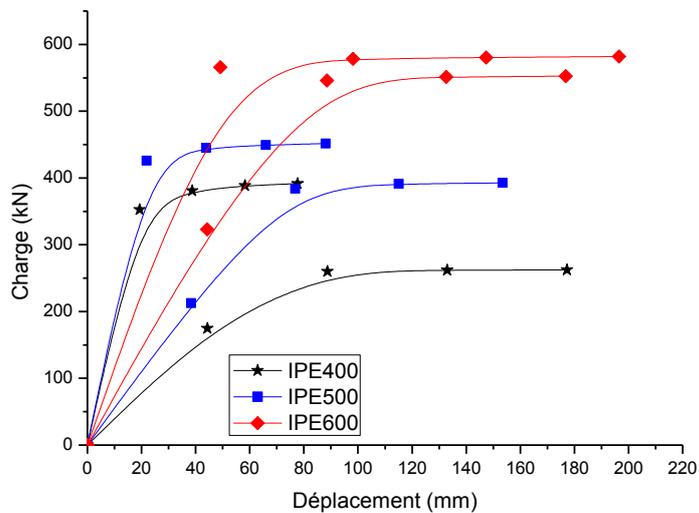
Les mesures numériques prises sur ces deux configurations de poutres sont les évolutions (Figures IV.17 et IV.18) : charge à mi- portée de la poutre en fonction du déplacement vertical local au niveau de la section critique de l'ouverture qui se trouve proche de la partie centrale de la poutre où l'effet Vierendeel est le plus marqué.



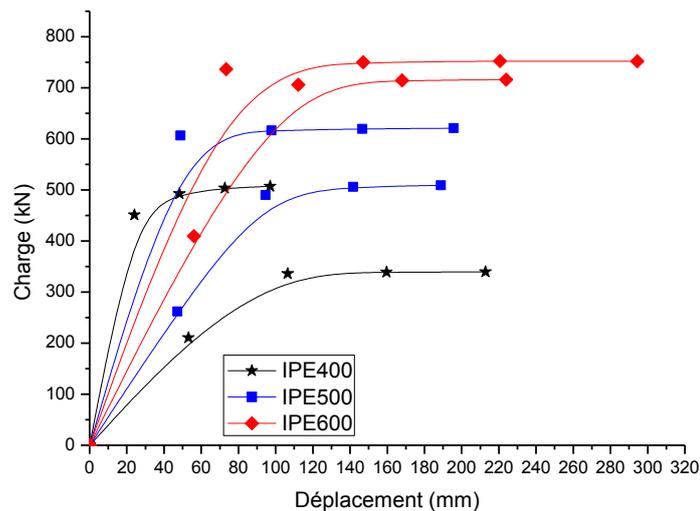
a- Poutres de nuance d'acier S235.



b- Poutres de nuance d'acier S275.



c- Poutres de nuance d'acier S355.



d- Poutres de nuance d'acier S460.

Figure IV.17 : Evolution charge-déplacement local des poutres de même nombre pair d'ouvertures.

Selon les graphes représentés ci-dessus (Figures IV.17), il est à constater que le mécanisme Vierendeel d'une poutre comportant 8 ouvertures pour différentes sections telles que IPE400, IPE500 et IPE600, s'est produit sous l'effet d'un chargement ultime appliqué de valeurs respectives :

259.08 kN, 316.83 kN et 385.38 kN correspondant aux poutres cellulaires de nuance S235.

173.65 kN, 255.77 kN et 365,763 kN correspondant aux poutres Angelina de nuance S235.

303.25 kN, 370.84 kN et 450.93 kN correspondant aux poutres cellulaires de nuance S275.

203.31 kN, 299.30 kN et 427.86 kN correspondant aux poutres Angelina de nuance S275.

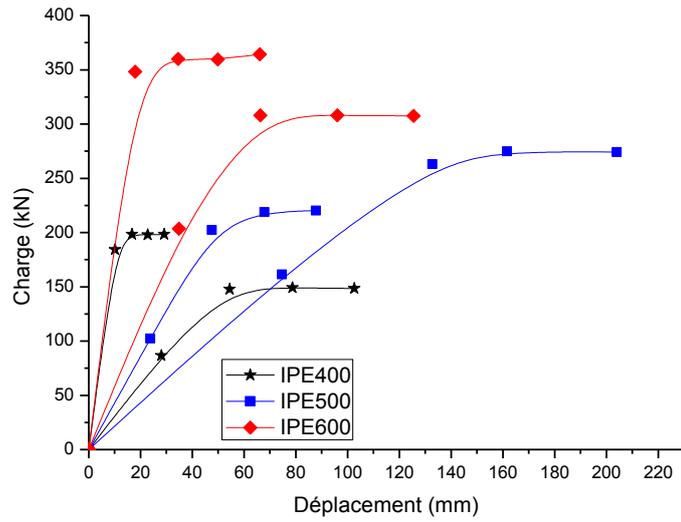
391,45 kN, 451,64 kN et 581,75 kN correspondant aux poutres cellulaires de nuance S355.

262,36 kN, 392,83 kN et 552,34 kN correspondant aux poutres Angelina de nuance S355.

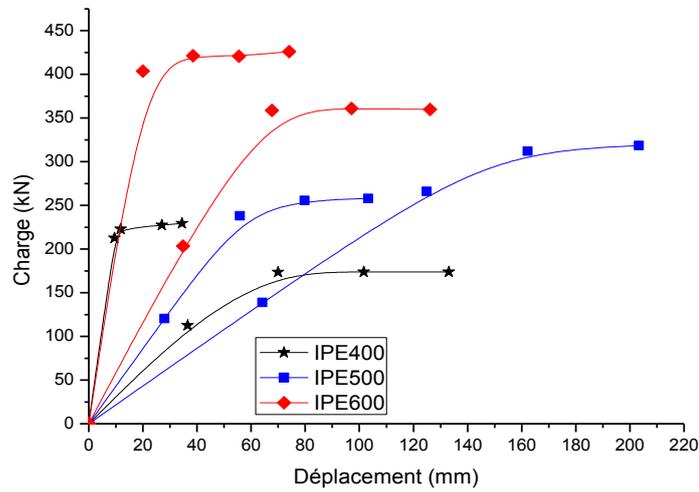
506,80 kN, 620,96 kN et 751,88 kN correspondant aux poutres cellulaires de nuance S460.

339,66 kN, 508,77 kN et 715,95 kN correspondant aux poutres Angelina de nuance S460.

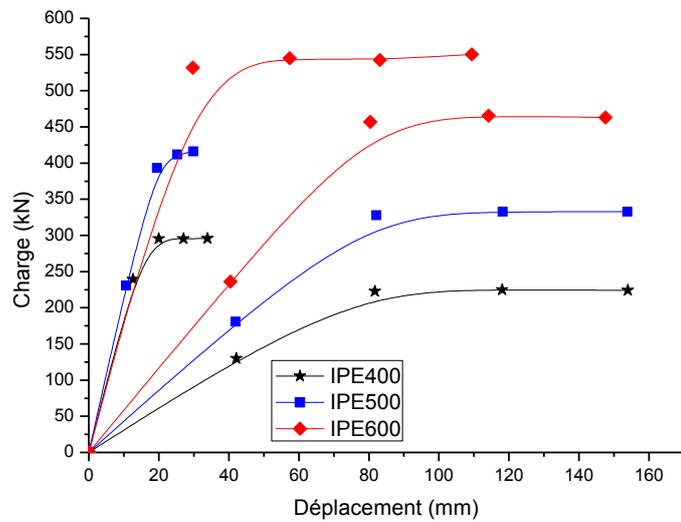
Il est également à observer que plus la section de la poutre n'est importante et significative elle est la charge ultime produisant ce mode de ruine (mécanisme Vierendeel).



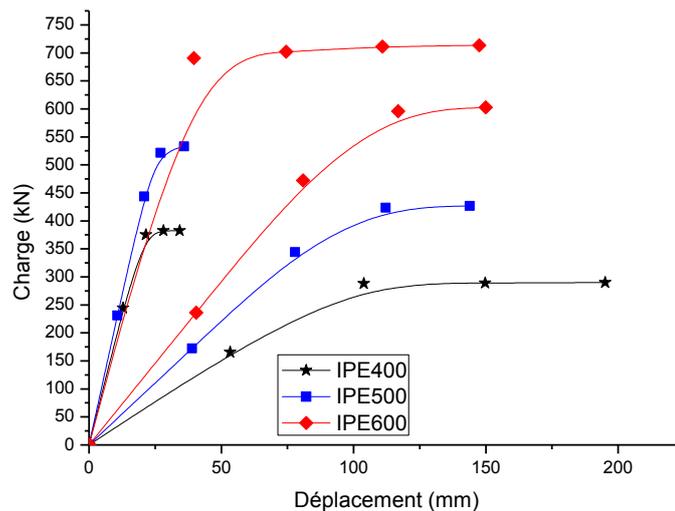
a- Poutres de nuance d'acier S235.



b- Poutres de nuance d'acier S275.



c- Poutres de nuance d'acier S355.



d- Poutres de nuance d'acier S460.

Figure IV.18 : Evolution charge-déplacement local des poutres de même nombre impair d'ouvertures.

De même, selon les graphes représentés ci-dessus (Figures IV.18), il est à constater que le mécanisme Vierendeel d'une poutre comportant 9 ouvertures pour différentes sections telles que IPE400, IPE500 et IPE600, s'est produit sous l'effet d'un chargement ultime appliqué de valeurs respectives :

198.35 kN, 274.19 kN et 364.16 kN correspondant aux poutres cellulaires de nuance S235.

148.58 kN, 220.30 kN et 307.46 kN correspondant aux poutres Angelina de nuance S235.

229.52 kN, 318.52 kN et 425.98 kN correspondant aux poutres cellulaires de nuance S275.

173.68 kN, 257.77 kN et 360.01 kN correspondant aux poutres Angelina de nuance S275.

295.64 kN, 416.12 kN et 550.09 kN correspondant aux poutres cellulaires de nuance S355.

224.12 kN, 332.88 kN et 462.97 kN correspondant aux poutres Angelina de nuance S355.

382.41 kN, 532.74 kN et 713.59 kN correspondant aux poutres cellulaires de nuance S460.

289.78 kN, 426.86 kN et 602.87 kN correspondant aux poutres Angelina de nuance S460.

Il est également à observer que plus la section de la poutre n'est importante et significative elle est la charge ultime produisant ce mode de ruine (mécanisme Vierendeel).

IV.2.2.4. Influence de la nuance de l'acier sur l'effet Vierendeel

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 le même nombre d'ouvertures pour différentes sections de la poutre.

Les histogrammes des figures (IV.19 à IV.20) ci-dessous représentent la valeur de la charge ultime des deux configurations de poutres pour différentes nuances d'acier.

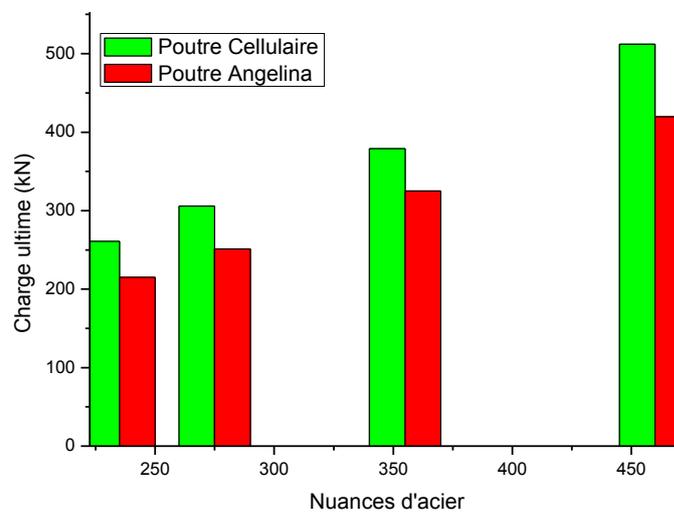


Figure IV.19 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 comportant 6 ouvertures.

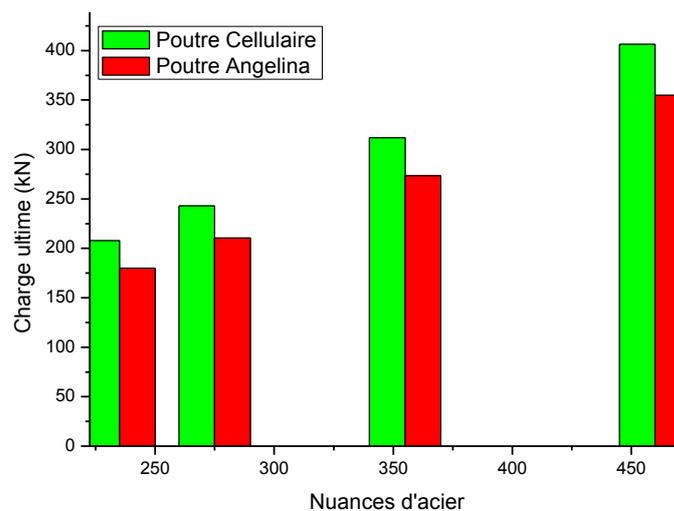


Figure IV.20 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE400 comportant 7 ouvertures.

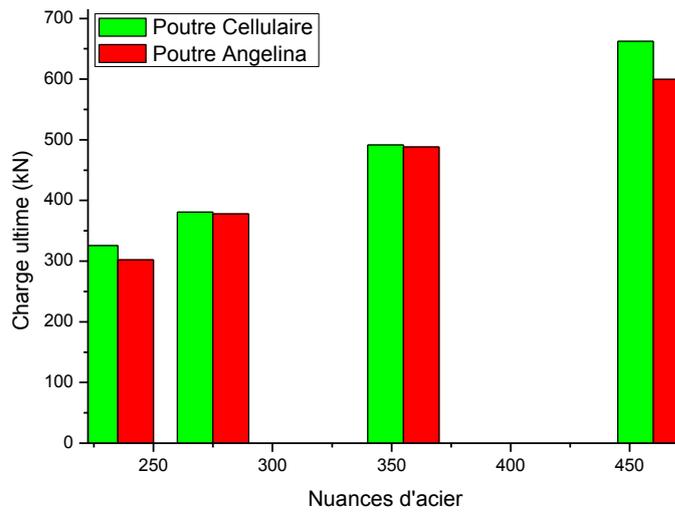


Figure IV.21 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 comportant 6 ouvertures.

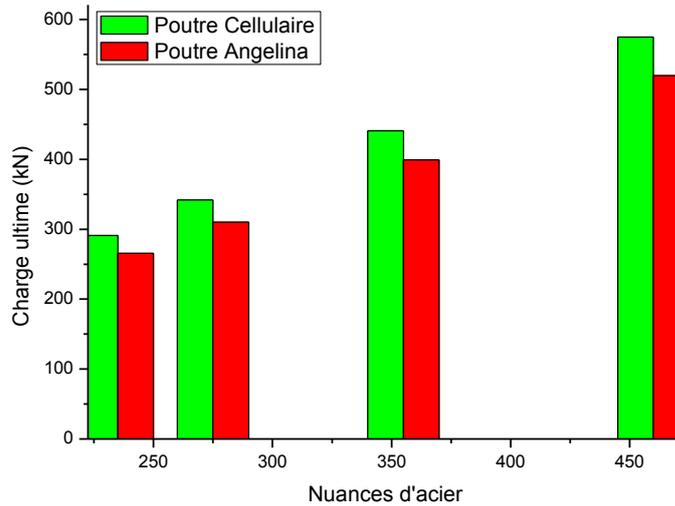


Figure IV.22 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE500 comportant 7 ouvertures.

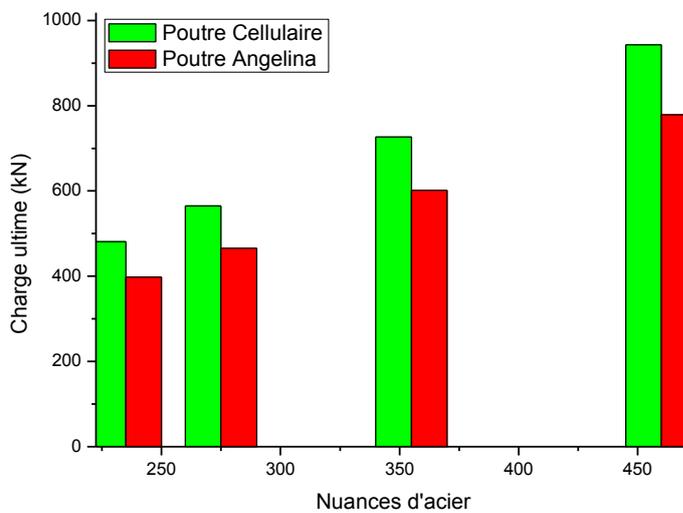


Figure IV.23 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 comportant 6 ouvertures.

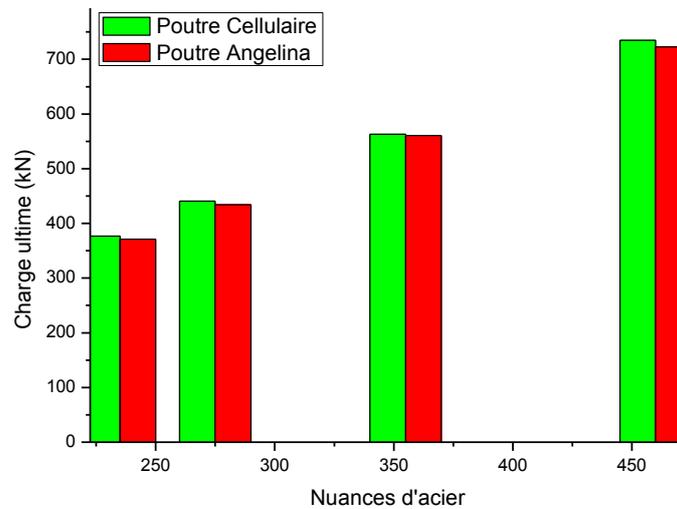


Figure IV.24 : Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600 comportant 7 ouvertures.

On peut conclure donc d'après les résultats obtenus selon les histogrammes des figures représentées ci-dessus, que la charge ultime augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la nuance d'acier quel que soit le nombre d'ouvertures que peut comporter les deux configurations de poutres et quel que soit le profilé en IPE envisagé pour leurs fabrications.

Il est également toujours à constater que, l'effet Vierendeel est plus marquant dans les poutres Angelina que dans les poutres cellulaires, celui-ci est interprété par le fait que la charge ultime produisant le mécanisme « Vierendeel » est plus grande dans les poutres cellulaires que celle dans les poutres Angelina.

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse numérique non-linéaire a été menée afin de prédire le comportement à l'état élasto-plastique des deux configurations de poutres (cellulaires et Angelina).

Cette analyse numérique montre l'application possible du modèle MEF 3D à l'étude du comportement non-linéaire, ainsi elle permet de représenter l'influence de la forme de l'ouverture vis-à-vis le mécanisme Vierendeel sur le comportement local et global de ce type de poutres métalliques en étudiant la capacité portante ultime.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail de recherche était de mener une analyse numérique dans le domaine non-linéaire sur le comportement de deux configurations de poutres, une comportant des ouvertures de forme circulaires dénommée poutre cellulaire et l'autre comportant des ouvertures de forme sinusoïdales appelée poutre Angelina, et ceci afin de prédire l'effet Vierendeel au niveau des ouvertures en estimant les charges ultimes, dont le but est de montrer laquelle entre ces deux configurations de poutres est la plus manifestée par ce mécanisme (l'effet Vierendeel).

Dans cette analyse, l'effet Vierendeel a été examiné à l'aide d'une modélisation par éléments finis en 3D à l'état élasto-plastique en utilisant le logiciel CAST3M. Les deux configurations de poutres fabriquées 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 modèle numérique qui a été reposé sur les résultats d'essais expérimentaux évoqués en littérature, a permis de localiser la section critique au niveau de laquelle l'effet Vierendeel est marquant dans la partie de l'ouverture sinusoïdale où la section est de classe 1 et 2.

Les résultats de l'analyse numérique obtenus selon des études comparatives ont permis de faire les conclusions suivantes :

- La longueur de la poutre n'a pas d'influence remarquable sur le comportement non-linéaire vis-à-vis l'effet Vierendeel, c'est-à-dire quelle que soit est la portée de la poutre, la charge ultime produisant la plastification locale par l'effet Vierendeel localisée au niveau de la section critique de l'ouverture, est presque de même ordre de grandeur pour les deux configurations de poutres.
- Plus le nombre des ouvertures augmente et moins (significative) elle est la charge ultime naissant le mécanisme « Vierendeel » dans les deux configurations de poutres. Ainsi, l'effet Vierendeel est plus marquant dans les poutres Angelina que dans les poutres cellulaires.

CONCLUSION GENERALE

- Plus la section de la poutre n'est importante et significative elle est la charge ultime produisant ce mode de ruine (mécanisme Vierendeel). Celui-ci est le mode dominant dans les poutres Angelina par rapport aux poutres cellulaires.
- La charge ultime augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la nuance d'acier quel que soit le nombre d'ouvertures que peut comporter les deux configurations de poutres et quel que soit le profilé en IPE envisagé pour leurs fabrications. Ainsi, l'effet Vierendeel est plus remarquable dans les poutres Angelina que dans les poutres cellulaires.

En résumé, le travail entrepris a permis de montrer la fiabilité du modèle numérique en trois dimensions, représentatif de la réalité et suffisamment souple, élaborer dans le sens de permettre à bien mener une analyse numérique dans le domaine non-linéaire pour prédire le comportement mécanique à savoir l'effet Vierendeel dans les deux configurations de poutres cellulaire et Angelina. Ainsi, les résultats de cette analyse numérique ont montré que l'effet Vierendeel est toujours l'effet le plus significatif dans les poutres Angelina que dans les poutres cellulaires.

Références Bibliographiques

- [1] CHUNG. K.F. et LAWSON. R.M. (2000) "Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode4", The Steel Construction Institute, Silwood Park, Ascot, Berkshire SL5 7QN, UK.
- [2] <http://www.arcelormittal.com/sections>
- [3] ArcelorMittal R&D Global Research And Development Esch-sur-Alzette (LU).
- [4] K.F. CHUNG, TCH. LIU, ACH KO, « Investigation on Vierendeel Mechanism in steel beams with circular web openings », Journal of Constructional Steel Research, vol.5, pp. 467-490, 2001.
- [5] K.F. CHUNG, TCH. LIU, ACH KO, « Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalized moment shear interaction curve », Journal of Constructional Steel Research, vol.59, pp. 1177-1200, 2003.
- [6] P.O. MARTIN, Y. GALEA, D. BITAR, T. DEMARCO, « Poutres cellulaires acier et mixtes : Partie 2, proposition de nouveaux modèles analytiques de calcul de la flèche », Revue Construction Métallique (CTICM), n°2, pp.15-33, 2006.
- [7] P.O. MARTIN, D. BITAR, Y. GALEA, « Flambement du montant, mise au point d'une méthode de dimensionnement », rapport interne n° 7.013-08 : ACB design optimisation, 2003.
- [8] Y. GALEA, P.O. MARTIN, D. BITAR, « calcul de la flèche, mise au point d'une nouvelle méthode », rapport interne n° 7.013-09 : ACB design optimisation, 2003.
- [9] FONDS DE RECHERCHE POUR LE CHARBON ET L'ACIER, « Ouvertures de grandes dimensions dans les âmes pour l'intégration des équipements techniques dans les planchers mixtes », guide de dimensionnement des poutres mixtes comportant des ouvertures d'âme de grandes dimensions ; juin 2006.
- [10] R.M. LAWSON, J. LIMB, S.J. HICKS, W.I. SIMMS, « Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings », Journal of Constructional Steel Research, Volume 62, Issue 6, pp 614-629, June 2006.

- [11] K.D. Tsavdaridis and C. D’Mello. “Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Web Opening Shapes, through Non-linear Finite Element Analyses” *Journal of Structural Engineering*, 138 (10). 1214-1230. 2012.
- [12] F. ERDAL et M. POLAT SAKA, « Ultimate load carrying capacity of optimally designed cellular beams », *Journal of Constructional Steel Research* 80 (2013) 355– 368, 2013.
- [13] P. Panedpojaman and T. Rongram “Design Equations for Vierendeel Bending of Steel Beams with Circular Web Openings” *Proceedings of the World Congress on Engineering 2014 Vol II, WCE 2014, July 2 - 4, 2014, London, U.K.*
- [14] F. ERDAL et al, “Nonlinear finite element analysis of optimally designed steel cellularbeams”. *Res. Eng. Struct. Mat.* Vol. 2 Iss. 2 (2016) 59-66. Feb 2016.
- [15] **S. Durif et al**, “Modèle mécanique pour les poutres à larges ouvertures d’âmes de section variable” *XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31Mai 2011.*
- [16] S. DURIF, « Comportement mécanique des poutres cellulaires à ouvertures sinusoïdales-développement d’un modèle analytique adapté -». *Laboratoire : Institut Pascal, Clermont Ferrand, France, Thèse de doctorat, 2012.*
- [17] S. Durif, and A. Bouchaïr, « Behavior of cellular beams with sinusoidal openings» *Steel Structures and Bridges, Procedia Engineering* 40 (2012) 108 – 113.
- [18] S. Durif, A. Bouchaïr, O. Vassart, « Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings» *Journal of Constructional Steel Research* 82 (2013) 72–87.
- [19] P.O. MARTIN, M. COUCHAUX, O. VASSART et A. BUREAU, « Modèle de résistance pour les poutres Angelina en acier et mixtes» *Revue C.M. N° 1- 2013.*
- [20] S. Durif, A. Bouchaïr, O. Vassart, « Experimental and numerical investigation on web-post specimen from cellular beams with sinusoidal openings» *Engineering Structures* 59 (2014) 587–598.

- [21] P.D. Kumbhar* and A.M. Jamadar Rajarambapu, OPTIMIZATION OF OPENING SIZE FOR CASTELLATED BEAM WITH SINUSOIDAL OPENINGS Institute of Technology, Illampu, Maharashtra, India INTERNATIONAL JOURNAL OF OPTIMIZATION IN CIVIL ENGINEERING Int. J. Optim. Civil Eng.,**2015**; 5(3):301-313.
- [22] Ferhat Erdal, Osman Tunca, Serkan Tas, Serdar Carbas, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:10, No:10, 2016 Barcelona Spain Oct 03-04, **2016**, 18 (10) Part I.
- [23] S. Durif et A. bouchair «Analytical model to predict the resistance of cellular beams with sinusoidal openings» Journal of Constructional Steel Research 121 (2016) 80–96.
- [24] P.-O. Martin ,M. Couchaux, O. Vassart, A. Bureau, «An analytical method for the resistance of cellular beams with sinusoidal Openings » Engineering Structures · July 2017 Engineering Structures 143 (**2017**) 113–126 .
- [25] Cast3M « www-cast3m.cea.fr »
- [26] D. BITAR, P.O. MARTIN, Y. GALEA, T. DEMARCO, « Poutres cellulaires acier et mixtes : Partie 1, proposition d'un modèle pour la résistance des montants », Revue Construction Métallique (CTICM), n°1, pp.15-39, 2006.
- [27] D. MATEESCO et G. MERCEA , «un nouveau type de poutres ajourées» Revue C.M. N°3-1981.