

# **Chapitre IV**

## **Exploitation du programme**

#### **IV.1. Introduction :**

Dans le chapitre précédent nous avons donné une présentation générale du logiciel Castem2000. Nous avons aussi choisi l'élément quadratique à 8 nœuds pour l'étude paramétrique que nous allons mener dans ce chapitre où nous allons tester ce code de calcul 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 ou deux charges ponctuelles, 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 validation des résultats obtenus théoriques, sur le calcul des contraintes et de la flèche.
- Dans la deuxième étape, nous présentons les résultats se rapportant à des poutres ayant des sections en I, d'un calcul sur la flèche et la contrainte ainsi que l'évolution du déplacement en fonction de la charge à l'état élastique.

#### **IV.2. Etude élastique :**

Cette étude est basée sur le calcul des poutres métalliques à section en I comportant des évidements d'âme sous l'effet de la flexion simple dans le domaine élastique; plusieurs exemples ont été traités.

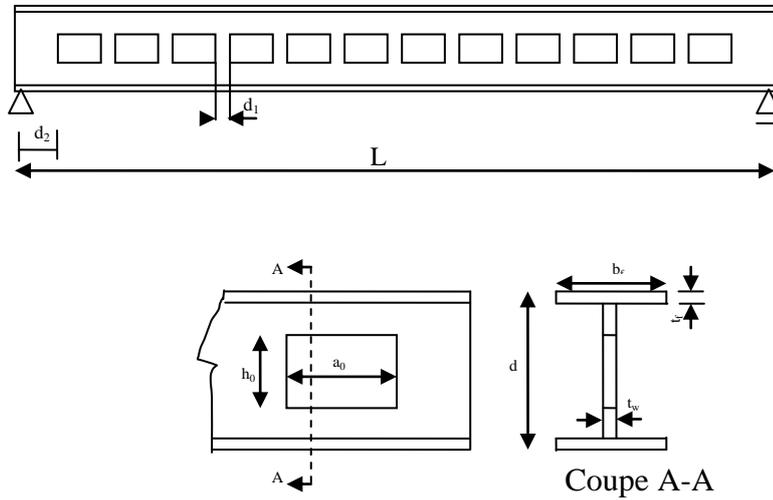
Afin de valider le programme Castem2000, trois cas sont traités :

- Poutre sur deux appuis simples comportant douze ouvertures rectangulaires.
- Poutres sur deux appuis simples comportant deux ouvertures.
- solive sur deux appuis simples comportant cinq ouvertures circulaires.

##### **IV.2.1. Poutre sous une charge uniformément répartie :**

Silvio Hong Tiing Tai [23] a étudié numériquement une poutre, de grande dimension, de longueur 30.6m comportant 12 ouvertures d'âme avec des mailles carrées de dimension 200mm. La poutre est sous l'effet d'une charge uniformément répartie de 10daN/mm. Nous allons donc comparer ses résultats avec les valeurs numériques obtenues grâce au logiciel castem2000.

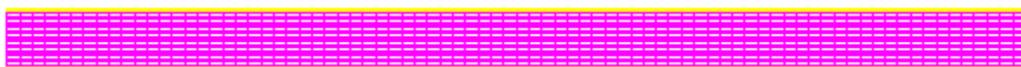
La géométrie de la poutre et les caractéristiques géométriques de la poutre sont présentées sur la figure IV.1.1 et le tableau IV.1.1 respectivement. Il est à signaler que la troisième dimension est prise en compte dans notre programme ceci est pour se rapprocher de plus en plus du cas réel.



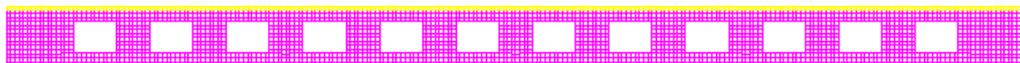
**Fig. IV.1.1: Géométrie de la poutre.**


**Tableau IV.1.1: caractéristiques géométriques de la poutre.**

La poutre à âme pleine a été discrétisée en 1760 éléments et la poutre évidée a été discrétisée en 2880 éléments (voir **Fig. IV.1.2**).



a - Poutre à âme pleine



b - Poutre à âme évidée

**Fig. IV.1.2 : discrétisation de la poutre en éléments finis.**

Les valeurs numériques de la contrainte normale et de la flèche, obtenues à mi-portée des poutres étudiées sont représentées dans le tableau IV.1.2 Ces résultats sont comparés à ceux obtenus par Silvio Hong Tiing Tai [23].

poutre	Contrainte au milieu (Mpa)		Ecart en %	Déplacement vertical au milieu (mm)		Ecart en %
	[S6]	Castem2000		[S6]	Castem2000	
pleine	152.30	153.71	<b>0.91%</b>	84.40	84.93	<b>0.62%</b>
évidée	154.80	154.58	<b>0.14%</b>	101.60	100.82	<b>0.76%</b>

**Tableau IV.1.2 : comparaison des résultats.**

Le tableau IV.1.2, qui peut être considéré comme un récapitulatif des résultats obtenus, donne aussi le pourcentage de différence de chaque résultat calculé par le programme Castem2000 par rapport à celui obtenu par [23] pour les deux cas de poutres. A partir de ce tableau, on remarque que l'écart entre les valeurs des contraintes ainsi de la flèche obtenues par le logiciel castem2000 et celles donnés par Silvio Hong Tiing Tai [23] à mi-portée est pratiquement nul.

**IV.2.2. Poutre simple soumise une fois à une charge concentrée à mi-portée et autre fois à une charge uniformément répartie :**

Pour cet exemple, une étude est effectuée sur la flèche ( $\delta$ ) et sur la contrainte normal ( $\sigma$ ) à mi-portée d'une poutre de portée 5 m. cette poutre comporte deux ouvertures soumise sous l'effet de chacune des deux types de chargement, une fois par une charge concentrée appliqué à mi-portée et une autre fois par une charge uniformément repartie. Cet exemple a pour but de confirmer la convergence des résultats obtenus par le programme castem2000 avec les résultats obtenus théoriquement. Il est à signaler que la poutre est sollicitée par un chargement progressif (avec un pas de charge de 10KN).

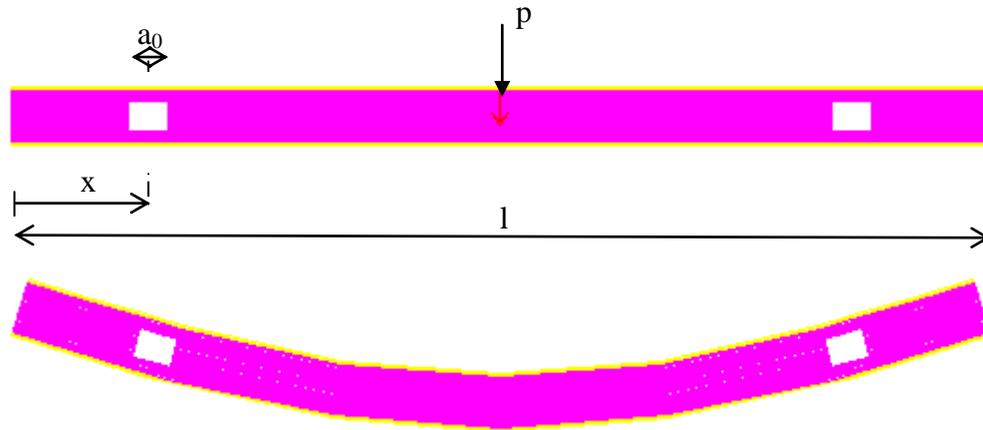
Les caractéristiques géométriques de la poutre sont présentées sur le tableau IV.2.1

l (mm)	d (mm)	b <sub>f</sub> (mm)	t <sub>f</sub> (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	a <sub>0</sub> (mm)	h <sub>0</sub> (mm)	X (mm)	D (mm)
5000	300	140	10	10	200	150	800	150

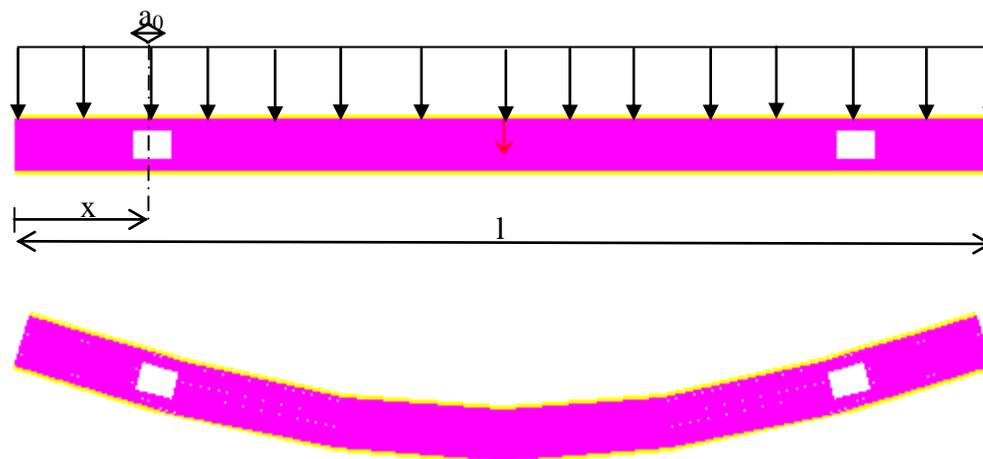
**Tableau IV.2.1 : Caractéristiques géométriques de la poutre.**

#### IV.2.2.1. poutre avec deux ouvertures rectangulaires :

La poutre a été discrétisée en 4448 éléments et 13799 nœuds comme la montre la figure IV.2.1.



a- déformation de la poutre sous l'effet d'un chargement concentré à mi-portée



b- déformation de la poutre sous l'effet d'un chargement uniformément répartie

**Fig. IV.2.1 : modèle numérique sur la déformation d'une poutre avec ouvertures rectangulaires.**

Les résultats numériques obtenus par Castem2000 des valeurs de la flèche et de la contrainte sont comparés à celles obtenus théoriquement dans les deux tableaux IV.2.2 et IV.2.3 respectivement.

Charge totale (KN)	$\delta$ (charge répartie) (mm)		Ecart en %	$\delta$ (charge concentrée) (mm)		Ecart en %
	théorie	Castem		théorie	Castem	
10	1.006	1.069	<b>6.25%</b>	1.610	1.692	<b>5.10%</b>
20	2.013	2.138	<b>6.25%</b>	3.220	3.385	<b>5.10%</b>
30	3.019	3.208	<b>6.25%</b>	4.831	5.077	<b>5.10%</b>
40	4.026	4.277	<b>6.25%</b>	6.441	6.770	<b>5.10%</b>
50	5.032	5.347	<b>6.25%</b>	8.052	8.463	<b>5.10%</b>

**Tableau IV.2.2 : Valeurs de la flèche.**

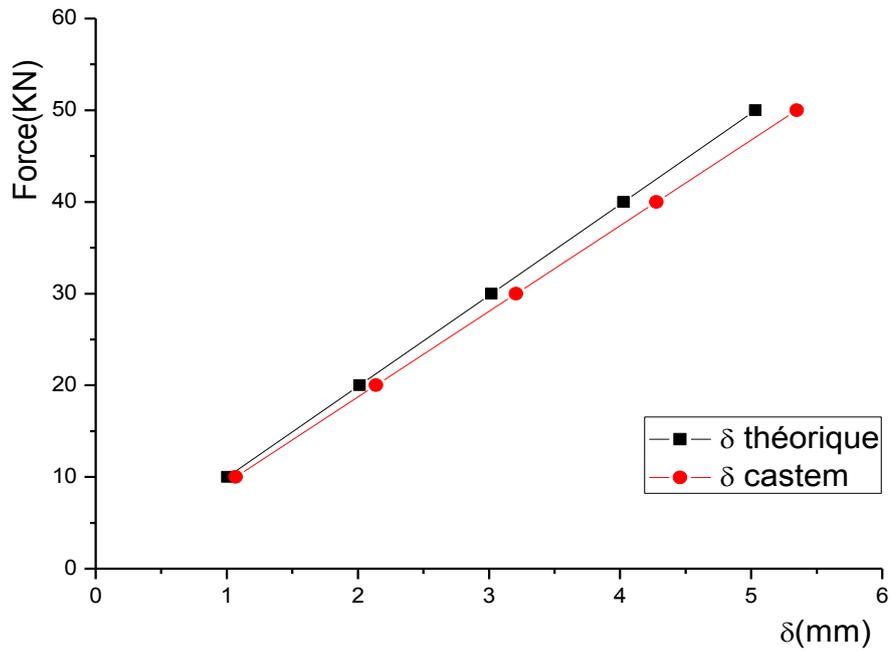
Charge totale (KN)	$\sigma$ (charge répartie) (mm)		Ecart en %	$\sigma$ (charge concentrée) (mm)		Ecart en %
	théorie	Castem		théorie	Castem	
10	12.146	12.296	<b>1.23%</b>	24.292	24.044	<b>1.02%</b>
20	24.292	24.592	<b>1.23%</b>	48.584	48.088	<b>1.02%</b>
30	36.438	36.888	<b>1.23%</b>	72.875	72.132	<b>1.02%</b>
40	48.584	49.184	<b>1.23%</b>	97.167	96.176	<b>1.02%</b>
50	60.729	61.480	<b>1.23%</b>	121.46	120.22	<b>1.02%</b>

**Tableau IV.2.3: valeurs de la contrainte.**

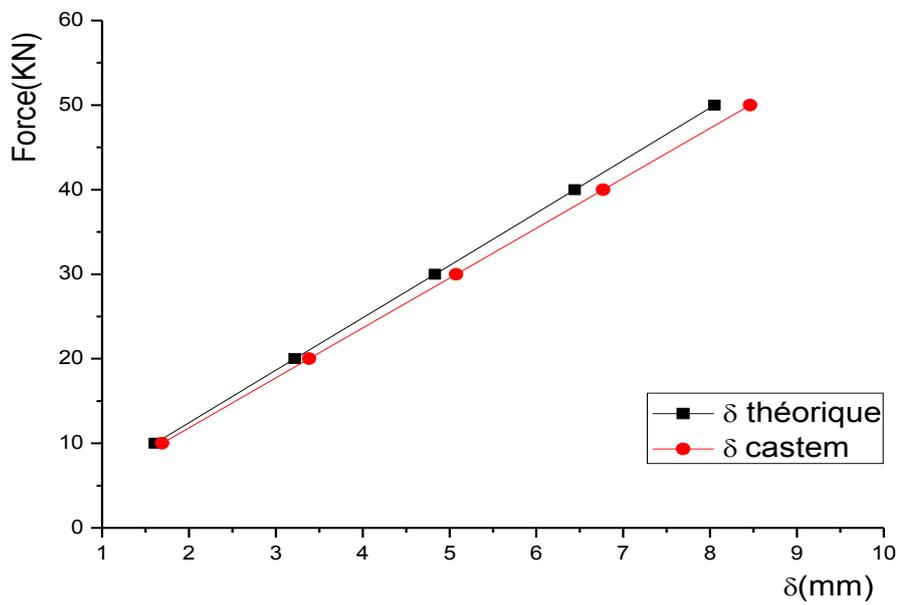
D'après les résultats obtenus selon les deux tableaux, il est à constater que :

- L'écart en pourcentage entre les valeurs de la flèche à mi-portée de la poutre ( $\delta_r$ ) et ( $\delta_c$ ) obtenues numériquement par castem2000 et celles calculées théoriquement est d'ordre 6.25% pour le cas d'un chargement répartie et d'ordre 5.10 % pour le cas d'un chargement concentré à mi-portée de la poutre.
- L'écart en pourcentage entre les valeurs de la contrainte à mi-portée de la poutre ( $\sigma_r$ ) et ( $\sigma_c$ ) obtenues numériquement par castem2000 et celles calculées théoriquement est d'ordre 1.23% pour le cas d'un chargement répartie et d'ordre 1.02 % pour le cas d'un chargement concentré à mi-portée de la poutre.

Les valeurs du deux tableaux (IV .2.2 et IV .2.3) sont illustrées par deux graphes représentant l'évolution du déplacement en fonction de la charge (voir Fig. IV.2.2) ainsi par deux graphes représentant l'évolution de la contrainte en fonction de la charge (voir Fig. IV.2.3).

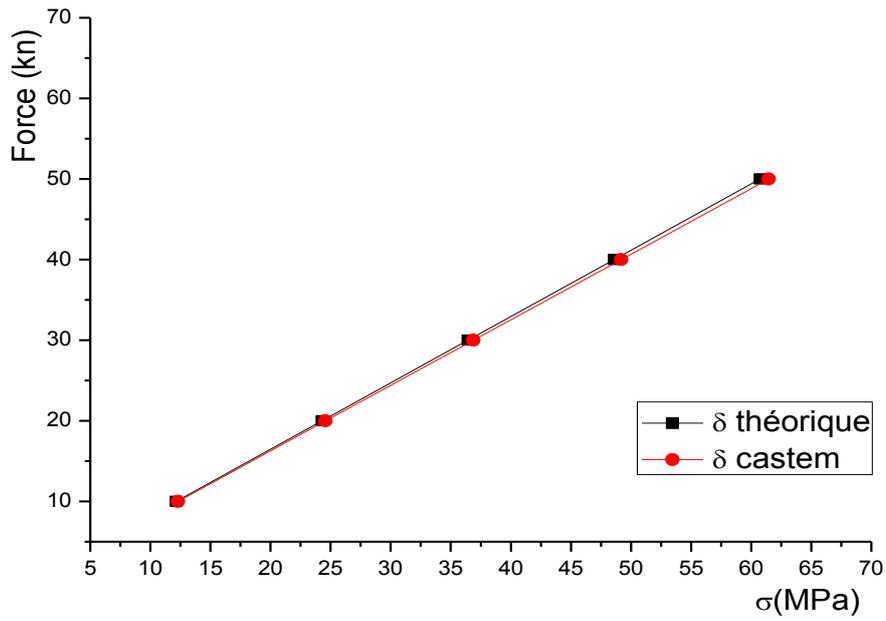


a: évolution déplacement – charge (repartie).

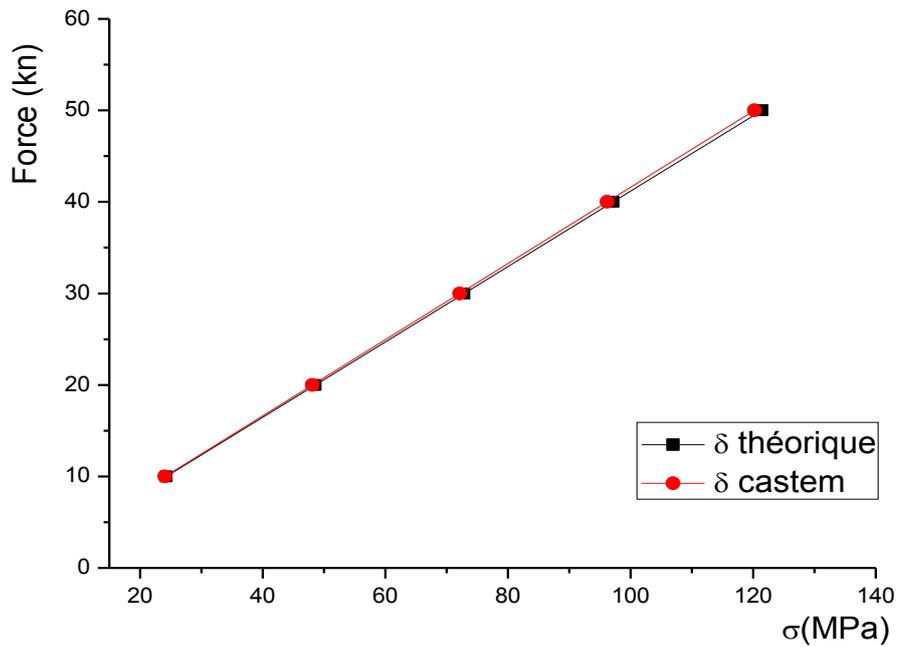


b: évolution déplacement – charge (concentrée).

**Fig. IV.2.2: évolution déplacement - charge.**



a: évolution contrainte – charge (repartie).



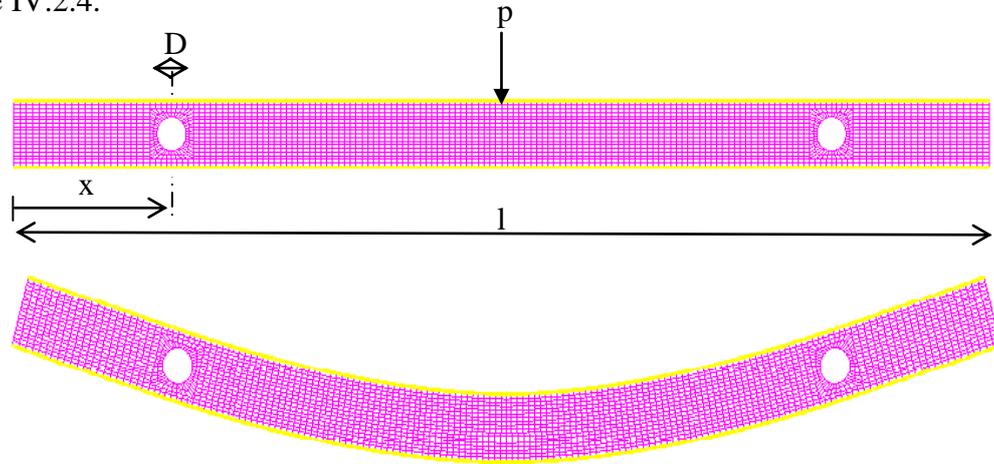
b: évolution contrainte – charge (concentrée).

**Fig. IV.2.3: évolution contrainte - charge.**

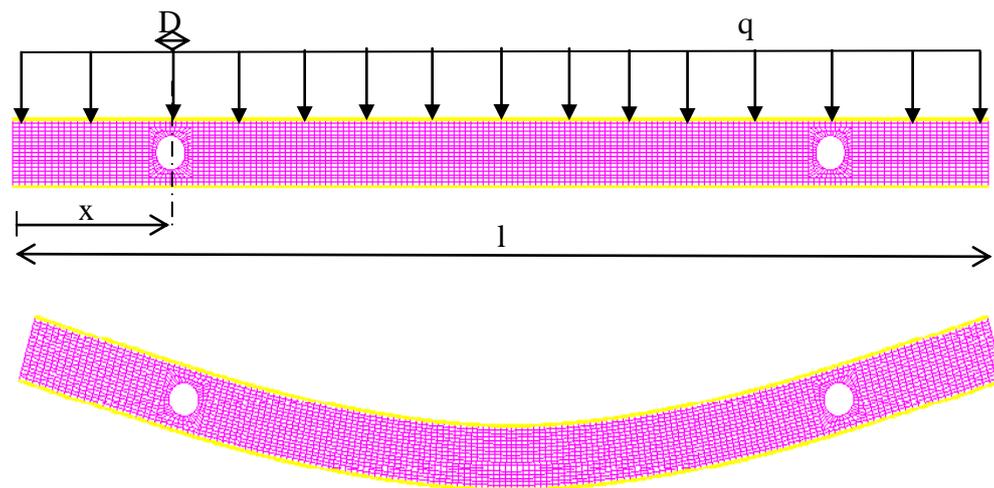
D'après les deux graphes, la concordance des résultats est bien confirmée entre les valeurs obtenues théoriquement et celles obtenues numériquement (castem2000).

#### IV.2.2.2. poutre avec deux ouvertures circulaires :

La poutre a été discrétisée en 3888 éléments et 12127 nœuds comme la montre la figure IV.2.4.



a- déformation de la poutre sous l'effet d'un chargement concentré à mi-portée



b- déformation de la poutre sous l'effet d'un chargement uniformément répartie

**Fig. IV.2.4: modèle numérique sur la déformation d'une poutre avec ouvertures circulaires.**

Les résultats numériques obtenus par Castem2000 des valeurs de la flèche et de la contrainte sont comparés à celles obtenus théoriquement dans les deux tableaux IV.2.4 et IV.2.5 respectivement.

Charge totale (KN)	$\delta$ (charge répartie) (mm)		Ecart en %	$\delta$ (charge concentrée) (mm)		Ecart en %
	théorie	Castem		théorie	Castem	
10	1.005	1.053	<b>4.83%</b>	1.608	1.668	<b>3.73%</b>
20	2.010	2.107	<b>4.83%</b>	3.216	3.336	<b>3.73%</b>
30	3.015	3.160	<b>4.83%</b>	4.824	5.004	<b>3.73%</b>
40	4.020	4.214	<b>4.83%</b>	6.432	6.672	<b>3.73%</b>
50	5.025	5.267	<b>4.83%</b>	8.040	8.340	<b>3.73%</b>

**Tableau IV.2 .4 : Valeurs de la flèche.**

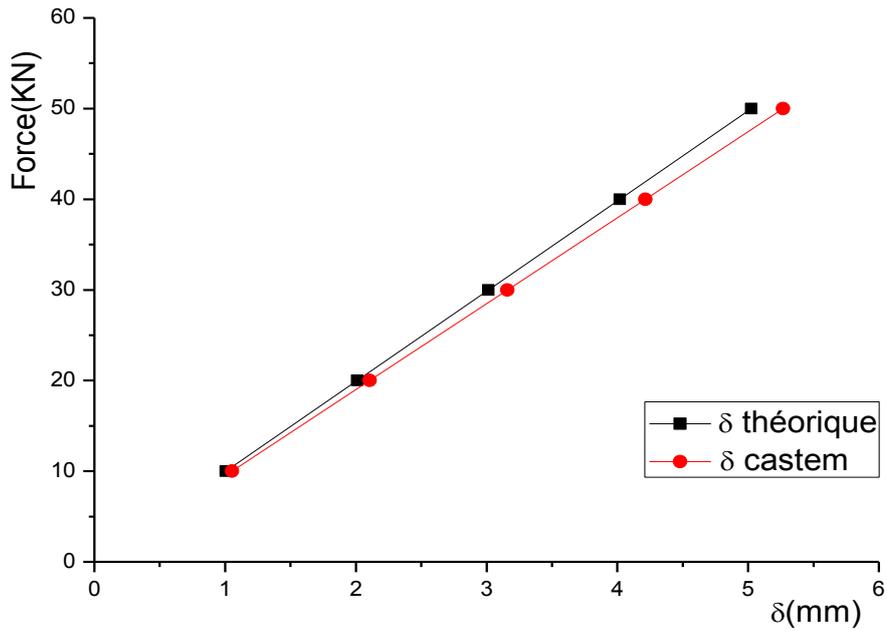
Charge totale (KN)	$\sigma$ (charge répartie) (mm)		Ecart en %	$\sigma$ (charge concentrée) (mm)		Ecart en %
	théorie	Castem		théorie	Castem	
10	12.146	12.293	<b>1.21%</b>	24.292	24.054	<b>0.97%</b>
20	24.292	24.587	<b>1.21%</b>	48.584	48.107	<b>0.97%</b>
30	36.438	36.880	<b>1.21%</b>	72.875	72.161	<b>0.97%</b>
40	48.584	49.173	<b>1.21%</b>	97.167	96.215	<b>0.97%</b>
50	60.729	61.467	<b>1.21%</b>	121.46	120.27	<b>0.97%</b>

**Tableau IV.2 .5 : Valeurs de la contrainte.**

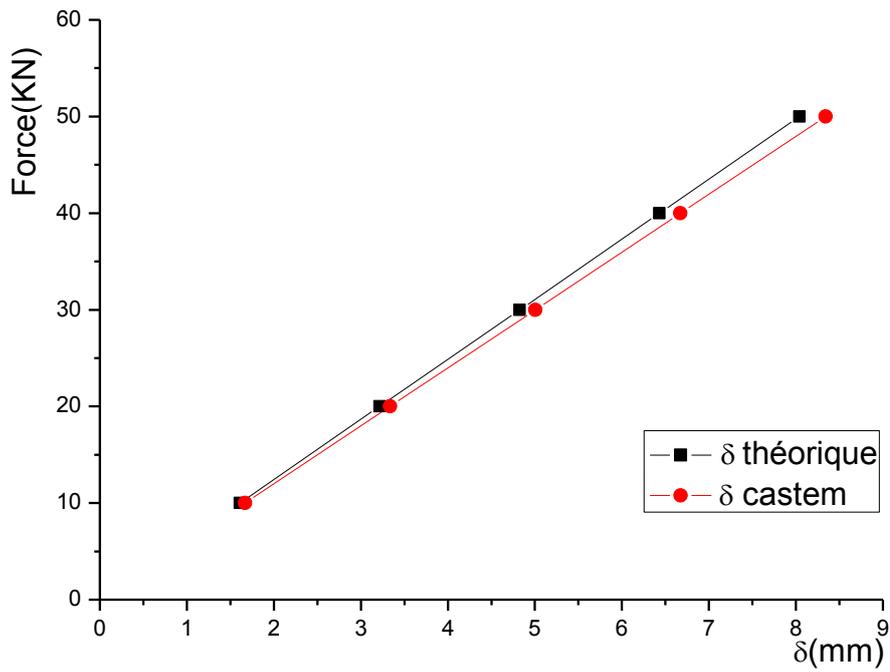
D'après les résultats obtenus selon les deux tableaux, il est à constater que :

- L'écart en pourcentage entre les valeurs de la flèche à mi-portée de la poutre ( $\delta_r$ ) et ( $\delta_c$ ) obtenues numériquement par castem2000 et celles calculées théoriquement est d'ordre 4.83 % pour le cas d'un chargement répartie et d'ordre 3.73 % pour le cas d'un chargement concentré à mi-portée de la poutre.
- L'écart en pourcentage entre les valeurs de la contrainte à mi-portée de la poutre ( $\sigma_r$ ) et ( $\sigma_c$ ) obtenues numériquement par castem2000 et celles calculées théoriquement est d'ordre 1.21% pour le cas d'un chargement répartie et d'ordre 0.97 % pour le cas d'un chargement concentré à mi-portée de la poutre.

Les valeurs des deux tableaux (IV.2.4 et IV.2.5) sont illustrées par deux graphes représentant l'évolution du déplacement en fonction de la charge (**Fig. IV.2.5**) ainsi par deux graphes représentant l'évolution de la contrainte en fonction de la charge (**Fig. IV.2.6**).

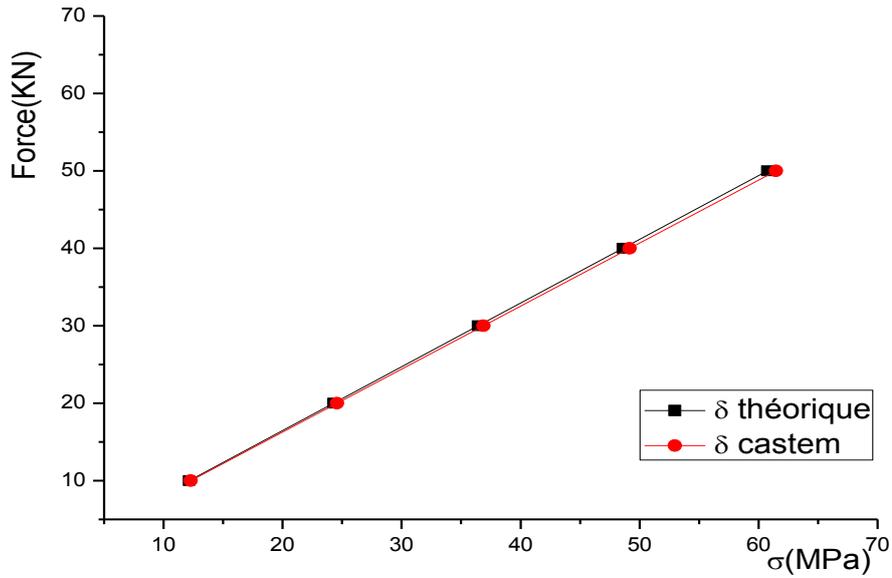


a: évolution déplacement – charge (repartie).

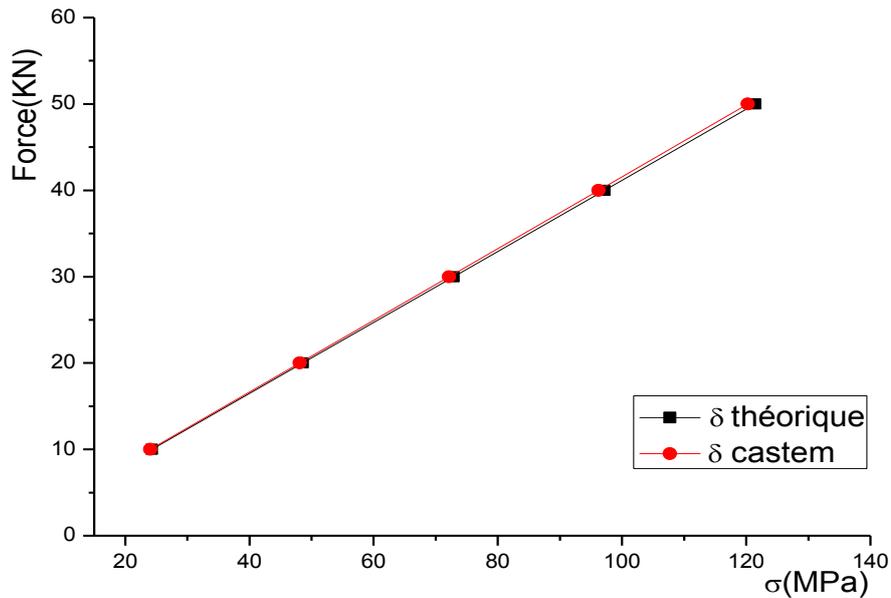


b: évolution déplacement – charge (concentrée).

**Fig. IV.2.5: évolution déplacement - charge.**



a: évolution contrainte – charge (repartie).



a: évolution contrainte – charge (concentrée).

**Fig. IV.2.6: évolution contrainte - charge.**

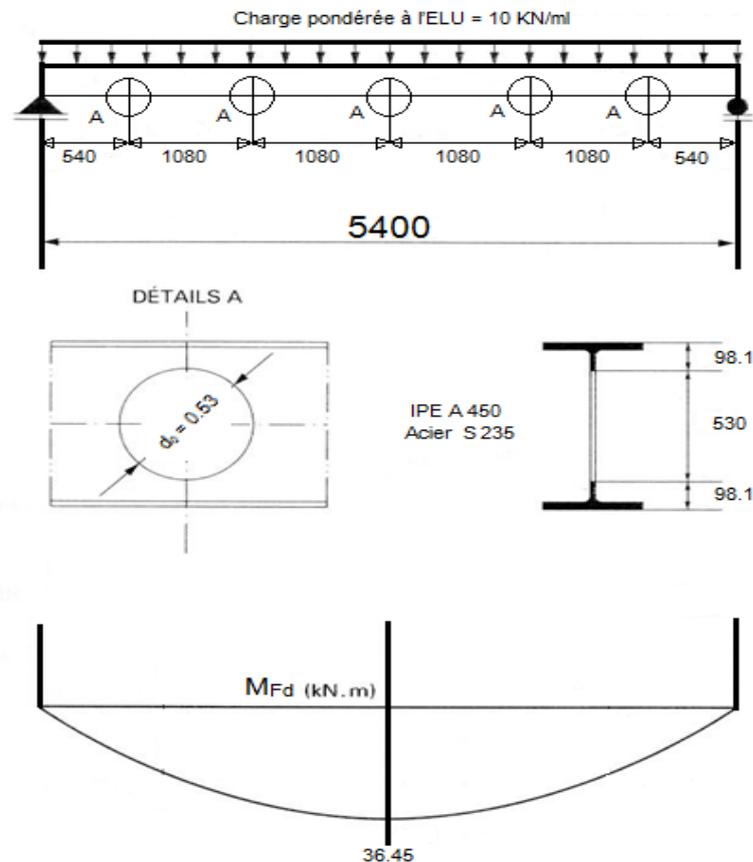
D'après les deux graphes, la concordance des résultats est bien confirmée entre les valeurs obtenues théoriquement et celles obtenues numériquement (castem2000).

### IV.2.3. Comparaison des résultats avec ceux obtenus selon les règles de calcul :

Dans ce paragraphe, nous allons tester le code de calcul Castem2000 adopté par un exemple traité selon les règles de calcul [13] d'une solive d'un plancher métallique comportant cinq ouvertures d'âme positionnées symétriquement comme le montre la figure IV.2.7.

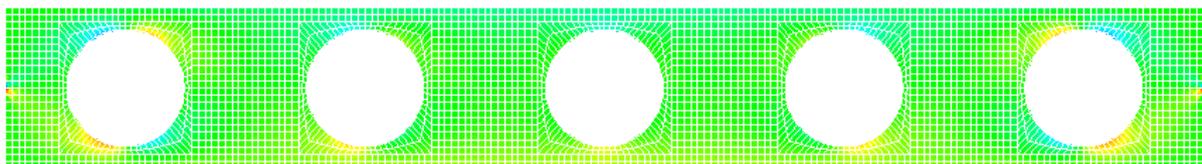
Les résultats obtenus selon les règles de calcul [13] sont comparés à ceux fournis par le logiciel d'éléments finis Castem2000.

La géométrie de la poutre et les données de cet exemple, ainsi le diagramme de moment de flexion sont présentés sur la figure IV.2.7.



**Fig. IV.2.7: géométrie de la poutre et le diagramme du moment de flexion.**

Les variations des contraintes normales obtenues par Castem2000 sont présentées par la figure IV.2.8.



**Fig. IV.2.8: Variation des contraintes normales ( $\sigma_{xx}$ ).**

Dans le tableau suivant on présente les résultats obtenus par les deux méthodes théoriques et numériques (castem2000) des valeurs du moment fléchissant ainsi la déduction de l'effort normal élastique à mi-portée de la poutre au niveau de l'ouverture centrale.

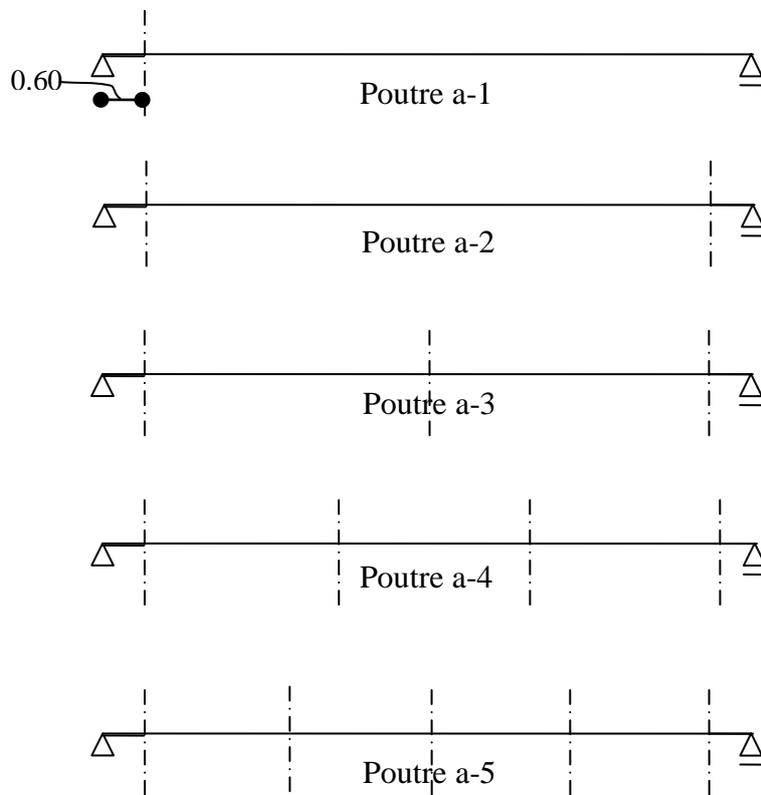
moment fléchissant (KN.m) à mi-portée de la poutre			Effort normal élastique (KN)		
Théorie	Numérique	Ecart	Théorie	Numérique	Ecart
36	32	<b>11%</b>	52	46	<b>11.5%</b>

**Tableau IV.2.6: valeurs des efforts internes.**

On peut constater que l'écart en pourcentage des sollicitations est dans l'ordre de 11%

### IV.3. Influence du type d'ouverture :

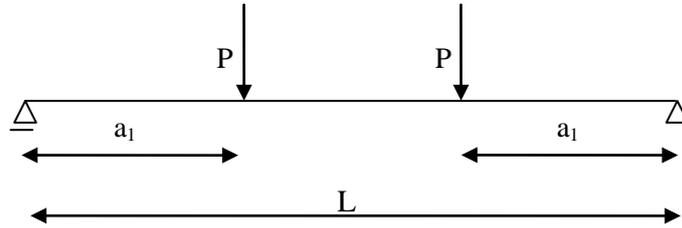
Nous allons montrer dans ce qui suit l'influence du type d'ouvertures sur le comportement des poutres. On compare entre les poutres à ouvertures rectangulaires et les poutres à ouvertures circulaires de portées 6m en augmentant à chaque fois le nombre des ouvertures selon leur positionnement (**Fig. IV.3.1**), sous l'effet de deux types de charges différents (**Fig. IV.3.2**).



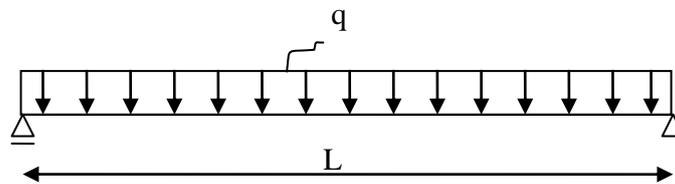
**Fig. IV.3.1: positionnement des ouvertures.**

Les deux types de charges appliquées dans cette étude sont:

a) deux charges concentrées :



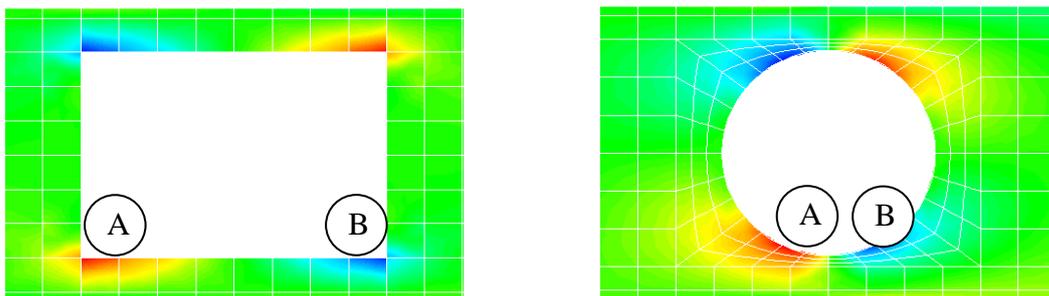
b) charge uniformément répartie :



**Fig. IV.3.2: type et positionnement de charge.**

Le traitement numérique par le programme Castem2000 a été fait sur le calcul de la flèche à mi-portée de la poutre ainsi que sur le calcul de la contrainte normale de la poutre au deux niveaux A et B de l'ouverture comme le montre la figure IV.3.3 et la contrainte à mi-portée de la poutre.

Il est à noter que la contrainte normale au niveau A de l'ouverture est la contrainte maximale dans toute la poutre.



**Fig. IV.3.3: les deux niveaux de l'ouverture où les contraintes sont maximales.**

Le tableau IV.3.1 présente les caractéristiques géométriques des poutres étudiées

L (m)	d (m)	b <sub>f</sub> (m)	t <sub>f</sub> (m)	t <sub>w</sub> (m)	a <sub>0</sub> (m)	a <sub>1</sub> (m)	h <sub>0</sub> = d <sub>0</sub> (m)
6.00	0.40	0.18	0.0135	0.0086	0.40	1.2	0.24

**Tableau IV.3.1: Caractéristiques géométriques des poutres.**

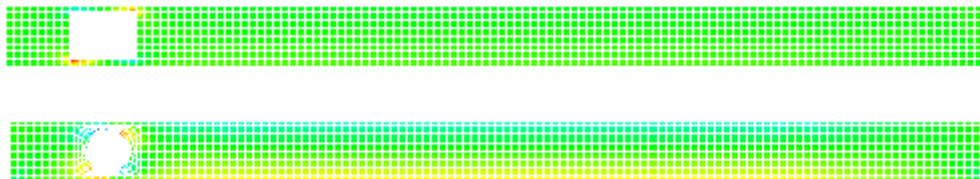
Les résultats obtenus des contraintes sont présentés dans les tableaux (IV.3.2 et IV.3.4) et ceux des déformations sont présentés dans les tableaux (IV.3.3 et IV.3.5).

Pour une meilleure analyse du comportement de la poutre, on présente la variation de la contrainte (**Fig. IV.3.4** et **Fig. IV.3.6**) et la déformation (**Fig. IV.3.5** et **Fig. IV.3.7**) le long de l'élément pour chaque cas de chargement.

**\* Cas de deux charges concentrées symétriques de 5 KN chacune:**

poutre	Contrainte (Mpa)					
	Ouverture rectangulaire			Ouverture circulaire		
	Niveau A	Niveau B	Milieu	Niveau A	Niveau B	Milieu
a-1	+56.3	-51.0	+5.505	+10.9	-8.36	+5.472
a-2	+56.4	-51.0	+5.509	+10.9	-8.36	+5.485
a-3	+56.4	-51.0	+5.633	+10.9	-8.36	+5.267
a-4	+56.4	-51.0	+5.485	+10.9	-8.36	+5.454
a-5	+58.5	-53.0	+5.634	+11.0	-8.40	+5.315

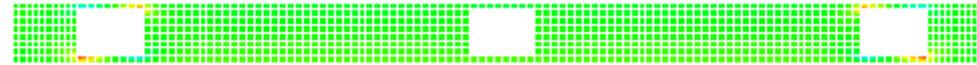
**Tableau IV.3.2: résultats des contraintes.**



**Poutre a-1: variation de la contrainte**



**Poutre a-2:** variation de la contrainte



**Poutre a-3:** variation de la contrainte



**Poutre a-4:** variation de la contrainte



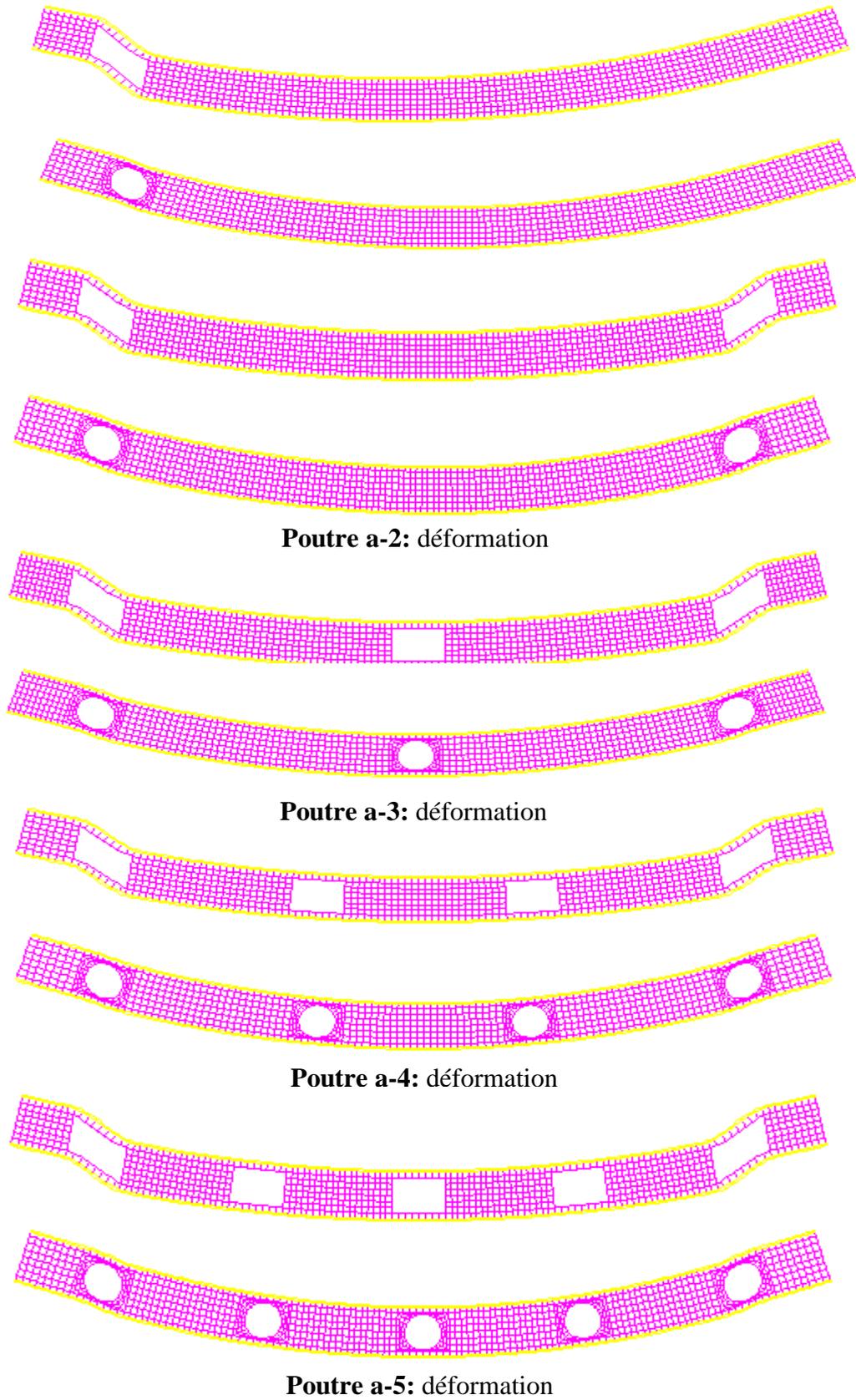
**Poutre a-5:** variation de la contrainte



**Fig. IV.3.4: Variation de la contrainte sous l'effet des deux charges concentrées.**

Déplacement (mm) à mi-portée de la poutre					
Poutre	a-1	a-2	a-3	a-4	a-5
Ouverture rectangulaire	0.652	0.720	0.722	0.726	0.729
Ouverture circulaire	0.589	0.598	0.598	0.599	0.606

**Tableau IV.3.3: résultats des déformations à mi-portée des poutres.**

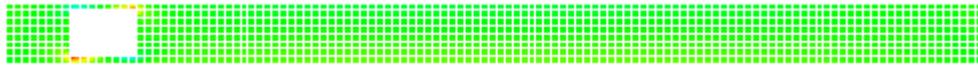


**Fig. IV.3.5: Déformation des poutres sous l'effet des deux charges concentrées.**

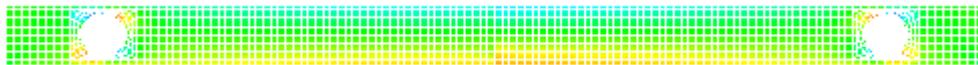
\* Cas d'une charge uniformément répartie de 1.333 KN/m:

poutre	Contrainte (Mpa)					
	Ouverture rectangulaire			Ouverture circulaire		
	Niveau A	Niveau B	Milieu	Niveau A	Niveau B	Milieu
a-1	+36.9	-32.1	+5.601	+7.21	-5.31	+5.528
a-2	+37.6	-32.7	+5.664	+7.22	-5.31	+5.500
a-3	+37.3	-32.5	+5.704	+7.19	-5.29	+5.272
a-4	+37.3	-32.3	+5.580	+7.19	-5.29	+5.506
a-5	+36.6	-31.7	+5.626	+7.09	-5.20	+5.228

**Tableau IV.3.4: résultats des contraintes.**



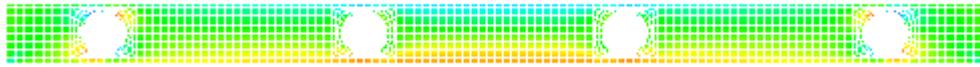
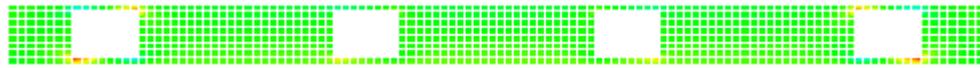
**Poutre a-1: variation de la contrainte**



**Poutre a-2: variation de la contrainte**



**Poutre a-3: variation de la contrainte**



**Poutre a-4:** variation de la contrainte



**Poutre a-5:** variation de la contrainte

**Fig. IV.3.6:** Variation de la contrainte sous l'effet d'une charge uniformément répartie.

Déplacement (mm) à mi-portée de la poutre					
Poutre	a-1	a-2	a-3	a-4	a-5
Ouverture rectangulaire	0.568	0.619	0.614	0.644	0.650
Ouverture circulaire	0.523	0.527	0.525	0.532	0.527

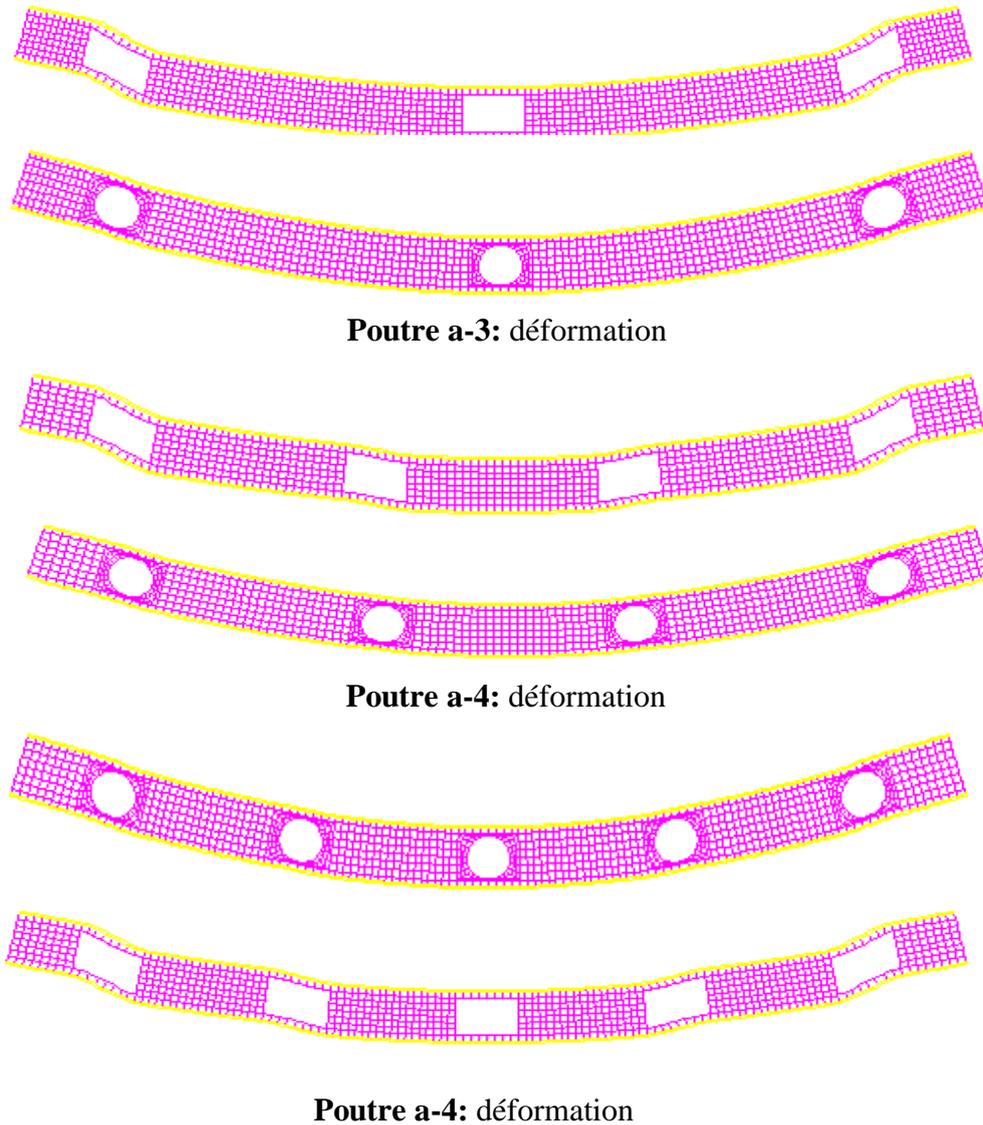
**Tableau IV.3.5:** résultats des déformations à mi-portée des poutres.



**Poutre a-1:** déformation



**Poutre a-2:** déformation



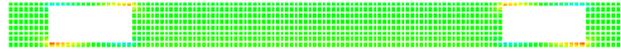
**Fig. IV.3.7: Déformation sous l'effet d'une charge uniformément répartie.**

D'après les valeurs obtenues de la contrainte et de la flèche pour les deux types d'ouvertures, on remarque que dans le cas des poutres à ouvertures rectangulaires les valeurs des contraintes aux niveaux A (contrainte maximale) et B de l'ouverture (**Fig. IV.3.3**) ainsi que la valeur de la contrainte et la valeur de la flèche maximale à mi-portée de la poutre sont des valeurs supérieures à celles des poutres à ouvertures circulaires.

Pour mieux expliquer les résultats obtenus, il nous a paru très utile de justifier la différence d'écart des valeurs de la contrainte et des valeurs de la flèche entre les deux types d'ouvertures (rectangulaire et circulaire).

Pour cela, une étude a été faite sur la variation des contraintes (**Fig. IV.3.8**) et des déformées (**Fig. IV.3.10**) en représentant les évolutions contraintes – forces (**Fig. IV.3.9**) et l'évolution déplacements – forces (**Fig. IV.3.11**) au niveau de l'ouverture (niveaux A et B) et à mi-portée de trois types de poutres à deux ouvertures (rectangulaires, carrés et circulaires) positionnées d'une manière symétrique sous l'effet d'une charge concentrées à mi-portée.

**\*étude des contraintes :**



a- Variation des contraintes d'une poutre à ouvertures rectangulaires.

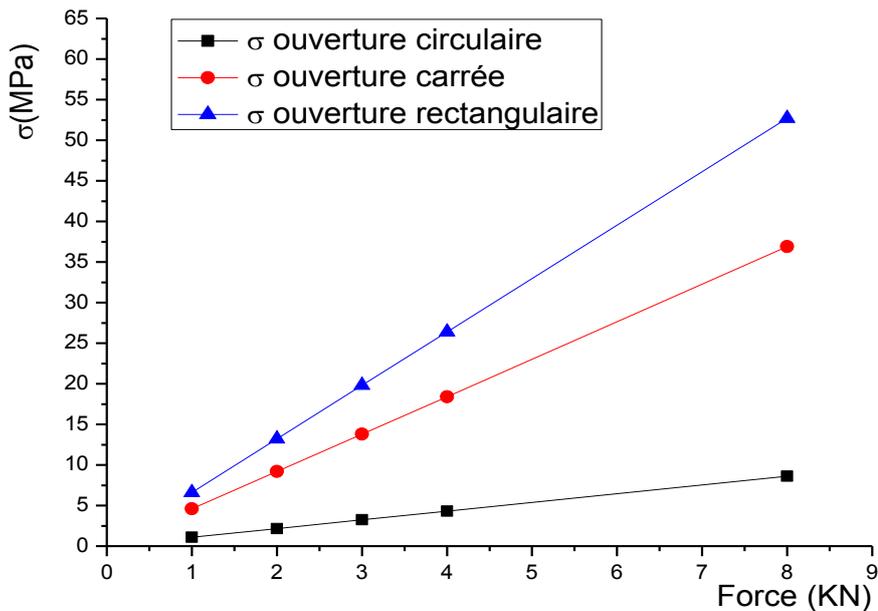


b- Variation des contraintes d'une poutre à ouvertures carrés.

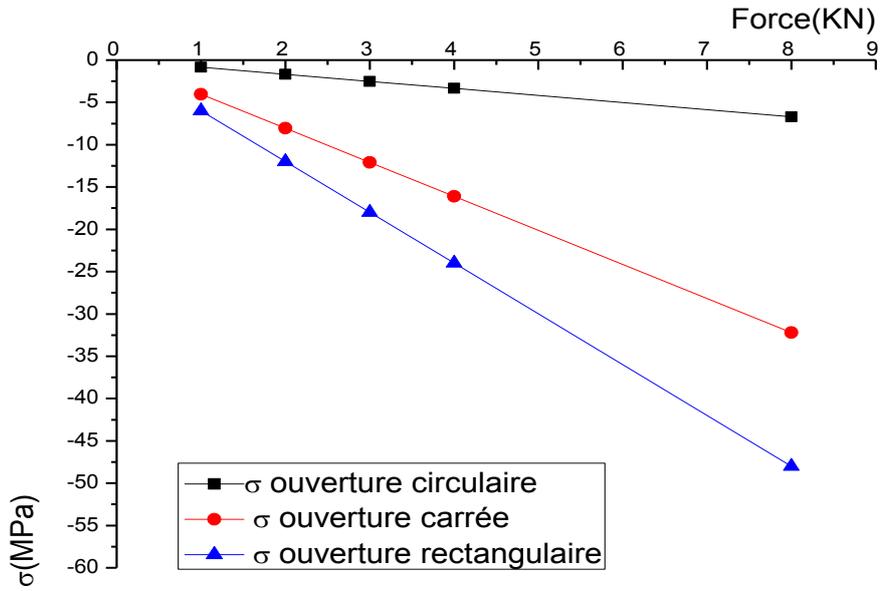


c- Variation des contraintes d'une poutre à ouvertures circulaires.

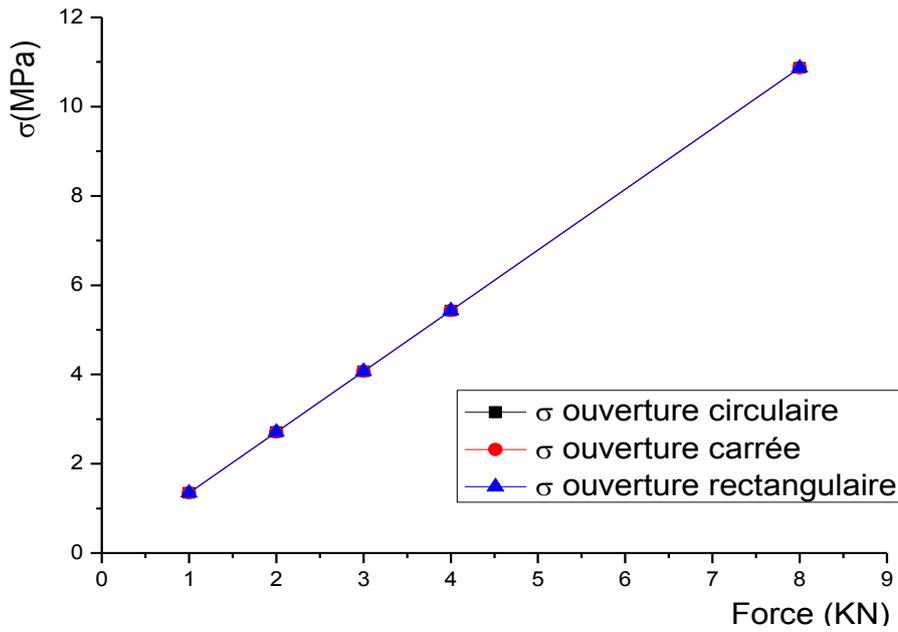
**Fig. IV.3.8: Etude de la contrainte.**



a: évolution contrainte – force au niveau A de l'ouverture.



b: évolution contrainte – force au niveau B de l’ouverture.



c: évolution contrainte – force a mi-portée de la poutre.

**Fig. IV.3.9: évolution contrainte - force.**

Les résultats obtenus des contraintes au niveau de l’ouverture (niveau A et B) et à mi-portée de ces trois types de poutres sont présentés respectivement dans les tableaux IV.3.6.

Force (KN)	Contraintes (Mpa) au niveau A de l'ouverture		
	Ouverture circulaire	Ouverture carrée	Ouverture rectangulaire
1.0	+1.08	+4.61	+6.59
2.0	+2.15	+9.21	+13.20
3.0	+3.23	+13.80	+19.80
4.0	+4.31	+18.40	+26.40
8.0	+8.61	+36.90	+52.70

a- Contraintes au niveau A de l'ouverture.

Force (KN)	Contraintes (Mpa) au niveau B de l'ouverture		
	Ouverture circulaire	Ouverture carrée	Ouverture rectangulaire
1.0	-0.83	-4.03	-6.00
2.0	-1.67	-8.06	-12.00
3.0	-2.51	-12.10	-18.00
4.0	-3.34	-16.10	-24.00
8.0	-6.69	-32.20	-48.00

b- Contraintes au niveau B de l'ouverture.

Force (KN)	Contraintes (Mpa) à mi-portée de la poutre		
	Ouverture circulaire	Ouverture carrée	Ouverture rectangulaire
1.0	+1.35	+1.35	+1.35
2.0	+2.71	+2.71	+2.71
3.0	+4.07	+4.07	+4.07
4.0	+5.43	+5.43	+5.43
8.0	+10.87	+10.87	+10.87

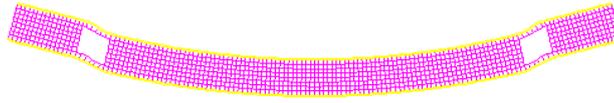
c- Contraintes à mi-portée de la poutre.

**Tableaux IV.3.6: résultats des contraintes.**

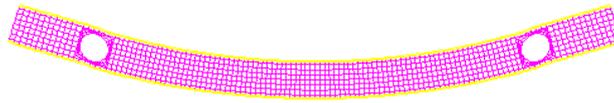
**\*étude des déformations :**



a- Déformation d'une poutre à ouvertures rectangulaires.

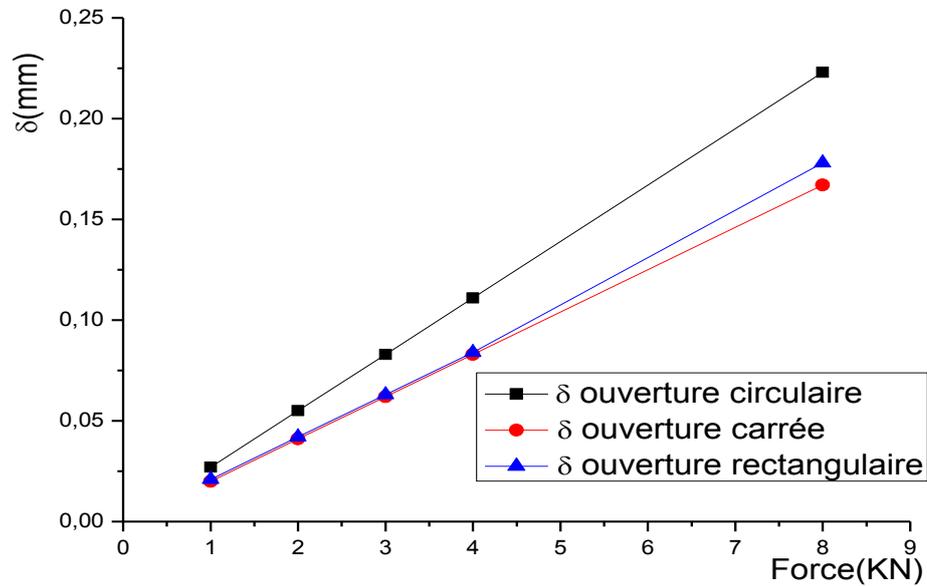


b- Déformation d'une poutre à ouvertures carrés.

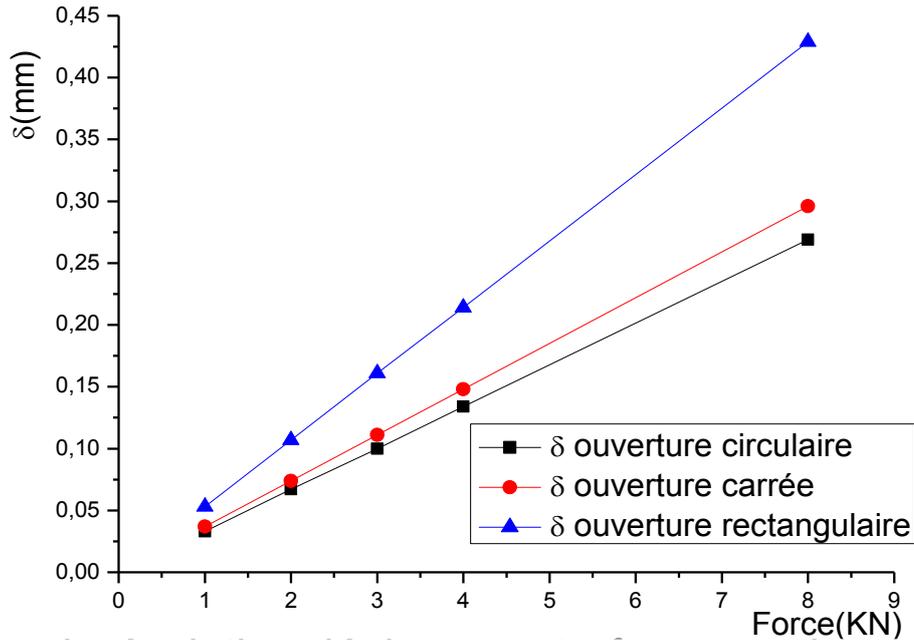


c- Déformation d'une poutre à ouvertures circulaires.

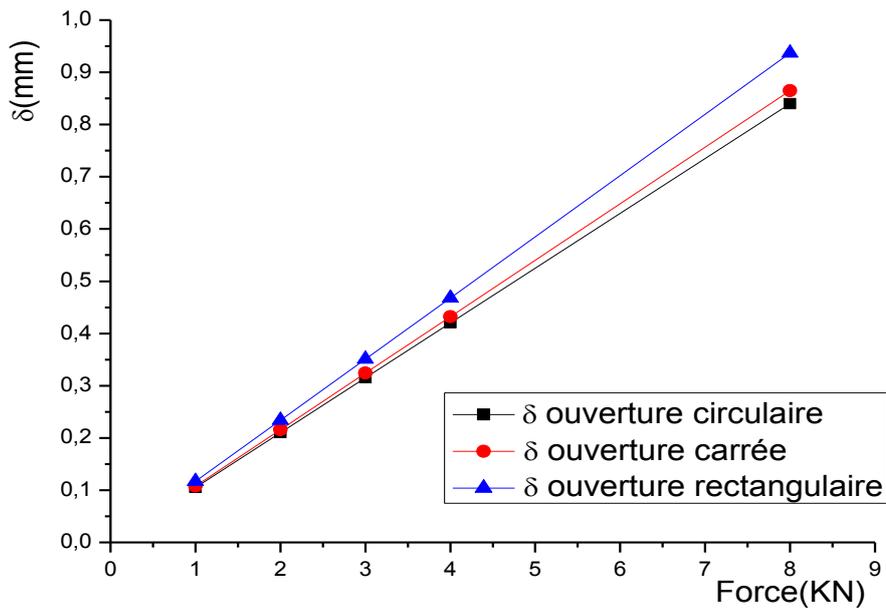
**Fig. IV.3.10: Etude de la flèche.**



a: évolution déplacement – force au niveau A de l'ouverture.



b: évolution déplacement – force au niveau B de l'ouverture.



c: évolution déplacement – force a mi-portée de la poutre.

**Fig. IV.3.11: évolution déplacement - force.**

Les résultats obtenus des contraintes au niveau de l'ouverture (niveau A et B) et à mi-portée de ces trois types de poutres sont présentés respectivement dans les tableaux IV.3.7.

Force (KN)	Déplacements (mm) au niveau A de l'ouverture		
	Ouverture circulaire	Ouverture carrée	Ouverture rectangulaire
1.0	0.027	0.020	0.021
2.0	0.055	0.041	0.042
3.0	0.083	0.062	0.063
4.0	0.110	0.083	0.084
8.0	0.221	0.167	0.178

a- Déplacements au niveau A de l'ouverture.

Force (KN)	Déplacements (mm) au niveau B de l'ouverture		
	Ouverture circulaire	Ouverture carrée	Ouverture rectangulaire
1.0	0.033	0.037	0.053
2.0	0.067	0.074	0.107
3.0	0.100	0.111	0.161
4.0	0.134	0.148	0.214
8.0	0.269	0.296	0.429

b- Déplacements au niveau B de l'ouverture.

Force (KN)	Déplacements (mm) à mi-portée de la poutre		
	Ouverture circulaire	Ouverture carrée	Ouverture rectangulaire
1.0	0.105	0.108	0.117
2.0	0.210	0.216	0.234
3.0	0.315	0.324	0.351
4.0	0.420	0.432	0.468
8.0	0.840	0.865	0.937

c- Déplacements à mi-portée de la poutre.

**Tableaux IV.3.7: résultats des déplacements.**

On remarque que les valeurs de la contrainte au niveau A et B des ouvertures circulaires sont plus petites que les valeurs des autres types (rectangulaires et carrées). A mi-portée des poutres on a une égalité de contrainte entre les trois types des poutres par ce qu'elles ont de la même géométrie.

Pour les valeurs de la flèche au niveau A des ouvertures circulaires sont un peut grandes par rapport aux autres types d'ouvertures a cause de l'endroit du niveau A par rapport à la mi-portée de la poutre (flèche maximal), au niveau B et à mi-portée des poutres les valeurs de la flèche des ouvertures circulaires sont inferieurs par rapport aux autres types d'ouvertures.

Cependant comme il n'est pas pratique d'utiliser des ouvertures carrées dans les poutres, alors la remarque générale à souligner pour les deux autres types d'ouvertures est que les poutres métalliques avec des ouvertures circulaires sont plus résistantes que les poutres avec des ouvertures rectangulaires; et comme ces derniers sont plus généralement utilisées dans la pratique, alors on prévoit des ouvertures rectangulaires arrondies aux coins afin d'éviter les déformations additionnelles significatives dans la poutre (l'effet Vierendeel).

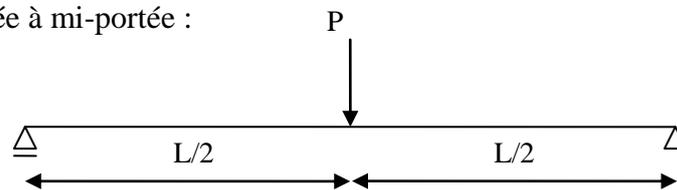
**IV.4. Influence de la dimension des ouvertures rectangulaires :**

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 flèche maximale à mi-portée de la poutre.

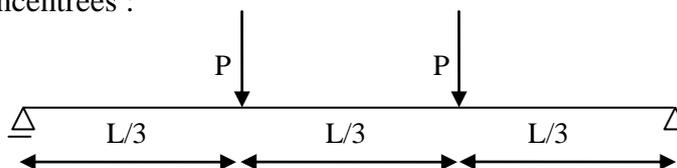
**IV.4.1. Influence de la hauteur de l'ouverture :**

Nous allons montrer l'influence de la hauteur de l'ouverture sur la flèche maximale d'une poutre symétrique à deux ouvertures rectangulaires de portée 5m sous chaque type et positionnement de charge représenté dans la figure IV.4.1.

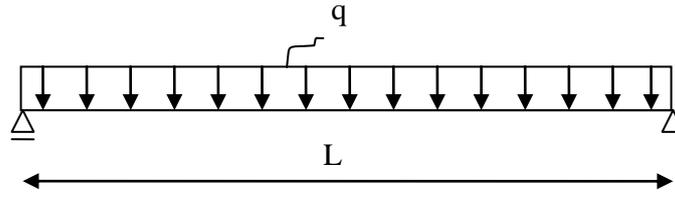
a) charge concentrée à mi-portée :



b) deux charges concentrées :



c) charge uniformément répartie :



**Fig. IV.4.1: type et positionnement de charge.**

Les caractéristiques géométriques des poutres étudiées sont présentées dans le tableau IV.4.1

L (m)	d (m)	b <sub>f</sub> (m)	t <sub>f</sub> (m)	t <sub>w</sub> (m)
5.00	0.40	0.18	0.0135	0.0086

**Tableau IV.4.1: Caractéristiques géométriques de la poutre.**

Les valeurs obtenues de la flèche maximale à mi-portée de la poutre sous chaque type de chargement représentées dans la figure IV.4.1 sont données dans le tableau IV.4.2.

t <sub>w</sub> =0.0086m	flèche maximale (mm)		
h <sub>0</sub> (m)	Une charge Concentrée de 60 KN	Deux charges Concentrées de 36.192KN chacune	Une charge répartie de 19.2KN/m
0.3 d	4.65	4.90	4.78
0.5 d	6.15	6.71	6.53
0.7 d	13.42	15.48	14.71
0.8 d	31.23	36.96	35.76

**Tableau IV.4.2: valeurs de la flèche maximale.**

A partir du tableau IV.4.2, on note que la flèche augmente lorsque la hauteur de l'ouverture augmente, ceci revient à dire que plus cette hauteur augmente plus la rigidité de la poutre diminue, et par suite la flèche augmente et devient plus importante si on ne respecte pas la condition de géométrie de l'ouverture  $h_0 \leq 0.7d$ .

**IV.4.2. Influence de la longueur de l'ouverture :**

Afin de voir l'influence de la longueur de l'ouverture sur la flèche maximale de la même poutre (voir **Fig.IV.4.1**), Les valeurs obtenues de la flèche maximale à mi-portée de la poutre sont données dans le tableau IV.4.3.

$t_w=0.0086m$	flèche maximale (mm)		
$a_0$ (m)	Une charge Concentrée de 60 KN	Deux charges Concentrées de 36.192KN chacune	Une charge répartie de 19.2KN/m
0.40	5.31	5.70	5.80
0.60	8.21	9.19	9.25
0.80	13.41	15.46	14.95
1.00	21.61	25.37	23.04

**Tableau IV.4.3 : valeurs de la flèche maximale.**

A partir du tableau IV.4.3, on relève que la longueur de l'ouverture joue un rôle secondaire par rapport à sa hauteur en ce qui concerne la valeur de la flèche. En effet pour des ouvertures de grandes longueurs la flèche est plus grande 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  $a_0 \leq 2 d$ .

**IV.5. Influence de l'épaisseur d'âme :**

Afin de confirmer les deux conditions de dimensions de l'ouverture ( $h_0 \leq 0.7d$  et  $a_0 \leq 2.0d$ ) sous l'influence de l'épaisseur d'âme sur la flèche, on a fait varier à chaque fois l'épaisseur d'âme de la même poutre étudié précédemment jusqu'à une épaisseur de 3mm et voir son influence sur la flèche.

Les valeurs de la flèche maximale obtenues par castem2000 selon deux différentes épaisseurs d'âme sont présentées dans le tableau IV.5.1.

$h_0 \leq 0.7d$ $a_0 \leq 2.0d$	Une charge Concentrée de 60 KN	Deux charges Concentrées de 36.192KN chacune	Une charge répartie de 19.2KN/m
$t_w$ (mm)	flèche max (mm)	flèche max (mm)	flèche max (mm)
0.003	27.33	32.00	30.71
0.004	22.44	26.18	25.17

**Tableau IV.5.1: valeurs de la flèche maximale.**

On remarque, bien que la condition de géométrie de l'ouverture mentionnée dans les critères de la littérature ( $h_0 \leq 0.7d$  et  $a_0 \leq 2.0d$ ) n'est plus valable pour des épaisseurs d'âme réduites comme le confirme le tableau IV.5.1; par suite une étude paramétrique a été faite sur différentes dimensions d'ouverture en faisant à chaque fois varier la longueur et la hauteur de l'ouverture jusqu'à aboutir à une condition de géométrie valable concernant les petites épaisseurs comme le confirme le tableau IV.5.2.

Les conditions de géométrie de l'ouverture obtenues pour les petites épaisseurs sont :

$$\begin{cases} h_0 \leq 0.6d \\ a_0 \leq 2d. \end{cases}$$

$h_0 \leq 0.6d$ $a_0 \leq 2d$	Une charge Concentrée de 60 KN	Deux charges Concentrées de 36.192KN chacune	Une charge répartie de 19.2KN/m
$t_w$ (mm)	flèche max (mm)	flèche max (mm)	flèche max (mm)
0.003	15.70	17.98	17.34
0.004	12.98	14.78	14.29

**Tableau IV.5.2: valeurs de la flèche maximale.**

On remarque donc, que pour les épaisseurs d'âme réduites les nouvelles conditions de géométrie de l'ouverture obtenues ( $h_0 \leq 0.6d$  et  $a_0 \leq 2d$ ) sont bien valables afin d'aboutir aux bons résultats.

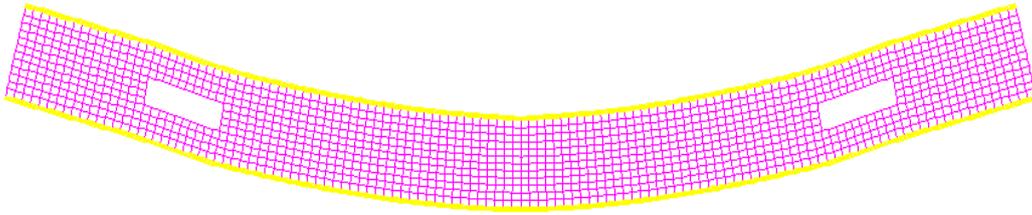
#### IV.6. Evolution force - déplacements :

Une comparaison entre les courbes d'évolution force – déplacements obtenues par castem2000 a été faite, en appliquant le chargement en fonction des déplacements relatifs au milieu de l'ouverture ( $\delta_o$ ) et à mi-portée ( $\delta_c$ ) sur trois types de poutres à deux ouvertures rectangulaires positionnées d'une façon symétrique par rapport à l'axe vertical à mi-portée de la poutre sous l'effet de charge et positionnement différents.

Les caractéristiques géométriques des poutres étudiées sont présentées dans le tableau IV.6.1.

L (mm)	d (mm)	$b_f$ (mm)	$t_f$ (mm)	$t_w$ (mm)	$a_0$ (mm)	$h_0$ (mm)
2400	201.30	134.01	7.88	5.89	180.00	60.00

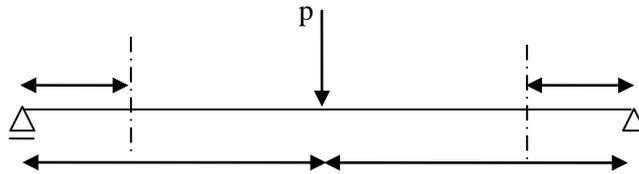
**Tableau IV.6.1: Caractéristiques géométriques des poutres.**



**Fig. IV.6.1: déformation de la poutre.**

Les résultats obtenus des valeurs de la flèche ( $\delta_o$ ) et ( $\delta_c$ ) sont présentés dans les tableaux IV.6.2 à IV.6.4, ainsi leurs représentations graphiques sont données dans les figures IV.6.2, IV.6.3 et IV.6.4.

#### IV.6. 1. Poutre sous une charge concentrée à mi-portée :



**Fig. IV.6.a: Poutre sous une charge concentrée à mi- portée.**

Charge (KN)	$\delta_o$ (mm)	$\delta_c$ (mm)	Ecart %
1.5	0.050	0.105	<b>52.21</b>
3.0	0.100	0.210	<b>52.21</b>
4.5	0.150	0.315	<b>52.21</b>
6.0	0.200	0.420	<b>52.21</b>
7.5	0.251	0.525	<b>52.21</b>

**Tableau IV.6.2: valeurs de la flèche**

Les valeurs du tableau (IV.6.2) sont illustrées par un graphe représente l'évolution du déplacement en fonction de la charge (Fig. IV.6.2).

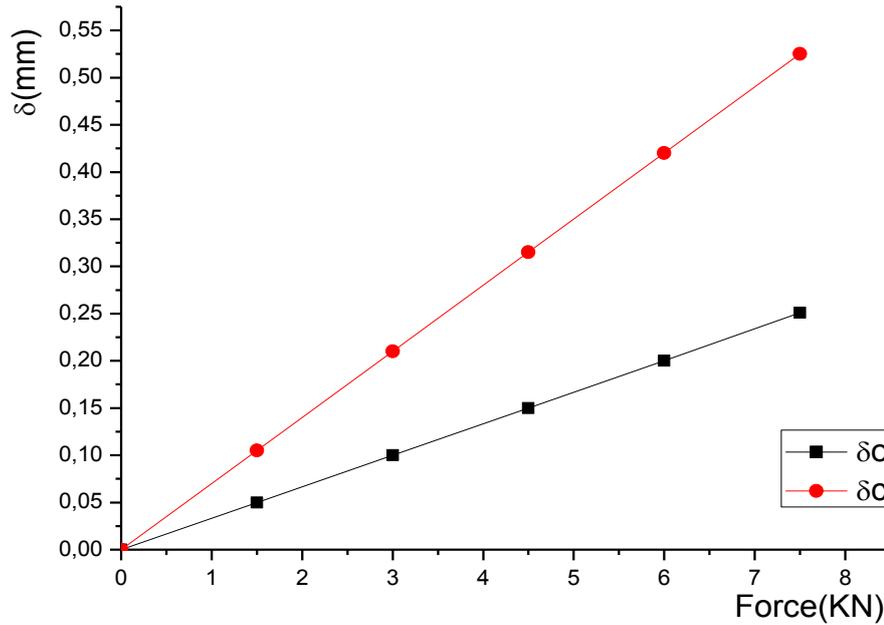


Fig. IV.6.2: évolution force - déplacement.

IV.6. 2. Poutre sous une charge uniformément répartie :

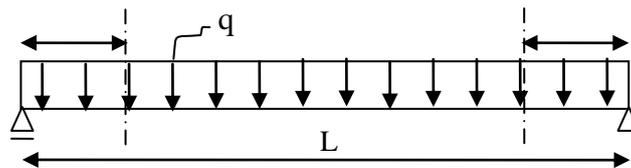


Fig. IV.6.b: Poutre sous une charge uniformément répartie.

Charge (KN/m)	$\delta_o$ (mm)	$\delta_c$ (mm)	Ecart %
1.0	0.053	0.103	<b>48.10</b>
2.0	0.107	0.207	<b>48.10</b>
3.0	0.161	0.311	<b>48.10</b>
4.0	0.215	0.415	<b>48.10</b>
5.0	0.269	0.518	<b>48.10</b>

Tableau IV.6.3: valeurs de la flèche.

Les valeurs du tableau (IV.6.3) sont illustrées par un graphe représente l'évolution du déplacement en fonction de la charge (Fig. IV.6.3).

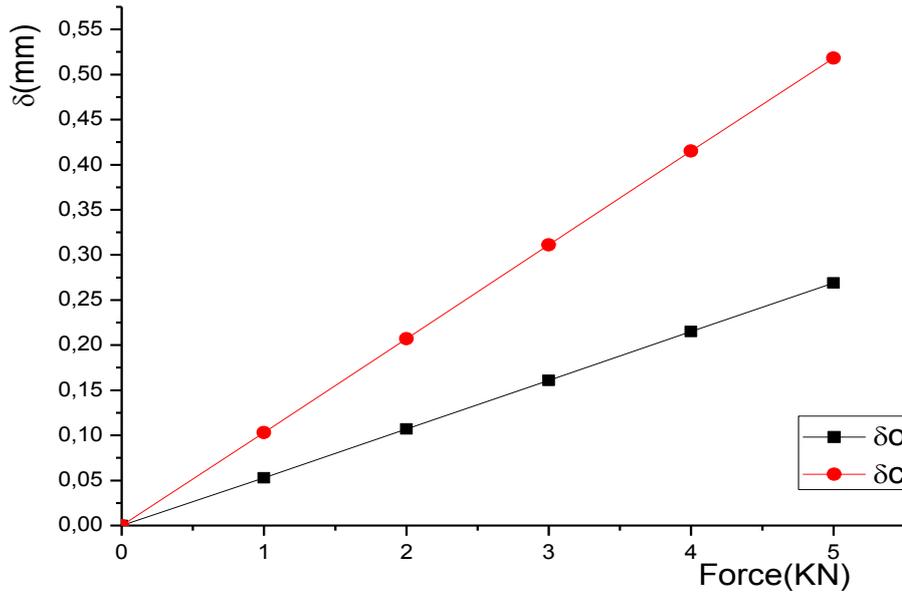


Fig. IV.6.3: évolution force - déplacement.

IV.6. 3. Poutre sous deux charges concentrées :

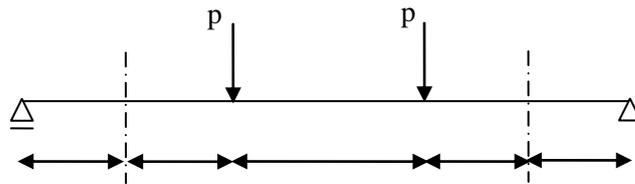
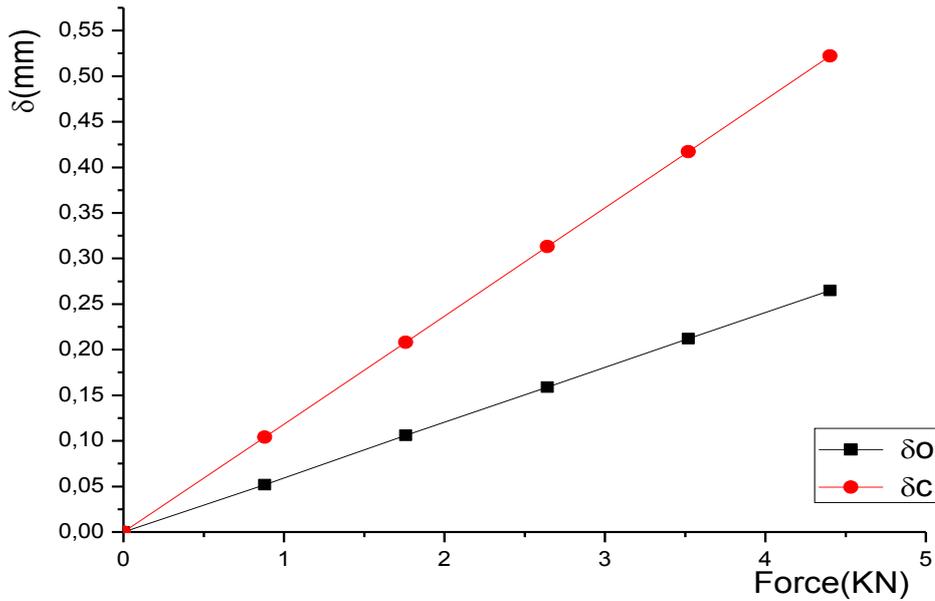


Fig. IV.6.c: Poutre sous deux charges concentrées.

Charge (KN)	$\delta_o$ (mm)	$\delta_c$ (mm)	Ecart %
0.880	0.052	0.104	<b>49.25</b>
1.760	0.106	0.208	<b>49.25</b>
2.641	0.159	0.313	<b>49.25</b>
3.521	0.212	0.417	<b>49.25</b>
4.402	0.265	0.522	<b>49.25</b>

Tableau IV.6.4: valeurs de la flèche.

Les valeurs du tableau (IV.6.4) sont illustrées par un graphe représente l'évolution du déplacement en fonction de la charge (Fig. IV.6.4).



**Fig. IV.6.4: évolution force - déplacement.**

A partir des figures IV.6.2, IV.6.3 et IV.6.4 on remarque que la flèche à mi-portée  $\delta_c$  est plus grande que la flèche relative à l'ouverture  $\delta_o$  pour les trois premiers types de positionnement d'ouvertures (poutres a – b – c) suivant le type de charge exercé c'est-à-dire que plus la charge augmente plus les deux flèches augmentent. En particulier celle à mi-portée est toujours plus grande que celle au niveau de l'ouverture avec un certain écart de 50% d'après les tableaux IV.6.2, IV.6.3 et IV.6.4.

#### IV.7. Étude d'une poutre selon le positionnement des ouvertures :

Cette étude est basée sur une comparaison entre la flèche à mi-porte  $\delta_c$  et la flèche à mi-longueur de l'ouverture  $\delta_o$ , ainsi que la détermination des contraintes aux coins de l'ouverture sous l'effet d'une charge uniformément répartie d'intensité égale à 5KN/m selon deux types de positionnement différents d'ouvertures, tout en respectant les critères présentés dans le chapitre I, afin d'éviter l'interaction entre les deux ouvertures.

La géométrie de ces deux poutres est présentée dans le tableau IV.7.1.

L (mm)	d (mm)	$b_f$ (mm)	$t_f$ (mm)	$t_w$ (mm)	$a_0$ (mm)	$h_0$ (mm)
2400	201.30	134.01	7.88	5.89	180.00	60.00

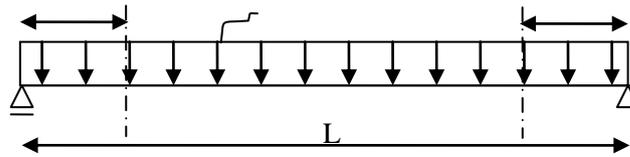
**Tableau IV.7.1: Géométrie des deux poutres.**

**IV.7.1. Etude de la flèche :**

Les résultats calculés par le programme Castem2000 des deux flèches  $\delta_c$  et  $\delta_o$  pour les deux types de positionnement d'ouvertures sont donnés dans le tableau IV.7.2.

**-Premier type de positionnement :**

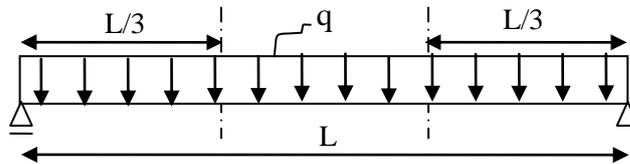
Les ouvertures sont proches des supports d'appui (poutre a) à une distance égale à  $1/6$  de la portée de la poutre.



**Fig. IV.7.1 : Poutre (a)**

**-Deuxième type de positionnement :**

Les ouvertures sont proches du milieu de la poutre (poutre b) à une distance égale à  $1/3$  de la portée de la poutre.



**Fig. IV.7.2: Poutre (b)**

Ouvertures flèches	Distance de L/6 Par rapport à l'appui	Distance de L/3 Par rapport à l'appui
$\delta_o$	0.269	0.433
$\delta_c$	0.518	0.500

**Tableau IV.7.2: Valeurs de la flèche.**

Pour les deux types de positionnement d'ouvertures, on remarque que :

la flèche à mi-portée est grande que celle à mi-longueur de l'ouverture.

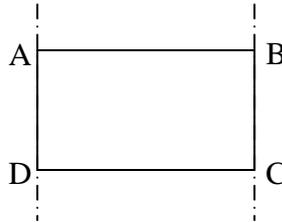
Pour le premier type de positionnement d'ouvertures, la différence entre les deux flèches  $\delta_c$  et  $\delta_o$  est de 48.10%.

Pour le deuxième type de positionnement d'ouvertures, la différence entre les deux flèches  $\delta_c$  et  $\delta_o$  est de 13.54%.

La flèche à mi portée de premier type de positionnement est grande que celle de deuxième type de positionnement.

**IV.7.2. Etude de la contrainte :**

Pour les deux types de poutres représentées précédemment figures IV.7.1 et IV.7.2, on a calculé les contraintes normales aux quatre coins (A, B, C, D) de l'ouverture présentée dans figure IV.7.3, et on a obtenu les valeurs présentées dans le tableau IV.7.3.

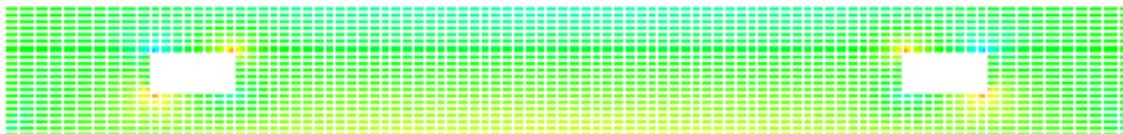


**Fig. IV.7.3: présentation d'une ouverture.**

Coins de l'ouverture	A	B	C	D
Contraintes du 1° type de positionnement	-53.6Mpa	+43.2Mpa	-43.2Mpa	+53.6Mpa
Contraintes du 2° type de positionnement	-31.3Mpa	+16.5Mpa	-16.5Mpa	+31.3Mpa

**Tableau IV.7.3: Valeurs de la contrainte.**

Pour une meilleure analyse du comportement de la poutre sous une charge uniformément répartie, on présente la variation de la contrainte (**Fig. IV.7.4**) le long de l'élément pour chaque cas de type de positionnement.



a- 1° type de positionnement



b- 2° type de positionnement

**Fig. IV.7.4: variation de la contrainte.**

On remarque que :  
pour les deux types de positionnement d'ouvertures, les contraintes de la section 1-1 sont plus grandes que celles de la section 2-2. Les contraintes dans les coins A et C sont des contraintes de compression tandis que dans les coins B et D sont des contraintes de traction.

Les contraintes du premier type de positionnement d'ouvertures sont plus importantes que celles du deuxième type de positionnement d'ouvertures.

alors la poutre b est plus résistante que la première poutre (poutre a).

#### **IV.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons testé le code de calcul Castem2000 dans le cas de divers exemples. Il s'agit de poutres métalliques à une seule travée comportant des évidements d'âme, avec des conditions aux limites et des sollicitations représentatives des cas envisageables.

Nous avons alors, étudié des poutres métalliques à âmes évidées, chargées soit par une ou deux forces ponctuelles, soit par une charge répartie. Les différentes configurations ont été illustrées.

L'utilisation de ce logiciel nécessite l'élaboration des programmes à base d'éléments finis pour chaque type de calcul sur le comportement des poutres et des sections sous l'effet des charges appliquées.

Concernant les résultats trouvés, nous avons présenté ceux relatifs aux comportements des poutres métalliques de sections en I comportant des évidements d'âme sollicitées en flexion simple à l'état élastique.

En dernier lieu, nous avons présenté une comparaison entre les résultats calculés par Castem2000 et ceux obtenus par la méthode classique en utilisant quelques expressions issues des règles fondamentales déterminant les efforts internes dans la phase élastique d'une solive métallique comportant cinq ouvertures d'âme positionnées symétriquement.

Grâce à la modélisation adoptée dans le chapitre précédent (chap.III), dont l'élément choisit est un élément quadratique à 8 nœuds, ces résultats obtenus à partir des programmes élaborés sont, pour les différents cas traités, dans les règles fondamentales selon la théorie proposée dans les chapitres 2. Nous pouvons dire donc, que le logiciel Castem2000 donne de bons résultats sur le traitement des problèmes mécaniques avec le comportement en élasticité linéaire.