

Chapitre 4

Etude paramétrique

4.1. Introduction :

Dans les chapitres précédents nous avons donné une présentation générale sur le dimensionnement et le calcul de la résistance à l'effet Vierendeel des poutres métalliques avec ouvertures d'âmes.

Dans ce chapitre nous allons mener une étude paramétrique afin de prédire le comportement des poutres métalliques comportant des évidements d'âme dans le domaine plastique où nous allons appliquer les méthodes de calcul vus précédemment pour divers exemples. Il s'agit de poutres métalliques à une seule travée de longueurs différentes et qui comportent des ouvertures de type rectangulaires ou circulaires dans l'âme, avec des conditions aux limites et des sollicitations représentatives des différents cas envisageables.

Nous étudierons alors, des poutres isostatiques, chargées soit par une ponctuelle, soit par une charge uniformément répartie. Chacune des différentes configurations considérées est illustrée par des figures dans chaque exemple.

Les étapes suivantes seront suivies :

- Dans la première étape, nous présentons une comparaison entre les résultats obtenus selon l'Annexe N de l'eurocode3 et ceux obtenus par la méthode de Wong (W1) d'une solive d'un plancher métallique comportant deux ouvertures d'âme positionnées symétriquement.
- Dans la deuxième étape, nous présentons l'influence du type d'ouvertures sur le comportement des poutres en comparant entre les poutres à ouvertures rectangulaires et les poutres à ouvertures circulaires
- Dans la troisième étape, nous présentons une étude sur l'influence de la hauteur d'une part et de la longueur d'autre part de l'ouverture rectangulaire sur la résistance à l'effet Vierendeel de la poutre.
- Dans la quatrième étape, nous faisons une étude sur le mécanisme Vierendeel afin de vérifier la sécurité structurale d'une poutre avec ouvertures isolées multiples.
- Dans la cinquième étape, nous présentons une étude sur le calcul de résistance à l'effet Vierendeel des poutres cellulaires en utilisant le code de calcul « ACB+ ».

4.2. Comparaison des résultats entre la méthode de l'Eurocode3 annexe N et de Wong

Dans ce paragraphe une comparaison a été faite entre la méthode de l'Eurocode3 dans son annexe N et celle de Wong (W1) sur une solive d'un plancher métallique comportant deux ouvertures d'âme positionnées symétriquement comme montrée dans la figure suivante :

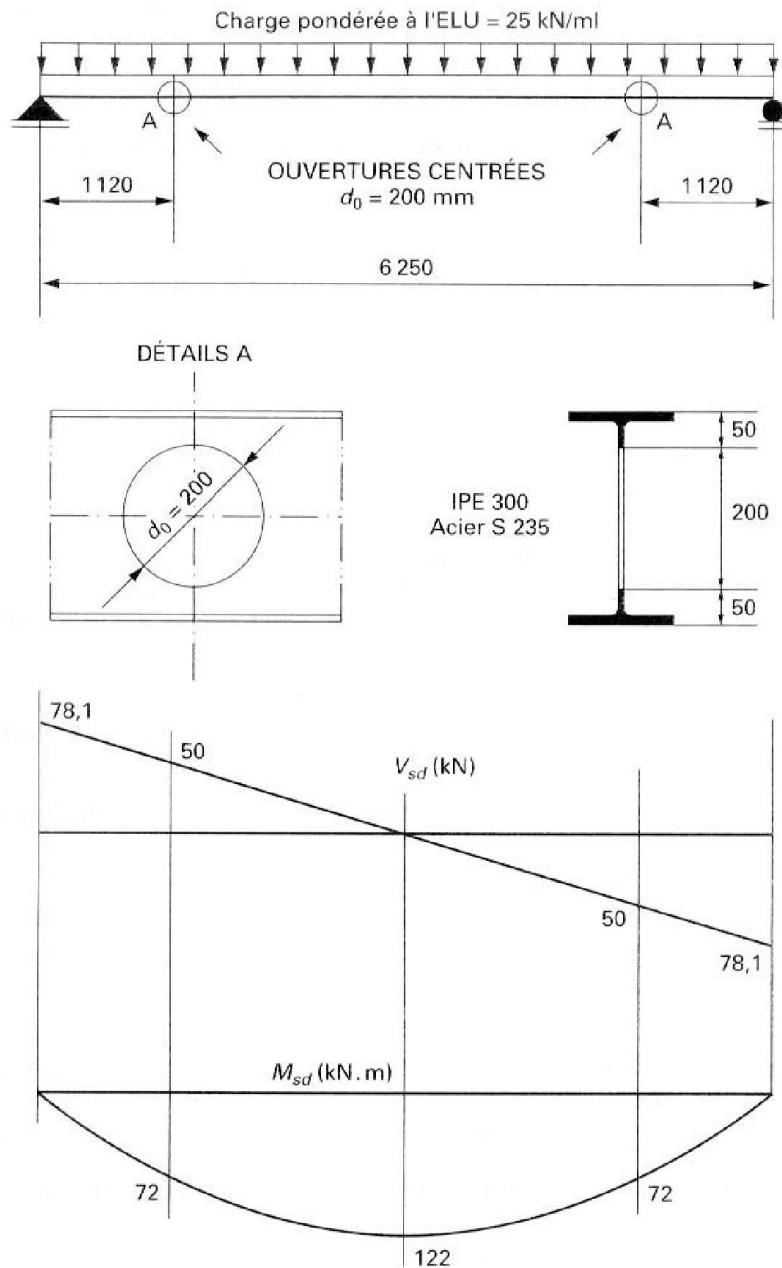


Fig. 2 – Cas n° 1

Fig.4.1: géométrie de la poutre et le diagramme du moment de flexion.

Il est à se rappeler que le calcul selon la méthode de Wang se résume à tracer le diagramme d'interaction (M, V) au droit de l'ouverture et de vérifier que le point se situe à l'intérieur du domaine de sécurité.

La figure suivante montre la position du point par rapport au diagramme d'interaction.

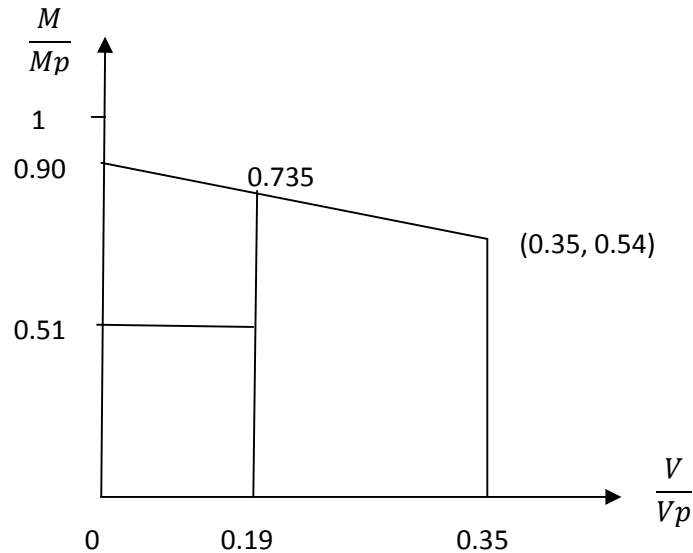


Fig.4.2. Diagramme d'interaction selon la référence (W1)

Une comparaison entre les résultats des deux méthodes peut être faite ainsi :

I.- Cisaillement :

Selon l'Annexe N :
$$\frac{V_{os.d}}{V_{o.Rd}} = \frac{50}{120.4} = 0.415$$

Selon Wang :
$$\frac{\text{Sollicitation}}{\text{Résistance}} = \frac{0.19}{0.35} = 0.54$$

II.- Flexion + cisaillement :

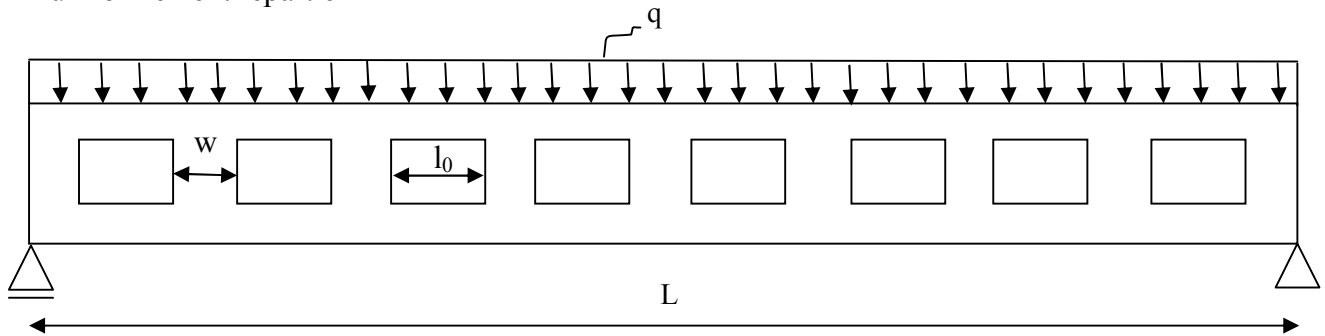
Selon l'Annexe N :
$$\frac{M_{os.d}}{M_{o.Rd}} = \frac{72}{120} = 0.6$$

Selon Wang :
$$\frac{\text{Sollicitation}}{\text{Résistance}} = \frac{0.51}{0.735} = 0.69$$

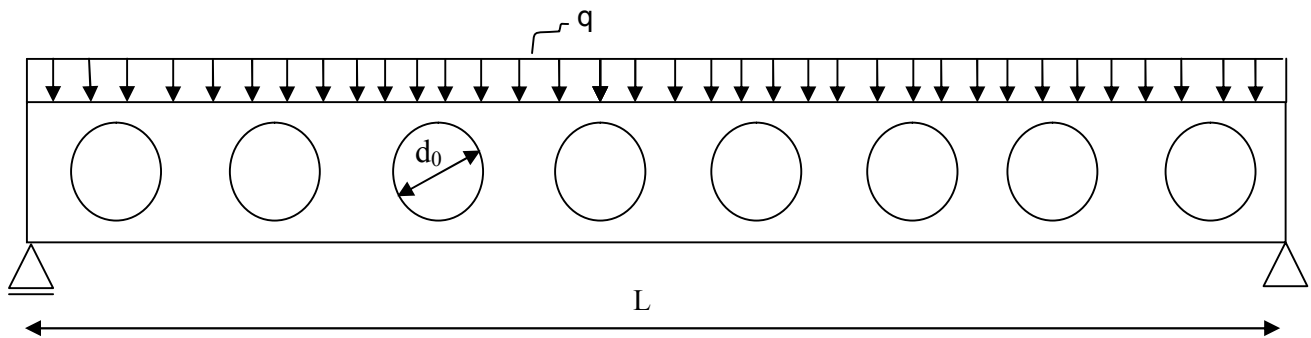
On peut constater que les rapports (effort/résistance) sont presque de même ordre de grandeur pour les deux méthodes.

4.3. Influence du type d'ouverture :

Nous allons montrer dans ce qui suit l'influence du type d'ouvertures sur le comportement des poutres. On compare entre les poutres à ouvertures rectangulaires et les poutres à ouvertures circulaires comportant huit ouvertures (Fig.4.3), sous l'effet d'une charge uniformément répartie



a- Poutre avec ouvertures rectangulaires



b- Poutre avec ouvertures circulaires

Fig.4.3. Différentes formes d'ouvertures

Le traitement théorique à savoir le calcul du moment Vierendeel qui a été mis en évidence afin de vérifier la résistance à la flexion Vierendeel totale. Il convient que la somme des résistances à la flexion Vierendeel soit supérieure au moment Vierendeel appliqué donné par $(V.l_0)$ où V est l'effort tranchant au niveau du centre de l' l_0 est la longueur efficace de l'ouverture. Pour les ouvertures circulaires, la longueur efficace peut être prise égale à $0.5d_0$, où d_0 est le diamètre de l'ouverture [R2].

Les caractéristiques géométriques des deux poutres sont présentées sur le tableau4.1.

poutre	L (m)	$D_0=h_0$ (mm)	a_0 (m)	W (mm)	q (K/m)
Avec ouvertures rectangulaires	7.00	315	675	200	15
Avec ouvertures circulaires	7.00	315	/	710	15

Tableau 4.1. Données géométriques de la poutre

formes Moment Vierendeel	ouverture rectangulaire	ouverture circulaire
ouverture 01	31	7.24
ouverture 02	22.15	5.19
ouverture 03	6.37	3.14
ouverture 04	4.43	1.11

Tableau 4.2. Comparaison des résultats

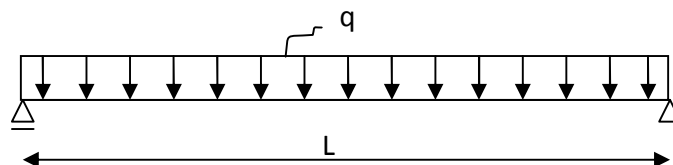
La remarque générale à souligner pour les deux types d'ouvertures est que les poutres métalliques avec des ouvertures circulaires sont plus résistantes que les poutres avec des ouvertures rectangulaires.

4.4. Influence de la dimension des ouvertures rectangulaires :

Nous allons maintenant étudier l'influence de la hauteur d'une part et de la longueur d'autre part de l'ouverture rectangulaire sur la résistance à l'effet Vierendeel.

4.4.1. Influence de la hauteur de l'ouverture :

Nous allons montrer l'influence de la hauteur de l'ouverture sur la résistance à l'effet Vierendeel d'une poutre comportant une ouverture rectangulaire isolée de portée 5m sous l'effet d'une charge uniformément répartie représenté dans la figure 4.4.

**Fig.4.4.** type de chargement.

Les caractéristiques géométriques des poutres étudiées sont présentées dans le tableau4.3.

L (m)	d (m)	b _f (m)	t _f (m)	t _w (m)
5.00	0.45	0.19	0.0146	0.0094

Tableau 4.3. Caractéristiques géométriques de la poutre

Les valeurs obtenues de la résistance à l'effet Vierendeel de la poutre sous l'effet du chargement uniformément réparti, sont données dans le tableau4.4.

• **Membrures dans la zone (x =1m) :**

Hauteur de L'ouverture	M _p (KNm)	V _p (KN)	M _f / M _p			V _f / V _p			M ₀ / M _p	M ₁ / M _p	V ₁ / V _p
			côté gauche	Milieu	côté droit	côté gauche	Milieu	côté droit			
H ₀ =0,3d	381.62	536.67	0.054	0.089	0.114	0.061	0.047	0.033	0.976	0.384	0.203
H ₀ =0,5d			0.054	0.089	0.114	0.061	0.047	0.033	0.934	0.482	0.105
H ₀ =0,7d			0.054	0.089	0.114	0.061	0.047	0.033	0.87	0.584	0.038
H ₀ =0,8d			0.054	0.089	0.114	0.061	0.047	0.033	0.79	0.634	0.017
H ₀ =0,9d			0.054	0.089	0.114	0.061	0.047	0.033	0.78	0.684	0.004

• **Membrures dans la zone (x =2m) :**

Hauteur de L'ouverture	M _p (KNm)	V _p (KN)	M _f / M _p			V _f / V _p			M ₀ / M _p	M ₁ / M _p	V ₁ / V _p
			côté gauche	Milieu	côté droit	côté gauche	Milieu	côté droit			
H ₀ =0,3d	381.62	536.67	0.119	0.133	0.139	0.030	0.015	0.001	0.976	0.384	0.203
H ₀ =0,5d			0.119	0.133	0.139	0.030	0.015	0.001	0.934	0.482	0.105
H ₀ =0,7d			0.119	0.133	0.139	0.030	0.015	0.001	0.87	0.584	0.038
H ₀ =0,8d			0.119	0.133	0.139	0.030	0.015	0.001	0.79	0.634	0.017
H ₀ =0,9d			0.119	0.133	0.139	0.030	0.015	0.001	0.78	0.684	0.004

- **Membrures dans la zone ($x = 2.5m$) :**

Hauteur de L'ouverture	M_p (KNm)	V_p (KN)	M_f / M_p			V_f / V_p			M_0 / M_p	M_1 / M_p	V_1 / V_p
			côté gauche	Milieu	côté droit	côté gauche	Milieu	côté droit			
$H_0=0,3d$	381.62	536.67	0.139	0.134	0.133	0.014	0	0.014	0.976	0.384	0.203
$H_0=0,5d$			0.139	0.134	0.133	0.014	0	0.014	0.934	0.482	0.105
$H_0=0,7d$			0.139	0.134	0.133	0.014	0	0.014	0.87	0.584	0.038
$H_0=0,8d$			0.139	0.134	0.133	0.014	0	0.014	0.79	0.634	0.017
$H_0=0,9d$			0.139	0.134	0.133	0.014	0	0.014	0.78	0.684	0.004

Tableau 4.4. Valeurs de la résistance ultime pour différentes valeurs de h_0

A partir du tableau4.4, on note que plus la hauteur de l'ouverture n'augmente et plus la résistance à l'effet Vierendeel est satisfaite, c.-à-d. la satisfaction au critère de résistance ne s'est accomplie si l'on ne respecte pas la condition de géométrie de l'ouverture ($h_0 \leq 0.7d$) sauf dans le cas où l'ouverture se trouve au niveau de la zone d'appui.

4.4.2. Influence de la longueur de l'ouverture :

Afin de voir l'influence de la longueur de l'ouverture sur la résistance à l'effet Vierendeel de la même poutre (voir Fig4.4), Les valeurs obtenues de la résistance ultime de la poutre sont données dans le tableau4.5.

- **Membrures dans la zone ($x = 1m$) :**

Longueur de L'ouverture	M_p (KNm)	V_p (KN)	M_f / M_p			V_f / V_p			M_0 / M_p	M_1 / M_p	V_1 / V_p
			côté gauche	Milieu	côté droit	côté gauche	Milieu	côté droit			
$a_0=d$	381.62	536.67	0.072	0.089	0.103	0.054	0.047	0.040	0.87	0.582	0.075
$a_0=1,5d$			0.064	0.089	0.109	0.058	0.047	0.036	0.87	0.583	0.050
$a_0=2d$			0.054	0.089	0.114	0.061	0.047	0.033	0.87	0.577	0.038
$a_0=2,5d$			0.043	0.089	0.119	0.065	0.047	0.029	0.87	0.578	0.030
$a_0=3d$			0.033	0.089	0.123	0.068	0.047	0.026	0.87	0.579	0.025

- **Membrures dans la zone ($x = 2m$) :**

Longueur de L'ouverture	M_p (KNm)	V_p (KN)	M_f / M_p			V_f / V_p			M_0 / M_p	M_1 / M_p	V_1 / V_p
			côté gauche	Milieu	côté droit	côté gauche	Milieu	côté droit			
$a_0 = d$	381.62	536.67	0.127	0.133	0.137	0.022	0.015	0.008	0.87	0.582	0.075
$a_0 = 1,5d$			0.123	0.133	0.138	0.026	0.015	0.005	0.87	0.583	0.050
$a_0 = 2d$			0.119	0.133	0.139	0.030	0.015	0.001	0.87	0.577	0.038
$a_0 = 2,5d$			0.113	0.133	0.139	0.033	0.015	0.001	0.87	0.578	0.030
$a_0 = 3d$			0.108	0.133	0.138	0.037	0.015	0.005	0.87	0.579	0.025

- **Membrures dans la zone ($x = 2.5m$) :**

Longueur de L'ouverture	M_p (KNm)	V_p (KN)	M_f / M_p			V_f / V_p			M_0 / M_p	M_1 / M_p	V_1 / V_p
			côté gauche	Milieu	côté droit	côté gauche	Milieu	côté droit			
$a_0 = d$	381.62	536.67	0.138	0.139	0.138	0.007	0	0.007	0.87	0.582	0.075
$a_0 = 1,5d$			0.136	0.139	0.136	0.010	0	0.010	0.87	0.583	0.050
$a_0 = 2d$			0.134	0.139	0.134	0.014	0	0.014	0.87	0.577	0.038
$a_0 = 2,5d$			0.132	0.139	0.132	0.017	0	0.017	0.87	0.578	0.030
$a_0 = 3d$			0.127	0.139	0.127	0.021	0	0.021	0.87	0.579	0.025

Tableau 4.5. Valeurs de la résistance ultime pour différentes valeurs de a_0

A partir du tableau 4.5, on relève que la longueur de l'ouverture joue un rôle primordial par rapport à sa hauteur en ce qui concerne la valeur de la résistance à l'effet Vierendeel. En effet pour des ouvertures de grandes longueurs la résistance à l'effet Vierendeel est plus faible que celle correspondante aux ouvertures courtes en longueur, et par suite elle devient plus importante si on ne respecte pas la condition de géométrie de l'ouverture ($a_0 \leq 2d$) sauf dans le cas où l'ouverture se trouve au niveau de la zone d'appui.

Pour mieux expliquer les résultats obtenus, il nous a paru très utile de justifier la condition de géométrie de l'ouverture à respecter en traçant les diagrammes d'interaction

(M, V) au droit de l'ouverture pour le cas de (x=2m) et de vérifier si le point se situe à l'intérieur du domaine de sécurité ou pas.

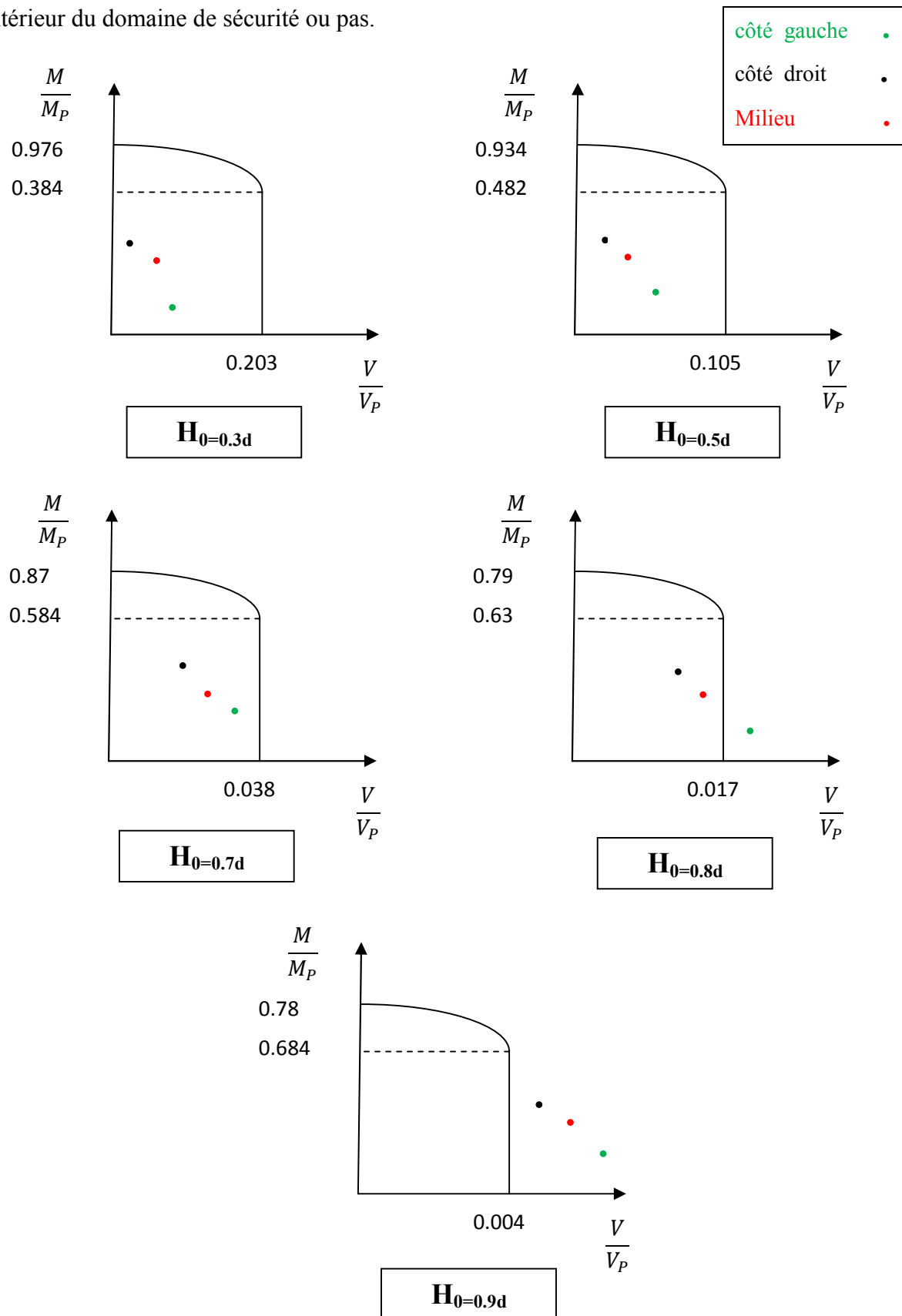
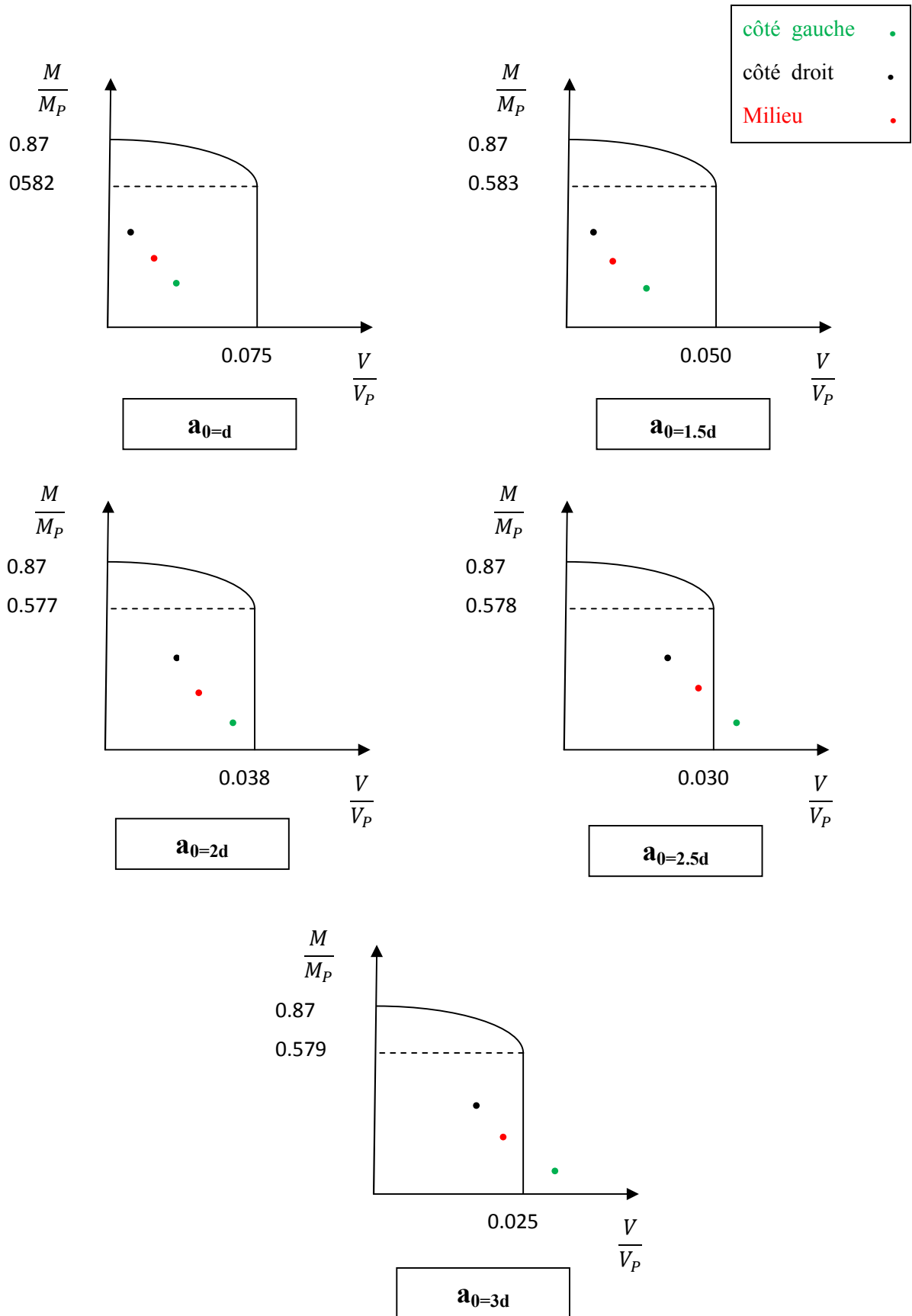


Fig.4.5. diagrammes d'interaction (M, V) pour différents h_0


 Fig.4.6. diagrammes d'interaction (M, V) pour différents a_0

4.5. Dimensionnement d'une poutre ajourée :

Une vérification de la résistance à l'effet Vierendeel selon le principe d'évaluation de la charge portante des poutres métalliques avec des ouvertures circulaires d'âme est présentée en utilisant la formule empirique d'interaction non- linéaire (Chung et al [C2])

Dans ce contexte, et afin de vérifier la sécurité structurale, un mécanisme Vierendeel a été étudié (voir tableau ci-dessous) d'une poutre simplement appuyée de 7.5m de portée, comportant six ouvertures circulaires, sous l'effet d'une charge uniformément répartie de 40 kN/m. les ouvertures sont placées symétriquement par rapport au centre de la poutre avec un intervalle de 1,0 m à partir des supports.

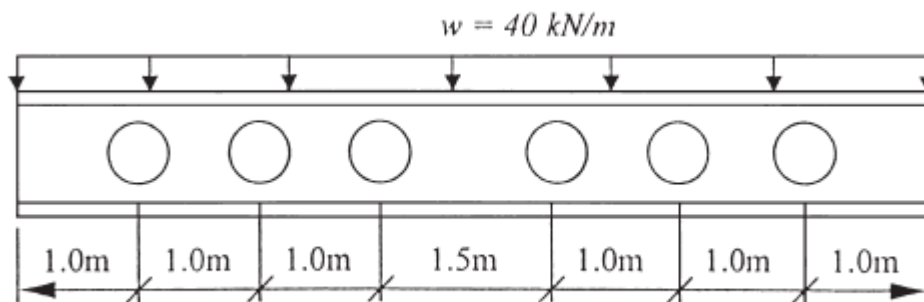


Fig.4.7. détail de la poutre étudiée.

$L=7.5 \text{ m}$, $x=1.0, 2.0, 3.0 \text{ m}$, $h=449.8 \text{ mm}$, $t_w=7.6 \text{ mm}$, $b=152.4 \text{ mm}$, $t_f=10.9 \text{ mm}$, $d_o=337.4 \text{ mm}$, $W_{pl}=1096.10^3 \text{ mm}^3$.

Le tableau suivant peut être considéré comme un récapitulatif des résultats obtenus :

position	M_{Sd}	V_{Sd}	$M_{O, Rd}$	$V_{O, Rd}$	$M_{VO, Rd}$	Mécanisme Vierendeel
1	130	110	241.9	135.6	168.9	Non
2	220	70			222.2	Non
3	270	30			239.7	Oui

Tableau 4.6. Récapitulatif des résultats du mécanisme Vierendeel

Il est à remarquer qu'un mécanisme Vierendeel est constaté au niveau de la troisième ouverture ; ceci signifie que notre poutre est considérée comme irrésistible.

Pour cela, une réduction de la charge portante est nécessaire afin de vérifier la sécurité structurale de cette poutre.

$$W=(Q/M_{Sd}) \times M_{VO, Rd}$$

$$W=(40/270) \times 239.7 = 35.5 \text{ kN/m}$$

Alternativement, le diamètre, d_0 , de la troisième ouverture peut être réduit à 0,5 h ou 225mm, et par la suite tout le calcul doit être répété (voir tableau ci-dessous).

position	M_{Sd}	V_{Sd}	$M_{O, Rd}$	$V_{O, Rd}$	$M_{VO, Rd}$	Mécanisme Vierendeel
3	270	30	275	271.2	274.6	Non

Tableau 4.7. Mécanisme Vierendeel au niveau de la 3^{me} ouverture pour $d_0 = 0.5h$

Il est à remarquer qu'aucun mécanisme Vierendeel n'est constaté au niveau de la troisième ouverture ; ceci signifie que notre poutre sera considérée comme résistible si l'on en réduit les diamètres des ouvertures à 0,5 h.

4.6. Etude de la résistance à l'effet Vierendeel des poutres cellulaires :

Dans ce paragraphe une étude est faite sur le calcul de la résistance à l'effet Vierendeel à savoir la résistance au moment de flexion et la résistance à l'effort tranchant obtenues par le code de calcul « ACB+ » des poutres cellulaires ; en faisant varier le type du profilé et le nombre d'ouvertures.

Les poutres cellulaires étudiées dans ce contexte ce sont des poutres isostatiques, chargées sous l'effet de chacun des deux types de chargement (charge répartie, charge concentrée à mi-portée).

4.6.1. Influence du type de profilé sur la résistance ultime selon le Logiciel « ACB+ »:

Dans ce paragraphe en illustrant la variation de la résistance à l'effet Vierendeel d'une poutre cellulaire de longueur $L=6m$ comportant 10 ouvertures pour différents types de profilés, sous l'effet d'un chargement progressif correspondant à chacun des deux types de chargement (une charge uniformément répartie et une charge concentrée à mi-portée), figures4.8.

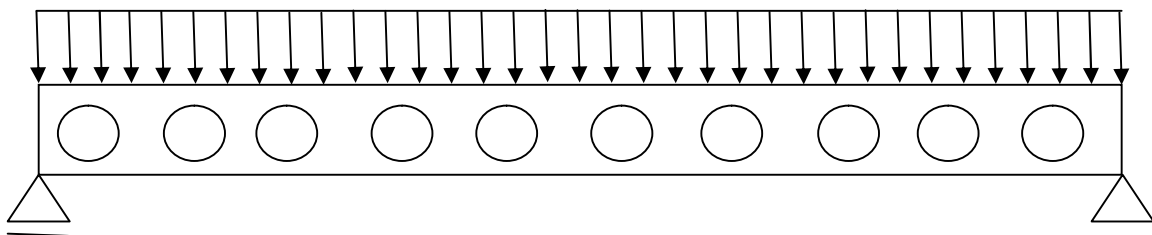


Fig.4.8. une charge uniformément répartie

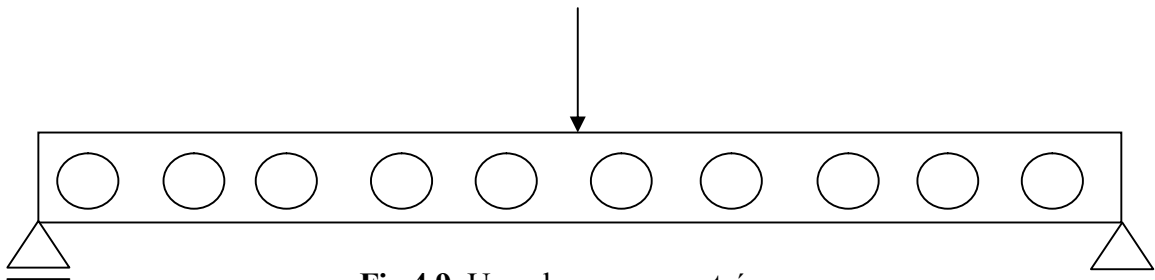


Fig.4.9. Une charge concentré

- Cas de flexion

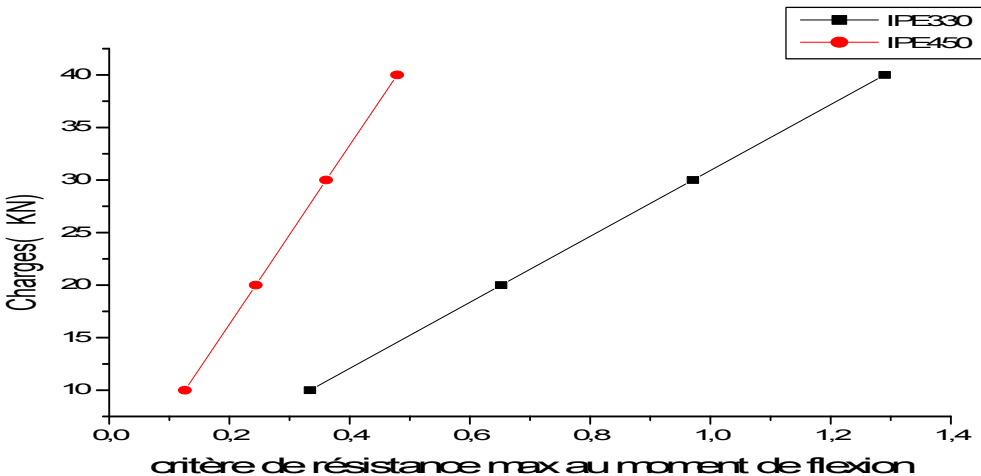


Fig.4.10. comparaison des résultats de la résistance à l'effet Vierendeel
« cas d'un chargement uniforme »

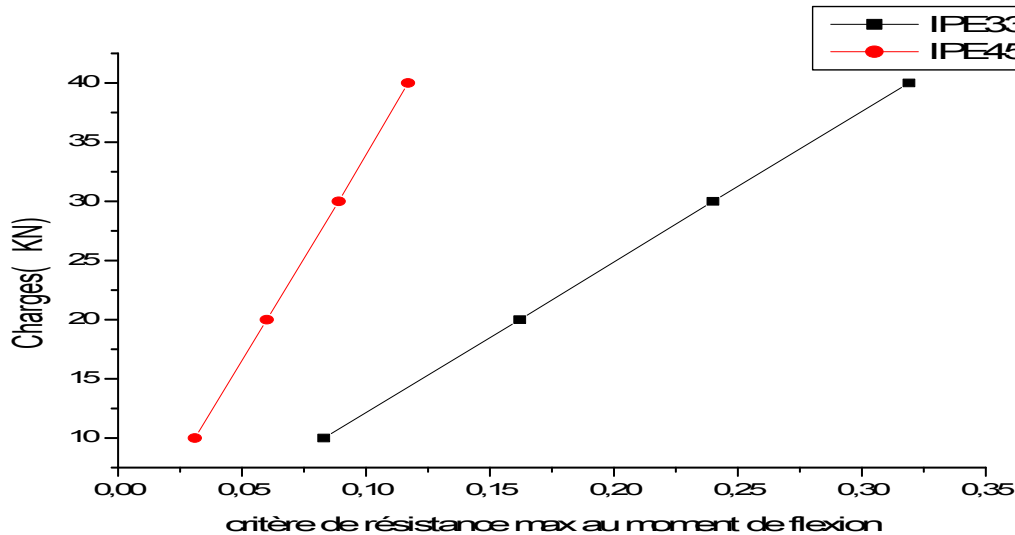


Fig.4.11. comparaison des résultats de la résistance à l'effet Vierendeel
« cas d'un chargement concentrée »

D'après les figures il est bien entendu que la résistance au moment de flexion augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la charge, en plus il est bien remarqué que, plus le profilé ne s'accroît et plus la résistance à l'effet Vierendeel devient d'une grande importance.

- Cas de cisaillement

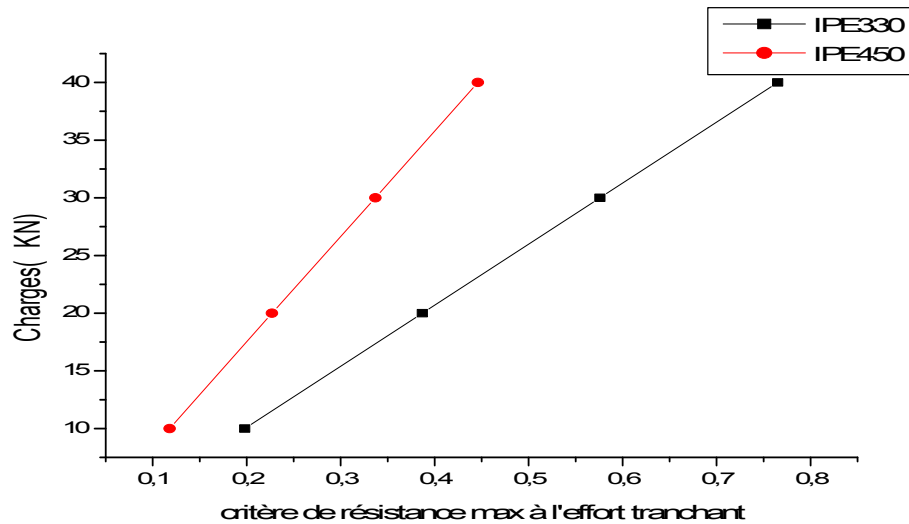


Fig.4.12. comparaison des résultats de la résistance à l'effet Vierendeel
« cas d'un chargement uniforme »

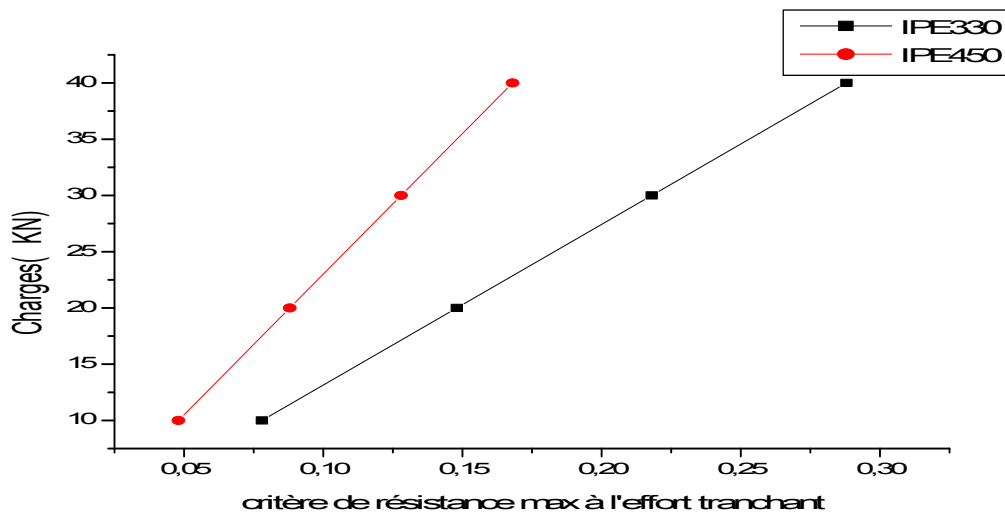


Fig.4.13. comparaison des résultats de la résistance à l'effet Vierendeel
« cas d'un chargement concentrée »

A partir de les figures, on remarque que le type de profilé influe de manière conséquente sur le comportement à la résistance à l'effort tranchant. En effet pour une telle section évidée, on note que la résistance à l'effort tranchant est inversement proportionnelle au type de profilé.

4.6.2. Influence du nombre d'ouvertures sur la résistance à l'effet Vierendeel selon le Logiciel « ACB+ »:

Il nous a paru très utile de justifier l'influence du nombre d'ouvertures sur la résistance à l'effet Vierendeel des poutres cellulaires, en illustrant la variation de celle-ci en fonction d'un chargement progressif correspondant pour le cas de flexion et le cas de cisaillement sous l'effet de chacun des deux types de chargement (chargement uniformément réparti et chargements concentrés à mi-portée), pour différents types de profilé

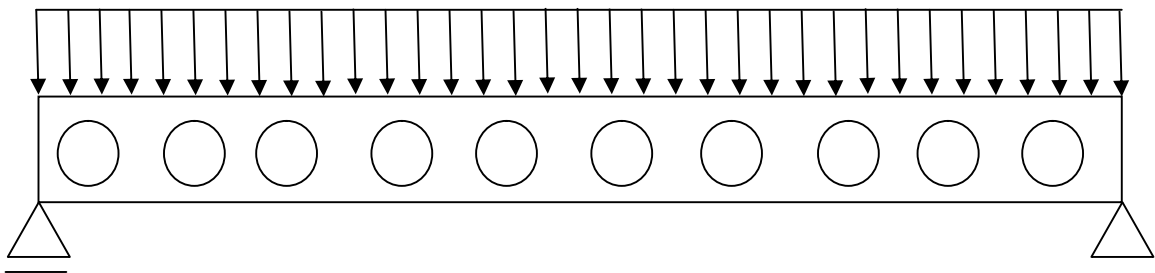


Fig.4.14.chargement uniformément réparti

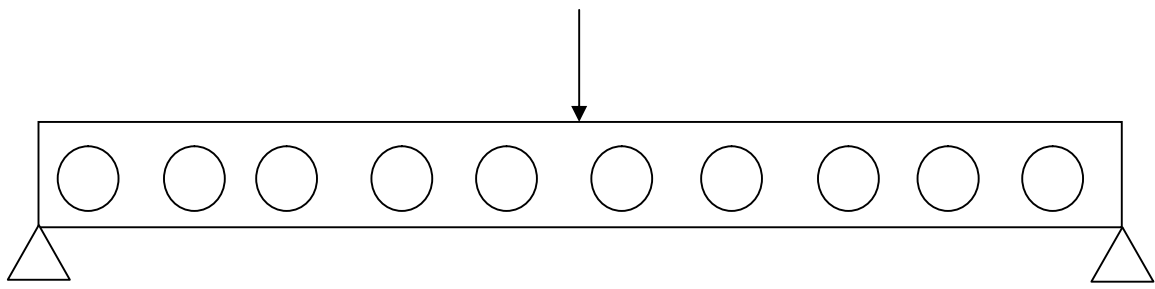


Fig.4.15chargements concentrés

Cas de flexion

IPE330

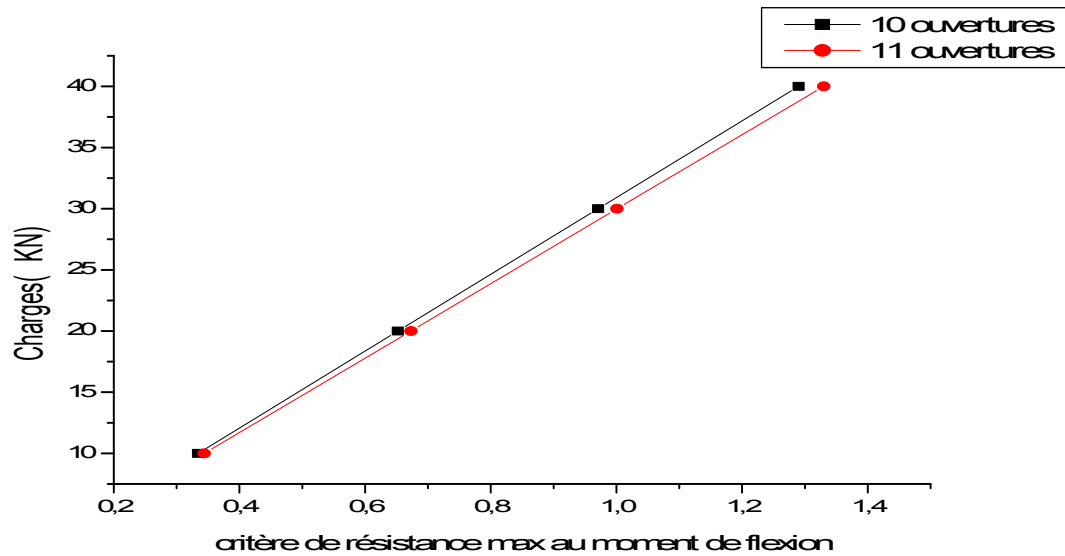


Fig.4.16. évolution charge - résistance au moment de flexion
« cas d'un chargement uniforme »

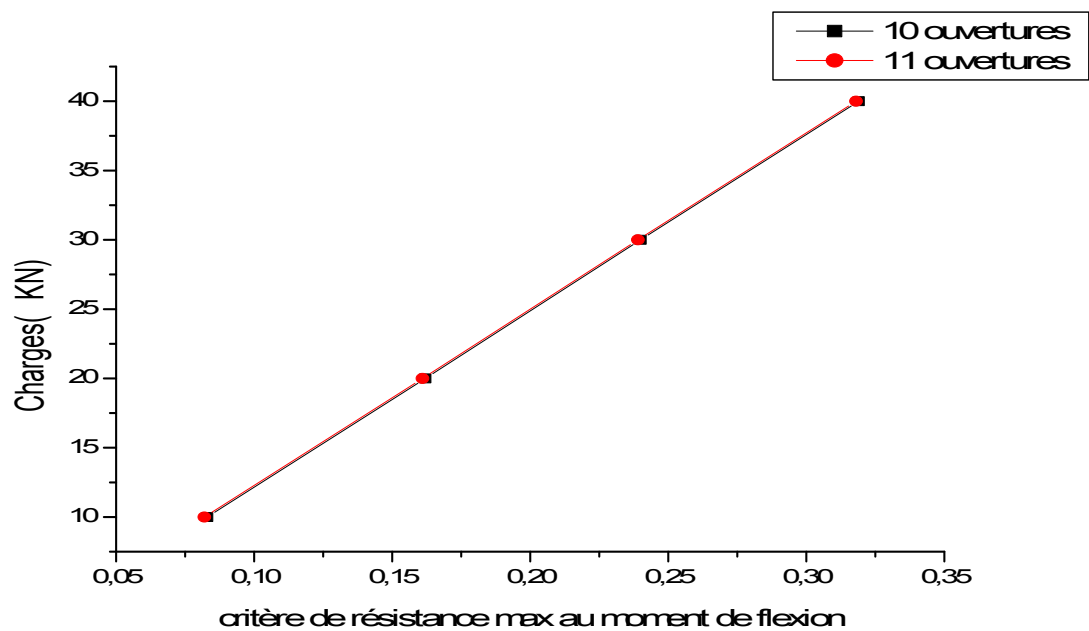


Fig.4.17. évolution charge - résistance au moment de flexion
« cas d'un chargement concentrée »

IPE450

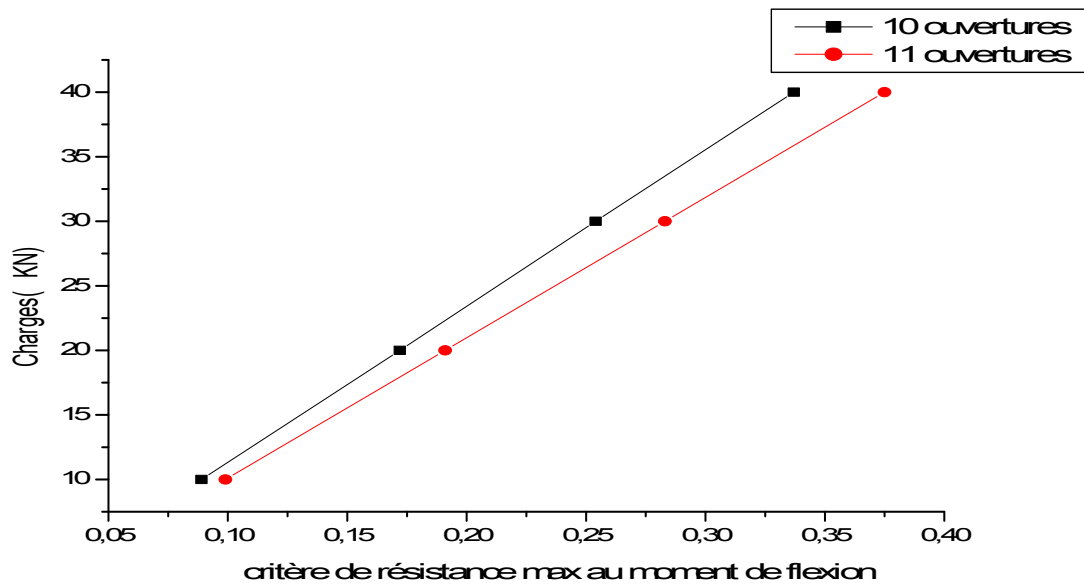


Fig.4.18. évolution charge - résistance au moment de flexion
« cas d'un chargement uniforme »

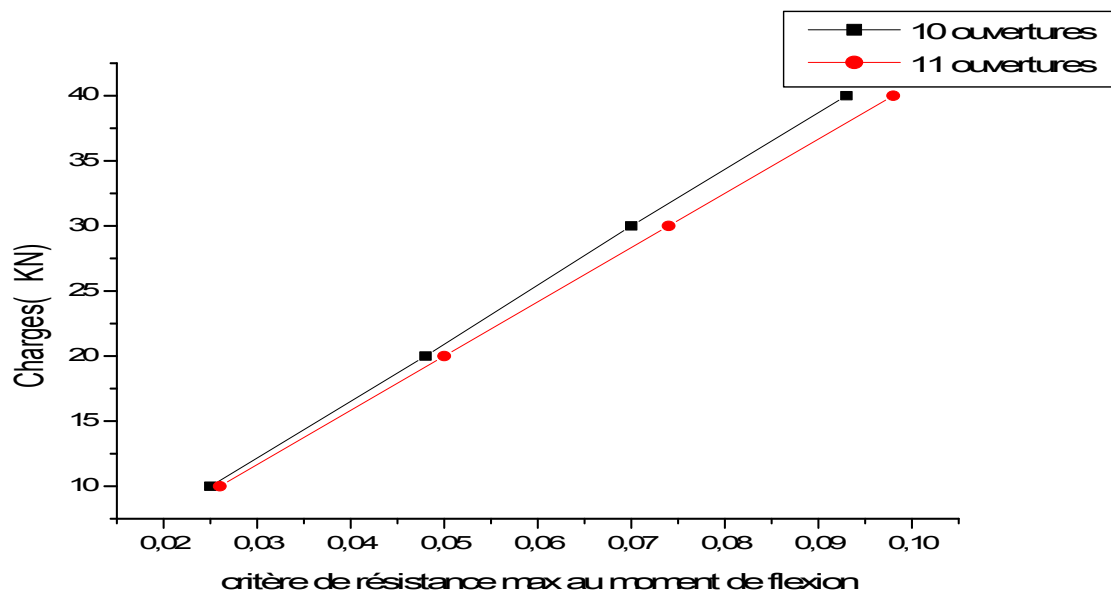


Fig.4.19. évolution charge - résistance au moment de flexion
« cas d'un chargement concentrée »

- Cas de cisaillement

IPE330

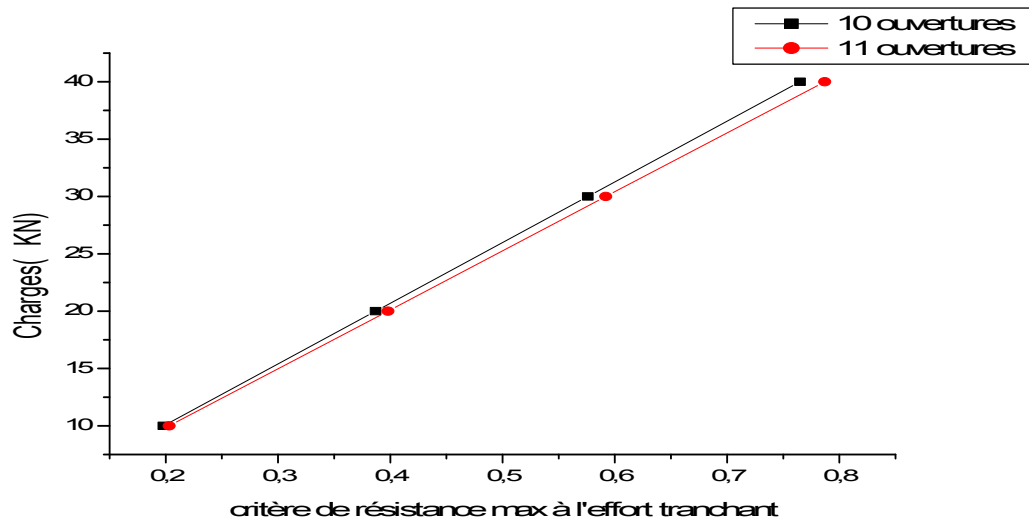


Fig.4.20. évolution charge - résistance à l'effort de cisaillement
« cas d'un chargement uniforme »

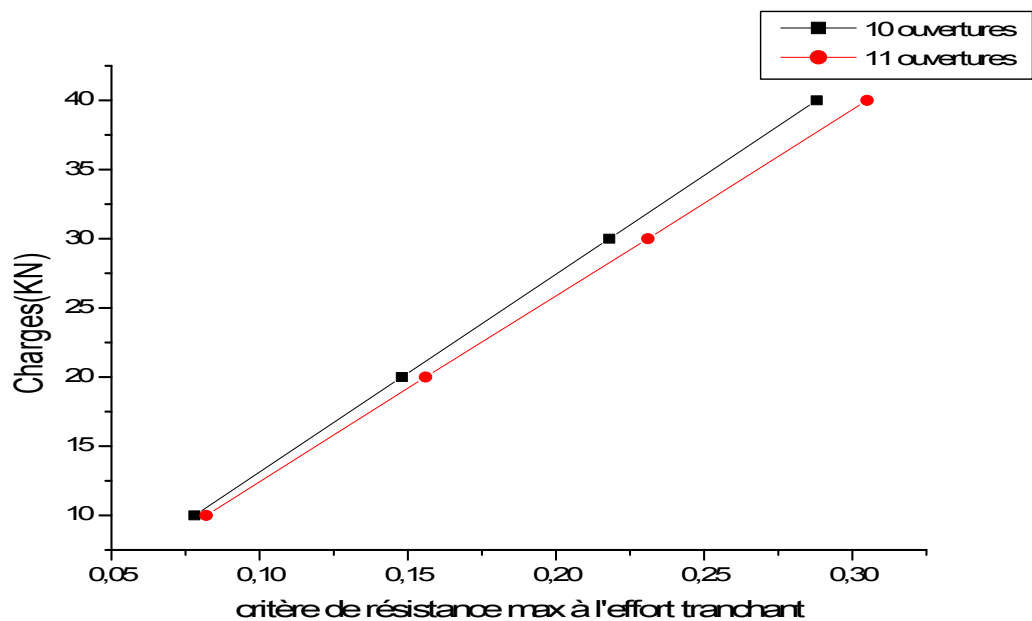


Fig.4.21. évolution charge - résistance à l'effort de cisaillement
« cas d'un chargement concentrée »

IPE450

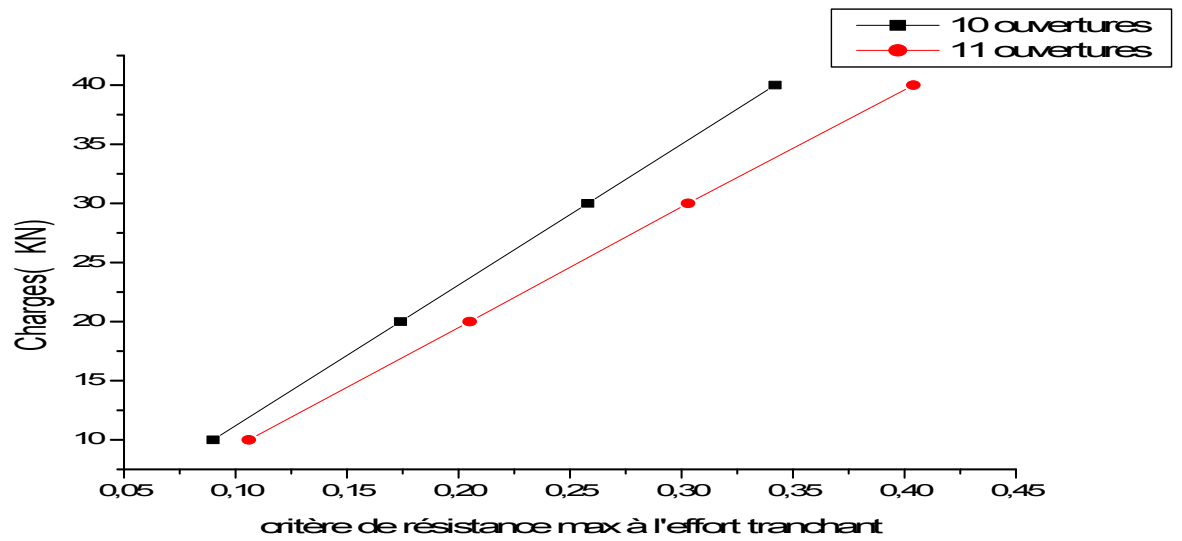


Fig.4.22. évolution charge - résistance à l'effort de cisaillement
« cas d'un chargement uniforme »

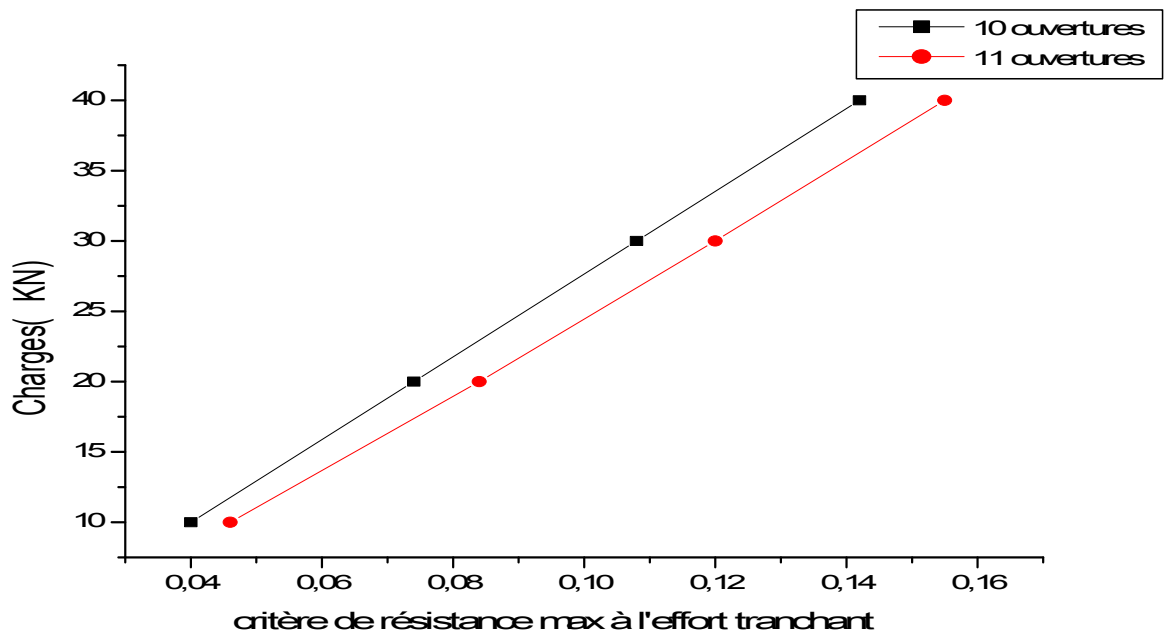


Fig.4.23. évolution charge - résistance à l'effort de cisaillement
« cas d'un chargement concentrée »

On peut conclure donc d'après les résultats obtenus selon les graphes des figures représentées ci dessus, que plus la charge augmente et plus la résistance au moment de flexion et la résistance à l'effort tranchant augmentent, ainsi ces derniers sont proportionnels au nombre des ouvertures.

4.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement à la résistance à l'effet Vierendeel des poutres comportant des évidements d'âmes, chargées soit par des charges ponctuelles, soit par une charge répartie. Les différentes configurations ont été illustrées.

Concernant les résultats trouvés, nous avons présenté dans un premier lieu une étude comparative, dont on a validé les résultats obtenus théoriquement par la méthode de l'Eurocode3 dans son annexe N et celle de Wong (W1), sur le calcul de la résistance à l'effet Vierendeel.

Nous avons ensuite présenté l'étude du comportement à la résistance à l'effet Vierendeel des poutres ajourées ; à savoir l'influence du type d'ouvertures (ouvertures rectangulaires et ouvertures circulaires), l'influence des dimensions de l'ouverture.

Dans un autre lieu, nous avons présenté une étude sur le mécanisme Vierendeel afin de vérifier la sécurité structurale d'une poutre métallique comportant des ouvertures isolées multiples.

Dans un dernier lieu, une étude sur le calcul de la résistance à l'effet Vierendeel a été présentée à savoir la résistance au moment de flexion et la résistance à l'effort tranchant obtenues par le code de calcul « ACB+ » des poutres cellulaires ; en faisant varier le type du profilé et le nombre d'ouvertures.