

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Année 2019

**MEMOIRE**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER**

*Thème :*

**ETUDE DU COMPORTEMENT DE POUTRES METALLIQUES  
COMPORTANT UNE OUVERTURE DANS LES AMES**

**Domaine :** Sciences et Technique

**Spécialité :**  
GENIE CIVIL

**OPTION**  
CONSTRUCTIONS METALLIQUES ET MIXTES

**Par**  
DAOUDI NESRINE  
BOUKHADRA GHADA

**DIRECTEUR DU MEMOIRE :** **HADIDANE YAZID.Dr.** GENIE CIVIL, U B M ANNABA

DEVANT LE JURY

**PRESIDENT :** MME KOUIDER

**EXAMINATEURS :** MME OTMANI

---

## *Remerciements*

---

*En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.*

*Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon encadreur, Mr Hadidane Yazid, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*Je tiens à remercier spécialement Mme Kouider Nadia, qui fut la première à me faire découvrir le sujet qui a guidé mon mémoire.*

*Je remercie mes très chers parents fatiha et Moussa et ma belle mère Nasira, et mon fiancé Rahim qui ont toujours été là pour moi.*

*Je remercie mes sœurs Amina, Sameh, Samira et mon frère Hamid et*

*petite fille Nourssine, pour leurs encouragements.*

*Je désire aussi remercier mes amies Chiraz, Ghada, Ahlem, Hanene, Insaf, Randa et Ranida, qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.*

*Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs du département génie civil, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.*

*À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.*

---

## *Remerciements*

---

*J'adresse en premier lieu ma reconnaissance à notre DIEU le tout puissant, de m'avoir donné la capacité, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.*

*J'adresse ma reconnaissance, ma gratitude à mon encadreur le professeur Mr. HADJANE YAZID de m'avoir fait bénéficier de ces compétences, ses qualités humaines et de sa disponibilité non seulement pour la réalisation de ce mémoire mais aussi durant tout le parcours de ma formation.*

*Toutes mes connaissances à Mme KOUIDER NADJA pour nous aider beaucoup par ces expériences et ses conseils pour faire notre travail*

*J'exprime mes sincères remerciements à mes parents qui m'ont enseigné la patience, la politesse, le sacrifice et qui ont toujours été là pour moi, Que le bon DIEU les bénisse d'avantage.*

*Un très grand merci à mes frères (Majdi, Ayoub, Mouhamed) et ma petite sœur Soundes, et ma cousine Asya, Zaineb de me donner le courage pour terminer ce travail.*

*Sans oublier tous mes très chères amies : Lamia, Houda, Rahma spécialement ma sœur et mon amie intime Nesrine qui m'a beaucoup aidé et m'a encouragé pendant la période de la réalisation de mon projet.*

*Je n'oublie pas de dire un grand merci à toutes les personnes, tous les professeurs qui ont contribué de près et de loin à l'enrichissement de mon travail et à mon épanouissement intellectuel.*

## Sommaire

Sommaire.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des symboles.....	III
Liste des tableaux .....	IV
Figure .....	page
Résumé.....	1
Introduction Général.....	2

### CHAPITRE I

#### PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1- Généralités .....	4
I-2-Définition de l'acier .....	4
I-3-Procédé d'élaboration de l'acier .....	5
I-3-1- matières premières.....	5
I-3-2- l'acier liquide aux demi-produits .....	5
I-3-3- Des demi-produits aux produits sidérurgiques finis.....	5
I-4- Première et deuxième transformations des produits en acier.....	7
I-5-Composition chimique des aciers .....	9
I-6- Caractéristiques Mécaniques de l'Acier .....	9
I-7-Avantages et Inconvénients des Structures Métalliques .....	11
I-8-Principaux produits utilisés comme éléments de structure.....	12
I-8-1-Les formes de produits.....	12
I-8-2-La classification des produits.....	12
I-9-Ouvrages à ossatures métalliques .....	15
I-10-Définition des poutres reconstituées soudées.....	16
I-11-La fabrication de Profilés Reconstitués Soudés.....	17
I-11-1-La Technique de soudage.....	17
I-11-1-1-Définition de soudage.....	17
I-11-1-2-Terminologie des différentes zones des soudures.....	17
I-11-1-3-Procèdes de soudage.....	18
I-11-1-4-Type de soudure.....	19
I-11-1-5-Défaut d'imperfection des prs.....	20
I-11-1-6-Domaine d'emploi des prs.....	20
I-11-1-7-Différents types de prs en fabrication.....	22
I-12-Généralités sur les poutres en acier avec ouvertures dans l'âme.....	25
I-13-Modes de ruine.....	29
I-13-1-Ruine par flexion de la section perforée.....	29
I-13-2-Ruine par cisaillement pur de la section perforée.....	30
I-13-3-Ruine par flexion Vierendeel de la section perforée.....	31
I-13-4-Ruine par flambement du montant d'âme sous cisaillement.....	31
I-13-5-Ruine par déversement.....	32
I-13-6-Ruine par écoulement du joint de soudure.....	32
I-13-7-Ruine par flambement du montant d'âme sous compression.....	33

### CHAPITRE II

#### CALCUL DE POUTRES EN ACIER COMPORTANT DES OUVERTURES D'ÂME SELON L'EUROCODE3

II-1-Sollicitations autour d'une ouverture.....	34
II-2-Résistance des membrures d'une ouverture .....	35
II-3-Géométrie de l'ouverture.....	38
II-4-Mode de ruine.....	39
II-5-Raidissage et renforcement de l'ouverture d'âme (selon l'Eurocode 3 partie 1-1).....	40
II-6 Classification des sections : (selon l'Eurocode 3 partie 1-1).....	43
II-6-1-Section transversale non ajourée.....	43
II-6-2-Section transversale ajourée.....	44
II-7-Résistance des poutres sans raidisseurs d'âme intermédiaires :.....	44
(selon l'Eurocode 3 partie 1-1)	
II-8-Calcul la résistance au cisaillement $v_{c,Rd}$ : (selon l'eurocode 3 partie 1-1).....	45
II-9-la résistance au cisaillement plastique $w_{pl,Rd}$ : (selon l'Eurocode 3 partie 1-1).....	46
II-10-Résistance aux forces transversales : (selon l'Eurocode 3 partie 1-1).....	47
II-11-Résistance au cisaillement : (selon l'Eurocode 3 partie 1-1).....	47
II-12-Moment de résistance.....	48
II-13-Ouvertures d'âme renforcées.....	49
II-14-Résistance des poutres avec raidisseurs d'âme transversaux intermédiaires.....	52
II-15-Résistance au cisaillement.....	53
II-15-1-Panneau d'âme comportant une ouverture centrale .....	53
II-15-2-Panneau d'âme comportant une ouverture renforcée .....	55
II-16-Moment de résistance.....	56

### **CHAPITRE III**

#### **ETUDE NUMERIQUE**

III-1 -Introduction .....	57
III-2-objectif.....	57
III-3-Présentation de logiciel abaqus.....	57
III-4-Structure d'une analyse sous abaqus.....	58
III-5-Les différents fichiers pour la simulation sous abaqus.....	58
III-6-Les systèmes d'unités .....	59
III-7- Organisation de l'interface abaqus CAE(Complete Abaqus Environment) .....	60
III-8-Réalisation d'une simulation numérique sous Abaqus CAE .....	60
III-9-Les éléments dans ABAQUS .....	61
III-10-Présentation du modèle étudié.....	61

---

III-11-Les étapes de modélisation des éléments sous ABAQUS 2017.....	62
III-11-1-Définition des Géométrie (Part).....	62
III-11-2-Définition des propriétés du modèle (Property).....	64
III-11-3-Définition l'assemblage du modèle (Assembly).....	65
III-11-4-Définition Étape (Step).....	67
III-11-5-Définition l'interaction (interaction).....	68
III-11-6- Définition Maillage (Mesh).....	69
III-11-7-Définition Condition aux limites et Charge (Load).....	71
III-11-8-Démarre l'Analyse (Job) .....	72

## **CHAPITRE IV**

### **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

IV-1-Introduction.....	73
IV-2-Présentation du modèle étudié.....	73
IV-3-Résultats.....	73
CONCLUSION GENERALE.....	81



Liste des figures

Figure	Titre	pages
Figure.1.1	Méthode de transformation de produit.....	7
Figure.1.2	Différents profilés.....	8
Figure .1.3	Différent produit plat .....	8
Figure .1.4	Diagramme Contrainte déformation.....	9
Figure.1.5	Types de profil.....	14
Figure1.6	Produits longs formés à froid exemples de sections transversales.....	14
Figure1.7	Profilés creux.....	15
Figure.1.8	Quelques ouvrages métalliques.....	16
Figure.1.9	Différents type de PRS.....	17
Figure .1.10	Terminologie employée pour les soudures.....	18
Fig.1.11.a	Soudage semi-automatique Sous flux solide.....	18
Fig.1.11.b	Moyen de soudage automatique.....	18
Figure .1.12	Soudures d'angle.....	19
Figure.1.13.a	Exemple1 d'utilisation des PRS.....	19
Figure.1.13.b	Exemple2 d'utilisation des PRS.....	20
Figure1.14	Exemple3d'utilisation des PRS dans le levage –manutention.....	21
Figure1.15	Exemples d'utilisation des PRS dans les Bâtiments en CM .....	21
Figure.1.16	Exemple5d'utilisation des PRS dans les Ponts.....	22
Figure.1.17	Exemples d'utilisations de PRS dans le Transport.....	22
Figure.1.18	PRS a âme pleine .....	23
Figure.1.19.a	Poutre alvéolaire cellulaire.....	23
Figure.1.19.b	Poutre alvéolaire hexagonale.....	24
Figure.1.20	Différents types de PRS en fabrication.....	24
Figure.1.21	Avantage de la présence des ouvertures dans l'âme.....	25
Figure.1.22	Poutres reconstituées munies d'ouvertures isolées de formes variées.....	25
Figure.1.23	Poutres ajourées.....	26
Figure.1.24	Poutre Angelina.....	26
Figure1.25	Oxycoupage du profilé de base, séparation et soudage des deux parties .....	27
Figure.1.26	Géométrie des poutres ajourées.....	28
Figure.1.27	Tés et montants d'âme.....	29
Figure.1.29	Ruine par cisaillement de la section perforée .....	30

Figure.1.30	Mécanisme de ruine par flexion Vierendeel.....	31
Figure.1.31	Flambement du montant.....	31
Figure.1.32	Déversement d'une poutre cellulaire.....	32
Figure.1.33	Ruine par écoulement du joint de soudure .....	33
Figure.1.34	Flambement du montant d'âme sous compression .....	33
Figure.2.1	Efforts globaux et leurs efforts locaux équivalents dans une ouverture.....	34
Figure.2.2	Séparation de contraintes globales en efforts locaux (Poutre Vierendeel).....	37
Figure.2.3	Géométrie de l'ouvertur.....	38
Figure.2.4	Géométrie de section transversale ajourée.....	39
Figure.2.5	Tés et montants d'âme.....	39
Figure.2.6	Modes de ruine supplémentaires dans les poutres comportant .....	40
	des ouvertures d'âme	
Figure.2.7	Modes de ruine supplémentaires dans les poutres Comportant.....	42
	des ouvertures d'âme multiples	
Figure.2.8	Raidissage ou renforcement des ouvertures d'âme.....	42
Figure.2.9	Portion de l'âme formant l'âme d'un té non raidi.....	44
Figure.2.10	Position et dimensions d'une ouverture.....	45
Figure.2.11	Zone d'influence d'une ouverture .....	47
Figure.2.12	Critères pour l'ancrage du renfort.....	52
Figure.2.13	Zone dans laquelle une ouverture est autorisée.....	53
Figure.2.14	Diamètre équivalent d'une ouverture rectangulaire.....	53
Figure.2.15	Modèle de calcul du renfort.....	55
Figure.2.16	Dimensions du renfort.....	55
Figure.3.1	Schéma de présentation du modèle d'étude.....	61
Figure.3.2	Vue longitudinale d'une poutre à ouverture d'âme.....	62
Figure.3.3	Modélisation de profilé .....	63
Figure.3.4	Modélisation de louverture .....	63
Figure.3.5.a	Raidisseur longitudinal.....	64
Figure.3.5.b	Raidisseur transversal.....	64
Figure.3.6	Définition des caractéristiques des éléments.....	65
Figure.3.7	Création d'assemblage .....	66
Figure.3.8	Assemblages des raidisseurs.....	67
Figure.3.9	Step pour les deux éléments.....	67

---

Figure.3.10	La création de l'interaction.....	68
Figure.3.11	La création de maillage pour tous les modes.....	70
Figure.3.12	La création de Condition aux limites.....	71
Figure.3.13	Démarrage de l'Analyse.....	72
Figure.4.1	Graphe déformation selon la longueur d'ouverture de modèle..... sans renforts	73
Figure.4.2	Graphe contrainte selon la longueur d'ouverture de modèle ..... sans renforts	74
Figure.4.3	Graphe déplacement selon la longueur d'ouverture de modèles ..... sans renforts	75
Figure.4.4	Graphe déformation-contrainte de modèles avec et sans renforts.....	76
Figure.4.5	Graphe charge-déplacement de modèles avec et sans renforts .....	77
Figure.4.6	Graphe déformation-contrainte de modèles avec présence..... de renforts horizontaux et verticaux	78
Figure.4.7	Graphe charge-déplacement de modèles avec et sans renforts .....	79
Figure.4.8	Graphe déformation-contrainte de modèles avec et sans renforts.....	80
Figure.4.9	Graphe charge-déplacement de modèles avec et sans renforts .....	81

Liste des tableaux

<b>Table</b>	<b>Titre</b>	<b>pages</b>
Tableau.2.1	Facteur de corrélation $\beta_w$ pour les soudures d'angle.....	51
Tableau.3.1	Propriétés géométriques et mécaniques des poutres en acier.....	62

Liste des symboles

$h_0$	Hauteur de l'ouverture
$a_0$	Largeur de l'ouverture.
$h$	Hauteur de profile.
$b$	Largeur de semelle.
$d_w$	Hauteur de l'âme.
$h_w$	La hauteur d'âme entre les axes des semelles.
$t_w$	épaisseur de l'âme.
$t_f$	épaisseur de semelle.
$d_1-d_2$	Hauteur de té sans soudure.
$b_{w1}-b_{w2}$	Hauteur de té soudée.
$c$	Largeur de semelle sans soudure.
$A_{tc}$	L'aire de semelle comprimée.
$A_w$	L'aire de lame non ajourée.
$b_{wc}$	Longueur saillante dame de té $b_{w1}$ ou $b_{w2}$ .
$l_0$	Longueur de l'ouverture.
$f_{yf}$	Module d'élasticité.
$E$	Module de Young.
$e_0$	L'excentricité de l'ouverture.
$w$	Largeur libre du montant.
$V_{sd}$	L'effort tranchant.
$V_{c,Rd}$	La résistance au cisaillement.
$V_{p1,Rd}$	La résistance plastique au cisaillement.
$A_v$	L'aire de cisaillement.
$W_{p,Rd}$	La résistance au cisaillement plastique
$V_{ba,Rd}$	La résistance au voilement par cisaillement.
$f_{bv}$	La contrainte limite de résistance au voilement de cisaillement.
$\Phi$	L'angle d'inclinaison de l'âme par rapport aux semelles.
$a_z$	Longueur totale de la zone d'influence.
$a_p$	Longueur supplémentaire de la zone d'influence.
$V_{o,Rd}$	La résistance au cisaillement d'une section transversale ajourée
$V_{o,p,Rd}$	La résistance au voilement plastique.
$V_{pl,Rd}$	La résistance au voilement plastique de la section transversale non ajourée.

---

$V_{o,ba,Rd}$	La résistance au voilement par cisaillement.
$M_{o,Rd}$	Le moment de résistance.
$M_{pl,Rd}$	Le moment de résistance plastique de la section transversale non ajourée .
$W_{pl}$	Le moment plastique.
$A_r$	L'aire de renforcement.
$A_f$	L'aire de semelle.
$V_{o,pl,Rd}$	La résistance plastique au cisaillement.
$M_{1,Rd}$	La résistance pour un cisaillement nul
$F_{r,sd}$	L'effort axial du renfort dans l'âme de la section non ajourée.
$F_{r,Rd}$	La résistance du raidisseur.
$l_y$	Résistance au cisaillement des soudures d'angle.
$a$	La gorge de la soudure d'angle.
$F_{vw,d}$	La résistance de calcul au cisaillement d'une soudure d'angle.
$F_u$	Résistance nominale ultime à la traction de la pièce assemblée la plus faible.
$\beta_w$	Facteur de corrélation.
$D$	La largeur du champ de traction.
$V_{o,bb,Rd}$	La résistance au voilement par cisaillement.
$g$	La largeur du champ diagonal de traction donnée en 5.6.4.1(3).
$\sigma_{bb}$	La résistance du champ diagonal de traction donnée en 5.6.4.1(1).
$\tau_{bb}$	La résistance au voilement par cisaillement initiale donnée en 5.6.4.1(2).
$M_{pl,r,Rk}$	Le moment de résistance plastique du renforcement.
$\sigma_{bb}$	La résistance du champ diagonal de traction de la section transversale non ajourée Voir Ec 5.6.4.1(1).
$\Phi$	L'inclinaison du champ diagonal de traction pour la section transversale non ajourée Voir Ec 5.6.4.2.
$M_{pl,r,Rk}$	Le moment de résistance plastique du renfort.
$b_r$	Largeur totale du renfort
$d_r$	La hauteur du renfort
$E_c$	Eurocode 3
<b>DAR 03</b>	Design Guide 2, AISC, 3ème édition, 65 pages, 2003
<b>RFC 05</b>	RFCS, Research Fund for Coal and Steel

**RESUME:**

Les poutres à ouvertures d'âmes sont aujourd'hui largement utilisées dans le domaine de la construction métallique et mixte. Cependant, la présence de larges ouvertures dans l'âme d'une poutre génère des comportements mécaniques spécifiques en comparaison avec les poutres à âmes pleines. Une des solutions couramment utilisée par l'industrie consiste à renforcer les ouvertures par le biais de différents raidisseurs verticaux ou horizontaux. Ces raidisseurs peuvent avoir plusieurs objectifs : prévenir le flambement du montant intermédiaire, renforcer la section des membrures d'ouverture vis-à-vis de la flexion Vierendeel, renforcer le panneau d'âme au voilement par cisaillement etc. Par conséquent, diverses raisons peuvent conduire à installer des raidisseurs autour d'une ouverture. Dans le cadre de la présente étude, différentes configurations géométriques de raidisseurs sont utilisées autour d'une ouverture isolée en vue d'évaluer leur influence sur le comportement global de l'ouverture. La version ENV des Eurocodes, fournit une annexe qui donne quelques règles relatives aux raidisseurs ainsi que des règles de dimensionnement. Cependant ces règles sont assez restrictives et conservatrices. L'objectif de ce présent travail est d'étudier le comportement mécanique d'un tronçon de poutre munie d'une ouverture rectangulaire avec différentes formes de raidisseurs par le biais de modélisations aux éléments finis.

**MOTS-CLÉS:** poutres cellulaires, études numériques, flexion Vierendeel, voilement local, modèle analytique, raidisseur.

## **INTRODUCTION GENERALE :**

Les poutres à ouvertures d'âmes sont aujourd'hui largement utilisées dans le domaine de la construction métallique et mixte. Ces poutres, présentant des ouvertures isolées ou réparties, offrent, outre une grande inertie, la possibilité de faire passer les conduits de service et gaines de ventilation dans leur hauteur, réduisant ainsi l'épaisseur totale du plancher.

De plus, certaines formes d'ouvertures multiples, rectangulaires, circulaires ou sinusoïdales, apportent aux structures métalliques un intérêt architectural supplémentaire. Cependant, la présence de larges ouvertures dans l'âme génère des comportements mécaniques spécifiques en comparaison avec les poutres à âmes pleines.

À ce jour, les études expérimentales sur les poutres ajourées ont permis d'identifier six principaux modes de ruine. Ces modes sont étroitement associés à la géométrie de la poutre globale, à l'élanement de l'âme, aux dimensions de l'ouverture, au type de chargement, aux conditions aux limites et à la position des ouvertures. Il est possible de distinguer les modes de ruine locaux au niveau des ouvertures des modes de ruines globaux. Les modes de ruine locaux mettent en jeu les sections locales autour de l'ouverture. Trois modes locaux propres aux poutres munies d'ouvertures ont pu être identifiés : la flexion Vierendeel, le flambement du montant intermédiaire et la rupture de la soudure entre ouvertures. La flexion Vierendeel correspond à la formation d'un mécanisme de rotules plastiques aux 4 coins de l'ouverture induit par le transfert du cisaillement autour de l'ouverture. Le flambement du montant intermédiaire est généré par le cisaillement horizontal ou par la compression directe liée à un chargement ponctuel. La rupture de la soudure du montant intermédiaire (poutre alvéolaire formée à partir d'un profilé laminé à chaud) est associée au cisaillement horizontal du montant. Les modes de ruine globaux des poutres sont la flexion globale, dans le cas où l'ouverture critique se situe en zone de flexion pure.

Le présent travail se concentre sur l'étude de la flexion locale des membrures d'une ouverture avec ou sans raidisseurs horizontaux et verticaux.

En effet, il existe peu de recherches sur le comportement des ouvertures munies de raidisseurs.

Aujourd'hui les prescriptions en terme de dimensionnement se basent sur les règles décrites dans l'annexe N de la précédente version ENV des Eurocodes [ENV1993-1-1, Annexe N + RFC 05]. Ces règles donnent des prescriptions de longueur minimale de raidisseurs et fournissent quelques règles de calcul. Cependant, ces règles peuvent s'avérer peu satisfaisantes dès lors que l'on vient à utiliser des profilés différents de ceux traditionnellement utilisés en charpente métallique.



Le travail présenté ci-après étudie donc différentes configurations d'ouvertures rectangulaires et différentes configurations de raidisseurs horizontaux afin d'évaluer la pertinence des règles existante en vue de fournir des règles permettant de compléter les prescriptions actuelles. La comparaison notamment avec le calcul d'une résistance plastique permet d'estimer le degré de participation d'un raidisseur en fonction de sa longueur et du fait qu'il soit simple ou double sur une même membrure.

**Le premier chapitre :**

Consiste en une recherche bibliographique pour l'acier et les profilés comportant une ouverture d'âme.

**Le deuxième chapitre :**

Concerne l'aspect réglementaire concernant le dimensionnement et la vérification de poutre munie d'une ouverture, selon partie 1-1 de l'Eurocode 3.

**Le troisième chapitre :**

Cette partie vise l'analyse numérique du modèle étudié et présentée sur le logiciel ABAQUS, Différents résultats numériques ont été obtenus pour être confrontés avec ceux obtenus dans le programme expérimental à prévoir.

**Le quatrième chapitre :**

Une analyse des résultats obtenus est présentée.

**Enfin** une conclusion générale résume le travail élaboré.

## **CHAPITRE I**

### **PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE**

#### **I-1 Généralités :**

Lors de la réalisation d'un projet, le maître d'œuvre a pour mission, entre autres, d'établir un cahier des charges définissant les conditions d'emploi de la construction. Il lui revient d'associer les exigences techniques du maître de l'ouvrage (fonction, situation géographique ...) avec une partie architecturale qui intègre les paramètres fonctionnels liés aux contraintes réglementaire, administratives, techniques... le matériau de base choisi pour la structure principale doit posséder les caractéristiques nécessaires et suffisantes pour répondre à sa mission, conformément aux critères de sécurité et de pérennité. En particulier, le cahier des charges définit, les diverses sollicitations auxquelles les matériaux de structure seront soumis : charges permanentes, surcharges d'exploitation, charges climatiques. Ce cahier des charges est ensuite remis au bureau d'études qui à l'issue des études de conception, définit les nuances et qualités d'acier appropriées, les sections constituant l'ossature de l'ouvrage et les modalités de mise en œuvre. Dans ce qui suit sont abordées les notions générales du comportement de l'acier, l'évolution récente des nouvelles nuances d'acier ainsi que celle des nouveaux produits laminés. L'industrie sidérurgique s'est développée à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle en proposant des produits de construction (laminés ou moulés) adaptés à la construction d'ossatures métalliques Charpente Métallique. Ces éléments de construction "rigides" permettent de dégager des grands espaces utiles au sol. La portée des éléments d'ossature peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. En outre le poids de ces éléments d'ossature, comparé à ceux d'une même structure en béton armé (ou maçonnerie) est réduit et allège considérablement les charges transmises au sol. Associé à des éléments de peau "légers" (bardage, façades rideau ...), ces structures sont adaptées à la réalisation de constructions telles que salles de sports, piscines, entrepôts, usines... Leur réalisation est rapide (assemblage direct d'éléments préfabriqués) et donc d'un prix très compétitif.

#### **I-2 Définition de l'acier :**

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone). C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés de l'acier. Il existe d'autres alliages à base de fer qui ne sont pas des aciers, comme les fontes et les ferroalliages.[1]

### **I-3 Procédé d'élaboration de l'acier :**

#### **I-3-1 matières premières:**

Cette première étape sert à combiner, selon des dosages précis, les composants chimiques l'acier : Fer et Carbone (composant de base de l'acier) et éventuels additifs, qui vont nuancer les qualités de l'acier en fonction de son utilisation future.

Deux procédés sont possibles :

Filière Fonte et aciérie à l'oxygène (Matière première Minieriez +chaux+coke =Produit fini Fonte-Acier) ; Filière « Ferraille » et Four électrique (Matière première Acier= Produit fini Acier) [2]

#### **1-3-2 l'acier liquide aux demi-produits :**

A la fin de l'opération de l'élaboration, l'acier est recueilli à l'état liquide est transporté jusqu'au lieu de coulée. Cette étape assure la solidification de l'acier et l'ébauche des formes. Pour cette phase également, deux procédés existent : la coulée en lingots (en voie de régression), la coulée continue (prédominant). [2]

- **Coulée continue** : Obtention direct de demi –produit→ébauche solide, carrée, rectangulaire où ébauche préformée en tronçons de longueur désirée qui sont réchauffées avant de passer à l'étape suivante de laminage.
- **Coulée en lingots**: L'acier est coulé et solidifié dans des moules en fonte : les lingotières. Après solidification, les lingots sont démoulés. Après réchauffage à 1200°C ils sont écrasés dans un gros laminoir pour être transformés en :
  - Barres, ébauches de produit plats (slabbing )
  - Blooms, Futures produits longs (blooming).

#### **1-3-3 Des demi-produits aux produits sidérurgiques finis :**

Cette transformation consiste principalement à laminier les demi-produits, c'est-à-dire à étirer et écraser le métal afin de lui donner les dimensions et formes souhaitées. Les plaques (épaisses) et Tôles (minces) en feuilles ou bobines forment la famille des « Produits plats ».

Les rails, Poutrelles, Fils, Barres de diverses sections composent la famille des « Produits longs ». Le laminage s'effectue à chaud (de 800°C à 1200°C). Certains produits plats subissent ensuite un amincissement complémentaire effectué par laminage à froid. [2]

#### **❖ Le laminage à chaud :**

Il s'agit d'entraîner et d'écraser le métal chaud (lingot où ébauche de coulée continue) entre deux cylindres tournant en sens inverse. Les cylindres sont lisses pour les produits plats, à

cannelures pour les « Profilés » produits longs. En répétant plusieurs fois l'opération, on obtient un produit de plus en plus mince et de plus en plus long, de la forme souhaitée. Après le laminage à chaud, les produits peuvent faire l'objet d'un parachèvement : Traitement thermique (afin d'ajuster leurs caractéristiques mécaniques), Planage, Dressage, Découpage, Conditionnement, etc.

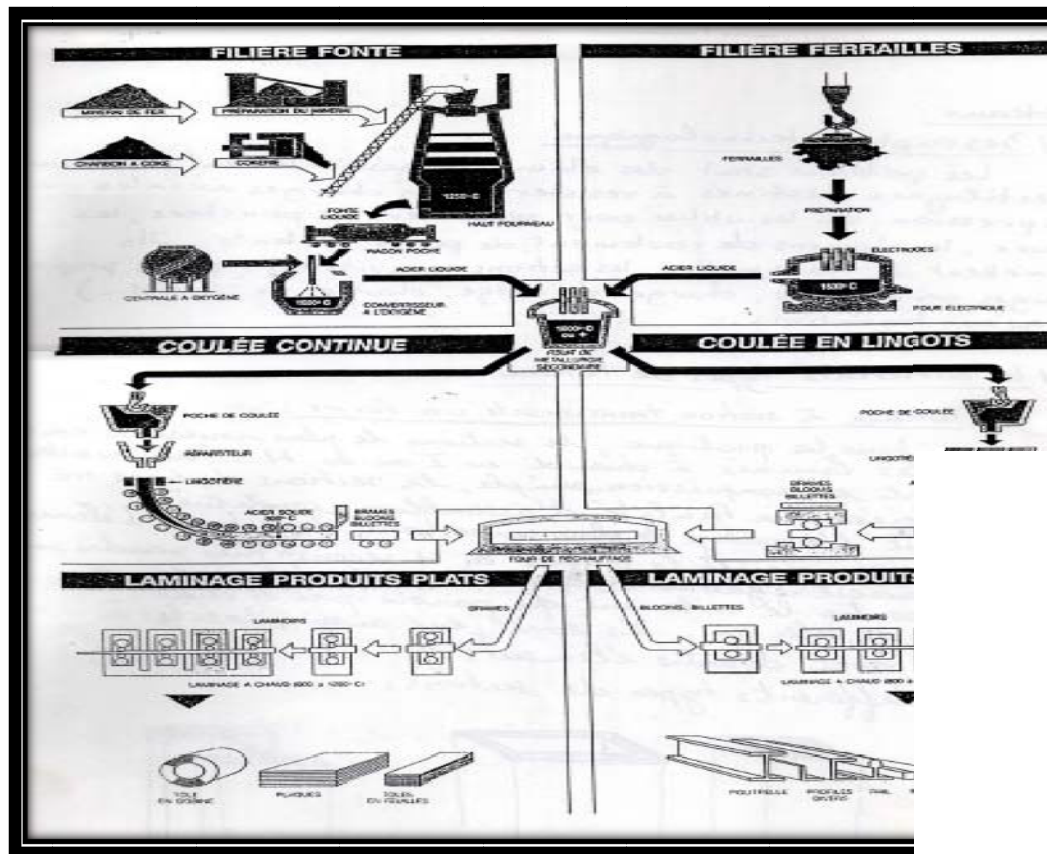
#### ❖ **Le laminage à froid :**

Une part importante des produits plats laminés à chaud est ensuite laminée à froid pour en réduire encore l'épaisseur. Enfin l'ultime transformation, une opération de recuit donne au métal les propriétés d'emploi désirées (notamment l'emboutissabilité). Tandis qu'un éventuel revêtement est appliqué pour protéger le métal contre l'oxydation : Zinc (tôle galvanisée) ou étain (Fer blanc). Ces tôles revêtues peuvent en outre être laquées ou plastifiées. (Voir Figure1.1)

#### ➤ **Les deux grandes familles de produits finis :**

On retrouve dans la famille des produits plats :

- Les plaques d'une épaisseur supérieure à 10mm pouvant aller jusqu'à 150mm, leur largeur peut atteindre 5m, leur épaisseur courante se situe entre 15mm et 25mm. (Utilisées dans les ponts, passerelles, navires...)
- Les tôles à chaud, en feuilles ou en bobines d'une épaisseur comprise entre 2 et 10mm (chaudronnerie) ;
- Les produits laminés à froid d'une épaisseur inférieure à 3mm, éventuellement revêtus, disponibles sous forme de feuilles ou de bobines, leurs utilisations sont très nombreuses, particulièrement pour la fabrication de biens de consommation tels que, l'automobile, le bâtiment, l'électroménager, les emballages métalliques... La famille des produits longs regroupe une grande diversité de produits : rails, poutrelles, palplanches, fils machine, ronds à béton, laminés marchands. Les produits longs sont utilisés dans tous les Secteurs industriels, mais particulièrement dans les constructions métalliques et dans l'industrie mécanique.



**Figure.1.1** Méthode de transformation de produit

#### I-4 Première et deuxième transformations des produits en acier :

Pour répondre à tous les besoins et élargir l'éventail des possibilités de cons de très nombreux produits en aciers sont proposées par les sidérurgistes et transformateurs :

##### ➤ Les profilés :

- Poutrelles classiques en I, U et H.
- Profilés minces formes à froid.
- Profilés creux.
- Profilés reconstitués soudés.
- Les profilés angulaires (cornières et Tés.
- Les barres et fils ronds, carrés, plats.(voir Figure.1.2)

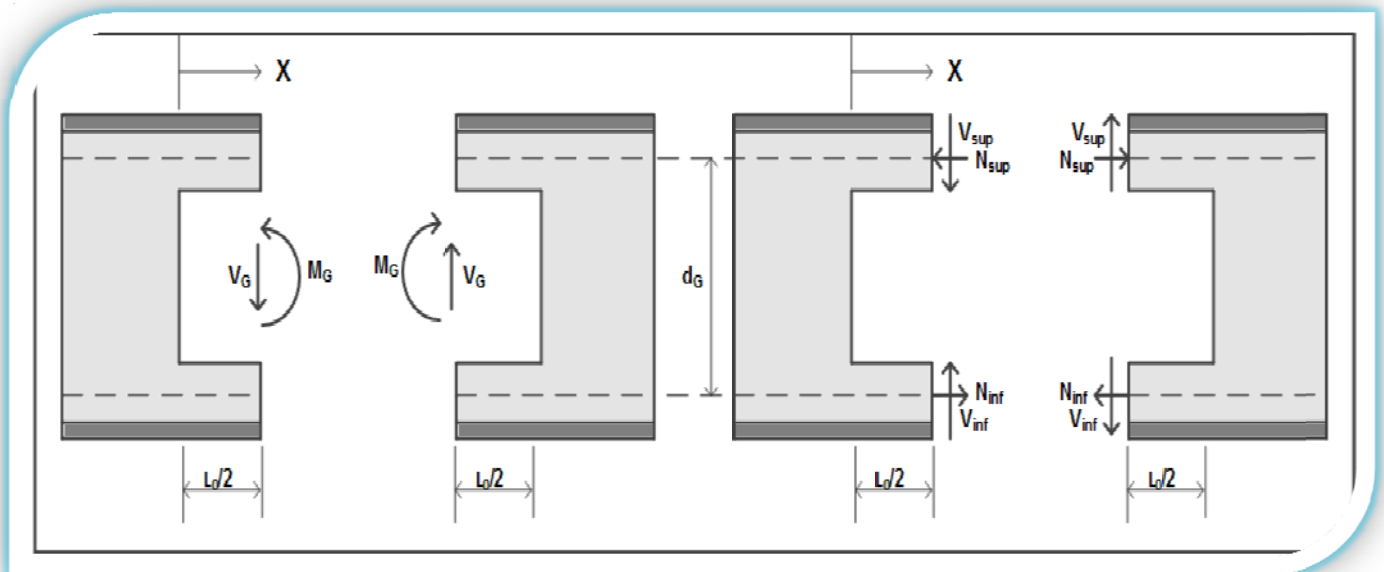
##### ➤ Les produits plats :

- Tôles minces épaisseur  $< 3\text{mm}$
- Tôles moyennes épaisseur  $3\text{mm} \leq e < 5\text{mm}$
- Tôles fortes épaisseur  $\geq 5\text{mm}$
- Produits livrés en feuille (plaques, Tôles à chaud)
- Produits livrés en bobines

## CHAPITRE II

**CALCUL DES STRUCTURES EN ACIER SELON L'EUROCODE 3 DE POUTRES  
COMPORTANT DES OUVERTURES D'AME****II-1 Sollicitations autour d'une ouverture :**

La méthode généralement utilisée pour définir le comportement mécanique d'une poutre munie d'une ou plusieurs ouvertures s'appuie sur la similitude avec une poutre échelle [DAR 03]. Ainsi, les efforts internes globaux de la poutre ( $V_G$  et  $M_G$ ) se répartissent dans les membrures supérieure et inférieure de l'ouverture. De plus, afin de résoudre le problème hyperstatique d'une poutre échelle (poutre Vierendeel), l'hypothèse communément admise consiste à considérer une rotule à mi-travée de chaque membrure d'ouverture permettant de déduire de manière aisée la distribution des efforts internes dans chaque membrure [MAN 06]. La Figure 2.1 illustre la distribution des efforts internes globaux dans une section d'ouverture (a) et leurs efforts internes locaux équivalents (b).



a- Efforts globaux

b- Efforts locaux

**Fig. 2.1** Efforts globaux et leurs efforts locaux équivalents dans une ouverture

- ❖ Dans le cas d'une ouverture centrée le cisaillement dans les membrures  $V_{inf}$  et  $V_{sup}$  peut se définir par l'équation (1).

- en considérant que l'effort tranchant se répartit proportionnellement aux aires des sections de membrures. La flexion Vierendeel locale ( $M_{Vier}$ ) qui équilibre les efforts induits autour de l'ouverture peut s'exprimer par l'équation (2) [MAN 06].

$$\square V_{sup} = V_{inf} = \frac{V_G}{2} \quad (1)$$

$$\square M_{vier} = \frac{V_{sup} * L_0}{2} = \frac{V_{inf} * L_0}{2} \quad (2)$$

- Les efforts locaux axiaux  $N_{sup}$  et  $N_{inf}$  induit par la flexion globale ( $M_G$ ) de la poutre peuvent être calculés par l'expression (3) :

$$\square N_{sup} = \frac{M_G}{d_G} = N_{inf} \quad (3)$$

- Où :

- $M_G$  est le moment global au droit de l'ouverture.

- $V_G$  est l'effort tranchant global au droit de l'ouverture.

- $d_G$  est la distance entre les centres de gravité des tés à mi-longueur de l'ouverture d'âme.

- $N_{sup}$  est l'effort normal dans la membrure supérieure au droit de l'ouverture.

- $v_{inf}$  est l'effort tranchant dans la membrure inférieure au droit de l'ouverture.

- $M_{Vier}$  est le moment de flexion locale, appelé moment de flexion Vierendeel.

- **Calcul l'effort tranchant dans la membrure supérieure et inférieure au droit de l'ouverture :**

$$V_G = V_{sd} = 715.2 \text{ KN}$$

$$V_{sup} = V_{inf} = 357.6 \text{ KN}$$

- **Calcul le moment de flexion locale :**

$$\text{On à : } l_0 = 500 \text{ mm}$$

$$M_{vier} = \frac{357.6 * 0.5}{2} \longrightarrow M_{vier} = 89.4 \text{ KN.m}$$

- **Calcul l'effort normal dans la membrure supérieure et inférieure au droit de l'ouverture :**

$$-d_G = 164.42 * 2 = 328.84 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$-M_G = V_{sd} .x$$

$$\text{Si } x = 2 \text{ m} \longrightarrow M_G = 1425 \text{ KN.m}$$

$$-N_{sup} = N_{inf} = 4.333 * 10^3 \text{ KN}$$

**II-2 Résistance des membrures d'une ouverture :**

Etant donné que les membrures d'une ouverture sont soumises à de la flexion composée, il est nécessaire dans le calcul de la résistance de section de considérer une interaction entre moment et effort axial. Les règles actuelles proposent d'utiliser, comme pour les sections en té seules, une interaction quadratique.

Les sections en té qui composent chaque membrure, hors section située au milieu de l'ouverture, sont ainsi soumises à un moment fléchissant local dû à l'effort tranchant et à un effort normal dû au moment global. Le moment fléchissant local n'est nul qu'au milieu de l'ouverture, section (b-b).

Ainsi, les contraintes axiales dans chaque té de membrure (Figure 2.2) peuvent être calculées par les expressions suivantes :

- $\sigma_{\text{vier,âme}} = \frac{M_{\text{vier}} \cdot h_2}{I_{\text{té}}}$
- $\sigma_{\text{vier.sem}} = \frac{M_{\text{vier}} \cdot h_1}{I_{\text{té}}}$
- $\sigma_G = \frac{N_{\text{sup}}}{A_{\text{té}}}$
- Section a-a  $\sigma_{\text{âme}} = \sigma_G + \sigma_{\text{vier,âme}}$
- $\sigma_{\text{sem}} = \sigma_G + \sigma_{\text{vier,sem}}$
- Section b-b  $\sigma_{\text{âme}} = \sigma_G$
- $\sigma_{\text{sem}} = \sigma_G$
- Où :
  - $\sigma_G$  est la contrainte normale à la section en té.
  - $\sigma_{\text{Vier.âme}}$  est la contrainte de flexion Vierendeel maximale sur l'âme.
  - $\sigma_{\text{Vier.sem}}$  est la contrainte de flexion Vierendeel maximale sur la semelle.
  - $\sigma_{\text{âme}}$  est la contrainte maximale totale sur l'âme.
  - $\sigma_{\text{sem}}$  est la contrainte maximale totale sur la semelle
- Calcul la contrainte de flexion Vierendeel maximale sur l'âme :
  - $h_2 = 200 \text{ mm}$
  - $I_{\text{té}} = 80.84 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$
  - $\sigma_{\text{vier,âme}} = \frac{89.4 \cdot 10^6 \cdot 0.2}{80.84 \cdot 10^6} = 221.17 \cdot 10^{-3} \text{ Mpa}$
- Calcul la contrainte de flexion Vierendeel maximale sur la semelle :



$$h_1 = 10 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{vier,sem}} = \frac{89.4 \cdot 10^6 \cdot 0.01}{80.84 \cdot 10^6} = 110.5 \cdot 10^{-3} \text{ Mpa}$$

- Calcul la contrainte normale à la section en té :

$$N_{\text{sup}} = 4.333 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$A_{\text{té}} = 2600 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_G = \frac{4.333 \cdot 10^6}{2600} = 1666.53 \text{ Mpa}$$

- Calcul la Section a-a  $\sigma_{\hat{\text{ame}}}$  :

$$\text{Section a-a } \sigma_{\hat{\text{ame}}} = \sigma_G + \sigma_{\text{vier,âme}} = 1666.53 + 221.17 \cdot 10^{-3} = 16.67 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$$

- Calcul la contrainte maximale totale sur la semelle :

$$\sigma_{\text{sem}} = 16.66 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$$

- Calcul Section Section b-b  $\sigma_{\hat{\text{ame}}}$  :

$$\text{Section b-b } \sigma_{\hat{\text{ame}}} = \sigma_G = 1666.53 \text{ Mpa}$$

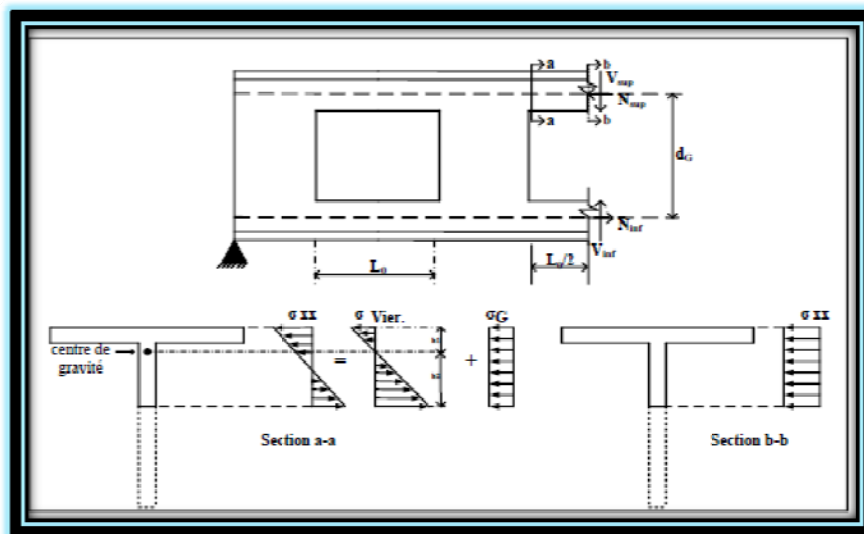
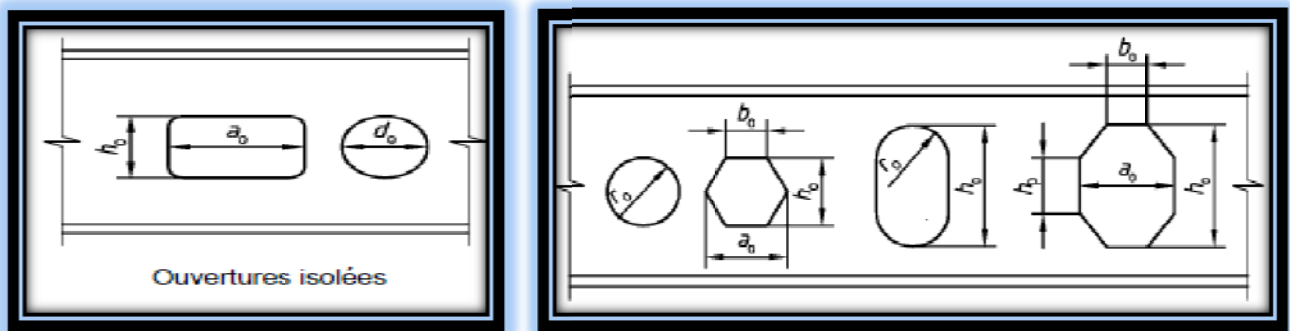


Fig. 2.2 Séparation de contraintes globales en efforts locaux (Poutre Vierendeel).

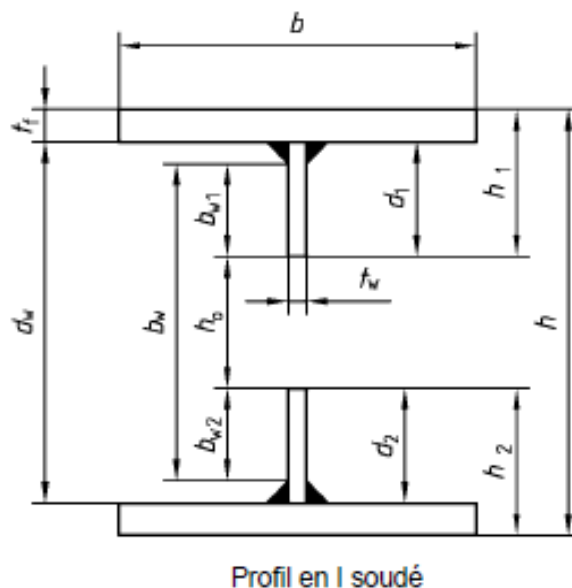
**II-3 Géométrie de l'ouverture :**

Cette annexe comprend les formes d'ouvertures suivantes, comme illustré à la Figure 2.3 :

- ouverture rectangulaire définie par sa hauteur  $h_0$  et sa largeur  $a$
- ouverture circulaire définie par son diamètre  $d_0$  ou son rayon  $r_0$
- ouverture hexagonale définie par sa hauteur  $h_0$ , sa largeur  $a_0$  et sa hauteur minimum  $b_0$
- ouverture circulaire étendue définie par sa hauteur  $h_0$  et son rayon d'extrémité  $r_0$
- ouverture octogonale définie par sa hauteur  $h_0$ , sa largeur  $a_0$  et sa largeur minimum  $b_0$  et la hauteur de la plaque intercalaire  $h_p$ .
- La géométrie d'une section transversale ajourée est indiquée à la Figure 2.2.
- Les détails des tés et des montants d'âme sont indiqués à la Figure 2.3.
  - L'ouverture rectangulaire :
    - $a_0 = 500$  mm
    - $h_0 = 200$  mm



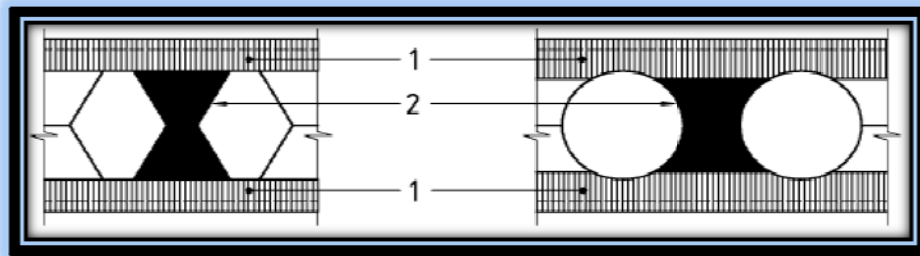
**Fig. 2.3** Géométrie de l'ouverture



**Profil en I soudé**

- $b=160$ mm	- $h_1=110$ mm
- $t_f=10$ mm	- $h_2=110$ mm
- $d_w=400$ mm	- $d_1=100$ mm
- $b_w=383.03$ mm	- $d_2=100$ mm
- $b_{w1}=91.51$ mm	- $t_w=5$ mm
- $b_{w2}=91.51$ mm	- $h=420$ mm
- $h_0=200$ mm	

**Fig.2.4** Géométrie de section transversale ajourée



Légende

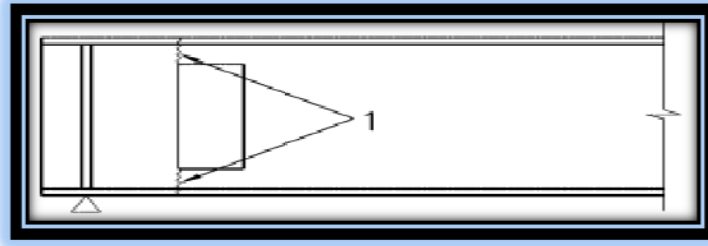
- 1 Tés
- 2 Montant d'âme

**Fig. 2.5** Tés et montants d'âme

#### II-4 Mode de ruine :

Pour toutes les poutres comportant des ouvertures dans les âmes, il convient de vérifier les modes de ruine Supplémentaires suivants (voir Figure 2.6) :

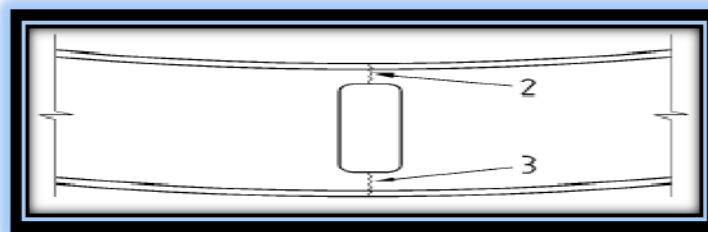
- ruine par cisaillement de la section transversale ajourée (voir Figure.a)
- ruine par flexion de la section transversale ajourée (voir Figure.b)
- mécanisme Vierendeel autour des ouvertures (voir Figure.c)



Légende

- 1 Plastification par cisaillement

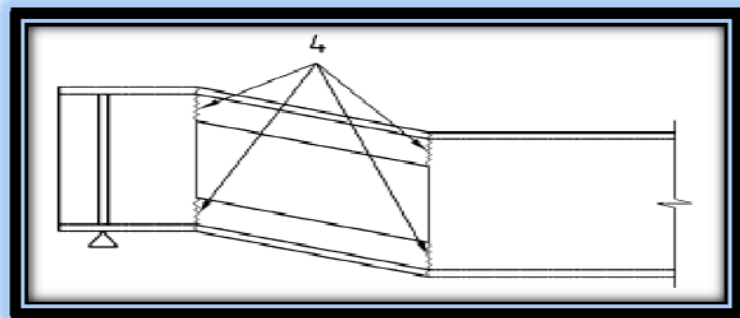
a) Ruine par cisaillement de la section transversale ajourée



Légende

- 2 Plastification en compression
- 3 Plastification en traction

b) Ruine par flexion de la section transversale ajourée



Légende

- 4 Rotules plastiques

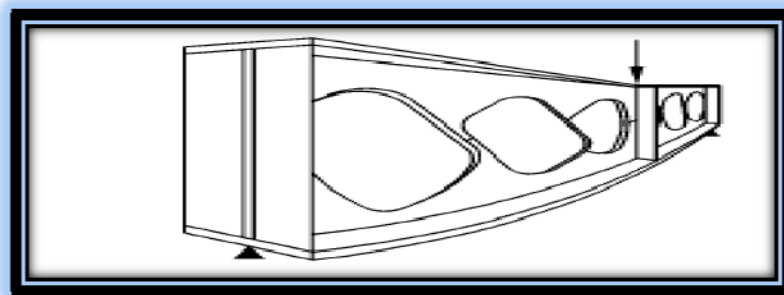
c) Mécanisme Vierendeel autour des ouvertures

**Fig .2.6** Modes de ruine supplémentaires dans les poutres comportant des ouvertures  
d'âme

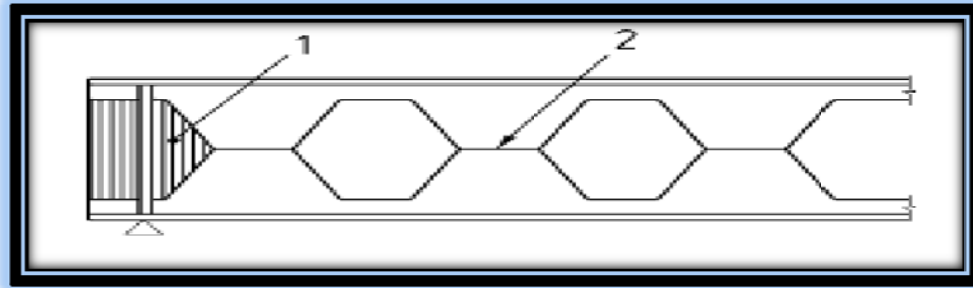
- Pour les poutres comportant des ouvertures d'âme multiples (voir Figure 2.7), il convient de vérifier également les modes de ruine supplémentaires suivants résultant du cisaillement longitudinal dans la poutre :
  - ruine par plastification ou flambement provoqués par les moments dans les montants d'âme ;
  - ruine par cisaillement du montant d'âme ou de la soudure du montant d'âme.

#### II-5 Raidissage et renforcement de l'ouverture d'âme : (selon l'Eurocode 3 partie 1-1)

- Les bords des ouvertures d'âme peuvent être raidis afin d'éviter le voilement local de l'âme, (voir Figure 2.8). Il convient que les raidisseurs respectent les limitations des élancements données pour les éléments de Classe 1 ou de Classe 2.
- Les raidisseurs longitudinaux peuvent être sur une face ou sur deux faces.
- Les bords des ouvertures d'âme peuvent être renforcés afin d'augmenter la résistance de la poutre. Il convient que le renfort longitudinal, voir Figure 2.8 a), soit totalement ancré au-delà des extrémités des ouvertures. Un renfort longitudinal comportant un ancrage d'extrémité total peut être pris en compte dans le calcul de la résistance de la section transversale ajourée au niveau d'une ouverture.
- Les raidisseurs longitudinaux peuvent également être pris en compte dans le calcul de la résistance de la section transversale au niveau de l'ouverture, à condition qu'ils soient totalement ancrés au-delà des extrémités de l'ouverture.



a) Flambement du montant d'âme provoqué par le cisaillement longitudinal

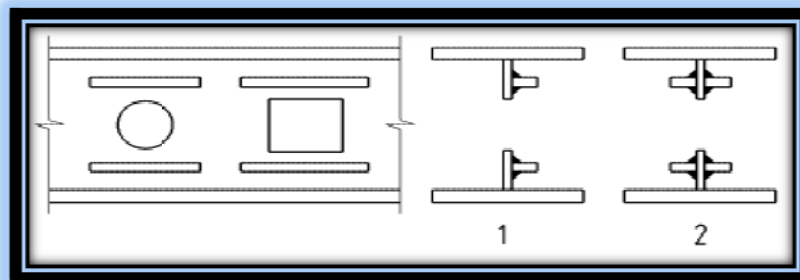


Légende

- 1 : Plaque de remplissage
- 2 : Possibilité de ruine par cisaillement

b) Ruine par cisaillement du montant d'âme ou de la soudure du montant d'âme

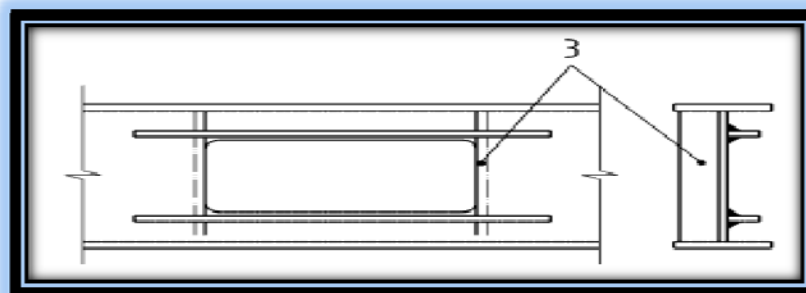
**Fig. 2.7** : Modes de ruine supplémentaires dans les poutres comportant des ouvertures d'âme multiples



Légende

- 1 : Unilatéral
- 2 : Bilatéral

a) Renforts ou raidisseurs longitudinaux



Légende

- 3 : Renfort transversal

b) Renfort longitudinal combiné avec un renfort transversal

**Fig. 2.8** : Raidissage ou renforcement des ouvertures d'âme

- Un renfort longitudinal peut être soit sur une face soit sur deux faces. Si un renfort transversal est également utilisé, il convient que le renfort longitudinal et le renfort transversal soient chacun sur une seule face, comme indiqué à (la Figure 2.8. b). Si l'on utilise un renfort longitudinal sur deux faces, il convient de le prolonger jusqu'à ce qu'il rejoigne le renfort transversal.
- Pour prévenir l'éventualité de flambement de la semelle comprimée dans le plan de l'âme, il convient de mettre de chaque côté de l'ouverture un renfort transversal d'une aire au moins égale à  $0,1 d_w t_w$  sauf si :
  - pour une ouverture rectangulaire :  $d_w / t_w \leq 0,4 (E / f_{yf}) [1 - 0,5 a_o / d_w] [A_w / A_{fc}]^{0,5}$

Où :

-  $A_{fc}$  est l'aire de la semelle comprimée ;

-  $A_w$  est l'aire de l'âme non ajourée ;

-  $a_o$  est la largeur de l'ouverture ;

-  $d_w$  est la hauteur hors tout de l'âme ;

-  $t_w$  est l'épaisseur d'âme ;

• **Dans notre cas :**

-  $A_{fc} = 160 * 10 = 1600 \text{ mm}^2$

-  $A_w = 400 * 5 = 2000 \text{ mm}^2$

-  $a_o = 500 \text{ mm}$

-  $d_w = 400 \text{ mm}$

-  $t_w = 5 \text{ mm}$

$d_w / t_w = 80 \text{ mm}$

▪  $0,4 (E / f_{yf}) [1 - 0,5 a_o / d_w] [A_w / A_{fc}]^{0,5} = 0,4 * (210000 / 235) [1 - 0,5 * 500 / 400] = 149,86 \text{ mm}$

➤ Vérification la nécessité de la raidisseur transversale:

$$80 \leq 149,86 \quad \Rightarrow \quad \text{vérifié}$$

## II-6 Classification des sections : (selon l'Eurocode 3 partie 1-1)

### II-6-1 Section transversale non ajourée :

- Il convient que la section transversale non ajourée de la poutre à une distance éloignée des ouvertures d'âme comporte des semelles de Classe 1 ou de Classe 2 et une âme de Classe 1, 2 ou 3.
  - **L'âme :**  $d / t_w \leq 72 \varepsilon$

$$d/t_w \leq 83 \varepsilon$$

$$d/t_w \leq 124 \varepsilon$$

$$d = d_w - 2a\sqrt{2} = 400 - 2 \cdot 6 \cdot \sqrt{2} = 383.03 \text{ mm}$$

$$d/t_w = 383.03/5 = 76.60 \leq 83\varepsilon \quad (\varepsilon = \sqrt{235/235} = 1)$$

✓ L'âme de classe 2

• **La semelle :**  $c/t_f \leq 9\varepsilon$

$$c/t_f \leq 10\varepsilon$$

$$c/t_f \leq 14\varepsilon$$

$$c = (b - t_w)/2 - a\sqrt{2} = (160 - 5)/2 - 6\sqrt{2} = 69.01 \text{ mm}$$

$$c/t_f = 69.01/10 = 6.90 \leq 9\varepsilon$$

✓ La semelle classe 1

Donc Le profilé est de classe 2

### II-6-2 Section transversale ajourée :

➤ Les portions de l'âme formant les âmes des tés non raidis au-dessus et en dessous d'ouvertures d'âme non raidies peuvent être classifiées en tenant compte de l'encastrement des portions adjacentes de l'âme de la façon suivante :

• pour la Classe 2 : soit  $l_0 \leq 32\varepsilon t_w$  ou  $b_{wc} \leq \frac{10\varepsilon t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{32\varepsilon t_w}{l_0}\right)^2}}$

• Pour classe 3 : soit  $l_0 \leq 36\varepsilon t_w$  ou  $b_{wc} \leq \frac{14\varepsilon t_w}{\sqrt{\left(\frac{36\varepsilon t_w}{l_0}\right)^2}}$

Où :

-  $b_{wc}$  est la longueur saillante d'âme de té  $b_{w1}$  ou  $b_{w2}$  indiquée à la Figure 2.4 ;

-  $l_0$  est la longueur définie à la Figure 2.9.

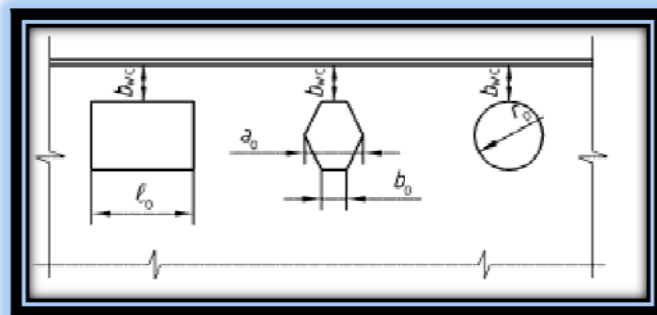


Fig.2.9 Portion de l'âme formant l'âme d'un té non raidi

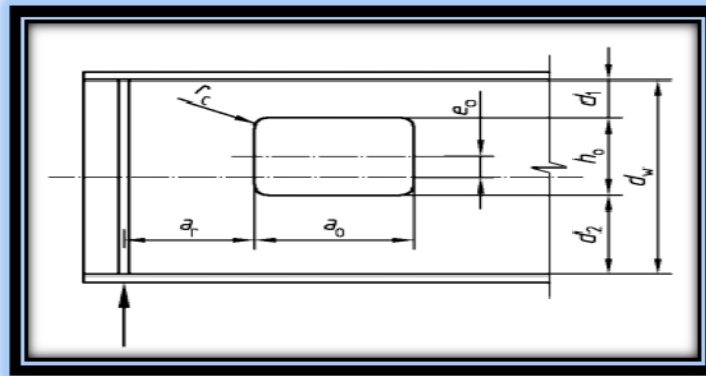
On a :

$$L_0 = 500 \text{ mm et } 32 \varepsilon t_w = 160 \text{ mm} \rightarrow 500 > 160 \Rightarrow \text{non vérifié}$$



## II-7 Résistance des poutres sans raidisseurs d'âme intermédiaires : (selon l'Eurocode 3 partie 1-1)

- Il convient que les dimensions d'une ouverture d'âme isolée (voir Figure 2.10), satisfasse les limites suivantes :
  - $h_0 \leq 0.75 d_w \rightarrow 200 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm} \rightarrow \text{vérifié}$
  - $d_1 \geq 0.10 d_w \rightarrow 100 \text{ mm} \geq 40 \text{ mm} \rightarrow \text{vérifié}$
  - $d_2 \geq 0.10 d_w \rightarrow 100 \text{ mm} \geq 40 \text{ mm} \rightarrow \text{vérifié}$
  - $a_0 \leq 3h_0 \rightarrow 500 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm} \rightarrow \text{vérifié}$
- Il convient que l'excentricité  $e_0$  d'une ouverture (voir Figure 2.10), ne soit pas supérieure à  $0,125 d_w$  en direction de la semelle comprimée :
  - $e_0=0$  (ouverture centrée dans l'âme)  $\leq 50 \text{ mm} \Rightarrow \text{vérifié}$



**Fig.2.10** Position et dimensions d'une ouverture

- Il convient que la largeur libre minimum  $w$  de l'âme formant un montant d'âme efficace entre deux ouvertures adjacentes satisfasse les conditions suivantes :
  - $w \geq a_0 V_{sd} / (V_{crd} - V_{sd})$   
 $w = 1750 \text{ mm}$
- **Calcul la charge  $p$  :**
  - $\sigma_f = \frac{My}{I} \leq 235 \Leftrightarrow \frac{plh}{42 I_y} \leq 235 \rightarrow p \geq \frac{42 I_y 235}{lh}$

Sachant que :

$$I_y = 161.176 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$l = 4000 \text{ mm}$$

$$h = 420 \text{ mm}$$

$$p \geq \frac{42 \cdot 161.176 \cdot 10^6 \cdot 235}{4000 \cdot 420} \rightarrow p \geq 946.909 \text{ KN} \rightarrow p = 950 \text{ KN}$$

- **Calcul  $v_{sd}$  :**

$$V_{sd} = 712.5 \text{ kN}$$

## II-8 Calcul la résistance au cisaillement $v_{c,Rd}$ : (selon l'eurocode 3 partie 1-1)

➤  $V_{c,Rd}$  est la valeur de calcul de la résistance au cisaillement.

- Pour le calcul plastique  $V_{c,Rd}$  est la valeur de calcul  $V_{pl,Rd}$  de la résistance plastique au cisaillement.

pour le calcul élastique,  $V_{c,Rd}$  est la valeur de calcul de la résistance élastique au cisaillement calculée en utilisant :

En l'absence de torsion, la valeur de calcul de la résistance plastique au cisaillement est donnée par l'expression:

- $$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{m0}}$$

Où  $A_v$  : est l'aire de cisaillement :

$$A_v = d t_w = 383.03 * 5 = 1915.15 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{1915.15 * (235 / \sqrt{3})}{1.1} = 236.22 \text{ kN}$$

- **La vérification :**

$$1750 \geq 500 * 712.5 * (236.22 - 712.5) \rightarrow 1750 \geq -747.98 \quad \Rightarrow \text{vérifié}$$

Où la résistance au cisaillement  $V_{c,Rd}$  de l'âme non ajourée est la plus faible entre la résistance au cisaillement plastique  $V_{p,Rd}$  suivant Ec 3 (5.4.6) et la résistance au voilement par cisaillement  $V_{ba,Rd}$  suivant Ec3 (5.6.3).

- **Calcul la résistance au voilement par cisaillement  $v_{ba,Rd}$  :**

- $$V_{ba,Rd} = (h_w / \sin \Phi) t f_{bv} / \gamma_{m1}$$

Où :

-  $f_{bv}$  est la contrainte limite de résistance au voilement de cisaillement

-  $h_w$  est la hauteur d'âme entre les axes des semelles = 410 mm

-  $\Phi$  est l'angle d'inclinaison de l'âme par rapport aux semelles =  $90^\circ$

-  $t$  est l'épaisseur de l'âme = 5 mm

- **Calcul  $f_{bv}$  :**

- $$F_{bv} = \frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1-\nu)} * \left[ \frac{t}{b} \right]^2 = k_\sigma * 189800 * \left[ \frac{t}{b} \right]^2$$

On prend :  $-k_\sigma = 1$

-  $t = 10 \text{ mm}$

-  $b = 400 \text{ mm}$

-  $\nu = 0.3$

$$-h_w = 410 \text{ mm}$$

$$-\Phi = 90^\circ$$

$$\bullet \quad F_{bv} = 1 * 189800 * \left(\frac{10}{400}\right)^2 \rightarrow f_{bv} = 118.625 \text{ N/mm}^2$$

• **Calcul  $V_{ba,Rd}$  :**

$$V_{ba,Rd} = \frac{(410 / \sin 90) * 5 * 118.625}{1} \rightarrow V_{ba,Rd} = 243.18 \text{ kN}$$

**II-9 la résistance au cisaillement plastique  $w_{pl,Rd}$  : (selon l'Eurocode 3 partie 1-1)**

$$w_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{m0}} = 236.22 \text{ kN}$$

On prend la valeur la plus faible : 236.22 kN

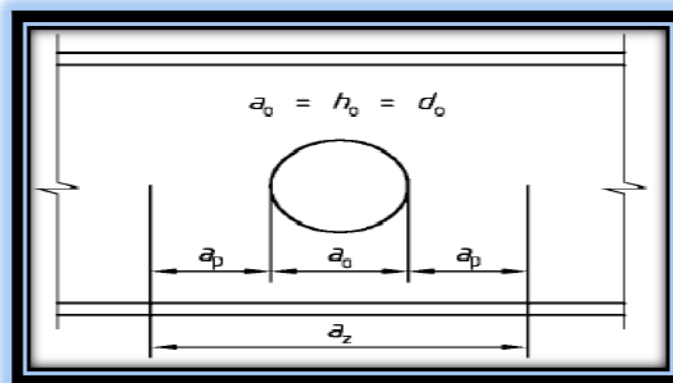
Donc :  $v_{c,Rd} = 236.22 \text{ kN}$

**II-10 Résistance aux forces transversales : (selon l'Eurocode 3 partie 1-1)**

- La résistance d'une poutre sans raidisseurs transversaux intermédiaires aux forces transversales appliquées au travers d'une semelle, à condition que la force ne soit pas appliquée à l'âme non raidie dans la longueur  $a_z$  de la zone d'influence d'une ouverture d'âme.
- Il convient de prendre la longueur totale  $a_z$  de la zone d'influence d'une ouverture (voir Figure 2.11), égale à :

$$a_z = a_o + 2a_p$$

- Il convient de calculer la longueur supplémentaire  $a_p$  de la zone d'influence au moyen d'expression suivante :
- Lorsque dans notre cas  $d_w/t_w = 80 \text{ mm} < 90\epsilon \rightarrow a_p = h_0 \rightarrow a_p = 200 \text{ mm}$



**Fig. 2.11** Zone d'influence d'une ouverture

**II-11 Résistance au cisaillement : (selon l'Eurocode 3 partie 1-1)**

- La réduction de la résistance au cisaillement provoquée par une ouverture d'âme isolée peut être négligée au niveau des sections transversales situées à une distance de l'ouverture supérieure à la longueur additionnelle  $a_p$  de sa zone d'influence, ou au-delà de la distance  $a_s$  jusqu'au raidisseur transversal suivant, si elle est moindre.
- La résistance au cisaillement  $V_{o,Rd}$  d'une section transversale ajourée peut être déterminée en utilisant :

$$V_{o,Rd} = V_{o,p,Rd} \text{ mais } V_{o,Rd} \geq V_{o,ba,Rd}$$

- La résistance au voilement plastique  $V_{o,p,Rd}$  peut être obtenue par l'expression suivante :

$$V_{o,p,Rd} = \left( V_{pl,Rd} - \frac{h_0 t_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \right) \sqrt{\frac{\eta}{1+\eta}}$$

Où  $V_{pl,Rd}$  représente la résistance au voilement plastique de la section transversale non ajourée.

- **Calcul  $\eta$  :**

$$\eta = 0.75 \left[ \frac{(d_w - h_0)^2 + 4e_0^2}{a_0(d_w - h_0)} \right]^2$$

Ouverture centrée dans l'âme : ( $e_0 = 0$ )  $\rightarrow \eta = 0.12$

- **Calcul  $V_{o,p,Rd}$  :**

$$V_{o,p,Rd} = \left( 236.22 * 10^3 - \frac{200 * 5 * 235}{1.1 * \sqrt{3}} \right) \sqrt{\frac{0.12}{1+0.12}} \rightarrow V_{o,p,Rd} = 36.91 \text{ kN}$$

Et  $V_{o,Rd} = V_{o,p,Rd}$

- La résistance au voilement par cisaillement  $V_{o,ba,Rd}$  peut être obtenue par l'expression suivante:

$$V_{o,ba,Rd} = V_{ba,Rd} (1 - h_0 / d_w + 0,3 a_0 / d_w)$$

- **Calcul  $V_{ba,Rd}$  :**

$$V_{o,ba,Rd} = 243.18 (1 - 200/400 + 0.3 * 500/400) \rightarrow V_{o,ba,Rd} = 212.7825 \text{ kN}$$

**II-12 Moment de résistance :**

- Le moment de résistance  $M_{o,Rd}$  d'une poutre à mi-longueur d'une ouverture d'âme, en tenant compte des effets de l'effort tranchant  $V_{sd}$  s'exerçant à ce point, peut être déterminé au moyen de la méthode approchée suivante :
  - pour les sections transversales de Classe 2

$$M_{o,Rd} = M_{pl,Rd} (1 - 0,25 t_w h_0 (h_0 + 4 e_0) / W_{pl} - \mu_1 V_{sd} / V_{o,Rd})$$

- **Calcul le moment de résistance plastique de la section transversale non ajourée**

$M_{pl,Rd}$  :

$$\bullet \quad M_{pl,Rd} = \frac{w_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

- **Calcul le moment plastique  $W_{pl}$ :**

$$W_{pl} = 2.S = 2[5 * 200 * 100 + 160 * 10 * 205] = 856000 \text{ mm}^3$$

Où : s est le moment statique

$$M_{pl,Rd} = \frac{856000 * 235}{1.1} \rightarrow M_{pl,Rd} = 182.87 \text{ kN.m}$$

- **Calcul  $\mu_1$ :**

$$\mu_1 = 0.25 t_w d_w^2 \left[ 1 + 3 \left( 0.7 - h_0 / d_w \right) a_0 / d_w / w_{pl} \right]$$

$$\mu_1 = 0.25 * 5 * 400^2 \left[ 1 + 3 \left( 0.7 - 200 / 400 \right) 500 / 400 / 856000 \right]$$

$$\mu_1 = 0.408$$

- **Calcul  $M_{0,Rd}$ :**

$$M_{0,Rd} = 182.87 * (1 - 0.25 * 5 * 200 (200+0) / 856000 - 0.408 * 712.5 * 10^3 / 36.91 * 10^3)$$

$$M_{0,Rd} = -1478.76 \text{ kN.m}$$

### II-13 Ouvertures d'âme renforcées :

➤ lorsque les conditions suivantes sont satisfaites :

-le renforcement est adjacent à l'ouverture, en laissant un espace juste suffisant pour les soudures ;

- les renforts au-dessus et en dessous de l'ouverture ont chacun une aire égale  $A_r$

- l'aire de renforcement  $A_r$  n'est pas supérieure à l'aire de semelle  $A_f$  tel que :

$$A_r = 3 * 400 = 1200 \text{ mm}^2 \text{ et } A_f = 160 * 10 = 1600 \rightarrow A_r < A_f \Rightarrow \text{vérifié}$$

- le renforcement est de Classe 1 ou de Classe 2 .

- les semelles sont de Classe 1

- après raidissement, les âmes des tés raidis sont de Classe 2.

➤ Il convient de prendre la résistance au cisaillement  $V_{o,Rd}$  d'une ouverture rectangulaire renforcée égale à la plus faible des deux valeurs suivantes : la résistance au voilement par cisaillement  $V_{o,ba,Rd}$  ... ou la résistance plastique au cisaillement  $V_{o,pl,Rd}$  donnée par :

$$V_{ba,Rd} = 243.18 \text{ kN}$$

$$V_{o,pl,Rd} = \left( V_{pl,Rd} - \frac{h_0 t_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \right) \mu_3$$

- **Calcul  $\mu_3$  :**

$$-\mu_3 = 2 \sqrt{3} A_r / (h_0 t_w)$$

$$-A_r = 1200 \text{ mm}^2$$

$$-h_0 = 200 \text{ mm}$$

$$-t_w = 5 \text{ mm}$$

$$\mu_3 = 2 \sqrt{3} * 1200 / (200 * 5) \rightarrow \mu_3 = 4.15$$

$$V_{pl,Rd} = 236.22 \text{ kN}$$

$$V_{0,pl,Rd} = \left( 236.22 * 10^3 - \frac{200 * 5 * 235}{1.1 \sqrt{3}} \right) 4.15 = 468.43 \text{ kN} \rightarrow V_{0,pl,Rd} = 468.43 \text{ kN}$$

$$\rightarrow V_{0,ba,Rd} = 212.7825 \text{ kN}$$

- La valeur de la résistance au cisaillement est :

$$V_{0,Rd} = 212.7825 \text{ kN}$$

- Il convient de déterminer le moment de résistance  $M_{0,Rd}$  à mi-longueur d'une ouverture rectangulaire, en tenant compte des effets de l'effort tranchant  $V_{sd}$  s'exerçant en ce point, au moyen de l'expression suivante :

$$-M_{0,Rd} = M_{1,Rd} - (V_{sd} / V_{0,Rd})(M_{1,Rd} - M_{2,Rd})$$

$$-M_{2,Rd} = (A_f - A_r) d w_{fy} / \gamma_{M0}$$

- **Calcul  $M_{2,Rd}$  :**

$$M_{2,Rd} = (1600 - 1200) 400 * 235 / 1.1 \rightarrow M_{2,Rd} = 34.1818 \text{ kN}$$

- **Calcul la résistance  $M_{1,Rd}$  pour un cisaillement nul:**

$$A_r > t_w e_0 \rightarrow 1200 > 0 :$$

$$M_{1,Rd} = M_{pl,Rd} \left[ 1 - \frac{t_w (0.25 h_0^2 + h_0 e_0 - e_0^2) - A_r h_0}{V_{pl}} \right]$$

$$\rightarrow M_{1,Rd} = 201 * 10^3 \left[ 1 - \frac{5(0.25 * 200^2 + 0) - 1200 * 200}{236.22} \right] \rightarrow M_{1,Rd} = 39.42 \text{ kN}$$

- **Calcul le moment de résistance  $M_{0,Rd}$  :**

$$M_{0,Rd} = 39.42 * 10^6 - (712.5 * 10^3 / 36.91 * 10^3) (39.42 * 10^6 - 34.1818 * 10^6)$$

$$\rightarrow M_{0,Rd} = -61.677 \text{ kN.m}$$

- Il convient que les soudures longitudinales d'assemblage des renforts sur l'âme au-delà de chaque extrémité de l'ouverture consistent en des soudures d'angle sur deux côtés. Il convient que ces soudures soient calculées pour transmettre l'effort axial de calcul  $F_{r,sd}$  du renfort dans l'âme de la section non ajourée. La valeur de  $F_{r,sd}$  peut être déterminée à partir du moment de résistance de calcul du té renforcé, ou, comme alternative par simplification, elle peut être prise égale à la résistance du raidisseur  $F_{r,Rd}$  donnée par :

$$F_{r,Rd} = A_r F_{yT} / \gamma_{M0}$$

$$F_{r,Rd} = 1200 \cdot 235 / 1.1 \rightarrow F_{r,Rd} = 256.36 \cdot 10^3 \text{ N}$$

• **Largeur de l'ouverture :**

$$l_v \geq 0.25a_0 \rightarrow l_v = 0.25 \cdot 500 = 125 \text{ mm}$$

• **Résistance au cisaillement des soudures d'angle  $l_y$ :**

$$l_y \geq \frac{F_{r,Rd}}{2na f_{vw,d}}$$

Où :

- a est la gorge de la soudure d'angle ;

-  $F_{vw,d}$  la résistance de calcul au cisaillement d'une soudure d'angle, voir Ec3 (6.6.5.3);

- n est 1 pour un renforcement sur une seule face, 2 pour un renforcement sur deux faces.

$$a = \frac{\sqrt{2}}{2} t = 3.53 \approx 4 \text{ mm}$$

$$F_{vw,d} = F_{w,Rd} = \frac{n f_u}{\beta_w \gamma_{M2} \sqrt{3}}$$

Avec :

-  $f_u$  résistance nominale ultime à la traction de la pièce assemblée la plus faible ;

-  $\beta_w$  facteur de corrélation approprié pris dans le tableau suivant :

Nuance	$\beta_w$	Nuance	$\beta_w$	Nuance	$\beta_w$	Nuance	$\beta_w$
S 235 ...	$\beta_w = 0,8$	S 275 ...	$\beta_w = 0,85$	S 355 ...	$\beta_w = 0,9$	S 420 ...	$\beta_w = 1,0$

**Tableau.1** Facteur de corrélation  $\beta_w$  pour les soudures d'angle.

$$F_{vw,d} = \frac{4 \cdot 360}{0.8 \cdot 1.25 \cdot \sqrt{3}} \rightarrow F_{vw,d} = 831.38 \text{ MPa}$$

$$l_v \geq \frac{256.36 \cdot 10^3}{2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 831.38} \rightarrow l_v \geq 19.27 \text{ mm}$$

• **Résistance au cisaillement du renforcement :**

$$L_v \geq \frac{F_{r,Rd}}{n t_r f_{yr} / (1.1 \sqrt{3})}$$

Où :

$t_r$  : est l'épaisseur de renfort longitudinale

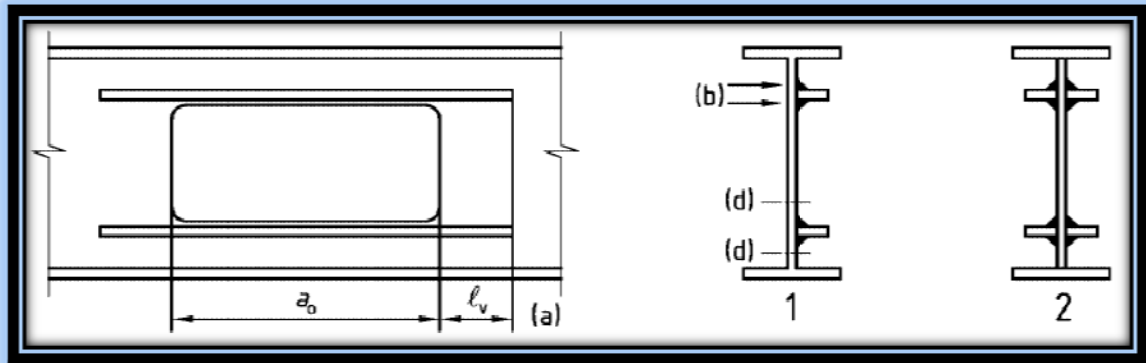
$$L_v \geq \frac{256.36 \cdot 10^3}{2 \cdot 10 \cdot 235 / (1.1 \sqrt{3})} \rightarrow l_v \geq 103.92 \text{ mm}$$

• **Résistance au cisaillement de l'âme :**

$$L_v \geq \frac{F_{r,Rd}}{n t_w f_{yr} / (1.1\sqrt{3})} \rightarrow L_v \geq \frac{256.36 \cdot 10^3}{2 \cdot 5 \cdot 235 / (1.1\sqrt{3})} \rightarrow l_v \geq \mathbf{103.93 \text{ mm}}$$

⇒ On prend :  $l_v = \mathbf{125 \text{ mm}}$

Avec :  $a_0 = 500 \text{ mm}$



Légende

- 1 : Renforcement sur une face
- 2 : Renforcement sur deux faces

**Fig. 2.12** Critères pour l'ancrage du renfort

#### II-14 Résistance des poutres avec raidisseurs d'âme transversaux intermédiaires :

- Il convient que l'élançement de l'âme  $d_w/t_w$  ne soit pas supérieur à  $390 \varepsilon$ .

$$d_w/t_w = 80 \leq 390 \varepsilon$$

- Il convient que l'espacement des raidisseurs  $a$  satisfasse la condition :

$$1.0 d_w \leq a \leq 3.0 d_w \rightarrow 400 \text{ mm} \leq a \leq 1200 \text{ mm}$$

→  $a = \mathbf{900 \text{ mm}}$

- Lors de la détermination de la résistance au cisaillement d'un panneau d'âme, il convient de réduire la largeur du champ de traction d'une dimension  $D$  égale au diamètre  $d_0$  d'une ouverture circulaire. Une ouverture rectangulaire peut être traitée comme une ouverture circulaire, voir (Figure 2.13), avec un diamètre équivalent  $D$  donné par l'expression :

$$D = \sqrt{a_0^2 + h_0^2} \sin(\Phi + \theta_0)$$

Avec :

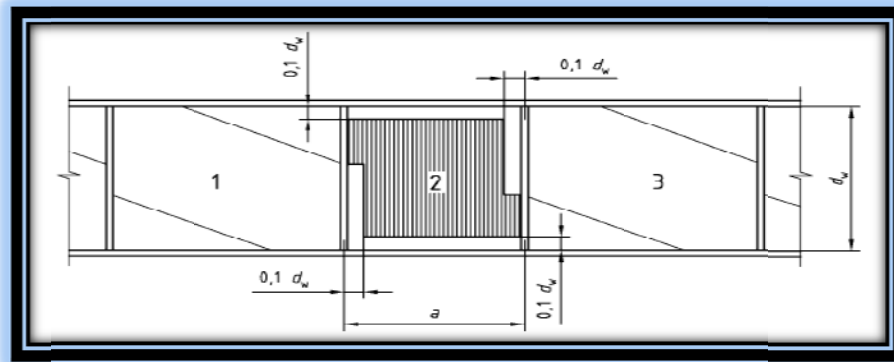
$$\theta_0 = \arctan(h_0/a_0) \rightarrow \theta_0 = \arctan(200/500) \rightarrow \theta_0 = \mathbf{21.80^\circ}$$

$$\Phi = 68.2^\circ$$

$$\rightarrow D = \sqrt{500^2 + 200^2} \sin(68.2^\circ + 21.80^\circ) \rightarrow \mathbf{D = 538.51 \text{ mm}}$$



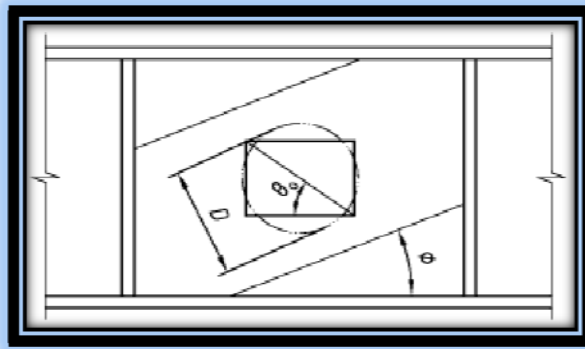
- Il convient que la dimension de l'ouverture soit telle que :



Légende

- 1 : Champ diagonal de traction dans le panneau adjacent
- 2 : Zone dans laquelle une ouverture est autorisée
- 3 : Champ diagonal de traction dans le panneau adjacent

**Fig.2.13** Zone dans laquelle une ouverture est autorisée



**Fig. 2.14** Diamètre équivalent d'une ouverture rectangulaire

### II-15 Résistance au cisaillement :

- Dans une âme raidie transversalement, il convient de déterminer la résistance au cisaillement  $V_{o, Rd}$  d'un panneau d'âme comportant une ouverture au moyen de l'expression:

$$V_{o, Rd} = V_{o, bb, Rd} \text{ mais } V_{o, Rd} \leq V_{o, pl, Rd}$$

#### II-15-1 Panneau d'âme comportant une ouverture centrale :

- Il convient de prendre en compte les effets d'une ouverture centrale sur le champ de traction et sur la résistance critique au voilement d'un panneau d'âme en déterminant la résistance au voilement par cisaillement  $V_{0,bb,Rd}$  au moyen de l'expression :

$$V_{0,bb,Rd} = [(d_w - D)t_w \tau_{bb} + 0.9(g - D)t_w \sigma_{bb} \sin \Phi] / \gamma_{M1}$$

Où :

- $g$  est la largeur du champ diagonal de traction donnée en Ec3 5.6.4.1(3) ;
  - $\sigma_{bb}$  est la résistance du champ diagonal de traction donnée en Ec3 5.6.4.1(1) ;
  - $\tau_{bb}$  est la résistance au voilement par cisaillement initiale donnée en Ec3 5.6.4.1(2).
- L'inclinaison du champ de traction peut être obtenue par une itération pour déterminer la valeur à laquelle la résistance au cisaillement  $V_{0,bb,Rd}$  atteint un maximum, ou cette inclinaison peut être approchée en prenant pour hypothèse :

$$\Phi = 0.67(1 - D/d_w)\theta$$

$$\theta = \arctan(d_w/a) \rightarrow \theta = \arctan(400/500) = 38.66^\circ$$

$$\Phi = 0.67(1 - 538.51/400)38.66 \rightarrow \Phi = -8.96^\circ$$

$$V_{0,bb,Rd} = [(400 - 538.51)5 * 212.7825 * 10^3 + 0.9(200 - 538.51)5 * 235 \sin -8.96] / 1$$

$$\rightarrow V_{0,bb,Rd} = 147.30 \text{ kN}$$

### II-15-2 Panneau d'âme comportant une ouverture renforcée :

- Il convient que le renforcement longitudinal soit calculé pour compenser l'effet de l'ouverture sur le champ diagonal de traction comme indiqué à la Figure 2.15.
- Il convient que le moment de résistance plastique  $M_{pl,r,Rk}$  du renforcement satisfasse le critère suivant  $M_{pl,r,Rk} > M_{r,Sk}$

dans lequel le moment interne  $M_{r,Sk}$  du renforcement est donné par l'expression suivante :

$$M_{r,Sk} = (h_0 \cos \Phi + a_0 \sin \Phi)^2 t_w \sigma_{bb} / 16$$

Où :

- $\sigma_{bb}$  : est la résistance du champ diagonal de traction de la section transversale non ajourée, voir Ec3 (5.6.4.1);

- $\Phi$  : est l'inclinaison du champ diagonal de traction pour la section transversale non ajourée, voir 5.6.4.2.

$$M_{r,Sk} = (200 \cos(-8.96) + 500 \sin(-8.96))^2 5 * 235 / 16$$

$$\rightarrow M_{r,Sk} = 1.05 * 10^6 \text{ kN.m}$$

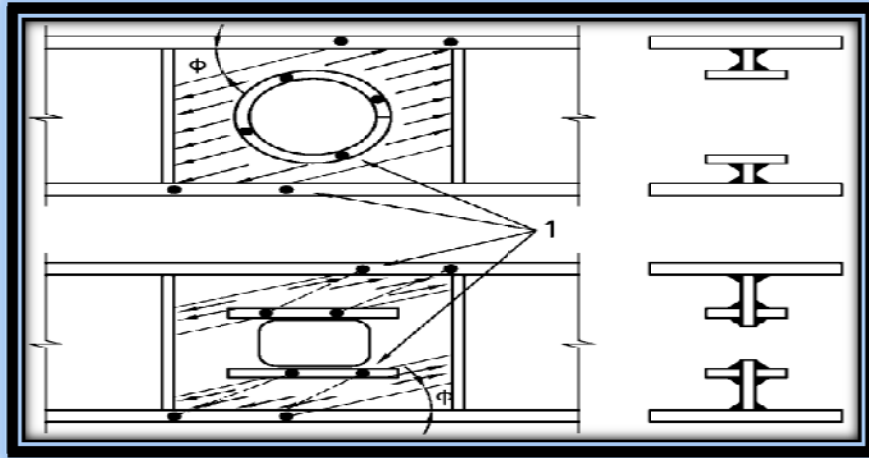
- Il convient de calculer le moment de résistance plastique  $M_{pl,r,Rk}$  du renfort au moyen de l'expression :

$$M_{pl,r,Rk} = 0.25 b_r d_r^2 f_{yr}$$

Où :

- $b_r$  est la largeur totale du renfort, comprenant l'épaisseur de l'âme entre deux plats de renfort le cas échéant, voir Figure 2.14 ;

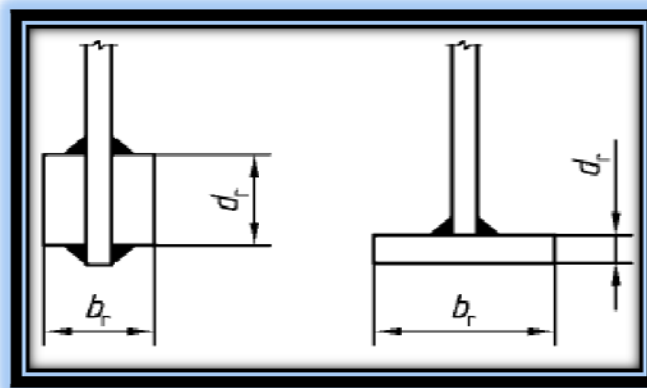
- $d_r$  est la hauteur du renfort, voir Figure 2.14



Légende

- 1 : Position de rotule plastique

**Fig. 2.15** Modèle de calcul du renfort



**Fig. 2.16** Dimensions du renfort

- $d_r = 50 \text{ mm}$  et  $b_r = 105 \text{ mm}$
- $M_{pl,r,Rk} = 0.25 * 105 * 5^2 * 105 \rightarrow M_{pl,r,Rk} = 1.05 * 10^6 \text{ kN.m}$

- Pour compenser l'effet de l'ouverture sur la résistance critique au voilement, il convient que les dimensions du renfort, voir Figure 2.14, satisfassent également les critères suivants

$$: \quad \frac{d_r}{d_w} \left( \frac{b_r}{t_w} \right)^2 \sqrt{\frac{d_w a}{h_0 a_0}} \geq 2.76$$

$$\rightarrow 15.59 > 2.76$$

- Pour des ouvertures rectangulaires, il convient que le renforcement soit convenablement ancré au-delà des extrémités des ouvertures. Il convient que la longueur d'ancrage  $l_v$  du renfort satisfasse également le critère suivant :

$$l_v \geq 0.5 \left( \sqrt{a_0^2} + h_0^2 - a_0 \right) \rightarrow l_v \geq 19.25 \text{ mm}$$

### II-16 Moment de résistance :

Dans une poutre munie de raidisseurs d'âme transversaux intermédiaires, le moment résistant  $M_{o,Rd}$  à mi-longueur d'une ouverture d'âme, en tenant compte des effets de l'effort tranchant  $V_{Sd}$  s'exerçant en ce point, peut être déterminé au moyen de l'expression :

$$M_{o,Rd} = M_{f,Rd} + (M_{o,pl,Rd} - M_{f,Rd}) (1 - V_{Sd} / V_{o,Rd})$$

Où :

- $M_{f,Rd}$  : est le moment plastique de résistance d'une section transversale composée uniquement des semelles ;

- $M_{o,pl,Rd}$  : est le moment plastique de résistance de la section transversale ajourée ;

- $V_{o,Rd}$  : est la résistance au cisaillement de la section transversale ajourée ;

- $V_{Sd}$  : est l'effort tranchant de calcul.

$$-M_{f,Rd} = \frac{W_{pl}(semelle) f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$W_{pl} = 2[(160 \cdot 10 \cdot 205)^2] = 1.31 \cdot 10^6$$

$$\rightarrow M_{f,Rd} = 280.20 \text{ KN}$$

$$\rightarrow M_{o,Rd} = 280.20 + (182.87 - 280.29) (1 - 712.52 / 36.91)$$

$$\rightarrow M_{o,Rd} = 3346.521 \text{ kN.m}$$

### **III-1 Introduction :**

Les systèmes étudiés de nos jours deviennent plus grands et complexes, ce qui les rend difficiles à comprendre. Une analyse structurée du système peut nous amener à une description pertinente pour la simulation du système.

La simulation et l'analyse numérique se sont développées ces dernières années dans la recherche industrielle privée ou publique (constructeurs automobile, aéronautique, spatial...) améliorant ainsi la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs. La solution d'analyse par éléments finis optimise le prototypage virtuel et la simulation numérique pour l'entreprise en utilisant les hypothèses de la mécanique de la rupture en élasticité et de la dynamique. Ainsi elle simule et améliore les performances des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...).

C'est pour cela on a intéressé au renforcement d'un PRS ajouré ouverture avec plusieurs mode de raidissage (verticaux ou horizontaux).

### **III-2 objectif :**

À ce jour, les études expérimentales sur les poutres ajourées ont permis d'identifier six principaux modes de ruine. Ces modes sont étroitement associés à la géométrie de la poutre globale, à l'élancement de l'âme, aux dimensions de l'ouverture, au type de chargement, aux conditions aux limites et à la position des ouvertures. Il est possible de distinguer les modes de ruine locaux au niveau des ouvertures des modes de ruines globaux. Les modes de ruine locaux mettent en jeu les sections locales autour de l'ouverture. Trois modes locaux propres aux poutres munies d'ouvertures ont pu être identifiés : la flexion Vierendeel, le flambement du montant intermédiaire et la rupture de la soudure entre ouvertures.

L'objectif de ce présent travail est d'étudier le comportement mécanique d'un tronçon de poutre munie d'une ouverture rectangulaire avec différentes formes de raidisseurs par le biais de modélisations aux éléments finis. Le modèle éléments finis est développé sous ABAQUS en tenant compte des non linéarités matérielles et géométriques avec des éléments volumiques.

### **III-3 Présentation de logiciel ABAQUS :**

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée

comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples. ABAQUS, c'est une structure de plus de 350 personnes, 24 agences implantées dans le monde et un réseau de distributeurs sur les marchés émergents.

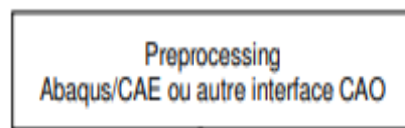
➤ Deux grands codes:

1. ABAQUS/Standard : résolution par un algorithme statique implicite
2. ABAQUS/Explicit: résolution par un algorithme dynamique explicite

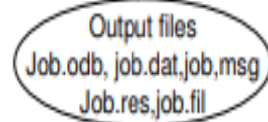
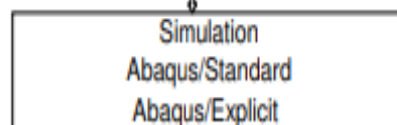
#### III-4 Structure d'une analyse sous ABAQUS :

ABAQUS n'est qu'un solveur (implicite, explicite) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier d'entrée (ou fichier de données) et qui écrit la solution vers un fichier de sortie (ou fichier de résultats).

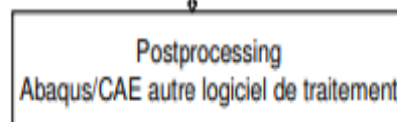
Etape 1 :



Etape 2 :



Etape 3 :



#### III-5 Les différents fichiers pour la simulation sous ABAQUS :

✓ Fichier d'entrée (input file) :

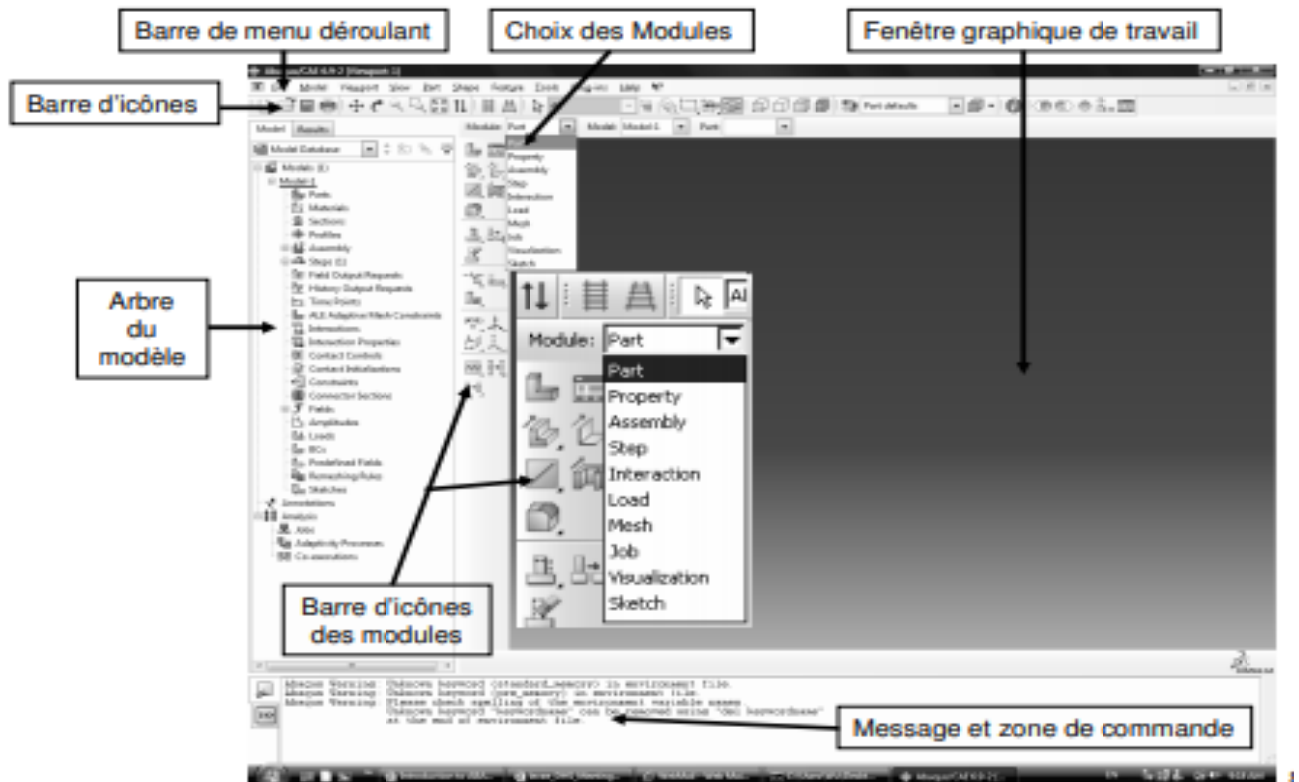
- Fichier .inp : contient des mots clés décrivant la géométrie, les matériaux, les conditions limites et les chargements de la structure étudiée
- Génération du fichier .inp: ---
  - avec un éditeur (fichier texte) ou programme en connaissant les divers mots clés de commande ABAQUS
  - avec l'interface graphique ABAQUS/CAE
  - avec un logiciel annexe (I-DEAS, NASTRAN,...,etc.)
- ✓ Fichier de résultats (output file) :
  - Fichier .odb : Contient les contours et courbes de résultats
- ✓ Autres fichiers créés par ABAQUS lors de la simulation :
  - Fichier .com : exécutable de vos calculs
  - Fichier .dat: liste des résultats, résumé de votre modélisation
  - Fichier .msg: résumé du déroulement du calcul en cours, message d'erreur
  - Fichier .res: fichier binaire de reprise
  - Fichier .fil: fichier binaire des résultats
  - Fichier .log: fichier de procédure
  - Fichier .sta: fichier statistique,...etc.

### III-6 Les systèmes d'unités :

ABAQUS ne gère pas les unités : c'est à l'utilisateur d'utiliser un système d'unités cohérent.

Quantité	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Longueur	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Masse	kg	tonne ( $10^3$ kg)	slug	$\text{lbf s}^2 / \text{in}$
Temps	s	s	s	s
Contrainte	Pa ( $\text{N} / \text{m}^2$ )	MPa ( $\text{N} / \text{mm}^2$ )	$\text{lbf} / \text{ft}^2$	Psi ( $\text{lbf} / \text{in}^2$ )
Energie	J	mJ ( $10^{-3}$ J)	ft lbf	in lbf
Masse volumique	$\text{kg} / \text{m}^3$	tonne / $\text{mm}^3$	slug / $\text{ft}^3$	$\text{lbf s}^2 / \text{in}^4$

### III-7 Organisation de l'interface ABAQUS CAE (Complete Abaqus Environment) :



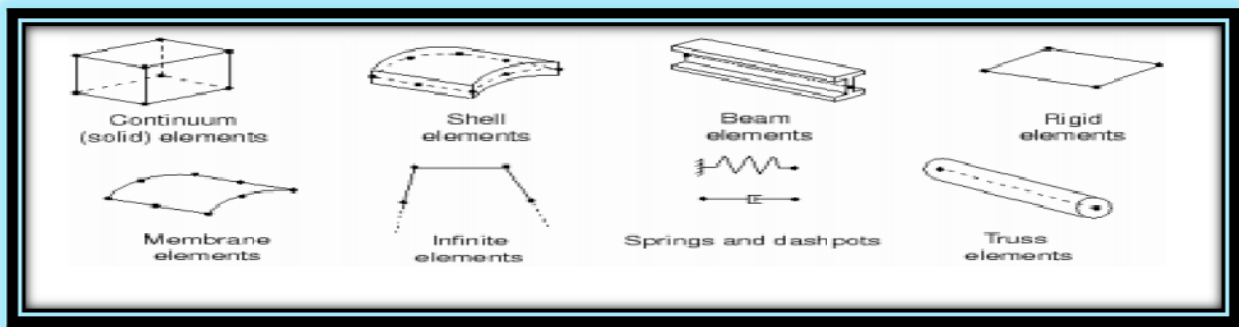
### III-8 Réalisation d'une simulation numérique sous Abaqus CAE :

- ✓ Passage successif dans :
- Module Part
  - Module Property
  - Module Assembly
  - Module Step
  - Module Interaction
  - Module Load
  - Module Mesh
  - Module Job
  - Module Visualization



### III-9 Les éléments dans ABAQUS :

Un très large choix d'éléments (plus de 100) :



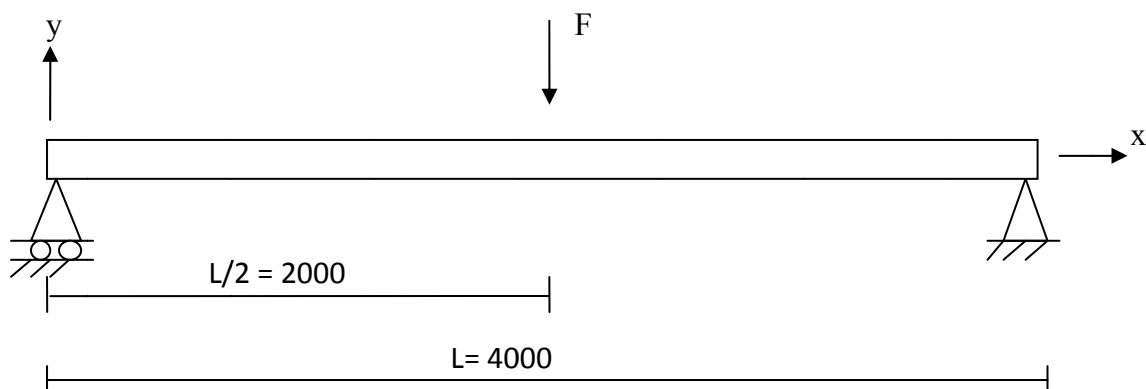
L'ABAQUS : utilise les domaines physiques suivants : Mécanique, Thermique, Électrique (piézo et thermique), Problèmes couplés. Les catégories d'éléments utilisées dans ce code sont : Milieu continu (2D et 3D), Poutres, plaques, coques, Éléments spéciaux (ressorts, masses,...etc).

Ce logiciel utilise trois types d'analyses non linéaires : Matériel, géométrique et de contact. Dans le non linéarité matérielle on trouve quatre théories disponibles : Hyper - élasticité, Plasticité, Visco -Plasticité, Endommagement. Concernant le non linéarité géométrique elle comporte : Grandes déformations, Grands déplacements, Grandes rotations, Instabilités (bifurcations, points limites).

### III-10 Présentation du modèle étudié :

Notre étude concerne une modélisation numérique d'une PRS simplement appuyé en acier S235 de 4 m de longueur sollicitée par un chargement concentrée au milieu de la poutre qui varie e intensité (voire figure ci-dessous).

Les propriétés géométriques sont présentées dans le tableau suivant :



**Fig.3.1** Schéma de présentation du modèle d'étude.

Hauteur	Epaisseur de l'âme (mm)	Epaisseur de semelle (mm)	Largeur de semelle (mm)	Poids volumique (N/mm <sup>3</sup> )	Module de Young E (N/mm <sup>2</sup> )	Coefficient de poisson $\nu$
420	5	10	160	$7.85 \cdot 10^{-5}$	210000	0.3

Tableau 1 : Propriétés géométriques et mécaniques des poutres en acier

Dans le but de pourvoir un maximum de flexibilité d'un bâtiment, les constructeurs utilisent de plus en plus des poutres avec d'importantes portées. En contrepartie cela requiert généralement des profilés de grande hauteur, ajoutée à l'épaisseur de plancher nécessaire au passage de services, on se retrouve souvent avec une importante hauteur d'étage.

La solution a donc été de concevoir des poutres avec des trous isolés ou uniformément répartis, permettant le passage des conduits à travers l'âme sans trop réduire la résistance à la flexion de la poutre. (Voir Figure 3.2)

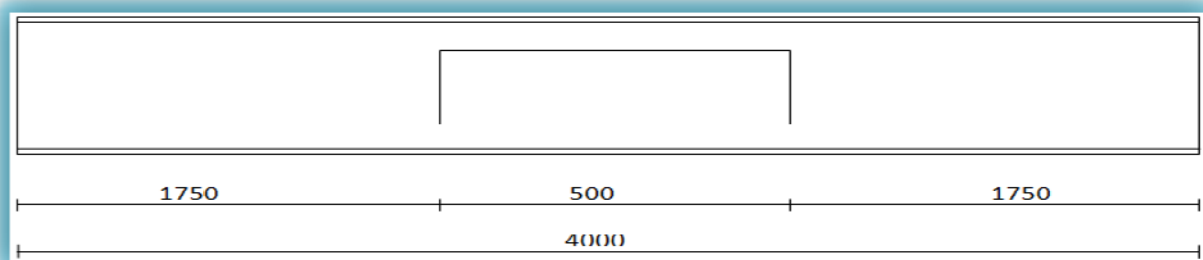


Fig.3.2 Vue longitudinale d'une poutre à ouverture d'âme

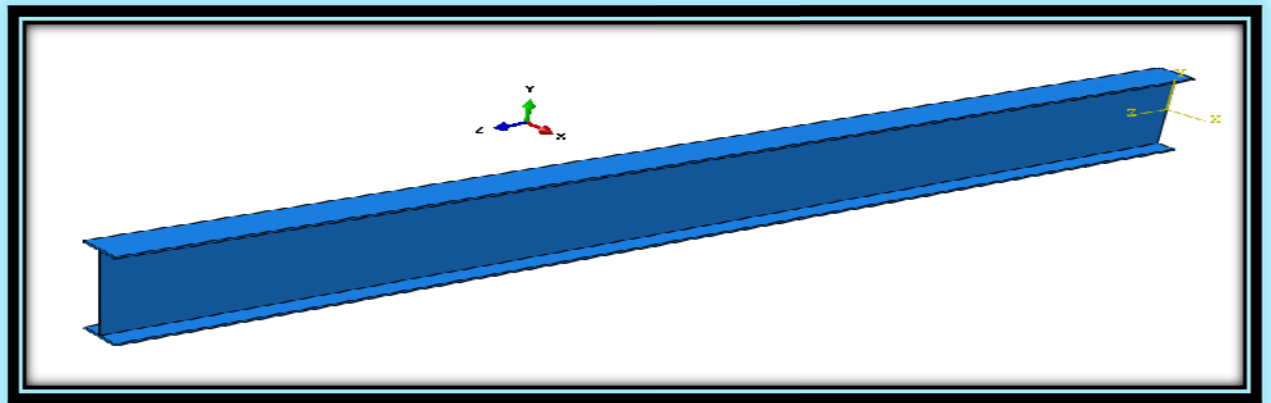
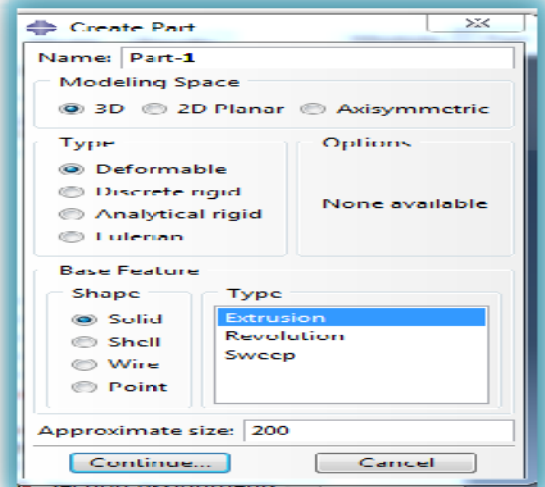
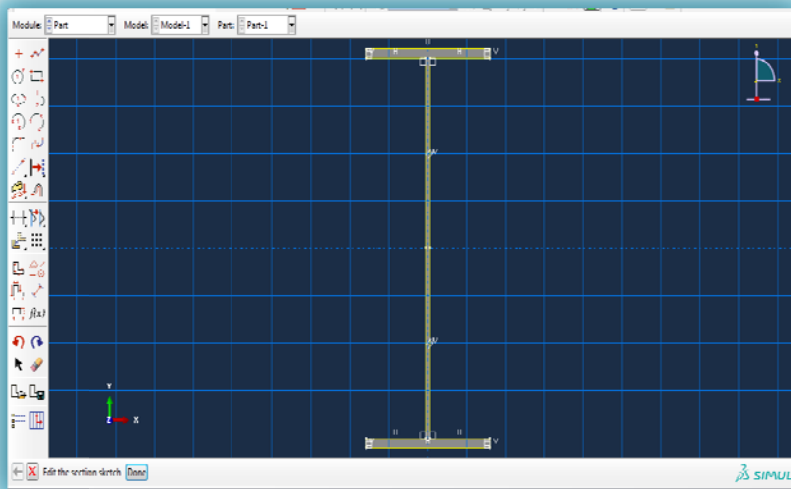
### III-11 Les étapes de modélisation des éléments sous ABAQUS 2017 :

Le logiciel est divisé en plusieurs modules indépendants les uns des autres :

#### III-11-1 Définition des Géométrie (Part) :

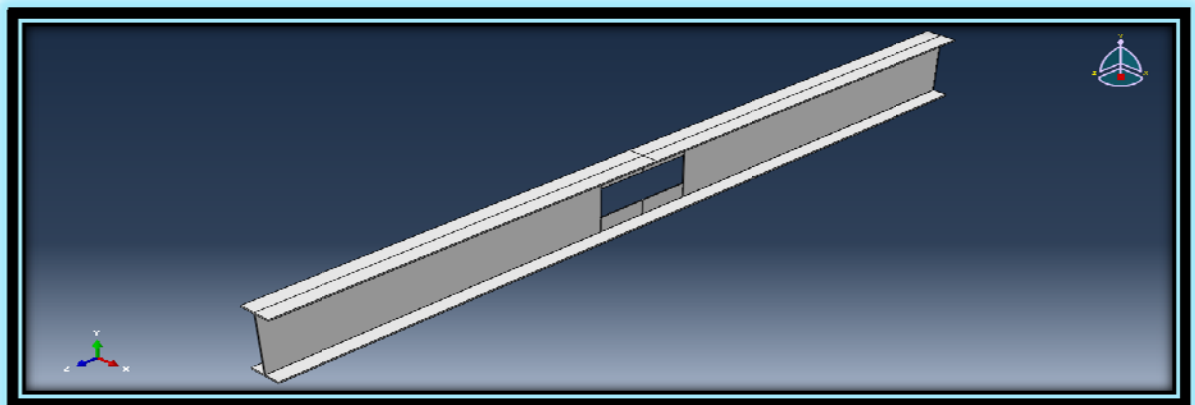
Les modélisations de poutres dans ABAQUS/CAE doivent s'appuyer sur des géométries adaptées, on créera notre profilé de type solide en forme I.

- La représentation de la création sur ces figures suivantes:( Figure 3.3)



**Fig.3.3** modélisation de profilé

- on fait une ouverture centrée au niveau de l'ame avec longueur 500 mm et largeur 300 mm.(Voir Figure 3.4)



**Fig.3.4** modélisation de louverture

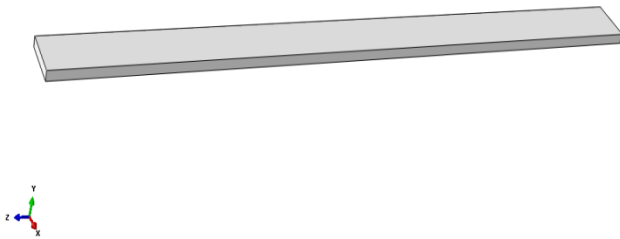
➤ On a créé plusieurs types de raidisseur pour l'assembler avec différentes méthodes:(Voir Figure 3.5.a et 3.5.b)

-type 1 : raidisseur longitudinal de longueur 500 mm et d'épaisseur 10 mm.

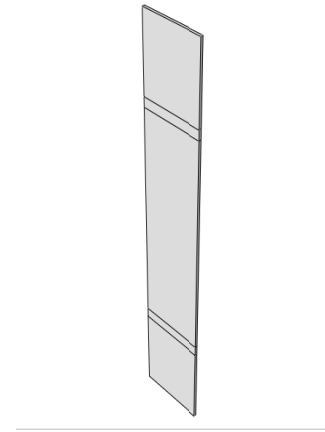
-type 2 : raidisseur longitudinal de longueur 750 mm et d'épaisseur 10 mm.

-types 3 : raidisseur longitudinal de longueur 900 mm et d'épaisseur 10 mm.

-type 4 : raidisseur transversal longueur 400 mm et d'épaisseur 3 mm.



**Fig.3.5.a** raidisseur longitudinal

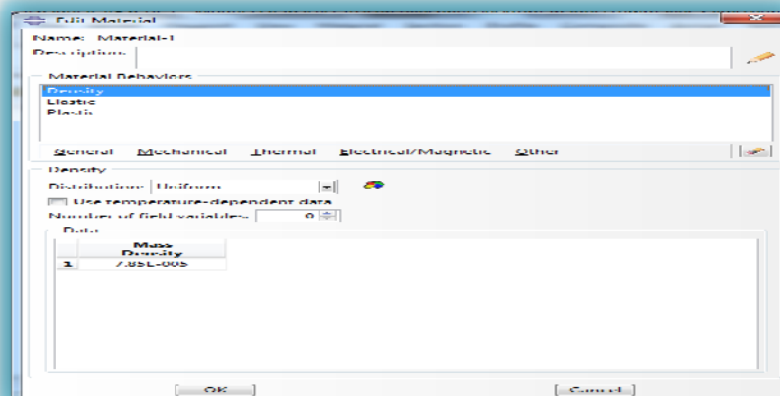


**Fig.3.5.b** raidisseur transversal

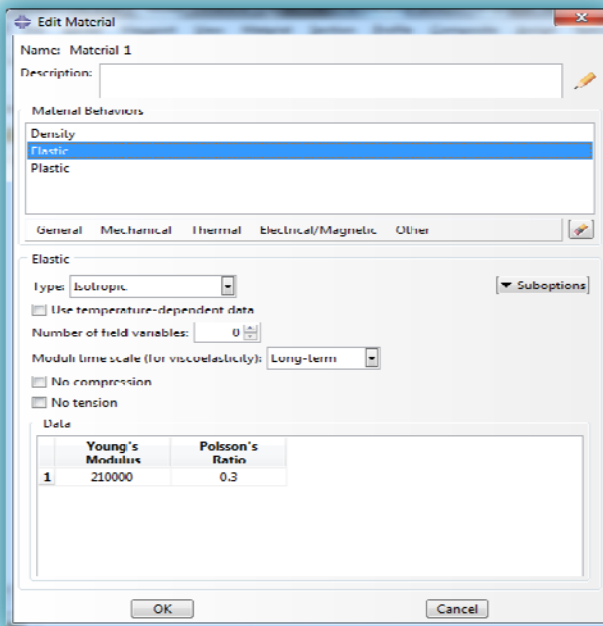
### III-11-2 Définition des propriétés du modèle (Property) :

Le modèle appliqué est défini au niveau du module **Property**. Du fait qu'on a réduit une ou deux dimensions du modèle, on doit définir les caractéristiques de la structure dans les dimensions éliminées : épaisseur pour une coque, profil de la section pour une poutre. Pour les poutres : on doit au préalable déterminer les caractéristiques de la section (Essentiellement son aire, ses moments d'inertie et densité).

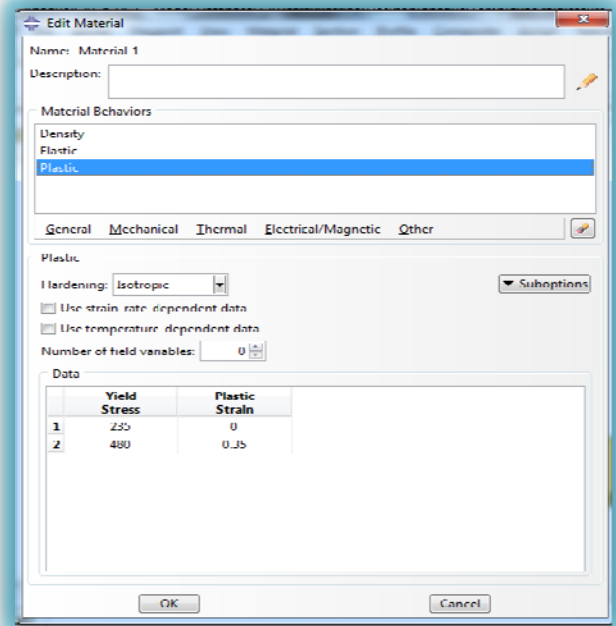
Les caractéristiques de chaque élément présentées dans les figures ci-dessous



Density



Elastic



Plastic

**Fig.3.6** Définition des caractéristiques des éléments

### III-11-3 Définition l'assemblage du modèle (Assembly) :

Les différents modèles d'étude sont présentés ci-dessous

-mode 1 : assemblage par 4 raidisseurs longitudinaux de longueur 500 mm et épaisseur 10 mm.

-mode 2 : assemblage par 4 raidisseurs longitudinaux de longueur 750 mm et épaisseur 10 mm.

-mode 3 : assemblage par 4 raidisseurs longitudinaux de longueur 900 mm et épaisseur 10 mm.

-mode 4 : assemblage par 4 raidisseurs longitudinaux de longueur 750 mm et épaisseur 10 mm + 4 raidisseurs transversaux de longueur 400 mm et épaisseur 3 mm.

-mode 5 Assembler le profilé avec les raidisseurs : assemblage par 4 raidisseurs longitudinaux de longueur 750 et épaisseur 50 mm. (Voir Figure.3.7 et Figure.3.8)

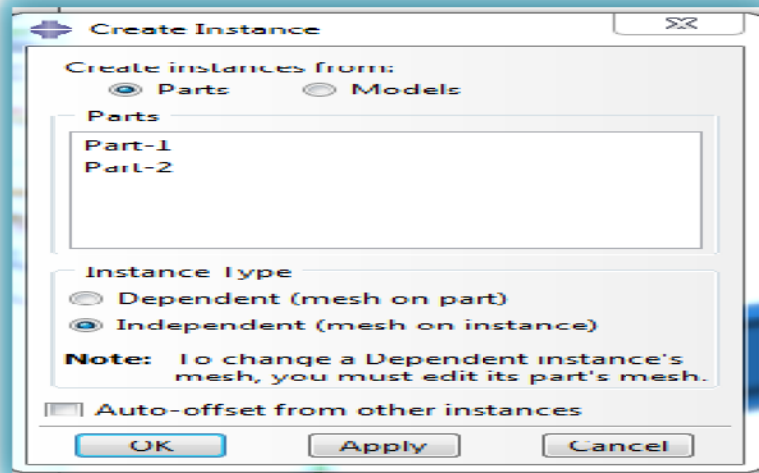
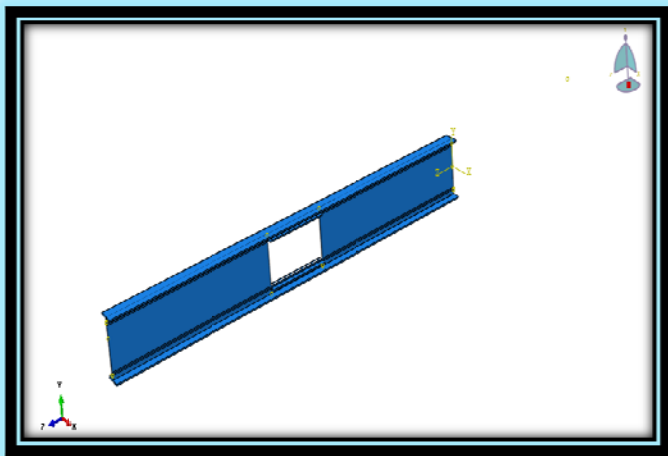
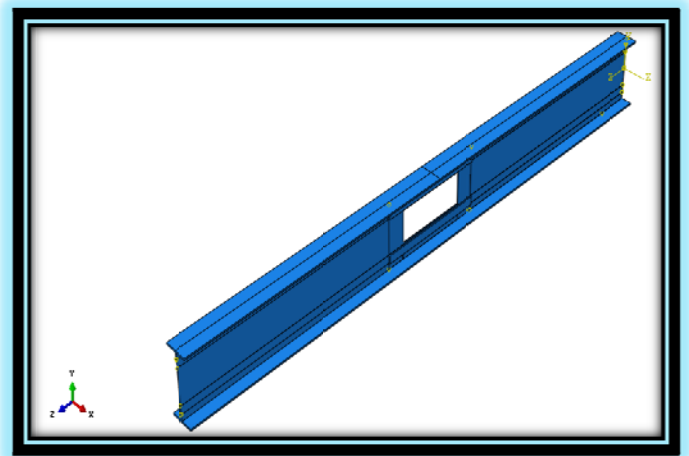


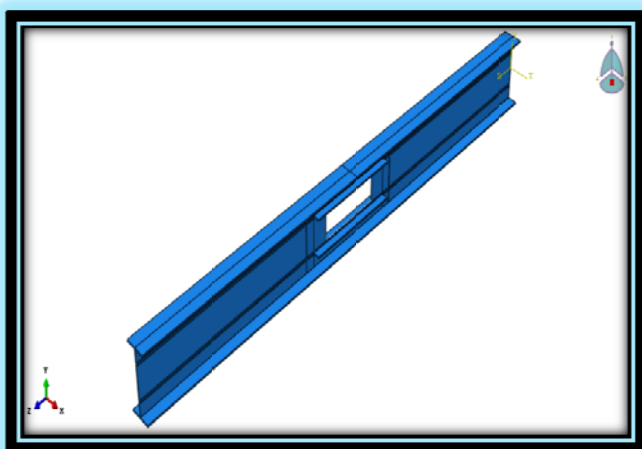
fig.3.7 création d'assemblage Mode 1



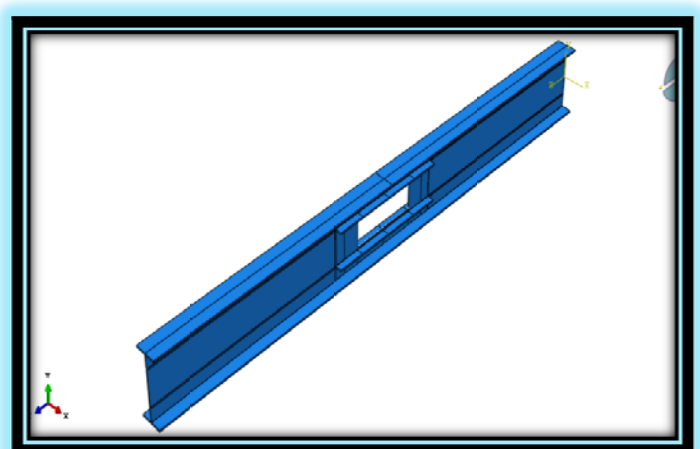
Mode 1



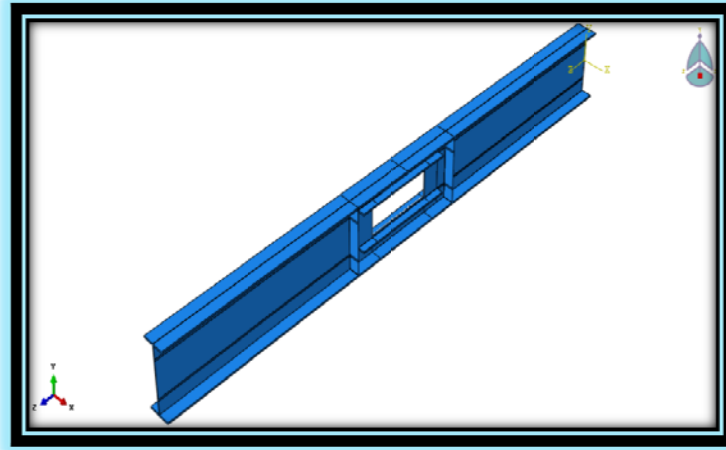
Mode 2



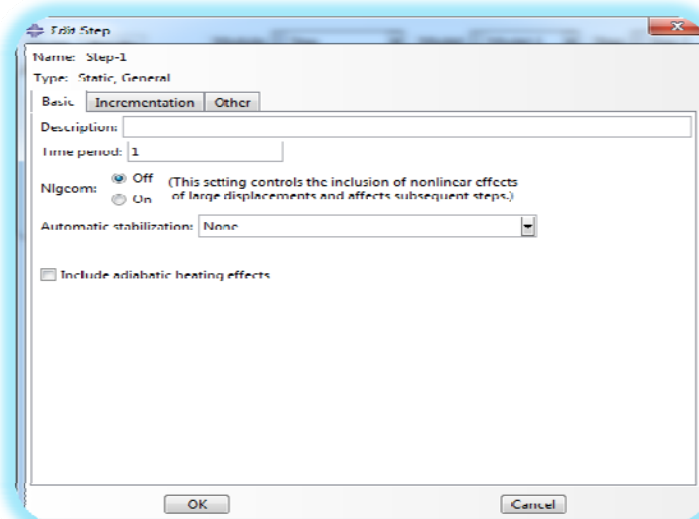
Mode 3



Mode 4

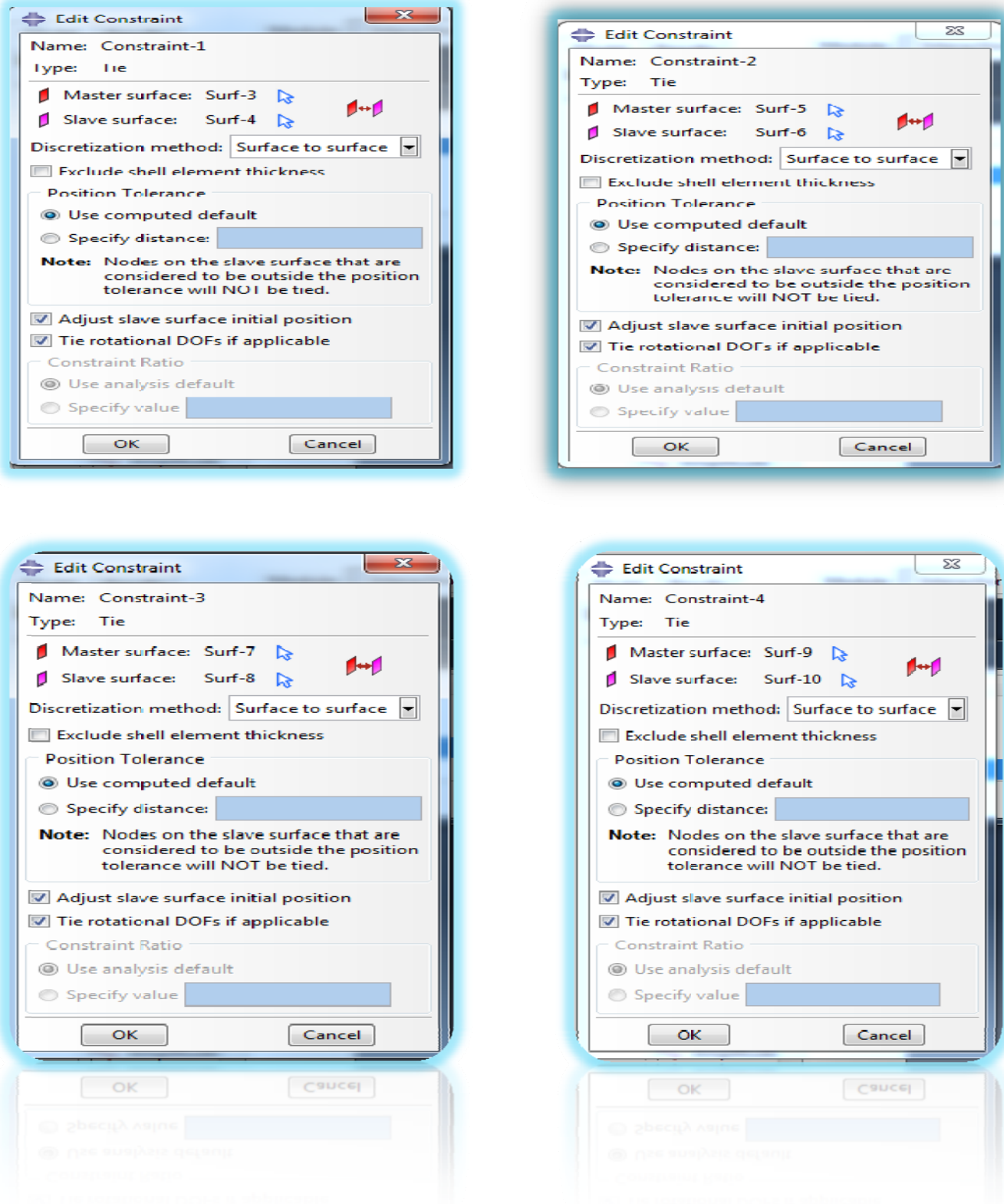


Mode 5

**Fig.3.8** assemblages des raidisseurs**III-11-4 Définition Étape (Step) :****Fig.3.9** Step pour les deux éléments

**III-11-5 Définition l'interaction (interaction) :**

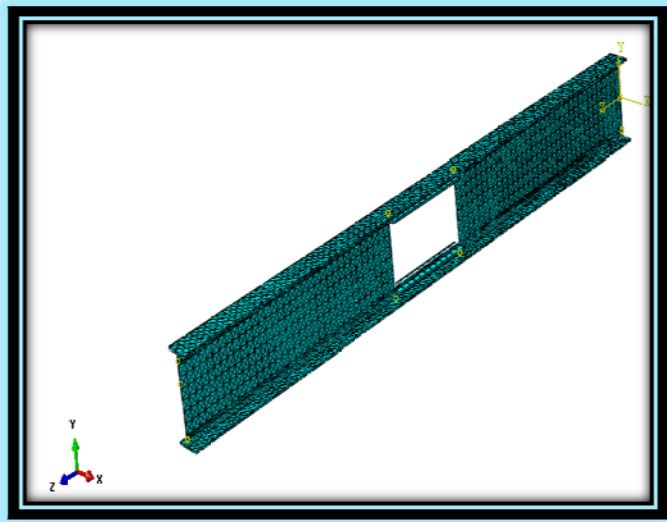
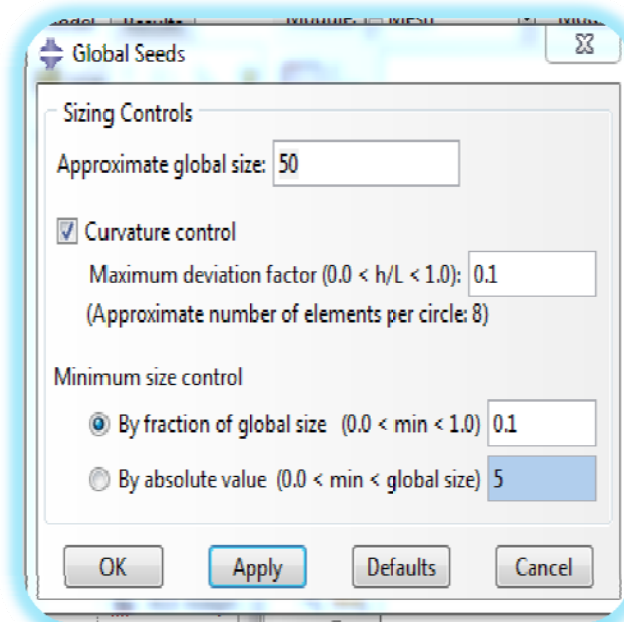
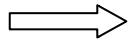
Pour tous les modes (Voir Figure 3.10)



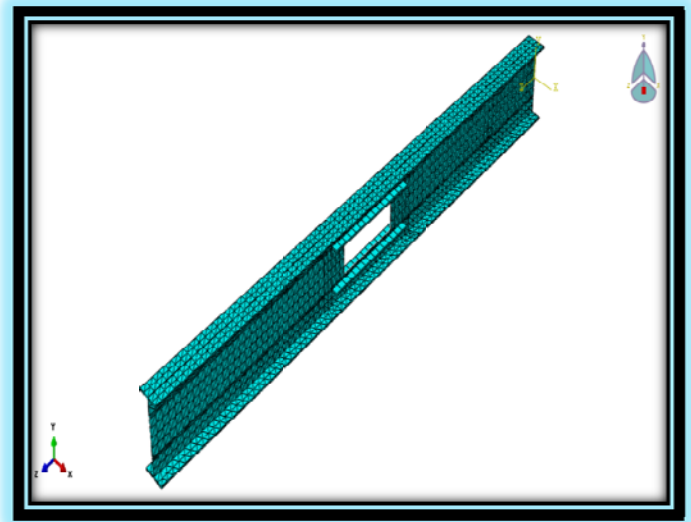
**Fig.3.10** la création de l'interaction



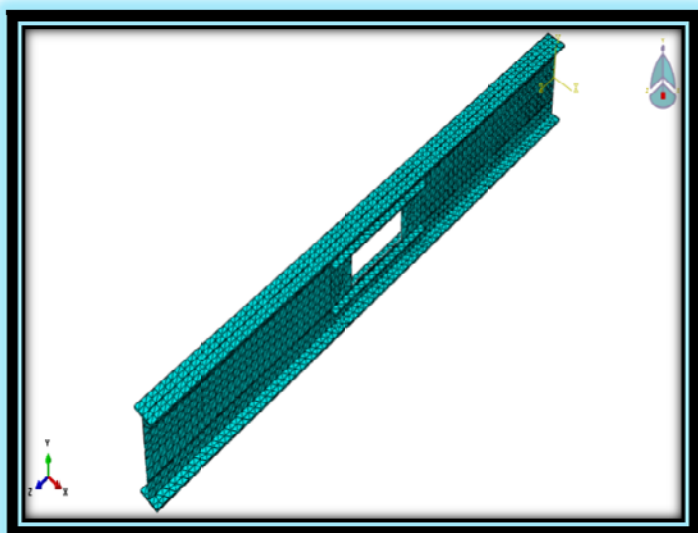
**III-11-6 Définition Maillage (Mesh) :** (Voir Figure 3.11)



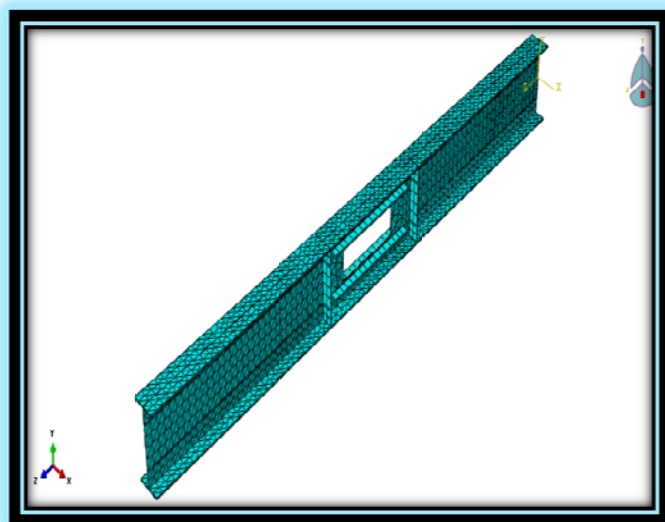
Mode 1



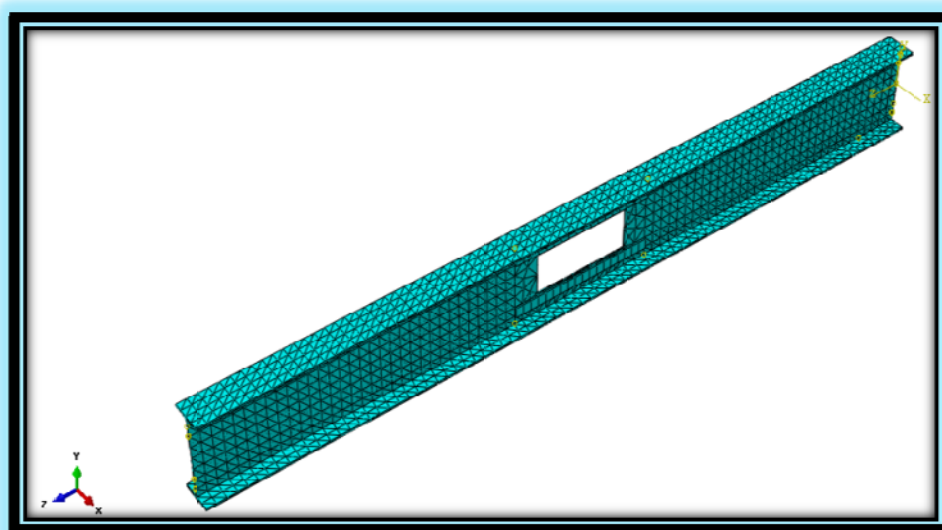
Mode 2



Mode 3



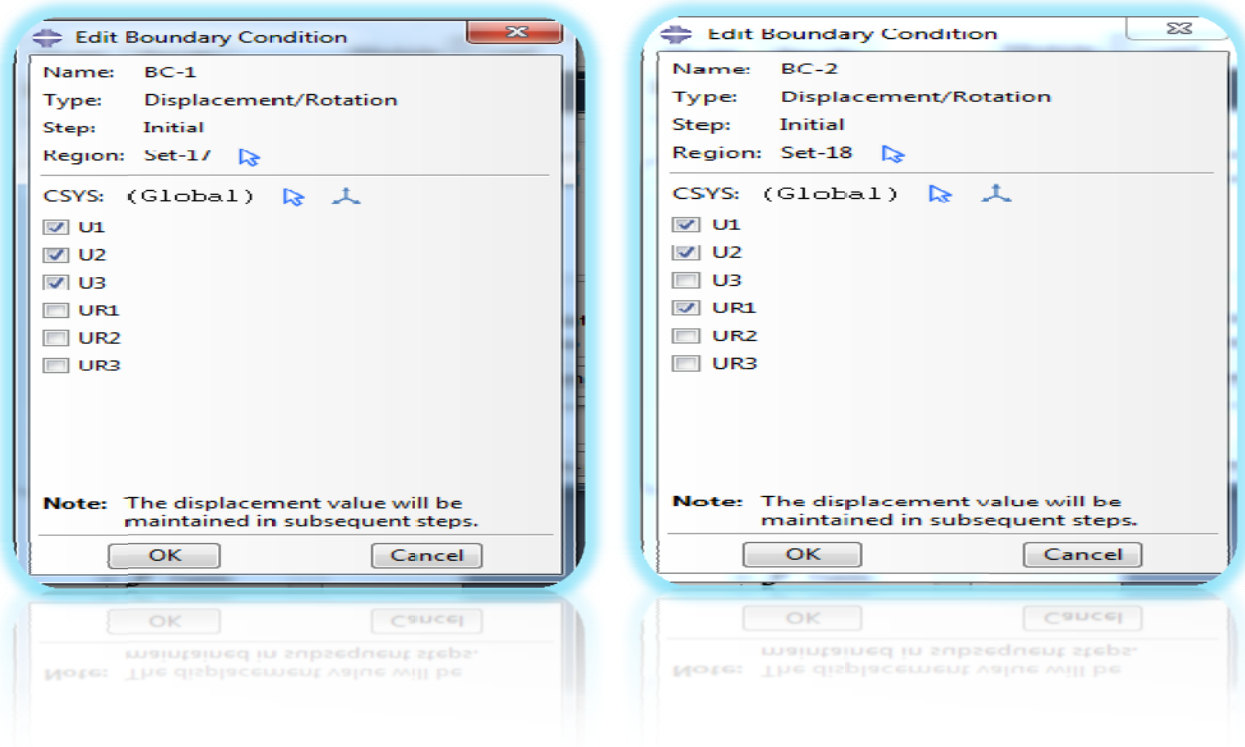
Mode 4



Mode 5

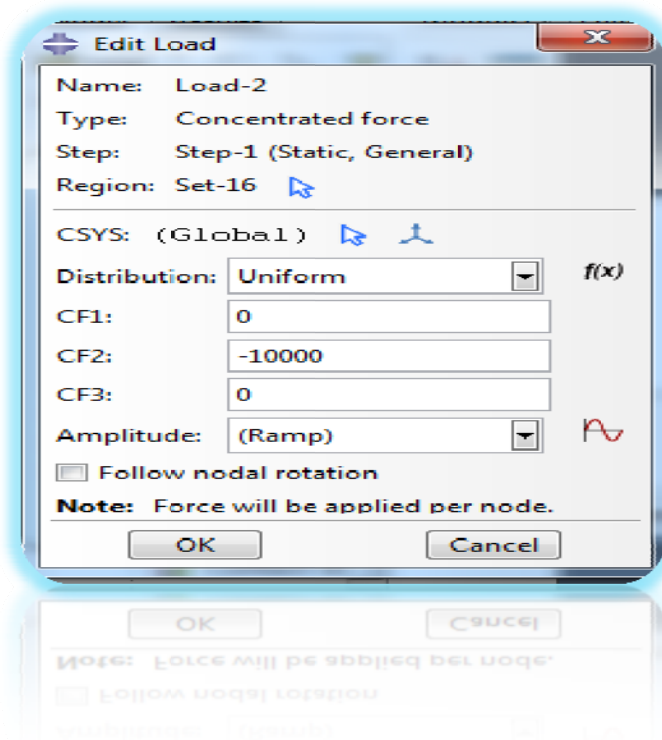
**Fig.3.11** la création de maillage pour tous les modes

**III-11-7 Définition Condition aux limites et Charge (Load) :** (Voir figure 3.12)

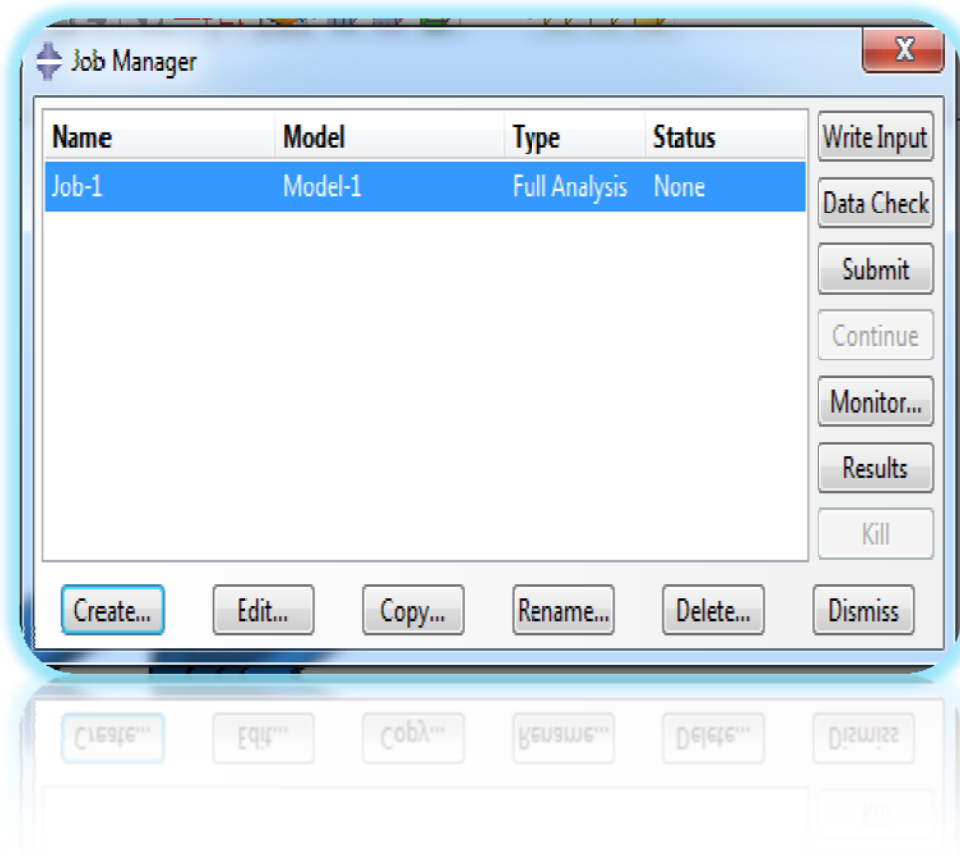


**Fig.3.12** la création de Condition aux limites

- **Chargement :**(Voir Figure 3.12)



**Fig.3.12** la création de Condition aux limites

**III-11-8 Démarre l'Analyse (Job) :****Fig.3.13**Démarrage de l'Analyse**IV-Conclusion :**

Le calcul des modèles et les résultats correspondants ci-dessus seront représentés au chapitre suivant.

## CHAPITRE IV

### RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### IV-1 Introduction :

Dans cette partie sont présentés les différents résultats de l'étude numérique de notre modèle.

#### IV-2 Présentation du modèle étudié :

Le modèle numérique proposé représente une poutre métallique ajourée en acier S235 appuyée sur deux appuis, et soumise à une charge concentrée appliquée au milieu de la poutre.

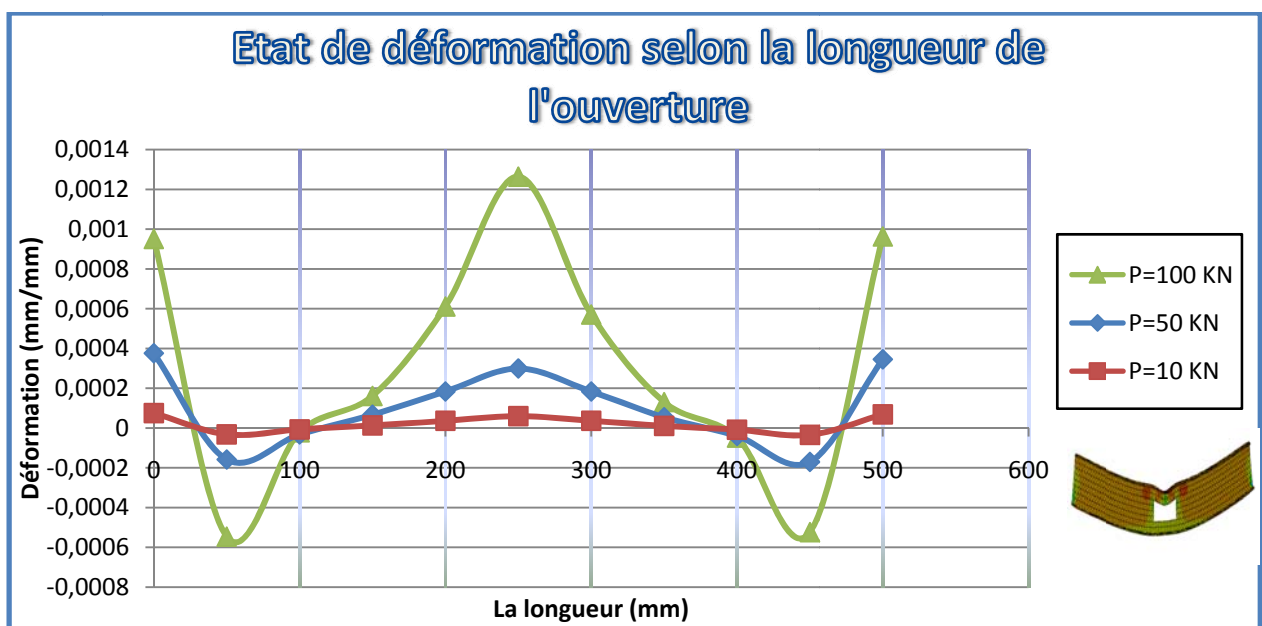
Le présent travail s'intéresse à l'étude du comportement d'une poutre à ouverture rectangulaire d'âme avec ou sans raidisseur vis-à-vis de la flexion.

Différentes configurations de raidisseurs sont utilisées, ainsi qu'une évaluation des charges appliquées au profilé en vue d'obtenir les résultats au niveau de l'ouverture.

#### IV-3 Résultats :

##### ❖ Etat de déformation selon la longueur l'ouverture :

Les résultats présentés ci-dessous représentent l'état de déformation de modèle avec ouverture sans renforcement, Les mesures ont été prises au niveau de la longueur de l'ouverture :



**Fig.4.1** Graphe déformation selon la longueur d'ouverture de modèle sans renforts

### Conclusion :

On Constate que :

- pour les charges 10 KN et 50 KN appliquées, Les déformations enregistrées dans la poutre sont maximum au niveau des coins par rapport au milieu, l'écart des valeurs des déformations au niveau des coins par rapport aux celles de milieu sont estimées à 25%.
- Pour la charge 100 KN appliquée, les déformations enregistrées au niveau de milieu sont plus grand de 20% par rapport aux déformations au niveau des coins.
- 3-Pour les trois charges appliquées, les déformations augmentent quand les charges augmentent.

### ❖ Etat contrainte de selon la longueur de l'ouverture :

Les résultats présentés ci-dessous représentent l'état de contrainte de modèle avec ouverture sans renforcement, Les mesures ont été prises au niveau de la longueur de l'ouverture :

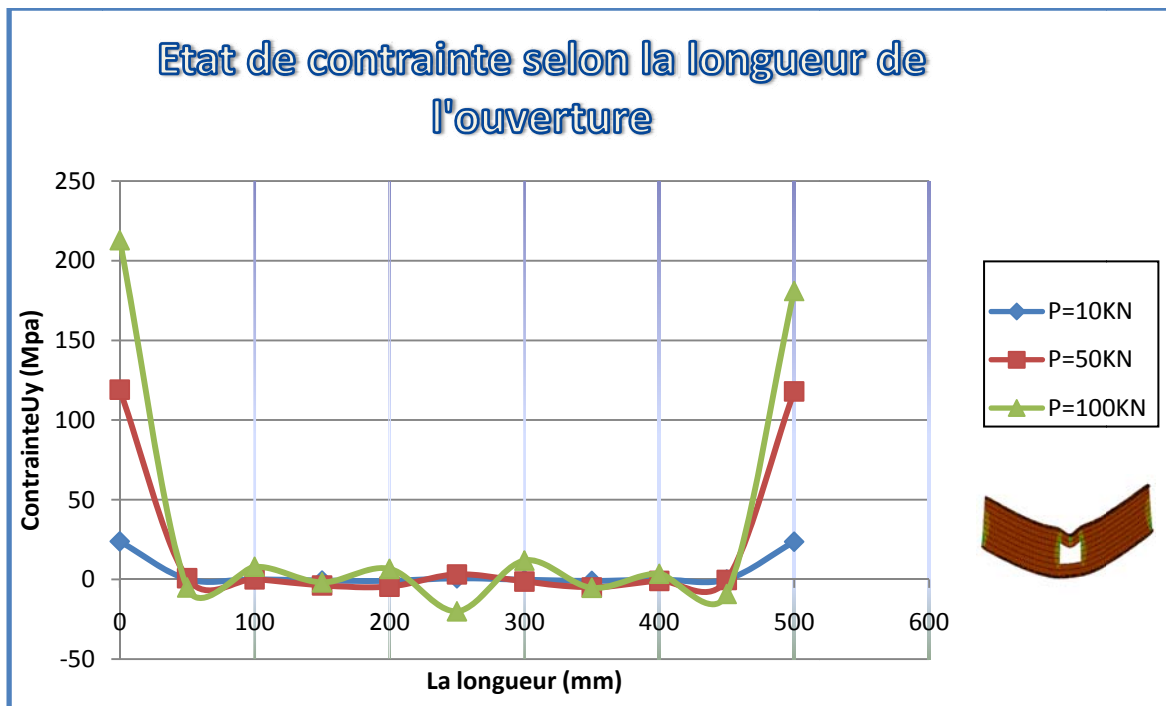


Fig.4.2 Graphe contrainte selon la longueur d'ouverture de modèle sans renforts

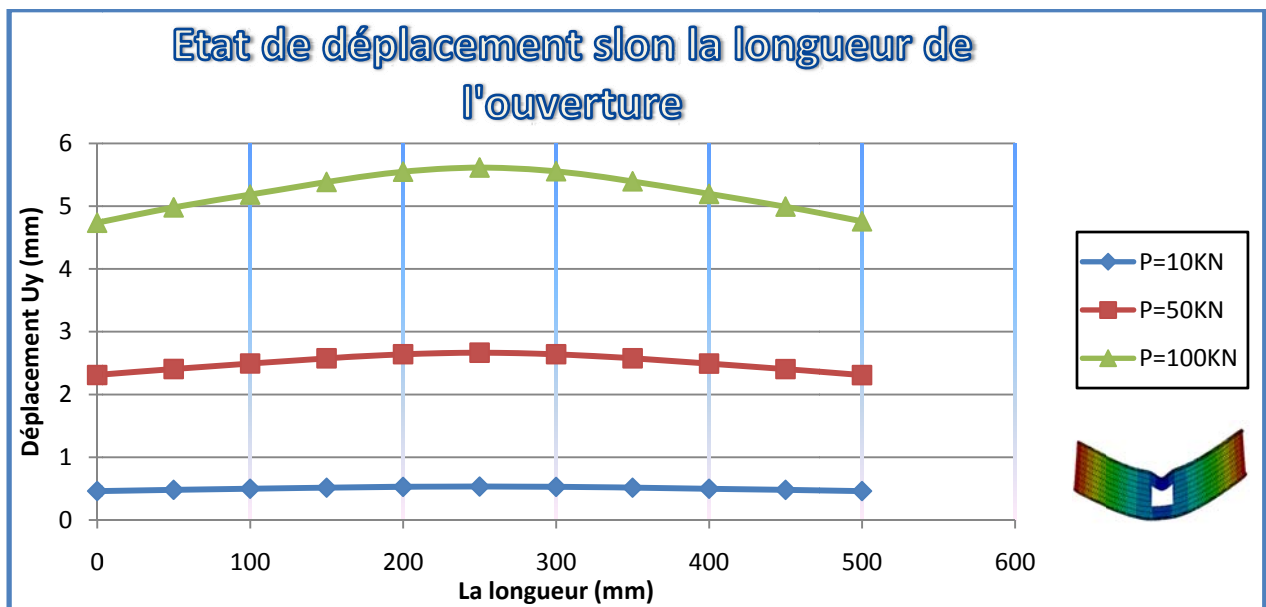
**Conclusion :**

-On constate que :

- Pour les trois charges appliquées, les Contraintes extrêmes au niveau des coins augmentent quand les charges augmentent,
- Les valeurs maximum des contraintes enregistrées sont au niveau des coins, par contre au niveau de milieu sont à peu près stable et sont d'ordre minimum par rapport aux coins.

❖ **Etat de déplacement de selon la longueur de l'ouverture :**

Les résultats présentés ci-dessous représentent l'état de déplacement de modèle avec ouverture sans renforcement, Les mesures ont été prises au niveau de la longueur de l'ouverture :



**Fig.4.3** Graphe déplacement selon la longueur d'ouverture de modèle sans renforts

**Conclusion :**

D'après le graphe ci-dessus, les déplacements maximums sont enregistrés au niveau de milieu.

- Il y'a un rapport direct entre le déplacement et la charge, le déplacement augmente quand la charge augmente.

- Pour la charge appliquée de 100 KN, le taux de déplacement enregistré dans le milieu est plus grand de 20% par rapport au coin.

#### ❖ Etat de déformation-contrainte de la poutre ajourée : $(\sigma_2, \varepsilon_2)$

Les résultats présentés ci-dessous représentent l'état de déformation – contrainte des différents modèles renforcés et non renforcés avec des raidisseurs horizontaux. Les mesures ont été prises au coin de l'ouverture censée avoir les sollicitations maximales.

Les différents modèles d'étude sont présentés au chapitre III.

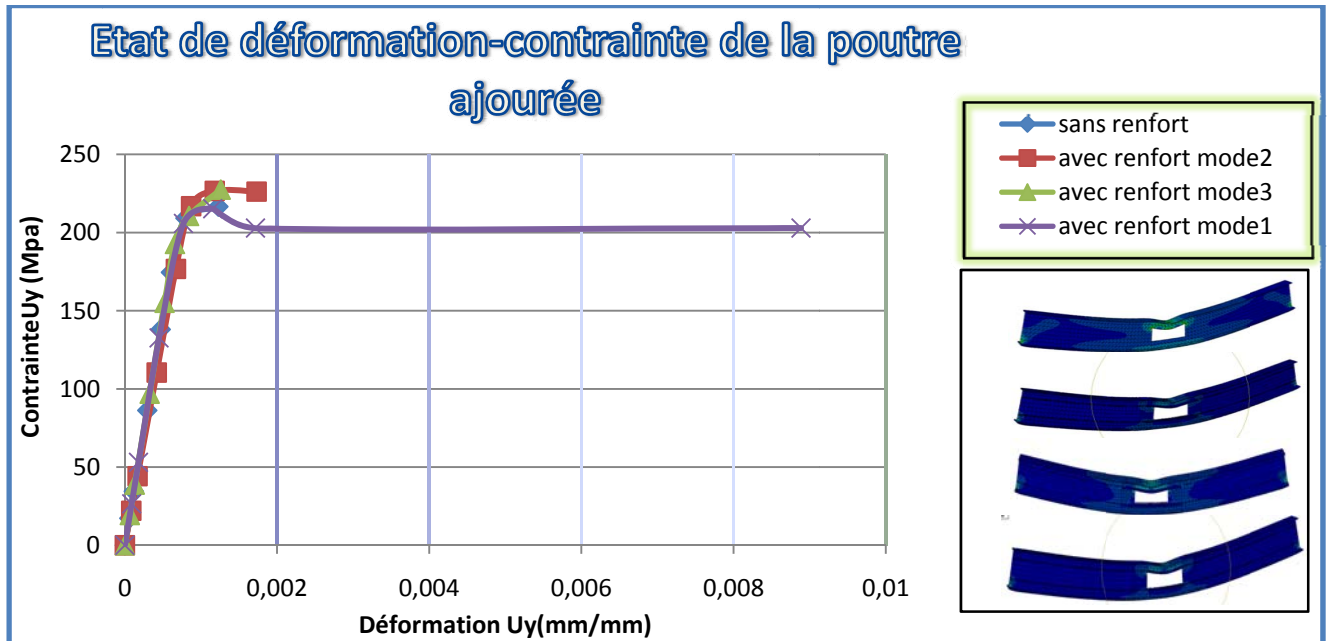


Fig.4.4 Graphe déformation-contrainte de modèles avec et sans renforts.

#### Conclusion :

- Les raidisseurs horizontaux d'épaisseur 10 mm n'ont pas une influence significative sur les contraintes mesurées au coin de l'ouverture.

#### ❖ Etat de charge-déplacement de la poutre ajourée : $(U_2, P)$

Les résultats présentés ci-dessous représentent l'état de charge – déplacement des différents modèles renforcés et non renforcés avec des raidisseurs horizontaux. Les mesures ont été prises au milieu de l'ouverture censée avoir les déplacements maximums.

Les différents modèles d'étude sont présentés au chapitre III.



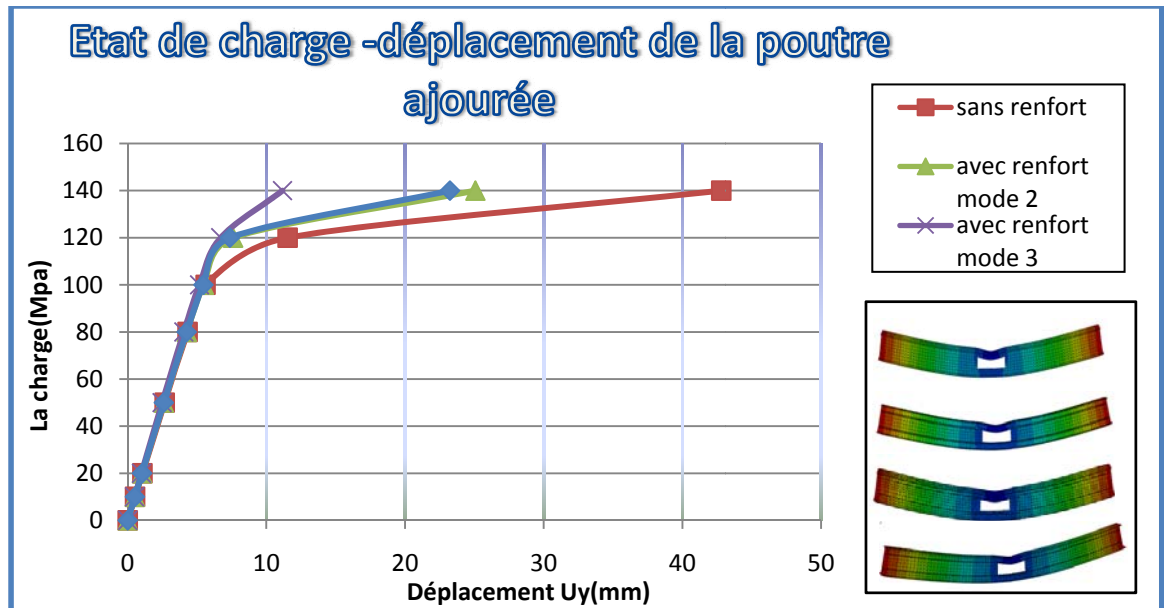


Fig.4.5 Graphe Charge-déplacement de modèles avec et sans renforts.

### Conclusion :

-Jusqu'à une valeur de charge égale à 100 kN, les déplacements sont pratiquement invariables. A partir de cette valeur, les déplacements divergent pour atteindre une valeur de 43 mm correspondant à une charge de 140 kN.

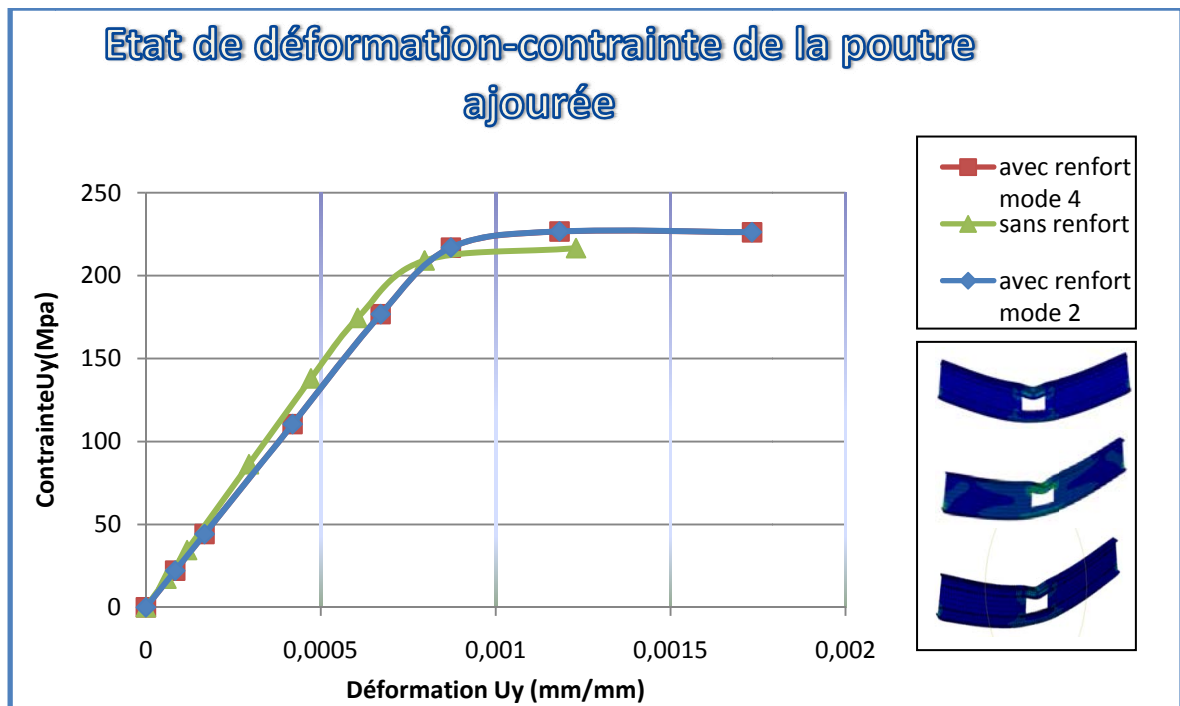
La différence de déplacement a atteint une valeur de 75% pour les poutres sans renfort et celle avec renfort mode 3.

Le même constat peut être fait avec les autres modes de renfort. On conclue que la longueur des raidisseurs a une influence sur le déplacement du haut de l'ouverture.

### ❖ Etat de déformation-contrainte de la poutre ajourée : ( $\sigma_2$ - $\epsilon_2$ )

Les résultats présentés ci-dessous représentent l'état de déformation – contrainte des différents modèles renforcés et non renforcés avec des raidisseurs horizontaux. Les mesures ont été prises au coin de l'ouverture censée avoir les sollicitations maximales.

Les différents modèles d'étude sont présentés au chapitre III.



**Fig.4.6** Graphe déformation-contrainte de modèles avec présence de renforts horizontaux et verticaux

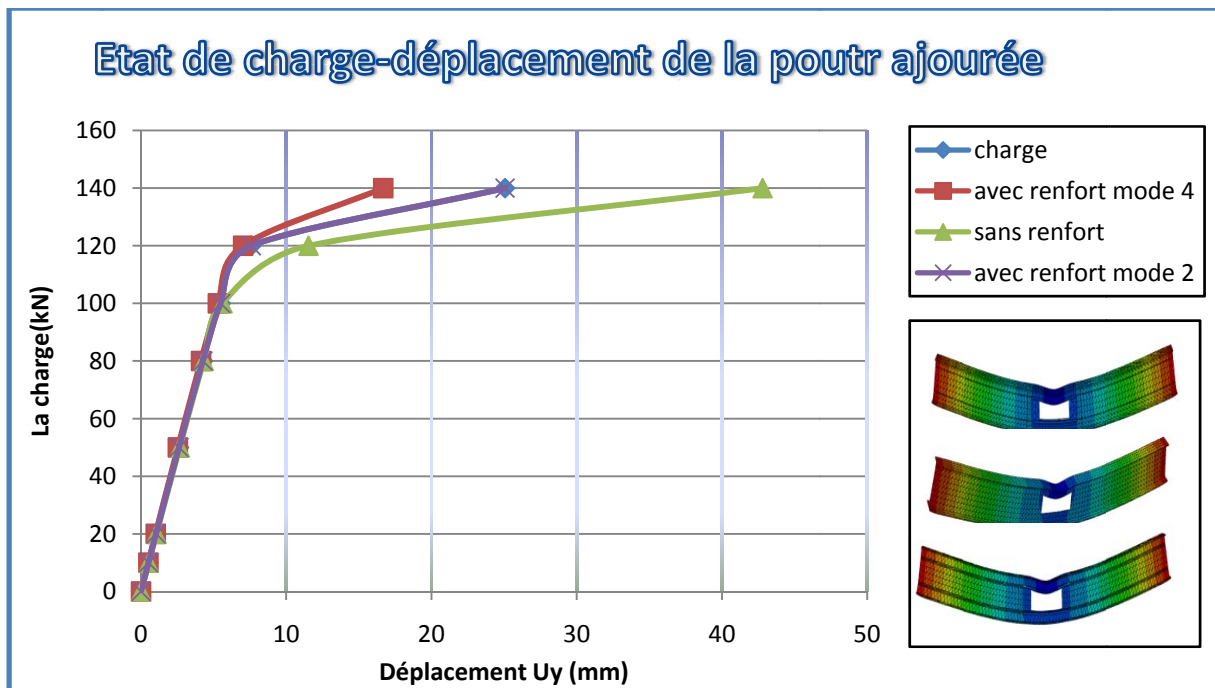
#### Conclusion :

- Les courbes de variation des contraintes ont la même allure jusqu'à une valeur de la limite élastique du matériau

#### ❖ Etat de la charge-déplacement de la poutre ajourée :( $U_2$ - $P$ )

Les résultats présentés ci-dessous représentent l'état de charge – déplacement des différents modèles renforcés et non renforcés avec des raidisseurs horizontaux. Les mesures ont été prises au milieu de l'ouverture censée avoir les sollicitations maximales.

Les différents modèles d'étude sont présentés au chapitre III.



**Fig.4.7** Graphe Charge-déplacement de modèles avec et sans renforts.

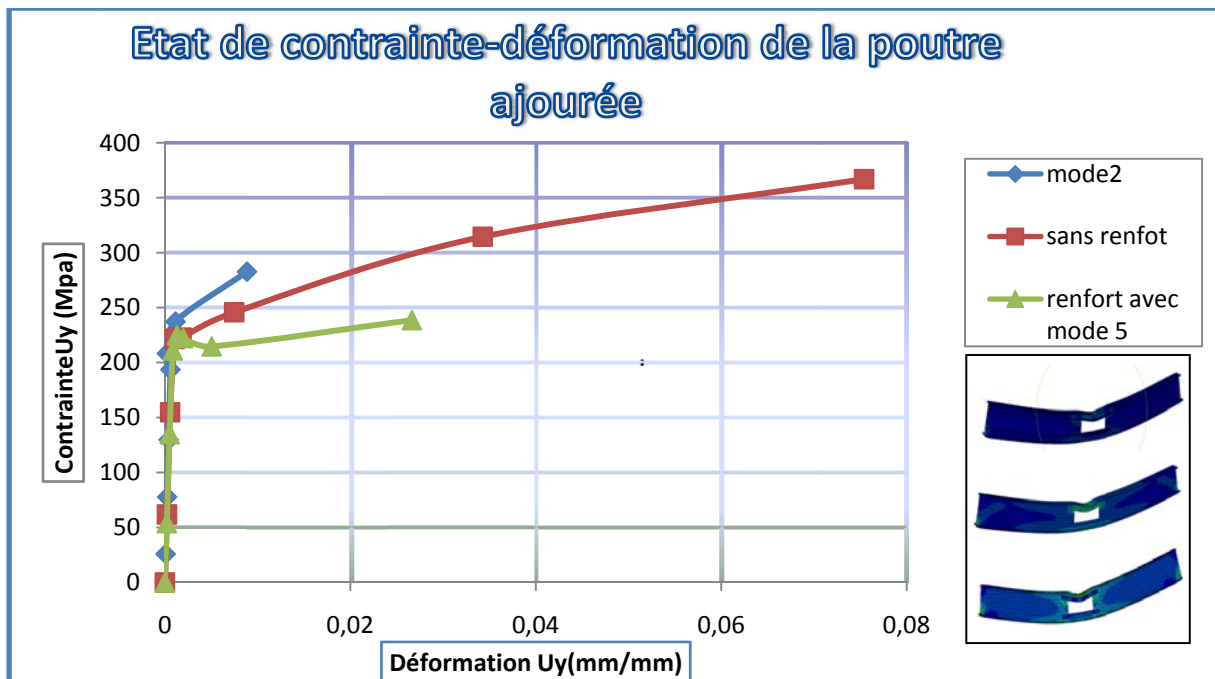
### Conclusion :

- On constate que les courbes de charge-déplacement ont la même allure jusqu'à une charge de 120 kN ; on conclue que l'ajout de raidisseurs verticaux n'est pas signifiante.
- La présence de raidisseurs verticaux devient significative au-delà de cette charge pour atteindre une différence de 64% et 226% par rapport à une poutre sans renforts

### ❖ Etat de déformation-contrainte de la poutre ajourée : ( $\sigma_2$ - $\epsilon_2$ )

Les résultats présentés ci-dessous représentent l'état de déformation – contrainte des différents modèles renforcés et non renforcés avec des raidisseurs horizontaux. Les mesures ont été prises au coin de l'ouverture censée avoir les sollicitations maximales.

Les différents modèles d'étude sont présentés au chapitre III.



**Fig.4.8** Graphe de contrainte-déformation de modèles avec et sans renforts

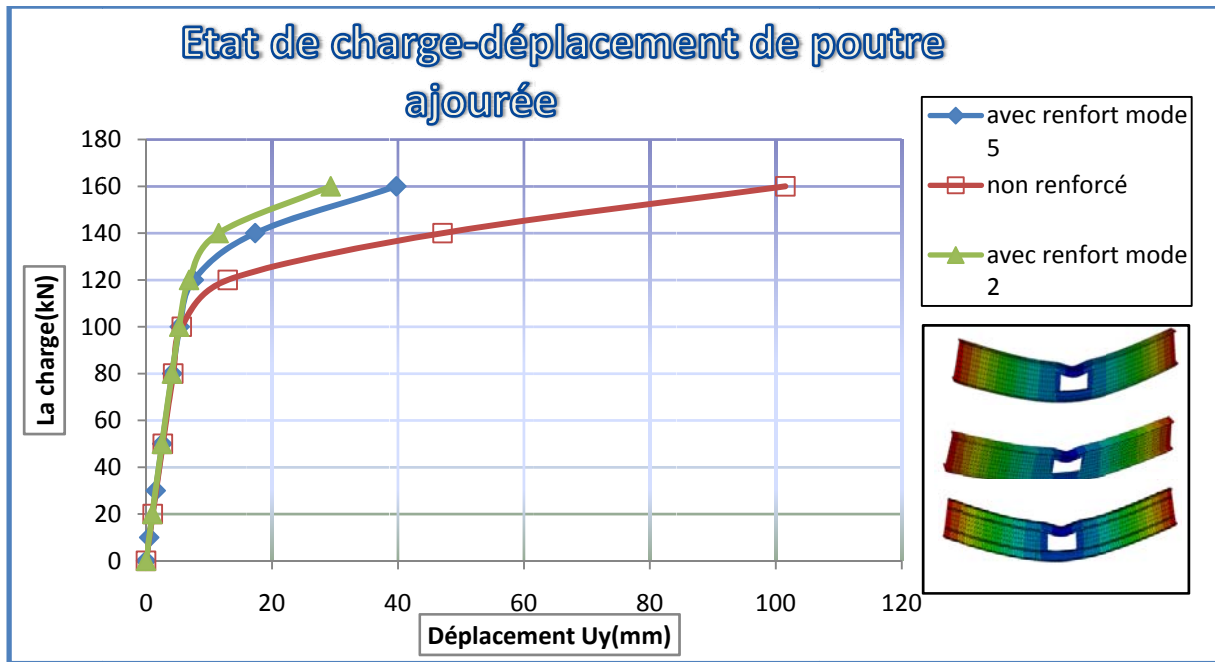
### Conclusion :

- Les déformations restent pratiquement invariables et ce jusqu'à la limite élastique, valeur à partir de laquelle les déformations divergent.

### ❖ Etat de la charge-déplacement de la poutre ajourée :( $U_2$ - P)

Les résultats présentés ci-dessous représentent l'état de charge – déplacement des différents modèles renforcés et non renforcés avec des raidisseurs horizontaux. Les mesures ont été prises au milieu de l'ouverture censée avoir les sollicitations maximales.

Les différents modèles d'étude sont présentés au chapitre III.



**Fig.4.9** Graphe Charge-déplacement de modèles avec et sans renforts.

### Conclusion :

Le déplacement vertical au milieu de l'ouverture est remarquable à partir d'une valeur de charge de 100 kN et ce en fonction de l'épaisseur des raidisseurs.

### CONCLUSION GENERALE

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique qui englobe des généralités sur les produits en acier, on s'est intéressé au profilé reconstitué soudés ainsi qu'à leur mode de fabrication, domaine d'emploi, et types.

Ensuite on a mentionné les poutres en acier avec ouvertures dans l'âme, leurs modes de fabrication, géométrie et les différents modes de ruine qui peut survenir au niveau ou proximité des ouvertures.

Le deuxième chapitre est une présentation de la méthode de raidissage et renforcement des ouvertures d'âme, ainsi que la détermination des différentes sollicitations et le dimensionnement des raidisseurs longitudinaux et transversaux.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude numérique appliquée au modèle, afin de déterminer les déformations, les contraintes et les déplacements subies au niveau de l'ouverture. Cette étude repose principalement sur ABAQUS et sur les résultats trouvés.

**Pour la poutre sans renforts :**

- ✓ pour les charges 10 KN et 50 KN appliquées, Les déformations enregistrées dans la poutre sont maximum au niveau des coins par rapport au milieu, l'écart des valeurs des déformations au niveau des coins par rapport aux celles de milieu sont estimées à 25%.
- ✓ Pour la charge 100 KN appliquée, les déformations enregistrées au niveau de milieu sont plus grand de 20% par rapport aux déformations au niveau des coins.
- ✓ Pour les trois charges appliquées, les déformations augmentent quand les charges augmentent.
- ✓ Pour les trois charges appliquées, les Contraintes extrêmes au niveau des coins augmentent quand les charges augmentent,
- ✓ Les valeurs maximum des contraintes enregistrées sont au niveau des coins, par contre au niveau de milieu sont à peu près stable et sont d'ordre minimum par rapport aux coins.
- ✓ Il y'a un rapport direct entre le déplacement et la charge, le déplacement augmente quand la charge augmente.
- ✓ Pour la charge appliquée de 100 KN, le taux de déplacement enregistré dans le milieu est plus grand de 20% par rapport au coin.
- **Pour les poutres avec renforts :**
  - ✓ Les raidisseurs horizontaux d'épaisseur 10 mm n'ont pas une influence significative sur les contraintes mesurées au coin de l'ouverture.
  - ✓ Jusqu'à une valeur de charge égale à 100 kN, les déplacements sont pratiquement invariables. A partir de cette valeur, les déplacements divergent pour atteindre une valeur de 43 mm correspondant à une charge de 140 kN.
  - ✓ La différence de déplacement a atteint une valeur de 75% pour les poutres sans renfort et celle avec renfort mode 3.
  - ✓ Le même constat peut être fait avec les autres modes de renfort. On conclue que la longueur des raidisseurs a une influence sur le déplacement du haut de l'ouverture.
  - ✓ Les courbes de variation des contraintes ont la même allure jusqu'à une valeur de la limite élastique du matériau
  - ✓ On constate que les courbes de charge-déplacement ont la même allure jusqu'à une charge de 120 KN ; on conclue que l'ajout de raidisseurs verticaux n'est pas signifiante.

- ✓ La présence de raidisseurs verticaux devient significative au-delà de cette charge pour atteindre une différence de 64% et 226% par rapport à une poutre sans renforts
- ✓ Les déformations restent pratiquement invariables et ce jusqu'à la limite élastique, valeur à partir de laquelle les déformations divergent.
- ✓ Le déplacement vertical au milieu de l'ouverture est remarquable à partir d'une valeur de charge de 100 KN et ce en fonction de l'épaisseur des raidisseurs.

**Références bibliographiques :**

[1] Web site internet :

- Wikipédia

[2] Chapitre I charpente métallique présenté par le Professeur Bensalah M.D

[3] Chapitre II sollicitations et combinaisons de charge présenté par le Professeur  
Bensalah M.D

[4] Mémoire du master 02 prestée par Bouafia Mounira

[5] Mémoire du master 02 prestée par Samira Zemouli

[6] Mémoire du master 02 prestée par Soltani Mohamed Rédha