

مهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : SCIENCES DE L'INGENIORAT

Département : GENIE CIVIL

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : CONSTRUCTIONS METALIQUES ET  
MIXTES

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**ÉTUDE NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT EN FLEXION D'UNE  
POUTRE EN ACIER FORMÉE À FROID AVEC DIFFÉRENTES  
FORMES D'ÂMES.**

Présenté par : - BRAHMIA Aymen

Encadrant : Dr.KOUIDER Nadia M.C.B Université Badji Mokhtar - ANNABA

### Jury de Soutenance :

SLIMANI Fayçal	MC.B	Badji Mokhtar Annaba	Président
KOUIDER Nadia	MC.B	Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
MEZIGUECHE NAWEL	MAA	Badji Mokhtar Annaba	Examineur

**u Diplôme de Master**

d

Année Universitaire : 2020/2021

ÉTUDE NUMÉRIQUE *Remerciements* EN FLEXION D'UNE  
POUTRE EN ACIER FORMÉE À FROID AVEC DIFFÉRENTES  
SECTIONS D'ÂMES.

Présenté par : - BRAHMIA Aymen

*J*

*M*

Encadrant : Dr.KOUIDER Nadia

M.C.B

Université Badji Mokhtar - ANNABA

**Jury de Soutenance :**

SLIMANI Fayçal	MC.B	Badji Mokhtar Annaba	Président
KOUIDER Nadia	MC.B	Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
MEZIGUECHE NAWEL	MAA	Badji Mokhtar Annaba	Examineur

## *Remerciements*

*Mes remerciements d'abord à dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné toujours.*

*Je tiens à remercier chaleureusement mon encadreur : Mme **Kouider** Nadia d'avoir accepté de diriger ce travail et de m'avoir prodigué des conseils scientifiques, ont été précieux et des orientations pour la réalisation de ce travail.*

*Des remerciements aux membres du jury, pour l'intérêt et d'avoir accepté de juger ce travail.*

*A l'ensemble des enseignants et surtout qui ont contribué à ma*

*formation ainsi que tout le personnel administratif qui, a participé au bon déroulement de ce travail, les enseignants du département de génie civil pour leur disponibilité, leur patience et les conseils qu'ils ont prodigué.*

*Mes remerciements vont aussi à tous mes parents, mes enseignants, mes amis et mes collègues de la promotion 2021.*

*A tous ceux qui, par leur encouragement ou leur amitié, ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce modeste travail*

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ

الْحَكِيمُ ﴿٣٢﴾ سورة البقرة، الآية 32

# Dédicace

*Je dédie cet ouvrage*

*A ma mère qui m'a soutenu et encouragé durant mes années d'études.*

*Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*A mon père mes frères et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

*A tous ceux que j'aime*



**SAMI** *R*

*Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont toujours donné le courage, la volonté et l'espoir de poursuivre les études. Je profite de cette occasion pour les remercier pour tous les sacrifices, leur affection qu'ils n'ont jamais cessé de me prodiguer*

*A mon chère cousin <<Ghalmi Mohamed Edjed >>*

*A tous mes amis et mes collègues sans exception*

*A tous ceux que j'aime*



*Amen*

## Sommaire

<b>Sommaire</b>	<b>I</b>
Liste des figures	II
Liste des tableaux	VI
Liste des notations	VII
Résumé	1
Introduction générale	4

### Chapitre I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

I.1	Généralités sur le matériau acier :	7
I.2	Application des aciers :	7
I.3	Le profilage:	8
I.4	Domaine d'application et utilisation des profilés formé à froid:	10
I.5	Caractéristiques technologiques :	11
I.5.1	Soudabilité:	11
I.5.2	Fissuration à chaud :	11
I.5.3	Arrachement lamellaire :	11
I.5.4	Fissuration à froid:	11
I.6	Les familles d'acier :	12
I.6.1	Aciers inoxydables :	12
I.6.2	Aciers décapés :	12
I.6.3	Acier pré-laqué :	12
I.7	Les formes de produits :	12

I.7.1	Laminage à chaud :	12
I.7.2	Laminage à froid :	12
I.7.3	Galvanisation Sendzimir :	12
I.7.4	Galvanisation par trempage :	12
I.8	Les produits plats :	13
I.8.1	Les tôles et les larges plats :	13
I.8.2	Les tôles nervurées :	13
I.9	Les profils creux :	13
I.10	Les profils minces :	13
I.11	Les plaques :	14
I.12	Laminage à froid :	14
I.12.1	Présentation du procédé du laminage :	14
I.12.2	Laminoirs à froid (laminoirs à bandes L F) :	15
I.13	Fabrication et domaine d'application des profilés formés froid :	16
I.13.1	Fabrication :	16
I.13.2	Domaine d'application :	17
I.13.3	Avantages des éléments formés à froid :	19
I.13.4	Les caractéristiques particulières des sections en acier formées à froid :	19
I.14	Effet de formatage à froid sur le comportement de l'acier :	21
I.15	Les phénomènes d'instabilité des profils formés à froids :	22
I.15.1	Introduction :	22
I.15.2	Définition des phénomènes d'instabilité:	23
I.15.3	Domaine d'application :	26
I.16	Conception des poutres en profilé formé à froid :	28
	Conclusion :	34

**Chapitre II : ASPECT REGLEMENTAIRE.**

II.1	Introduction :	34
II.1.1	Présentation des modèles d'étude :	34
II.1.2	Les propriétés géométriques et mécaniques des poutres :	35
II.2	Vérification selon l'approche de l'Eurocode 3 partie 1.3. :	37
II.2.1	Base de calcul :	37
II.2.2	Coefficient de sécurité :	37
II.2.3	Caractéristiques des matériaux :	38
II.2.4	Caractéristiques des sections :	39
II.2.5	Limite d'élasticité moyenne augmentée :	40
II.2.6	Proportions géométriques :	41
II.3	Instabilité Locale :	42
II.3.1	Principe de la méthode de la « largeur effective » :	42
II.3.2	Parois non raidies :	43
II.3.3	Parois munis de raidisseurs de bords et intermédiaire :	46
II.4	Résistance des Sections Transversales :	47
II.4.1	Traction axiale :	47
II.4.2	Compression axiale :	48
II.4.3	Moment fléchissant :	48
II.5	Exemple d'analyse de la poutre forme I selon EC3 à la flexion simple :	51
II.5.1	Détermination des caractéristiques des sections:	51
II.5.2	Vérification des proportions géométriques:	51
II.5.3	Propriétés de la section efficace des semelles et des bords comprimés:	52
	Première étape:	52
	Deuxième étape	54
	Troisième étape :	57

II.5.4	Vérification de la résistance à la flexion:	61
	Conclusion :	62

### **Chapitre III : ETUDE NUMERIQUE DES POUTRES EN I AVEC DIFFERENTES ÂMES SOUS ABAQUS.**

III.1	Introduction :	63
III.2	Présentation de logiciel ABAQUS 2017 :	64
III.2.1	Présentation de logiciel abaqus :	64
III.2.2	Modele de conception de l'element :	66
III.3	Présentation du modèle étudié :	68
III.4	Définition des propriétés du modèle (Property) :	70
III.5	Définition l'assemblage du modèle(Assembly):	71
III.6	Définition Étape (Step) :	71
III.7	Définition Maillage (Mesh) :	72
III.8	Condition aux limites et chargements (Load):	72
	<b>RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>	<b>75</b>
	<b>Conclusion</b>	<b>81</b>
	<b>Conclusion générale :</b>	<b>82</b>
	<b>Référence bibliographique</b>	<b>83</b>

## Liste des figures.

### Figures

### Page

#### Chapitre I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Processus de profilage.	8
Figure I.2 : Tête de profileuse.	9
Figure I.3 : Le pliage.	9
Figure I.4 : Procédé de pliage.	10
Figure I.5 : Etapes de formage pour une presse plieuse.	10
Figure I.6 : Différents types de profilés laminés à froid.	17
Figure I.7 : Formes typiques de raidisseurs pour profilés et plaques formés à froid.	17
Figure I.8 : Exemples des tôles ondulées pour les toitures, revêtements muraux et planchers.	18
Figure I.9 : Raidisseurs de bord typiques.	18
Figure I.10 : Contraintes résiduelles de flexion dans une section en acier formée à froid avec bord tombé.	20
Figure I.11 : Courbe contrainte-déformation de l'acier avant et après mise en forme.	21
Figure I.12 : Courbe de comportement de l'acier.	22
Figure I.13 : Charges critiques et déformés d'une section en C.	22
Figure I.14 : Voilement d'une plaque.	23
Figure I.15 : La forme sinusoidale de la déformé (section en U).	23
Figure I.16 : Flambement global d'une section en C.	24
Figure I.17 : Instabilité distorsionnelle d'une section en C.	24
Figure I.18 : Instabilité distorsionnelle d'une section en C avec raidisseur d'âme.	25
Figure I.19 : Modes de flambement d'une barre simplement comprimée	25
Figure I.20 : Exemple de plaques formées à froid.	27
Figure I.21 : Exemples de Profilés ouvert simple et poutres formées à froid.	27
Figure I.22 : Poutres formés à froid (pannes et lisses profilés sigma).	28
Figure I.23 : Détails du montage d'essai pour la poutre formés à froid avec âme trapézoïdale.	29
Figure I.24 : Essais de flexion trois points pour les poutres à âme simple et à âme trapézoïdale.	30
Figure I.25 : Modélisation numérique sous ANSYS des poutres à âme simple et à âme trapézoïdale.	31
Figure I.26 : Schéma de rupture des poutres à âme simple et à âme trapézoïdale sous l'essai de flexion trois points.	33

## Chapitre II : ASPECT REGLEMENTAIRE

Figure II.1 : Présentation des sections transversales des poutres étudiées.	37
Figure II.2 : Présentation des sections transversales de la poutre à âme trapézoïdales.	37
Figure II.3 : Présentation de la poutre à âme simple (âme pleine).	38
Figure II.4 : Présentation de la poutre à âme trapézoïdales.	38
Figure II.5 : Présentation de la poutre à âme triangulaire.	39
Figure II.6 : Point médian d'un arrondi ou de pli.	41
Figure II.7 : Largeur de référence des parois.	41
Figure II.8 : Largeur de référence des parois adjacentes des raidisseurs.	41
Figure II.9 : Largeur efficace.	45
Figure II.10 : Paroi avec raidisseur.	48
Figure II.11 : Section transversale efficace en compression.	50
Figure II.12 : Flexion générée par l'effort F.	50
Figure II.13 : Section transversale efficace en résistance en moment fléchissant.	52
Figure II.14 : Section transversale de la poutre I.	53
Figure II.15 : Caractéristiques géométriques de la section efficace type I.	53
Figure II.16 : Section efficace du profilé type I.	62

## Chapitre III : ETUDE NUMERIQUE DES POUTRES EN I AVEC DIFFERENTES ÂMES SOUS ABAQUS

Figure III.1 : Différents types d'élément de la bibliothèque d'Abaqus.	65
Figure III.2 : Principe de calcul sous le logiciel ABAQUS.	67
Figure III.3 : Organisation d'Abaqus	68
Figure III.4 : Présentation d'une poutre en I avec âme simple ( pleine)	69
Figure III.5 : Présentation d'une poutre en I avec âme ondulée triangulaire.	69
Figure III.6 : Présentation d'une poutre en I avec âme ondulée trapézoïdale.	70
Figure III.7 : Les propriétés intégrés dans la modélisation des poutres	70
Figure III.8 : Assemblage des poutres de forme I avec différentes section d'âme	71
Figure III.9 : Maillage des poutres avec différents âme ( simple, triangulaire et trapézoïdale)	72
Figure III.10 : Condition aux limites pour les poutres étudiées	72
Figure III.11 : L'essai de flexion trois points pour les 03 modèles étudiés.	73

Figure III.12 : Les valeur de l'état $\sigma_{yy}$ la poutre I avec âme simple.	73
Figure III.13 : Les valeur de l'état $\sigma_{yy}$ la poutre I avec âme trapézoïdale.	73
Figure III.14 : Les valeur de l'état $\sigma_{yy}$ la poutre I avec âme triangulaire.	74
Figure III.15 : Les valeur des déplacements $U_y$ de la poutre I avec âme simple.	74
Figure III.16 : Les valeur des déplacements $U_y$ la poutre I avec âme trapézoïdale.	74
Figure III.17 : Les valeurs des déplacements $U_y$ de la poutre I avec âme triangulaire.	75
Figure III.18 : Etat de déformation selon la longueur des poutres étudiées	76
Figure III.19 : Etat de contrainte $\sigma_{yy}$ selon la longueur des poutres étudiées.	76
Figure III.20 : Etat de déplacement $U_y$ selon la longueur des poutres étudiées	77
Figure III.21 : Etat de déplacement $U_x$ selon la longueur des poutres étudiées.	77
Figure III.22 : Etat comparatif (contrainte-déformation) des poutres étudiées.	78
Figure III.23 : État comparatif (charge- flèche $U_y$ ) des poutres étudiées.	79
Figure III.24 : Etat comparatif (charge- flèche $U_x$ ) des poutres étudiées.	79
Figure III.25 : Comparaison des états ( $U_x - U_y - \sigma_{yy}$ ) des poutres étudiées.	80
Figure III.26 : Comparaison des états ( $\sigma_{yy}$ ) des poutres étudiées selon ABAQUS et Eurocode3	81

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Influence du procédé de fabrication sur les forces de base des profilés formés à froid.	20
Tableau I.2 : Type d'amplitude des contraintes résiduelles dans les sections en acier.	21
Tableau I.3 : Formes de section et mode de flambement	26
Tableau II.1 : Paramètres des sections transversales des poutres étudiées.	38
Tableau II.2 : Valeurs de la limite d'élasticité $f_{yb}$ et la résistance à la traction $f_u$ .	40
Tableau II.3 : Rapports largeur épaisseur maximum.	43
Tableau II.4 : Modélisation des parois d'une section transversale.	44
Tableau II.5 : Parois comprimées sur deux appuis	46
Tableau II.6 : Parois comprimées en console.	47
Tableau III.1: Propriétés mécaniques de l'acier.	74

## Liste des notations

$b_i, C_i, S_i$  : le nombre de parois planes ;

$b_i/t$  : Rapports largeur- épaisseur maximum ;

$C_p$  : largeur du raidisseur.

$L$  : la longueur des poutres.

$H$  : Hauteur du profil.

$t$  : épaisseur de la section.

$f_{yb}$  : La limite d'élasticité d'base.

$f_u$  : La résistance à la traction.

$E$  : Module d'élasticité.

$\nu$  : coefficient de poisson.

$\gamma_{M0}$  : Résistance des sections transversales lorsque la ruine est due à une plastification.

$n$  : Le nombre de plis.

$A_g$  : Section brute;

$A_g$  : L'aire de section transversale brute.

$Z_g$  : Position de l'axe neutre comprimé.

$\sigma_{com,Ed}$  : La contrainte de compression.

$b_{e1}$  et  $b_{e2}$  : Les largeurs efficaces de la paroi.

$K_s$  : Rigidité du support élastique.

$I_s$  : le moment d'inertie de la section efficace d'aire  $A_s$  du raidisseur par rapport à l'axe a-a.

$X_d$  : coefficient de réduction.

$C_{eff}$  : Largeur efficace du raidisseur.

$\sigma_{cr}$  : Contrainte critique de flambement élastique.

$f_{ya}$  : La limite d'élasticité moyenne augmentée.

$\psi$  : Le rapport de contrainte supérieure sur la contrainte inférieure.

$K_\sigma$  : Coefficient de voilement.

$\Lambda$  : L'élancement réduit.

$b_{eff}$  : Largeur efficace.

$H_c$  : La position de l'axe neutre.

**A<sub>eff</sub>** : Section efficace.

**Z<sub>c</sub>** : Position de l'axe neutre tendue.

**I<sub>eff,y</sub>** : Moment inertie efficace.

**W<sub>eff,y,c</sub>** : Module de résistance section efficace.

**f<sub>yb</sub>** : Limite d'élasticité moyenne ;

**K** : coefficient numérique dépendant du type de formage de la façon **k = 7**.

**y<sub>c</sub>** : position d' l'axe neutre par rapport x-x.

**n** : nombre de plis à 90° dans la section transversale avec un rayon **r ≤ 5t**

**M<sub>c,Rd</sub>** : Le moment critique de la résistance;

**M<sub>sd</sub>** : Le moment fléchissant.

**EC** : Eurocode 3 partie 1.3

**PAF** : Profilé à froid

## Résumé

Au cours des dernières décennies, des progrès substantiels ont été réalisés dans les propriétés des matériaux et la méthodologie de construction, ce qui exige le développement d'éléments plus forts et plus légers dans les applications de l'acier de construction. Les demandes d'augmentation de la résistance et de réduction du poids des sections conduisent au développement de structures plus fines et la stabilité joue également un rôle majeur dans la conception. Les poutres en acier avec des âmes ondulées représentent une nouvelle technique qui a émergé au cours de la dernière décennie pour les poutres de courte et moyenne portée.

L'objectif principal de cette étude est de développer et d'étudier la performance des sections de poutres en I en acier avec des âmes ondulées. Cette étude se concentre sur l'analyse du comportement de flexion et des modes d'instabilités des poutres à âme simple, trapézoïdale et triangulaire, ces poutres sont sollicitées par une charge concentrée à mi portée. La modélisation numérique a été faite en utilisant le logiciel des éléments finis ABAQUS.6.17. Les résultats ont été validés avec ceux trouvés analytiquement on en se basant sur la norme Eurocode 3.

**Mots clés :** Acier formé à froid, âme ondulée, ABAQUS, éléments finis

## **Abstract**

Over the past decades, substantial progress has been made in the properties materials and construction methodology, which requires the development of elements stronger and lighter in structural steel applications. Requests increase in resistance and reduction in weight of the sections driven at development of finer structures and stability also plays a major role in the design. Steel beams with webs represent a new technique which has emerged over the last decade for short and medium span beams. The main objective of this study is to develop and study the performance of the sections of steel I-beams with corrugated webs. This study focuses on the analysis of bending behavior and modes of instability of beams with single, trapezoidal and triangular, these beams are stressed by a concentrated load at mid-span. Modeling digital was done using the finite element software ABAQUS.6.17. The results were validated with those found analytically on based on the Eurocode 3 standard.

Key words: Cold formed steel, corrugated core, ABAQUS, finite elements

## ملخص

على مدى العقود الماضية ، تم إحراز تقدم كبير في العقارات المواد ومنهجية البناء ، الأمر الذي يتطلب تطوير عناصر أقوى وأخف وزناً في تطبيقات الفولاذ الإنشائي. زيادة المقاومة وتقليل وزن الأقسام المدفوعة في التطبيقات يلعب تطوير الهياكل الدقيقة والاستقرار أيضا دوراً رئيسياً في التصميم. تمثل الحزم الفولاذية ذات الشبكات تقنية جديدة التي ظهرت على مدى العقد الماضي للحزم قصيرة ومتوسطة المدى. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تطوير ودراسة أداء مع شبكات موجهة. تركز هذه الدراسة على تحليل سلوك الانحناء وأنماط عدم I الأقسام من عوارض حديدية على شكل استقرار الحزم ذات الشكل الفردي شبه المنحرف و مثلثة ، يتم التأكيد على هذه الحزم بواسطة حمولة مركزة في منتصف النتائج تم التحقق من صحتها مع ABAQUS.6.17 المدى. النمذجة تم إجراء رقمي باستخدام برنامج العناصر المحدودة Eurocode 3. تلك التي تم العثور عليها تحليلاً بناءً على معيار

الكلمات المفتاحية: الفولاذ المشكل على البارد ، اللب المموج ، العبق ، العناصر المحدودة

## Introduction générale :

Antérieurement, l'utilisation des éléments minces formés à froid était surtout restreinte aux produits pour lesquels le gain de coût était de première importance, par exemple dans les industries aéronautique, ferroviaire et mécanique. Les éléments de section simple formés à froid (de section semblable aux profilés laminés à chaud), de même que des panneaux profilés, ont aussi été utilisés dans la construction comme éléments non structuraux depuis environ 100 ans. Un travail de recherche systématique, mené sur les quatre dernières dizaines d'années, de même qu'une technologie de fabrication améliorée, la protection contre la corrosion, l'augmentation de la résistance des aciers et la mise à disposition de codes pour le dimensionnement, ont conduit à un usage plus large des sections formés à froid dans la construction. Dans beaucoup de pays, les éléments formés à froid représentent le secteur qui se développe le plus dans le domaine de la construction métallique.

Les éléments de structure dans la construction métallique sont classés en deux catégories : les sections laminées à chaud et les sections formées à froid. Ces profilés en acier formés à froid sont fabriqués selon deux méthodes : le laminage à chaud ou le pliage sous presse.

L'acier formé à froid est largement utilisé dans l'industrie du bâtiment, et va de la purge à la couverture de toit et au plancher. En général, les profilés en acier formés à froid comme les profilés en U, en Z et en I sont utilisés efficacement comme éléments de flexion pour les pannes, les grilles murales et les dalles de toit. Les résultats de l'étude expérimentale jouent sur la capacité de charge des profilés en acier formés à froid avec une âme trapézoïdale. L'étude montre que la poutre en acier formée à froid avec une âme ondulée trapézoïdale a une capacité de charge plus élevée que les poutres ayant une âme lisse.

En raison de la nécessité d'avoir des sections très résistantes et légères, les sections doivent être élancées en tenant compte de la stabilité pendant la conception. La stabilité des sections est basée sur la résistance et l'élancement de ces sections. Dans les sections I, les contraintes de cisaillement qui se développent en raison des charges externes sont reprises par des âmes minces. Si l'âme d'une section en I est instable (voilement), des raidisseurs peuvent également être utilisés pour compenser les problèmes de stabilité. Pour éliminer l'utilisation de raidisseurs, des ondulations dans la partie de l'âme peuvent être fournies. Cette âme ondulée fournit une plus grande rigidité latérale par rapport aux âmes plates. Les poutres à âme

ondulée sont avantageuses pour l'industrie de la construction, en raison de la rigidité latérale maximale de la poutre.

### **Objectif du travail**

Notre travail de recherche a quatre principaux objectifs, le premier concerne que les profilés en acier formés à froid sont préférables par rapport aux profilés laminés à chaud en raison de leur plus grande polyvalence et parce qu'ils sont bien adaptés à une construction économique. Le second objectif est de trouver un élément plus résistant qui permet également d'obtenir des sections transversales plus durables plus légère et moins consommatrice de matière.

Le troisième objectif c'est l'élimination de l'utilisation de raidisseurs pour absorbé les contraintes de cisaillement dans l'âme dont les ondulations dans la partie de l'âme peuvent être fournies.

Le quatrième objectif est de trouver une la rigidité latérale maximale dans les poutres et comparaison entre le comportement d'une poutre avec une âme ondulée et une âme plane. C'est dans ce contexte que nous nous proposons de s'intéresser a l'étude numérique du comportement en flexion d'une poutre en acier formée à froid avec de différents sections d'âmes.

L'organisation du mémoire est subdivisée en 3 chapitres et se présente comme suit :

#### **Le premier chapitre :**

Une recherche bibliographique générale sur les techniques de fabrication des produits en acier formés à froid avec ces différentes formes et avantages tel que leur résistance, poids léger, et la facilité de production, en plus le traitement de différents modes d'instabilité qui sont de type local, global ou bien la combinaison des deux rendant le problème de l'étude de ces types de profilés plus complexes et difficiles à maîtriser.

#### **Le deuxième chapitre :**

Traite la détermination des caractéristiques géométriques et mécaniques de la section d'étude (les poutres) et du matériau utilisé on se basant sur le code de calcul Eurocode 3 partie 1-3. Pour résoudre les problèmes d'instabilités, les règlements de la construction métallique offrent des méthodes réglementaires. La notion de section efficace est introduite plus la détermination du le moment résistant, la rigidité initiale et la capacité de résistance des poutres en I avec différent section d'âme (simple, triangulaire et trapézoïdale).

**Le troisième chapitre:**

Une modélisation numérique sous le logiciel ABAQUS 6.17 par une validation tridimensionnelle non linéaire des poutres en I en acier formé à froid de 12m de portées avec des âmes simples ou ondulées (triangulaire et trapézoïdale). Ces poutres ont soumis à la flexion trois points avec un chargement statique croissant afin de développer un élément plus performant. Les modèles sont comparés entre eux et la validation des résultats est faite avec ceux trouvés analytiquement.

**Une conclusion générale** clôture ce manuscrit en synthétisant les principaux résultats et l'influence des différents paramètres sur le comportement des poutres en I en acier formé à froid avec des âmes simples ou ondulées (triangulaire et trapézoïdale).

**Des perspectives de recherche** sont aussi présentées pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes pour les travaux futurs et qu'il serait judicieux d'explorer.

# **CHAPITRE I :**

## **Recherche bibliographique**

## Présentation des éléments en acier formés à froid

### I.1 Généralités sur le matériau acier :

L'acier est un alliage métallique utilisé dans les domaines de la construction métallique et de la construction mécanique. Il est constitué d'au moins deux éléments, majoritairement le fer puis le carbone dans des proportions comprises entre 0,02 % et 1,67 % en masse.

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferronickels par exemple.

La teneur en carbone peut évoluer entre 0.03% et 1.8%. La quantité de ce dernier modifie les propriétés physiques : moins il y a de carbone, plus l'acier est plastique et malléable ; plus il y en a, plus l'acier est dur et résistant.

L'acier est ductile, c'est-à-dire qu'il peut subir des changements de forme par compression ou par expansion, aussi bien à chaud qu'à froid. On dit aussi que certains aciers prennent la trempe (pas pour tous les aciers alliés). Ceci signifie qu'ils peuvent acquérir une grande dureté lorsqu'ils sont chauffés à une température très élevée et puis refroidis brutalement.

Signalons aussi que l'acier est très important dans le développement d'un pays.

En effet, c'est lui le responsable du taux de développement d'un pays car la quantité d'acier consommée par habitant est considérée comme l'indice de développement d'un pays.

### I.2 Application des aciers :

L'acier est utilisé au formage à chaud et à froid et dans notre cas nous nous intéressons au deuxième type.

Depuis les dernières décennies, les éléments en acier formés à froid sont largement utilisés dans le domaine de la construction métallique.

La facilité de leur fabrication permet de produire une grande variété de formes et l'utilisation d'aciers à haute résistance rend les rapports largeur-épaisseurs des parois relativement grands. L'utilisation de matériaux de construction en acier formés à froid est devenue de plus en plus populaire depuis l'introduction des normes codifiées en 1946. Dans l'industrie de la construction, des éléments structurels et non structurels sont créés à partir de tôles d'acier de minces épaisseurs. Ces éléments englobent des colonnes, des poutres, des solives, des talons, des planchers, des sections bâties et d'autres composants.

La fabrication de produits en acier formés à froid se fait à température ambiante par laminage ou par pressage. Nous allons commencer par présenter brièvement la technologie de fabrication de ce type d'éléments de construction.

### I.3 Le profilage:

Le profilage est une technique qui a pour but la déformation en continu par formage à froid à partir de métal en feuilles ou en bobines. Cela permet de réaliser des pièces appelées profilés, généralement plus longues que larges. La section de ces pièces est constante, et la précision varie en fonction de la qualité recherchée. La matière utilisée peut être de : l'acier, inox, aluminium, titane, cuivre, acier laqué, acier galvanisé, ...

La bande de métal est entraînée entre des pièces appelées (galets) inférieur et supérieur, réalisés en acier trempé ou prétraité. Elle va passer entre plusieurs têtes de profilage qui va former progressivement la tôle, jusqu'à la forme finale. Le profilage est une technique de pliage en continu. La machine utilisée est une profileuse, possédant diverses têtes de profilage (galets supérieur-galets inférieur) de 6 à 30 têtes environ suivant les cas. Cette machine peut être équipée d'appareillages divers, dérouleurs, dévireurs, outils de coupe, outils de poinçonnage, d'armoires à commande numérique.(Figure I.1).[1]



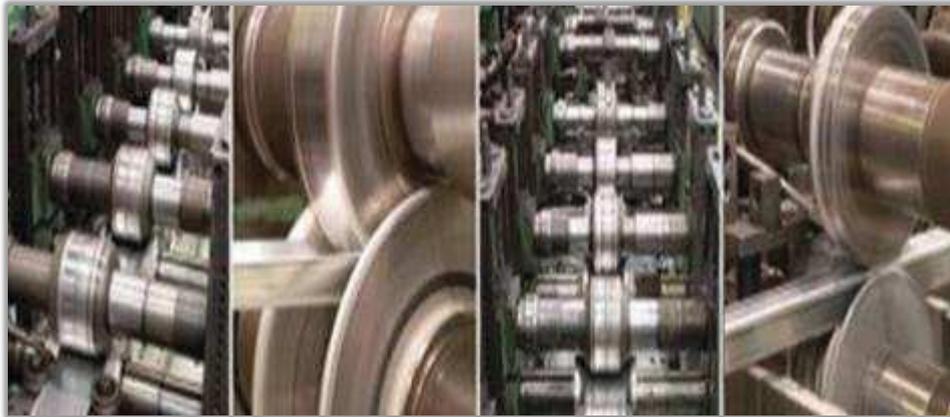
**Figure I.1 : Processus de profilage.**

Cette technique permet de réaliser des pièces appelées profilés. Les profilés sont utilisés dans des secteurs divers, dans des applications liées à l'automobile (joint de portière, longeron de portière), au travaux publics (palplanches, glissières d'autoroutes), au bâtiment (bardages, éléments de structures, couvertures, planchers, bardages, plafonds, portes, échafaudages), à

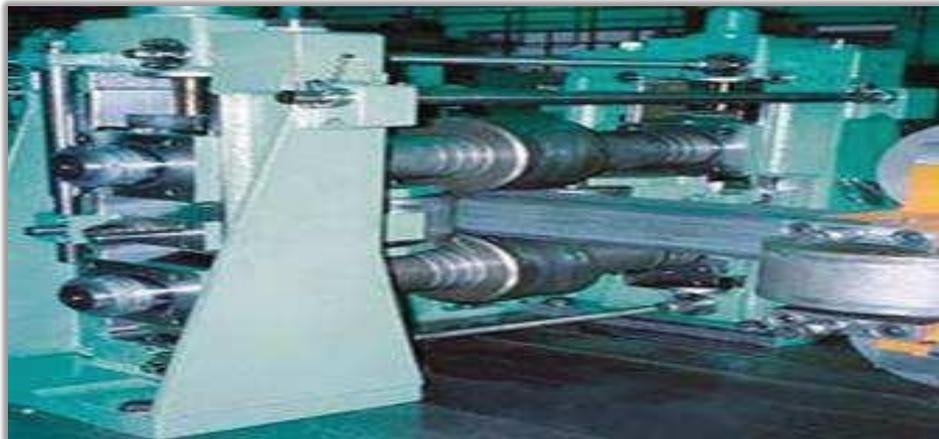
l'équipement intérieur (meubler de bureau, électroménager), au stockage (rayonnages), aux transports (longerons, cadres de portières), à l'agriculture (piquets de vigne, systèmes de clôture, silos).

*La matière de ces produits (profils) peut être*

Acier - Acier galvanisé - Acier pré laqué - Acier inox - Cuivre - Laiton - Aluminium - Titanium. (Figure I.2)



**Figure I.2 : Tête de profileuse.**

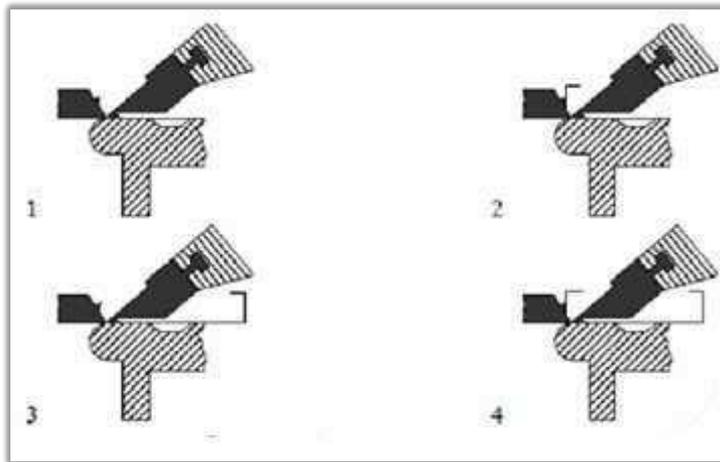


**Figure I.3 : Le pliage.**

Le pliage est le procédé le plus simple, il consiste à faire plier la tôle découpée en dimensions bien précises pour obtenir la forme désirée et ceci après l'avoir placée entre les mors d'une plieuse comme montrée par la figure I.3.

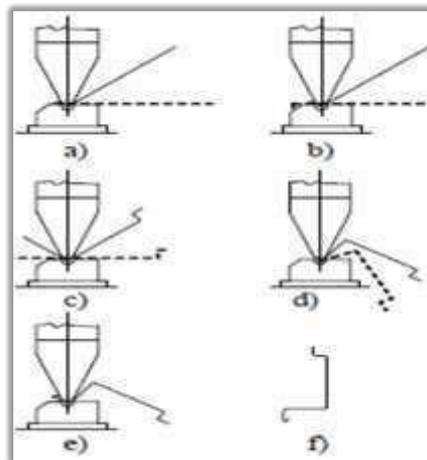
On peut donc réaliser tous types de sections de profilés qu'on peut imaginer.

Dans la fabrication d'un profilé par pliage, les efforts appliqués à l'élément se concentrent dans ses coins arrondis, c'est cela qui donne la particularité, du point de vue comportement, à ces profilés formés à froid. (Figure I.4)



**Figure I.4 : Procédé de pliage.**

La presse plieuse est largement utilisée, ce processus peut produire une plus grande variété de formes en coupe transversale. La mise en place d'une presse plieuse typique est illustrée dans la figure I.5. Ce procédé présente également des limitations sur la géométrie des profilés qui peuvent être formés et, sur les longueurs des éléments qui peuvent être produits.



**Figure I.5 : Etapes de formage pour une presse plieuse.**

#### **I.4 Domaine d'application et utilisation des profilés formé à froid:**

Aujourd'hui nous trouvons tous types de profilés formé à froid dans de nombreux domaines, automobile, maison, mobilier de bureaux, bardage, etc.. Ces matériaux sont obtenus par profilage à froid. La forme du profilé à réaliser est obtenue par le pliage d'une bande d'acier, (aluminium, inox, pré laqué, zingué, cuivre, titane, etc) ou par l'obtention de plis d'angles différents, passage de la tôle (feuillard) dans une ligne de profilage. Les plis sont obtenus par le passage du feuillard, dans les diverses opérations (passes - tête de profilage) de la ligne de profilage. Les plis sont progressifs et régulier, angle de déformation de la tôle, à chaque

opération de la ligne de profilage. Afin de ne pas abîmer le produit à obtenir (profilé) la déformation devra être progressive.

Les profilés peuvent être de matière différente, acier, aluminium, inox, cuivre, pré laqué, titane, etc. Ils peuvent être protégés d'un film plastique, pour les profilés d'aspects difficiles, protection contre les railleurs. Ainsi que de colories différentes pour les pré-laqués, souvent utilisés pour les profilés de bardage. Ils seront d'épaisseur différente de 0,2 à 12 mm, et largeur différente.

Les bandes de profilés seront livrés en bobine de feuillards, qui serviront à alimenter la ligne de profilage. Celle-ci seront mise en place sur le dévidoir en début de ligne de profilage. [2]

## **I.5 Caractéristiques technologiques :**

### **I.5.1 Soudabilité:**

La soudabilité des aciers, c'est-à-dire l'aptitude à l'assemblage par soudure, est influencée par la composition chimique et par la structure métallographique des aciers, en augmentant la teneur des éléments d'alliages on diminue la soudabilité par contre une amélioration de la soudabilité est obtenue par l'affinage des grains.

### **I.5.2 Fissuration à chaud :**

Les fissures à chaud sont des fissures longitudinales du cordon de soudure qui apparaissent le plus souvent dans le métal fondu et dont la présence est liée à la composition chimique de celui-ci.

### **I.5.3 Arrachement lamellaire :**

Les fissures par arrachement se produisent parallèlement à la surface d'un produit laminé, au droit d'un assemblage soudé sollicitant le matériau.

### **I.5.4 Fissuration à froid:**

La fissuration à froid est, en fait, le défaut essentiel de soudabilité dont les trois causes sont: L'introduction d'hydrogène dans le métal fondu lors du soudage: la transformation de la structure métallographique du métal solide avec formation de martensite fragile dans la ZAT (zone affectée thermiquement par la chaleur): l'existence de contraintes résiduelles importantes au niveau de la soudure (Retrait et bridage).

## **I.6 Les familles d'acier :**

### **I.6.1 Aciers inoxydables :**

Ce sont des aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement le chrome qui, au-delà de 12 à 13 %, produit la résistance souhaitée à l'oxydation.

### **I.6.2 Aciers décapé :**

Le processus a pour objet le traitement chimique de la tôle, qui consiste à enlever la couche superficielle d'oxyde (calamine) issue du traitement métallurgique lors du laminage à chaud.

### **I.6.3 Acier pré-laqué :**

Il a pour principal avantage sa qualité constante et reproductible d'une production à l'autre, en ce qui concerne tant l'épaisseur que les tolérances colorimétriques. Le laquage permet d'obtenir plusieurs aspects de surface : lisse, peau d'orange, graine, texture ou embossé. [2]

## **I.7 Les formes de produits :**

### **I.7.1 Laminage à chaud :**

Après passage dans un four de réchauffage à plus de 1000 °C, le métal est acheminé sur des rouleaux motorisés. Progressivement, par un passage successif dans différentes cages équipées de cylindres refroidis à l'eau le métal perd en épaisseur et gagne en longueur.

### **I.7.2 Laminage à froid :**

Il est généralement réservé aux produits plats (tôles d'acier). Il transforme un produit laminé à chaud en bobine de métal de fine épaisseur (moins de 3mm).

Les produits longs (poutrelles, palplanches, râbles, fils, ronds à béton.), obtenus par laminage à chaud, étirage ou tréfilage ;

Les produits plats (tôles, bardais, profils minces, profils creux...) qui subissent en général un laminage à froid supplémentaire, à l'exception des tôles de fierté épaisseur.

### **I.7.3 Galvanisation Sendzimir :**

C'est un procédé industriel de protection des aciers à base de zinc extrêmement performant qui est utilisé pour les constructions métalliques (ossatures, toitures, etc...).

### **I.7.4 Galvanisation par trempage :**

Un procédé plus artisanal qui consiste à plonger les profilés dans un bain de zinc.

## **I.8 Les produits plats :**

### **I.8.1 Les tôles et les larges plats :**

Les tôles sont fabriquées sous forme de bobines. Elles sont livrées en largeurs standards ou à la demande, mais les largeurs sont en général limitées à 1800 mm l'épaisseur ne dépasse pas 16 à 20 mm pour les tôles laminées à chaud et 3 mm pour les tôles laminées à froid. Celles-ci peuvent être mises en forme par profilage, pliage ou emboutissage.

### **I.8.2 Les tôles nervurées :**

Ce sont des tôles minces que l'on nervure par profilé à froid à l'aide d'une machine à galets. Les tôles nervurées sont issues de bobines galvanisées et souvent pré-laquées. Les applications concernent les produits d'enveloppe (bardage), de couverture (bac, support d'étanchéité) et de

plancher (bac pour plancher collaborant ou à coffrage perdu), ainsi que les panneaux sandwich incorporant des matériaux isolants.[2]

### **I.9 Les profils creux :**

Les tubes de construction sont appelés « profils creux ». Ils sont fabriqués en continu à partir de tôles minces ou moyennes repliées dans le sens de leur longueur.

Les profilés creux dits « de forme » sont en général formés à partir de tubes ronds : ils peuvent être carrés, rectangulaires, hexagonaux, elliptiques, voire demi-elliptiques. Les longueurs standards sont de 6 à 15 m. [1]

### **I.10 Les profils minces :**

Les tôles minces galvanisées (d'épaisseur inférieure à 5 mm) peuvent être profilées à froid pour réaliser des profils minces. On appelle élément à froids minces les éléments porteurs constitués de tôles profilées ou de profilés dont la section est obtenue par façonnage à froid d'une tôle mince plane. Les produits façonnés à froid sont caractérisés par leur forme. Parfois assez élaborée et par fois leur épaisseur. Ce sont surtout des tôles minces et plus rarement des profilés. [2]

De sections très diverses, les profils minces sont utilisés en serrurerie, en menuiserie métallique et en ossatures légères : pannes de charpente, ossatures de murs ou de cloisons, de faux plafonds... Légers et maniables, ils peuvent s'assembler par vis auto taraudeuses.

### **I.11 Les plaques :**

On parle de plaques lorsque l'épaisseur dépasse 20 mm. On peut obtenir des plaques jusqu'à 400 mm d'épaisseur et 5 200 mm de largeur. Les plaques sont principalement utilisées pour la grosse chaudronnerie ou pour les ouvrages d'art.

### **I.12 Laminage à froid :**

#### **I.12.1 Présentation du procédé du laminage :**

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme du métal. Cette déformation est obtenue par compression contenue au passage entre deux cylindres contrarotatifs appelés laminoir. Un laminoir est une installation industrielle ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau (généralement du métal). Il permet également la production de barres profilées (produit long).

Dans le laminage à froid, les propriétés des produits issus du laminage à chaud, telles que l'épaisseur, les caractéristiques mécaniques et technologiques, sont modifiées par compression entre des cylindres sans chauffage préalable du matériau de départ, constitué de bobines issues des laminoirs à chaud.

En effet l'écroutissage local (déformation plastique) augmente la zone de déformation élastique, la limite d'élasticité est repoussée, mais la résistance à la rupture est constante (ils agissent d'une propriété interne du matériau).

Le laminage à froid est généralement réservé aux produits plats (tôles d'acier). H transforme un produit laminé à chaud en bobine de métal de fine épaisseur (moins de 3 mm). Il existe principalement deux types de laminoirs à froid :

- Le laminoir mono cage réversible (le plus simple, la bande passe plusieurs fois dans la même cage de laminoir);
- Le tandem (le plus compliqué, constitué de plusieurs cage (de 4 à 6) travers desquelles la bande passe simultanément). Le pilotage de ce genre de laminoir est difficile à cause de l'interaction entre les cages.

Il peut être suivi d'opérations de revêtement après recuit et écrouis.

Les étapes du processus de laminage à froid et leur enchaînement dépendent de la qualité du métal traité. Les étapes suivantes sont mises en œuvre pour les aciers alliés et faiblement allié (aciers au carbone) : décapage, laminage d'amincissement, recuit, laminage de dressage ou skin-pas et finissage.

Dans le cas des aciers fortement alliés (acier inoxydable), le processus comporte un recuit initial précédant le décapage en raison de la dureté de la qualité de l'acier, ainsi que des étapes de recuit précédant le décapage en raison de la dureté de la qualité de l'acier, ainsi que des étapes de recuit et/ou de décapage supplémentaires pendant le laminage.

Les produits laminés à froid sont principalement des bandes et des tôles (épaisseur typique comprise entre 0.15 et 3 mm).

### **I.12.2 Laminoirs à froid (laminoirs à bandes L F) :**

Il illustre des configurations typiques de laminoir à froid. Les usines comprennent généralement les éléments suivants :

- **La ligne de décapage continue** : ou la couche d'oxyde formé pendant le laminage à chaud est retiré par décapage.
- **Le laminage à froid** comprend généralement un laminoir tandem à 4 ou 5 cages et à 4Cylindres ou un laminoir réversible à 4 cylindres. Le laminage à froid réduit de 50 à 80% épaisseur initiale de la bande laminée à chaud.
- **Les installations de recuit** permettent de restaurer la ductilité de la bande d'acier perdue en raison de l'écroutissage pendant le laminage à froid.

- **Les laminoirs adoucisseurs** permettent de conférer au matériau recuit les propriétés mécaniques requises (empêche la formation de lignes de Luders pendant l'emboutissage). Le matériau est soumis à un léger laminage skin-pass effectué généralement sur un laminoir skin-pass à 4 cylindres. La rugosité des cylindres de travail du laminoir est transférée à la bande par la pression du cylindre.
- **Les lignes d'inspection et de finissage**, des bobines de différentes longueurs peuvent être soudées ensemble pour obtenir le poids requis ou refendues à la largeur requise. Les bobines peuvent être également découpées en tôles de la longueur et de la largeur requises. Les parties défectueuses de la bande sont simultanément éliminées.
- **Les lignes de conditionnement des bobines ou feuilles** dépendent de la destination et/ou du moyen de transport.

Dans l'**atelier des cylindre** », les cylindres de travail et d'appui du laminoir à froid du laminoir adoucisseur sont préparés.

Pour la production de tôles magnétiques en acier, le laminoir comprend en général une cage réversible à 4 cylindres, qui est élargie pour le laminage et une opération de laminage skin-roll alternative (passe d'ébauchage jusqu'à 7 % de déformation). Les tendances techniques et les développements réalisés dans la production de bandes laminées à froid, motivés par les demandes croissantes du marché et la concurrence de matériaux alternatifs, ont pour objectif l'amélioration du rendement et de la production des usines en réduisant au maximum le temps de traitement et la consommation de matériaux et d'énergie. L'impact des installations sur l'environnement doit être réduit dans le même temps.[1]

Il existe de nombreux types de laminoirs :

- **Laminoir à produits plats**
    - Laminoirs industriels pour les métaux
    - Dans l'aménagement intérieur, les vitrages occultant et la décoration
  - **Laminoir à produits long**
    - Laminoirs universels (métaux)
    - Laminoirs cannelures (métaux)
  - **Laminoirs à fils**
    - Fils industriels (cuivre par exemple)
- laminoirs à rouleaux coniques : pour le formage des roues pour le chemin de fer.

### I.13 Fabrication et domaine d'application des profilés formés froid :

#### I.13.1 Fabrication :

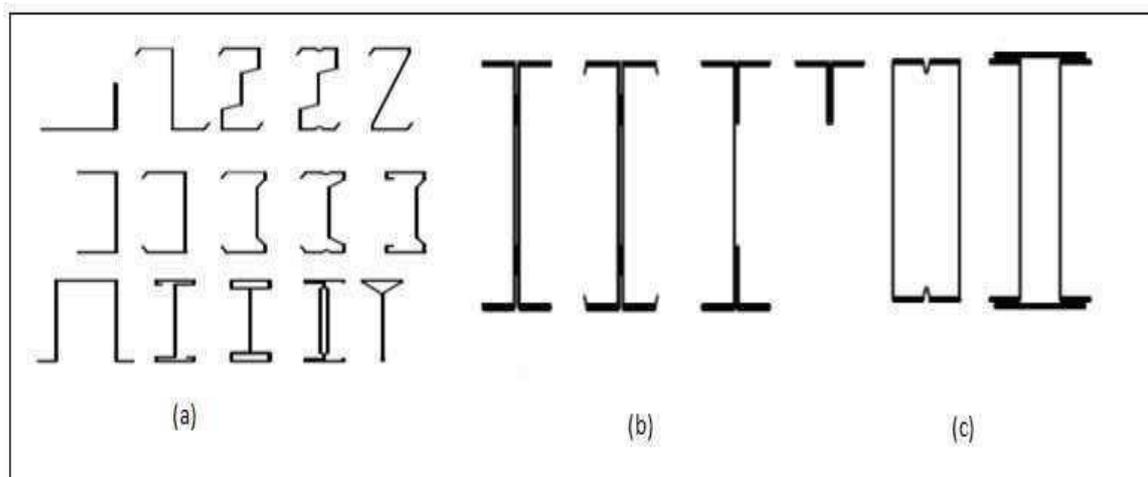
Les principaux avantages des éléments à parois minces sont la possibilité qu'on ait de leur donner des formes très variées, ainsi que leur facilité de fabrication et de montage. Le matériau de base est de l'acier de construction courant, possédant souvent une limite d'élasticité  $f_y$  plus élevée due au laminage à de petites épaisseurs, et présenté sous forme de bobines (pour les tôles) ou de feuillard (pour les profilés), ces derniers étant obtenus par laminage à chaud ou à froid dans des épaisseurs variant de 0.5 à 5mm. Les tôles minces sont en général galvanisées à chaud en continu et, si nécessaire revêtues (pré laquées) en vue d'améliorer leur résistance à la corrosion ainsi que leur aspect. Les deux procédés les plus courants pour transformer une tôle mince plane sont :

- le profilage en continu, dans une machine à galets entraînés par une force motrice, pour la fabrication des tôles profilées formées à froid.
- le pliage, dans une presse à matrice ou une plieuse à bras les profilés formés à froid de longueur limitée.

La section ainsi obtenue est identique sur toute la longueur. Cette section est formée d'éléments plans et, arrondis juxtaposés et comporte souvent des raidisseurs en forme de rainures et de plis. Elle est caractérisée, à cause du procédé de fabrication, par une épaisseur mince mais constante du matériau.

#### I.13.2 Domaine d'application :

Les tôles profilées sont principalement utilisées dans les dalles mixtes, les bardages de façades et les couvertures de toiture.

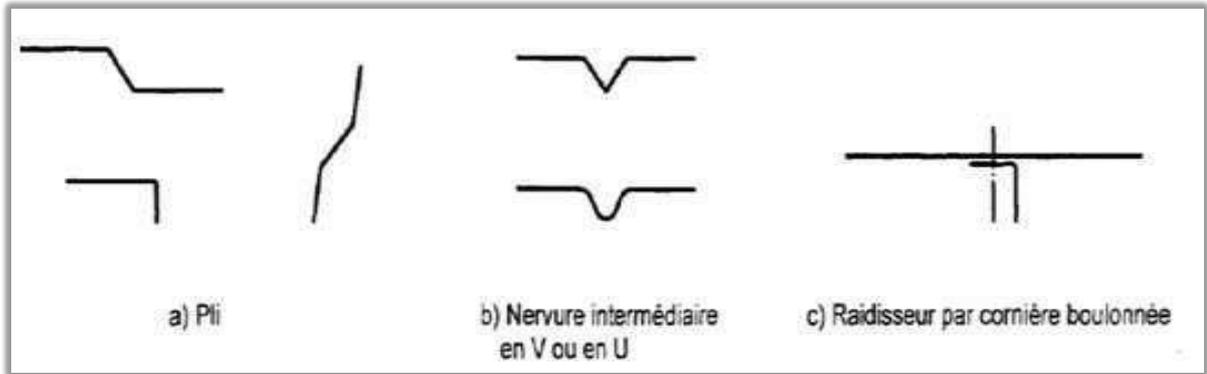


**Figure I.6 : Différents types de profilés laminés à froid.**

a) *profilés ouverts simples* b) *profilés ouverts reconstitués* c) *profilés fermés*

Les parois (âme ou semelles) des sections transversales de profilés et plaques formés à froid peuvent comporter des raidisseurs longitudinaux.

Les formes typiques de raidisseurs destinées aux profilés et plaques formés à froid comprennent : Des plis tels que montrés par la figure ; Des nervures intermédiaires de la figure et des profilés rapportés par boulonnage, rivetage ou soudage, montrés par la figure.

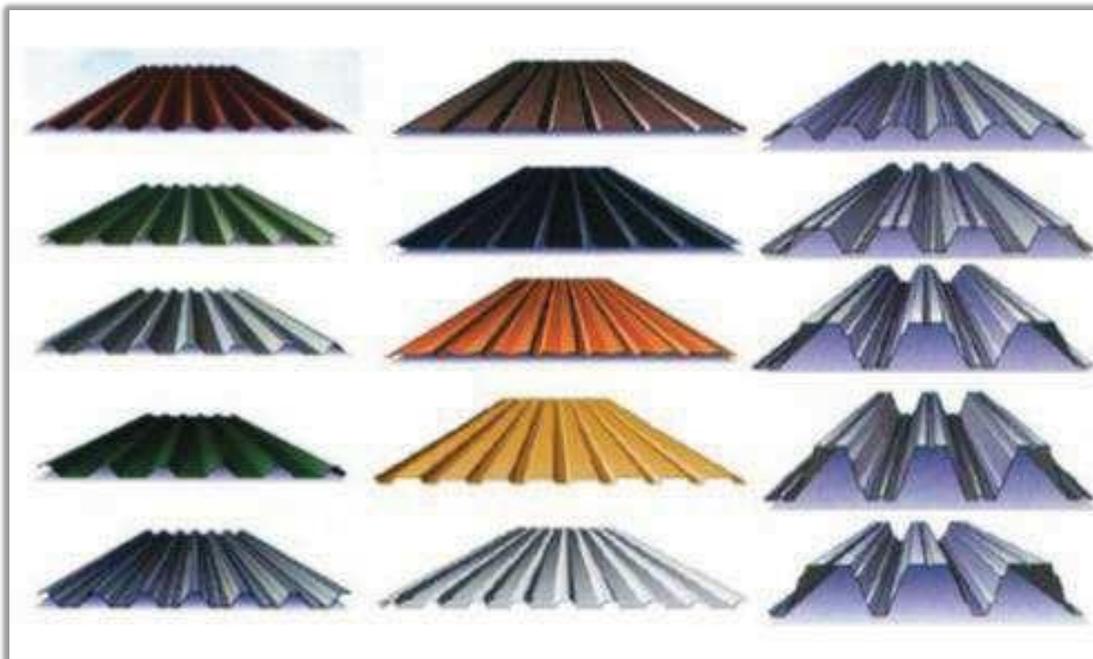


**Figure I.7 : Formes typiques de raidisseurs pour profilés et plaques formés à froid.**

Tôles pour les toitures  
( $t= 0.45 - 1.0\text{mm}$ )

Tôles de revêtement mural  
( $t= 0.45 - 0.7\text{mm}$ )

Tôles pour les planchers  
( $t= 0.6 - 1.5\text{mm}$ )



**Figure I.8 : Exemples des tôles ondulées pour les toitures, revêtements muraux et planchers.**

Les raidisseurs longitudinaux de semelles peuvent être soit des raidisseurs de bord, soit des raidisseurs intermédiaires. [3]

Les raidisseurs de bord typiques comprennent :

- Les raidisseurs de bord à pli simple ou à bord tombé, voir figure 10a.
- Les raidisseurs de bord à double plis, figure I.9 b).

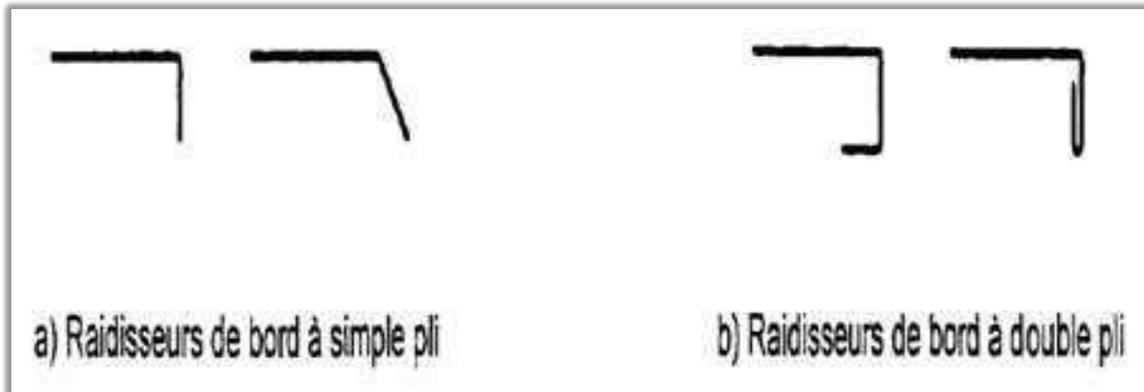


Figure I.9 : Raidisseurs de bord typiques.

### I.13.3 Avantages des éléments formés à froid :

Par rapport aux profils laminés à chaud, les éléments formés à froid présentent plusieurs avantages comme, on peut citer:

- La facilité de produire des formes complexes et d'atteindre une parfaite adéquation de la forme du profil à sa section ;
- Leur légèreté équilibre la manutention, le transport et le montage, ils sont donc, plus économique;
- Diverses opérations secondaires telles que le perçage, la grugeage, le marquage ou la mise en peinture peuvent être réalisés en même temps que le formage.
- Procédé de production très flexible, le sur mesure très simple à exécuter
- Les outillages nécessaires offrent des avantages et peuvent être réalisés rapidement
- Temps de production réduit et donc livraison rapide
- Rapport résistance mécanique/poids excellent
- Relativement peu de chutes
- Une large gamme de qualités d'aciers, épaisseurs précises de 0,2 à 8mm, prélaqué, inox, zingué, etc...
- Pratique et constructif.

### I.13.4 Les caractéristiques particulières des sections en acier formées à froid :

Comparés à des profilés en acier laminés à chaud, la technologie de fabrication de profilés en acier formés à froid induit certaines caractéristiques particulières. Tout d'abord, le formage à froid conduit à une modification de la courbe contrainte-déformation de l'acier. En

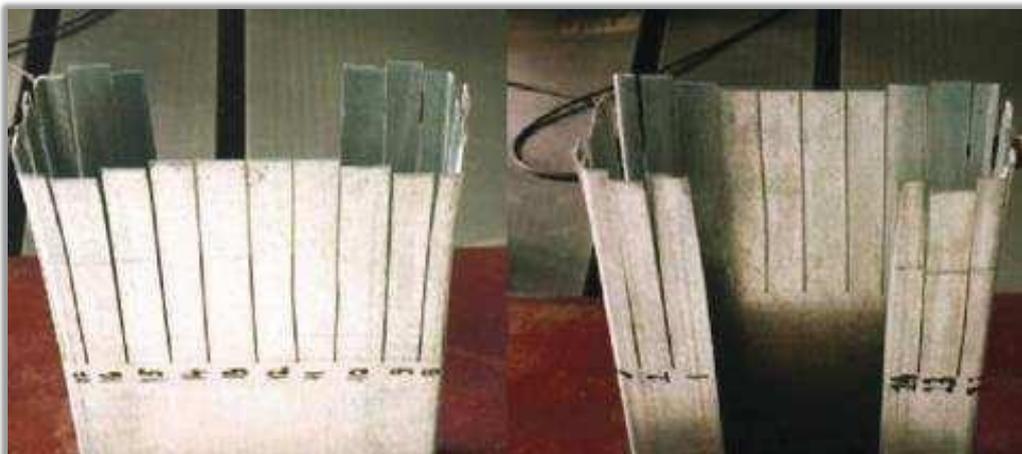
ce qui concerne le matériau vierge, le laminage à froid permet une augmentation de la limite d'élasticité et, parfois, la résistance à la rupture qui est importante dans les coins et encore appréciable dans les semelles, tandis que la presse plieuse laisse ces caractéristiques presque inchangées dans les semelles. Le tableau 1.1 résume l'influence du procédé de fabrication sur les forces de base des profilés formés à froid.

Méthode de formage		Formage à froid	
		Laminage à froid	Presse plieuse
Limite d'élasticité	<i>Angle</i>	Élevé	Élevé
	<i>Semelle</i>	Modéré	--
Force ultime	<i>Angle</i>	Élevé	Élevé
	<i>Semelle</i>	Modéré	--

**Tableau I.1 : Influence du procédé de fabrication sur les forces de base des profilés formés à froid.**

L'augmentation de la limite d'élasticité est due à l'écrouissage et dépend du type d'acier utilisé pour le laminage à froid. Au contraire, l'augmentation de la résistance à la rupture est liée au vieillissement, qui est accompagné par une diminution de la ductilité et dépend des propriétés métallurgiques du matériau.

Dans le cas de sections en acier formées à froid les contraintes résiduelles sont essentiellement de type flexion, comme le montre la figure I.10, et leur influence sur la résistance au flambement est moins importante que les contraintes résiduelles de la membrane comme le montre le tableau I.1.



**Figure I.10 : Contraintes résiduelles de flexion dans une section en acier formée à froid avec bord tombé.**

D'autre part, le laminage à froid produit différentes contraintes résiduelles dans la section par rapport à la presse plieuse, comme le montre le tableau 1.2, la force de coupe peut être différente dans le cas où le flambement et la déformation élastique interagissent..

Méthode de formage	Formage à froid	
	Laminage à galet	Presse plieuse
Contraintes résiduelles de la membrane	Faible	Faible
Contraintes résiduelles de flexion	Elevé	Faible

Tableau I.2 : Type d'amplitude des contraintes résiduelles dans les sections en acier.

#### I.14 Effet de formatage à froid sur le comportement de l'acier :

Lors du processus de production des éléments formés à froid, les propriétés mécaniques initiales de l'acier sont souvent modifiées. L'opération de mise en forme s'accompagne généralement par une augmentation de la limite élastique  $f_y$  et de la résistance à la traction  $f_u$  et en parallèle une diminution de la ductilité.

Lorsqu'on applique la force de formage sur la tôle, cette dernière va se déformer en se plastifiant jusqu'à la forme désirée atteignant une certaine contrainte. Elle représentera la nouvelle limite élastique si on recharge immédiatement. Par contre, si on recharge après un certain temps, la limite élastique sera plus importante (figure I.11).

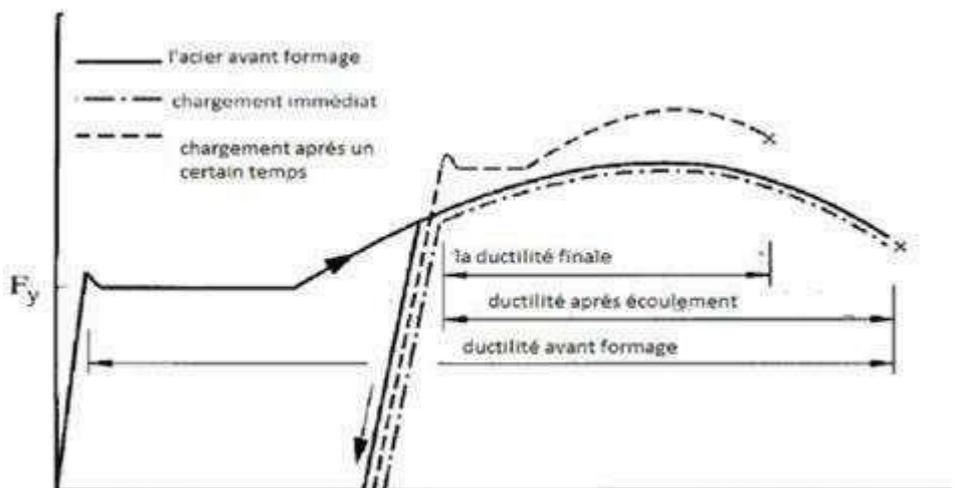


Figure I.11 : Courbe contrainte-déformation de l'acier avant et après mise en forme.

En réalité, l'augmentation de la résistance à traction  $f_u$  est beaucoup plus petite que celle de la limite élastique  $f_y$  donc l'allure de la courbe contrainte-déformation de l'acier changera et sera comme celle représentée sur la figure I.12 Dans ce cas la limite élastique  $f_y$  est

déterminée pour une déformation égale à 0.002.

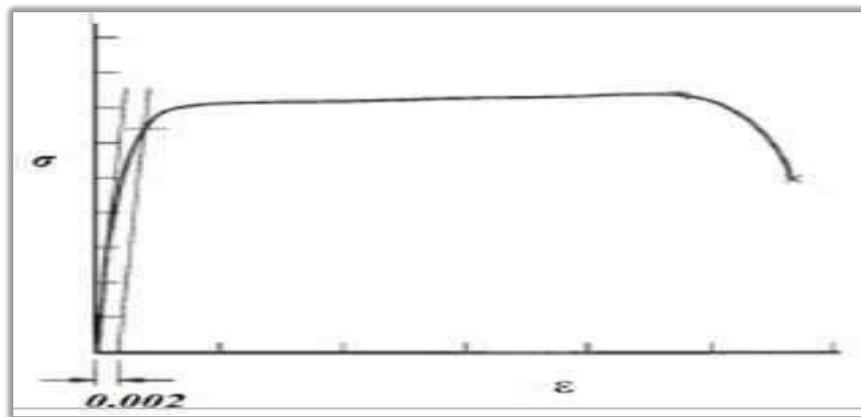


Figure I.12 : Courbe de comportement de l'acier.

## I.15 Les phénomènes d'instabilité des profils formés à froids :

### I.15.1 Introduction :

Les problèmes associés aux constructions avec des éléments à du phénomène d'instabilité. La vérification de cette instabilité constitue dans de nombreux cas un problème délicat à traiter.

Selon la portée du profilé et sous l'application d'une charge compressive, on peut mettre en évidence trois types d'instabilité (figure I.13).

- Instabilité locale.
- Instabilité distorsionnelle.
- Instabilité globale.

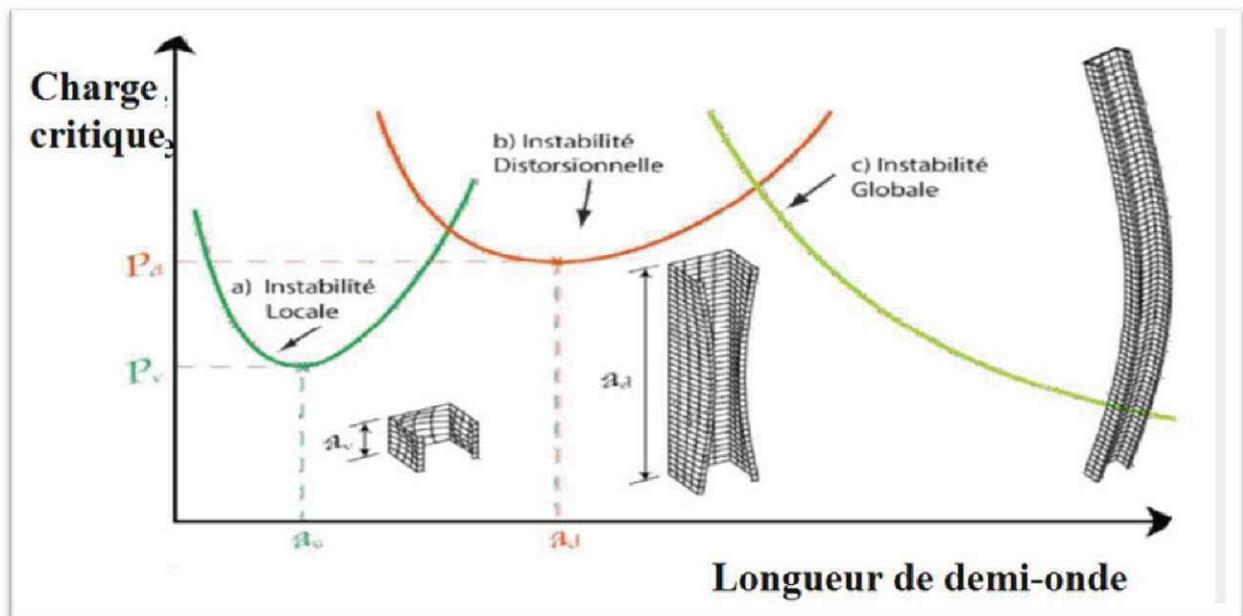


Figure I.13 : Charges critiques et déformés d'une section en C.

## I.15.2 Définition des phénomènes d'instabilité:

### I.15.2.1 Instabilité locale :

C'est un phénomène d'instabilité par bifurcation de l'équilibre, mais après déformation ces sections constituées de plaques présentent une certaine réserve de résistance avant la rupture c'est le comportement post critique. Ce type d'imperfection apparaît lors que le rapport hauteur sur épaisseur est inférieur à 200 ( $h/t < 200$ ), c'est un mode impliquant seulement la flexion hors plan de la plaque sans déformation des lignes à la jonction des plaques c'est-à-dire juste une rotation et pas de translation (Figure 1.13). Ce phénomène ressemble au voilement d'une plaque Figure (1.14).

Le mode local est induit seulement par l'énergie des déformations flexionnelles, il se produit suivant une loi sinusoïdale Figure (I.15).

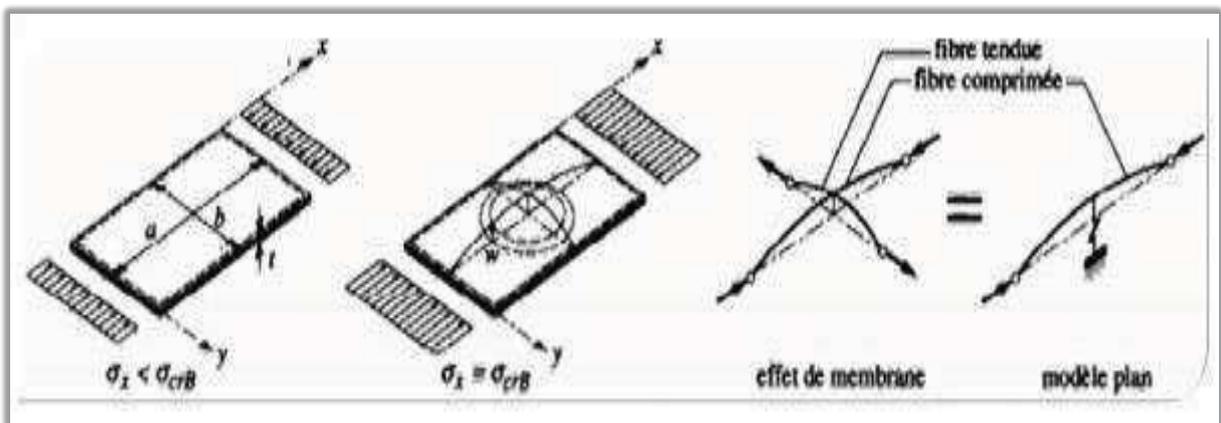


Figure I.14 : Voilement d'une plaque.

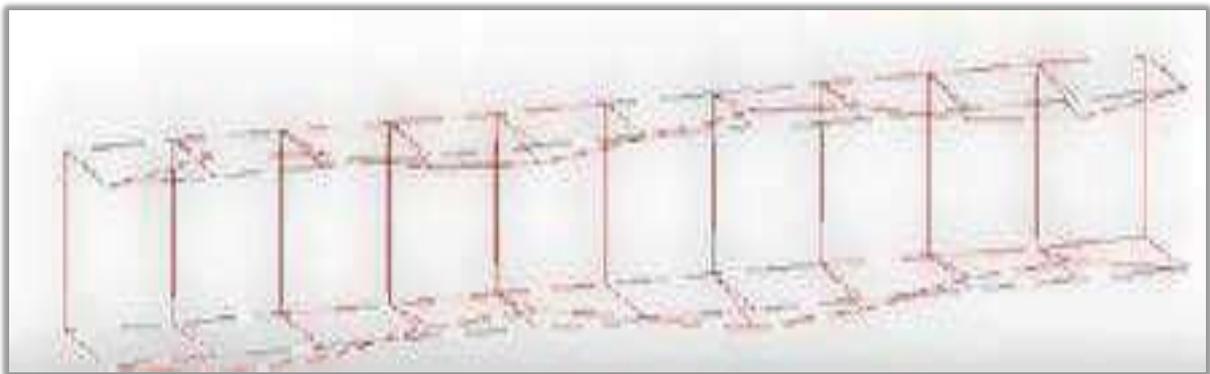


Figure I.15 : La forme sinusoïdale de la déformé (section en U).

### I.15.2.2 Instabilité globale :

C'est le cas le plus simple et le plus clair. Ce flambement global comprend les phénomènes de flambement d'Euler (1744), le mode flexionnel-torsionnel du poteau et latéral des poutres, ou la section se déplace comme un corps rigide sans aucune distorsion figure (I.16) et l'onde de flambement est la plus longue par rapport aux autres modes.

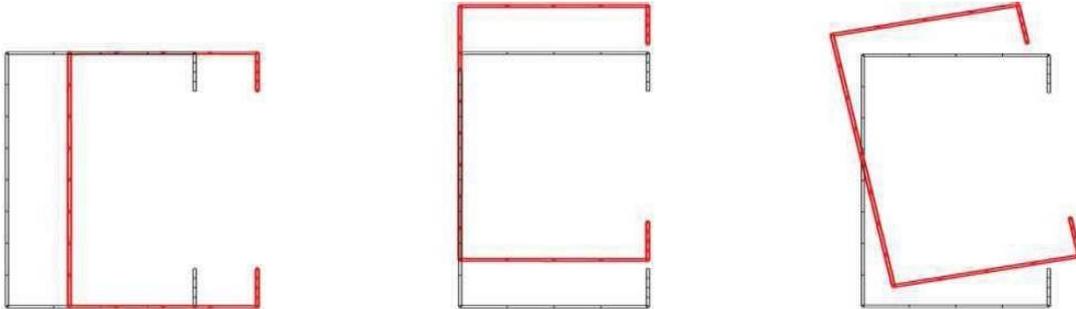


Figure I.16 : Flambement global d'une section en C.

### I.15.2.3 Instabilité distorsionnelle :

Les règles de calcul existant ne traitent pas explicitement le mode distorsionnel. C'est un mode mal maîtrisé et qui suscite plus d'attention.

En ce mode la semelle est déplacée de sa position initiale sur toute la longueur de l'élément, d'où le changement de la forme de la section (Figure I.17)

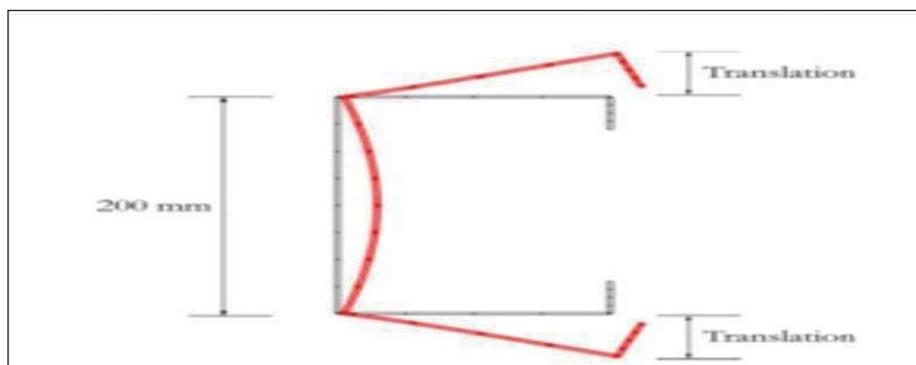
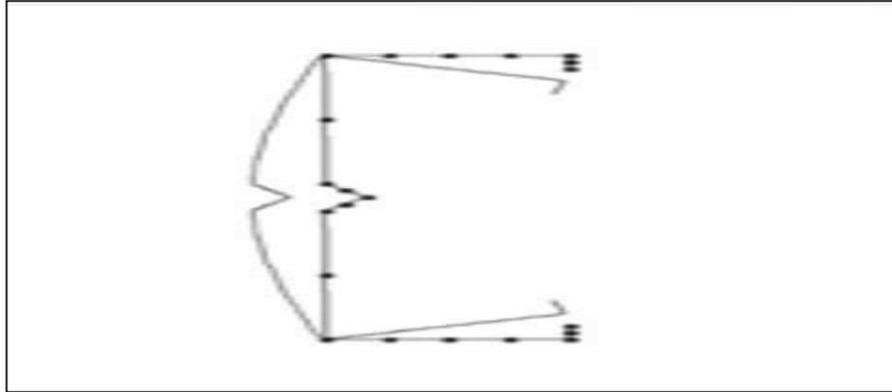


Figure I.17 : Instabilité distorsionnelle d'une section en C.

Pour des sections avec des raidisseurs intermédiaires, le mode distorsionnel est caractérisé par le déplacement du raidisseur perpendiculairement au plan de l'élément (Figure I.18).

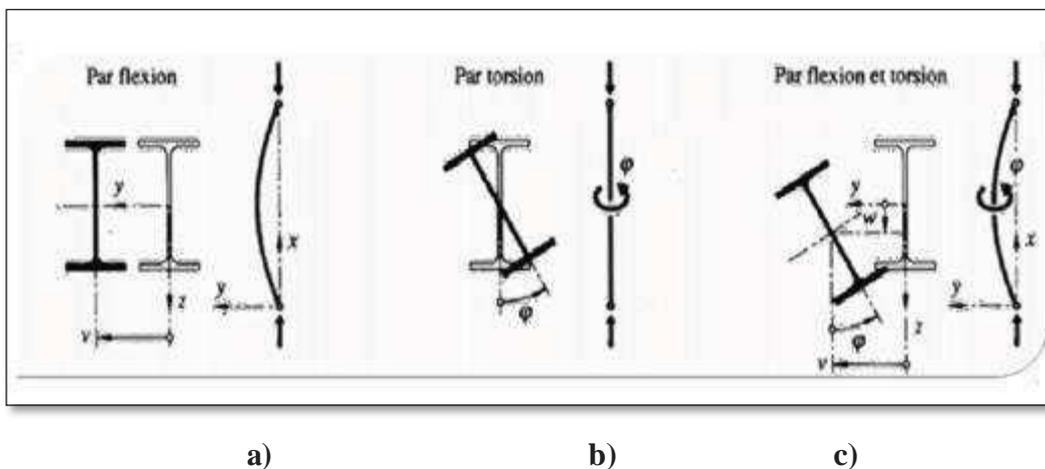


**Figure I.18 : Instabilité distorsionnelle d'une section en C avec raidisseur d'âme.**

#### I.15.2.4 Flambement par flexion :

Les profilés à section symétrique et chargé axialement en compression peuvent flamber par flexion autour de l'un des axes principaux.

Ce type d'instabilité est associé à des déplacements latéraux dans un plan de symétrie de la section, c'est le plan faible et de la moindre inertie. (Figure I.19.a)



**Figure I.19 : Modes de flambement d'une barre simplement comprimée**

#### I.15.2.5 Flambement par torsion et flexion-torsion :

Le champ de déplacement comporte non seulement des déplacements latéraux de flexion mais aussi des torsions (Figure I.19-b-c). Le flambage par flexion ou par torsion seules ont des cas particuliers. Ce dernier n'apparaît que pour des sections dont le centre de gravité et le centre de cisaillement sont confondus tandis que le flambage par flexion-torsion est le phénomène d'instabilité qui dicte la ruine de l'élément. C'est le mode d'instabilité le plus général d'une barre droite figure (I.19-c). Le tableau (I.3) donne quelques sections et leur mode de flambement.

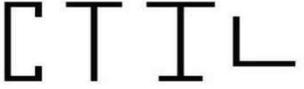
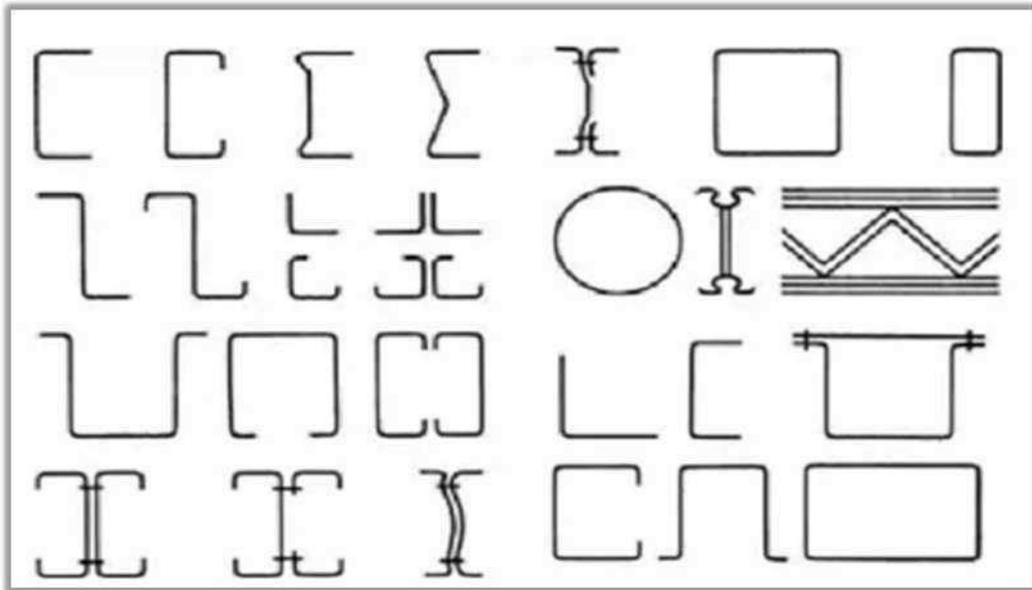
Formes de section	Modes de flambement	Efforts normaux critiques à calculer
 <p>Le centre de cisaillement est confondu avec le centre de gravité.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flambement par flexion</li> <li>• Flambement par torsion</li> </ul>	$N_{cr,y}$ $N_{cr,z}$ $N_{cr,T}$
 <p>Sections asymétriques</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flambement par flexion-torsion</li> </ul>	$N_{cr,y}$ $N_{cr,z}$ $N_{cr,T}$ $N_{cr,TF}$
 <p>Sections avec un plan de symétrie</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flambement par flexion dans le plan de symétrie</li> <li>• Flambement par flexion-torsion</li> </ul>	$N_{cr,y}$ $N_{cr,z}$ $N_{cr,T}$ $N_{cr,TF}$
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flambement par flexion</li> </ul>	$N_{cr,y}$ $N_{cr,z}$

Tableau I.3 : Formes de section et mode de flambement

### I.15.3 Domaine d'application :

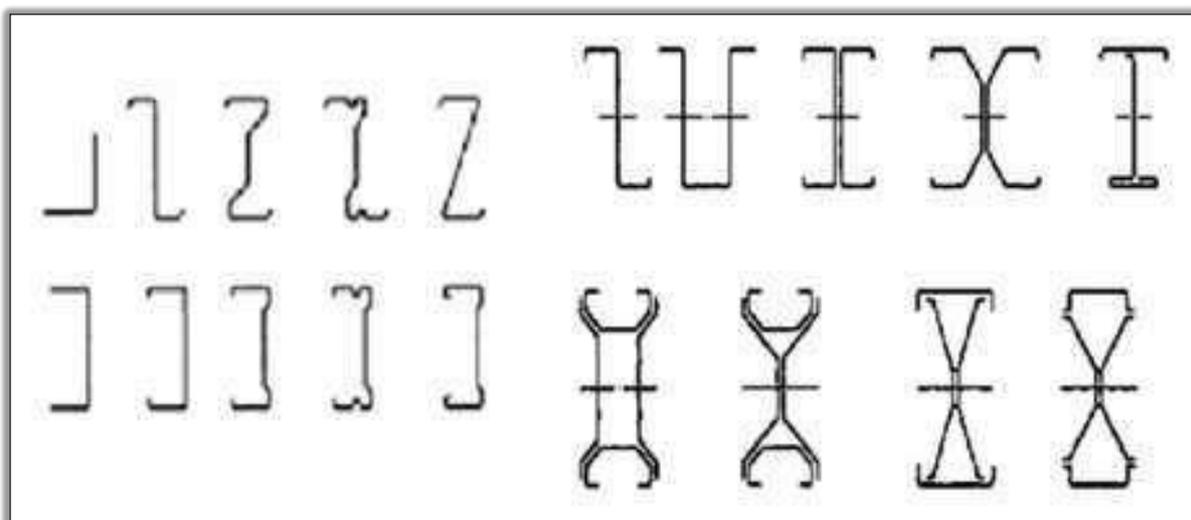
Les tôles profilées sont principalement utilisées dans les dalles mixtes, les bardages de façades et les couvertures de toiture, tandis que les profilés formés à froid le sont surtout autant que pannes de toiture et filières de façade. Il existe une tendance actuelle à utiliser ces éléments à parois minces non seulement pour les éléments secondaires, mais aussi pour les éléments porteurs principaux tels que cadres de halles industrielles, hangars agricoles et pylônes de lignes électriques. La figure (I.20) donne des exemples des tôles profilées utilisées en façade, en toiture et pour des planchers. La hauteur des tôles peut varier d'environ 30 à 180mm et leurs épaisseurs de 0.6 à 1.5 mm les tôles profilées ne doivent pas seulement reprendre des actions telles que le vent ou les charges utiles dans un bâtiment, mais elles servent souvent de coffrage (dalles mixtes) ou de support d'isolation (toiture).



**Figure I.20 : Exemple de plaques formées à froid.**

La figure (I.21) illustre quelques types de profilés formés à froid, utilisés en général dans les structures de bâtiment. En général, la hauteur de ces profilés varie de 80 à 250mm et leur épaisseur de 1 à 5mm.

Etant donné qu'il s'agit d'éléments porteurs, leur résistance ultime (à la compression, à la flexion, à la torsion) et leur rigidité en flexion et en torsions ont les caractéristiques essentielles à considérer lors du dimensionnement.



**Figure I.21 : Exemples de Profilés ouvert simple et poutres formées à froid.**

Figure I.22 représente une structure en profilé formé à froid « T » constitué de pannes et de lisses profilés sigma.



Figure I.22 : Poutres formés à froid (pannes et lisses profilés sigma).

### I.16 Conception des poutres en profilé formé à froid :

✓ L'année 2018, Les chercheurs R. Divahar et P. S. Joanna ont étudié une simulation numérique et une étude expérimentale du comportement statique d'une poutre en acier formée à froid avec une âme ondulée trapézoïdale en faisant varier le rapport profondeur-épaisseur.

Les poutres en acier avec des âmes ondulées représentent une nouvelle innovation qui a émergé au cours de la dernière décennie pour les poutres de courte et moyenne portée. La fine âme ondulée permet une réduction significative du poids de ces poutres, par rapport aux poutres laminées à chaud. Dans la solution initiale, les semelles sont constituées de plaques plates, soudées à l'âme trapézoïdale, ce qui nécessite une technologie de soudage spécifique.

L'article résume les recherches expérimentales et numériques menées à l'Université Hindustan et présente le comportement en flexion des poutres en acier formées à froid avec une âme ondulée trapézoïdale. Pour trouver l'effet de l'ondulation de l'âme, 12 expériences ont été menées sur des poutres en acier formées à froid. Les poutres ayant deux rapport profondeur-épaisseur de l'âme ( $d_w/t_w$ ) 60 et 80 et avec trois types d'angles d'ondulation de l'âme 0, 30 et 45 testées. Deux poutres ont été testées dans chaque série. Les performances statiques des trois différents angles d'ondulation, y compris mode de défaillance, courbes charge-déformation, capacité de résistance, courbes charge-déformation, courbes moment-courbure, rigidité à la flexion et ductilité. ductilité, sont comparés et discutés en détail sur la base des résultats expérimentaux. Enfin, l'analyse numérique utilisant le code de calcul par

éléments finis ANSYS est analysée. Les résultats expérimentaux ont été validés avec les résultats obtenus à partir de l'analyse numérique.

L'âme ondulée, qui est beaucoup moins lourde en raison de sa très faible épaisseur que l'âme ordinaire avec des raidisseurs transversaux ou longitudinaux, présente une meilleure rigidité à la flexion et au cisaillement hors du plan. Les principaux avantages de ce type de poutres sont les suivants les âmes ondulées augmentent la stabilité de la poutre contre le contre le flambage, ce qui peut donner lieu à une conception très économique avec une réduction des raidisseurs d'âme.

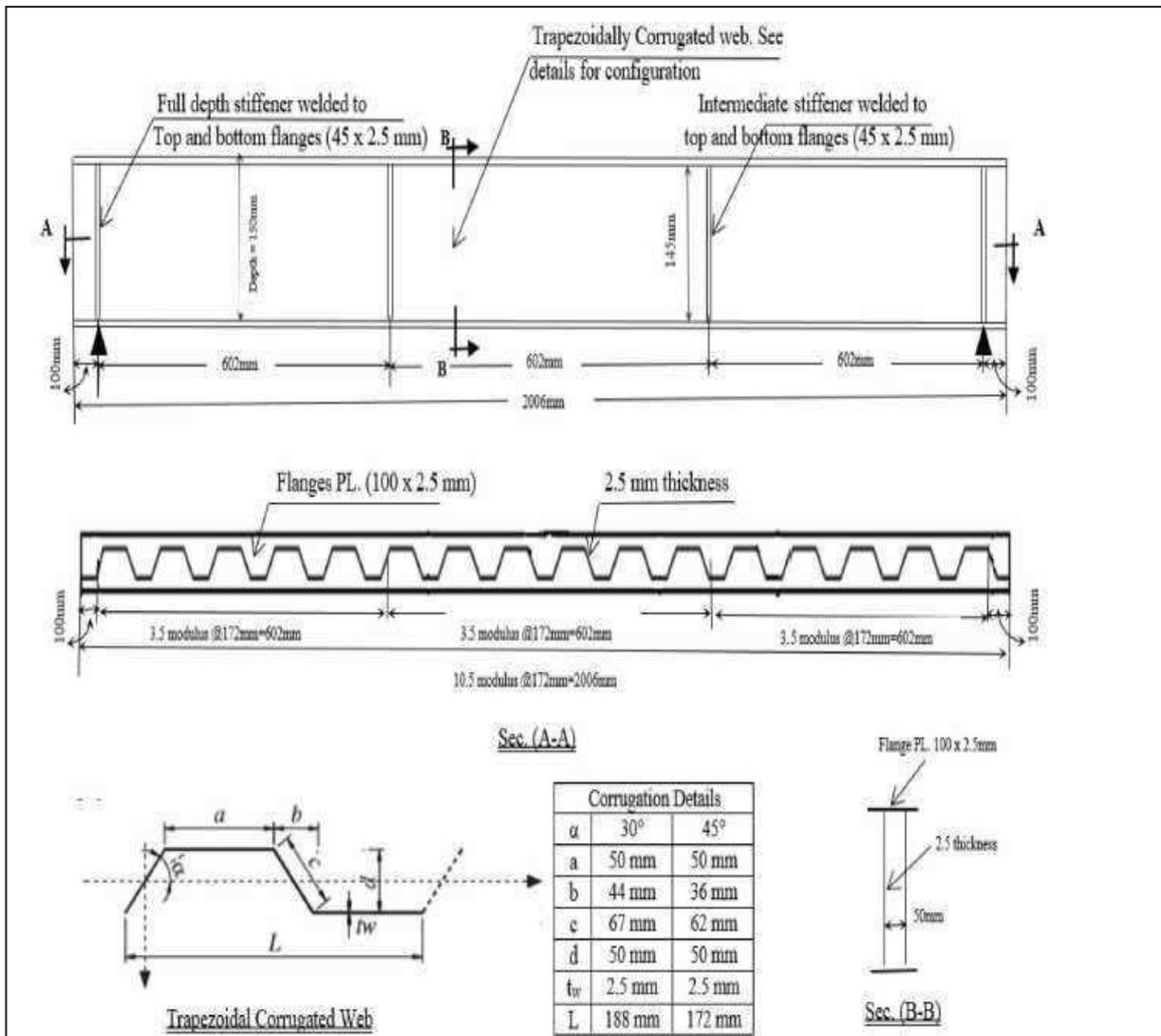
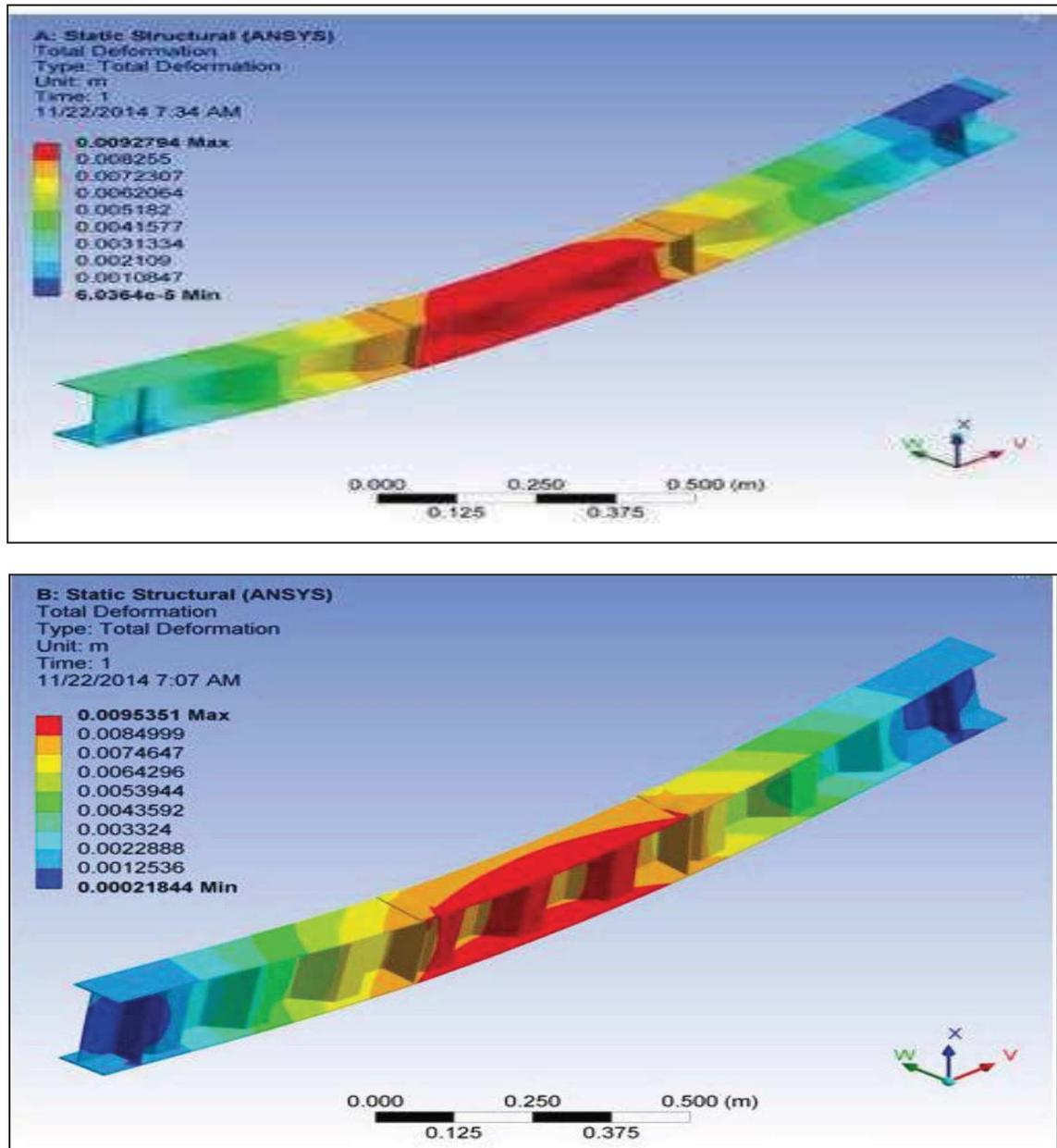


Figure I.23 : Détails du montage d'essai pour la poutre formés à froid avec âme trapézoïdale.



Figure I.24 : Essais de flexion trois points pour les poutres à âme simple et à âme trapézoïdale.



**Figure I.25 : Modélisation numérique sous ANSYS des poutres à âme simple et à âme trapézoïdale.**

La poutre en acier avec une âme à ondulation trapézoïdale de 30° ondulation a donné de bons résultats par rapport aux poutres à âme lisse et à âme à 45° d'ondulation. Il a été constaté que les poutres à âme ondulée avec un angle moins important pouvaient supporter un moment de flexion plus élevé. L'essai a également conclu que les poutres dont l'âme est ondulée trapézoïdale présentent une plus grande résistance au moment, une plus grande rigidité et moins de ductilité par rapport aux poutres à âme lisse.[5]

✓ L'année 2020, les chercheurs T. Preethi, P. R. Kannan Rajkumar, M. Jegan ont fait une enquête sur le comportement en flexion des sections bâties en acier formé à froid.

De nos jours Les profilés en acier formés à froid sont principalement utilisés dans les industries et ont une large gamme d'applications. Au cours des cinquante dernières années, plusieurs recherches ont été menées pour étudier le comportement des poutres en acier formé à froid. Bien que plusieurs recherches aient été menées dans ce domaine au cours des dernières décennies, la finalité de ces recherches n'est toujours pas atteinte.

Au début de ce siècle, en raison de l'augmentation de la demande d'utilisation de sections solides et légères dans une large gamme d'applications, il y a un progrès substantiel dans ce domaine. Cette demande d'utilisation de ces sections est rendue possible par le développement de la théorie et la compréhension de leur comportement sous charge, les considérations économiques, les techniques de construction, l'efficacité de la construction, etc. Ces progrès changent la manière traditionnelle de concevoir et rendent ces profilés en acier plus économiques. En raison du besoin de sections légères et à haute résistance, les sections doivent être rendues plus minces en tenant compte de la stabilité pendant la conception. La stabilité des sections est basée sur la résistance et l'élanement de ces sections. Dans les sections I, les contraintes de cisaillement qui se développent en raison des charges externes sont reprises par des âmes minces. Si l'âme d'une section en I est instable, des raidisseurs peuvent également être utilisés pour compenser les problèmes de stabilité. Pour éliminer l'utilisation de raidisseurs, des ondulations dans la partie de l'âme peuvent être fournies. Cette âme ondulée fournit une plus grande rigidité latérale par rapport aux âmes plates. Les poutres à âme ondulée sont avantageuses pour l'industrie de la construction, en raison de la rigidité latérale maximale de la poutre. L'objectif principal de cette étude est d'analyser le comportement d'une poutre avec une âme ondulée et une âme plane, par une approche expérimentale et une approche théorique en utilisant ANSYS et de comparer les résultats expérimentaux et théoriques.[6]



**Figure I.26 : Schéma de rupture des poutres à âme simple et à âme trapézoïdale sous l'essai de flexion trois points.**

**Conclusion :**

Les éléments de structure dans la construction métallique sont classés en deux catégories : les sections laminées à chaud et les sections formées à froid. Les profilés en acier formés à froid sont préférables aux profilés laminés à chaud en raison de leur plus grande polyvalence et parce qu'ils sont bien adaptés à une construction économique. Ces profilés en acier formés à froid sont fabriqués selon deux méthodes : le laminage à chaud ou le pliage sous presse. L'acier formé à froid est largement utilisé dans l'industrie du bâtiment, et va de la purge à la couverture de toit et au plancher. En général, les profilés en acier formés à froid comme les profilés en U, en Z et en I sont utilisés efficacement comme éléments de flexion pour les pannes et les dalles de toit.

L'étude de ces types de profilés plus complexes et difficiles à maîtriser. Plusieurs méthodes existent actuellement pour l'analyse et la compréhension du comportement des profilés minces formés à froid et dans un souci de pratique, a poussé les chercheurs à les synthétiser dans les codes de calcul comme celui de l'Eurocode (code européen) et l'AISI (code américain).

**CHAPITRE II:**  
**Aspects réglementaire**

## II.1 Introduction :

Comme nous avons dit dans le chapitre précédent, De nos jours, les profilés formés à froid sont utilisés dans diverses applications par rapport aux profilés laminés à chaud, car le poids de ces derniers est beaucoup plus élevé que celui des profilés formés à froid .

Les profilés formés à froid (PAF) sont le plus couramment utilisés dans les structures légères grâce à ces grands avantages surtout dans les silos de stockage des grains. La section formée à froid peut être combinée avec une plaque ondulée de profil et d'épaisseur variables, de sorte que les avantages de l'ondulation dans les âmes des poutres peuvent être pour améliorer les propriétés de la section.

La tôle d'acier ondulée en PAF (profilé formé à froid) présente diverses propriétés favorables et l'utilisation dans de nombreuses applications structurelles.

C'est dans ce contexte que nous nous présentons une étude analytique du comportement en flexion d'une poutre en acier formée à froid avec de différentes sections d'âmes, afin d'augmenté la rigidité latérale dans les poutres.

Pour cela la notion de section efficace doit être introduite en tenant compte des raidisseurs et des arrondis dus au pliage présents dans la section. L'application des règlements existants à savoir l'Eurocode 3 partie 1.3 est indispensable.

### II.1.1 Présentation des modèles d'étude :

On considère trois poutres en acier à haute d'élasticité pour formage à froid ( S355 selon la norme EN10149-2) , la première de forme I de 12m de portées, avec âmes simples, l'autre avec âme d'ondulation triangulaire et la dernière avec âme trapézoïdale. Ces poutres ont soumis à la sollicitation de flexion trois points avec un chargement statique croissant afin de développer un élément plus performant.

II.1.2 Les propriétés géométriques et mécaniques des poutres :

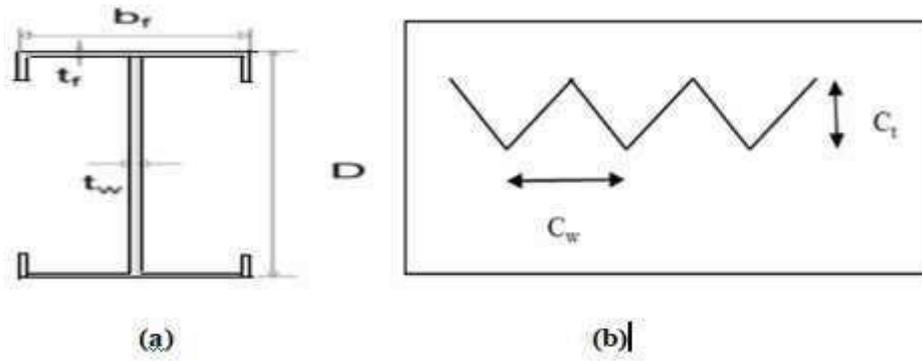


Figure II.1 : Présentation des sections transversales des poutres étudiées.

(a) Poutre I avec âme simple, (b) Ame triangulaire

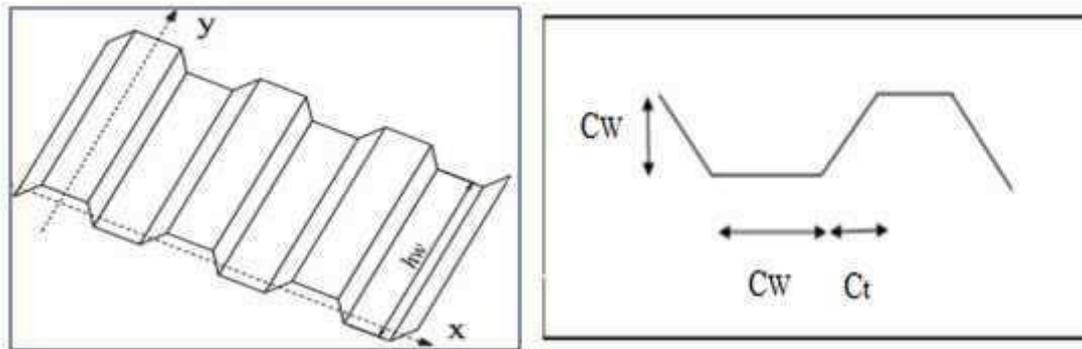


Figure II.2 : Présentation des sections transversales de la poutre à âme trapézoïdales.

Le tableau II.1 représente toutes les caractéristiques géométriques et dimensionnelles des sections transversales des poutres étudiées

Paramètre	Ame simple	Ame ondulée trapézoïdale	Ame ondulée triangulaire
D (mm)	300	300	300
bf (mm)	150	150	150
tf (mm)	3	3	3
tw (mm)	3	3	3
dw (mm)	294	294	294
Longueur de la lèvre (mm)	30	30	30
$L_{\text{poutre}}$ (m)	12	12	12
Largeur d'ondulation (Cw) (mm)	.	50	50
Profondeur d'ondulation (Ct) (mm)	.	35	25
$\Theta$ (°)	.	45	45

Tableau II.1 : Paramètres des sections transversales des poutres étudiées.

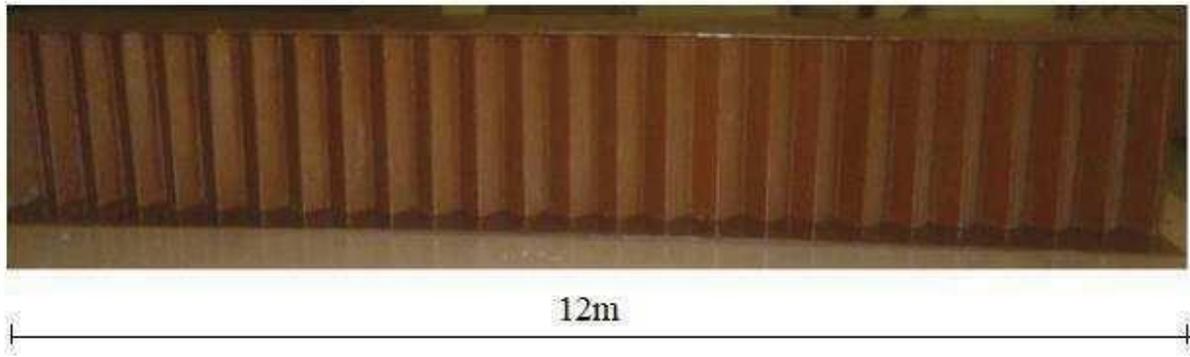
(a) âme simple; (b) âme ondulée trapézoïdale; (c) âme ondulée triangulaire



Figure II.3 : Présentation de la poutre à âme simple (âme pleine).



Figure II.4 : Présentation de la poutre à âme trapézoïdales.



**Figure II.5 : Présentation de la poutre à âme triangulaire.**

Nous présentons dans ce chapitre une méthode analytique pour la vérification des poutres vis à vis la flexion, on se basant sur la procédure retenue dans l'approche de l'Eurocode 3 partie 1.3.

## **II.2 Vérification selon l'approche de l'Eurocode 3 partie 1.3. :**

L'Eurocode 3 est le règlement européen de conception des structures en acier, dont la partie 1-3 est dédiée au dimensionnement des profilés minces formés à froid qu'on va essayer de détailler dans ce chapitre.

### **II.2.1 Base de calcul :**

Les sections transversales peuvent être classifiées suivant leur capacité d'atteindre leur état limite. Cette classification est influencée par la capacité des sections à se plastifier et l'influence des instabilités. L'Eurocode définit quatre types de classes. Nos profilés sont placés dans la classe 4 à cause de leur épaisseur et leur susceptibilité à l'instabilité locale. Dans cette classe, la résistance au moment fléchissant ou à la compression d'une section transversale doit être déterminée avec prise en compte explicite des effets du voilement local. [4]

### **II.2.2 Coefficient de sécurité :**

Pour la vérification à l'état limite ultime, les coefficients partiels  $\gamma_m$  doivent être pris comme suit :

- Résistance de la section quand la ruine est due à une plastification  $\gamma_{M0} = 1,1$
  - Résistance des profilés et plaques lorsque la ruine est due à une instabilité  $\gamma_{M1} = 1,1$
  - Résistance des sections nettes au niveau des trous de boulons  $\gamma_{M2} = 1,25$
- à l'état limite de service on prend le coefficient  $\gamma_{MSer} = 1,0$

### II.2.3 Caractéristiques des matériaux :

Les caractéristiques et les nuances des aciers utilisés dans la formation des profilés formés à froid et à chaud recommandées par l'Eurocode sont synthétisées dans le tableau (II.2) suivant :

Les coefficients caractéristiques de l'acier :

- Le module d'élasticité  $E=210\,000\text{ N/mm}^2$
- Le module de cisaillement  $G=E/2(1+\nu)\text{ N/mm}^2$
- Le coefficient de poisson  $\nu =0.3$
- Le coefficient de dilatation linéaire  $\alpha=12 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$
- La masse volumique  $\rho=7850\text{ kg/m}^3$

Type d'acier	Norme	Nuance	$f_{yb}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_u$ N/mm <sup>2</sup>
Tôle en acier de construction laminée à chaud	EN10025	S235	235	360
		S275	275	430
		S355	355	510
Tôles en acier de construction à haute limite d'élasticité laminées à chaud	EN10113-2	S275N	275	370
		S355N	355	470
		S420N	420	520
		S460N	460	550
	EN10113-3	S275M	275	360
		S355M	355	450
		S420M	420	500
		S460M	460	530
Tôles en acier de construction Laminée à froid	ISO4997	CR220	220	300
		CR250	250	330
		CR320	320	400
Tôles en acier de construction galvanisées à chaud en continu	EN10147	Fe E220G	220	300
		FeE250G	250	330
		Fe E 280G	280	360
		FeE320G	320	390
		Fe E350G	350	420
Aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid	EN10149-2	S315MC	315	390
		S355MC	355	430
		S420MC	420	480
		S460MC	460	520
		S500MC	500	550
	EN10149-3	S550MC	550	600
		S260MC	260	370
		S315MC	315	430
		S355MC	355	470
		S420MC	420	530

Tableau II.2 : Valeurs de la limite d'élasticité  $f_{yb}$  et la résistance à la traction  $f_u$ .

II.2.4 Caractéristiques des sections :

Les propriétés des sections doivent être déterminées en fonction des particularités des sections transversales car elles influencent la résistance de l'élément. [4]

Ces caractéristiques sont déterminées à partir de la géométrie réelle des sections (Figures II.6, II.7 et II.8).

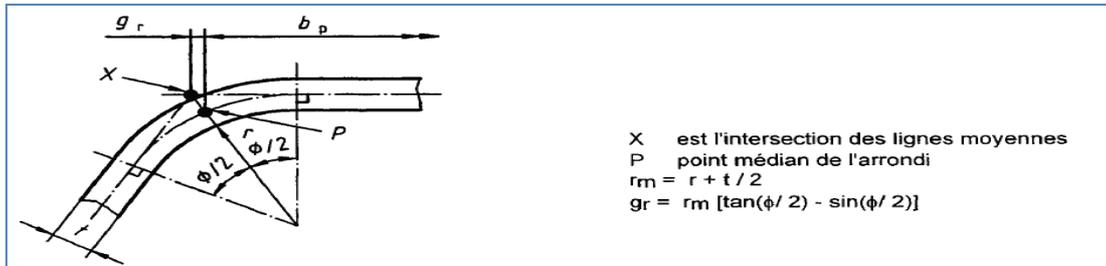


Figure II.6 : Point médian d'un arrondi ou de pli.

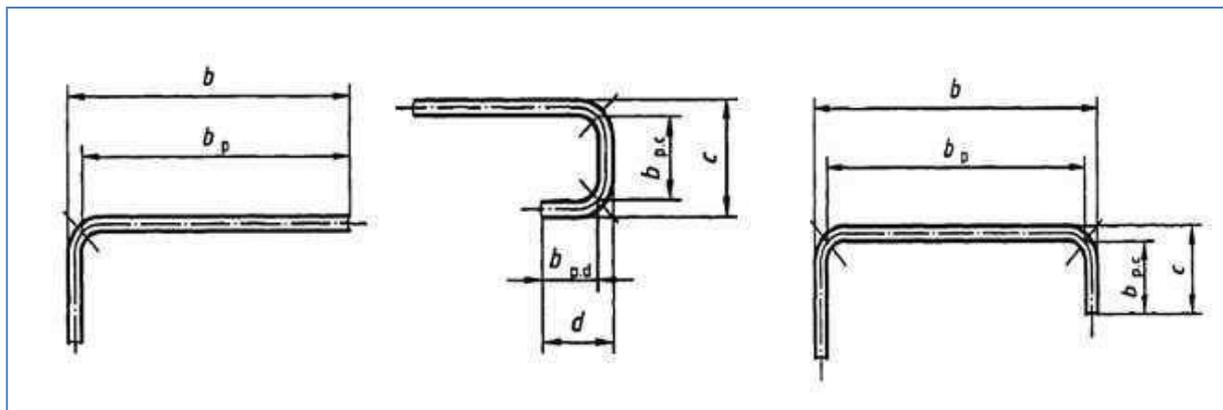


Figure II.7 : Largeur de référence des parois.

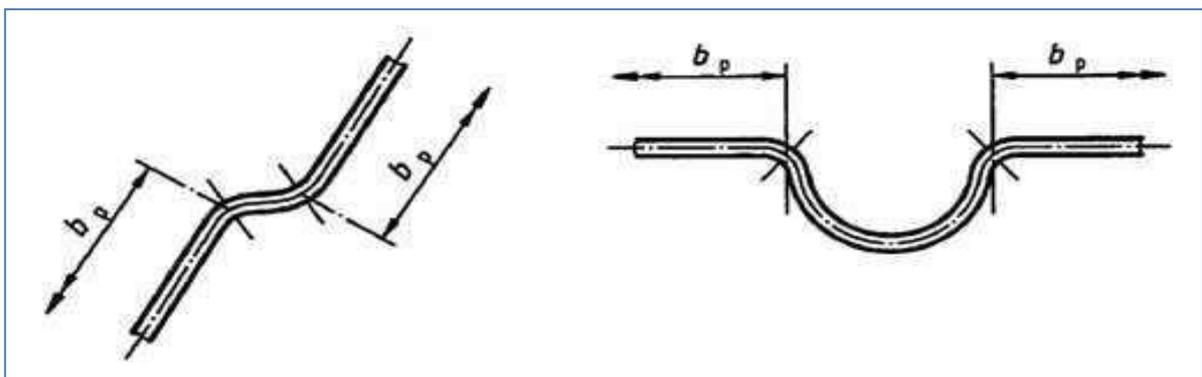


Figure II.8 : Largeur de référence des parois adjacentes des raidisseurs.

- b<sub>p</sub>** : largeur de la paroi sans les coins
- b** : largeur totale de la paroi
- c** : largeur totale du raidisseur

### II.2.5 Limite d'élasticité moyenne augmentée :

L'Eurocode introduit la notion de limite d'élasticité moyenne augmentée  $f_{ya}$  d'une section transversale après formage à froid. Elle peut être calculée de la manière suivante :

$$f_{ya} = K \cdot f_y \cdot \left( \frac{A_{br}}{A_{eff}} \right)^{1/n}$$

**K** : coefficient dépendant du type de formage.

**K=7** Profilage à froid ou **K=5** autre type de profilage

**n** : Nombre de plis à 90 dans la section transversale avec un rayon intérieur  $r < 5t$

**t** : l'épaisseur nominale de métal nu de la tôle d'acier avant le formage à froid

Cette limite élastique moyenne augmentée est utilisée lorsque le profilé est soumis à une charge axiale et que l'aire efficace de la section  $A_{eff}$  est égale l'aire brute

Pour ce qui est des épaisseurs minimales à utiliser, l'Eurocode propose les valeurs suivantes :

Pour les plaques  $0,5\text{mm} \leq t \leq 4,0\text{ mm}$

Pour les profilés  $1,0\text{mm} \leq t \leq 4,0\text{ mm}$

**II.2.6 Proportions géométriques :**

Le tableau suivant (II.3) présente les valeurs maximales des proportions géométriques des sections que doivent respecter les profilés.

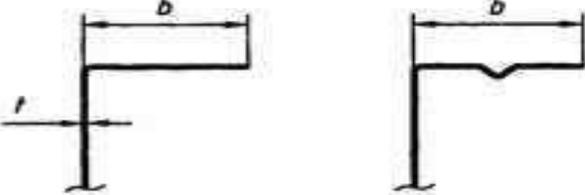
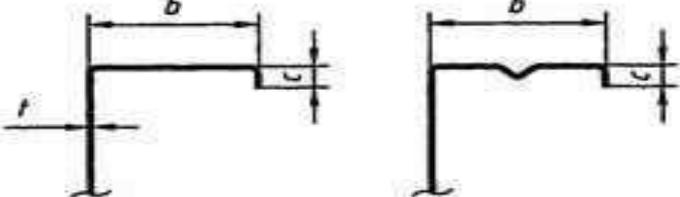
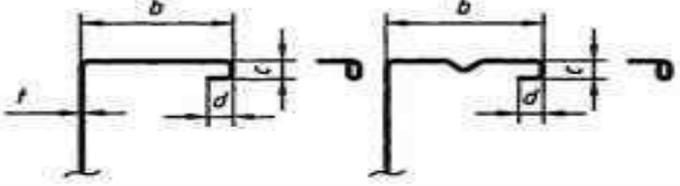
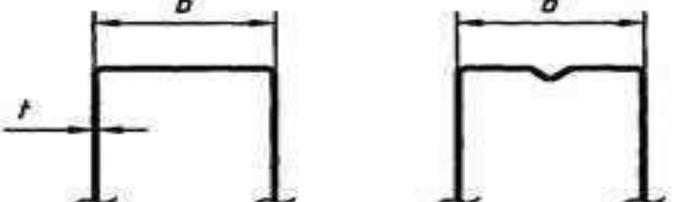
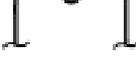
Paroi de section transversale		Valeur maximale
		$b/t \leq 50$
		$b/t \leq 60$
		$b/t \leq 90$
		$b/t \leq 500$
		$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

Tableau II.3 : Rapports largeur épaisseur maximum.

Type de paroi	Modèle	Type de paroi	modèle
			
			
			
			
			

**Tableau II.4 : Modélisation des parois d'une section transversale.**

Le tableau II.3 représente pour chaque type de section, la modélisation correspondante des parois. Dans un souci de garantir une rigidité suffisante et d'éviter le flambement du raidisseur, les conditions suivantes doivent être vérifiées :

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6 \quad \text{et} \quad 0,1 \leq c/b \leq 0,3$$

Avec b et c, les largeurs de la paroi données sur les figures du tableau II.4

### II.3 Instabilité Locale :

Les effets de voilement local sont pris en compte pour déterminer la résistance des profilés. Ce phénomène est souvent analysé en utilisant la méthode simple dite de «la largeur effective».

#### II.3.1 Principe de la méthode de la « largeur effective » :

Pour les éléments à formés à froid et à parois minces, le rapport largeur épaisseur est très élevé. Ces éléments, lorsqu'ils sont soumis à des efforts de compression ils ont tendance à voiler localement mais pendant ce voilement les coins, les raidisseurs et une partie de la paroi restent intacts et continuent de résister effectivement à plus que la contrainte de compression appliquée.

Dans cette situation, on se pose la question, qu'elle est la largeur de la paroi du profilé qui

résiste effectivement. De ceci vient la méthode des largeurs effectives.

Donc, on peut avoir des sections non raidies (doublement appuyées ou en consol) ou bien des sections raidies au bord ou sur la paroi (intermédiaire)

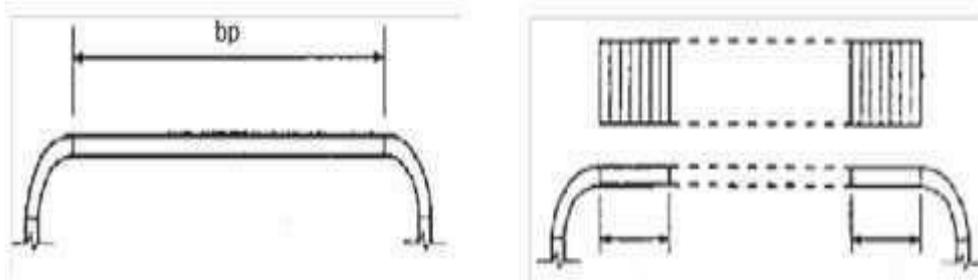


Figure II.9 : Largeur efficace.

**II.3.2 Parois non raidies :**

La largeur effective efficace d'un élément comprimé est évaluée en utilisant un facteur de réduction  $\rho$  qui sera déterminé à partir de la contrainte de compression  $\sigma_{com,Ed}$  qui s'exerce dans la paroi concernée. Soit :

$$b_{eff} = \rho b_p$$

Si  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M1}$  le facteur de réduction sera obtenu comme suit :

On calcule :

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{K \cdot b_p^3}{12 \cdot E \cdot I_y}}$$

$$\rho = 1 \quad \text{si} \quad \lambda_p \leq 0.673 \quad (1)$$

$$\rho = (1 - 0.22 / \lambda_p) / \lambda_p \quad \text{si} \quad \lambda_p > 0.673 \quad (2)$$

$K$  coefficient de voilement donné dans les tableaux suivants (II.4) et (II.5) pour les différents types de distribution des contraintes.

si  $\sigma_{com,Ed} < f_{yb} / \gamma_{M1}$  le facteur de réduction sera obtenu selon deux alternatives :

Utiliser les expressions (1) et (2) mais remplacer l'élancement  $\lambda_p$  par l'élancement réduit.

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_{yb} / \gamma_{M1}}}$$

Ou bien remplacer les équations (1) et (2) par :

$\rho = 1$  , si  $\lambda p \leq 0.673$  (1)

$\rho = \frac{0.85 \lambda p}{1 + 0.00008 \lambda^3 p^3}$  si  $\lambda p > 0.673$  (2)

Après avoir calculé  $\rho$  et d'après le tableau 2.4 et 2.5 on obtient  $b_{eff}$  de laquelle on va calculer la section efficace  $A_{eff}$

Distribution des contraintes		Largeur efficace $b_{eff}$				
		$\Psi = +1$ $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = 0.5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.5 b_{eff}$				
		$0 \leq \Psi \leq +1$ $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = 2 b_{eff} / (5 - \psi)$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$				
		$-1 \leq \Psi \leq 0$ $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = 0.4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.6 b_{eff}$				
		$\Psi \leq -1$ $b_{eff} = \rho b_c$ $b_{e1} = 0.4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.6 b_{eff}$				
$\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	$0 \leq \Psi \leq +1$	0	$-1 \leq \Psi \leq 0$	-1	$-3 \leq \Psi \leq -1$
Coefficient de voilement K	4	8,2 / (1,05 + $\psi$ )	7,81	7,81 - 6,29 $\psi$ + 9,78 $\psi^2$	23,9	5,98(1 - $\psi$ ) <sup>2</sup>
De manière alternative $-1 \leq \Psi \leq +1$						
$K = \frac{16}{[(1 + \psi)^2 + 0,112(1 - \psi)^2]^{0,5} + (1 + \psi)}$						

Tableau II.5 : Parois comprimées sur deux appuis

Distribution des contraintes (compression positive)		Largeur efficace $b_{\text{eff}}$			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -1$	
Coef. de voilement $k_{\sigma}$	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Coefficient de Voilement $k_{\sigma}$	0,43	$\frac{0,578}{\psi + 0,34}$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	

Tableau II.6 : Parois comprimées en console.

II.3.3 Parois munis de raidisseurs de bords et intermédiaire :

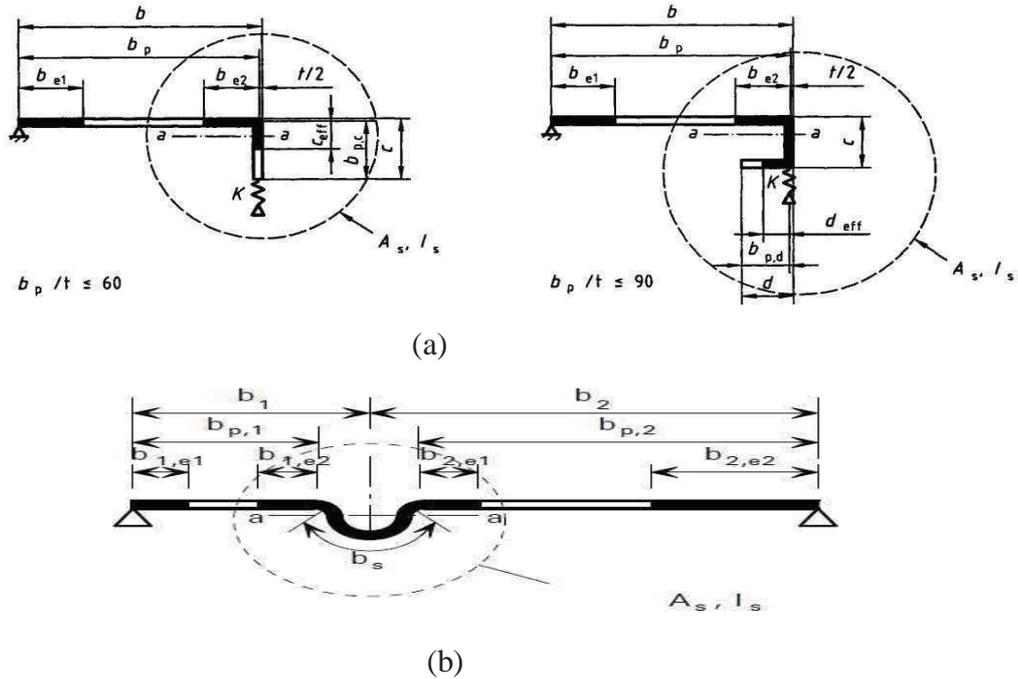


Figure II.10 : Paroi avec raidisseur.

(a) raidisseur bord, (b) raidisseur intermédiaire

Si il ya présence de raidisseurs dans la section on doit suivre la procédure itérative suivante pour déterminer les largeurs efficaces (Figure 2.II).

**Etape 1 :** On calcule une section efficace transversale initiale  $A_s$  pour le raidisseur à l'aide des largeurs efficaces qui est basée sur  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M1}$  et en utilisant le coefficient de voilement suivant :

**K=0,5**

**$b_{p,c} / b_p \leq 0,35$**

**$K = 0,5$**

**$0,35 < b_{p,c} / b_p \leq 0,5$**

$c_{eff} = \rho b_{p,c}$  pour un raidisseur de bord à simple pli (Figure II.10.a)

$c_{eff} = \rho b_{p,c}$  et  $d_{eff} = \rho b_{p,d}$  pour un raidisseur de bord à double pli (Figure II.10.b)

$A_s = t (b_{e2} + c_{eff} + d_{eff})$  Pour un raidisseur de bord.

$A_s = t (b_{1,e2} + b_{2,e1} + b_s)$  Pour un raidisseur intermédiaire.

**Étape 2 :** On utilise cette section efficace initiale pour déterminer le facteur de réduction de flambement par distorsion.

$$\chi_{cr,s} = \frac{\sigma_{cr,s}}{\sigma_{cr,s}}$$

$\sigma_{cr,s}$  est la contrainte critique de flambement élastique

$K_s$  est la rigidité du support élastique par unité de longueur

$I_s$  est le moment d'inertie de la section efficace d'aire  $A_s$  du raidisseur par rapport à l'axe

(a-a) (figure II.5)

$$\lambda_{cr,s} = \frac{K_s l}{\sigma_{cr,s}}$$

Le facteur de réduction est donné par :

$$\chi_d = 1,0 \quad \text{si } \lambda_{cr,s} \leq 0,65$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \lambda_{cr,s} \quad \text{si } 0,65 < \lambda_{cr,s} < 1,38$$

$$\chi_d = 0,66 / \lambda_{cr,s} \quad \text{si } 1,38 \leq \lambda_{cr,s}$$

**Étape 3 :** on répète l'étape 1 en calculant la largeur efficace avec la contrainte de compression réduite  $\sigma_{cr,s} = \chi_d f_{yb} / \gamma_{M1}$  avec  $\chi_d$  de l'itération précédente jusqu'à avec  $\chi_d = \chi_{d(n-1)}$  avec  $\chi_d \leq \chi_{d(n-1)}$ . Adopter une largeur efficace  $b_{e2}$ ,  $c_{eff}$  et l'épaisseur réduite  $t_{red}$  correspondant à  $\chi_d$ .

## II.4 Résistance des Sections Transversales :

La vérification de la résistance des sections est faite de la même manière pour les structures en profilés formés à chaud sauf au lieu d'utiliser la section totale du profilé on utilise la section efficace déterminée précédemment.

### II.4.1 Traction axiale :

Dans un élément sollicité en traction axiale la valeur de calcul de l'effort de traction doit rester inférieure à  $N_{t,rd}$

$$N_{t,rd} = f_{ya} A_g / \gamma_{M1} \text{ mais } N_{t,rd} \leq F_{n,rd}$$

### II.4.2 Compression axiale :

Dans un élément sollicité en compression axiale la valeur de calcul de l'effort de compression doit rester inférieure à  $N_{c,rd}$

$$\text{Si } A_{eff} \leq A_g N_{c,rd} = f_{yb} \cdot A_{eff} / \gamma_{M1}$$

$$\text{Si } A_{eff} = A_g N_{c,rd} = f_{ya} \cdot A_g / \gamma_{M0}$$

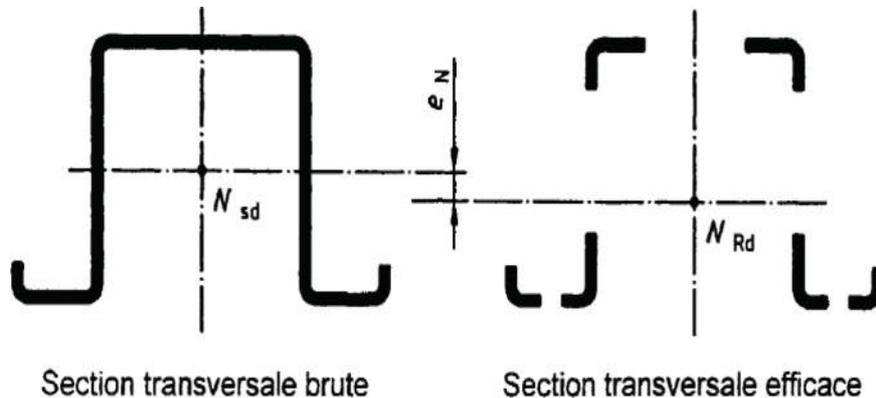


Figure II.11 : Section transversale efficace en compression.

### II.4.3 Moment fléchissant :

#### Introduction:

Considérons une poutre horizontale appuyée à ses deux extrémités et supportant un poids placé au milieu des appuies. La force extérieure  $F$  exercée sur la poutre par la charge qu'elle supporte est perpendiculaire à son axe longitudinal. Elle génère ce qu'on appelle une flexion ou un moment fléchissant.

La poutre se déforme pour produire une réaction qui équilibre le système. Contrairement à la traction où la section du matériau est soumise à une contrainte uniforme, la flexion exerce de part et d'autre de la fibre neutre des contraintes variables et de signes opposés. La face supérieure de la poutre se raccourcit sous un phénomène de compression et la face inférieure s'allonge sous un phénomène inverse de traction. (Figure II.12).

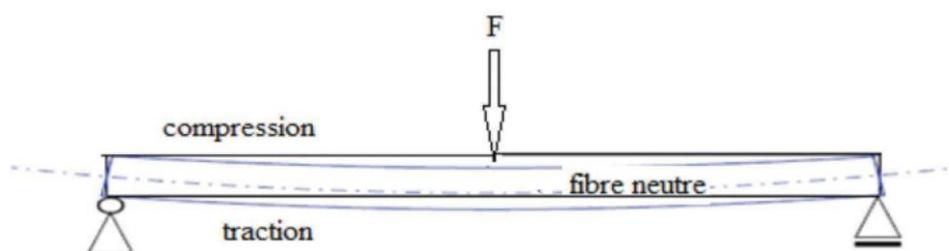


Figure II.12 : Flexion générée par l'effort  $F$ .

**Vérification des sections transversales:**

Il y'a deux vérifications à savoir :

- à l'état limite ultime
- à l'état limite service

**Vérification à l'état limite ultime:**

Dans une poutre simple à travée unique, comme la ruine survient, lorsque la valeur du moment fléchissant ( $M_{max}$ ) dépasse le moment de résistance de la section transversale. Dont la grandeur dépend de la forme du profil, de la résistance du matériau et de la classification de la section. (L'EC3 fixe une valeur d'effort tranchant de 50% de la résistance de calcul plastique au cisaillement).

**Vérification à l'état limite de service:**

- Outre les vérifications de résistance déjà décrites, il est également nécessaire de vérifier le comportement des poutres aux états limites de service.
- Les principes concernant les états limites de service donnés dans la section 4 de l'ENV1993 1-1 doivent également être appliquées aux profilés formés à froid.
- Vérification de la flèche: Une flèche excessive dans une poutre de plancher ou de toiture peut entraîner divers désordres: fissuration des cloisons, bris des vitrages, dysfonctionnement des châssis de portes (ou fenêtres) .... Par ailleurs une flèche anormale peut créer des transmissions de bruits ou de vibration, qui est source d'inconfort. Une flèche excessive peut provoquer une accumulation d'eau sur les toitures de faible pente (< à 3 %).

Pour respecter les conditions de service, les flèches calculées doivent rester inférieures aux flèches admissibles.

Les flèches admissibles dépendent de la destination et de la fonction de la poutre.

Il convient que la flèche calculée d'une panne dans la direction perpendiculaire à la surface du toit, résultant des charges variables de gravité, ne soit pas supérieur aux valeurs données par les normes **EC3 partie 1.3**, fournit les valeurs indicatives des valeurs admissibles pour les flèches  $f_{max}$ ,  $\delta 2_{max}$ .

Les flèches peuvent être calculées en prenant l'hypothèse du comportement élastique. Selon les règles il faut vérifier que:  $\delta 1 + \delta 2 - \delta 0 \leq f_{max}$  et  $\delta 2 \leq \delta 2_{max}$ .

**Résistance en flexion:**

En l'absence de l'effort tranchant la valeur du moment fléchissant de la section transversale doit rester inférieure à  $M_{c,rd}$ .

Si  $W_{eff} < W_{el}$   $M_{c,rd} = f_{yb} \cdot W_{eff} / \gamma_{M1}$

Si  $W_{eff} = W_{el}$   $M_{c,rd} = f_{ya} \cdot W_{el} / \gamma_{M0}$

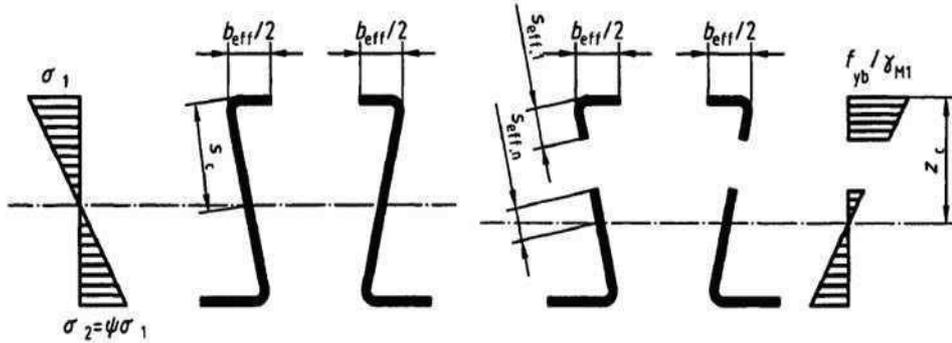
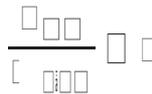
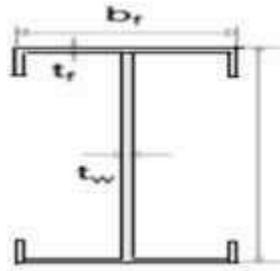


Figure II.13 : Section transversale efficace en résistance en moment fléchissant.



**II.5 Exemple d'analyse de la poutre forme I selon EC3 à la flexion simple :**



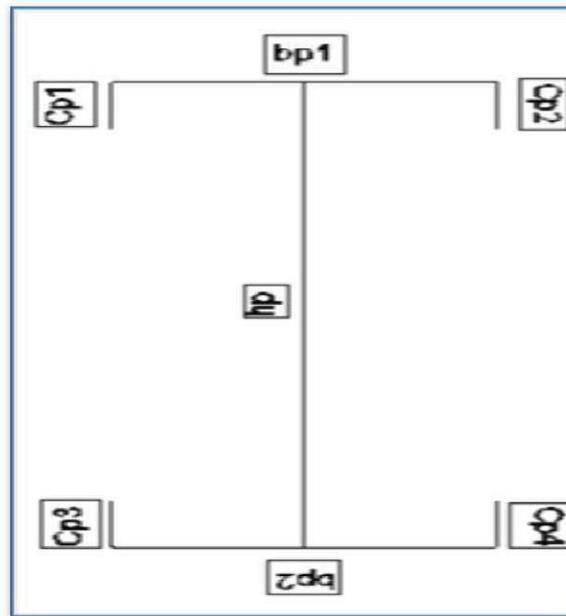
**Figure II.14 : Section transversale de la poutre I.**

**II.5.1 Détermination des caractéristiques des sections:**

$$h_p = h - t_{nom} = 300 - 3 = 297 \text{ mm}$$

$$b_{p1} = b_{p2} = b - t_{nom} = 150 - 3 = 147 \text{ mm}$$

$$C_{p1} = C_{p2} = C_{p3} = C_{p4} \implies C - t_{nom} = 30 - (3/2) = 28.5 \text{ mm}$$



**Figure II.15 : Caractéristiques géométriques de la section efficace type I.**

**II.5.2 Vérification des proportions géométriques:**

La méthode de calcul de l'EN1993-1-3 peut être appliquée si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$1.0 \text{ mm} < t_{nom} < 4.0 \text{ mm} \implies 1.0 \text{ mm} < 3 < 4.0 \text{ mm} \quad \text{vérifiée}$$

$$\frac{b_f}{t_f} \leq 60 \implies \frac{150}{3} = 50 \leq 60 \quad \text{vérifiée}$$

$$\frac{h_p}{t_w} \leq 500 \implies \frac{297}{3} = 99 \leq 500 \quad \text{vérifiée}$$

$$\frac{b}{t} \leq \lambda \Rightarrow \frac{80}{2.8} = 28.57 \leq 50 \quad \text{vérifiée}$$

Pour assurer une rigidité suffisante et pour éviter le flambement du raidisseur de bord, les dimensions de ce dernier devraient être comprises entre les valeurs suivantes:

$$45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ \Rightarrow 45^\circ \leq 90^\circ \leq 135^\circ \quad \text{Vérifiée}$$

$$\frac{t}{t'} \leq \frac{b}{b'} \Rightarrow \frac{2.8}{10} \leq \frac{80}{100} \quad \text{Vérifiée}$$

L'influence des arrondis est négligée si:

$$\frac{b}{t} \leq \lambda \Rightarrow \frac{80}{2.8} = 28.57 \leq 50 \quad \text{Vérifiée}$$

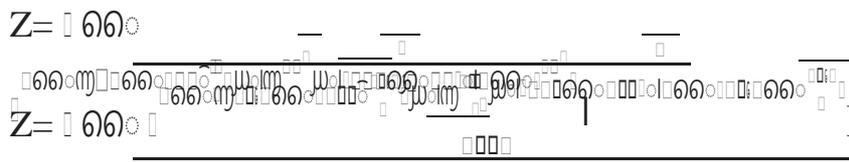
$$\frac{t}{t'} \leq \frac{b}{b'} \Rightarrow \frac{2.8}{10} \leq \frac{80}{100} = 0.8 \leq 1 \quad \text{Vérifiée}$$

Propriétés de la section brute:

$$A_b = t [(2b_p) + (4C_p) + (h_p) ]$$

$$A_b = 2.8 \times [(2 \times 147) + (4 \times 28.5) + (297) ] = 1974 \text{ mm}^2$$

**Position de l'axe neutre par rapport à la semelle supérieure:**



$$Z = 148.5$$

**II.5.3 Propriétés de la section efficace des semelles et des bords comprimés:**

Il convient d'appliquer la procédure générale (itérative) pour calculer les propriétés efficaces de la semelle et des bords comprimés (élément plan avec raidisseur de bord). Le calcul s'effectue en trois étapes :

**Première étape:**

Obtention d'une section transversale efficace initiale pour le raidisseur en utilisant les largeurs efficaces des semelles, lesquelles sont déterminées en considérant que les semelles comprimées sont doublement soutenues, que le raidisseur confère un maintien total (\$K = \infty\$) et que la résistance de calcul n'est pas réduite (\$\sigma\_{com,Ed} = f\_{yb} / \gamma\_{M0}\$).

**Largeur efficace des semelles comprimées:**

Le rapport de contraintes :  $\psi=1$  (compression uniforme), donc le coefficient de flambement est

:  $k_{\sigma} = 4$  pour un élément interne en compression  $\epsilon = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$   $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$   $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$

**L'élancement réduit:**

$\lambda_{bp1} = \frac{L_{eff1}}{i_{y1}} = \frac{L_{eff1}}{i_{y1}} = 1.14 > 0.673$   
 $p_1 = \frac{1}{\lambda_{bp1}^2} < 1 = > 0.707$

**Largeur efficace est:**

$b_{eff1} = p_1 \times b_{p1} = 0.707 \times 147 = 103.93 \text{ mm}$

$b_{e1} = 0.5 \times b_{eff1} = 51.97 \text{ mm}$

**Pour la semelle inférieure:**

$\lambda_{bp2} = \frac{L_{eff2}}{i_{y2}} = \frac{L_{eff2}}{i_{y2}} = 1.14 > 0.635$

$p_2 = \frac{1}{\lambda_{bp2}^2} < 1 = > 0.707$

**Largeur efficace est:**

$b_{eff2} = p_2 \times b_{p2} = 0.707 \times 147 = 103.93 \text{ mm}$

$b_{e2} = 0.5 \times b_{eff2} = 51.97 \text{ mm}$

**Largeur efficace des bords tombés:**

**Pour les bords tombé supérieur :**

$C_{p1} = C_{p2}$

**Le coefficient de flambement est**

$\frac{60}{9.7} \times 1.1 \times 1.1 = 1.1$  Donc :  $K_{\sigma} = 0.5$

**L'élancement réduit :**

$\lambda_{ef} = \frac{L_{ef}}{i_{y1}} = 0.626 < 0.673$

donc  $p=1$

$$c_{\text{eff}} = \rho \times c_p = 1 \times 30 = 28.5 \text{ mm}$$



↑  
□ □ □ □ □ □ □ □ □ □  
□ □ □

Avec :

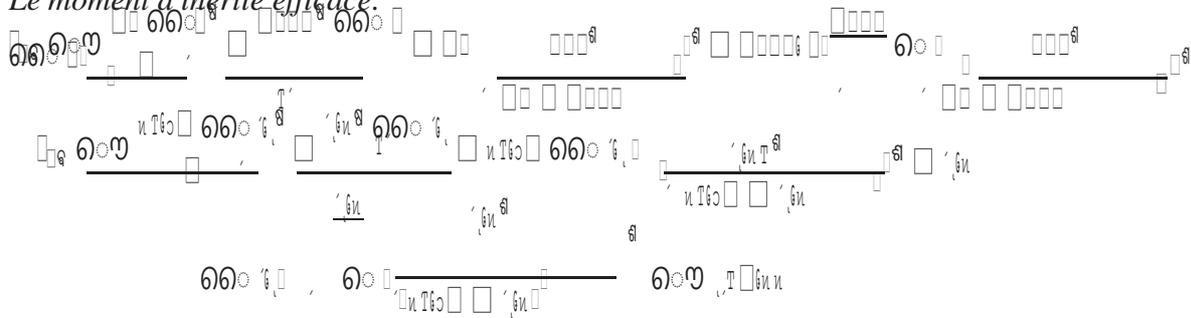
$b_1$ – distance entre la jonction âme-semelle et le centre de gravité de l'aire efficace du raidisseur de bord semelle supérieur.

$$b_1 = \frac{I_{eff}}{I_{web}} = 130.22 \text{ mm}$$

$$b_1 = 130.22 \text{ mm}$$

$$K_f = \dots$$

Le moment d'inertie efficace:



$$I_{s1} = 8307.55 \text{ mm}^4$$

$K_f = 0$  pour la flexion par rapport à l'axe y-y

Donc la rigidité du support élastique est :

$$K_1 = \frac{E I_{s1}}{L^3} = \dots$$

$$K_1 = 0.56$$

Ainsi, la contrainte critique de flambement élastique pour le raidisseur du bord supérieur est :

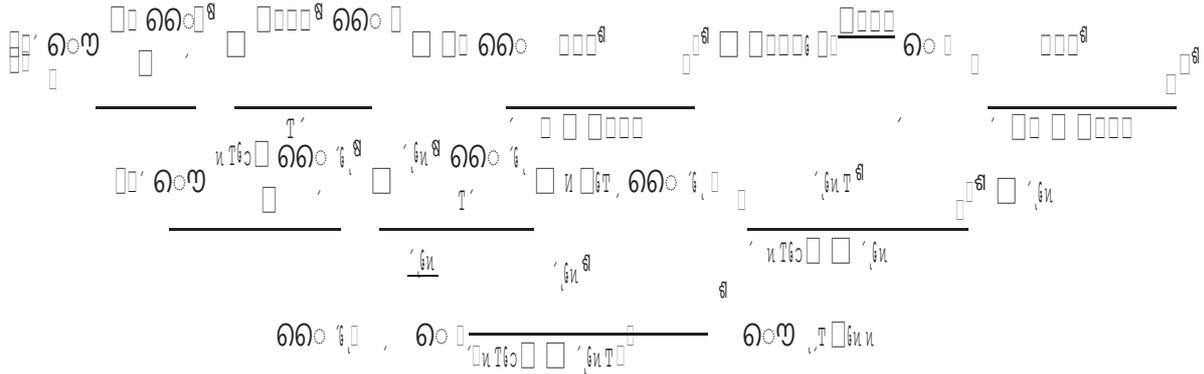
$$\sigma_{cr,s} = \frac{E \pi^2 I_{s1}}{L^2} = 151.85 \text{ MPa}$$

Pour les raidisseurs du bord inferieur :

$$K_f = \frac{E I_{eff}}{L^3} = 11 \times \frac{E I_{eff}}{L^3} = 130.22 \text{ mm}$$

$$K_f = \frac{E I_{eff}}{L^3}$$

Le moment d'inertie efficace:



$$I_{eff} = 8307.55 \text{ mm}^4$$

$K_f = 0$  pour la flexion par rapport à l'axe y-y

Donc la rigidité du support élastique est :

$$K_2 = \frac{E I_{eff}}{L^3} = \frac{E I_{eff}}{L^3}$$

$$K_2 = 0.56$$

Ainsi , la contrainte critique de flambement élastique pour le raidisseur du bord inférieur est :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{E I_{eff}}{L^2} = 138.70 \text{ MPa}$$

Coefficient de réduction de l'épaisseur  $\chi_d$  pour le raidisseur de bord L'élanacement réduit est égale :

$$\chi_d = \frac{E I_{eff}}{L^2} = 1.591.38 \leq \dots$$

Donc

$$X_{d2} = 0.66 / \xi_{\text{red}}$$

$$X_{d2} = 0.66 / 1.59 = 0.42$$

**Troisième étape :**

**Pour le raidisseur du bord inférieur :**

**L'élançement réduit:**

$$\xi_{\text{red}} = \frac{\lambda_p \xi_{\text{red}}}{\lambda_p \xi_{\text{red}}} = 1.59$$

Donc

$$X_d = 0.66 / \xi_{\text{red}}$$

$$X_d = 0.66 / 1.59 = 0.42$$

$$\lambda_{p,\text{red}} = \lambda_p \xi_{\text{red}}$$

**Pour semelle supérieure :**

$$\lambda_{p,\text{red}1} = \lambda_p \xi_{\text{red}} = 1.59 \times 0.42 = 1.03$$

$$\rho_1 = \frac{1.03}{1.1} = 0.76 < 1$$

*Largeur efficace est:*

$$b_{\text{eff}1} = \rho_{bp} \times b_p = 0.76 \times 147 = 111.72 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0.5 \times b_{\text{eff}} = 55.86 \text{ mm}$$

**Pour semelle inférieure :**

$$\lambda_{p,\text{red}2} = \lambda_p \xi_{\text{red}} = 1.59 \times 0.42 = 1.03$$

$$\rho_2 = \frac{1.03}{1.1} = 0.76 < 1$$

*Largeur efficace est:*

$$b_{\text{eff}2} = \rho_{bp} \times b_p = 0.825 \times 147 = 111.72 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0.5 \times b_{eff} = 55.86\text{mm}$$

**Pour le bord tombé supérieur:**

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \xi = 1.59 \xi = 1.03$$

$$\rho = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{cr,lim}} = 0.76 < 1$$

$$c_{eff} = \rho \times c_p = 0.76 \times 28.5 = 21.66\text{mm}$$

**Aire efficace des raidisseurs des bords supérieurs:**

$$A_{s1} = 2t ( b_{e1} + c_{eff1} )$$

$$A_{s1} = 2(2.8(55.86 + 21.66 )) = 439.71\text{mm}^2$$

**Pour le bord tombé inférieure:**

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \xi = 1.59 \xi = 1.03$$

$$\rho = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{cr,lim}} = 0.84 < 1$$

$$c_{eff} = \rho \times c_p = 0.84 \times 30 = 21.66\text{mm}$$

**Aire efficace des raidisseurs des bords inférieures:**

$$A_{s2} = t ( b_{e2} + c_{eff2} )$$

$$A_{s2} = 2(2.8(61.64 + 23.94 )) = 439.71\text{mm}^2$$

**Propriétés de la section efficace de l'âme**

La position de l'axe neutre par rapport à la semelle comprimée :

$$hc = \frac{A_{s1} \times \frac{b_{e1} + c_{eff1}}{2} + A_{s2} \times \frac{b_{e2} + c_{eff2}}{2}}{A_{s1} + A_{s2}}$$

$$hc = 167.88$$

$$e = \frac{A_{s1} \times \frac{b_{e1} + c_{eff1}}{2} + A_{s2} \times \frac{b_{e2} + c_{eff2}}{2}}{A_{s1} + A_{s2}}$$

$$e = -0.77$$

Le coefficient de flambement :

Le coefficient de flambement est donné par :

Le coefficient de flambement est :

$$\lambda_{bp} = \frac{l}{i} = \frac{l}{\frac{I}{A}} = 1.1 > 0.673$$

$$p = \frac{f_{ct} - f'_{ct}}{f_{ct}} < 1 \Rightarrow > 0.72$$

Le coefficient de flambement est donné par :

Le coefficient de flambement est :

Le coefficient de flambement est :

**A proximité de la semelle comprimée :**

Le coefficient de flambement est :

**A proximité de l'axe neutre :**

Le coefficient de flambement est :

**A proximité de la semelle tendue :**

Le coefficient de flambement est :

**Aire de la section transversale efficace :**

$$A_{eff} = t [2c_p + b_p^2 + h_1 + h_2 + b_e^1 + 2(b_e^2 + c_{eff}) \chi_d]$$

$$A_{eff} = 2.8 \times [28.5 + 147 + 85.36 + 201.64 + 55.86 + (22.66 + 55.86) \times 0.42]$$

$$A_{eff} = 1543.74 \text{ mm}^2$$

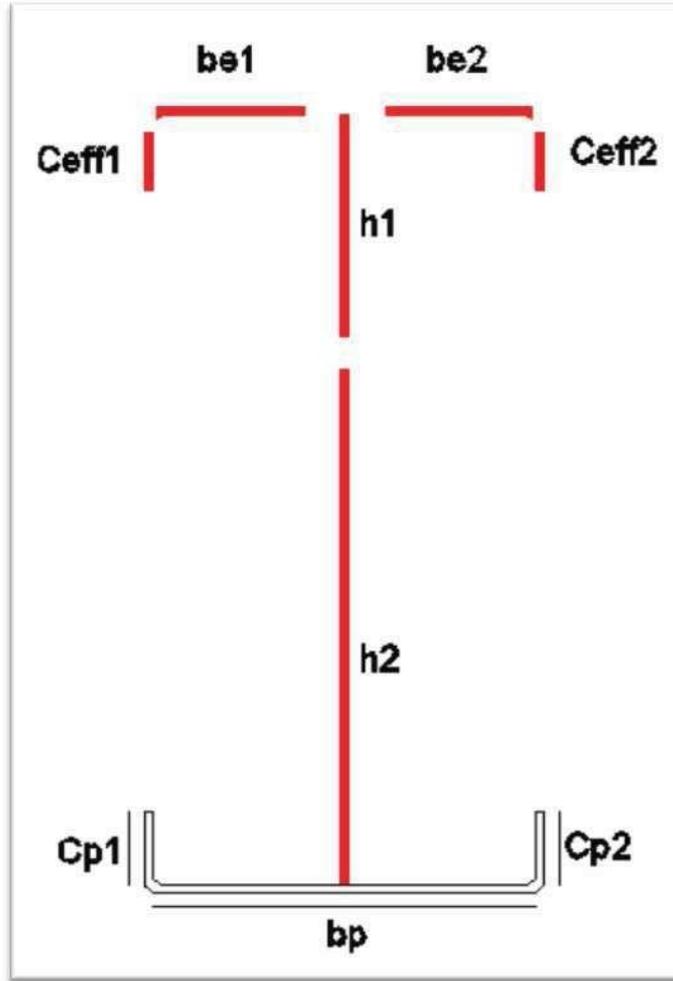


Figure II.16 : Section efficace du profilé type I.

Position de l'axe neutre par rapport à la semelle comprimée :

$$Z_c = \frac{C_{eff1} \cdot h_1 + C_{eff2} \cdot (h_1 + h_2)}{b_p}$$

$$Z_c = \frac{C_{p1} \cdot h_2 + C_{p2} \cdot h_2 + C_{eff1} \cdot h_1 + C_{eff2} \cdot (h_1 + h_2)}{b_p}$$

$Z_c = 68 \text{ mm}$

$Z_t = h_p - Z_c = 297 - 68 = 229 \text{ mm}$

$$I_{eff} = \frac{C_{p1} \cdot h_2^3}{12} + C_{p1} \cdot h_2 \cdot (Z_c - h_2)^2 + \frac{C_{p2} \cdot h_2^3}{12} + C_{p2} \cdot h_2 \cdot (Z_c - h_2)^2 + \frac{C_{eff1} \cdot h_1^3}{12} + C_{eff1} \cdot h_1 \cdot (Z_c - h_1)^2 + \frac{C_{eff2} \cdot (h_1 + h_2)^3}{12} + C_{eff2} \cdot (h_1 + h_2) \cdot (Z_c - h_1)^2$$

$$I_{eff} = \frac{C_{p1} \cdot h_2^3}{12} + C_{p1} \cdot h_2 \cdot (Z_c - h_2)^2 + \frac{C_{p2} \cdot h_2^3}{12} + C_{p2} \cdot h_2 \cdot (Z_c - h_2)^2 + \frac{C_{eff1} \cdot h_1^3}{12} + C_{eff1} \cdot h_1 \cdot (Z_c - h_1)^2 + \frac{C_{eff2} \cdot (h_1 + h_2)^3}{12} + C_{eff2} \cdot (h_1 + h_2) \cdot (Z_c - h_1)^2$$

$$I_{eff} = \frac{I_{x1} + I_{x2} + I_{x3} + I_{x4}}{1 + \frac{e_1^2}{I_{x1}} + \frac{e_2^2}{I_{x2}} + \frac{e_3^2}{I_{x3}} + \frac{e_4^2}{I_{x4}}} = \frac{100000 + 100000 + 100000 + 100000}{1 + \frac{100^2}{100000} + \frac{100^2}{100000} + \frac{100^2}{100000} + \frac{100^2}{100000}} = 602941.18$$

$$I_{eff} = 602941.18 \text{ mm}^4$$

**Module de résistance de la section efficace :**

par rapport à la semelle comprimée :

$$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{e}$$

$$W_{eff} = \frac{602941.18}{100} = 6029.4118$$

par rapport à la semelle tendue:

$$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{e}$$

$$W_{eff} = \frac{602941.18}{340} = 1773.3564$$

**II.5.4 Vérification de la résistance à la flexion:**

Calcul du moment de résistance à la flexion de la section transversale :

$$M_{c,Rd} = \frac{f_{yk} I_{eff}}{\sigma_{yk}}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{235 \times 602941.18}{370} = 380.55 \text{ KN.m}$$

Moment fléchissant appliqué maximal (à mi-portée) par rapport à l'axe principal y-y :

$$M_{Ed} = \frac{q l^2}{8}$$

$$M_{Ed} = \frac{10 \times 10^2}{8} = 125 \text{ KN.m}$$

Vérification de la résistance à la flexion :

$$\frac{M_{Ed}}{W_{pl,y} f_{y,d}} = 0.94 \leq 1 \quad \text{vérifiée}$$

### Conclusion :

L'EUROCODE 3 offre une méthode très efficace pour la vérification des sections transversales des profilés formés à froid surtout pour la détermination des largeurs efficaces. Mais la validation numérique s'avère nécessaire pour calibrer les résultats analytiques.

# **CHAPITRE III :**

**Etude numérique des poutres en I avec différentes âme  
sous ABAQUS**

### III.1 Introduction :

De nos jours, les profilés en acier formés à froid sont principalement utilisés dans les industries et dans une large gamme d'application. Au cours des cinquante dernières années, plusieurs recherches ont été menées pour étudier le comportement des sections de poutres en acier formées à froid . Au début de ce siècle, en raison de l'augmentation de la demande d'utilisation de sections solides et légères dans un vaste domaine d'application, il y a un progrès substantiel dans ce domaine. Cette demande d'utilisation de ces sections est rendue possible par le développement de la théorie et la compréhension de leur comportement sous charge, les considérations économiques, les techniques de construction, l'efficacité de la construction. La simulation et l'analyse numérique sont développées ces dernières années dans la recherche industrielle privée ou publique (constructeur automobile, aéronautique, spatial...) améliorant ainsi la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs. La solution d'analyse par les éléments finis optimise le prototype 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...).

Le but de notre projet est la conception d'un modèle de poutre sur deux appuis soumis à la flexion dont la section est en forme I l'âme simple et âme ondulée trapézoïdale et âme ondulée triangulaire.

Les modèles étudiés sont des poutres I de 12m de portée en acier formée à froid avec différentes sections d'âme c.à.d. soient une âme pleine et une âme ondulée (trapézoïdale ou triangulaire) de 3 mm d'épaisseur. L'angle d'ondulations pour le modèle trapézoïdal et triangulaire est  $45^\circ$ . Les sections transversales des poutres en I sont de  $150 \times 300 \times 3 \text{ mm}^3$ . Les poutres ont été sollicitées par une charge concentrée au milieu (flexion trois points)

Les poutres en acier formées à froid présentant le rapport profondeur / épaisseur d'âme ( $d_w / t_w$ ) égale à 98. La limite d'élasticité de l'acier utilisé est de  $355 \text{ N/mm}^2$ . Les poutres en acier formée à froid sont construites en soudant les ailes et l'âme en utilisant des soudures de 4 mm d'épaisseur.

Les détails des poutres testées sont illustrés dans le tableau II.1. La modélisation du comportement des poutres testées est effectuée au moyen d'un logiciel très performant qui Abaqus 6.17 et on a pu trouver l'état contrainte-déformation et déplacement de poutres testées dans les zones critiques.

### III.2 Présentation de logiciel ABAQUS 2017 :

Abaqus est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique créé en 1978. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non - linéaires il comporte deux grands codes de calcul :

- ABAQUS/Standard : résolution par un algorithme statique ;
- ABAQUS/Explicit : résolution par un algorithme dynamique explicite

#### III.2.1 Présentation de logiciel abaqus :

Abaqus est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique créé en 1978. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non - linéaires il comporte deux grands codes de calcul :

- ABAQUS/Standard: résolution par un algorithme statique;
- ABAQUS/Explicit: résolution par un algorithme dynamique explicite.

Le cœur du logiciel Abaqus est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données. Il y a deux méthodes pour générer un fichier d'entrée à la main avec ABAQUS/CAE (graphique), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées, et fournit les résultats dans un fichier. La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc., suivant une syntaxe précise. Abaqus propose le module Abaqus CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation comme suit :

- La génération du fichier de données ;
- Le lancement du calcul proprement dit ;
- L'exploitation des résultats.

✓ Description du logiciel

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

- Part ;      -Property ;      -Assembly ;      -Step ;      -Interaction ;      -Load ;
- Mesh ;      -Job ;      -Visualisation ;

Parmi les méthodes d'analyse dynamique on trouve notamment Abaqus standard et explicite. Les huit premiers sous - modules servent à définir le problème mécanique à simuler. Le module Job est celui qui gère le passage du calcul de simulation proprement dit, c'est-à-dire le

cœur du code. Enfin, le dernier module regroupe tout ce qui concerne l'exploitation des résultats sous forme de diverses visualisations.

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.), il comporte un très large choix d'éléments (plus de 100). 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).

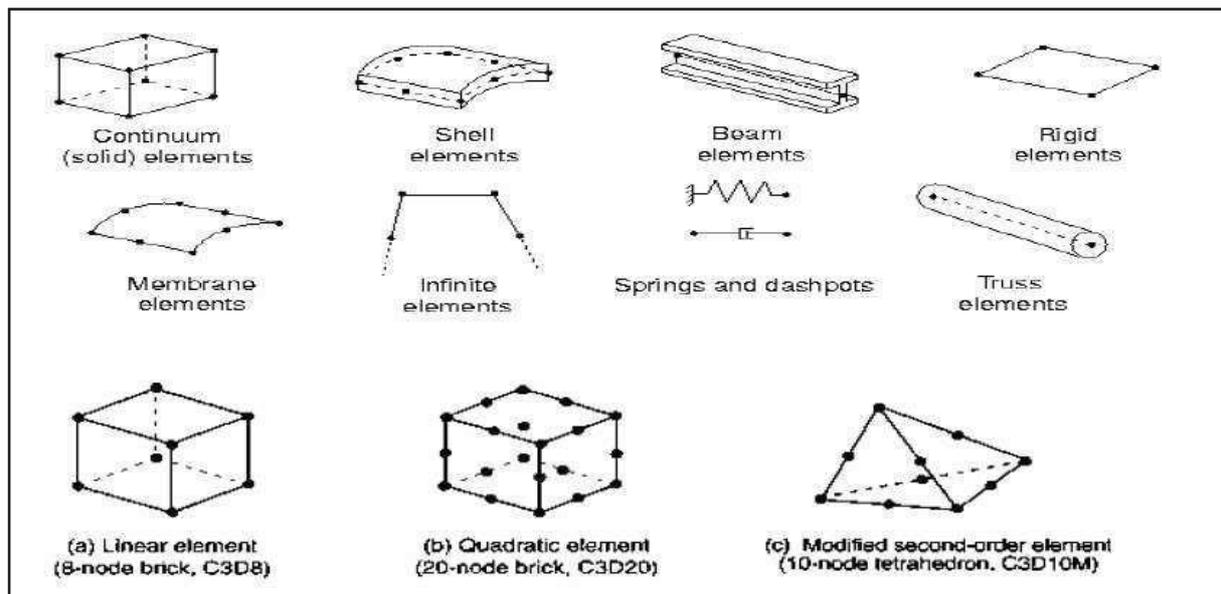


Figure III.1: Différents types d'élément de la bibliothèque d'Abaqus.

### III.2.2 Modele de conception de l'element :

#### III.2.2.1 Les étapes de modélisation des éléments sous ABAQUS

##### a/Géométrie

Les modélisations de poutres dans ABAQUS/CAE doivent s'appuyer sur des géométries adaptées, c'est-à-dire qu'au moment de créer les pièces supports, on créera des géométries de type Shell les poutres en plaque mince.

##### b/Définition des propriétés du modèle

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 coques : on se contentera de donner l'épaisseur de la coque au moment de la création de la Section à assigner à la pièce.

Pour les poutres : on doit au préalable déterminer les caractéristiques de la section (essentiellement son aire et ses moments d'inertie).

##### c/Maillage

Le choix de l'élément fini de coque ou de poutre est fait dans le module Mesh. Ce choix d'élément s'opère à partir de l'icône , dans la colonne de gauche. En sélectionnant ou non les options proposées, on retrouve dans la boîte de dialogue le nom de l'élément ainsi choisi dans la bibliothèque des éléments ABAQUS, ainsi qu'un bref descriptif de celui-ci. On se reportera à la documentation sur ces éléments pour approfondir la formulation quand cela sera nécessaire.

## III.2.2.2 Principe de calcul sous le logiciel ABAQUS.6.14

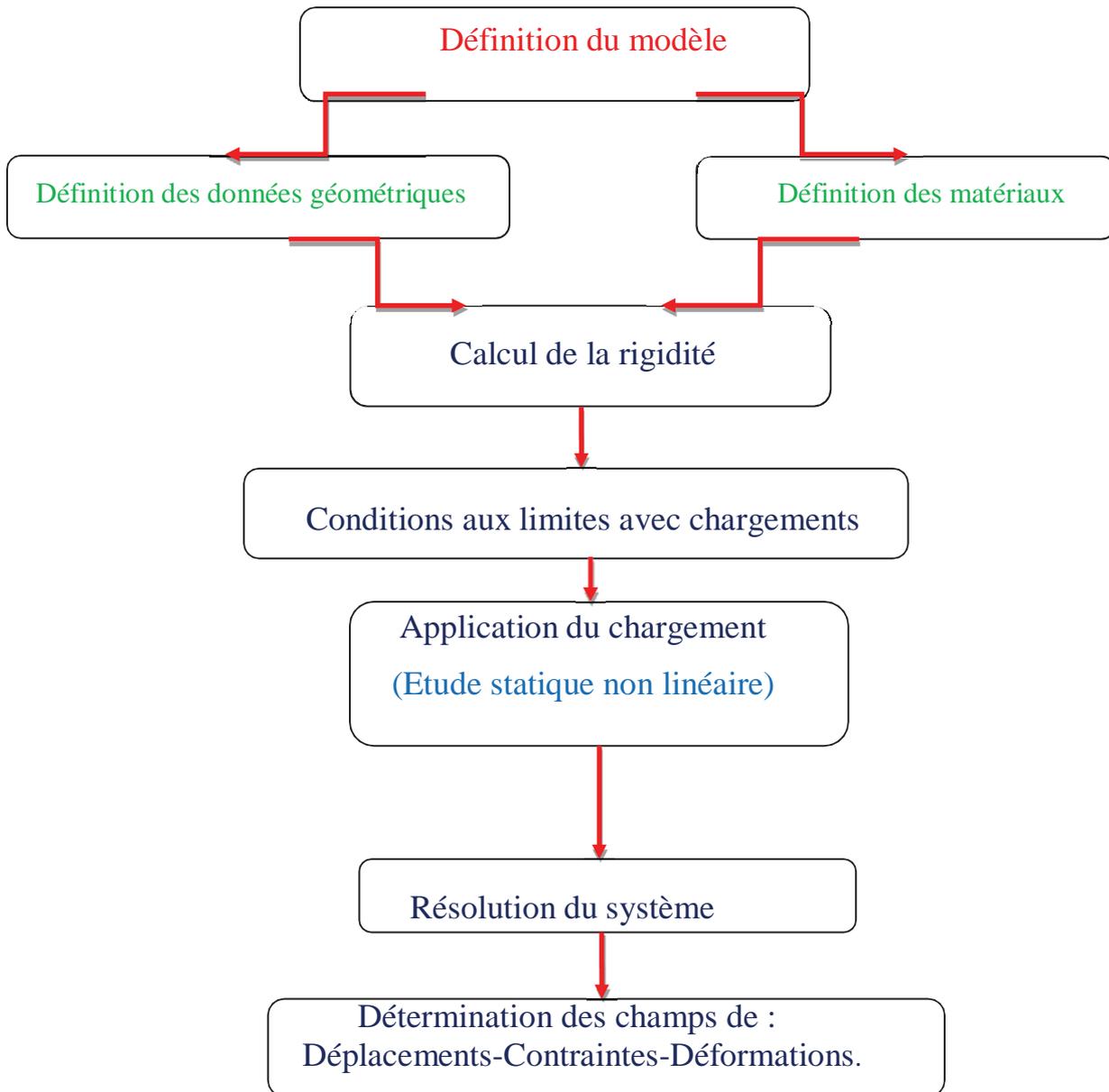


Figure III.2: Principe de calcul sous le logiciel ABAQUS.

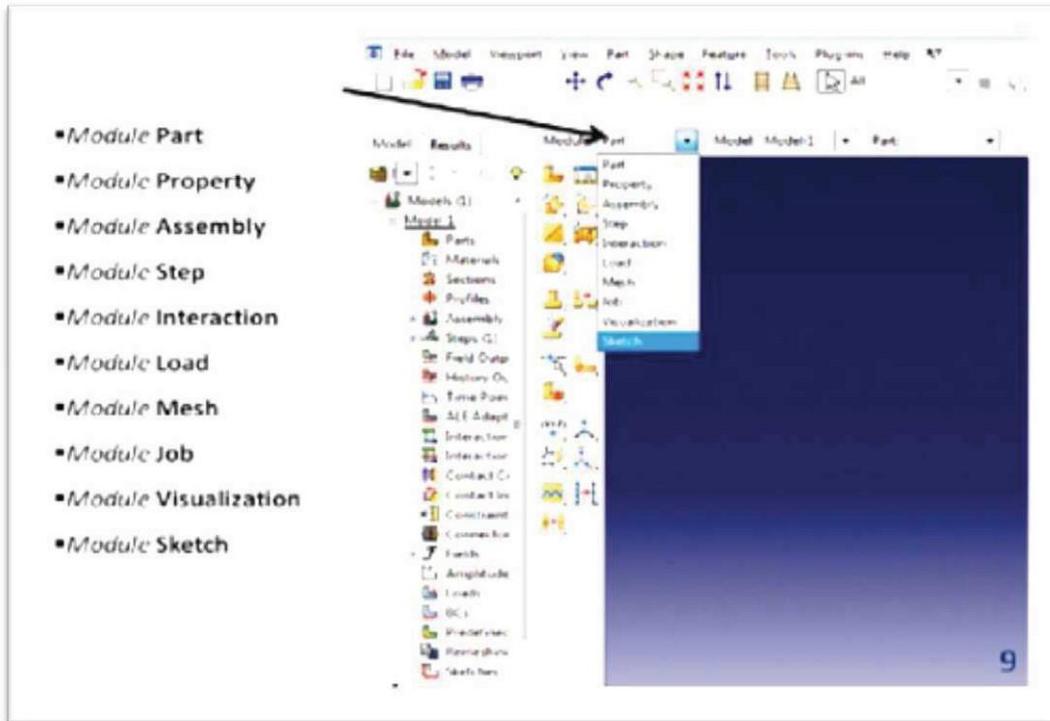


Figure III.3: Organisation d'Abaqus

### III.3 Présentation du modèle étudié :

Notre étude concerne une modélisation numérique des poutres isostatiques forme de I sur deux appuis en acier formé à froid. Les modèles traités sont :

**Modèle 1 :** Une poutre en I avec âme simple ( pleine) (Figure III.4)

**Modèle 2 :** Une poutre en I avec âme ondulée triangulaire (Figure III.5)

**Modèle 3 :** Une poutre en I avec âme ondulée trapézoïdale (Figure III.6)

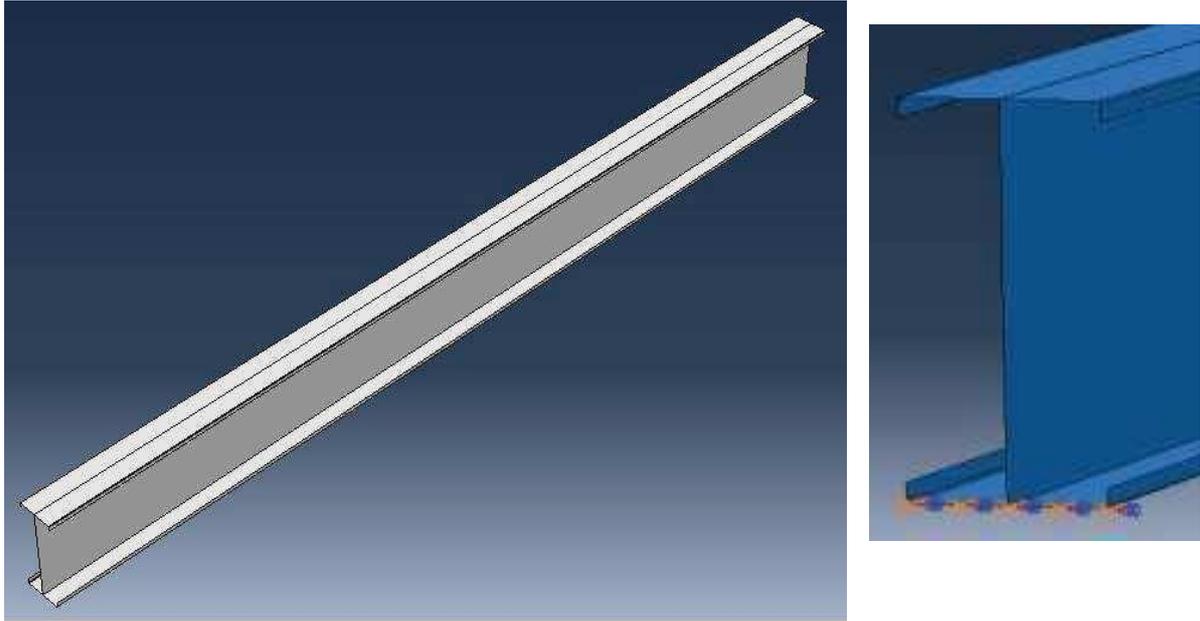


Figure III.4:Présentation d'une poutre en I avec âme simple ( pleine)

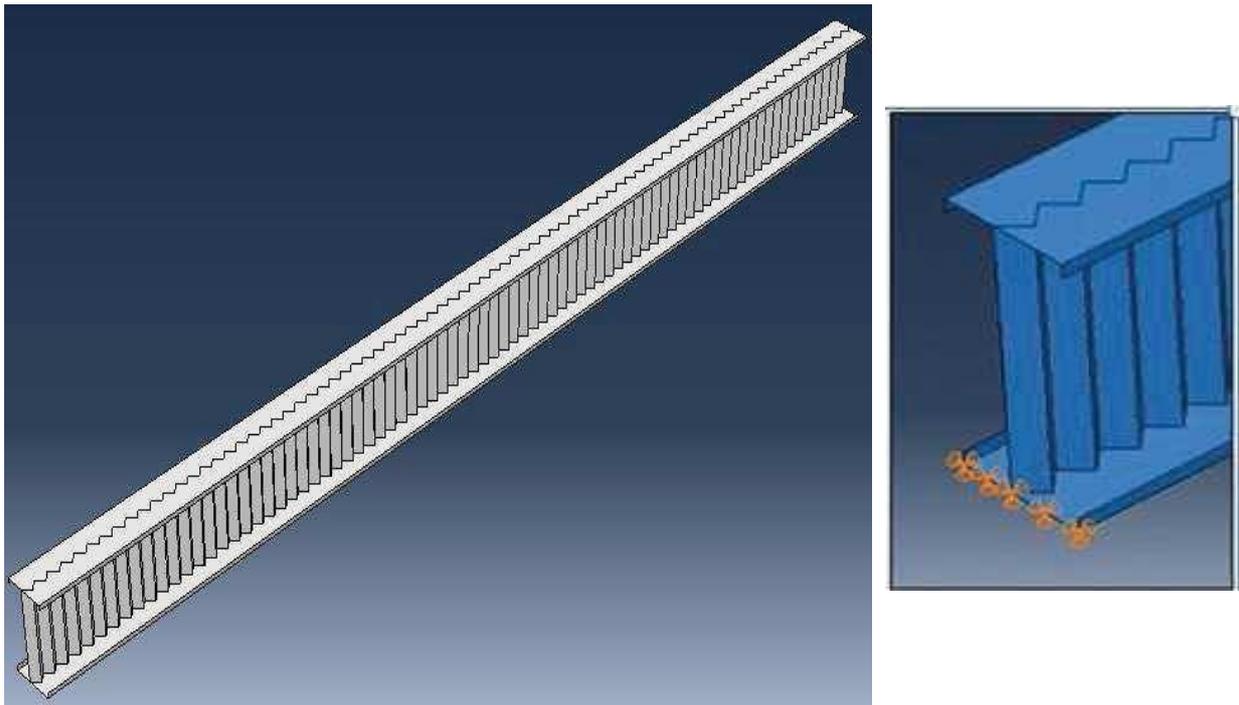


Figure III.5: Présentation d'une poutre en I avec âme ondulée triangulaire.

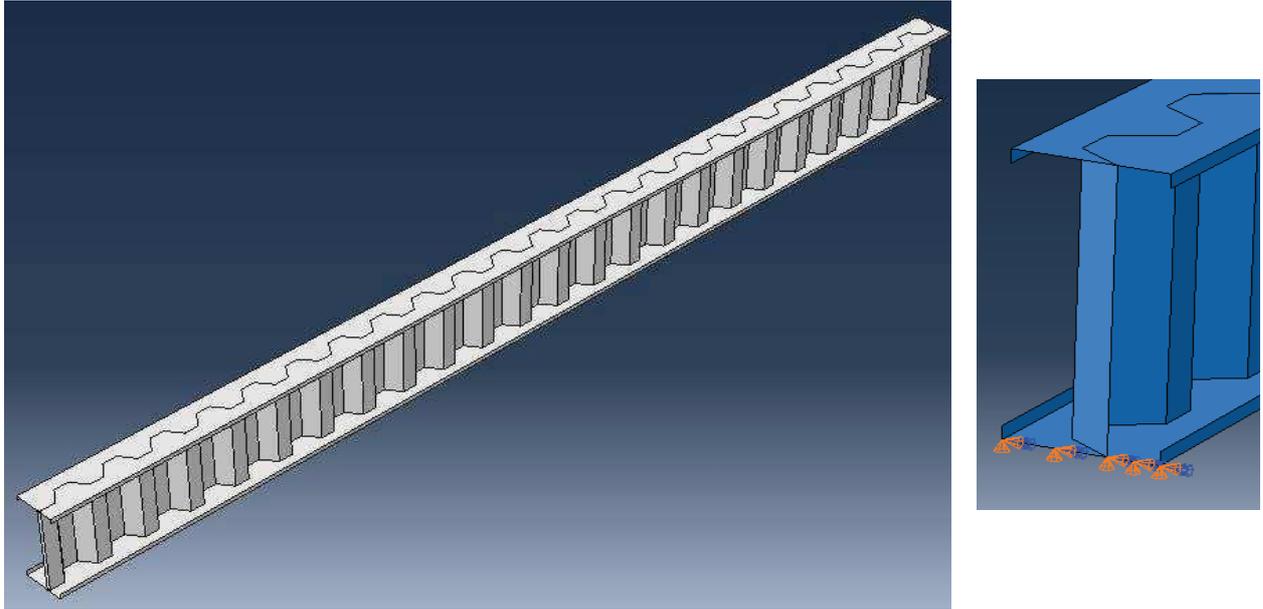


Figure III.6: Présentation d'une poutre en I avec âme ondulée trapézoïdale.

#### III.4 Définition des propriétés du modèle (Property) :

L'essai retenu est l'essai de flexion 03 points (ASTMA370 ou ISO 15630-1). Les propriétés mécaniques utilisées comme début de modélisation pour les poutres testées sont la densité ( $\rho=7850\text{kg/m}^3$ ), le module de Young (E), le coefficient de poisson  $\nu$ , la limite d'élasticité. Ces propriétés sont caractéristiques aux aciers S355MC. L'acier est modélisé comme un matériau élasto-plastique. (Tableau III.1)

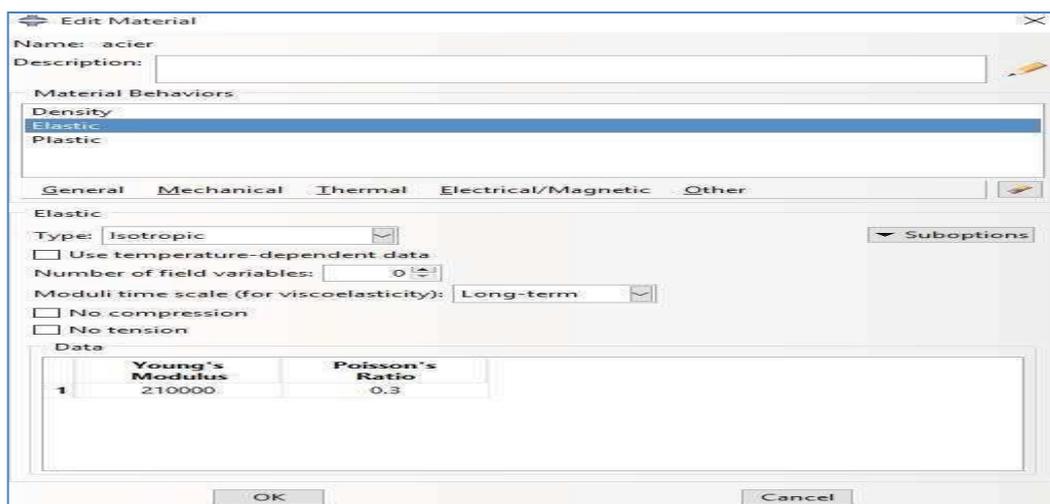


Figure III.7 : Les propriétés intégrés dans la modélisation des poutres

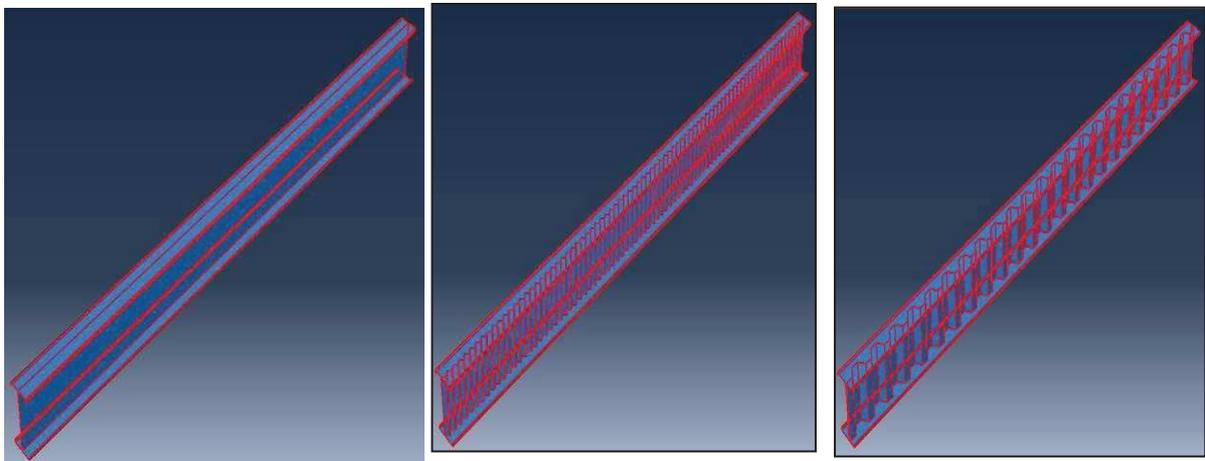
L'élément	Poids volumique $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	Module de Young E (MPa)	Coeff de poisson $\nu$	Limite élastique $f_y$ (MPa)
Acier	7850	210000	0.3	355

**Tableau III.1: Propriétés mécaniques de l'acier.**

### III.5 Définition l'assemblage du modèle(Assembly):

Assemble ce module, il s'agit de créer une instance à partir des entités que vous avez définies dans le module Part. Ces instances seront celles que vous manipulerez par la suite dans le modèle.

Dans le cas général, pour créer une instance vous sélectionnez tous les éléments créés dans Part. Vous pouvez le cas échéant faire subir des mouvements d'ensemble à ces instances pour les repositionner dans l'espace.



**Figure III.8 : Assemblage des poutres de forme I avec différentes section d'âme**

### III.6 Définition Étape (Step) :

Une étude statique non linéaire c.a.d le module « static,general ».

### III.7 Définition Maillage (Mesh) :

Le maillage utilisé représente un bon compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats. Pour l'analyse mécanique non linéaire les poutres sont modélisées comme des éléments plaques assemblés entre eux, alors pour le maillage on se réfère à la bibliothèque d'ABAQUS et selon une étude de cas proposée par celui-ci. Dans notre étude ; on fait appel à des éléments du type S8R, dont S8R: Une coque épaisse à 8 nœuds doublement courbée, intégration réduite.

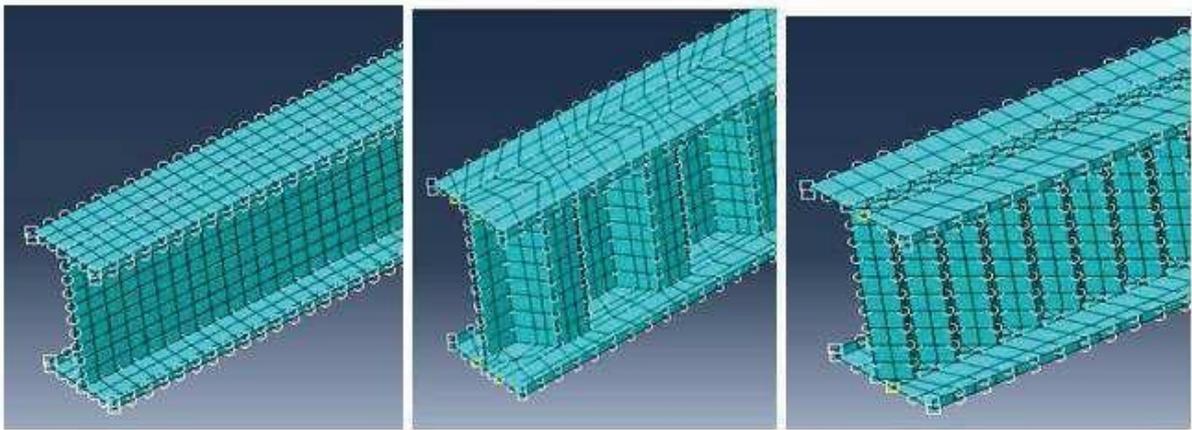


Figure III.9: Maillage des poutres avec différents âmes ( simple, triangulaire et trapézoïdale)

### III.8 Condition aux limites et chargements (Load):

Les poutres testées sont simplement appuyées, les conditions aux limites se traduisent de ce fait par un blocage des déplacements au niveau du premier appui où on a ( $U_x=U_y=U_z=0$ ).

Par contre l'autre appui on a un blocage des déplacements et de rotation qui assure ( $U_x=U_y=R_x=0$ ),

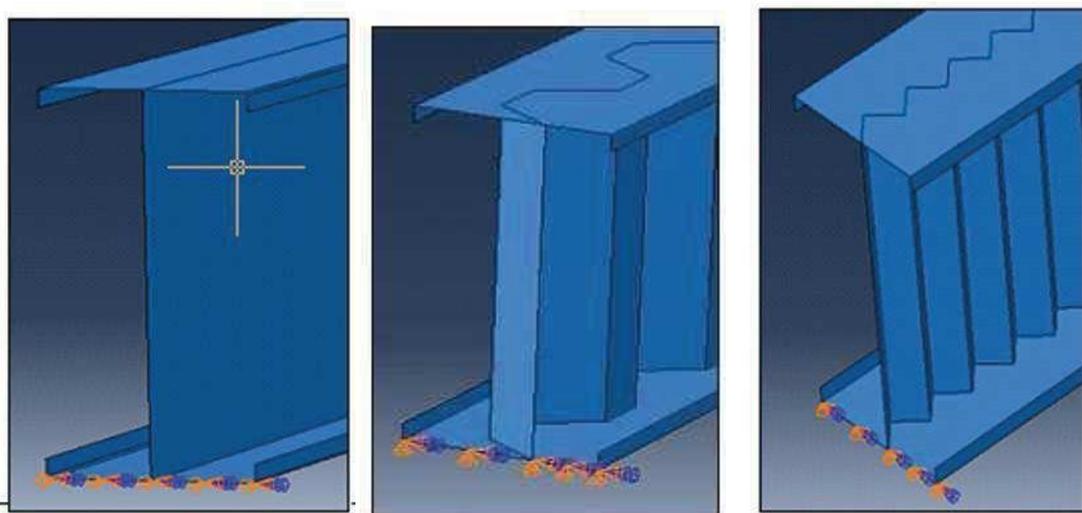


Figure III.10 : Condition aux limites pour les poutres étudiées

Le chargement extérieur est de flexion et présenté par une charge concentrée appliquée au milieu de la semelle supérieure et croissant qui varie à partir de  $P=10000$  N.

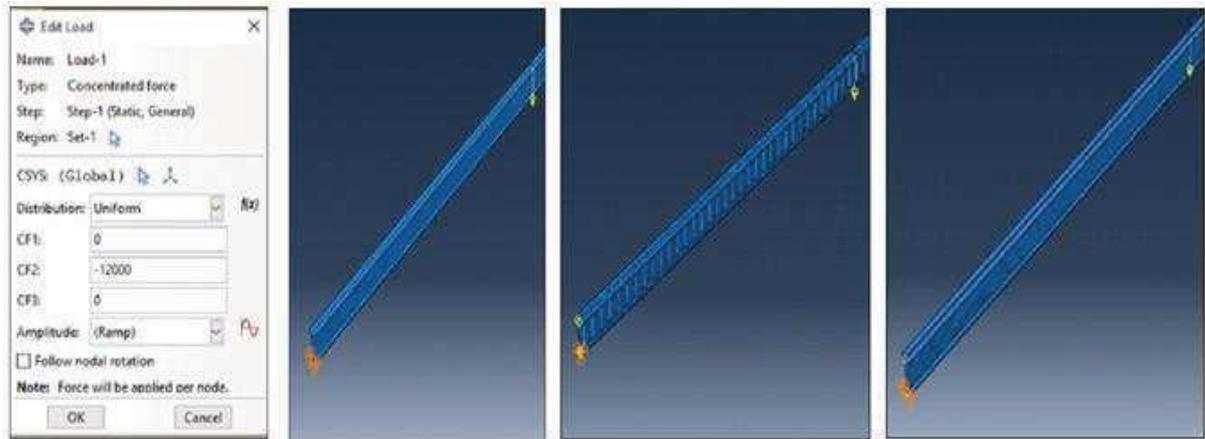


Figure III.11 : L'essai de flexion trois points pour les 03 modèles étudiés.

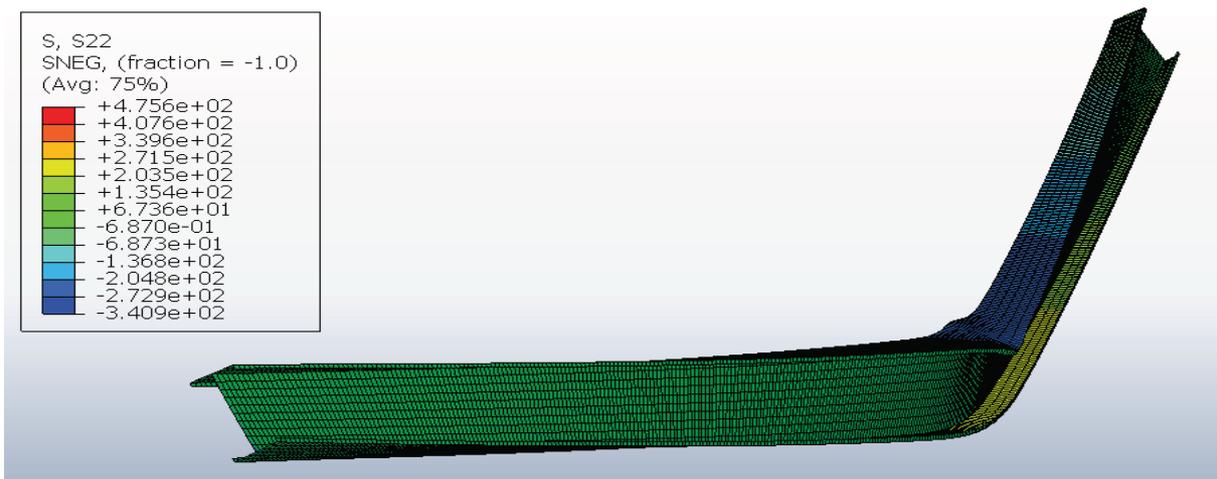


Figure III.12 : Les valeur de l'état  $\sigma_{yy}$  la poutre I avec âme simple.

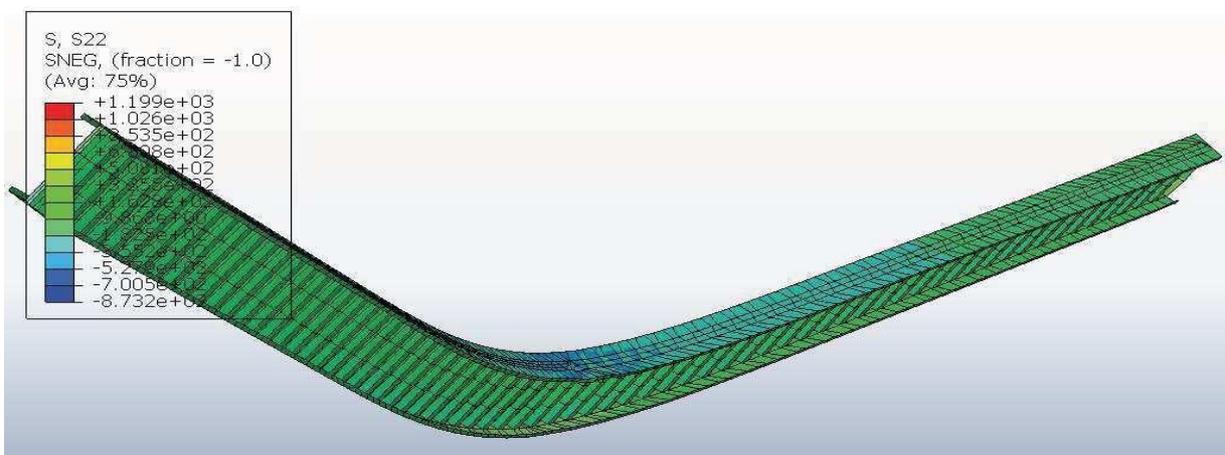


Figure III.13 : Les valeur de l'état  $\sigma_{yy}$  la poutre I avec âme trapézoïdale.

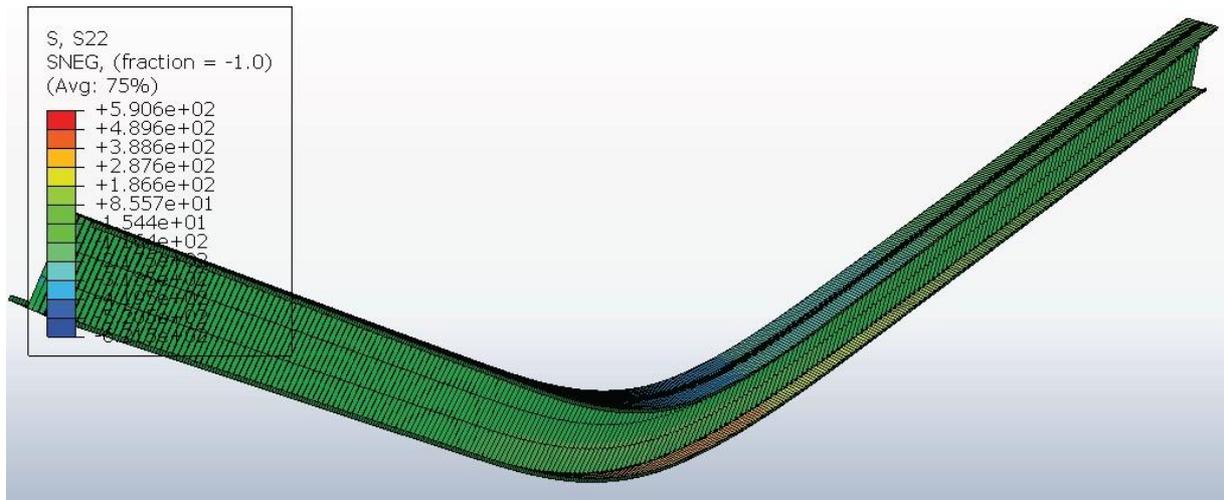
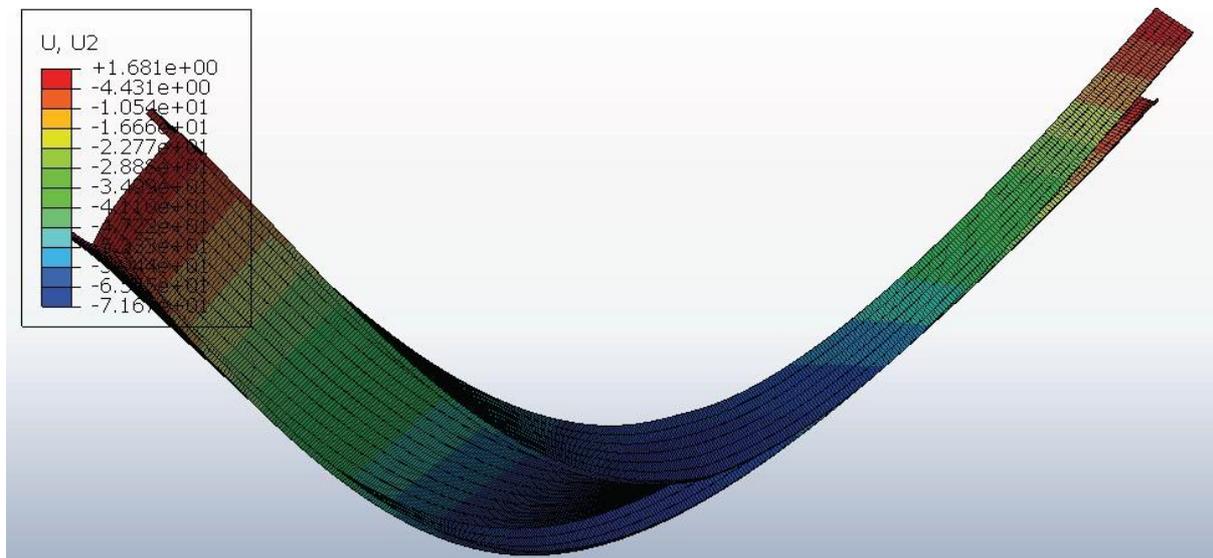
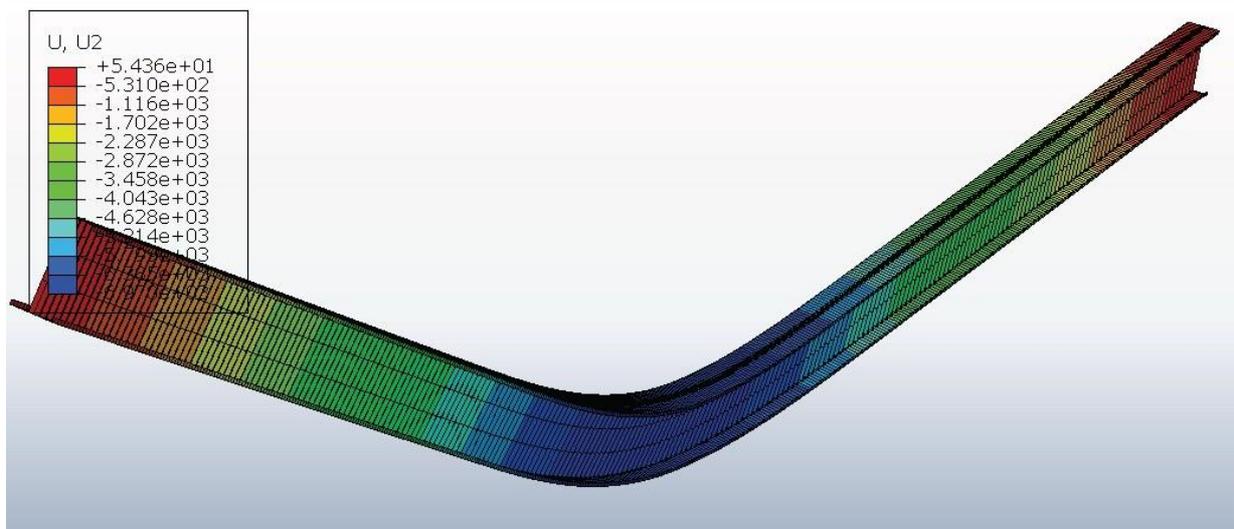


Figure III.14 : Les valeur de l'état  $\sigma_{yy}$  la poutre I avec âme triangulaire.



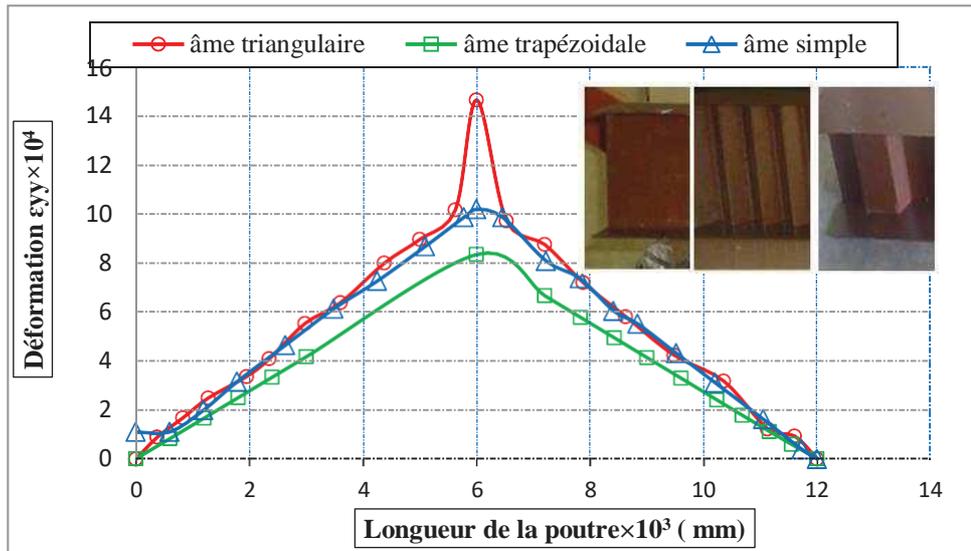


**Figure III.17 : Les valeurs des déplacements  $U_y$  de la poutre I avec âme triangulaire.**

## RESULTATS ET DISCUSIONS

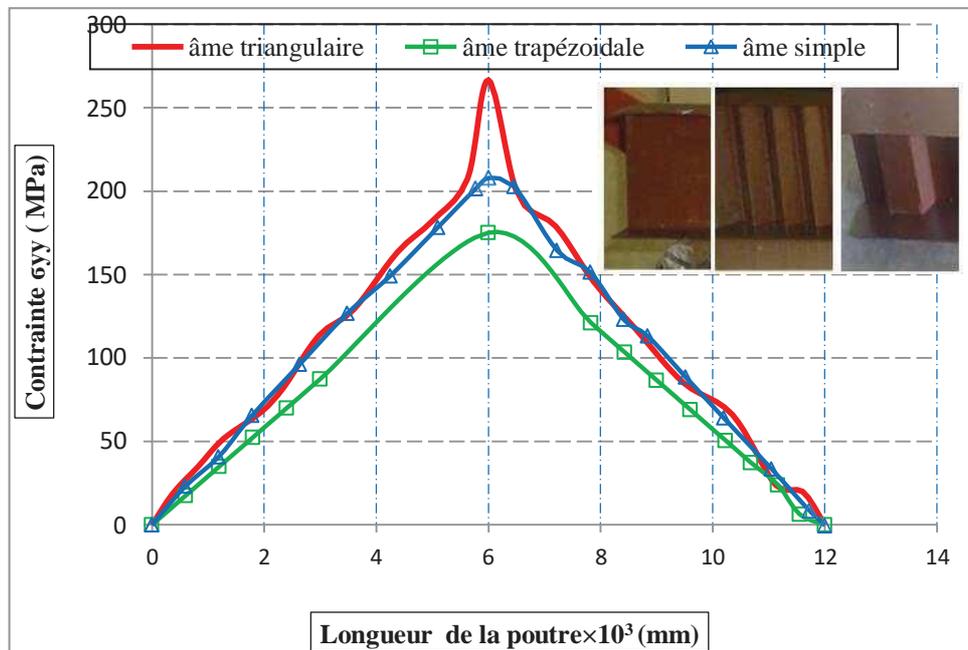
Les poutres à âmes ondulées sont avantageuses pour l'industrie de la construction, en raison de la rigidité latérale maximale de la poutre. L'objectif principal de cette étude est d'analyser le comportement d'une poutre avec une âme ondulée et une âme plane, par une approche analytique et une approche théorique en utilisant Abaqus 6.17 et une comparaison des résultats entre eux.

Pour une charge de 6kN, on remarque que la poutre à âme ondulée trapézoïdale et la poutre I ont présenté une rigidité très remarquable de point de vue diminution de déformation. Une réduction de 15 % de déformation par rapport la poutre à âme ordinaire. La zone centrale est la plus sollicitée (la zone d'application de la charge). (Figure III.15)



**Figure III.18 : Etat de déformation selon la longueur des poutres étudiées**

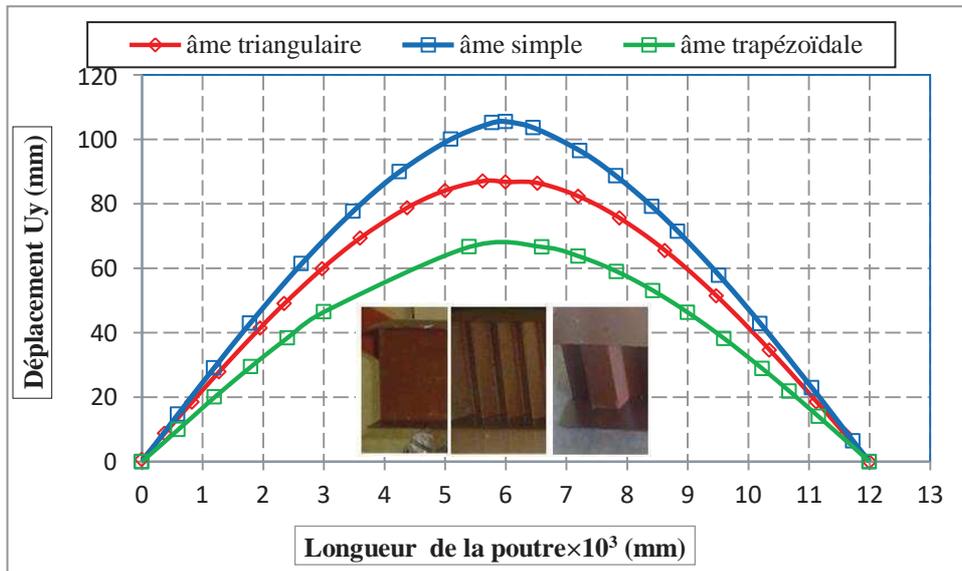
Pour une charge de 6kN, la poutre à âme ondulée trapézoïdale a montré un comportement meilleur, une réduction des contraintes d'ordre 15% par rapport la poutre à âme simple. La poutre à âme triangulaire et la poutre I sont presque confondues sauf dans la zone centrale, une majoration de 22% des contraintes dans la zone centrale de la poutre triangulaire. (Figure III.16)



**Figure III.19 : Etat de contrainte  $\sigma_{yy}$  selon la longueur des poutres étudiées.**

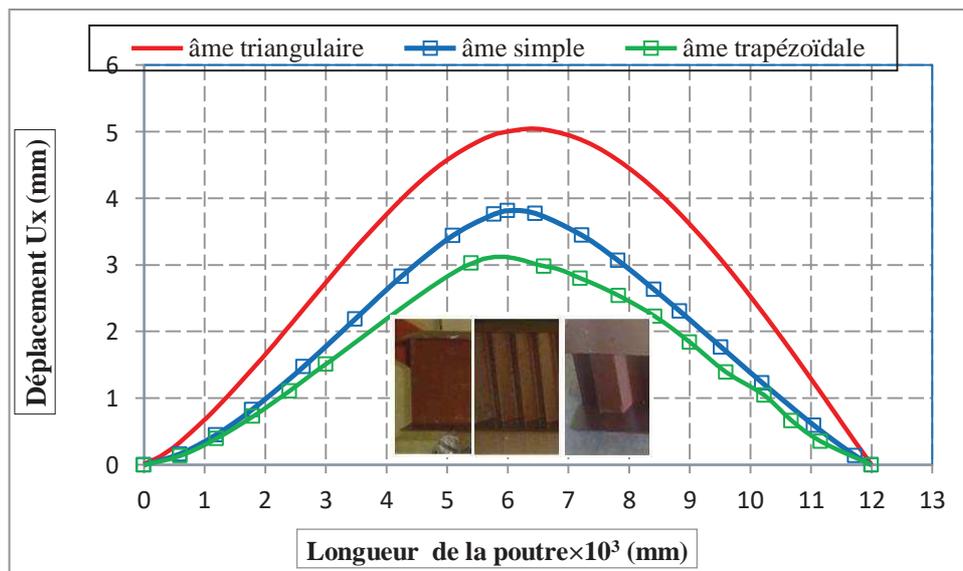
Pour une charge de 6kN, les poutres à âmes ondulées ( trapézoïdale et triangulaire) ont exposé une diminution de déplacement  $U_y$  d'ordre 36% et 17% respectivement, par rapport

la poutre à âme simple. Outre la poutre I montre de grands déplacements avec  $U_{max}=105\text{mm}$  (zone centrale).



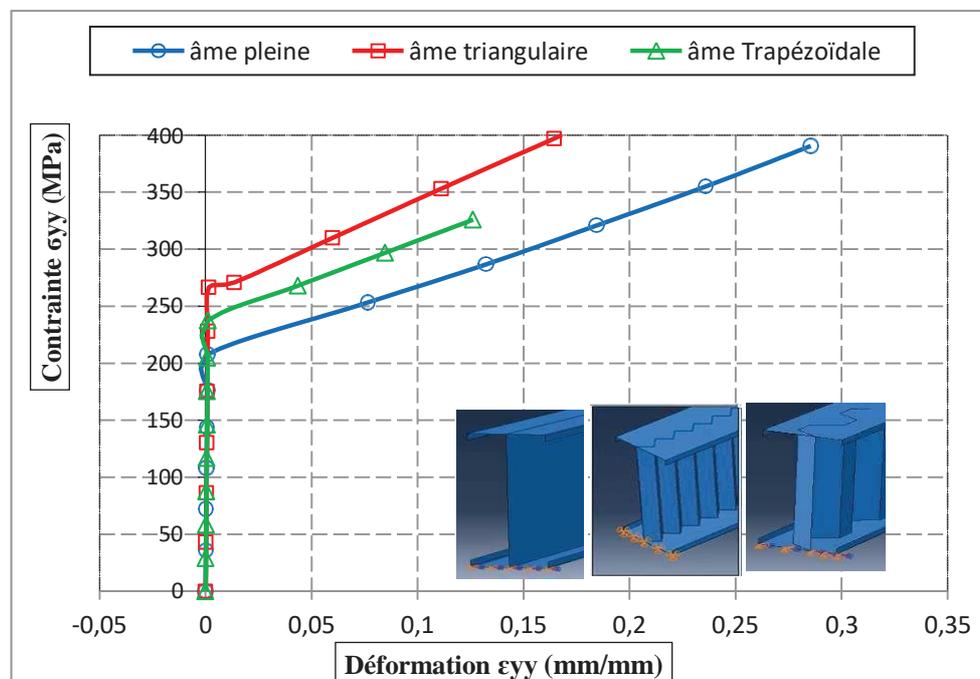
**Figure III.20 : Etat de déplacement  $U_y$  selon la longueur des poutres étudiées**

Pour une charge de 6kN, on remarque que la poutre à âme triangulaire a présenté un déplacement latéral important par rapport aux autres poutres (simple et trapézoïdale), ce déplacement latéral se traduit par une instabilité. Par contre on remarque une réduction de déplacement  $U_x$  d'ordre 21% pour le modèle de poutre avec âme trapézoïdale on compare avec la poutre à âme pleine. (Figure III.18)



**Figure III.21 : Etat de déplacement  $U_x$  selon la longueur des poutres étudiées.**

En décrivant loi de comportement des trois poutres étudiées, les trois modèles ont un comportement non linéaire. Au début du chargement les poutres ont présenté un comportement élastique dont les déformations sont proportionnelles aux efforts appliqués ( $\epsilon_{elas}=2\%$ ). Une plastification du matériau est obtenue pour des valeurs supérieures. La plasticité se traduit par la dissipation de l'énergie au cours de la déformation: l'énergie mécanique est transformée et conduisant à l'irréversibilité du comportement du matériau; ce mécanisme traduit également la ductilité du matériau qui permet aux métaux de subir des allongements significatifs avant de rompre. Le modèle à âme simple a présenté de grandes déformations. (Figure III.19)



**Figure III.22:Etat comparatif (contrainte-déformation) des poutres étudiées.**

On traçant la courbe (charge – déplacement verticale  $U_y$ ) dans le point central de la semelle inférieure, là où on a pu faire une comparaison entre les modèles étudiés. On constate que les poutres à âme ondulée trapézoïdale et triangulaire ont présenté une capacité maximale c.à.d une réduction de déplacement d'ordre 84% et 31% respectivement par rapport au modèle de la poutre ordinaire. (Figure III.20)

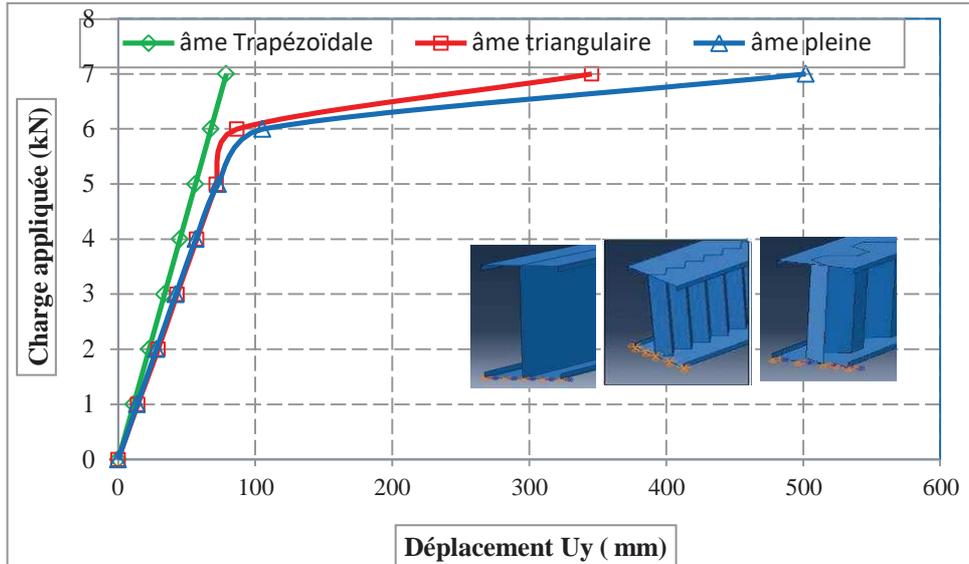


Figure III.23 : État comparatif (charge- flèche Uy) des poutres étudiées.

La courbe (charge – déplacement horizontal Ux) dans le point central de la semelle inférieure, jusqu'à une charge de 6 kN, les trois modèles ont présenté un comportement approché, au-delà de cette valeur > 6kN la poutre avec âme ondulée trapézoïdale a exposé un déplacement latéral moins important d'ordre 36 % par rapport à la poutre à âme simple.

Les modèles (poutre avec âme simple et âme triangulaire) ont un risque de rupture par flambage latéral en torsion (déversement). (Figure III.21)

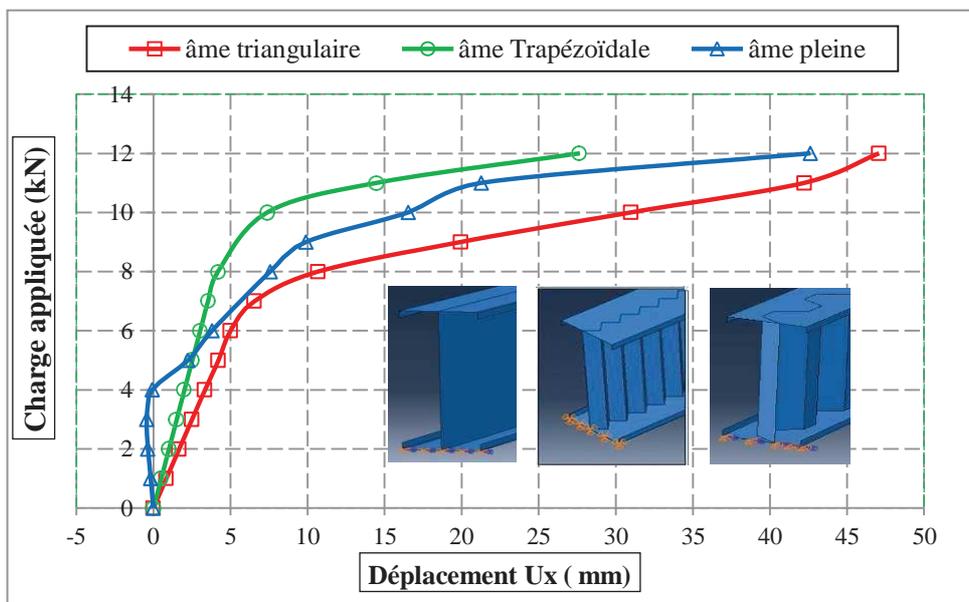


Figure III.24 : État comparatif (charge- flèche Ux) des poutres étudiées.

L'histogramme représente que :

**Pour une charge de 6kN**

***De point de vue déplacement  $U_x$***

Une diminution de 21% pour les poutres à âme trapézoïdale par rapport la poutre à âme simple, et une majoration de 24% pour le modèle triangulaire.

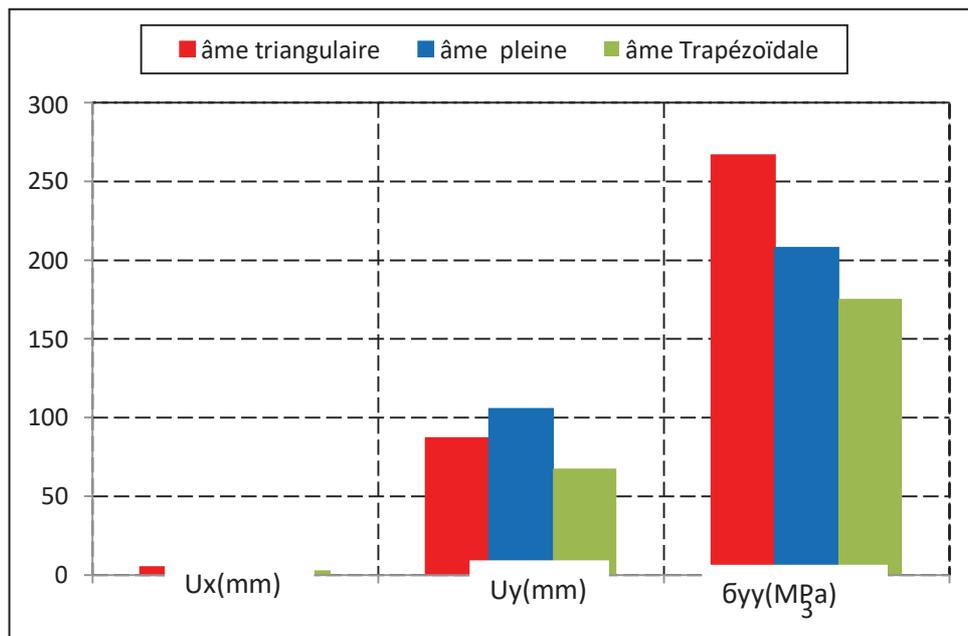
***De point de vue déplacement  $U_y$***

Une réduction de 36% et 17% pour les poutres à âme ondulée (trapézoïdale et triangulaire) par rapport à la poutre à âme simple. (Figure III.22)

***De point de vue déplacement  $\sigma_{yy}$***

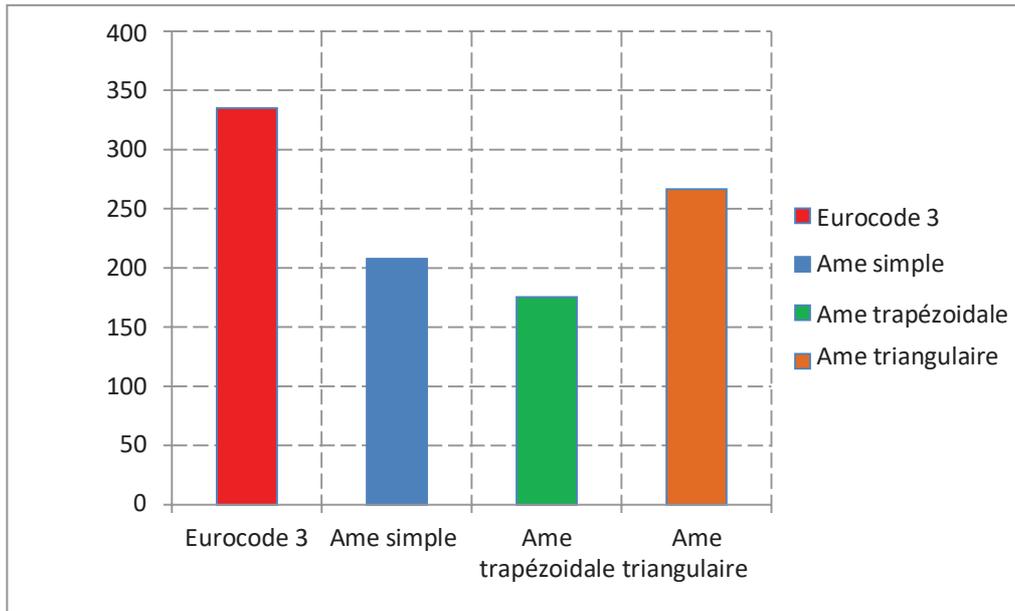
Une réduction de 15% pour la poutre à âme triangulaire et une 22% majoration trapézoïdale par rapport la poutre à âme simple et une majoration de 22% pour le modèle triangulaire.

(Figure III.22)



**Figure III.25 : Comparaison des états ( $U_x - U_y - \sigma_{yy}$ ) des poutres étudiées.**

Pour une charge de 6kN, EUROCODE 3 donne un état de contrainte plus défavorable par rapport aux autres modèles car l'EUROCODE est basé sur l'expérimentation là où plusieurs défaillances peuvent être trouvées. Le modèle trapézoïdal est le plus rigide par rapport aux autres modèles. (Figure III.23)



**Figure III.26 : Comparaison des états ( $\sigma_{yy}$ ) des poutres étudiées selon ABAQUS et Eurocode3**

### Conclusion

Le mode de défaillance des poutres en I est dû à un flambement latéral avec torsion. En raison du besoin de sections légères et à haute résistance, les sections doivent être rendues plus minces en tenant compte de la stabilité pendant la conception. L'âme ondulée triangulaire est plus susceptible de se résister que les autres poutres avec âmes ondulées .

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale :

L'étude numérique menée sur des poutres de section I avec différentes formes d'âmes ondulées nous a permis de tirer les conclusions suivantes.

1. La capacité de charge est plus élevée pour les poutres avec des âmes ondulées par rapport aux poutres avec une âme normale.
2. La poutre à âme simple a présenté un déplacement latéral important par rapport aux poutres à âme ondulée (triangulaire et trapézoïdale), ce déplacement latéral se traduit par une instabilité.
3. Par l'augmentation de la charge, et dans le point central de la semelle inférieure. On constate que les poutres à âmes ondulées (trapézoïdale et triangulaire) ont présenté une réduction de déplacement  $U_y$  d'ordre 84% et 31% respectivement.
4. L'ondulation réduit la rupture par flambement torsionnel à un voilement local.
5. L'âme ondulée trapézoïdale a présenté une capacité maximale par rapport au modèle de poutre avec âme ordinaire et triangulaire :
  - ✓ Une diminution de 21% de point de vue déplacement  $U_x$
  - ✓ Une diminution de 36% de point de vue déplacement  $U_y$
6. La poutre trapézoïdale est avantageuse pour l'industrie de la construction, en raison de leur rigidité latérale maximale.

### RECOMMANDATIONS:

- L'étude d'autres types de sections d'âmes ondulées peut être élaborée comme la section d'âmes ondulées rectangulaire.
- En vue de valider les résultats numériques proposés, des études expérimentales à échelle réelle sont nécessaires pour mieux comprendre le comportement de ces profilés minces formés à froid.
- Elargir les études à d'autres formes d'instabilité.

---

## Référence bibliographique

- [1] Mme ABBACI D et BOUKACHABIA Med LAMINE intitulé : Comportement en flexion de poutre en profilé formé à froid ; mémoire du master 02,Badji mokhtar, 2016, p 84.
- [2] Docteur d'état Présentée par DJAFOUR M thèse : Etude de la Stabilité distorsionnelle des Profils en Acier Formés à Froid
- [3] Web site internet :
- Wikipédia
  - ([https://materiel-soudure.4mepro.com/.../140-guide-les-differents-types-de-soudage\)site](https://materiel-soudure.4mepro.com/.../140-guide-les-differents-types-de-soudage)site)
  - Access steel eurocodes made easy
  - <http://www.steelbizfrance.com/article/d111.asp>
  - <http://www.profilage.net/Profilage.htm>
- [4] [Eurocode 1993-1-1] La commission de normalisation, Eurocode 3: Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale, XP P 22-311/A2
- [5] R.Divahan,P.S Joanna : numerical simulation and experimentale investigation on static behaviosof cold formed steel bean,with trapezoidally depth-theckness ration / Asian journal ofcivil engineering ; vol7, 1-17P
- [6] T. Preethi, P. R. Kannan Rajkumar, M. Jegan : Investigation on the Flexural Behaviour of Steel Cold Formed Built Up Sections / INTERNATIONAL JOURNAL OF INTEGRATED ENGINEERING VOL. 12 NO. 9 (2020) 184-190P