

Chapitre 4

Charges de ruine et Modes de ruine associés des poutres cellulaires

4.1 Introduction

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

La présence des ouvertures provoque l'apparition de modes de ruine spécifiques au type de poutre cellulaires qui sont la formation de rotule par flexion Vierendeel (figure 4.1) ; l'instabilité locale du montant intermédiaire (figure 4.2) et l'instabilité globale qui est le déversement de la poutre (figure 4.3).



Figure 4. 1. Effet Vierendeel [1]

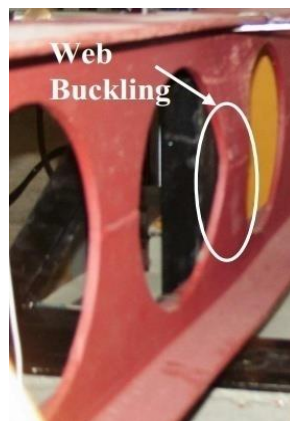


Figure 4. 2. Flambement du montant d'âme [21]

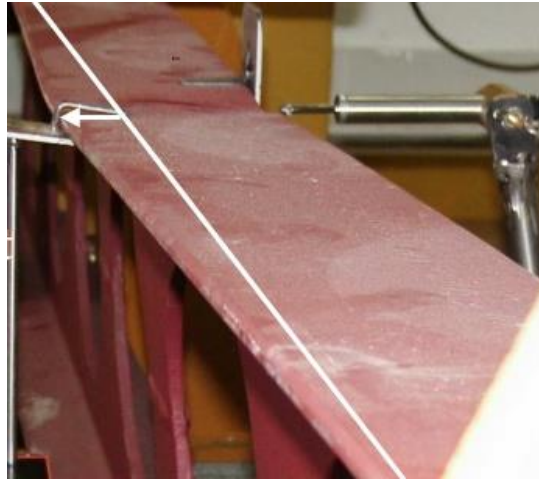


Figure 4. 3. Diversement d'une poutre cellulaire

Notre étude a été présentée en deux parties, la première partie consiste à déterminer la résistance globale, la résistance locale au droit des ouvertures et au niveau des montants d'âmes des poutres cellulaires avec les mêmes caractéristiques géométriques et mécaniques. Dans la deuxième partie une analyse sur les modes de ruine a été menée pour estimer la capacité portante ultime de ce type de poutres avec différentes caractéristiques géométriques et mécaniques.

4.2. Résistance globale

4.2.1. Flexion globale

Nous avons étudié la résistance à la flexion globale, en estimant la charge ultime des poutres cellulaires par rapport à celle des poutres à âmes pleines de profilés différents (IPE400, IPE500 et IPE600) sous l'effet d'un déplacement imposé à mi portée.

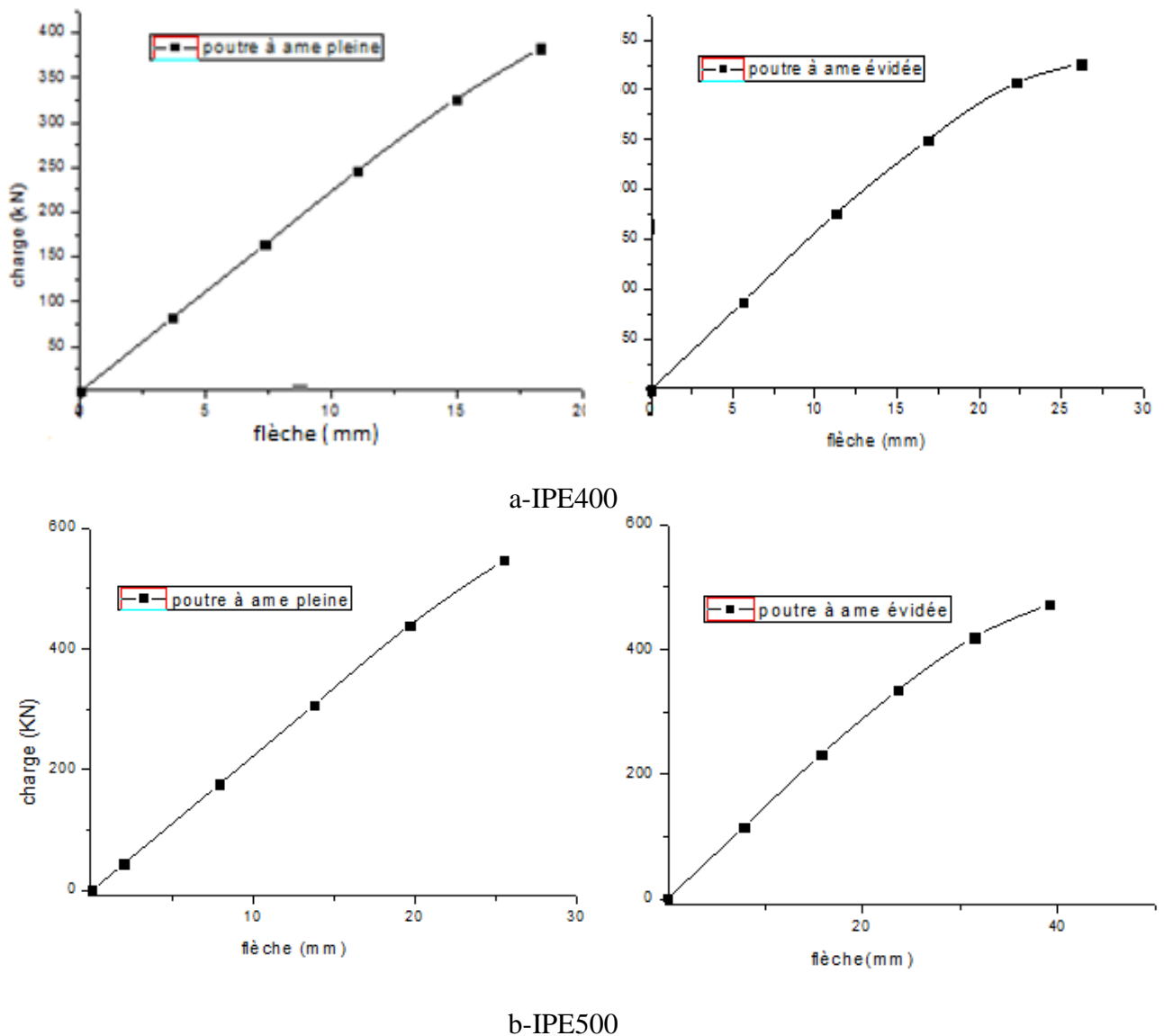
Les hauteurs des poutres cellulaires après découpage correspondantes aux poutres à âmes pleines étant égales à 560 mm, 700 mm et 840 mm respectivement.

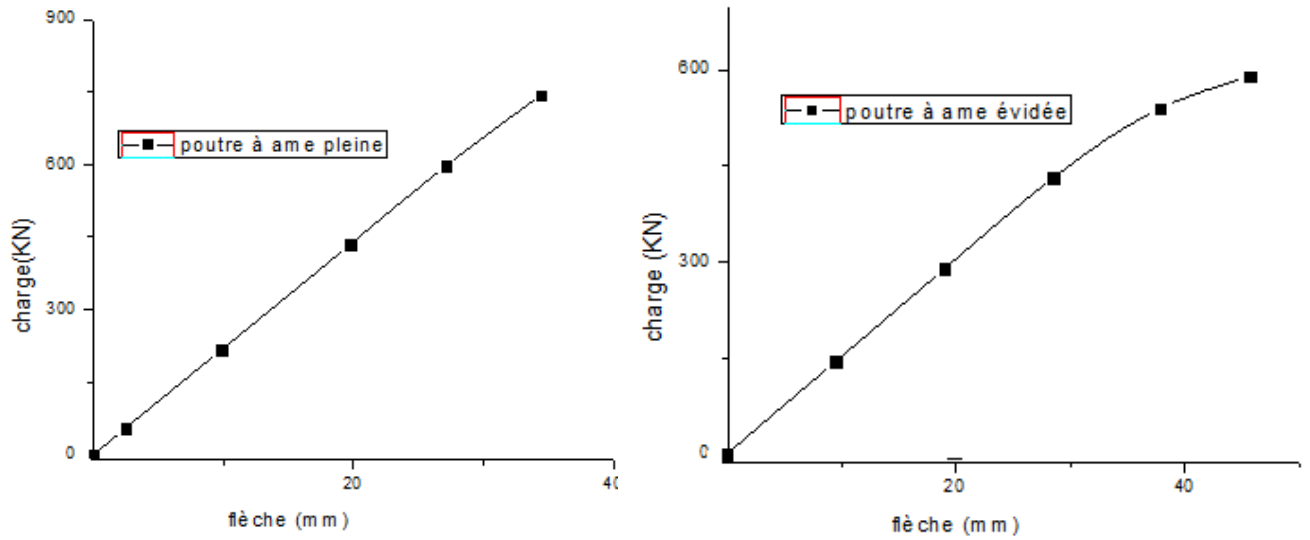
Les caractéristiques mécaniques de la poutre en acier utilisées dans cette étude sont données dans le Tableau 4.1

| | | |
|-----------------|------------------------|------------|
| Poutre en Acier | Limite d'élasticité | 355 MPa |
| | Module de Young | 210000 MPa |
| | Coefficient de Poisson | 0.3 |

Tableau 4. 1. Propriétés du matériau de base des poutres considérées

Afin de déterminer la charge ultime, nous avons étudié l'évolution de la charge en fonction de la flèche d'une poutre (avec 9 ouvertures et sans évidement) telle qu'elle est représentée dans la figure 4.4 pour le cas d'un IPE400, IPE500, IPE600 respectivement, correspondant au rapport ($L/h = 15$), où la hauteur h correspond à la hauteur totale (H) de la section cellulaire en I.





a- IPE600

Figure 4. 4. Evolutions charge-flèche correspondant au rapport (L/h=15)

D’après les six graphes de la figure 4.4, la valeur de la charge ultime est égale à 383KN, 591KN ,507KN pour les IPE400, 500 et 600 respectivement, pour le cas des poutres sans évidement, alors qu'elle est égale à 326KN ,472KN et 589KN pour le cas de la même poutre avec évidement d’âme (poutre cellulaire).

De façon similaire nous avons déterminé pour chaque rapport (L/h) les autres charges ultimes appropriées.

Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 montrent les valeurs obtenus de la charge ultime (Wu) en fonction des hauteurs croissantes (L/h) des IPE.

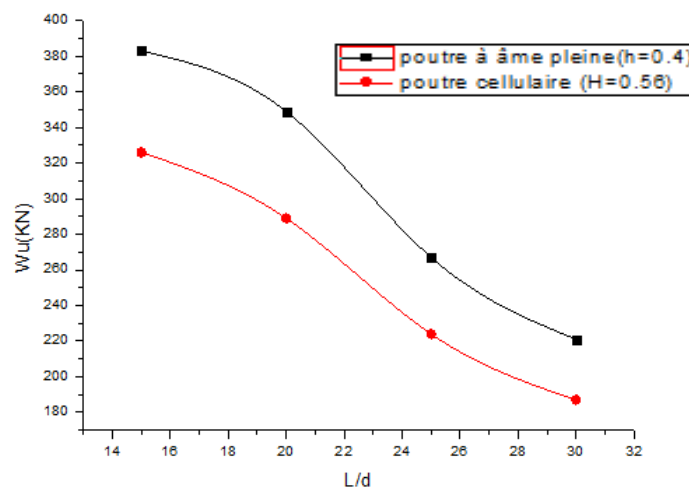


Figure 4. 5. Charges ultimes des poutres fabriquées en IPE400

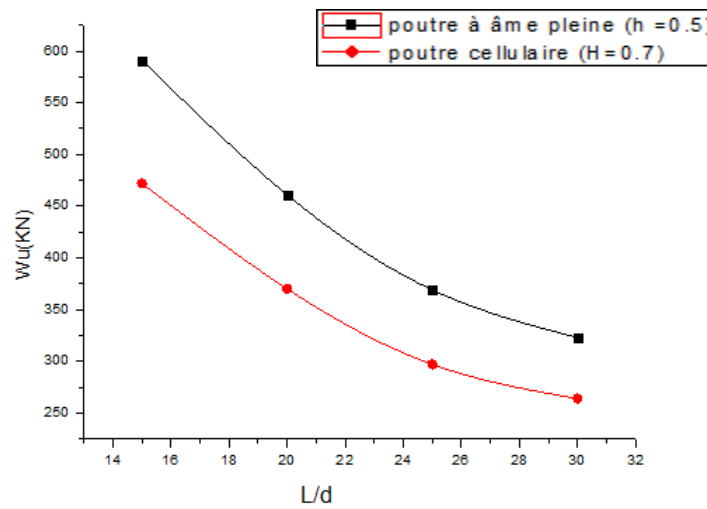


Figure 4. 6. Charges ultimes des poutres fabriquées en IPE500

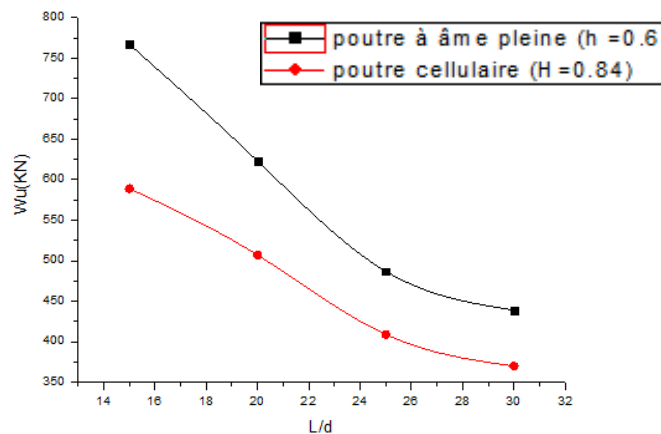


Figure 4. 7. Charge ultime des poutres fabriquées en IPE600

D'après les graphes des figures (4.5, 4.6 et 4.7) ci-dessus, il est à constater que la charge ultime des poutres cellulaires peut être estimée en multipliant d'environ 80% celle obtenue avec des poutres simples.

4.2.2. Déversement de la poutre cellulaire

Dans ce paragraphe, une étude a été faite afin de prédire le comportement de ruine à savoir le déversement des deux configurations de la poutre cellulaire précédente.

La poutre est dépourvue du maintien latéral afin de se permettre de se déplacer librement dans le sens latéral (voir figure 4.8 et 4.10).

Les mesures numériques prises sur cette poutre sont les évolutions : charge-déplacement latéral (la flèche latérale) au niveau de la partie médiane de la semelle supérieure et charge-déplacement vertical respectivement (voir figures 4.9 et 4.11).

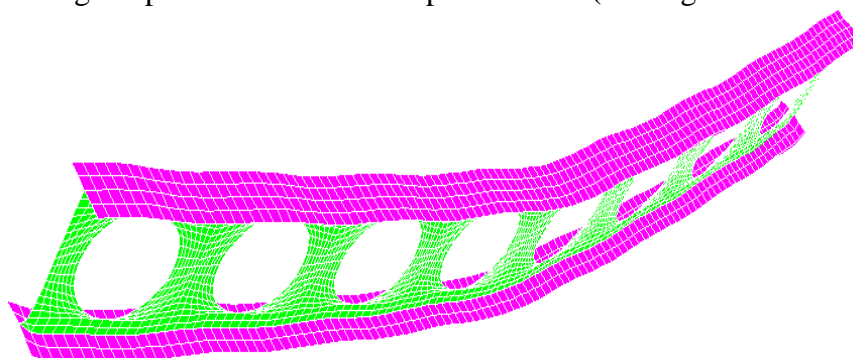


Figure 4. 8. Déversement de la poutre cellulaire {8 ouvertures}

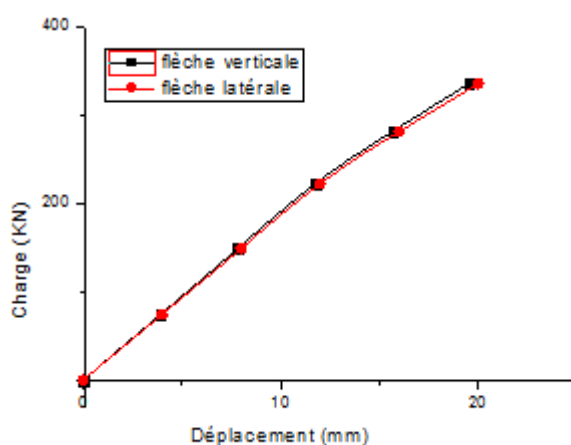


Figure 4. 9. Charges - flèche de la poutre cellulaire {8 ouvertures}

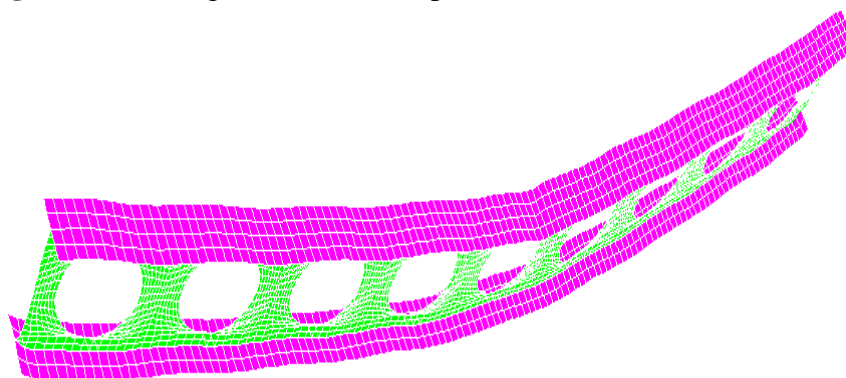


Figure 4. 10. Déversement de la poutre cellulaire {9 ouvertures}

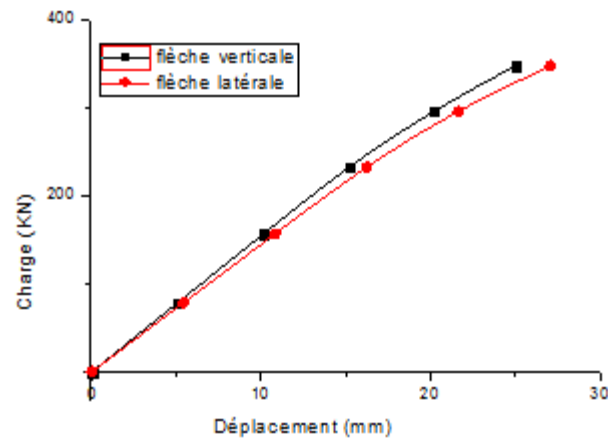


Figure 4. 11. Charges - flèche de la poutre cellulaire {9 ouvertures }

Selon les deux graphes ci-dessus, les résultats obtenus à partir des tests numériques montrent évidemment que la flèche latérale au niveau de la semelle supérieure dans la partie médiane de la poutre est de même ordre de valeur (elle pourrait être même très élevée) en comparaison avec les déplacements verticaux de la poutre. Ceci signifie que le mode de ruine développé sur cette poutre s'agit d'un déversement en raison d'un manque de support latéral. Ce mode de ruine est associé à une charge de ruine d'ordre 335kN pour le cas de la poutre cellulaire comportant 8 ouvertures et d'ordre 347kN pour le cas de la poutre cellulaire comportant 9 ouvertures.

4.3. Résistance locale

L'objectif de cette étude est de prédire le comportement de ruine de deux configurations des poutres cellulaires, l'une comportant un nombre impair d'ouverture (9 ouvertures) et l'autre comportant un nombre pair d'ouverture (8 ouvertures), sous l'effet d'un chargement transversal. A cet effet deux analyses non-linéaires ont été effectuées ; la première sur la plastification locale par effet Vierendeel et la deuxième traitera le flambement d'âme.

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

Les caractéristiques géométriques et mécaniques des poutres étudiées sont données dans le tableau 4.2.

| Spécimens | PCM | |
|--------------------------------------|---------------|---------------|
| | (8ouvertures) | (9ouvertures) |
| H (mm) | 560 | |
| b _f (mm) | 180 | |
| t _f (mm) | 13.5 | |
| t _w (mm) | 8.6 | |
| d ₀ (mm) | 420 | |
| w (mm) | 225 | |
| Portée (m) | 5.16 | 5.805 |
| Limite d'élasticité du profilé (MPa) | 413 | |

Tableau 4. 2. Caractéristiques géométriques et mécaniques des poutres étudiées

4.3.1. Plastification locale par effet Vierendeel

Le mécanisme « Vierendeel » est toujours critique dans la section la plus sollicitée au niveau de l'ouverture où le développement d'une rotule plastique est entraîné par ces sollicitations. Cette section critique est localisée au niveau des Tés inclinés d'un angle ϕ ($15^\circ < \phi < 25^\circ$) [55] par rapport à l'axe vertical de l'ouverture (figure 4.12).

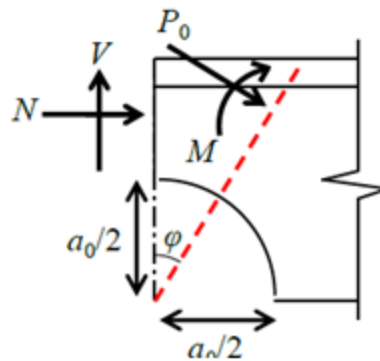
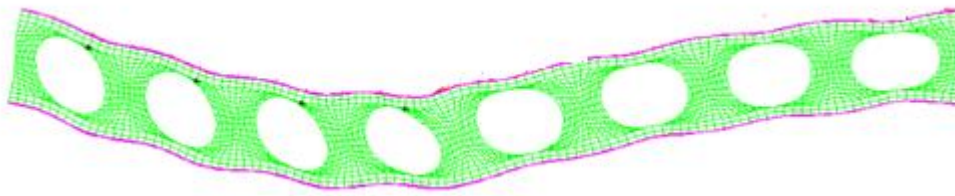


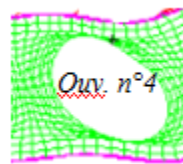
Figure 4. 12. Section critique en flexion Vierendeel

Dans ce contexte, nous avons étudié le comportement de ruine à savoir la plastification locale par effet Vierendeel (figure 4.13) –b- des deux configurations de poutres en interprétant les courbes de l'évolution charge- déplacement.

Les graphes des figures ci-dessous représentent la variation de la charge en fonction du déplacement (figures 4.13 et 4.14) au niveau d'un Té inclinés d'un angle $\phi = 20^\circ$



a- mécanisme « Vierendeel » au niveau des ouvertures



b- Rotule plastique au niveau de l'ouverture n°4

Figure 4. 13. Rotule plastique dans la membrure supérieure de la poutre

- **Cas de la poutre cellulaire comportant 8 ouvertures**

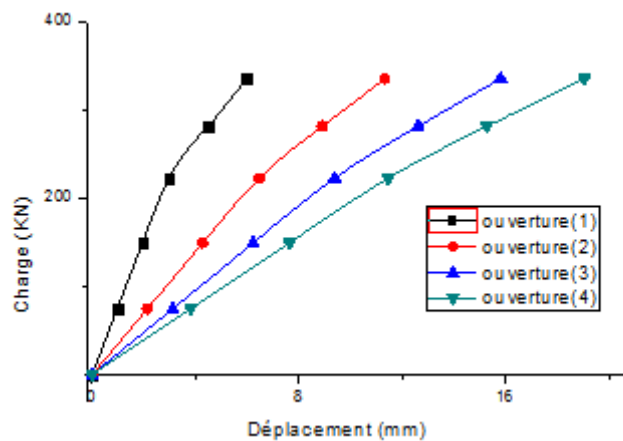


Figure 4. 14. Comportement charge-déplacement au niveau des ouvertures

D'après les résultats obtenus des courbes de la figure représentée ci-dessus, il est à remarquer pour le cas de la poutre avec un nombre pair d'ouvertures (8ouvertures) que, le déplacement de la section critique augmente au niveau d'une ouverture à un autre vers celle qui se trouve à mi-portée de la poutre.

Il est à noter que ce mode de ruine s'est développé sous l'effet d'une charge de ruine d'ordre 335kN (voir figure 4.15)

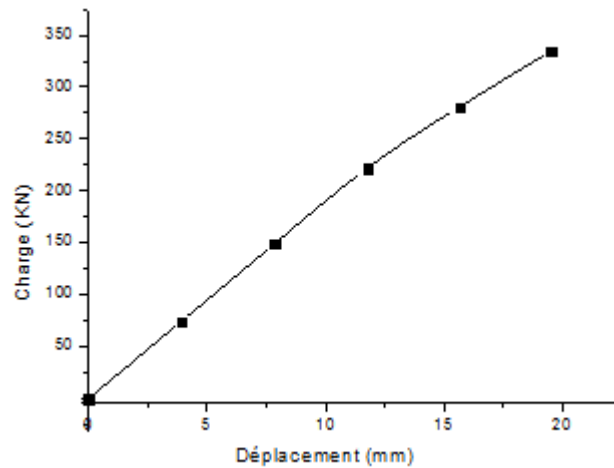


Figure 4. 15. Comportement charge-déplacement de la poutre

- **Cas de la poutre cellulaire comportant 9 ouvertures**

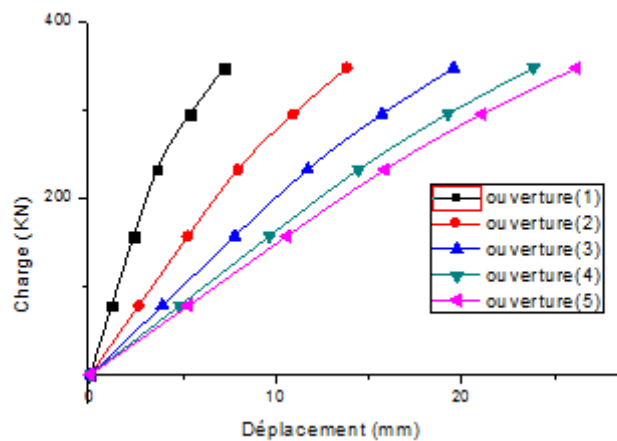


Figure 4. 16. Comportement charge-déplacement au niveau des ouvertures

De même pour le cas de la poutre avec un nombre impair d'ouvertures (9 ouvertures), il est à remarquer d'après les résultats des courbes de la figure représentée ci-dessus que, le déplacement de la section critique augmente au niveau d'une ouverture à une autre vers celle à mi-portée de la poutre. C'est-à-dire que l'effet Vierendeel est plus marquant dans la section critique de l'ouverture qui se trouve vers la mi-portée de la poutre.

Il est à noter que la charge de ruine associée à ce mode de ruine est d'ordre 347kN (voir figure 4.17).

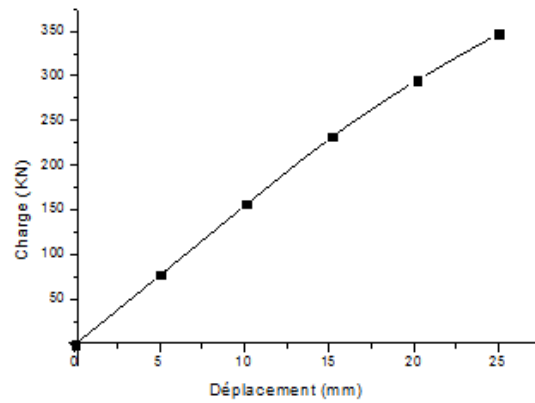


Figure 4. 17. Comportement charge-déplacement de la poutre

Pour une meilleure analyse, et afin de confirmer la localisation de la section critique (\emptyset variant entre 15° et 25°) au niveau de la quelle l’effet Vierendeel est marquant, une comparaison a été faite pour trois valeurs d’angle d’inclinaison du Té ($\emptyset = 16^\circ$; $\emptyset = 20^\circ$ et $\emptyset = 24^\circ$) pour les deux configurations des poutres cellulaires étudiées précédemment sous l’effet d’un chargement progressif (voir tableau 4.3).

| Poutres | charge ultime (kN) | Angle d’inclinaison (\emptyset) | | |
|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|------------|------------|
| | | 16° | 20° | 24° |
| Poutre avec 8 ouvertures | 335 | 19.00 | 19.07 | 19.04 |
| Poutre avec 9 ouvertures | 347 | 26.10 | 26.19 | 26.15 |

Tableau 4. 3 . Valeurs de la flèche pour différentes sections critiques

D’après les valeurs obtenues dans le tableau 4.3, on remarque que pour les deux configurations des poutres cellulaires, au niveau de la section critique localisée pour des valeurs d’angle d’inclinaison \emptyset ($15^\circ < \emptyset < 25^\circ$), la résistance au cisaillement est de 335 kN pour le cas où le nombre d’ouvertures est pair et elle est de 347 kN pour le cas où le nombre d’ouvertures est impair ; cela veut dire que les poutres sans ouverture à mi portée sont plus résistantes que celles avec ouverture à mi portée.

4.3.2. Flambement du montant d'âme

Sous l'effet du cisaillement longitudinal et de la flexion locale induite, la partie entre deux ouvertures, appelée «montant», risque d'être instable et de subir des déformations hors plan. Cette instabilité s'apparente surtout à un phénomène de voilement local et/ou de déversement local, mais l'usage, qui sera respecté ici, veut que l'on parle globalement de «flambement» du montant.

Dans ce contexte, une étude a été faite afin de prédire le comportement de ruine à savoir le flambement des montants de deux configurations des poutres cellulaires précédentes en interprétant les courbes de l'évolution charge- déplacement hors-plan.

Les graphes des figures ci-dessous (figure 4.21) représentent la variation de la charge en fonction du déplacement hors-plan (flambement des montants) au niveau du troisième montant.

Les déplacements hors-plan sont représentées graphiquement au niveau des endroits suivants: les parties supérieure (point A), au milieu (point B), et inférieure (point C) du montant d'âme (figure 4.18). Les emplacements des points indiqués dans les graphiques sont identifiés sur le modèle de la poutre associée.

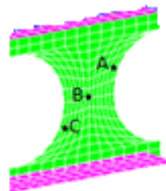


Figure 4. 18. Emplacements des points indiqués dans les graphiques

Les parties supérieure (point A) et inférieure (point C) représentent les points (section critique) de déformation maximale hors plan [1], ces points sont situés à une distance approximative de la ligne de soudure des membrures (figure 4.19); cette distance (d_w) repérant la section critique en fonction des caractéristiques géométriques de l'ouverture, elle est donnée par l'expression suivante :

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

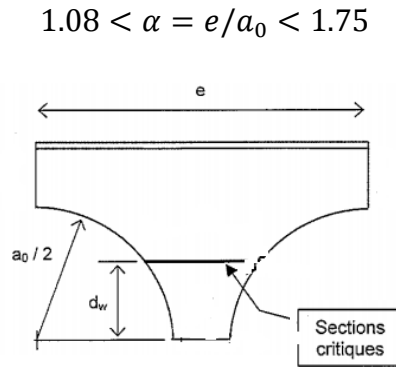


Figure 4. 19. Section critique dans un montant d'âme

Le flambement d'âme obtenu avec Cast3M est visualisé par la figure suivante :

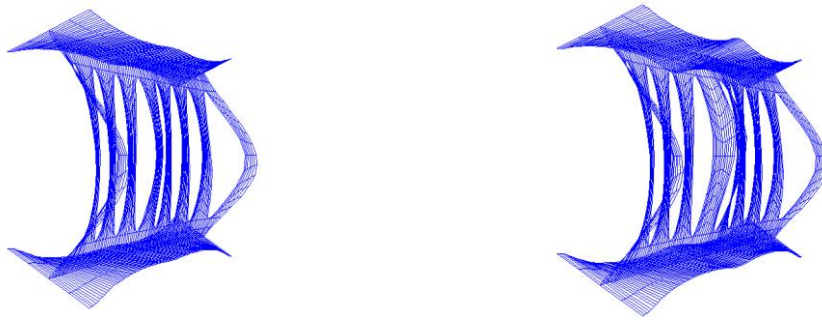
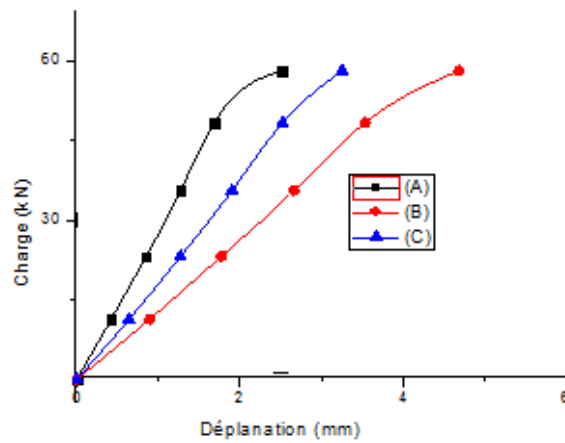
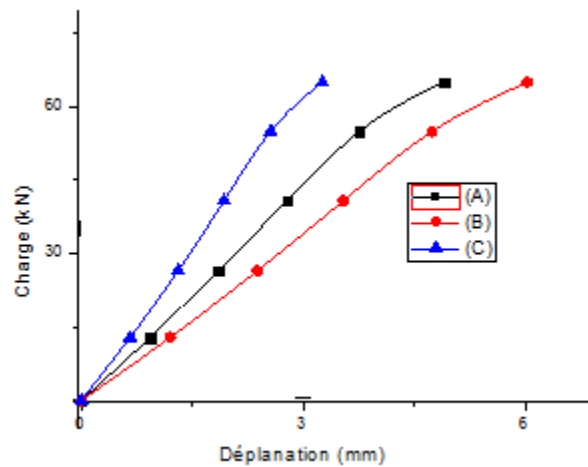


Figure 4. 20. Flambement au niveau de l'âme de la poutre obtenu avec CAST3M



Cas de la poutre cellulaire avec 8 ouvertures



Cas de la poutre cellulaire avec 9 ouvertures

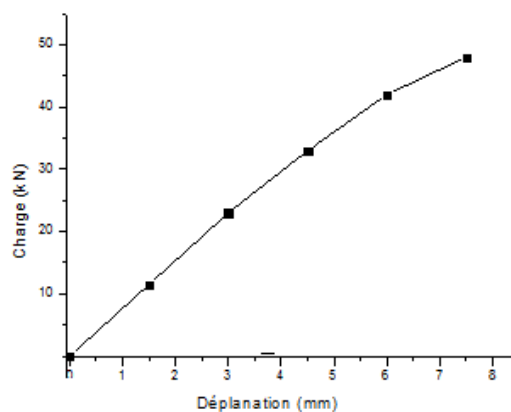
Figure 4. 21. Charge-déplacement hors-plan au niveau du montant à mi portée de la poutre

D'après les graphes représentés dans la figure 4.21, il est à constater que le déplacement hors-plan au niveau du point (B) est plus que ceux au niveau des deux points (A et C) du montant à mi portée de la poutre (quatrième montant).

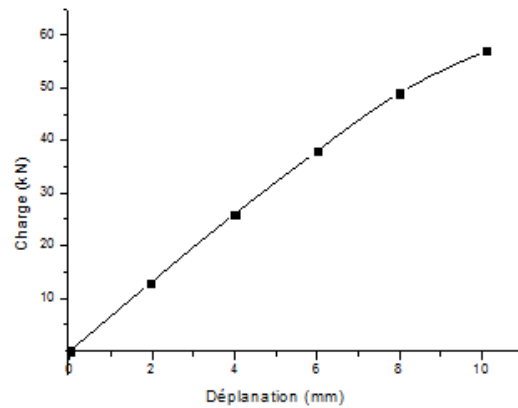
Il est également à observer que le flambement des montants d'âme, s'est produit sous l'effet d'un chargement ultime d'une valeur égale à 58.3 kN pour le cas de la poutre cellulaire avec 8 ouvertures et d'une valeur égale à 65 kN pour le cas de la poutre cellulaire avec 9 ouvertures.

Pour une meilleure analyse, nous avons fait une étude sur le flambement d'âme au niveau du point (B) dans le montant à mi portée des deux configurations des poutres cellulaires mais avec une largeur du montant d'âme (w) égale à 0.1m (figure 4.18), en suite nous avons comparé la valeur de la charge ultime trouvée avec celle obtenue précédemment pour le cas ($w = 0.225$).

Les mesures de comparaison entre les valeurs de la charge ultime sont données dans le tableau 4.4.



Cas de la poutre cellulaire avec 8 ouvertures



Cas de la poutre cellulaire avec 9 ouvertures.

Figure 4. 22. Comportement charge-déplacement hors plan (point B)

Selon les graphes représentés ci-dessus (figure 4.22), il est à constater pour les poutres cellulaires comportant 8 ouvertures, le flambement d'âme se produit sous l'effet d'une charge ultime de valeur égale à 48kN, tandis que pour les poutres cellulaires comportant 9 ouvertures, le flambement d'âme se produit sous l'effet d'une charge ultime de valeur égale à 57kN.

| Largeur du montant d'âme w (mm) | Poutre Cellulaire avec 8ouvertures (kN) | Poutre Cellulaire avec 9ouvertures (kN) |
|-----------------------------------|---|---|
| 100 | 48 | 57 |
| 225 | 58 | 65 |

Tableau 4. 4. Valeurs de la charge ultime pour différentes largeurs du montant

D'après les valeurs de la charge ultime obtenues dans le tableau 4.4, nous remarquons que pour le cas des poutres cellulaires de largeurs du montant d'âme étroites ; la charge ultime est plus significative que celle pour le cas des poutres cellulaires de largeurs du montant d'âme larges.

4.4. Analyse sur les modes de ruine (rupture)

Dans ce paragraphe, deux spécimens de poutres cellulaires (PC1 ; PC2) ayant des caractéristiques géométriques et propriétés mécaniques différentes, sont testés

numériquement ; l'objectif principal de cette analyse est d'étudier la capacité portante ultime afin de prédire le mode de ruine.

Ces poutres sont simplement appuyées et elles sont soumises à des déplacements imposés au niveau de la mi-portée.

La symétrie de la géométrie, et des conditions de chargement mécanique, nous permet de représenter seulement la moitié de la poutre.

Un maintien latéral « continu » est appliqué le long de la jonction âme – semelle (supérieure et inférieure) de la poutre en bloquant les déplacements latéraux au droit de chaque montant.

Les caractéristiques géométriques et mécaniques des poutres étudiées sont données dans le tableau 4.5.

| spécimens | PCM1 | PCM2 |
|--------------------------------------|-------|-------|
| H (mm) | 394.9 | 406.9 |
| b_f (mm) | 113 | 119 |
| t_f (mm) | 14.1 | 1502 |
| t_w (mm) | 9.4 | 10.1 |
| d_0 (mm) | 286 | 277 |
| e (mm) | 389 | 440 |
| w (mm) | 103 | 163 |
| Portée (m) | 5.057 | 5.28 |
| Limite d'élasticité du profilé (MPa) | 290 | 295 |

Tableau 4. 5. Caractéristiques géométriques et mécaniques des poutres considérées

4.4.1. Etude du premier spécimen(PC1)

Le premier spécimen (PC1) représente une poutre cellulaire avec treize ouvertures (figure 4.23), testée numériquement.

Les mesures numériques prises sur ce spécimen sont les évolutions : charge-déplacement latéral (la flèche latérale) au niveau de la partie médiane de la semelle supérieure et charge-déplacement vertical au niveau de l'ouverture centrale (voir figures 4.24)

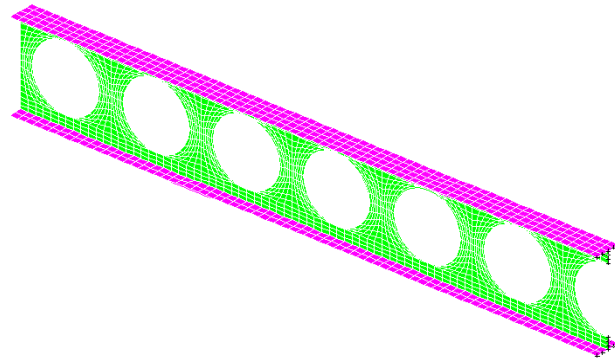


Figure 4. 23. Poutre cellulaire testée { 13 ouvertures }

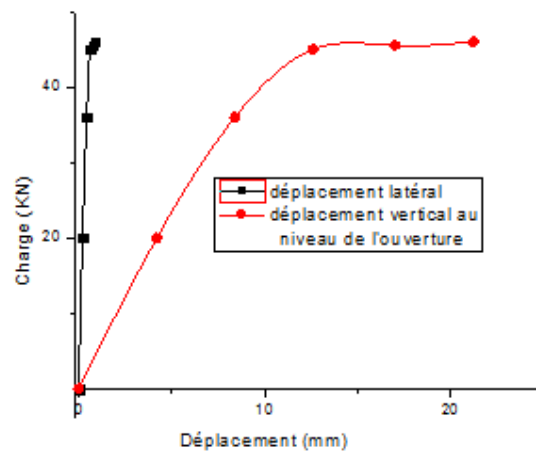


Figure 4. 24. Charges - Déplacement de la poutre cellulaire { 13 ouvertures }

Selon le graphe ci-dessus, les résultats obtenus à partir du test numérique montrent que la capacité flexionnelle des tés supérieur et inférieur est critique, parce qu'une flexion Vierendeel au niveau de l'ouverture a eu lieu à mi portée de la poutre.

Outre la charge ultime, les valeurs de flèches correspondantes et le type du mode de ruine sont illustrés dans le tableau 4.6.

| Spécimen (PC1) | Test numérique |
|---------------------------|--------------------|
| Charge ultime (kN) | 45.67 |
| Flèche (mm) Latérale | 0.87 |
| Flèche (mm) à l'ouverture | 21.23 |
| Type de ruine | flexion vierendeel |

Tableau 4. 6. Capacité portante ultime et mode de ruine du spécimen (PC1)

D’après les valeurs du tableau 4.6, on remarque que pour ce type de mode de ruine (flexion Vierendeel) le déplacement vertical au niveau de l’ouverture est plus grand que le déplacement latéral, ce dernier représente une valeur infiniment petite.

4.4.2. Etude du deuxième spécimen(PC2)

Le deuxième spécimen (PC2) représente une poutre cellulaire avec douze ouvertures, testée numériquement. (Figure 4.25).

Les mesures numériques prises sur ce spécimen sont les évolutions : charge-déplacement latéral (la flèche latérale) au niveau du montant central, charge-déplacement vertical au niveau de l’ouverture (voir figures 4.26)

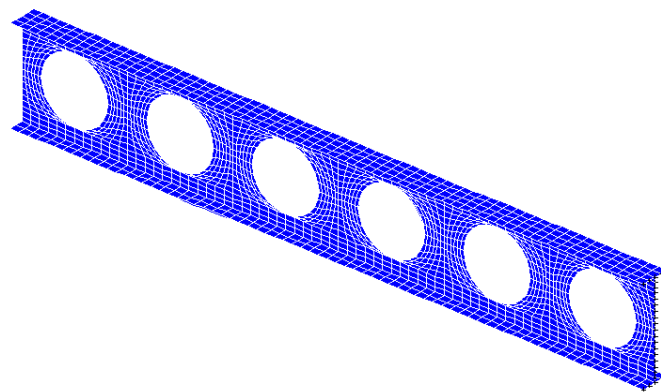


Figure 4. 25. Poutre cellulaire testée {12 ouvertures}

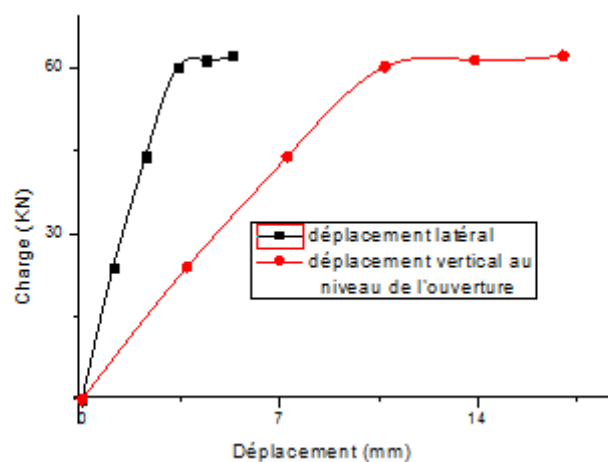


Figure 4. 26. Charges- Déplacement de la poutre cellulaire {12 ouvertures}

D'après la figure ci-dessus, il est à remarquer qu'un mode de ruine mixte s'est produit, sous un chargement directement appliqué au droit du montant d'âme est défini par une flexion Vierendeel au niveau de l'ouverture et un flambement d'âme.

La charge ultime et les valeurs de flèches correspondantes sont illustrées dans le tableau 4.7.

| | |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Spécimen (PCM3) | Test 1 |
| Charge ultime (kN) | 62.30 |
| Flèche (mm) Latérale | 5.32 |
| Flèche (mm) à l'ouverture | 17.00 |
| Type de ruine | flexion vierendeel ; flambement d'âme |

Tableau 4. 7. Capacité portante ultime et mode de ruine du spécimen (PC2)

D'après les valeurs du tableau 4.7, on remarque que pour ce type de mode de ruine (flexion Vierendeel plus flambement d'âme) le déplacement vertical au niveau de l'ouverture est plus grand que le déplacement latéral, ainsi ce dernier représente une valeur considérable en comparaison avec celui du spécimen précédent (PC1).

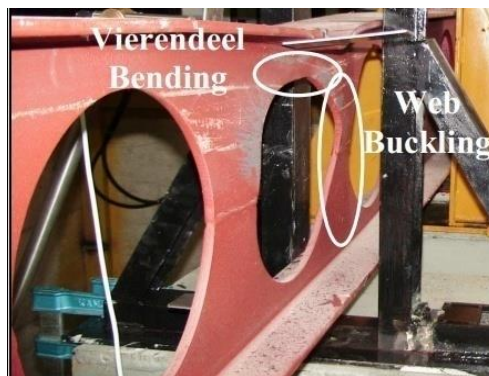


Figure 4. 27 .Flexion Vierendeel et flambement d'âme

4.5. Conclusion

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

Cette analyse numérique montre l'application possible du modèle MEF 3D à l'étude du comportement non linéaire, ainsi elle permet de représenter l'influence de l'ouverture sur le comportement global de la poutre cellulaire en étudiant la capacité portante ultime et prédire les différents modes de ruine. Ainsi, il est à souligner que l'effet vierendeel représente le mode de ruine le plus marquant que les autres modes de ruine existants.