

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



**FACULTÉ DES SCIENCE 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 :

ZEBBAR MAHMOUD  
MEKHALDI NOURREDDINE

**Sujet du mémoire**

**CALCUL DE LA CHARGE ULTIME PRODUISANT LE FLAMBEMENT  
DES MONTANTS D'AMES DU AU CISAILLEMENT LONGITUDINAL DES  
POUTRES CELLULAIRES METALLIQUES : MODELISATION COUPLEE  
« ANALYTIQUE-NUMERIQUE »**

*Soutenu publiquement le 26/05/2024 devant le jury composé de :*

Mr, CHIKH Abdelbaki

Président

Mr, DJEBLI Benyagoub

Encadrant

Mr, KRIM Abdallah

Examineur

Mr, KERROUM Nadir

Examineur

## **Remerciement**

En ce moment solennel où s'achève un chapitre décisif de mon parcours académique, je tiens à exprimer ma gratitude la plus sincère à ceux qui ont éclairé mon chemin de leur savoir, soutenu mes efforts et enrichi ma vie de leur présence.

Je rends hommage à mon directeur de thèse, Djebli B, dont l'expertise, la perspicacité et la générosité intellectuelle ont guidé mes recherches et forgé mon esprit critique. Sa confiance et son encouragement ont été le phare dans l'océan de mes interrogations.

Mes pensées reconnaissantes se tournent également vers le corps enseignant de L'université Ibn Khaldoun Tiaret, dont l'excellence académique et l'engagement pédagogique ont façonné l'ingénieur de demain que je m'efforce de devenir.

À ma famille, je dédie ce travail. Leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leur foi en mes rêves ont été le socle sur lequel j'ai bâti mes ambitions.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de ce travail. Que chacun trouve ici l'expression de ma reconnaissance la plus profonde.

# **Dédicaces**

***A mes Chers parents.***

***A mon frère.***

***A mes sœurs.***

***A toute ma famille.***

# **Dédicaces**

***A mes Chers parents.***

***A mes frères.***

***A ma sœur.***

***A toute ma famille.***

# Tables des matières

# Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

## Chapitre 1 : Revue de la littérature

1.1. Introduction .....	11
1.2. Bilan sur les Travaux de recherches .....	11
1.3. Conclusion .....	18

## Chapitre 2 : Modélisation numérique et choix d'éléments

2.1. Introduction .....	19
2.2. Présentation du logiciel .....	19
2.2.1. Introduction .....	19
2.2.2. Environnement et langage .....	19
2.2.3. Organisation d'un calcul.....	22
2.3. Modélisation et choix d'élément.....	24
2.3.1. Introduction .....	24
2.3.2. Modèle numérique.....	24
➤ Géométrie et Maillage .....	24
➤ Conditions aux limites et chargement.....	25
➤ Loi de comportement de l'acier.....	26
➤ Non-linéarité.....	26
➤ Imperfections géométriques.....	27
2.3.3. Calibrage des résultats :.....	28
2.4. Conclusion.....	31

## Chapitre 3 : Étude analytique et validation par éléments finis

3.1. Introduction .....	32
3.2. Solution analytique.....	32
3.3. Calibrage du modèle analytique par rapport au modèle numérique .....	34
3.4. Conclusion .....	37

## Chapitre 4 : Etude paramétrique

4.1. Introduction .....	38
4.2. Influence de la section de la poutre.....	39
4.3. Influence de la portée de la poutre.....	43
4.4. Influence de l'espacement entre les ouvertures .....	44
4.5. Influence de la nuance de l'acier .....	45
4.6. Conclusion .....	47

Conclusion générale.....	48
--------------------------	----

References bibliographiques.....	49
----------------------------------	----

# Liste des Figures

# Liste des Figures

<b>Figure 1:</b> Avantage de la présence des ouvertures dans l'âme .....	1
<b>Figure 2:</b> Premier lieu avec une portée libre de 15 m, Londres .....	2
<b>Figure 3:</b> Centre commercial IKEA, CYPRUS .....	2
<b>Figure 4:</b> Poutres cellulaires d'un toit courbé, Winchester .....	2
<b>Figure 5:</b> Parking de Cambridge .....	3
<b>Figure 6:</b> Parking de Charlotte , NC. ....	3
<b>Figure 7:</b> Stade de Stamford Bridge, Londres .....	4
<b>Figure 8:</b> Conception en porte-à-faux d'une poutre cellulaire dans un stade, Dunfermline .....	4
<b>Figure 9:</b> Processus de base d'une poutre cellulaire .....	5
<b>Figure 10:</b> Table d'oxycoupage de poutrelles laminées. ....	6
<b>Figure 11:</b> Poutre Vierendeel. ....	6
<b>Figure 12:</b> Flambement du montant sous cisaillement [3].....	12
<b>Figure 13:</b> Flambement du montant sous compression [4].....	13
<b>Figure 2.1:</b> Organigramme du modèle de calcul.....	22
<b>Figure 2.2:</b> Noyau de calcul , pré et post traitements.....	24
<b>Figure 2.3:</b> Élément coque COQ4.....	25
<b>Figure 2.4:</b> Modélisation des Sections métalliques[3] .....	25
<b>Figure 2.5:</b> Chargement et conditions aux limites].....	26
<b>Figure 2.6:</b> Loi de comportement idéalisé de l'acier .....	26
<b>Figure 2.7:</b> Exemple de déformée du 1 <sup>er</sup> mode de flambement d'une poutre cellulaire.....	27
<b>Figure 2.8:</b> Poutre étudiée expérimentalement .....	28
<b>Figure 2.9:</b> Déformée de la poutre étudiée issue du Cast3m .....	29
<b>Figure 2.10:</b> Déformée de la poutree étudiée issue du 1 <sup>er</sup> mode de flambement.....	29
<b>Figure 2.11:</b> Précision du modèle numérique à partir de l'essai A].....	30
<b>Figure 2.12:</b> Précision du modèle numérique à partir de l'essai B .....	31
<b>Figure 3.1:</b> Répartition des efforts internes dans une cellule .....	32
<b>Figure 4.1:</b> Emplacements des points indiqués dans les graphiques .....	38
<b>Figure 4.2:</b> Section critique dans un montant d'âme [1].....	39
<b>Figure 4.3:</b> Configuration des poutres cellulaires étudiées.....	40
<b>Figure 4.4:</b> Variation de la charge ultime produisant le flambement du montant d'ame .....	42
<b>Figure 4.5:</b> Charge ultime (Fu) en fonction des hauteurs croissantes (ipe 400) .....	42
<b>Figure 4.6:</b> Charge ultime (Fu) en fonction des hauteurs croissantes (ipe 500) .....	44
<b>Figure 4.7:</b> Charge ultime (Fu) en fonction des hauteurs croissantes (ipe 600) .....	44
<b>Figure 4.8:</b> Charge- déplacement hors-plan d'une poutre cellulaire raide en IPE 400.....	46
<b>Figure 4.9:</b> Charge- déplacement hors-plan d'une poutre cellulaire raide en IPE 500.....	46
<b>Figure 4.10:</b> Charge- déplacement hors-plan d'une poutre cellulaire raide en IPE 600.....	46



# Liste des Tableaux

# Liste des Tableaux

<b>Tableau 2.1:</b> Caractéristiques géométriques et propriétés mécaniques .....	28
<b>Tableau 3.1:</b> Caractéristiques géométriques des poutres .....	34
<b>Tableau 3.2:</b> Evaluation de ( $k_F$ ) et de ( $\lambda$ ) .....	35
<b>Tableau 3.3:</b> Charge ultime produisant le flambement des montants d'âme (S235) .....	35
<b>Tableau 3.4:</b> Charge ultime produisant le flambement des montants d'âme (S275) .....	35
<b>Tableau 3.5:</b> Charge ultime produisant le flambement des montants d'âme (S355) .....	35
<b>Tableau 3.6:</b> Comparaison des résultats des deux modèles analytique et numérique (S235) .....	36
<b>Tableau 3.7:</b> Comparaison des résultats des deux modèles analytique et numérique (S275) .....	36
<b>Tableau 3.8:</b> Comparaison des résultats des deux modèles analytique et numérique (S355) .....	36
<b>Tableau 4.1:</b> Charge ultime d'une poutre cellulaire comportant 8 ouvertures (S235) .....	45
<b>Tableau 4.2:</b> Charge ultime d'une poutre cellulaire comportant 8 ouvertures (S275) .....	45
<b>Tableau 4.3:</b> Charge ultime d'une poutre cellulaire comportant 8 ouvertures (S355) .....	45

## ملخص

تتناول هذه الدراسة قدرة الأحمال القصوى التي يمكن للأعمدة الخلوية الفولاذية تحملها. تم تطوير طريقة تجمع بين الحسابات النظرية والمحاكاة الحاسوبية للتنبؤ بقوة هذه الأعمدة. تأخذ المحاكاة في الاعتبار العيوب الأولية وكيفية تصرف المواد تحت الضغط. تم مقارنة نتائج النموذج مع اختبارات المختبر والدراسات السابقة، مما يؤكد موثوقية النموذج. تُظهر دراسة تفصيلية كيف أن ترتيب التعزيزات داخل العمود يؤثر على قدرته على تحمل الأحمال. تساعد هذه البحوث المهندسين المدنيين في تصميم أعمدة خلوية فولاذية أقوى وأكثر أماناً للمباني.

**الكلمات المفتاحية:** أعمدة خلوية فولاذية؛ قدرة تحمل الأعمدة القصوى؛ الحسابات النظرية؛ المحاكاة الحاسوبية؛ الحمولة القصوى.

## Résumé

Le principal objectif de ce travail de mémoire est d'étudier le comportement vis-à-vis la stabilité locale des montants d'âmes dans les poutres cellulaires en acier. Pour ce faire, un modèle couplé modélisation analytique- numérique a été proposé afin de prédire la charge ultime provoquant le flambement des montants d'âme par cisaillement ainsi que le mode de rupture associé. La modélisation numérique par éléments finis développée, prend en compte des non-linéarités géométriques et matérielles ainsi que des imperfections géométriques initiales. A des fins de validation, cette modélisation a été appliquée à des poutres cellulaires en acier testées au laboratoire et dont les résultats sont publiés dans la littérature. La comparaison des résultats expérimentaux et numérique a montré toute la capacité du modèle développé à prédire de manière satisfaisante le comportement réel de ce type de poutres. Par la suite une étude paramétrique a été menée dans le but de prédire la capacité portante vis-à-vis le flambement des montants d'âme par cisaillement dans les poutres cellulaires en acier.

**MOTS-CLES:** Poutre cellulaire en acier; Flambement des montants d'âme par cisaillement; Modèle couplé; Modélisation analytique-numérique; Charges ultimes.

## **Abstract**

This work investigates the ultimate load carrying capacity of steel cellular beams, with a focus on optimizing design for enhanced performance. A coupled analytical-numerical modeling approach is proposed to predict the ultimate load that induces web stiffener shear buckling. The numerical model incorporates geometric and material nonlinearities, as well as initial geometric imperfections, and is validated against laboratory-tested steel cellular beams and published literature. The satisfactory correlation between experimental and numerical results underscores the model's accuracy in predicting the real behavior of steel cellular beams. A parametric study further elucidates the influence of web stiffener configurations on the load-carrying capacity. This research contributes to the field of civil engineering by providing a discerning approach to the design of high-strength steel cellular beams, ensuring safety and efficiency in structural applications.

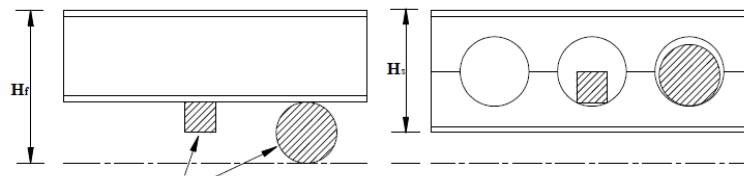
**KEYWORDS:** Steel cellular beams; Ultimate load capacity; Analytical calculations; Load-bearing capacity; Computer simulations; Finite Element modeling; ultimate load.

# Introduction generale

### INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine de la construction métallique, les entreprises de construction utilisent de plus en plus des poutres de grandes portées pour obtenir une grande flexibilité dans l'utilisation des surfaces.

En contrepartie cela requiert généralement des profilés de grande hauteur, ajoutée à l'épaisseur de plancher nécessaire au passage de services, on se retrouve souvent avec une importante hauteur d'étage. Pour réduire la hauteur d'étage, et par conséquent la hauteur totale de la construction, la solution a donc été de concevoir des poutres comportant des ouvertures pratiquées d'une manière isolée ou régulière dans leurs âmes (figure 1), permettant le passage des conduites de service (eau, chauffage, ventilation, condition d'air, etc.) sans trop réduire la résistance à la flexion de la poutre.



*Figure 1: Avantage de la présence des ouvertures dans l'âme.*

Parmi les poutres comportant des ouvertures d'âmes régulièrement espacées, on trouve les poutres cellulaires. Ce type de poutres connaît depuis une dizaine d'années un usage croissant tant dans le domaine de la construction métallique que dans l'exploration de voies structurelles nouvelles. L'utilisation des poutres cellulaires permet une nouvelle expression architecturale.

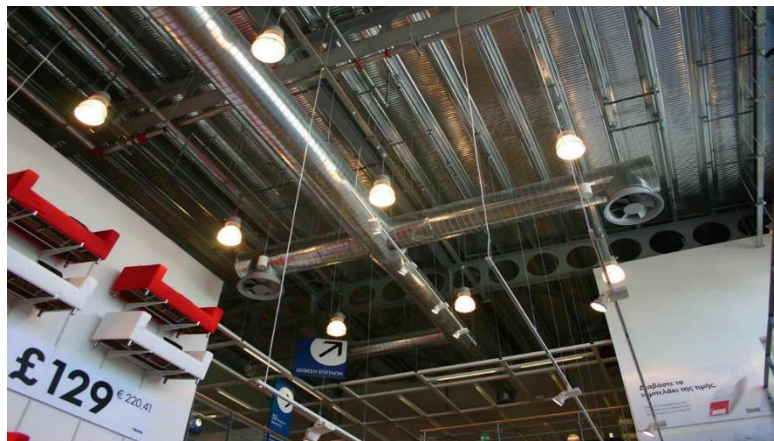
#### ➤ Utilisation

Les poutres cellulaires sont couramment utilisées dans diverses conceptions de bâtiments structurels tels que les immeubles de bureaux, les parkings, les centres commerciaux, les hôpitaux et toute structure nécessitant un plancher suspendu. Leur principal avantage réside dans leur capacité à couvrir de longues portées sans support intermédiaire. De plus, elles offrent une grande flexibilité pour l'intégration des services techniques. En somme, les poutres cellulaires sont idéales pour servir de poutres de plancher, comme illustré à la figure 2.



*Figure 2: Premier lieu avec une portée libre de 15 m, Londres.*

Les poutres cellulaires représentent une option économique pour les poutres de toit. Elles sont particulièrement adaptées aux applications de toiture, comme le montrent les figures 3 et 4, offrant un avantage significatif en termes de réduction de poids et permettant la conception de bâtiments avec un nombre réduit de colonnes internes, en comparaison avec les sections de poutres traditionnelles.



*Figure 3: Centre commercial IKEA, CYPRUS.*



*Figure 4: Poutres cellulaires d'un toit courbé, Winchester.*

Les poutres cellulaires se distinguent comme des composants structuraux performants pour les charges de stationnement, grâce à leur capacité à enjamber de grandes distances sans appuis



## INTRODUCTION GENERALE

---

intermédiaires. Elles se caractérisent par leur légèreté et fournissent une hauteur de poutre précise, contribuant ainsi à un espace intérieur plus ouvert et lumineux, ce qui renforce la sécurité dans les parkings contemporains. (figure 5 et 6)



*Figure 5: Parking de Cambridge.*



*Figure 6: Parking de Charlotte , NC.*

Les poutres cellulaires sont avantageuses pour leur coût modéré et leur performance structurelle dans les constructions à longue portée, ce qui les rend particulièrement appropriées pour les vastes complexes sportifs, comme le démontrent les figures 7 et 8. Ces poutres se distinguent par leur moindre poids et leur faible profondeur par rapport aux poutres pleines traditionnelles, tout en étant plus économiques que les poutres en treillis.



*Figure 7: Stade de Stamford Bridge, Londres.*



*Figure 8: Conception en porte-à-faux d'une poutre cellulaire dans un stade, Dunfermline.*

La conception élancée et la robustesse des poutres cellulaires continuent de stimuler la créativité architecturale, menant à l'émergence constante de nouvelles formes structurelles.

L'adoption croissante des poutres cellulaires est encouragée par divers facteurs d'innovation :

### ➤ **Fabrication**

La fabrication des poutres cellulaires a été grandement améliorée grâce à l'optimisation des procédés tels que l'oxycoupage et le cintrage. Ces avancées technologiques permettent de répondre efficacement aux besoins spécifiques des projets de construction, assurant ainsi une production et une livraison accélérées des poutres.

### ➤ **Normalisation**

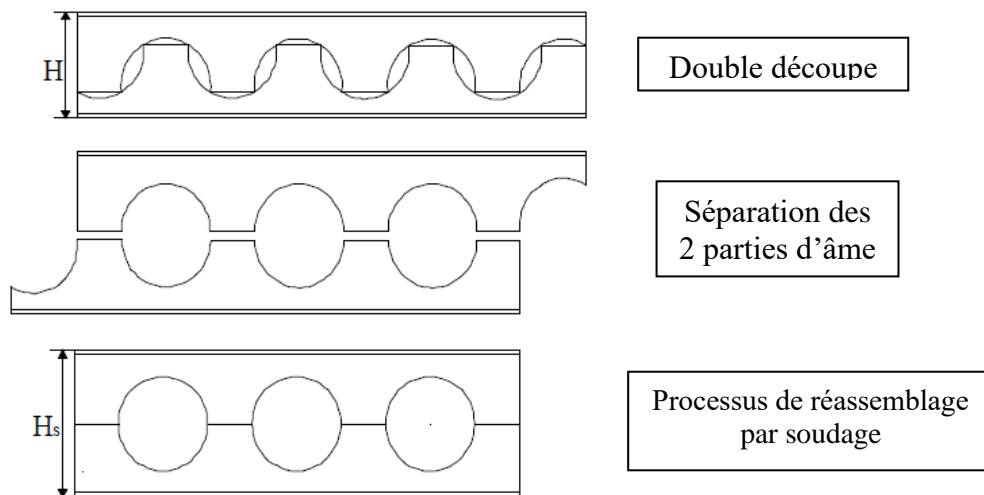
La normalisation par les Eurocodes, notamment l'Eurocode 3 pour les structures en acier et l'Eurocode 4 pour les structures mixtes acier-béton, fournit des directives précises pour le calcul de la résistance des structures. Ces normes couvrent les conditions d'utilisation courantes, les cas d'incendies accidentels, ainsi que l'emploi de l'acier à haute performance S460.

### ➤ Concept – Fabrication

Les poutres cellulaires ACB® (Arcelor Cellular Beam) sont fabriquées selon une méthode brevetée qui repose sur l'utilisation exclusive de poutrelles laminées à chaud. Voici comment cela fonctionne :

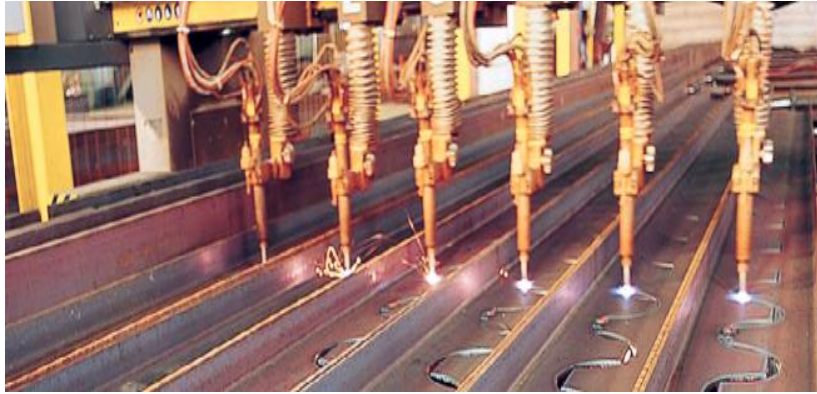
- 1. Découpe double dans l'âme :** Tout d'abord, une double découpe est pratiquée dans l'âme de la poutrelle à l'aide de la technique d'oxycoupage. Cette découpe crée deux tés dans l'âme du profilé laminé.
- 2. Ressoudage après décalage d'une demi-onde :** Ensuite, les deux tés ainsi formés sont ressoudés après avoir été décalés d'une demi-onde. Ce processus permet d'augmenter la hauteur de la poutre.

L'utilisation de cette méthode de fabrication permet d'obtenir des poutres cellulaires légères et résistantes, idéales pour des applications architecturales et structurelles (figure 9).



*Figure 9: Processus de base d'une poutre cellulaire.*

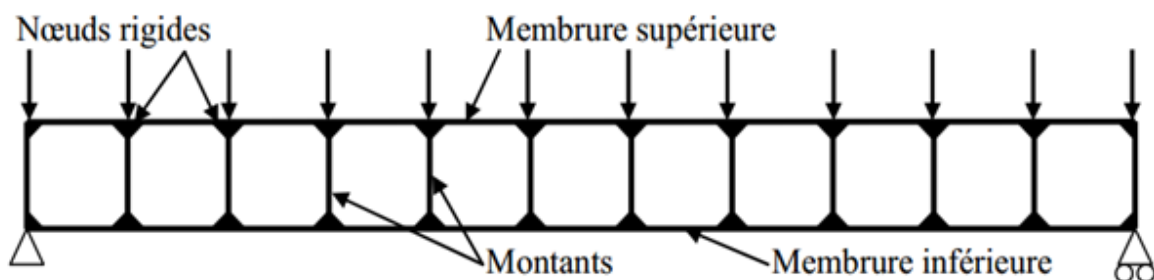
Le produit obtenu présente une augmentation du rapport inertie/poids grâce à sa structure modifiée. Les programmes de découpe sont contrôlés numériquement pour garantir un ajustement précis des alvéoles (voir figure 10). La fabrication simultanée de poutres permet de réduire les coûts de production. Les schémas montrent clairement une limitation de la longueur des soudures. Les cordons de soudure sont inspectés visuellement ou selon les spécifications spécifiques du client ou du maître d'ouvrage.



*Figure 10: Table d'oxycoupage de poutrelles laminées.*

### ➤ Fonctionnement des poutres cellulaires

Les poutres cellulaires sont conçues selon le principe des poutres échelles ou poutres Vierendeel. Pour résoudre le problème de l'hyperstaticité interne de la poutre, on suppose l'existence de rotules ou de points d'inflexion au niveau des ouvertures et également au milieu des montants. Il est important de noter que lors du calcul des efforts internes, le moment interne au milieu des montants peut être pris en considération.



*Figure 11: Poutre Vierendeel.*

### ➤ Modes de ruine

Bien que les poutres avec ouvertures présentent des avantages, leur résistance est considérablement impactée par la présence de ces ouvertures dans l'âme. Il est essentiel de prendre en compte ces ouvertures lors de la conception et du dimensionnement, car elles entraînent des modifications dans le comportement et la stabilité de ce type de poutres, ainsi qu'une diminution de leur résistance. De nombreux travaux de recherche [1, 2] ont démontré que la ruine de ces types de poutres peut survenir si l'une des résistances suivantes est dépassée : la résistance globale à la flexion, au cisaillement et au déversement, ainsi que la résistance locale des montants et des Tés supérieur et inférieur.



L'impact des ouvertures rapprochées sur le comportement d'une poutre ajourée est complexe. Différents modes de ruines peuvent prédominer en fonction de :

- Si l'ouverture est située dans une zone de cisaillement intense ou de flexion importante.
- La configuration des ouvertures, qui peuvent être par exemple circulaires, rectangulaires ou oblongues.
- L'écart entre les ouvertures, où des effets d'interaction peuvent se manifester dans le montant d'âme situé entre ces 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'élanement de l'âme, qui a un impact sur la résistance au voilement.

Pour les poutres qui présentent plusieurs ouvertures d'âme, les modes de ruines principaux qui peuvent se produire au niveau du montant d'âme entre les ouvertures sont les suivants :

- Flambement du montant d'âme par compression de l'âme.
- Flambement par compression de l'âme.

Ces modes de ruines sont influencés par la géométrie et l'élanement de l'âme, la forme et les dimensions des ouvertures, ainsi que les modes de chargement.

### ➤ Ruine par flambement du montant d'âme sous cisaillement

En raison du cisaillement longitudinal et de la flexion locale induite, les montants peuvent subir des déformations hors plan à double courbure dans la hauteur (figure 12). Cette instabilité est principalement liée à un phénomène de voilement local et/ou de déversement local, mais on parle généralement de «flambement» du montant. La résistance du montant au flambement est influencée par plusieurs facteurs : l'espacement des ouvertures, l'élanement de l'ouverture, le type d'acier utilisé, et enfin la symétrie ou l'asymétrie de la section.



*Figure 12: Flambement du montant sous cisaillement [3].*

### ➤ Ruine par flambement du montant d'âme sous compression

Le flambement du montant d'âme sous compression peut survenir en présence de charges concentrées et de réactions d'appui (figure 13). À la différence du voilement par cisaillement, le flambement du montant d'âme sous compression se traduit uniquement par un déplacement latéral, sans torsion. Ce mode de ruine n'est généralement pas critique si un raidissement approprié est prévu au niveau des charges concentrées ou des réactions d'appui.



*Figure 13: Flambement du montant d'âme sous compression [4].*

### ➤ Objectifs de la recherche

Les objectifs établis pour ce mémoire peuvent être structurés comme suit:

- Élaboration d'une méthode analytique pour déterminer la charge ultime qui provoque le flambement des montants d'âme par cisaillement dans les poutres cellulaires métalliques simplement appuyées (soumises à des charges verticales appliquées au milieu de la portée), fabriquées à partir de profilés IPE.
- Élaboration d'un modèle numérique non-linéaire en utilisant le logiciel **CAST3M** [5], qui est un outil polyvalent offrant de vastes capacités de calcul linéaire (contrainte, déformation) et non linéaire (plasticité, grand déplacement).
- Validation de la précision du modèle numérique développé en le comparant avec l'approche analytique
- Estimation de la charge ultime pour diverses poutres cellulaires métalliques en utilisant le modèle numérique et le modèle analytique.

### ➤ Structuration du mémoire

Le plan du mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre présente une revue générale sur les principales études et recherches consacrées aux problèmes des poutres cellulaires métalliques dans le domaine non linéaire.

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

Le deuxième chapitre expose la modélisation et le choix d'élément en utilisant le logiciel (**CAST3M**) basé sur la méthode des éléments finis. En outre, on donne un aperçu sur la présentation de cet outil de calcul.

Le troisième chapitre de cette recherche consiste sur un développement d'une approche analytique permettant le calcul de la charge ultime, engendrant le flambement des montants d'âme par cisaillement dans les poutres cellulaires métalliques simplement appuyée (fabriquées en profilés IPE), et validé à la base du modèle numérique développé dans le chapitre précédent.

Le chapitre quatre est réservé pour une étude paramétrique à l'état élasto-plastique, en exploitant le modèle numérique validé dans le deuxième chapitre.

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

# **CHAPITRE 1**

Revue de la littérature



### 1.1. Introduction

Le dimensionnement exact des poutres métalliques contenant des évidements dans l'âme est nécessaire en raison de l'utilisation fréquente de ces dernières dans la construction d'habitations et de bureaux. Ceci est dû aux différents avantages qu'offrent ce type de poutres en particulier le passage de la tuyauterie et la réduction en conséquence, de la hauteur globale de la construction qui peut devenir intéressante pour des bâtiments à plusieurs étages quant à la réduction des coûts de la construction.

### 1.2. Bilan sur les Travaux de recherches

Dans ce contexte, quelques travaux de recherches disponibles dans la littérature sont présentés. Ces travaux fournissent des informations utiles sur le comportement et le calcul de ce type de poutres.

Des études expérimentales ont été menées par M.D. Altifillisch, B.R. Cooke et A.A. Toprac [6] sur des poutres alvéolaires (ouvertures de forme hexagonale régulièrement réparties sur la longueur de la poutre). Ces essais se composaient de 3 poutres bi-appuyées en flexion 4 points. Deux modes de ruine ont pu être observés, une ruine par flexion globale avec plastification des membrures supérieure et inférieure par effort axial ainsi qu'une ruine par flexion locale des coins de l'ouverture liée au cisaillement global de l'ouverture. Ces essais furent les premiers à identifier une flexion locale des membrures de l'ouverture la plus sollicitée, phénomène communément appelé flexion Vierendeel. L'observation de la ruine a montré une plastification d'un coin de l'ouverture en premier ; ensuite arrive la ruine finale avec l'observation d'un voilement par compression du coin opposé. Ces premières observations mettent ainsi en évidence deux points importants. Tout d'abord, l'existence d'une flexion locale des membrures liée au transfert de cisaillement autour d'une ouverture (la flexion ou effet Vierendeel) et la caractérisation d'une résistance supplémentaire liée au schéma cinématique de ruine par formation successive de rotules plastiques.

A.A. Toprac, et B.R. Cooke [7] ont effectué des études sur 9 poutres alvéolaires jusqu'à la ruine. L'objectif principal était d'étudier le comportement à la ruine de ces poutres. Certains essais se sont terminés par déversement global et n'ont pas pu être exploités du fait que ce mode ne faisait pas partie des phénomènes étudiés. De la même façon que précédemment, il a pu être observé une ruine par plastification dans un coin de l'ouverture critique située en zone de fort cisaillement. Dans le cas des poutres pour lesquelles les ouvertures critiques étaient situées en zone de flexion pure, la ruine était caractérisée par la plastification en compression et traction des membrures supérieure et inférieure de l'ouverture.

D'autres études expérimentales ont été menées par A.N. Sherbourne [8] visant à étudier l'interaction entre la flexion et le cisaillement en observant le mode de ruine ainsi que l'influence des conditions de chargement. Ces études sont les prémices des recherches effectuées notamment

par R.G. Redwood [9] et plus tard par K.F. Chung et al. [10][11] qui cherchent à caractériser la résistance des ouvertures en fonction des rapports entre le moment sollicitant et le moment résistant, et entre l'effort tranchant sollicitant et l'effort tranchant résistant de l'ouverture considérée. Les études numériques ont montré que la résistance réelle de l'ouverture est souvent sous-estimée (de l'ordre de 10 à 15 % dans les gammes d'ouvertures testées par les auteurs [10]).

En 1967 P. Halleux [11] proposa des résultats expérimentaux sur 5 poutres alvéolaires. A. Bazile et J. Texieren [12] en 1968 et M.U. Husain et W.G. Speirs [13] en 1971, ont fait plusieurs essais mettant en évidence le flambement du montant intermédiaire entre deux ouvertures proches des appuis (où le cisaillement est élevé). Les auteurs relient ce mode de ruine au fait que les ouvertures de ces poutres alvéolaires avaient un faible espacement qui impliquait des montants intermédiaires élancés [14]. Ces diverses études expérimentales ont permis de formuler les premières conclusions théoriques sur le comportement à l'état ultime des poutres munies d'ouvertures isolées ou régulièrement réparties (poutres alvéolaires).

Les recherches décrites par D. Kendal et D.A. Nethercot [15] ont permis d'identifier 6 principaux modes de ruine des poutres alvéolaires. Ils sont principalement liés à la géométrie de la poutre globale, à l'élancement de l'âme, aux dimensions de l'ouverture, au type de chargement, aux conditions aux limites (maintiens anti-déversement) et à la position des ouvertures (dans le cas d'ouvertures isolées). Les modes de ruine sont de nature commune avec les poutres à âmes pleines (ruines globales) ; à savoir la flexion globale, dans le cas où l'ouverture critique se situe en zone de flexion pure. Dans ce cas, les membrures inférieure et supérieure de l'ouverture se plastifient par traction ou compression, le cisaillement global, ce mode peut survenir dans le cas où l'ouverture se situe en zone de fort cisaillement et de faible longueur. Des ruines par cisaillement direct des sections des membrures supérieures et inférieures au droit de l'ouverture critique ont été observées et le déversement global qui, sans maintien adéquat, constitue souvent le mode de ruine principal de ces poutres car la présence des ouvertures dans l'âme des poutres diminue de manière importante leur rigidité torsionnelle, ou de nature spécifique aux poutres à ouvertures d'âmes (ruines locales) ; à savoir la flexion locale dite flexion Vierendeel des sections en té aux coins de l'ouverture due au transfert de cisaillement autour de l'ouverture, le flambement du montant intermédiaire (poutres alvéolaires) par cisaillement horizontal ou par compression directe liée à un chargement ponctuel et la rupture de la soudure du montant intermédiaire (poutre alvéolaire formée à partir d'un profilé laminé à chaud). Cette rupture de soudure est associée au cisaillement horizontal du montant. Les essais de M.U. Husain et W.G. Speirs [13] ont permis de mettre en évidence ce mode de ruine.

Des essais à la ruine sont réalisés au LaMI (Université Blaise Pascal) en coopération avec ArcelorMittal sur des poutres de dimensions réelles [16]. Les résultats expérimentaux permettent de

comprendre le fonctionnement mécanique de ces poutres et de calibrer les modèles numériques. Le modèle éléments finis développé sur SAFIR permet d'évaluer les potentiels de développement de la ruine par plastification ou voilement local des parois autour des ouvertures de formes sinusoïdale 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.

S.durif [17] a développé une approche analytique permettant de définir la charge ultime d'une nouvelle forme de poutre cellulaire à ouvertures sinusoïdales. Cette nouvelle forme d'ouverture implique de nouveaux modes de ruine. De ce fait, en vue de développer ce modèle de calcul analytique adapté à cette nouvelle forme d'ouverture, une campagne d'essais expérimentaux a été menée sur des poutres cellulaires à ouvertures sinusoïdales à grande échelle ( $\approx 10\text{m}$ ).

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

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

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

Le mécanisme Vierendeel est toujours critique dans les poutres en acier perforées avec de grandes ouvertures d'âme isolées, au niveau du quel 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 Te supérieur et la zone d'ouverture d'âme.

K.D. Tsavdaridis and C. D'Mello [18] 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 tés supérieurs et inférieurs, a été obtenue directement à partir de l'analyse FE. 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 plastique 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.

P. Panedpojaman [18] a étudié d'une manière large, le flambement du montant d'âme en tant que mode de ruine des poutres cellulaires. Dans ce contexte, une modélisation typique du montant d'âme est examinée et discutée. En se basant sur une analyse par éléments finis et de la loi de comportement mécanique, une équation empirique permettant le calcul du flambement a été proposée.

F.Erdal [19] a effectué des études sur des poutres cellulaires conçus d'une manière optimale jusqu'à la ruine. L'objectif principal était d'étudier le comportement à la ruine de ces poutres en menant des essais expérimentaux sur douze poutres cellulaires afin de prédire la capacité portante ultime et enfin, il a réalisé une analyse par éléments finis sur le flambement et prédire les charges critiques de toutes les poutres cellulaires testées expérimentalement. Les résultats d'analyse par éléments finis sont ensuite comparés avec les résultats de tests expérimentaux pour chaque poutre cellulaire testée.

Une étude [20] a été menée, pour évaluer la capacité portante basée sur l'effet Vierendeelle par le dimensionnement des poutres métalliques munies d'ouverture circulaire, élaboré par la méthode de la SCI P100 et la formule de Chung et al.

La capacité portante est étudiée en termes d'interactions moment-cisaillement normalisées 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 FE, 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 effet Vierendeel.

P.D. Pachpor et al [21] ont décrit le comportement des poutres cellulaires à la base de la méthode de BS59.50 [22], en considérant particulièrement la résistance des Tes et du montant d'âme. Un tel comportement est dérivé d'une étude paramétrique impliquant une analyse par éléments finis en utilisant le logiciel ANSYS. La méthode de calcul est basée sur l'analyse plastique de la section de la poutre pour les charges ultimes (ELU) et sur l'analyse élastique de la poutre pour les charges de service (ELS). La procédure de calcul des poutres cellulaires est illustrée. Un exemple basé sur la méthode de calcul est élaboré et sa vérification est faite sur capacité.

A.S. Shaikh et H.R. Aher ont fait des recherches sur les poutres cellulaires [23], et ils ont montré que la hauteur est le paramètre le plus important qui régit la propriété sectionnelle de la section. Car le moment d'inertie de service joue un rôle très important et le moment d'inertie de la section est directement proportionnel à la hauteur élevée en puissance trois.

Les recherches sur les poutres cellulaires à ouvertures circulaires sont très limitées et moins développées que les poutres cellulaires, ce qui peut être attribué au fait que les poutres cellulaires sont plus compliquées à analyser en raison de leurs propriétés de section en continu autour de la cellule.

K. KUČHTA et M. MAŠLAK [24] ont évalué la résistance et la stabilité des poutres cellulaires métalliques du moment où les modes de ruine relatifs à ces dernières se présentent comme étant critiques. La résistance au moment de flexion ultime globale de la poutre en présence de cisaillement est estimée ainsi que la résistance de la section Te située à mi-longueur de l'ouverture d'âme de la poutre.

En ce qui concerne la vérification de la stabilité de la poutre, non seulement le déversement est pris en compte, mais aussi le flambement d'âme par cisaillement de la poutre et même l'instabilité locale du montant d'âme.

Enfin, le risque de rupture d'un joint soudé situé dans un montant d'âme est évalué pour vérifier s'il est possible d'être accepté par l'utilisateur du bâtiment.

Une analyse par éléments finis (FEA) [25] des poutres alvéolaires a été menée en utilisant le logiciel ANSYS. L'étude du flambement du montant d'âme en tant que mode de ruine de ce type de poutres a été étudiée et a conclu que la poutre cellulaire est la mieux adaptée pour les applications structurales.

Dans ce travail, une étude paramétrique des poutres cellulaires a été réalisée pour optimiser sa taille en considérant le rapport entre l'espacement de l'ouverture et la hauteur d'ouverture ( $S / D_0$ ) et diverses charges de ruine produisant le flambement du montant d'âme ont été déduites.

L'étude analytique a été également effectuée en faisant varier différents paramètres dans la poutre cellulaire tels que le diamètre de la cellule, l'espacement des cellules, la forme de la cellule. Il a été observé que les poutres cellulaires se ruinent particulièrement (principalement) à cause du mécanisme de Vierendeel. Une conception optimale des poutres cellulaires a également été étudiée sur la base de l'Eurocode3.

Une étude détaillée a été effectuée sur l'influence des raidisseurs [26] à savoir le nombre de raidisseurs, la taille du raidisseur et leurs emplacements dans la partie d'âme de la poutre alvéolaire. Par conséquent, cette étude a été envisagée par la littérature existante sur la résistance de la poutre en utilisant des raidisseurs. L'étude disponible dans la littérature indique que l'utilisation de raidisseurs dans la partie d'âme des poutres alvéolaire aide à augmenter la résistance et à minimiser la flèche. Les chercheurs ont suggéré d'utiliser un raidisseur le long des bords des ouvertures afin de réduire la concentration des contraintes au niveau de celles-ci.

Une étude sur la résistance au déversement [27] des poutres cellulaires soumises uniquement à un moment de flexion constant, a été examinée.

Grâce aux comparaisons effectuées entre les moments maximums produisant le déversement, la résistance calculée en utilisant la méthode générale de l'EC3 est légèrement conservatrice dans la plupart du temps par rapport à la méthode spécifique qui fournit principalement (particulièrement) des résultats significativement surestimés.

Cependant, pour un élanement court non-dimensionnel, la méthode générale devrait être modifiée pour fournir la résistance conservatrice. On constate également que l'élanement non dimensionnel et le rapport de section affectent clairement la précision de prédiction de la résistance calculée pour les deux méthodes.

Cependant, les autres paramètres affectent moins la précision. Comme un calcul fructueux et sûr, la méthode générale de l'EC3 devrait être utilisée pour le calcul de la résistance au déversement des

poutres cellulaires. Cependant, d'autres développements sur le calcul du déversement sont nécessaires pour considérer l'effet de l'élanement court non-dimensionnel et du rapport de section.

La hauteur est le paramètre le plus important qui régit la propriété sectionnelle. Car le moment d'inertie joue un rôle très important du moment où celui-ci est directement proportionnel à la hauteur élevée en puissance trois. Les recherches [28] sur les poutres cellulaires sont très limitées et moins développées que les poutres alvéolaires, ce qui peut être attribué au fait que les poutres cellulaires sont plus compliquées à analyser en raison de leurs propriétés de section variables autour de la cellule.

Une étude a été effectuée sur le raidissage des poutres cellulaire [29] et qui montre la nécessité des raidisseurs qui se présente comme une meilleure solution pour dominer les ruines et résister au flambement des montants d'âme. En première partie de cette recherche, l'étude se concentre sur la modélisation par éléments finis des poutres cellulaire en acier avec et sans raidisseurs en utilisant le logiciel ANSYS. Dans la deuxième partie de la recherche, une analyse par éléments finis est effectuée pour prédire le flambement élastique et les charges critiques associées des poutres cellulaires en acier avec et sans raidisseurs.

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 [30] est de mener des analyses par éléments finis (EF) dans le domaine non linéaire des poutres cellulaires qui ont été testée expérimentalement afin de déterminer leurs charges ultimes en comparaison avec les solutions de celles-ci.

Les poutres cellulaires 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 stabilité de ce type des poutres ainsi qu'une diminution de leur résistance. B. Djebli et al ont mené une analyse numérique [31], sur le comportement des poutres cellulaires mixtes en tenant compte des non-linéarités matérielles et géométriques. Cette analyse est destinée, à prédire à l'aide d'une modélisation par éléments finis deux modes de ruine spécifiques en l'occurrence l'effet Vierendeel et l'instabilité

locale (flambement) au niveau des ouvertures et des montants d'âme respectivement en estimant les charges ultimes correspondantes.

Les ouvertures prévues dans la partie âme sont généralement de forme circulaire, hexagonale, en forme de losange ou de forme sinusoïdale. La capacité portante de la poutre alvéolaire est élevée en augmentant la hauteur de la poutre. Il n'y a pas de modes de ruine dans la poutre alvéolaire à cause de l'augmentation de sa hauteur comme le déversement, la formation du mécanisme de Vierendeel, la rupture du joint soudure et le flambement du montant d'âme qui doivent être pris en compte. Par conséquent, pour minimiser ces modes de ruines, une étude a été effectuée [32], et montre que l'utilisation de raidisseurs dans la partie d'âme pleine est importante.

En 2018, Une étude a été menée sur le comportement structural des poutres cellulaires en acier, en mettant l'accent sur le flambement du montant d'âme [33]. L'objectif principal de cette étude était de proposer une nouvelle formulation pour calculer la résistance au flambement des montants d'âme du au cisaillement de ce type de poutres, basée sur des tests en laboratoire ainsi sur une analyse numérique. Des tests à grande échelle ont été réalisés sur des poutres cellulaires en acier. Au cours de ces expériences, les déplacements verticaux et latéraux ont été mesurés, ainsi que les déformations du montant d'âme. Les propriétés mécaniques de l'acier de ces poutres ont été déterminées par des essais de traction. Un modèle numérique a été développé dans le logiciel ABAQUS pour effectuer une analyse paramétrique. En traitant 597 cas à partir de ces modèles numériques, une nouvelle formulation pour déterminer la résistance au cisaillement dans les poutres cellulaires, spécifiquement pour le flambement du montant d'âme, a été proposée. Cette formulation est basée sur des courbes de résistance et a été vérifiée dans différentes situations géométriques et avec différentes propriétés matérielles. Les résultats obtenus étaient compatibles avec les résultats numériques et montraient une meilleure précision que ceux disponibles dans la littérature.”.

### 1.3. Conclusion

Dans ce chapitre une présentation des travaux de recherches menés sur les poutres métalliques cellulaires a été présentée.

Les chapitres qui suivent consistent sur une modélisation couplée « analytique-numérique » permettant d'estimer (prédire) avec une certaine précision la charge ultime engendrant l'instabilité locale des montants d'âmes par cisaillement de ce type de poutres.



# **Chapitre 2**

Modélisation numérique  
et choix d'éléments

## Chapitre 2: Modélisation numérique et choix d'éléments

---

### 2.1. Introduction

Dans ce type d'approche, où la précision de l'analyse dépend directement du maillage et des éléments utilisés, les utilisateurs ont pris l'habitude de vérifier qu'il était suffisamment fin pour conduire à des résultats fiables. Un logiciel tel que Cast3m [5] 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 et après avoir donné en premier lieu un aperçu global sur l'organisation d'un calcul mécanique mené sur le logiciel Cast3m [5], nous présentons la démarche que nous avons retenue pour le développement et la validation d'un modèle numérique non linéaire [34] pour simuler le comportement des poutres cellulaires en acier. Le choix du modèle élément fini est guidé par les moyens de calcul des poutres cellulaires métalliques, associés au logiciel éléments finis dont nous disposons en l'occurrence Cast3m [5]. Nous présentons ensuite les résultats obtenus à partir d'une simulation numérique effectuée sur deux poutres cellulaires testées expérimentalement afin d'évaluer leur influence sur leurs comportement à l'état non linéaire.

### 2.2. Présentation du logiciel

#### 2.2.1. Introduction

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

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

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

#### 2.2.2. Environnement et langage

Le logiciel Cast3m fonctionne sur tout ordinateur PC ou compatible utilisant tous types Windows. Afin de convertir les informations en entités informatiques par le programme, il faut

## Chapitre 2: Modélisation numérique et choix d'éléments

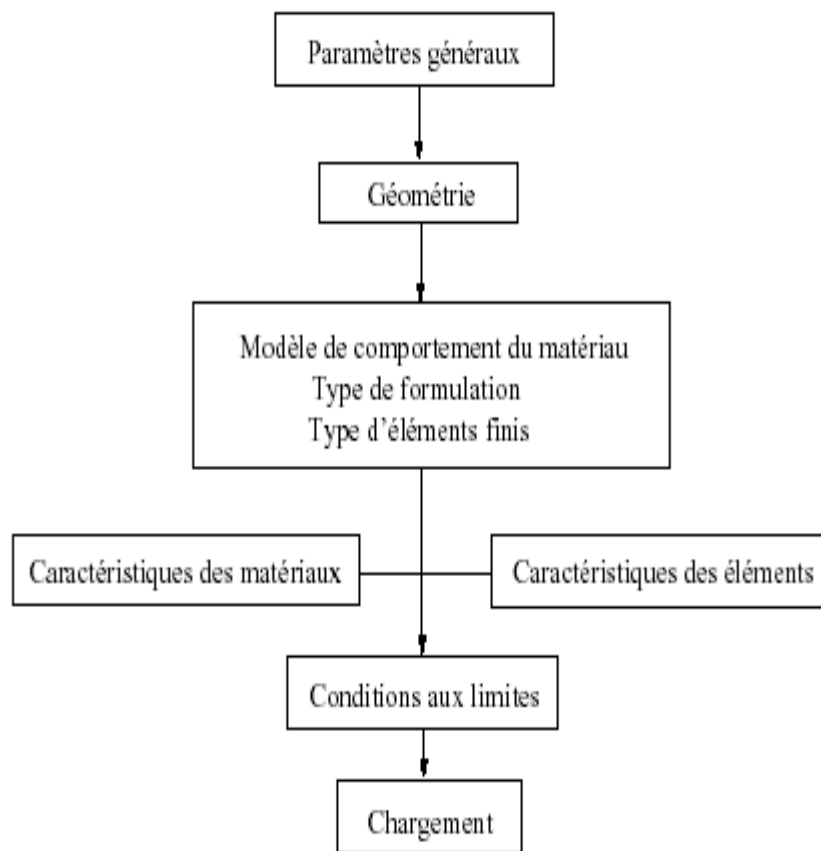
---

disposer d'une interface. C'est le langage GIBIANE qui va permettre de communiquer directement avec le programme.

### 2.2.3. Organisation d'un calcul

#### ➤ Préparation du modèle de calcul

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



*Figure 2.1: Organigramme du modèle de calcul*

- Les paramètres généraux sont définis avec les options générales de calcul.
- La géométrie représente la forme discrétisée du domaine à étudier.
- Le modèle associe au maillage une loi de comportement du matériau, la formulation éléments finis ainsi que le type d'éléments utilisés.
- Les caractéristiques des matériaux définissent les propriétés physiques des matériaux : module d'Young, coefficient de Poisson, masse volumique, (pour un calcul non linéaire, on ajoute la limite élastique du matériau  $f_y$ ).

## Chapitre 2: Modélisation numérique et choix d'éléments

---

- 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.

### ➤ Résolution du système d'équations

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

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

Et le résoudre. Il faut donc dans un premier temps calculer les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité.

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

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

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

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

### ➤ Traitement des résultats

Il s'avère indispensable de traiter les résultats d'une analyse effectuée avec Castem2000. Ce traitement permet le calcul de grandeurs dérivées plus faciles à appréhender ou une visualisation en vue d'une meilleure interprétation des résultats. Deux groupes d'opérateurs sont disponibles à cet effet, l'un étant réservé au post-traitement des données et l'autre à la représentation graphique. Il est ensuite possible de sauvegarder les résultats en vue de les restituer dans des calculs ultérieurs.

Les programmes de calcul par éléments finis classiques sont structurés selon cette logique (voir Figure 2.2), chaque étape étant associée à un module du code :

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

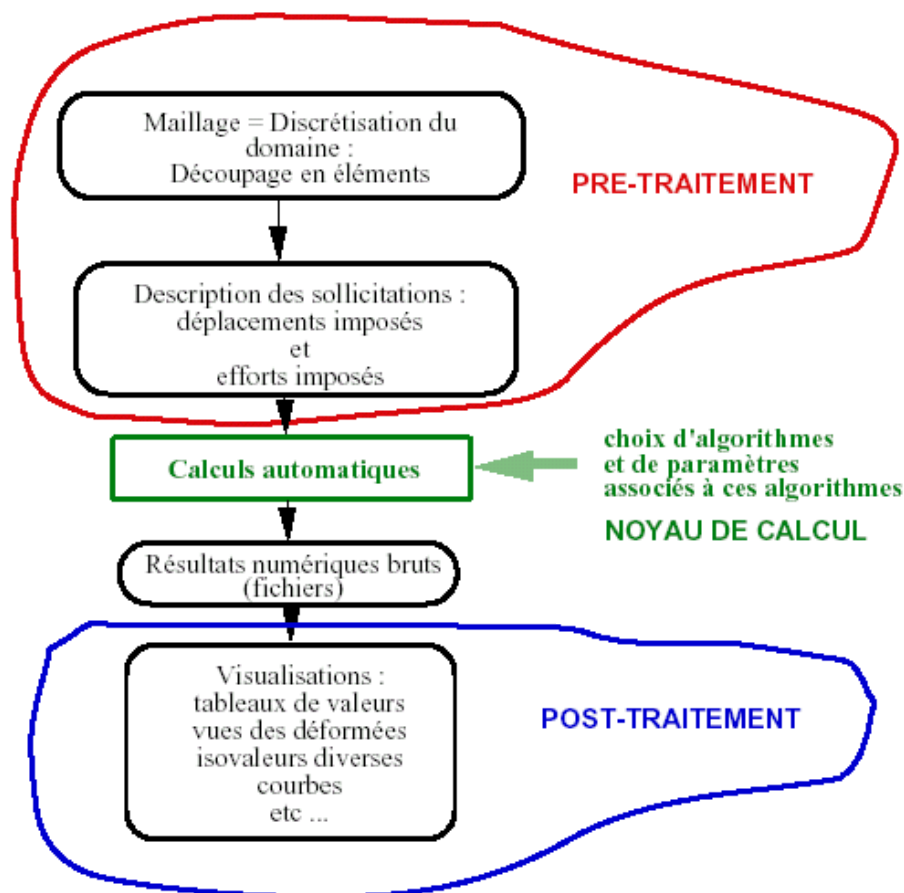


Figure 2.2: Noyau de calcul, pré et post traitements.

### 2.3. Modélisation et choix d'élément

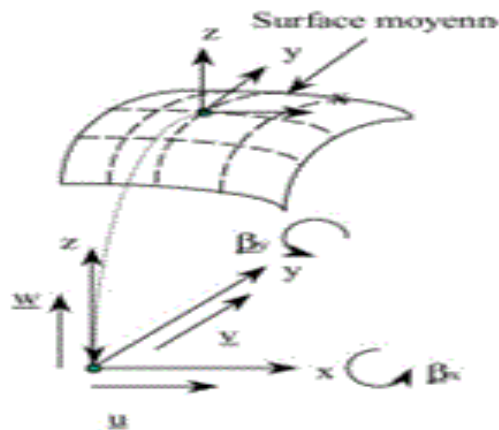
#### 2.3.1. Introduction

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

#### 2.3.2 Modèle numérique

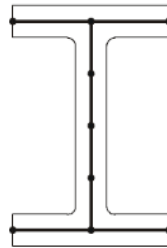
##### ➤ Géométrie et Maillage

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 2.3.



*Figure 2.3: Élément coque COQ4.*

Le maillage de la poutre est défini dans le plan moyen des parois comme le montre la modélisation de la section d'une poutre d'après la figure 2.4.



*Figure 2.4: Modélisation des sections métalliques.*

Cette approche consiste à définir le maillage de la coque dans le plan moyen des parois, dont la hauteur de la section est définie par  $(h-t_f)$ .

### ➤ Conditions aux limites et chargement

Les appuis sont définis en tant que conditions aux limites sur toute la largeur des semelles inférieures des poutres cellulaires. Les déplacements verticaux  $v(y)$  et  $u(x)$  sont nuls.

Les déplacements latéraux sont bloqués aux niveaux des plans moyens des semelles pour simuler le travail des appuis latéraux contre le déversement.

Le chargement du modèle est réalisé par un déplacement imposé monotone croissant au niveau de la semelle supérieure. Le calcul élasto-plastique s'effectue par la procédure incrémentale PASAPAS de Cast3M [5].

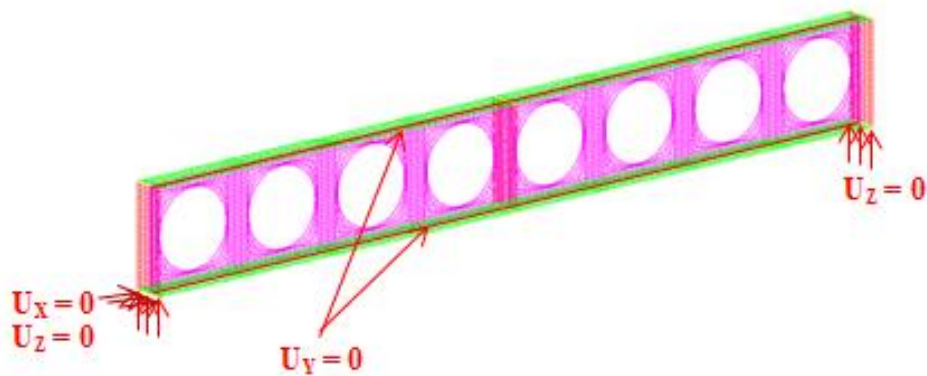


Figure 2.5: Chargement et conditions aux limites.

### ➤ Loi de comportement de l'acier

Le matériau acier est modélisé à l'aide d'une loi de comportement élasto-plastique parfaite. Sans écrouissage. Ce comportement est présenté sur le diagramme de la figure 2.6. Les caractéristiques mécaniques de l'acier sont définis comme suit :  $E = 210$  GPa et  $\nu = 0.3$ .

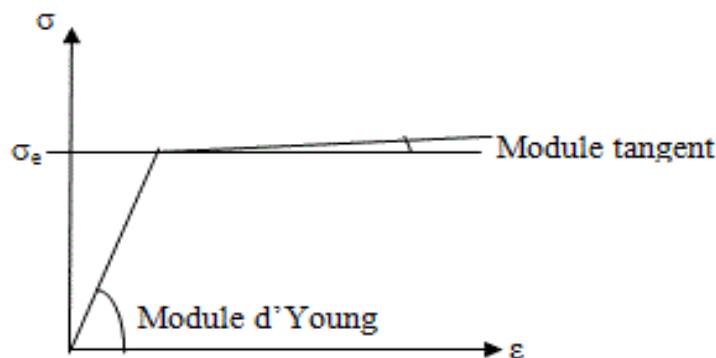


Figure 2.6: Loi de comportement idéalisé de l'acier.

### ➤ Non-linéarité

La modélisation que nous nous proposons dans ce travail, pour simuler le comportement des poutres cellulaires en acier, nécessite de résoudre des problèmes présentant deux types de non-linéarité : une non-linéarité géométrique et une non-linéarité matérielle :

1. les non-linéarités matérielles. Elles peuvent provenir de la loi de comportement intrinsèque du matériau,
2. la non-linéarité géométrique. Cette non-linéarité est due aux déplacements même de la structure. En effet, lorsque ces déplacements deviennent importants, l'équilibre ne peut plus être décrit dans la configuration initiale non déformée (déformation au premier ordre des déplacements) mais doit être étudiée dans la configuration déformée (déformation au second ordre des déplacements). Au sein de cette catégorie, on peut distinguer les grands

## Chapitre 2: Modélisation numérique et choix d'éléments

---

déplacements et les rotations modérées, d'une part et les grands déplacements et les grandes rotations d'autre part.

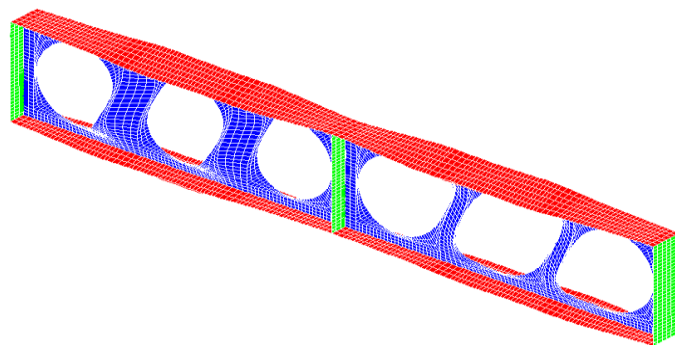
Dans notre cas de la simulation du comportement des poutres cellulaires, la prise en compte de la non-linéarité géométrique qui a été retenue est celle due aux grands déplacements et petites rotations.

### ➤ Imperfections géométriques

Il est bien connu que pour effectuer une analyse élasto-plastique non linéaire prenant en compte non seulement la plasticité mais également les phénomènes d'instabilité, il est nécessaire d'introduire une imperfection géométrique. Les imperfections géométriques initiales dans la simulation numérique peuvent être employées non seulement pour représenter la géométrie imparfaite, mais aussi pour prendre en compte les phénomènes d'instabilités qui ne peuvent être obtenus avec le chargement introduit dans le modèle numérique. C'est le cas notamment du voilement du montant d'âme qui ne peut avoir lieu dans le modèle numérique proposé étant donné que l'âme est chargée dans son plan.

La technique communément utilisée, afin de définir la distribution des imperfections initiales, est d'adopter une imperfection basée sur le premier mode de flambement. Pour ce faire, nous avons réalisé préalablement une analyse d'instabilité linéaire de la structure. Ainsi, nous avons pu évaluer les différentes charges (valeurs propres) et modes critiques (modes propres).

Lors de cette analyse, la structure est supposée indéfiniment élastique et parfaite. La plasticité du matériau ainsi que les imperfections géométriques et matérielles sont négligées. La figure 2.7 illustre un exemple de déformée issue du premier mode de flambement.



*Figure 2.7: Exemple de déformée du 1er mode de flambement d'une poutre cellulaire.*

Les déplacements nodaux du premier mode de flambement sont normalisés en utilisant le déplacement maximal dans la structure et ce déplacement maximal est pris égal à l'unité. En multipliant les déplacements normalisés par un facteur approprié, qui est l'amplitude, les imperfections initiales rattachées au mode propre considéré peuvent être calculées.



## Chapitre 2: Modélisation numérique et choix d'éléments

### 2.3.3. Calibrage des résultats :

Afin de confirmer notre choix sur l'élément « COQ4 », Nous avons effectué une étude sur le comportement charge-déplacement de deux poutres testées expérimentalement A et B (voir figures 2.11 et 2.12) de section (UB457x152x52) et de portée de 1.7m, comportant des ouvertures circulaires régulières [35]. La poutre est soumise à l'effet d'une charge concentrée à mi-portée (voir figure 2.8).

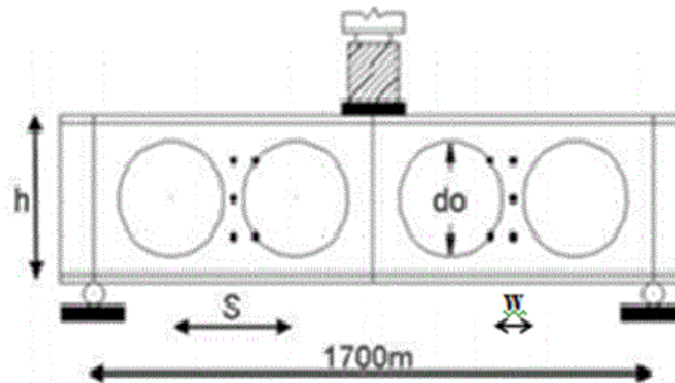


Figure 2.8: Poutre étudiée expérimentalement [35]

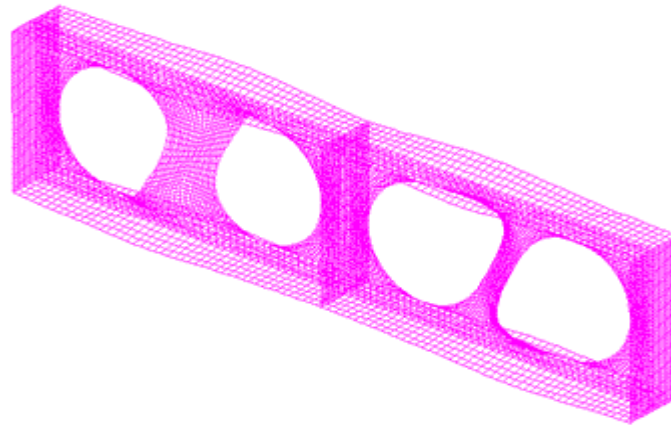
Les caractéristiques géométriques et propriétés mécaniques de la section sont données dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Caractéristiques géométriques et propriétés mécaniques [35].

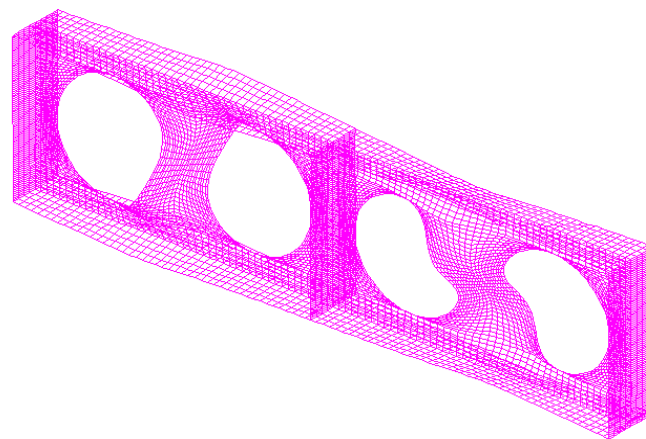
UB457x152x52	A (mm)	B (mm)	$\sigma_e$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\nu$	E (GPa)
H	449.8		359.7	480.9	0.3	200
$b_f$	152.4					
$t_f$	10.9					
$t_w$	7.6		375.3	492.7		
$d_o$	315					
S	409.5	94.5				
W	378	63				

La figure 2.9 illustre la déformée issue du premier mode et deuxième mode de flambement.

1<sup>er</sup> mode de flambement

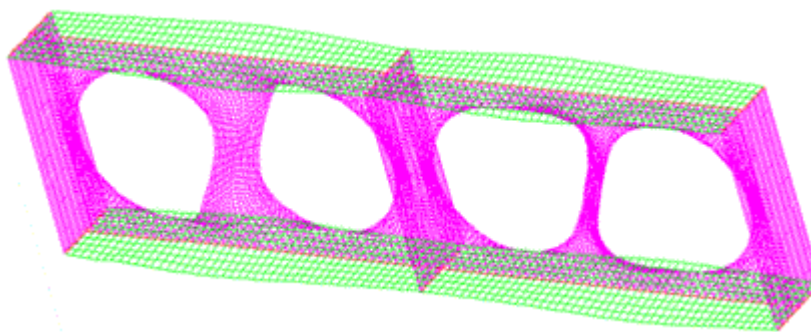


2<sup>ème</sup> mode de flambement



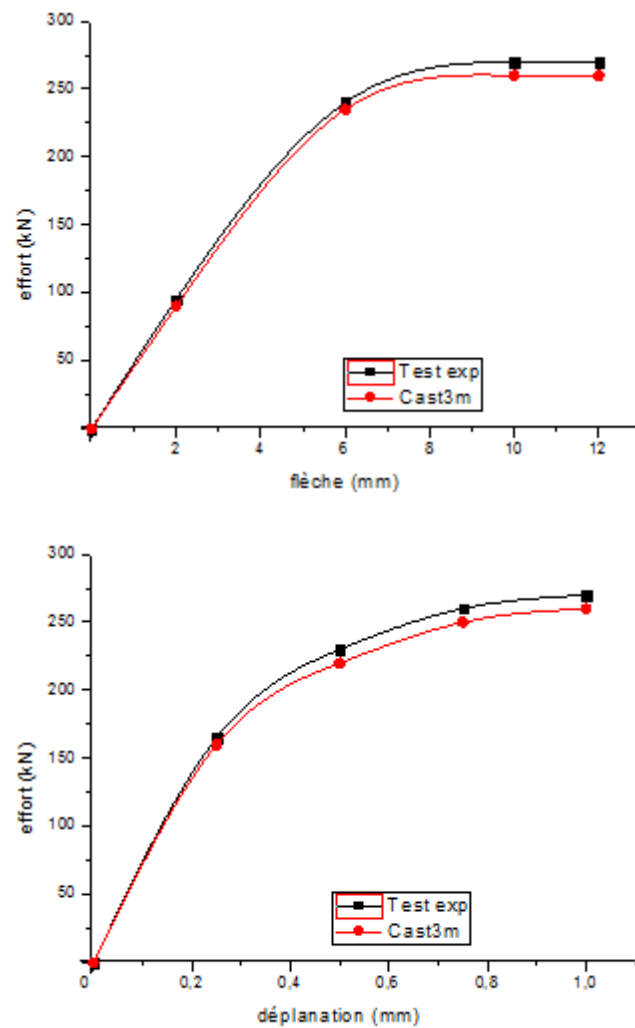
*Figure 2.9: Déformée de la poutre étudiée issue du Cast3m.*

Il est bien entendu que l'imperfection géométrique introduite afin de prendre en compte le phénomène d'instabilité en l'occurrence le flambement des montants d'âmes, est basée sur le premier mode de flambement telle qu'il est illustré dans la figure suivante :



*Figure 2.10: Déformée de la poutre étudiée issue du 1<sup>er</sup> mode de flambement.*

Dans ce qu'il suit, on illustre le comportement non-linéaire (effort-flèche à mi-portée) et la courbe effort-déplacement hors plan (au niveau des premier et troisième montants) des deux poutres précédentes à la base d'une modélisation numérique comparée aux tests expérimentaux A et B.



*Figure 2.11: Précision du modèle numérique à partir de l'essai A.*

D'après les deux courbes (effort-flèche à mi-portée et effort-déplacement hors plan) de la figure 2.11, la comparaison montre une bonne concordance entre les résultats obtenus numériquement et expérimentalement à partir de l'essai A. Il est à remarquer donc, que le modèle en éléments coques minces à 4 nœuds COQ4 convient mieux pour ce type de poutre.

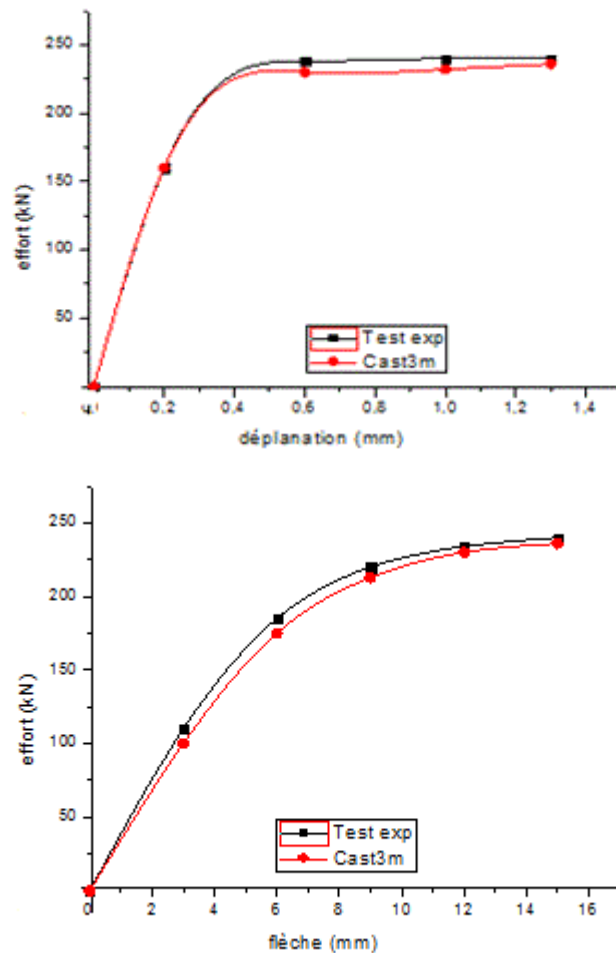


Figure 2.12: Précision du modèle numérique à partir de l'essai B.

De même d'après les deux courbes (effort-flèche à mi-portée et effort-déplacement hors plan) de la figure 2.12, la comparaison montre une bonne concordance entre les résultats obtenus numériquement et expérimentalement à partir de l'essai B. Il est à souligner donc comme remarque, que le modèle en éléments coques minces à 4 nœuds COQ4 convient mieux pour ce type de poutre.

### 2.4. Conclusion

Grâce au modèle 3D, développé ci-haut en coques minces à 4 nœuds (COQ4), décrit dans ce chapitre, nous avons pu mettre en évidence l'influence de la souplesse du support sur le comportement des poutres cellulaires.

Dans le chapitre qui suit, nous allons tout d'abord développer un modèle analytique permettant le calcul de la charge ultime produisant le flambement du montant d'âme par cisaillement, puis le valider à la base de celui numérique, en suite mener des applications en vue d'une analyse numérique dans le domaine non linéaire afin de prédire ce mode de ruine ( flambement du montant d'âme par cisaillement) et la charge ultime correspondante des poutres cellulaires sur appuis simples.

# **Chapitre 3**

Étude analytique et validation  
par éléments finis

### 3.1. Introduction

Malgré les avantages que présentent les poutres cellulaires à savoir leur utilisation dans les immeubles de grande hauteur pour permettre le passage des équipements techniques à travers leurs ouvertures, permettant ainsi de diminuer la hauteur des étages et de réduire le poids de la superstructure; leur stabilité à savoir le flambement du montant d'âme, est affectée par la présence des ouvertures dans l'âme qui doivent être prises en compte lors de la conception et du dimensionnement.

Dans ce chapitre, une solution analytique a été développée pour prédire la charge ultime associée au flambement du montant d'âme par cisaillement des poutres métalliques fabriquées en profilé IPE, ensuite et afin de prouver la fiabilité de cette solution analytique, un calibrage de résultats a été effectué par rapport au modèle numérique développé en éléments finis coques minces à quatre nœuds (COQ4), décrits dans le chapitre précédent (Chapitre2).

### 3.2. Solution analytique

Une solution à la base d'un modèle analytique (voir figure 3.1) a été proposée, permettant le calcul de la charge ultime provoquant le flambement des montants d'âme par cisaillement dans les poutres cellulaires métalliques.

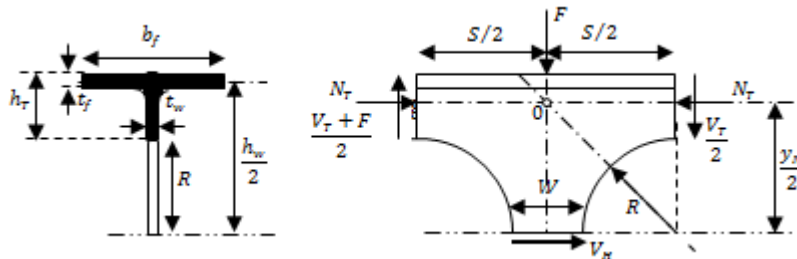


Figure 3.1: Répartition des efforts internes dans une cellule

La solution analytique proposée ici pour calculer la charge ultime est basée sur l'identification de l'effort élastique de cisaillement horizontal ( $V_{H,el}$ ) avec l'effort plastique de cisaillement horizontal ( $V_{H,pl}$ ) d'un montant d'âme.

$$V_{H,el} = V_{H,pl} \quad (1)$$

#### ➤ Effort élastique de cisaillement horizontal ( $V_{H,el}$ )

Selon le modèle analytique présenté sur la figure 3, l'effort de cisaillement horizontale du montant d'âme ( $V_{H,el}$ ) est obtenue à partir de l'équation d'équilibre par rapport au point zéro ( $(\sum M)_0 = 0$ ).

$$V_{H,el} = \frac{S}{2y_N} (2V_T + F) \quad (2)$$

S: est l'espacement centre-centre des ouvertures adjacentes

## Chapitre 3 : Étude analytique et validation par éléments finis

---

$V_T$ : est l'effort de cisaillement vertical due au chargement externe, et s'exprime par:

$$V_T = \frac{F}{2} \quad (3)$$

Alors, l'expression (eq.2) peut s'écrire comme suit:

$$V_{H,el} = \frac{S}{y_N} F \quad (4)$$

$y_N$ : est le bras de levier entre les efforts normales supérieure et inférieure  $N_T$ , donné par:

$$y_N = \frac{Q}{A_T} \quad (5)$$

$Q$ : est le moment statique de la poutre au droit des ajours, donné par:

$$Q = b_f \cdot t_f \cdot h_w + t_w (h_T - t_f) (h_w - h_T) \quad (6)$$

$A_T$ : est l'aire d'une membrure (section transversale d'un té), donnée par:

$$A_T = b_f \cdot t_f + t_w (h_T - t_f) \quad (7)$$

### ➤ Effort plastique de cisaillement horizontal ( $V_{H,pl}$ )

Généralement, le calcul de la résistance au cisaillement est basé sur le critère d'élasticité de Von Mises:

$$f_y = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau_p^2} \quad (8)$$

Sur la base de cette relation, la valeur ultime de la contrainte de cisaillement en l'absence de contraintes normales devient :

$$\tau_p = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

En se basant sur la relation (9), la résistance au flambement par cisaillement horizontal ( $V_{H,pl}$ ) d'un montant d'âme est donnée par l'expression suivante:

$$\tau_{H,pl} = \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

Or, la valeur ultime de la contrainte de cisaillement en termes d'effort plastique de cisaillement horizontal est donnée par :

$$\tau_{H,pl} = \frac{V_{H,pl}}{A'_w} \quad (11)$$

En combinant les deux relations (10) et (11) ainsi en introduisant le facteur de sécurité partiel  $\gamma_R$ , l'effort plastique de cisaillement horizontal est donné par :

$$V_{H,pl} = \frac{1}{\gamma_R} \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} A'_w \quad (12)$$

$f_{yw}$ : est la limite d'élasticité de l'acier de l'âme

## Chapitre 3 : Étude analytique et validation par éléments finis

$\gamma_R$ : représente le facteur de sécurité partiel dépendant de la nature du matériau, il est pris égale à 1,1.

$A'_w$ : est la section transversale réduite d'un montant d'âme, elle est donnée par :

$$A'_w = \frac{A_w}{k} \quad (12)$$

$A_w$ : est la section transversale du montant d'âme ( $A_w = w \cdot t_w$ ).

$k$  : représente le facteur de cisaillement de la section transversale du montant d'âme ( $k = 3/2$ )

La charge externe  $F$  provoquant le flambement local au niveau d'un tel montant d'âme selon la relation (eq.1) est donnée par l'expression suivante:

$$F = 0,35 \frac{y_N}{S} A_w \cdot f_{yw} \quad (13)$$

Enfin, la charge ultime provoquant le flambement local des montants d'âme sous cisaillement est déterminée à l'aide de l'expression suivante:

$$F_u = k_F \cdot \lambda \cdot F \quad (14)$$

$k_F$ : représente le coefficient de correction dû au nombre des ouvertures (influence de l'effort tranchant vertical qui n'est pas pris en compte dans cette approche).

$\lambda$ : représente le coefficient de majoration dû à l'effet de l'élanement de la poutre caractérisé par  $(1+H/L)$ .

### 3.3. Calibrage du modèle analytique par rapport au modèle numérique

Afin de prouver la fiabilité de l'approche analytique proposée, il a été question au cours de cette étude d'évaluer tout d'abord le coefficient de correction ( $k_F$ ) par la baie du nombre des ouvertures, et après un certain calcul préliminaire, on a pu mettre en évidence l'évaluation de celui-ci (voir tableau 3.2).

Les caractéristiques géométriques des poutres étudiées sont données dans le tableau 3.1.

*Tableau 3.1: Caractéristiques géométriques des poutres.*

Section	H <sub>t</sub> (mm)	b <sub>f</sub> (mm)	t <sub>f</sub> (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	r (mm)	D (m)
<b>IPE400</b>	600	180	13.5	8.6	21	0.45
<b>IPE500</b>	750	200	16	10.2	21	0.5625
<b>IPE600</b>	900	220	19	12	24	0.675



## Chapitre 3 : Étude analytique et validation par éléments finis

Tableau 3.2: Evaluation de ( $k_F$ ) et de ( $\lambda$ ).

Nombre d'ouvertures	Coefficient de correction $k_F$	IPE400			IPE500			IPE600		
		L (m)	H (m)	$\lambda$	L (m)	H (m)	$\lambda$	L (m)	H (m)	$\lambda$
6 ouvertures	1	3.6	0.6	1.17	4.275	0.75	1.175	4.95	0.9	1.182
8 ouvertures	0.95	4.8		1.125	5.7		1.132	6.6		1.136
10 ouvertures	0.90	6.0		1.1	7.125		1.105	8.25		1.109
12 ouvertures	0.80	7.2		1.083	8.55		1.088	9.9		1.09
14 ouvertures	0.75	8.4		1.071	9.975		1.075	11.5 5		1.078

A cet effet une comparaison a été effectuée entre les valeurs de la charge ultime obtenues par les deux approches analytique et numérique des poutres cellulaires de différentes nuances d'acier (S235, S275 et S355) et pour différentes portées en fonction de différentes sections en gardant la même largeur du montant d'âme ( $w = 150\text{mm}$ ).

Tableau 3.3: Charge ultime produisant le flambement des montants d'âme (S235).

Nombre d'ouvertures	Charge ultime (kN)								
	IPE400			IPE500			IPE600		
	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$
6 ouv	117.54	117.56	0.99	148.81	147.67	1.01	189.83	180.76	1.05
8 ouv	104.05	107.69	0.97	127.13	135.05	0.94	159.97	165.11	0.97
10 ouv	101.56	99.76	1.02	123.91	124.97	0.99	152.00	152.67	0.99
12 ouv	85.56	87.33	0.98	109.41	109.32	1.00	134.77	133.48	1.01
14 ouv	82.98	80.97	1.02	104.76	101.31	1.03	127.31	123.65	1.03

Tableau 3.4: Charge ultime produisant le flambement des montants d'âme (S275).

Nombre d'ouvertures	Charge ultime (kN)								
	IPE400			IPE500			IPE600		
	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$
6 ouv	133.60	137.57	0.97	169.20	172.80	0.98	207.56	211.52	0.98
8 ouv	118.40	126.02	0.94	149.37	158.04	0.94	180.88	193.22	0.94
10 ouv	110.61	116.74	0.95	138.63	146.24	0.95	171.19	178.66	0.96
12 ouv	102.03	102.19	0.99	129.64	127.93	1.01	153.34	156.20	0.98
14 ouv	92.63	94.75	0.98	121.30	118.55	1.02	144.58	144.70	1.00

Tableau 3.5: Charge ultime produisant le flambement des montants d'âme (S355).

Nombre d'ouvertures	Charge ultime (kN)								
	IPE400			IPE500			IPE600		
	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$
6 ouv	163.74	177.59	0.92	204.73	223.07	0.92	255.62	273.06	0.94
8 ouv	149.88	162.68	0.92	187.91	204.01	0.92	230.56	249.43	0.92
10 ouv	141.13	150.70	0.94	176.34	188.78	0.93	215.12	230.63	0.93
12 ouv	130.47	131.92	0.99	160.49	165.14	0.97	188.55	201.64	0.93
14 ouv	115.51	122.32	0.94	145.68	153.04	0.95	174.49	186.80	0.93

## Chapitre 3 : Étude analytique et validation par éléments finis

Selon les tableaux ci-dessus, il est à constater que les valeurs obtenues par l'approche proposée pour le calcul de la charge ultime produisant le flambement des montants d'âme par cisaillement concordent bien avec celles obtenues numériquement.

Pour une meilleure analyse sur la fiabilité de cette approche analytique, il s'est avéré de calibrer cette dernière par rapport au modèle numérique d'une poutre cellulaire comportant 8 ouvertures de différentes nuances d'acier (S235, S275 et S355) et pour différentes largeurs du montant d'âme  $w$  (100mm, 130mm et 150mm).

La comparaison de résultats est établie dans les tableaux ci-dessous, entre la valeur obtenue par l'approche analytique proposée  $F_{Uth}$  à celle obtenue par la solution numérique  $F_{Ufe}$ .

**Tableau 3.6:** Comparaison des résultats des deux modèles analytique et numérique (S235).

w (m)	Charge ultime (kN)								
	IPE400			IPE500			IPE600		
	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$
0,100	78.48	79.11	0.99	96.71	97.68	0.99	115.25	118.08	0.98
0,130	95.53	96.92	0.98	117.52	120.83	0.97	139.05	147.09	0.94
0,150	104.05	107.69	0.97	127.13	135.05	0.94	159.97	165.11	0.97

**Tableau 3.7:** Comparaison des résultats des deux modèles analytique et numérique (S275)

w (m)	Charge ultime (kN)								
	IPE400			IPE500			IPE600		
	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$
0,100	91.98	92.58	0.99	110.73	114.30	0.97	136.71	138.18	0.99
0,130	108.81	113.42	0.96	133.57	141.40	0.94	168.75	172.13	0.98
0,150	118.40	126.02	0.94	149.37	158.04	0.94	180.88	193.22	0.94

**Tableau 3.8:** Comparaison des résultats des deux modèles analytique et numérique (S355)

w (m)	Charge ultime (kN)								
	IPE400			IPE500			IPE600		
	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}/F_{Uth}$
0,100	115.81	119.51	0.98	142.14	147.56	0.96	177.48	178.38	0.99
0,130	138.77	146.41	0.95	172.15	182.53	0.94	205.15	222.20	0.92
0,150	149.88	162.68	0.92	187.91	204.01	0.92	230.56	249.43	0.92

D'après les résultats obtenus selon les tableaux ci-dessus, il est à constater que l'approche proposée pour le calcul de la charge ultime produisant le flambement des montants d'âme par cisaillement s'entend bien avec modèle numérique.

### 3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle analytique a été développé ci-dessus dont le but de déterminer la charge ultime provoquant l'instabilité locale (flambement des montants d'âme) par cisaillement dans telle poutre métallique fabriquée en profilé IPE, soumise à l'effet d'une charge transversale concentrée à mi portée.

Les résultats obtenus par la méthode analytique sont ensuite comparés avec ceux obtenus numériquement ; d'où une bonne concordance s'est obtenue entre les deux méthodes.

# **Chapitre 4**

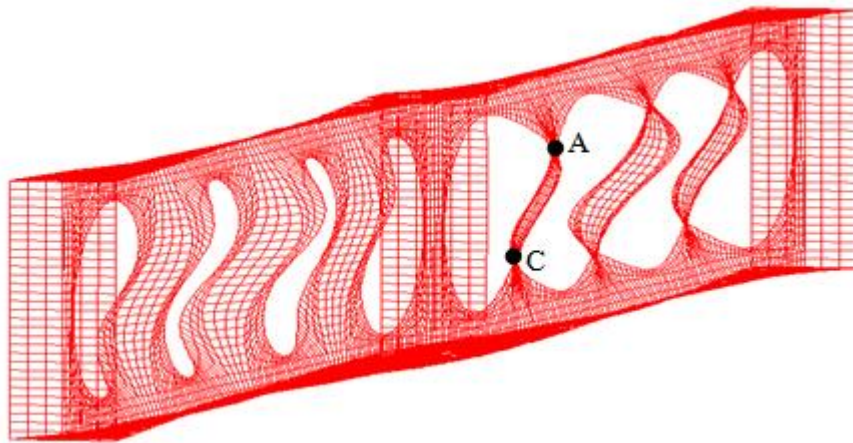
Etude paramétrique

### 4.1.Introduction

Un modèle numérique non linéaire a été défini et validé dans le chapitre 2 par une comparaison avec des résultats expérimentaux. Ce modèle va nous permettre d'étudier le comportement des poutres métalliques cellulaires simplement appuyées à l'état ultime.

A cet effet, une étude paramétrique est menée à savoir l'influence de la section, de la portée, de l'espacement et de la nuance de la poutre sur le comportement de celles-ci dans le domaine non-linéaire, dont le but est de prédire la charge ultime provoquant le flambement des montants d'âmes par cisaillement.

Il est à se rappeler que le flambement du montant d'âme est caractérisé par les déplacements hors-plan au niveau de la section critique présentée par les parties supérieure (point A) et inférieure (point C) du montant d'âme (figure 4.1). Les emplacements des points indiqués dans les graphiques sont identifiés sur le modèle de la poutre associée

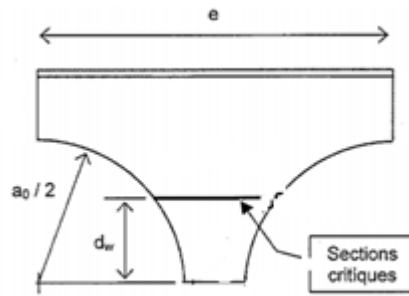


*Figure 4.1: Emplacements des points indiqués dans les graphiques.*

Les parties supérieure (point A) et inférieure (point C) représentent les points (section critique) de déformation maximale hors plan [36], ces points sont situés à une distance approximative de la ligne de soudure des membrures (figure 4.2); cette distance ( $d_w$ ) repérant la section critique en fonction des caractéristiques géométriques de l'ouverture, elle est donnée par l'expression suivante :

$$d_w = \frac{a_0}{2} \sqrt{\frac{\sqrt{\alpha^4 + 8\alpha^2 - \alpha^2 - 2}}{2}}$$

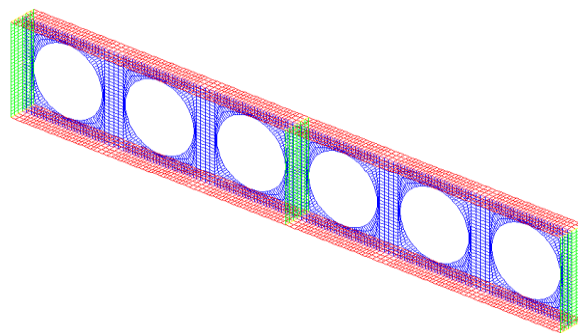
$$1.08 < \alpha = e/a_0 < 1.75$$



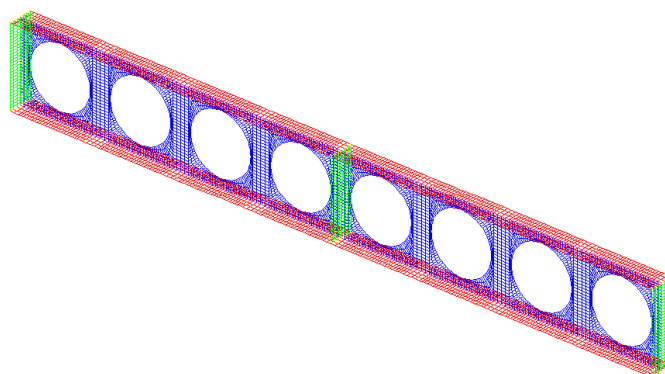
*Figure 4.2: Section critique dans un montant d'âme [1].*

### 4.2. Influence de la section de la poutre

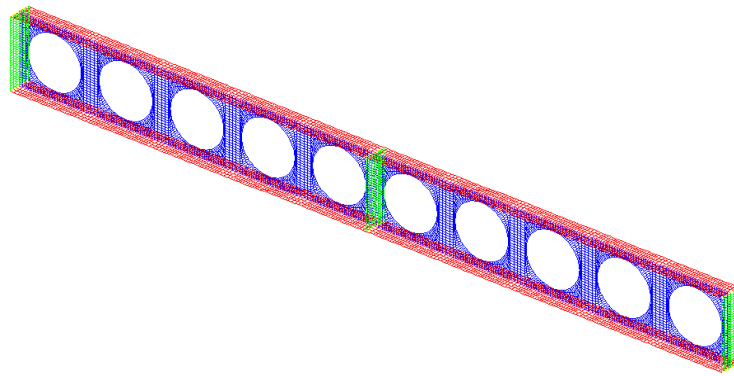
Nous allons montrer l'influence de la section de la poutre sur son comportement vis-à-vis le flambement des montants d'âme par cisaillement, à savoir l'estimation de la charge ultime associée, en faisant varier la section et garder la même portée (6, 8, 10, 12 et 14) pour une largeur des montants d'âmes égale à 15cm.



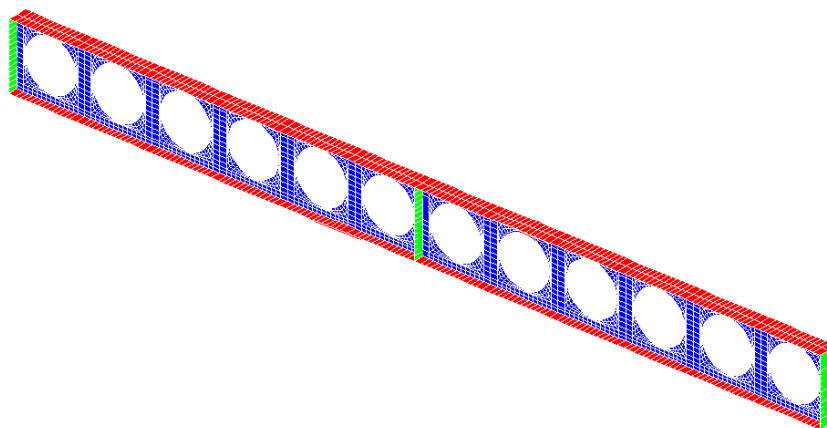
**a-** Poutre cellulaire comportant 6 ouvertures



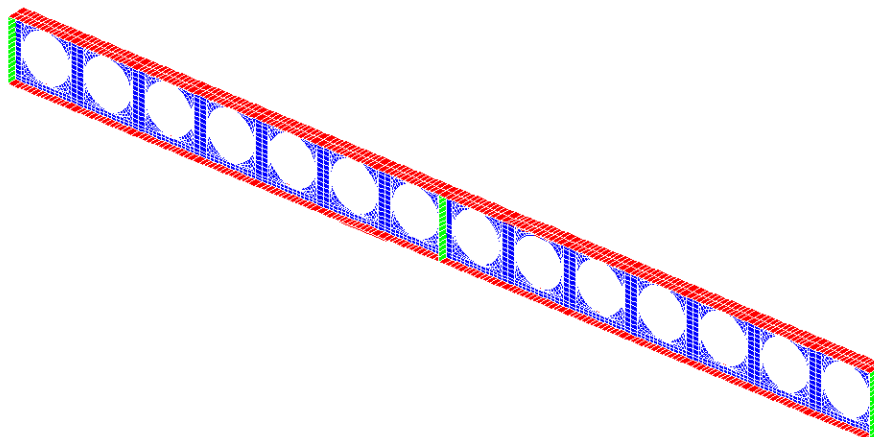
**b-** Poutre cellulaire comportant 8 ouvertures



c- Poutre cellulaire comportant 10 ouvertures



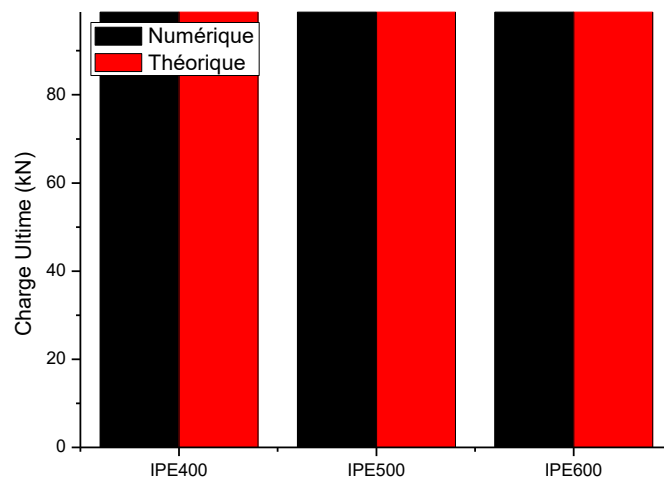
d- poutre cellulaire comportant 12 ouvertures



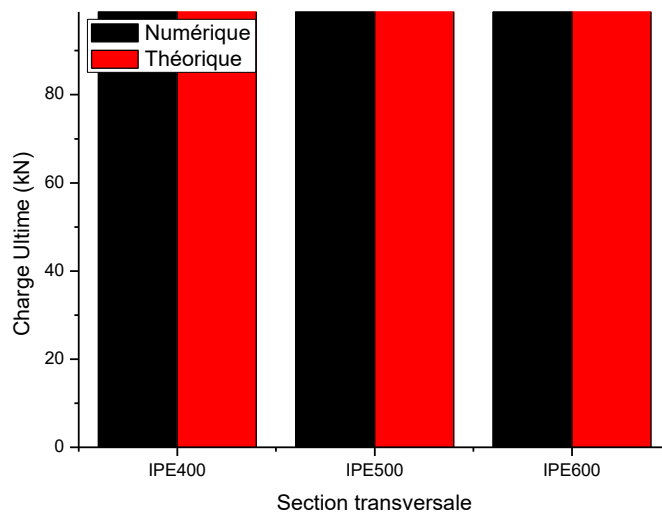
e- Poutre cellulaire comportant 14 ouvertures

*Figure 4.3: Configuration des poutres cellulaires étudiées*

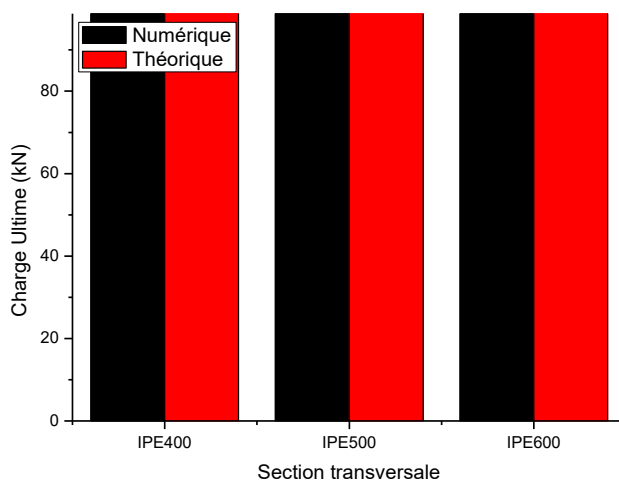
Les graphes de la figure ci-dessous (figure 4.4) représentent la variation de la charge ultime produisant le déplacement hors plan du montant intermédiaire d'âme de la poutre en fonction de différents profilés en IPE de nuance S235.



**a- Cas d'un nombre d'ouvertures (6ouv)**

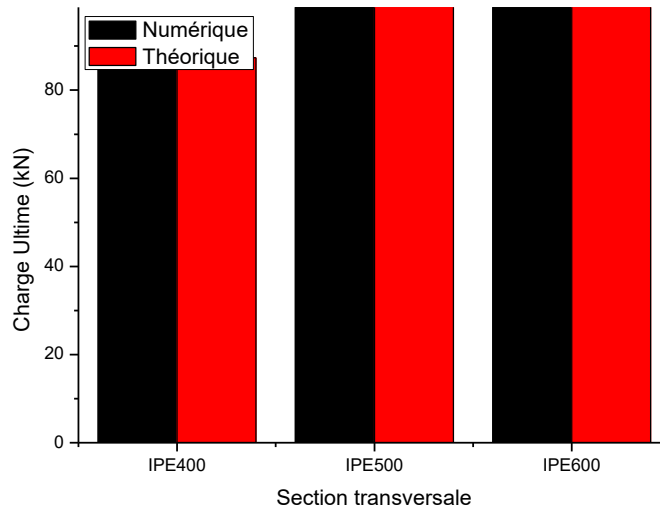


**b- Cas d'un nombre d'ouvertures (8ouv)**

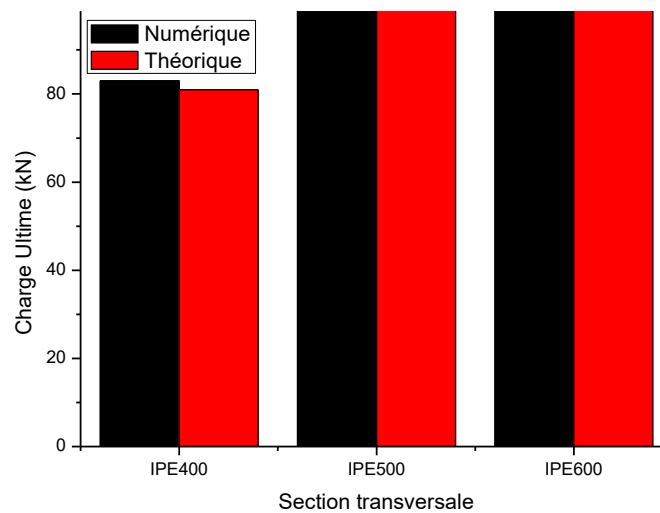


**c- Cas d'un nombre d'ouvertures (10ouv)**





**d- Cas d'un nombre d'ouvertures (12ouv)**



**e- Cas d'un nombre d'ouvertures (14ouv)**

**Figure 4.4:** Variation de la charge ultime produisant le flambement du montant d'âme.

On peut conclure donc d'après les résultats obtenus selon les histogrammes de la figure 4.4 représentée ci-dessus, que la charge ultime provoquant la stabilité au flambement des montants d'âme par cisaillement est presque de même ordre de magnitude pour différents profilés

Il est également à constater que les valeurs de la charge ultime correspondantes aux poutres cellulaires :

- Comportant 6 ouvertures, fabriquées en profilés (IPE400), (IPE500) et (IPE600) sont analytiquement d'ordre 117.56kN, 147.67kN et 180.76kN respectivement et numériquement d'ordre 117.54kN, 148.81kN et 189.83kN respectivement.
- Comportant 8 ouvertures fabriquées en profilés (IPE400), (IPE500) et (IPE600), il est à remarquer que les valeurs de la charge ultime correspondantes sont analytiquement d'ordre 107.69kN, 135.05kN et 165.11kN respectivement et numériquement d'ordre 104.05kN, 127.13kN et 159.97kN respectivement.

## Chapitre 4: Etude paramétrique

- Comportant 10 ouvertures fabriquées en profilés (IPE400), (IPE500) et (IPE600), il est à remarquer que les valeurs de la charge ultime correspondantes sont analytiquement d'ordre 99.76kN, 124.97kN et 152.67kN respectivement et numériquement d'ordre 101.56, 123.91kN et 152.00kN respectivement.
- Comportant 12 ouvertures fabriquées en profilés (IPE400), (IPE500) et (IPE600), il est à remarquer que les valeurs de la charge ultime correspondantes sont analytiquement d'ordre 87.33kN, 109.32kN et 133.48kN respectivement et numériquement d'ordre 85.56, 109.41kN et 134.77kN respectivement.
- Comportant 14 ouvertures fabriquées en profilés (IPE400), (IPE500) et (IPE600), il est à remarquer que les valeurs de la charge ultime correspondantes sont analytiquement d'ordre 80.97kN, 101.31kN et 123.65kN respectivement et numériquement d'ordre 82.98, 104.76kN et 127.31kN respectivement.

### 4.3. Influence de la portée de la poutre

Nous allons montrer l'influence de la portée de la poutre de nuance S235 sur son comportement vis-à-vis le flambement des montants d'âme par cisaillement, en faisant varier la portée et garder la même section pour une largeur des montants d'âmes égale à 15cm.

Les graphes des figures ci-dessous (figure 4.5, figure 4.6 et figure 4.7) montrent les valeurs obtenues de la charge ultime ( $F_u$ ) en fonction des hauteurs croissantes ( $L/H$ ).

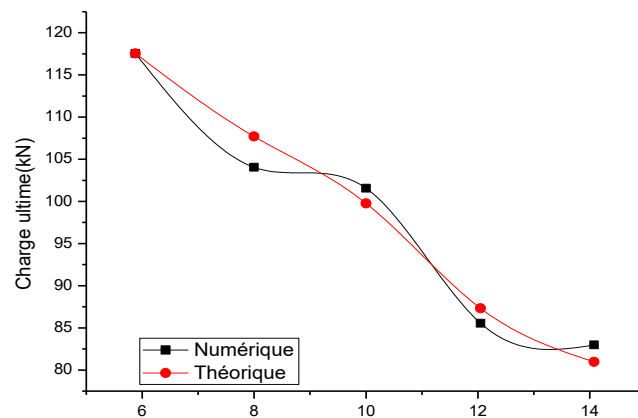


Figure 4.5: Charge ultime ( $F_u$ ) en fonction des hauteurs croissantes (IPE400).

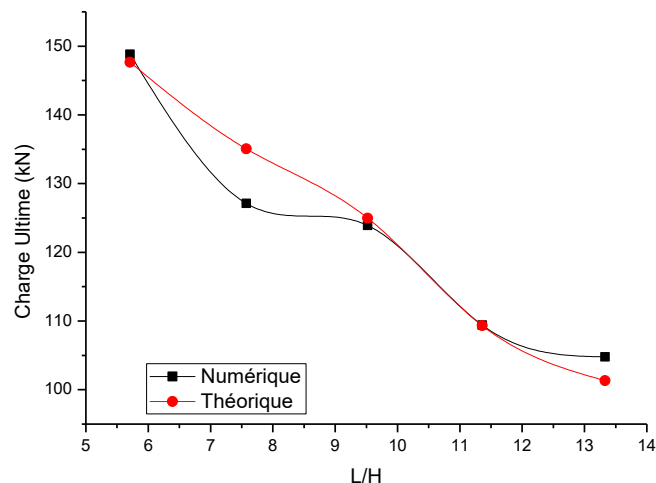


Figure 4.6: Charge ultime ( $F_u$ ) en fonction des hauteurs croissantes (IPE500).

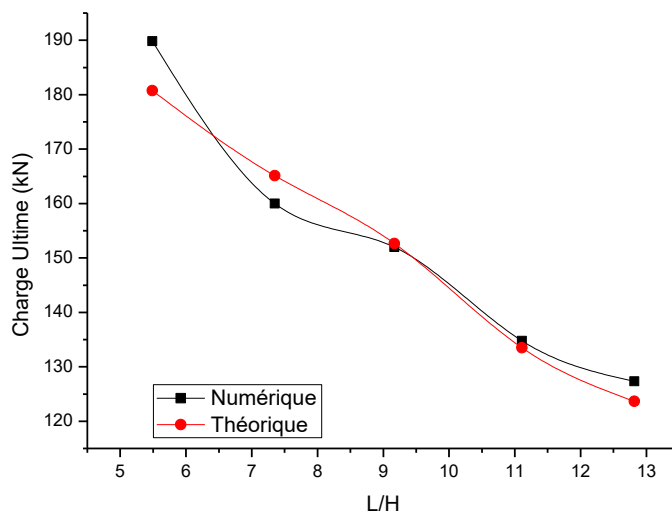


Figure 4.7: Charge ultime ( $F_u$ ) en fonction des hauteurs croissantes (IPE600).

Selon les courbes de l'évolution de la charge en fonction des hauteurs croissantes ( $L/H$ ) pour différents profilés représentés dans les figures ci-dessous (figure 4.5, figure 4.6 et figure 4.7), il est à remarquer que la longueur a une influence remarquable sur le comportement non-linéaire vis-à-vis la stabilité des montants d'âmes par cisaillement, c'est-à-dire plus la portée de la poutre est importante et plus les montants d'âmes des poutres cellulaires sont instables au cisaillement.

#### 4.4. Influence de l'espacement entre les ouvertures

Dans ce paragraphe une étude a été faite en faisant une comparaison entre les valeurs de la charge ultime obtenues produisant le flambement des montants d'âme, pour différentes largeurs des montants d'âmes variant entre 100 à 150mm, des poutres cellulaires comportant 8 ouvertures. Les mesures de comparaison entre les valeurs de la charge ultime pour des poutres cellulaires de différentes nuances d'acier (S235, S275 et S355) sont données dans les tableaux suivants :

*Tableau 4.1: Charge ultime d'une poutre cellulaire comportant 8 ouvertures (S235).*

w (m)	Charge ultime (kN)					
	IPE400		IPE500		IPE600	
	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$
0,100	78.48	79.11	96.71	97.68	115.25	118.08
0,130	95.53	96.92	117.52	120.83	139.05	147.09
0,150	104.05	107.69	127.13	135.05	159.97	165.11

*Tableau 4.2: Charge ultime d'une poutre cellulaire comportant 8 ouvertures (S275).*

w (m)	Charge ultime (kN)					
	IPE400		IPE500		IPE600	
	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$
0,100	91.98	92.58	110.73	114.30	136.71	138.18
0,130	108.81	113.42	133.57	141.40	168.75	172.13
0,150	118.40	126.02	149.37	158.04	180.88	193.22

*Tableau 4.3: Charge ultime d'une poutre cellulaire comportant 8 ouvertures (S355).*

w (m)	Charge ultime (kN)					
	IPE400		IPE500		IPE600	
	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$	$F_{Ufe}$	$F_{Uth}$
0,100	115.81	119.51	142.14	147.56	177.48	178.38
0,130	138.77	146.41	172.15	182.53	205.15	222.20
0,150	149.88	162.68	187.91	204.01	230.56	249.43

D'après les valeurs de la charge ultime obtenues par les deux méthodes (analytique et numérique) dans les tableaux (4.1, 4.2 et 4.3), nous remarquons que pour le cas des poutres cellulaires comportant 8 ouvertures fabriquées en différents profilés (IPE400, IPE500 et IPE600) de largeurs du montant d'âme étroites, la charge ultime est plus significative que celle pour le cas des mêmes poutres de largeurs du montant d'âme larges.

### 4.5. Influence de la nuance de l'acier

Dans ce paragraphe il s'est avéré utile de donner une impression sur l'influence de la nuance de l'acier utilisé de la poutre sur son comportement vis-à-vis le flambement des montants d'âme par cisaillement, en faisant varier la nuance de l'acier et garder la même portée (6 ouvertures) et la même section (IPE400) de la poutre d'une largeur du montant d'âme de 130mm.

Les graphes des figures ci-dessous (figure 4.8, figure 4.9 et figure 4.10) représentent la valeur de la charge ultime en fonction du déplacement hors plan du premier montant d'âme de la poutre cellulaire.

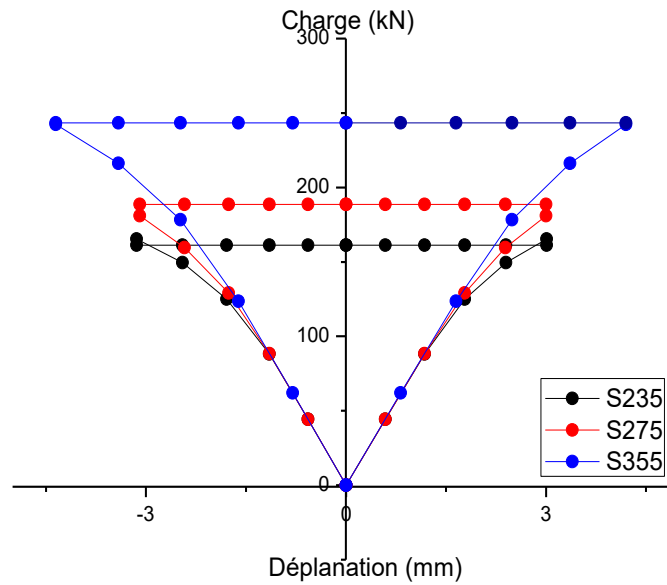


Figure 4.8: Charge- déplacement hors-plan d'une poutre cellulaire raide en IPE 400

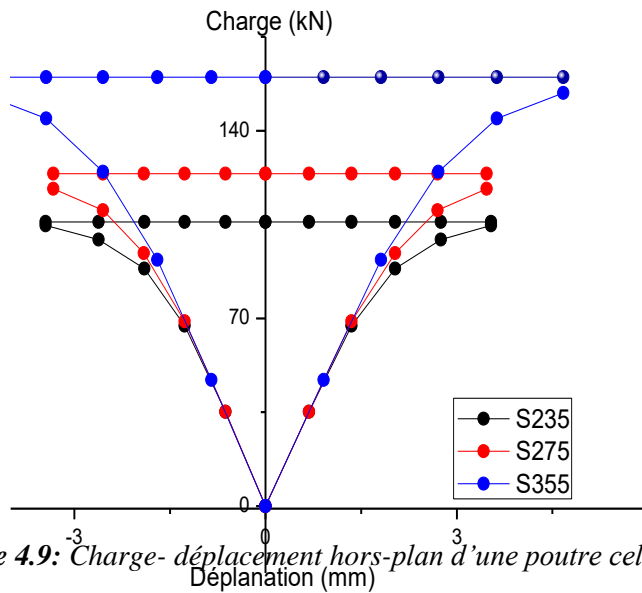


Figure 4.9: Charge- déplacement hors-plan d'une poutre cellulaire raide en IPE 500.

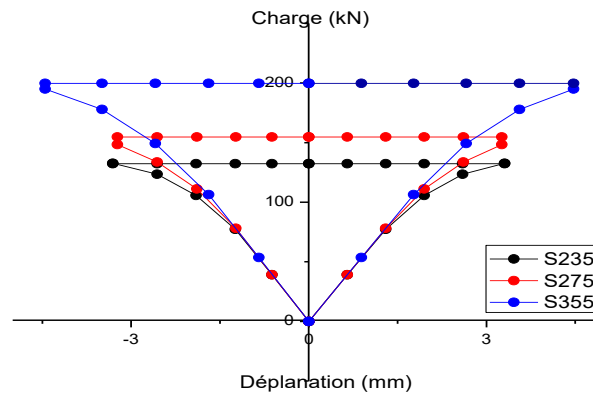


Figure 4.10: Charge- déplacement hors-plan d'une poutre cellulaire raide en IPE 600.

## Chapitre 4: Etude paramétrique

---

D'après les courbes du comportement élasto-plastique d'une poutre cellulaire pour différentes nuances de l'acier voir (figures 4.8,4.9 et 4.10), il est à remarquer qu'à l'état élastique, le comportement de la poutre représente presque les mêmes valeurs de grandeur quel que soit la nuance de l'acier, par contre à l'état plastique, il est à constater que plus la nuance de l'acier augmente, et plus la stabilité des montants d'âme est élevée, en d'autres mots la charge ultime augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la nuance de l'acier.

Il est également à constater que les valeurs de la charge ultime correspondantes aux poutres cellulaires comportant 6 ouvertures fabriquées en profilé IPE400 de nuances d'acier (S235), (S275) et (S355) sont d'ordre 105kN, 123kN et 160kN respectivement.

De même pour le cas des poutres cellulaires fabriquées en profilé IPE500 comportant 6 ouvertures, il est à remarquer que les valeurs de la charge ultime correspondantes aux nuances d'acier (S235), (S275) et (S355) sont d'ordre 132kN, 154kN et 199kN respectivement.

De même pour le cas des poutres cellulaires fabriquées en profilé IPE600 comportant 6 ouvertures, il est à remarquer que les valeurs de la charge ultime correspondantes aux nuances d'acier (S235), (S275) et (S355) sont d'ordre 161kN, 188kN et 243kN respectivement.

### 4.6. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude paramétrique a été menée afin de prédire le comportement à l'état élasto-plastique à savoir l'estimation de la charge ultime provoquant le flambement des montants d'âme par cisaillement dans les poutres métalliques cellulaires simplement appuyées.

Cette analyse montre l'application possible des deux modèles en l'occurrence le modèle analytique et le modèle numérique par élément fini en 3D à l'étude du comportement non linéaire des poutres métalliques cellulaires à sections en profilé IPE, ainsi elle permet de représenter l'influence de certains paramètres à savoir la section, la portée, l'espacement entre les ouvertures ainsi la nuance de l'acier utilisée sur le comportement des poutres métalliques cellulaires vis-à-vis le flambement des montants d'âme par cisaillement.

# **Conclusion générale**

### CONCLUSION GÉNÉRALE

Les objectifs principaux de notre travail étaient, d'une part d'élaborer un modèle couplé modélisation analytique-numérique permettant le calcul de la charge ultime produisant le flambement du montant d'âme par cisaillement dans les poutres cellulaires métalliques sous l'effet d'un chargement transversal appliquée à mi-portée et d'autre part de mener une étude paramétrique à la base d'une analyses dans le domaine non-linéaire pour prédire le comportement de ce type de poutres vis-à-vis ce type d'instabilité locale.

Le modèle numérique basé sur le logiciel d'éléments finis en 3D CAST3M a été développé en tenant en compte des imperfections géométriques initiales pour étudier le comportement des poutres cellulaires métalliques à l'état élasto-plastique vis-à-vis le flambement des montants d'âme par cisaillement. Les poutres cellulaires en acier ont été modélisées à l'aide d'éléments coques minces à quatre nœuds (*COQ4*). Une attention particulière a été apportée au choix du maillage et de la loi de comportement utilisée. Ce modèle numérique a été validé par des études comparatives avec des essais expérimentaux disponibles dans la littérature.

Le modèle analytique a été présenté (développé) dans ce mémoire pour prédire la charge ultime provoquant le flambement des montants d'âme par cisaillement dans les poutres métalliques fabriquées en profilé IPE, puis calibrer par rapport au modèle numérique en éléments finis décrit ci-dessus.

L'étude paramétrique a permis de faire les conclusions suivantes :

- La charge ultime provoquant la stabilité au flambement des montants d'âme par cisaillement est presque de même ordre de magnitude pour différents profilés.
- Les poutres à longue portée sont plus sujettes au flambement d'âme par cisaillement, autrement dit : plus la portée de la poutre est importante ; plus les montants d'âmes des poutres cellulaires sont instables au cisaillement longitudinale.
- La charge ultime produisant le flambement sous cisaillement au niveau du montant d'âme, est plus significative quand la largeur de celui-ci est étroite tandis qu'elle est moins significative quand la largeur du montant d'âme est large.
- À l'état élastique, le comportement de la poutre représente presque les mêmes valeurs de grandeur quel que soit la nuance de l'acier, par contre à l'état plastique, il est à constater que plus la nuance de l'acier augmente, et plus la stabilité des montants d'âme de la poutre est élevée, en d'autres mots la charge ultime augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la nuance de l'acier.

En résumé, le travail entrepris a permis de prouver que l'approche analytique proposée peut être facile à appliquer pour prédire la charge ultime produisant le flambement du montant d'âme



## Conclusion générale

---

par cisaillement à la base d'une étude du comportement mécanique à l'état élasto-plastique des poutres cellulaires métalliques symétriques de différentes sections et portées avec diverses caractéristiques géométriques, soumises à une charge transversale appliquée à mi-portée.

Ainsi, il a permis de montrer la fiabilité du modèle numérique en trois dimensions, représentatif de la réalité et suffisamment souple, élaborer dans le sens de permettre à bien mener des analyses numériques dans le domaine non linéaire pour prédire le comportement mécanique des poutres cellulaires métalliques vis-à-vis le flambement des montants d'âme par cisaillement.

**References**

**bibliographiques**

## References bibliographiques

---

### References bibliographiques

- [1] **REDWOOD. R.G.** (1968). "Plastic behavior and design of beams with web openings", Proceeding, 1st Canadian Structural Engineering. Conference, Canadian Steel Industry Construction Council, 127- 138.
- [2] **REDWOOD. R.G. ET UENOYA. M.** (1979). "Critical loads for webs with holes", Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of the Structural Division, 105(ST10), 2053-2067.
- [3] **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
- [4] **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.
- [5] **CEA (Commissariat à l’Energie Atomique)** « CAST3M Web site », <http://wwwcast3m.cea.fr>
- [6] **M.D. ALTIFILLISCH, B.R. COOKE, A.A. TOPRAC**, « An investigation of open web expanded beams », Welding Research Council Bulletin, Series No.47. pp 77s-88s, 1957.
- [7] **A.A. TOPRAC, B.R. COOKE**, « An experimental investigation of open-web beams. Welding Research Council Bulletin, New York. Series No.47, pp 1 – 10, 1959.
- [8] **A.N. SHERBOURNE**, «The plastic behavior of castellated beams », Proc. 2nd Commonwealth Welding Conference. Inst. Of Welding, No. C2, London. pp 1-5, 1966
- [9] **R.G. REDWOOD**, « Analyse et dimensionnement des poutres ayant des ouvertures dans les âmes », Revue Construction métallique, n°3, pp.15-27, 1978.
- [10] **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.
- [11] **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.
- [12] **A. BAZILE, J. TEXIER**, « Essais de poutres ajourées (Tests on castellated beams) », Constr. Métallique, Paris, France, Vo1.3, pp 12-25, 1968.
- [12] **P. HALLEUX**, « Limit analysis of castellated steel beams », Acier-Stahl-Steel, 325, 133- 144, 1967
- [13] **M.U. HUSAIN, W.G. SPEIRS**, « Failure of castellated beams due to rupture of welded joints », Acier-Stahl-Steel, No. 1, 1971.

## References bibliographiques

---

- [14] **S. DEMIRDJIAN**, « Stability of Castellated Beam Webs », Thèse de master, McGill University, Monreal, 1999.
- [15] **D. E. KERDAL, D.A. NETHERCOT**, « Failure modes of castellated beams », Journal of constructional steel research, vol.4, pp.295-315, 1984.
- [16] **S. DURIF ET ALL**, “Modèle mécanique pour les poutres à larges ouvertures d’âmes de section variable” XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.
- [17] **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
- [18] **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
- [19] **P. PANEDPOJAMAN et T. Rongram** “Buckling analysis for web post of cellular beams” The 10th International PSU Engineering Conference, May 14-15, 2012
- [20] **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
- [21] **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.
- [21] **P.D. PACHPOR ET AL**, “analysis and design of cellular beam and its verification” International Conference on Applied Computing, Computer Science, and Computer Engineering. 2013. IERI Procedia 7 ( 2014 ) 120 – 127
- [22] **BRITISH STANDARDS INSTITUTION BS5950**: « Structural use of steelwork in building », Part 3 Section 3.1: Code of practice for design of composite beams, 1990
- [23] **A.S. SHAIKH ET H.R. AHER**, “Structural Design of Circular Cross-Section Beam” International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE) Volume: 2 Issue: 7. July 2015
- [24] **K. KUCHTA et M. MAŚLAK**. “Failure modes determining the resistance and the stability of steel cellular beams” Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. pp 263-280, 2015.
- [25] **S. SAJU ET M. GEORGE**. “Buckling Analysis of Cellular Beams” International Journal of Engineering Development and Research. Volume 3, Issue 4. 2015.

## References bibliographiques

---

- [26] **S. A. PATIL ET P. D. KUMBHAR.** “STUDY OF CASTELLATED BEAM USING STIFFENERS: A REVIEW” *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Volume: 04 Issue: 11, Nov-2015.
- [27] **P. PANEDPOJAMAN.** “INVESTIGATION ON LATERAL TORSIONAL BUCKLING RESISTANCE OF EC3 FOR CELLULAR BEAM” *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*. Volume 2, Issue 4, Aug-2015.
- [28] **A.S. SHAIKH ET P.B. AUTADE.** “Structural Analysis and Design of Castellated Beam in Fixed Action” *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*. Volume 3, Issue 8, Aug-2016
- [29] **K. P. NIMMI ET V.N. KRISHNACHANDRAN** “Buckling Analysis of Cellular Steel Beams with and without Stiffeners” *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. Volume 4, Issue 8, Aug-2016
- [30] **F. ERDAL et al,** “Nonlinear finite element analysis of optimally designed steel cellular beams”. *Res. Eng. Struct. Mat.* Vol. 2 Iss. 2 (2016) 59-66. Feb 2016.
- [31] **B. DJEBLI,** “Vierendeel failure mechanisms of composite cellular beams: Non-linear finite element analysis” *International Conference on Advanced in Science and Arts. ICASA’17*, March 29-31, 2017
- [32] **A.S. SHAIKH ET H.R. AHER,** “Review on Study of Castellated Beam with & without Stiffeners” *International Journal of Science Technology & Engineering*. Volume 3, Issue 09. March 2017
- [33] **L. F. GRILO, R. H. FAKURY, A. L. R. DE CASTRO E SILVA, ET G. DE S. VERISSIMO,** « Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams », *J. Constr. Steel Res.*, vol. 148, p. 525-541, sept. 2018, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.06.020.
- [34] **F. SASA et H.N. ZAIR ,** «Analyse numérique des poutres cellulaires prediction de la charge ultime engendrant le flambement d’âme», Mémoire de fin d’étude pour l’obtention du diplôme de Master en Génie civil option Structures (2018)
- [35] **TSAVDARIS, KD AND CEDRIC ,D(2011)**«Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with Different Novel Web Opening Shapes», *Journal of constructional steel Research* ,67(10) .1605-1620 .ISSN 0143-974X
- [36] **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.