

الجمهورية 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 METALLIQUES
ET MIXTES

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

ÉTUDE NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT EN FLEXION DES SECTIONS
OUVERTES EN ACIER FORMÉE À FROID SOUS CHARGEMENT STATIQUE

Présenté par : - MHEISSEN Mahmoud

Encadreur : KOUIDER Nadia

MC.B

Université Annaba

Jury de Soutenance :

SLIMANI Fayçal	MC.B	Badji Mokhtar Annaba	Président
KOUIDER Nadia	MC.B	Badji Mokhtar Annaba	Encadreur
MEZIGHECHE NAWEL	MA.A	Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Dédicace.

Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont donné la force pour continuer.
À ma mère qui a donné à ma vie un sens, à mon père qui a fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui,
A mes chères sœurs et frère,
Et à toute ma famille et mes amis qui m'ont soutenu et encouragé.

MHEISSEN Mahmoud.

Remerciements

Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon DIEU, lequel nous a accordé la force et le courage afin de pouvoir accomplir ce modeste travail.

Nous tenons en premier lieu à remercier le comité d'examen de notre mémoire de Master.

Mr SLIMANI Fayçal, qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Mme KOUIDER Nadia pour nous avoir fait l'honneur de diriger ce mémoire, pour la confiance qu'elle nous a témoignée, pour ses précieux conseils et encouragements ainsi que pour le temps qu'elle nous a consacré lors de la réalisation ce travail.

Nous tenons aussi à remercier **Mme MEZIGUECHE Nawel** de Bien vouloir examiner et d'évaluer ce travail.

Leurs idées précieuses, leurs analyses critiques et avisées vont contribuer à l'enrichissement de ce travail.

On ne remercie jamais assez nos chers parents pour leur soutien inconditionnel. Merci pour tout. Si nous sommes ici aujourd'hui, c'est grâce à vous !

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du département de génie civil qui nous ont formés avec beaucoup de dévouement et de compétence. Et nos camarades de la promotion 2020-2021 pour ces années passées ensemble.

On tient à remercier tous ceux qui, d'une manière ou d'autre, ont participé à notre formation et à la réalisation de ce travail.

Liste des notations :

- b_i, C_i, S_i : le nombre de parois planes ;
 L : la longueur des poutres ;
 H : Hauteur du profil
 Θ_i : les angles de rotations;
 t : épaisseur de la section;
 f_{yb} : La limite d'élasticité de base;
 f_u : La résistance à la traction;
 E : Module d'élasticité ;
 ρ : Masse volumique ;
 ν : coefficient de poisson ;
 b_i/t : Rapports largeur- épaisseur maximum ;
 γ_{M0} : Résistance des sections transversales lorsque la ruine est due à une plastification ;
 m : Le nombre de parois plane ;
 n : Le nombre de plis ;
 A_{br} : Section brute;
 A_g : L'aire de section transversale brute ;
 $A_{g,sh}$: la valeur de A_g pour une section transversale avec angles vifs;
 δ : La flèche de la poutre ;
 Z_{b1} : Position de l'axe neutre comprimés;
 $\sigma_{com,Ed}$: La contrainte
 f_{ya} : La limite d'élasticité moyenne augmentée ;
 ψ : Le rapport de contrainte supérieure sur la contrainte inférieure ;
 k_σ : Coefficient de voilement ;
 $\bar{\lambda}$: L'élancement réduit ;
 b_{eff} : Largeur efficace ;
 h_c : La position de l'axe neutre ;
 A_{eff} : Section efficace ;
 Z_c : Position de l'axe neutre tendue ;
 $I_{eff,y}$: Moment inertie efficace ;
 $W_{eff,y,c}$: Module de résistance section efficace ;
 f_{yb} : Limite d'élasticité moyenne ;

K : coefficient numérique dépendant du type de formage de la façon $k = 7$;

n : nombre de plis à 90° dans la section transversale avec un rayon $r \leq 5t$ (il convient de tenir compte des angles de plis inférieurs à 90° sous forme de fractions de n) ;

EC : Eurocode 3 partie 1.3 ;

Ω : Omega ;

Liste des figures

Chapitre I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I. 1:Essai de dureté : méthode de Brinell	1
Figure I. 2:Essai de traction simple pour un matériau ductile	2
Figure I. 3: Schéma de principe de l'essai de choc	3
Figure I. 4: l'essai et appareil de fluage.	4
Figure I. 5: L'essai de fatigue.....	5
Figure I. 6: fissure au niveau du cordon de soudure.....	6
Figure I. 7: Arrachement lamellaire	6
Figure I. 8: Machine de formage a froid.....	9
Figure I. 9: Machine de formage a froid.....	13
Figure I. 10: Presse plieuse industrielle (Procédé de pliage).....	14
Figure I. 11: Plaques nervurées et plateaux.....	15
Figure I. 12: Exemples des tôles ondulées pour les toitures, revêtements muraux et planchers	15
Figure I. 13: Profilés fermés reconstitués.....	16
Figure I. 14: Profilés ouverts simples.....	16
Figure I. 15: Différents types de profilés.....	17
Figure I. 16: Différents types de raidisseurs.....	17
Figure I. 17: Contraintes résiduelles de flexion dans une section en acier formée à froid avec bord tombé (Bivolaru, 1993).....	19
Figure I. 18: Courbe contrainte-déformation de l'acier avant et après mise en forme.	20
Figure I. 19 : Courbe de comportement de l'acier.....	20
Figure I. 20: Différents modes d'instabilité subissent par les parois minces	21
Figure I. 21: les trois types d'instabilité.	21
Figure I. 22: Instabilité locale (voilement).	22
Figure I. 23: Instabilité distorsionnel.....	23
Figure I. 24: Instabilité distorsionnelle d'une section C avec raidisseur d'âme	23
Figure I. 25: Instabilité globale	24
Figure I. 26: Profilé formé a froid de forme super-oméga	26
Figure I. 27: Essai sur le modèle de poutre super-oméga.....	27
Figure I. 28: Voilement locale de la poutre super-oméga	28

Chapitre II : ASPECT REGLEMENTAIRE

Figure II. 1: Concept de largeur efficace (Eurocode3).....	35
Figure II. 2: Section transversale efficace d'un profile en forme C	36
Figure II. 3: Point médian d'un arrondi ou de pli.....	37
Figure II. 4: Point médian d'un arrondi ou de pli.....	37
Figure II. 5: Largeur de référence des parois adjacentes des raidisseurs.....	37
Figure II. 6: raidisseur intermédiaire	43
Figure II. 7: Raidisseur de bord	43
Figure II. 8: Section transversale efficace en compression.	45
Figure II. 9: Section transversale efficace en résistance en moment fléchissant.....	46
Figure II. 10: Les sections transversales des poutres de forme (C) et (Ω)	47
Figure II. 11:Caractéristiques géométriques de la section type C	49
Figure II. 12: Section efficace du profilé type C.....	57
Figure II. 13:Poutre soumis à la flexion trois points	59

CHAPITRE III : Étude numérique des profils formé à froid de type C et Ω sous ABAQUS

Figure III- 1: Une poutre en C avec arrondies (Modèle 1).....	64
Figure III- 2: Une poutre en C sans arrondies (Modèle 2).....	64
Figure III- 3: Une poutre en Ω avec arrondies (Modèle 3).....	64
Figure III- 4: Une poutre en Ω sans arrondies (Modèle 4).....	65
Figure III- 5: Différents types d'élément de la bibliothèque d'Abaqus.....	66
Figure III- 6: Les modules intégrés dans le logiciel ABAQUS.....	68
Figure III- 7: Principe de calcul sous le logiciel ABAQUS.	69
Figure III- 8:Présentation des sections transversales des poutres de forme (C) et (Ω)	70
Figure III- 9: La poutre (C) en 3D sous ABAQUS	71
Figure III- 10: La poutre (C) en 3D sous ABAQUS	71
Figure III- 11: La géométrie et les modes locaux de voilement d'une section en C.....	72
Figure III- 12: Les propriétés intégrées dans la modélisation des poutres	73
Figure III- 13:Sélection de la section sous ABAQUS.....	73
Figure III- 14: Chargement de la poutre C sous ABAQUS.....	74
Figure III- 15: Chargement et conditions aux limites de la poutre C sous ABAQUS.....	74
Figure III- 16: Maillage des poutres avec différents âmes	75
Figure III- 17: Lancement des analyses des modèles sous ABAQUS.....	75
Figure III- 18: Iso valeur de l'état de contrainte de Von Mises de la poutre C sous ABAQUS.....	76
Figure III- 19: Etat de déformation la poutre C sous ABAQUS	76
Figure III- 20: Iso valeur de l'état de contrainte de Von Mises de la poutre Ω sous ABAQUS.....	77
Figure III- 21: Etat de contrainte selon la longueur des poutres.....	77
Figure III- 22: État de déformation \square_{yy} selon la portée des poutres étudiées	78
Figure III- 23: État de déplacement U_y la poutre C sous ABAQUS.....	78
Figure III- 24 : Etat de (σ - \square) de la poutre C avec et sans arrondies sous ABAQUS	79
Figure III- 25: Etat de (charge-déplacement) de la poutre C avec et sans arrondies sous ABAQUS.....	80
Figure III- 26: État de (σ - \square) de la poutre Ω avec et sans arrondies sous ABAQUS.....	80
Figure III- 27: État de (σ - \square) de la poutre Ω avec et sans arrondies sous ABAQUS.....	81
Figure III- 28: Etat contrainte –déformation selon la variation des épaisseurs dans les profilés C et Ω	82
Figure III- 29: Etat charge –déplacement selon la variation des épaisseurs dans les profilés.....	83
Figure III- 30: État déplacement latéral des modèles C et Ω	84
Figure III- 31: Présentation des modèles avant et après galvanisation	84
Figure III- 32: Présentation du modèle C avant et après chargement.....	85
Figure III- 33: Présentation du modèle Ω avant et après chargement	85
Figure III- 34: État déplacement latéral et vertical du modèle C	86
Figure III- 35: État déplacement latéral et vertical du modèle Ω	86

Liste des tableaux

Chapitre I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I. 1: Influence du procédé de fabrication sur les forces de base des profilés formés à froid	19
Tableau I. 2: Type d'amplitude des contraintes résiduelles dans les sections en acier	20
Tableau I. 3: Les modes d'instabilité, local, distorsionnel et pour de faibles longueurs de demi-ondes	26
Tableau I. 4: Propriétés géométriques et mécaniques de poutre super oméga.	27

Chapitre II : ASPECT REGLEMENTAIRE

Tableau II. 1: Valeurs de la limite d'élasticité f_{yb} et la résistance à la traction f_u	34
Tableau II. 2: Rapports largeur épaisseur maximum.....	39
Tableau II. 3: Modélisation des parois d'une section transversale.....	39
Tableau II. 4: Parois comprimées sur deux appuis.....	41
Tableau II. 5: Parois comprimées en console.....	42
Tableau II. 6: Les données des profilés en C et Ω	48

CHAPITRE III : Étude numérique des profils formé à froid de type C et Ω sous ABAQUS

Tableau III. 1: Les caractéristiques mécaniques intégrées sous ABAQUS.....	12
--	----

CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	6
I-Introduction :	7
I-1.Généralité sur le matériau acier :	7
I-2. Propriétés des aciers.....	7
I-2.2. L’essai de traction	8
I-2.3 La résilience	9
I-2.4 Les essais de fluage.....	10
I-2.5 Les essais d’endurance (fatigue).....	10
I-3.Caractéristiques technologiques de l’acier.....	11
I-3.1.Soudabilité	11
I-3.2.Fissuration à chaud	11
I-3.3. Fissuration à froid	11
I-3.4.Arrachement lamellaire.....	11
I-4.Les familles d’acier.....	12
I-4.1.Aciers inoxydables	12
I-4.2.Acier décapé.....	12
I-4.3.Acier pré-laqué.....	12
I-5.Les formes de produits.....	12
I-5.1.Laminage à chaud	12
I-5.2.Laminage à froid	12
I-5.3.Galvanisation Sendzimir	13
I-5.4.Galvanisation par trempage	13
I-6.Les produits plats	13
I-6.1.Les tôles et les larges plats.....	13
I-6.2.Les tôles nervurées.....	13
I-7.Les profils creux	13
I-8.Les plaques.....	14
I-9.Les profils minces	14
I-10.Profilés formés à froid.....	14
I-10.1.Introduction.....	14
I-10.2. Informations générales sur le formage à froid	15
I-11.Procédés et techniques appliquées dans le formage et laminage à froid... 15	15
I-12.Emboutissage à froid des barres d’acier	15
I-13.Laminage à froid	15
I-13.1.Présentation du procédé du laminage	15
I-14.Laminoirs à froid (laminoirs à bandes LF).....	17
I-15.Fabrication et domaine d’application des profilés formés froid.....	18
I-15.1.Fabrication	18
I-15.2.Les technologies de fabrication	18
I-15.3.Domaine d’application.....	19
I-16.Types des sections en acier formées à froid	20
I-16.1.Panneaux et plancher	20
I-16.2.Les éléments d’ossatures individuelles	21
I-16.3.Les raidisseurs.....	22
I-17.Les caractéristiques particulières des sections en acier formées à froid :. 23	23
I-18.Effet de formatage à froid sur le comportement de l’acier :	24

I-19. Modes d'instabilité des profilés formés à froid et à parois minces :	
Généralité.....	25
I-19.1 Instabilité locale (voilement)	27
I-19.2. Instabilité distorsionnel	27
I-19.3. Instabilité globale	28
I-20. Exemple réel de flexion en quatre point d'un profilé formé a froid de forme super-oméga.....	30
I.23. Les avantages des profilés formés à froids dans la construction.....	33
CHAPITRE II: ASPECTS REGLEMENTAIRE	34
II-1. Analyse et méthode de calcul selon EC3 partie 1.3.....	35
II-1.1. Introduction	35
II-1.2. Base de calcul	35
II-1.3. Coefficient de sécurité :	35
I-1.4. Caractéristiques des matériaux	35
II-2. SECTION EFFICACE UN FROFILE FORME A FROID	37
II-2.1. CONCEPT DE LARGEUR EFFICACE POUR UN FROFILE FORME A FROID	37
II-2.2. Validité du concept des largeurs efficaces	38
II-3. Caractéristiques des sections	38
□ Section transversale brute.....	38
□ Air nette.....	38
□ Influence des arrondis	39
II-3.1. Limite d'élasticité moyenne augmentée.....	40
II-3.2. Proportions géométriques.....	40
II-4. Instabilité Locale	41
II-4.1. Parois non raidies	41
II-4.2. Parois munis de raidisseurs de bords et intermédiaire.....	43
II-4.3. Parois munies de raidisseur de bord.....	44
II-5. Résistance des Sections Transversales.....	46
II-5.1. Traction axiale	46
II-5.2. Compression axiale	46
II-5.3. Moment fléchissant	47
II-5.4. Traction et flexion combinées	47
II-5.5. Compression et flexion combinée	48
II-5.6. Effort tranchant	48
II.6 Exemple d'analyse de la poutre forme C selon EC3 :	48
II.6.1. Introduction	48
II-6.2. Les données de la poutre C.....	49
II-6.3. Détermination des caractéristiques des sections	50

1/ Vérification des proportions géométriques:	50
2/ Propriétés de la section brute:.....	51
3/ Position de l'axe neutre par rapport à la semelle supérieure	51
II-6.4 Propriétés de la section efficace des semelles et des bords comprimés:..	51
1/ Largeur efficace des semelles comprimées	52
II-6.5 Vérification de la résistance à la flexion	60
II-7. Conclusion	61
CHAPITRE III :	63
ÉTUDE NUMERIQUE DES PROFILS FORME A FROID DE TYPE C ET Ω	
SOUS ABAQUS	63
III-1. Introduction.....	64
III-1-2. Objectif :	65
III-2-1. Présentation du modèle étudié.....	65
III-2-2. Présentation de logiciel Abaqus :	67
III-3. Modèle de conception de l'élément.....	68
III-3-1. Les étapes de modélisation des éléments sous ABAQUS.....	68
a/Géométrie	69
b/Définition des propriétés du modèle.....	69
c/Maillage	69
Les modules	69
Principe de calcul sous le logiciel ABAQUS.6.14	70
III-4. Présentation des modèles étudiés.....	71
III-4-1. Modélisation des profilés de forme C et Ω	71
III-4.2. Le module « PROPERTY ».....	74
III-4.3. Le module « LOAD »	75
III-4.4. Le module « MESH »	76
III-4-5. Le module « JOB ».....	77
III-4-6. Module visualization	78
III-5. Comparaison numérique entre les profilés:	79
III-5.1 Comparaison numérique entre les profilés C et Ω	79
III-5-2. L'influence de rayon de courbure sur le comportement des poutres en C et Ω	81
III-5-3. L'influence de la variation des épaisseurs dans les profilés C et Ω	84
III-5-4. Comparaison entre résultats numériques et expérimentales.....	85
III-6. Conclusion	88

Résumé

Actuellement, les profilés en acier formés à froid (PAF), tels que les profilés en "C" et en "Z", sont couramment utilisés pour la conception des structures. Mais ce type de sections ouvertes subissent aux certains modes d'instabilités, tel que le flambage par flexion. Il est donc important de traiter ce genre de problème et de trouver une solution pour augmenter la résistance de ces éléments. Dans ce but, une analyse numérique par éléments finis est effectuée par le logiciel ABAQUS 6.14 des poutres en acier formé à froid des sections de forme C et Ω (chapeau). Les modèles sont de 1m de longueur et de 4mm d'épaisseur, ils ont été examinés pour étudier les performances vis à vis les instabilités. ces poutres sont soumises à une charge statique au milieu varie en intensité (l'essai de flexion 3 points) en plus une étude analytique à été faite en se basant sur Eurocode 3 partie 1-3.

Les résultats des deux sections sont comparés avec l'essai expérimental et on a trouvé un très bon accord avec ceux expérimentaux.

Mots clés : Acier formé à froid, flambage par flexion, instabilités, ABAQUS.

Abstract

Currently, cold-formed steel sections (CFS), such as "C" and "Z" sections, are commonly used for structural design. However, such open sections are subject to certain instability modes, such as flexural buckling. It is therefore important to address this type of problem and find a solution to increase the strength of these elements. For this purpose, a numerical finite element analysis is performed by ABAQUS 6.14 software of cold-formed steel beams of shape C and Ω (hat) sections. The models are 1m long and 4mm thick, they were examined to study the performance against instabilities. These beams are subjected to a static load in the middle varies in intensity (the 3-point bending test) in addition an analytical study was made based on Eurocode 3 part 1-3.

The results of the two sections are compared with the experimental test and a very good agreement with the experimental ones was found.

Key words: Cold formed steel, flexural buckling, instabilities, ABAQUS.

ملخص

حاليًا، يتم استخدامات المقاطع المشكلة على البارد (PAF) ، مثل الأقسام "C" و "Z" ، بشكل شائع للتصميم الإنشائي. لكن هذا النوع من الأقسام المفتوحة يخضع لأنماط معينة من عدم الاستقرار، مثل الانحناء. لذلك من المهم معالجة هذا النوع من المشاكل وإيجاد حل لزيادة مقاومة هذه العناصر. لهذا الغرض، يتم إجراء تحليل رقمي للعناصر المحدودة بواسطة برنامج ABAQUS 6.14 لعوارض فولاذية مشكلة على البارد لأقسام من النموذج C و Ω (قبعة). يبلغ طول النماذج 1 متر وسمكها 4 مم، وقد تم فحصها لدراسة الأداء فيما يتعلق بعدم الاستقرار. تخضع هذه الحزم لحمل ثابت في الوسط متفاوتة الشدة (اختبار الانحناء ثلاثي النقاط) بالإضافة إلى إجراء دراسة تحليلية على أساس Eurocode 3 الجزء 1-3.

تمت مقارنة نتائج القسمين بالاختبار التجريبي ووجدنا توافقًا جيدًا جدًا مع النتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية : الفولاذ المشكل على البارد ، الانثناء الانحناء ، عدم الاستقرار ، ABAQUS .

CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I-Introduction

I-1.Généralité sur le matériau acier :

L'acier est un alliage métallique utilisé dans les domaines de la construction métallique constitué d'au moins deux éléments, majoritairement le fer puis le carbone dans des proportions comprises entre 0,03 % et 1,8 % en masse. C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier » 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.

I-2. Propriétés des aciers :

I-2.1.Essais de dureté : méthodes de Brinell par empreinte ou pénétration.

L'essai consiste à biller un métal, c'est-à-dire à enfoncer une bille en acier extra dur sur sa surface, à mesurer l'empreinte laissée par la bille grâce à une réglette (abaque) et lire sa dureté sur un tableau. La dureté d'un métal, symbolisée par la lettre H (hard en anglais) est la résistance qu'il offre aux efforts de pénétration. Cet essai a l'avantage d'être réalisable dans les ateliers. L'appareil servant à mesurer la dureté est un duromètre. D'autres méthodes de mesure de la dureté existent également : la méthode Vickers (la bille est remplacée par un diamant) utilisée pour des métaux très durs (HB supérieur 400) ou la méthode Rockwell (HR). (Figure I. 1)

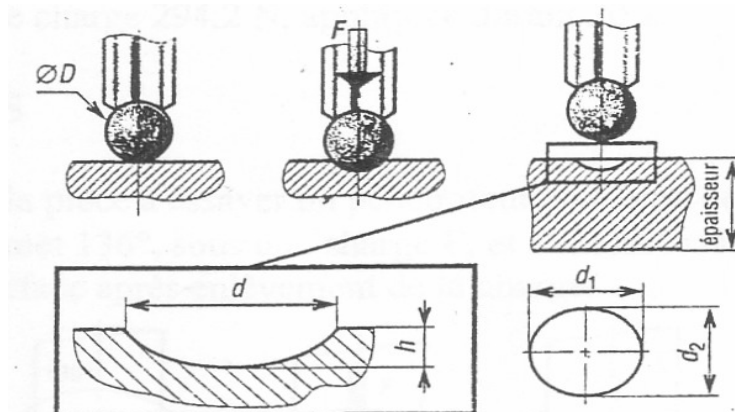
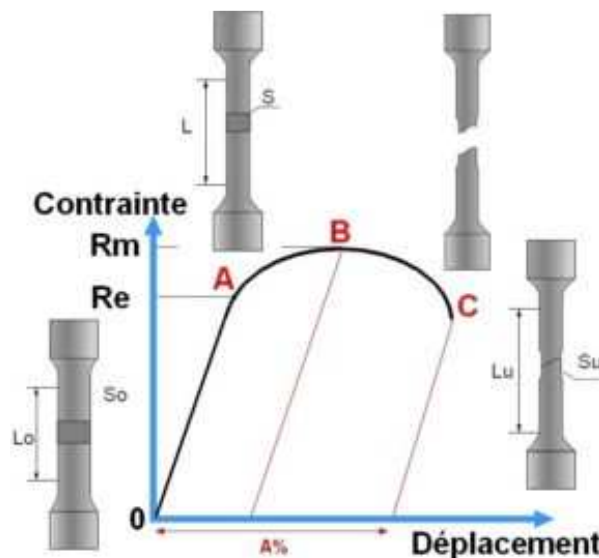


Figure I-1: Essai de dureté : méthode de Brinell**I-2.2. L'essai de traction :**

Il consiste à soumettre une éprouvette d'acier à une charge d'acier progressivement de plus en plus grande jusqu'au moment de la rupture.

Cet essai prend de l'importance notamment pour les aciers de constructions (poutres, poutrelles...) soumis à de nombreuses sollicitations simples ou composées (flexion, torsion, traction, compression, température, vent...). Des microfissures peuvent apparaître, notamment en raison de défauts de surface (inclusions métalliques, piqûres de rouille, fissurations intergranulaires...) ou d'accidents d'usinage (entailles). Ces amorces de microfissures peuvent se propager plus ou moins vite en fonction de la microstructure du métal et réduisent la résistance à la fatigue de l'acier jusqu'à pouvoir entraîner sa rupture. (Figure I. 2)

**Figure I-2:** Essai de traction simple pour un matériau ductile

- Entre l'origine et le point A: une phase élastique où la déformation est réversible.
- Le point A est la limite d'élasticité apparente (en général, on détermine la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % de déformation de L_o).
- De A à B: une déformation permanente homogène appelée aussi déformation plastique répartie.
- Le point B correspond à la charge maximale et correspond à la résistance mécanique du matériau.

- De B à C: la déformation plastique se localise dans une portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction et on aboutit à la rupture en C.
- L'abscisse représente l'allongement ΔL de l'éprouvette sur la longueur calibrée (déterminée sur le L_0 pour le calcul de l'allongement).
- En ordonnée, la contrainte (c'est à dire le quotient de la force unitaire par le section initiale de l'éprouvette: S_0).

Cet essai permet de mesurer :

- le module de Young E , ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en mégapascals (MPa) ou gigapascals
- la limite élastique (R_e)
- la résistance à la traction R_m qui définit la limite à la rupture
- la striction Z
- l'allongement à la rupture A

I-2.3 La résilience :

C'est une grandeur caractérisant la ductilité de l'acier, et plus particulièrement sa résistance aux chocs. Elle exprime le travail (en J/cm^2) nécessaire pour rompre un acier, par flexion sous l'effet d'un choc. (Figure I. 3)

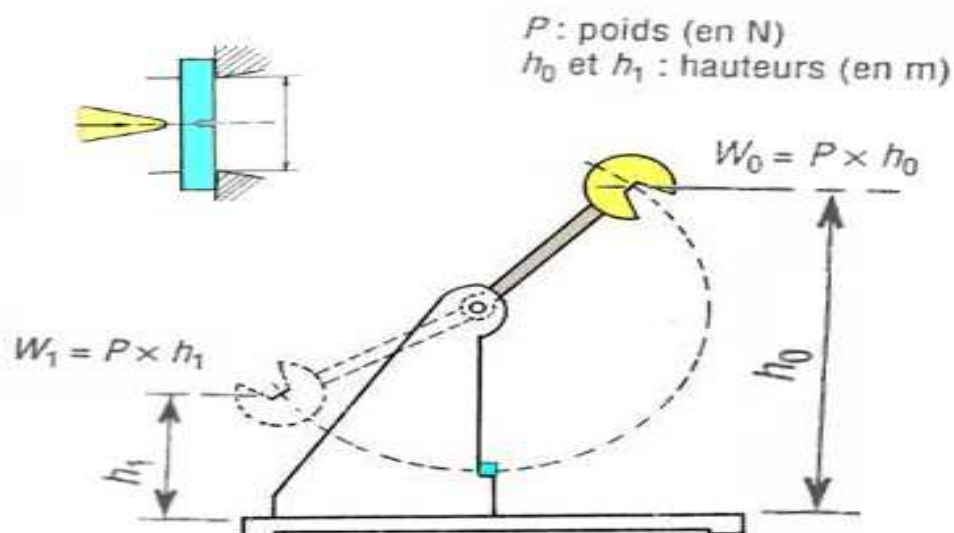


Figure I-3: Schéma de principe de l'essai de choc

I-2.4 Les essais de fluage :

L'essai de fluage consiste à soumettre le matériau à une contrainte constante de traction ou de compression, inférieure à la limite d'élasticité du matériau, pendant une durée suffisante et à température constante élevée.

il est pratiquement similaire à un essai de traction, sauf que dans ce cas, l'essai durera dans le temps et provoquera ce qu'on appelle un allongement retardé (Figure I. 4)

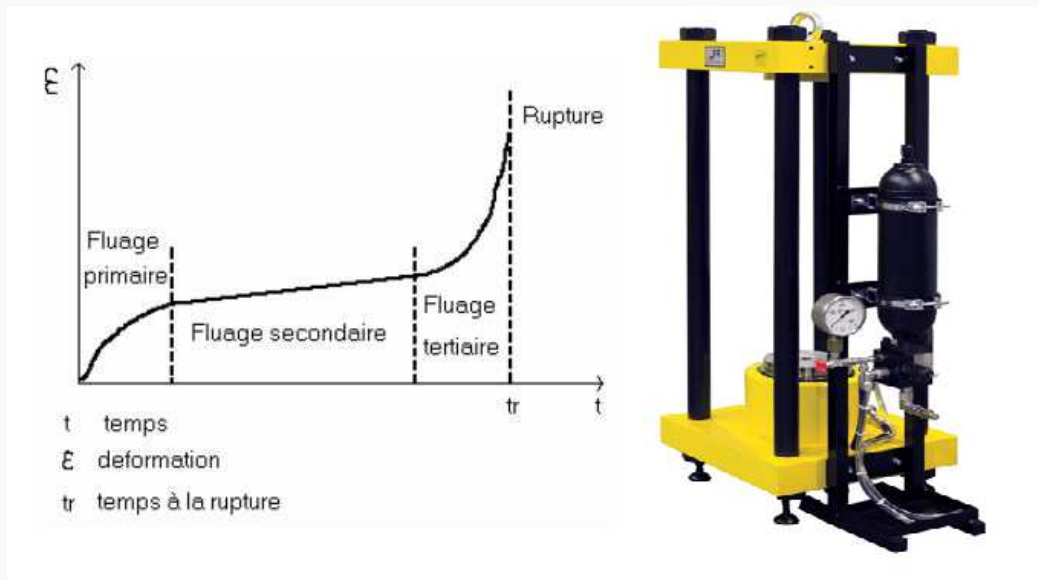


Figure I-4: l'essai et appareil de fluage.

I-2.5 Les essais d'endurance (fatigue) :

Cet essai est aussi très important, car il se peut que certaines structures en acier se rompent sous une charge étant bien inférieure à la charge de rupture, à cause de l'usure ou encore à cause de la vétusté de la structure. Donc ce calcul permet d'éviter qu'une structure en acier rompe au fil du temps. (Figure I. 5)

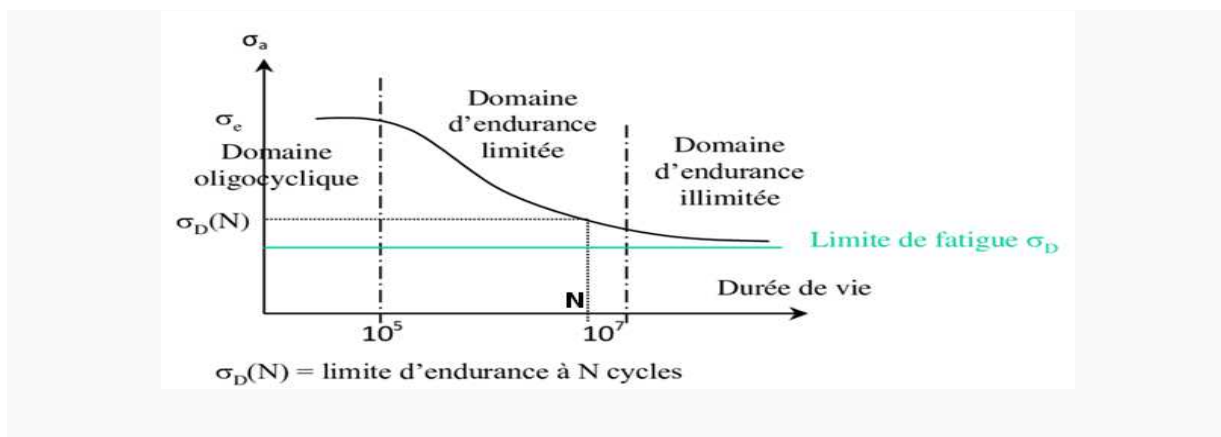


Figure I-5: L'essai de fatigue

I-3. Caractéristiques technologiques de l'acier :

I-3.1. 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-3.2. Fissuration à chaud :

ce type de fissure apparaît lorsque le métal est encore chaud, au moment de la solidification. Parmi les facteurs favorisant l'apparition de tels défauts, on retrouve la conception du joint soudé. Plus un chanfrein est étroit, plus les contraintes mécaniques dues à la solidification du métal sont importantes. Si celles-ci sont trop élevées une fissure risque de se former lors de ce changement d'état, Il est donc important de déterminer correctement l'angle du chanfrein. On privilégiera donc un usinage des bords à l'aide d'une machine adaptée qui permettra de réaliser un angle précis et constant.

I-3.3. Fissuration à froid :

Une fissure à froid apparaît après l'opération de soudage tel défaut est causé par la combinaison simultanée de trois facteurs : une structure de trempe (dure et fragile), des contraintes mécaniques résiduelles (retrait et bridage) et la présence d'hydrogène diffusible dans le cordon de soudure. Ce dernier facteur peut être lié à une mauvaise préparation des bords. (Figure I. 6)

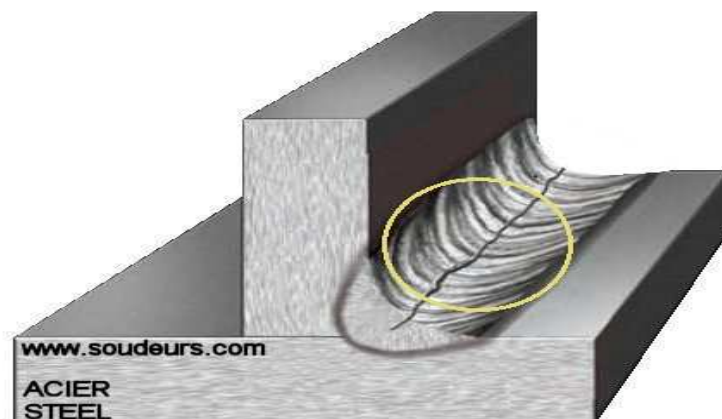


Figure I-6: fissure au niveau du cordon de soudure

I-3.4. Arrachement lamellaire :

Les fissures par arrachement lamellaire se produisent parallèlement à la surface d'un produit laminé, au droit d'un assemblage soudé sollicitant le matériau dans le sens de son

épaisseur. L'arrachement lamellaire est toujours associé à des concentrations très élevées de force de traction. (Figure I. 7)

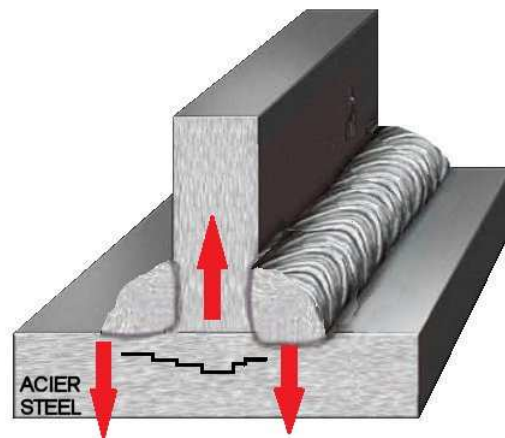


Figure I-7: Arrachement lamellaire

I-4. Les familles d'acier:

I-4.1. Aciers inoxydables :

Ces aciers présentent une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage (déformation irréversible). Ils sont essentiellement alliés au chrome, élément qui confère la propriété d'inoxidabilité, et au nickel, élément qui confère de bonnes propriétés mécaniques. Les aciers inoxydables sont classés en quatre familles : ferritique, austénitique, martensitique et austéno-ferritique.

I-4.2. Acier 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-4.3. 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, grainé, texturé ou embossé.

I-5. Les formes de produits :

I-5.1. 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-5.2.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, câbles, fils, ronds à béton...), obtenus parlaminage à chaud, étirage ou tréfilage.

Les produits plats (tôles, bardages, profils minces, profils creux...) qui subissent en généralun laminage à froid supplémentaire, à l'exception des tôles de forte épaisseur.

I-5.3.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-5.4.Galvanisation par trempage:

Un procédé plus artisanal qui consiste à plonger les profilés dans un bain de zinc.dans le but de la protéger contre la corrosion ce qu'on appelle traitement anticorrosif.

I-6.Les produits plats :**I-6.1.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 1800mm 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-6.2.Les tôles nervurées :

Ce sont des tôles minces que l'on nervure par profilage 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.

I-7.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.

I-8. 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-9. 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 éléments à parois 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. 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 plafond... Légers et maniables, ils peuvent s'assembler par vis auto taraudeuses.

I-10. Profilés formés à froid :

I-10.1. Introduction :

Dans la construction en acier, il existe deux grandes familles l'une qui est la plus familière à savoir les profilés en acier laminés à chaud, sont formés à des températures élevées ; l'autre moins familière, mais d'une importance croissante.

Les profilés formés à froid sont constitués de faces planes ou courbes raccordées entre elles par des plis des formes arrondies. Ils présentent une section droite uniforme sur toute leur longueur.

Profilés en acier laminés à froid tandis que ces derniers sont formés à une température ambiante à partir de tôles d'acier, ou de barres plates obtenues par des machines de profilage ou par la presse plieuse (Figure I. 8).

L'idée derrière les éléments en acier formés à froid est d'utiliser la forme plutôt que l'épaisseur de la charge de support. un grand nombre de différentes configurations peuvent être produites pour répondre aux exigences de conception optimisée à des fins structurelles et économiques. de nombreux autres avantages compris la légèreté, haute résistance et la

rigidité, la production de masse, rapide et facile Installation, et de l'économie dans le transport et la manutention.



a)Machine a profilage.

.b)Presse plieuse

Figure I-8 : Machine de formage a froid

I-10.2. Informations générales sur le formage à froid:

Le formage à froid comprend différents procédés de transformation du métal, tels que le laminage à froid et l'emboutissage. Ils permettent d'obtenir une grande variété de produits finis et semi-finis par différentes lignes de production.

On distingue différents groupes :

Production de fer et Production d'acier (comprenant la plupart des produits formés à chaud et à froid, ainsi que les bandes couchées en continu), fabrication de tubes d'acier et « autres premières transformations de l'acier » (emboutissage à froid, laminage à froid à bande étroite, laminage de fils, etc.).

I-11. Procédés et techniques appliquées dans le formage et laminage à froid :

Les activités de formage à froid abordées dans ce paragraphe sont le laminage à froid et le tréfilage.

I-12. Emboutissage à froid des barres d'acier:

L'emboutissage à froid concerne la fabrication de barres ou de sections d'acier par emboutissage à froid, meulage ou écaillage de barres d'acier laminées à chaud en barres d'acier clair ayant la forme et les caractéristiques souhaitées par les utilisateurs. Le finissage à froid pendant les opérations d'emboutissage à froid durcit et augmente la résistance de l'acier tout en réduisant la ductilité, ce qui peut nécessiter un traitement de recuit du produit après l'emboutissage.

I-13.Laminage à froid :

I-13.1.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 continue 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 (produits longs).

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'agit d'une propriété interne du matériau).

Le laminage à froid 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 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 cages (de 4 à 6) au 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 alliés (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 0,16 et 3 mm).

I-14.Laminoirs à froid (laminoirs à bandes LF) :

Les usines comprennent généralement les éléments suivants :

- La ligne de décapage continue, où la couche d'oxyde formée pendant le laminage à chaudes retirée par décapage.
- Le laminage à froid comprend généralement un laminoir tandem à 4 ou 5 cages et à 4 cylindres ou un laminoir réversible à 4 cylindres. Le laminage à froid réduit de 50 à 80% l'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'érouissage pendant le laminage à froid.
- Les laminoirs adoucisseurs permettent de conférer au matériau recuit les propriétés Mécaniques requises (empêche la formation de lignes de Lüders 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.
- Sur 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 cylindres, les cylindres de travail et d'appui du laminoir à froid et 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 skinroll 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.

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 longs
 - laminoirs universels (métaux)
 - laminoirs en 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-15.Fabrication et domaine d'application des profilés formés froid :

I-15.1.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 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.

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-15.2.Les technologies de fabrication :

Le profilage consiste à faire passer une bande d'acier en continu à travers une série de rouleaux opposés pour déformer progressivement l'acier plastiquement afin de former la forme souhaitée. Chaque paire de rouleaux produit une quantité fixe de déformation dans une séquence. (Figure I- 9)



Figure I- 9 : Procédé de profilage

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 ce ci-après l'avoir placée entre les mors d'une plieuse.

Dans la fabrication du 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-10)

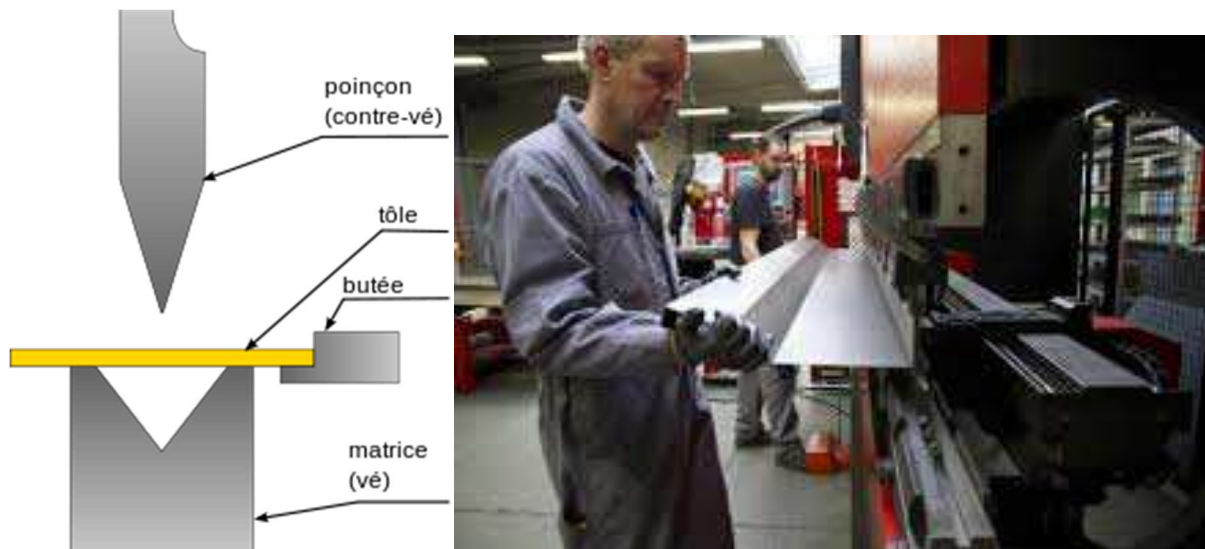


Figure I-10 : Presse plieuse industrielle (Procédé de pliage)

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 en tant 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.

I-16. Types des sections en acier formées à froid :

Ils peuvent être classés en deux grandes catégories :

- Panneaux et plancher.
- Les éléments d'ossatures individuelles ;

I-16.1. Panneaux et plancher :

a) **Plaques nervurées et plateaux** : Les panneaux et les plateformes sont faits à partir de tôles profilées et de plateaux linéaires. Comme représenté sur la figure 1.10. La profondeur des panneaux s'étend habituellement de 20 à 200 millimètres, alors que l'épaisseur varie de 0.4 à 1.5 millimètres. (Figure I-11)

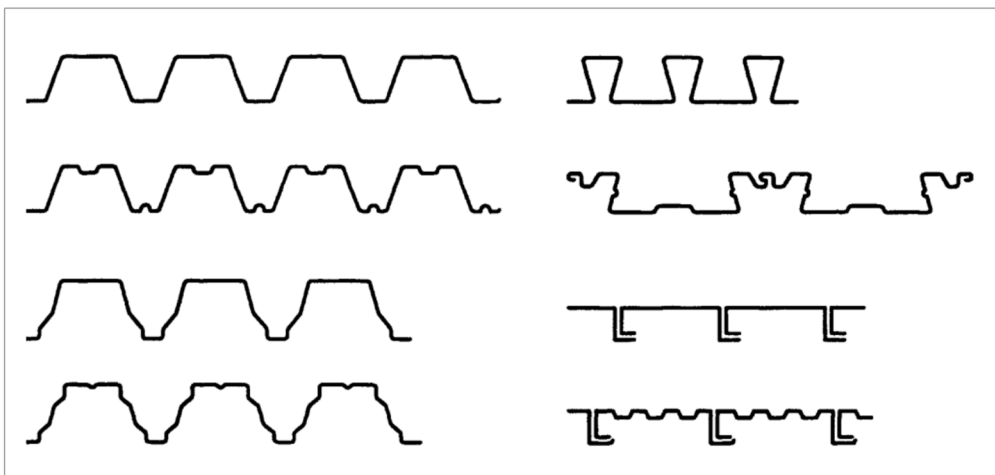


Figure 1-11 : Plaques nervurées et plateaux

b) **tôles ondulées** : utilisées en façade, en toiture et pour des planchers. La hauteur des tôles peut varier d'environ 30 à 180 mm et leur épaisseur 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 (dalle mixte) ou de support d'isolation (toiture). Lors de la construction, elles servent de plate-forme de travail et de coffrage. En façade, les tôles constituent, en plus de leur fonction principale d'enveloppe, un élément décoratif important. (Figure I-12)

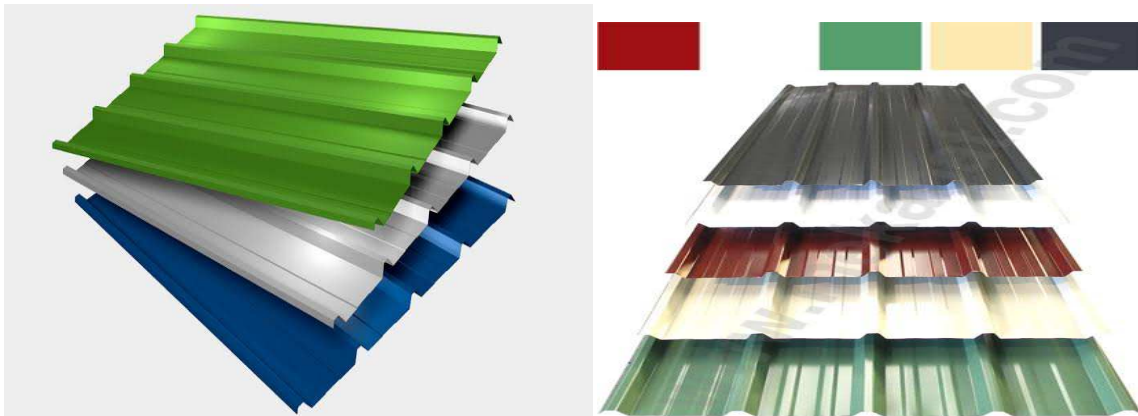


Figure I-12 :Exemples des tôles ondulées pour les toitures, revêtements muraux et planchers

I-16.2. Les éléments d'ossatures individuelles :

Ils sont utilisés en général dans les structures de bâtiment. En général, la hauteur de ces profilés varie de 80 à 250 mm et leur épaisseur de 1 à 5 mm. Étant 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 torsion sont les caractéristiques essentielles à considérer lors du dimensionnement.

a) Profilés fermés reconstitués :

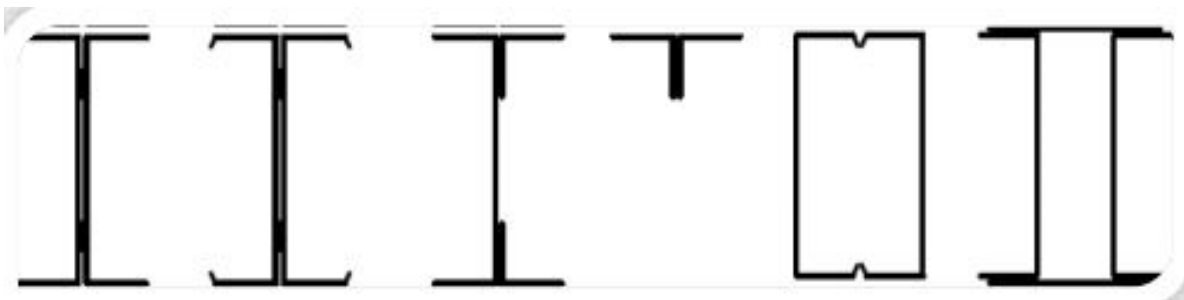


Figure I-13 :Profilés fermés reconstitués

b) Profilés ouverts simples :

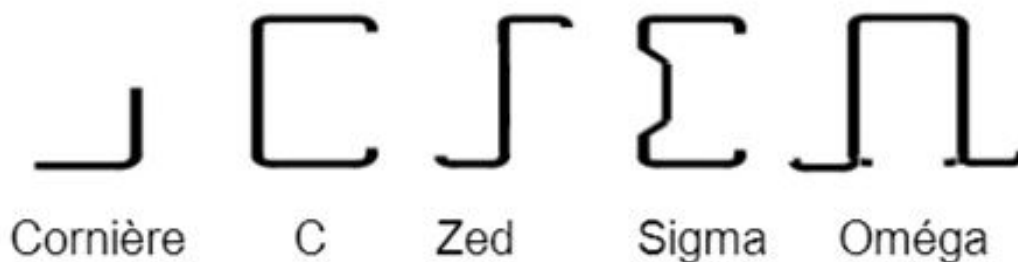


Figure I-14 :Profilés ouverts simples

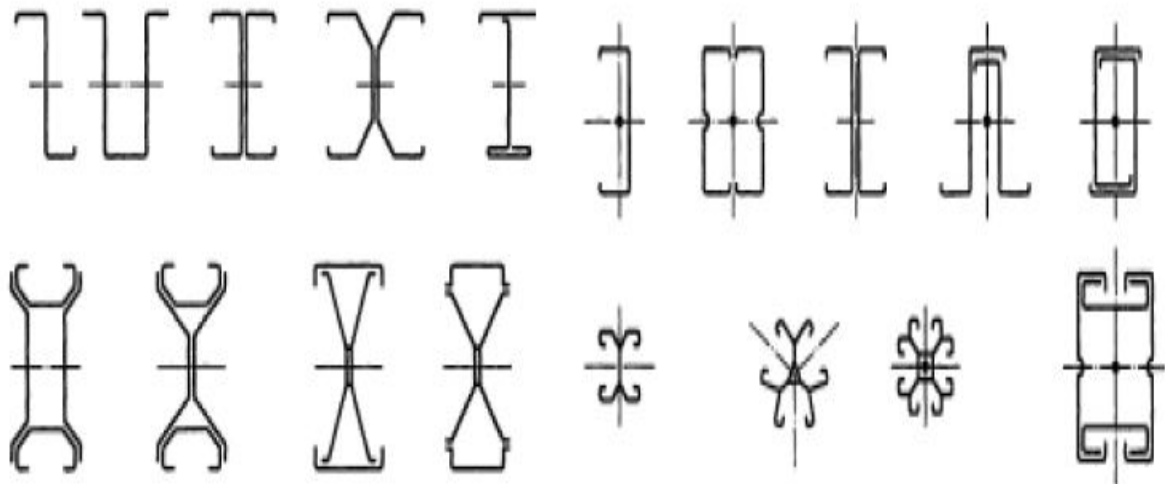


Figure I-15 :Différents types de profilés

I-16.3. Les raidisseurs :

Les raidisseurs constituent souvent des plis, des nervures intermédiaires ou bien des éléments indépendants qu'on ajoute au profilé par boulonnage. Ces raidisseurs dans les profilés peuvent être de bord, un simple ou double pli par exemple ou bien intermédiaires dans la semelle ou l'âme. (Figure I-16)

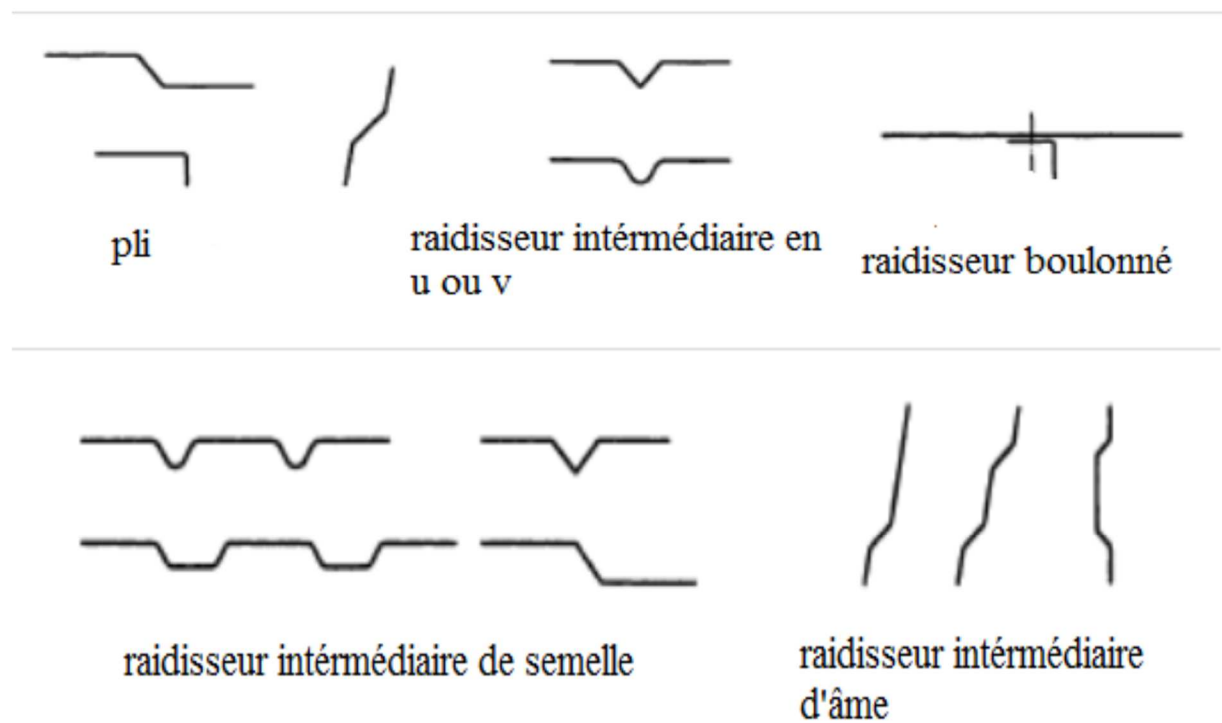


Figure I-16 :Différents types de raidisseurs

I-17. 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 (Ronald, 1988) (Tableau I. 1)

Méthode de formage		Formage à froid	
		Laminage à froid	Presse plieuse
Limite d'élasticité	Angle	Elevé	Elevé
	Semelle	Modéré	--
Force ultime	Angle	Elevé	Elevé
	Semelle	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'écroutissage 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 1.15, et leur influence sur la résistance au flambement est moins importante que les contraintes résiduelles de la membrane comme le montre le tableau 1.2. (Bivolaru, 1993). (Figure I-17)

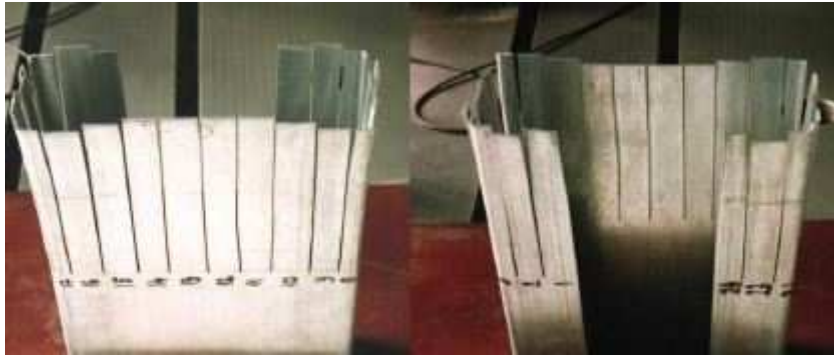


Figure I-17 : Contraintes résiduelles de flexion dans une section en acier formée à froid avec bord tombé (Bivolaru, 1993)

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 (Ronald, 1988).

Méthode de formage	Formage à froid	
	Laminage à galet	Presseplieuse
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-18. 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.18).

Dés que la section est formée la résistance dans les coins et les raidisseurs devient plus importante que dans les zones plates de la section. Donc les propriétés mécaniques diffèrent dans la section.

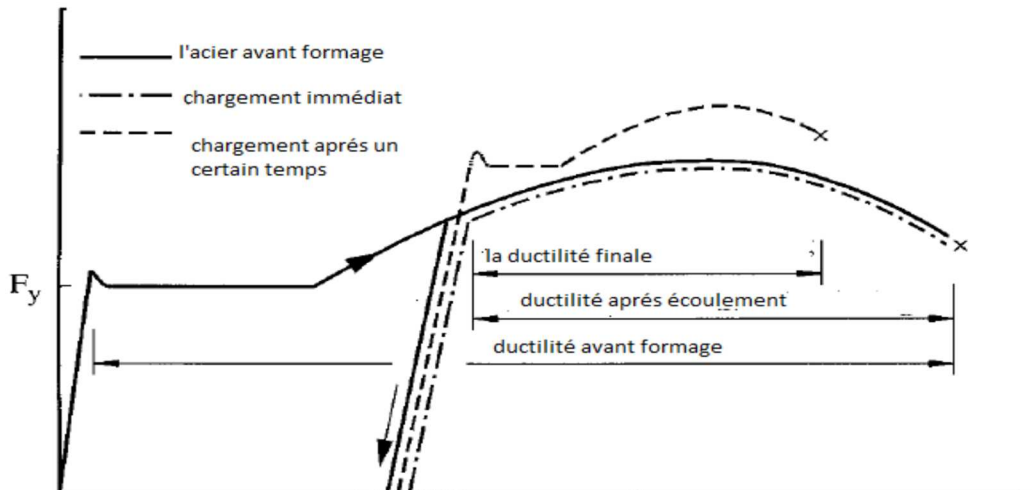


Figure I-18 : Courbe contrainte-déformation de l'acier avant et après mise en forme.

En réalité, l'augmentation de la résistance à la 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.19.

Dans ce cas la limite élastique f_y est déterminée pour une déformation égale à 0.002.

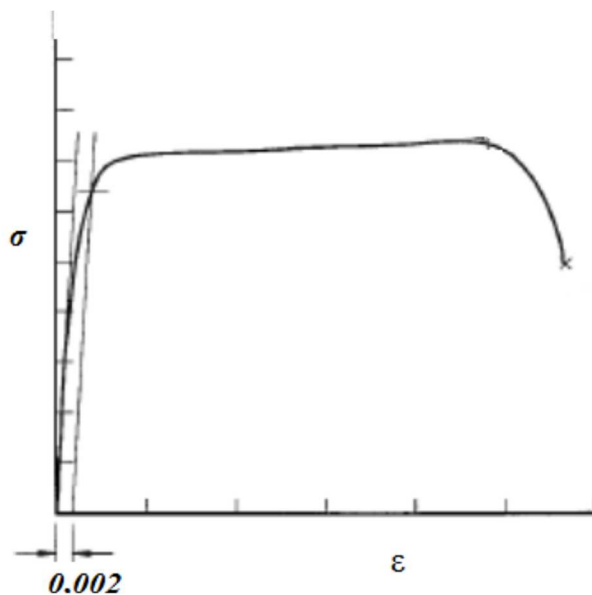


Figure I-19 : Courbe de comportement de l'acier

I-19. Modes d'instabilité des profilés formés à froid et à parois minces :

Généralité :

les éléments formés à froid sont obtenus à partir de tôles minces, leur épaisseur est généralement très faible comparée à celle des éléments formés à chaud. Les parties planes de ces éléments peuvent donc devenir instables sous l'action des forces agissant dans leur plan. Ce problème est le plus accentué dans ce type d'éléments du fait de la méconnaissance des

charges critiques et surtout du mode d'instabilité qui peut être de type local, global ou bien par la combinaison des deux types rendant le phénomène d'interaction plus complexe à maîtriser(Figure I.20)



Figure I-20 :Différents modes d'instabilité subissent par les parois minces

Selon la portée du profilé et sous l'application d'une charge compressive, on peut mettre en évidence trois types d'instabilité :

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

La définition de ces modes d'instabilité repose sur la bonne compréhension des rôles de la longueur de demi-onde et de la forme déformée associées à l'instabilité.(Figure I-21)

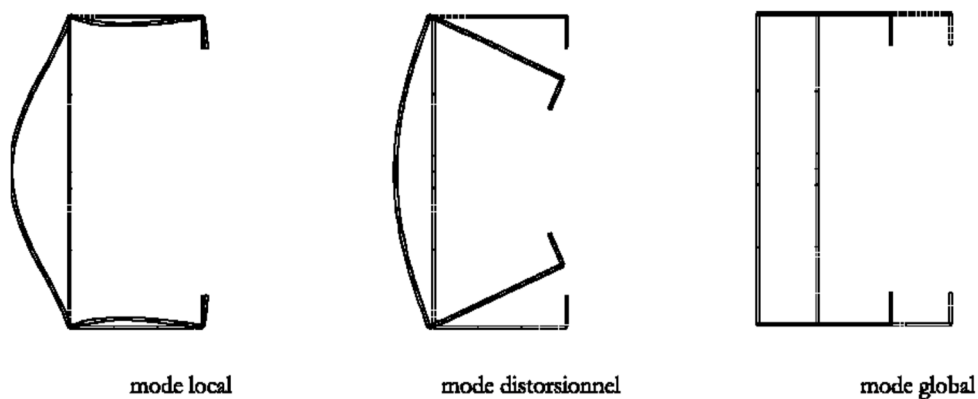


Figure I-21 : les trois types d'instabilité.

I-19.1 Instabilité locale (voilement) :

Ce mode d'instabilité présente une distorsion significative de la section transversale, mais cette distorsion inclut seulement la rotation, et non la translation, sur les lignes de pliage internes (par exemple les coins) d'un élément. La demi-longueur d'onde du mode de flambement local doit être inférieure ou égale à la plus grande dimension de l'élément sous des contraintes de compression. (Figure I-22)

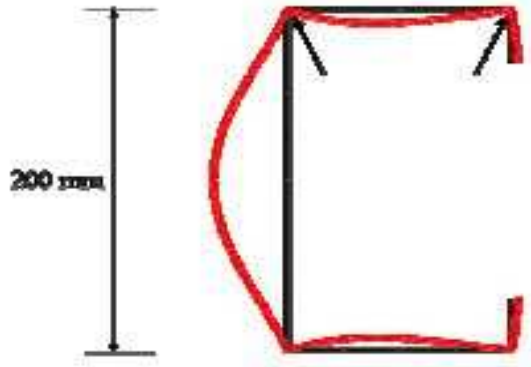


Figure I-22 : Instabilité locale (voilement).

I-19.2 Instabilité distorsionnel :

Il se manifeste également par une distorsion significative de la section transversale, mais cette distorsion comprend la rotation et la translation à une ou plusieurs lignes de pliage interne d'un élément. La demi-longueur d'onde dépend de la charge et de la géométrie, et se situe entre le mode local et le mode global. (Figure I-23)

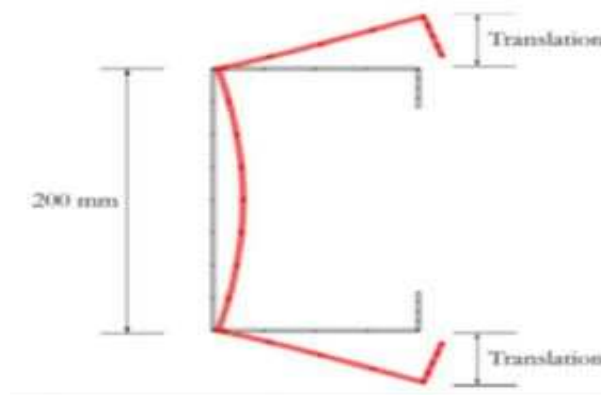


Figure I-23 : Instabilité distorsionnel.

Pour des sections avec des raidisseurs intermédiaires, le mode distorsionnel est caractérisé par le déplacement du raidisseur perpendiculairement au plan de l'élément comme le montre. (Figure I.24)



Figure I-24 :Instabilité distorsionnelle d'une section C avec raidisseur d'âme

I-19.3.Instabilité globale :

C'est un mode non périodique qui couvre toute la longueur du poteau ou de la poutre. Il peut prendre la forme d'une instabilité par flexion, par torsion, ou par flexion et torsion. La forme de la section transversale de l'élément de structure reste inchangée et se déplace comme un corps rigide en translation et/ou en rotation sans subir de déformations.(Figure I.25)

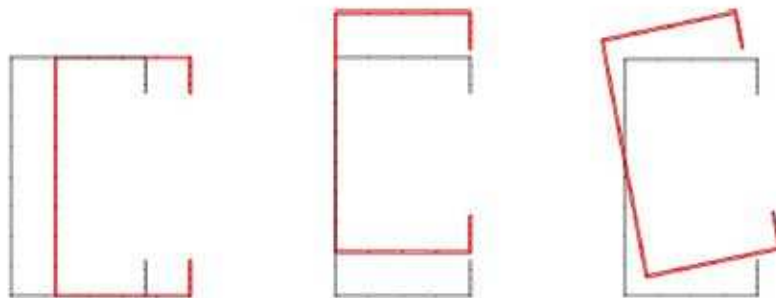


Figure I-25 :Instabilité globale





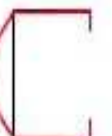





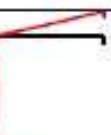
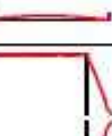


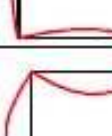
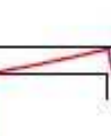
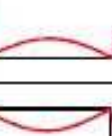
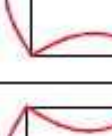
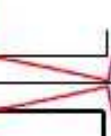
Zone	Forme du C		Section déformée		
	b_2/b_1	b_3/b_1	$a \ll b_1$	Minimum local	Minimum distorsionnel
1	0.2	0.15			Pas de 2 ^{ème} minimum
2	0.2	0.4			Pas de 2 ^{ème} minimum
3	0.6	0.15			
4	0.6	0.4			Pas de 2 ^{ème} minimum
5	0.9	0.05		Pas de minimum Local	
6	0.95	0.47			Pas de 2 ^{ème} minimum
7	1	0.2			
8	1	0.35			

Tableau I-3 : Les modes d'instabilité, local, distorsionnel et pour de faibles longueurs de demi-ondes, correspondants à des sections représentatives des 8 zones de la classification.

On remarque que raidissage peut être efficace en retardant l'instabilité distorsionnelle et en amplifiant la résistance d'un élément. Il va alors limiter la rotation de la jonction âme/semelle dans la zone comprimée.

I-20.Exemple réel de flexion en quatre point d'un profilé formé a froid de forme super-oméga

Le modèle numériques est de poutre type super-oméga métallique 160x1.5 (figureI-26) en acier S280, sur deux appuis sollicités par une charge de flexion en 2 points. Les caractéristiques géométriques et mécaniques sont présentées dans le tableau 1-4 :

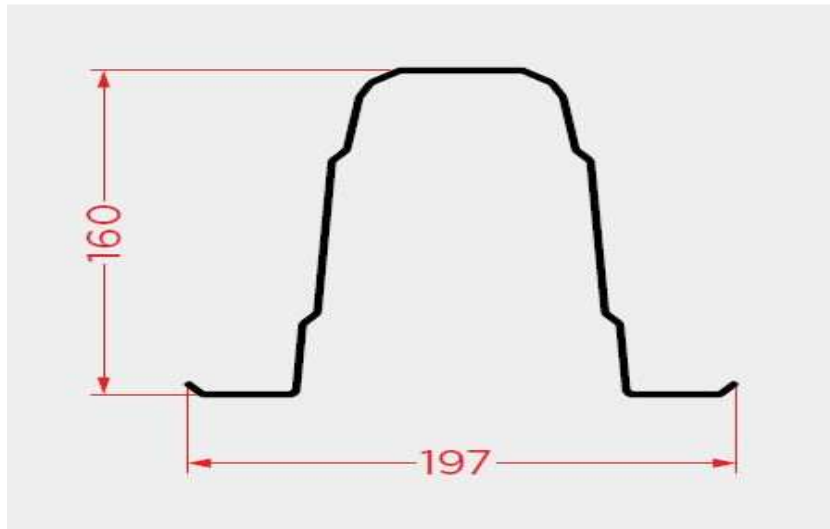


Figure I-26 : Profilé formé a froid de forme super-oméga

L'élément	H (mm)	C (mm)	L (m)	Poids Volumique γ (kg/m ³)	Module de Young E(Mpa)	Coefficient de poisson ν
Superomega 160 x1.5	160	197	4	7850	210000	0,3

Tableau I-4 : Propriétés géométriques et mécaniques de poutres en acier.



Figure I- 27 : Essai sur le modèle de poutre super-oméga.

Les flèches calculées au 1/4 de la poutre (points 2)(figure I. 27), matérialisant les positions respectives des comparateurs placés lors de l'essai expérimental sont comparées. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous:

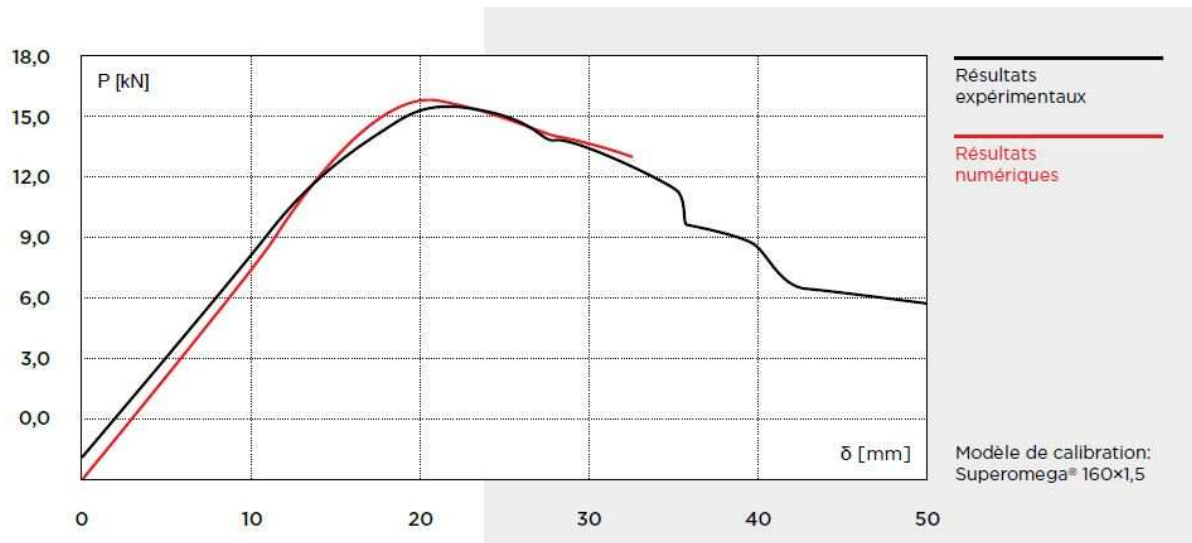


Figure I-28 : Courbe de flèches à 1/4 de la poutre super-oméga



Figure I- 29: voilement locale de la poutre super-oméga

Le phénomène d'instabilité locale de la section a été intégré à l'analyse par la détermination des propriétés efficaces de la section sous compression, de flexion selon l'axe de la plus grande inertie (positive et négative) et de la flexion selon l'axe de la moindre inertie.

Le résultat de ces expériences est de déterminer la section efficace, en pratique, est la réduction de la quantité d'acier nécessaire pour la même performance structurelle.

Applications du Superomega

La polyvalence du Superomega permet une applicabilité élargie à divers types de structures ainsi que l'adaptation à presque tous les types de matériaux

Ce profilé peut être appliqué aux:

- Structures secondaires pour le support des revêtements et des façades;
- Diviseurs intérieurs;
- Structures pour étages intermédiaires;
- Supports pour systèmes de panneaux photovoltaïques.

I.23. Les avantages des profilés formés à froids dans la construction :

- Par rapport aux profilés laminés à chaud plus épais, les profilés formés à froid peuvent être fabriqués pour des charges relativement légères et / ou des durées courtes. Les configurations en coupe inhabituelles peuvent être produites économiquement par formage à froid, et par conséquent des rapports favorables résistance-poids peuvent être obtenus.
- Sections emboîtables peuvent être produites, ce qui permet pour l'emballage compact et expédition.
- Charges panneau de transport et les ponts peuvent fournir la surface utile pour le plancher, le toit et la construction du mur, et dans d'autres cas, ils peuvent également fournir des cellules ci-joint pour les conduits électriques et d'autres.
- Panneaux portants et des ponts non seulement supporter des charges normales à leurs surfaces, mais ils peuvent également agir comme des diaphragmes de cisaillement pour résister à la force dans leurs propres panneaux si elles sont correctement reliés les uns aux autres et aux membres de soutien.
 - ✓ 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
 - ✓ Relativement peu de chutes.
 - ✓ Beaucoup de possibilités d'opérations en ligne : poinçonnage, cambrage,
 - ✓ emboutissage...
 - ✓ Une large gamme de qualités d'aciers, épaisseurs précises de 0,2 à 8mm, pré laqué,
 - ✓ inox, zingué, etc....Pratique et constructif.

CHAPITRE II:

Aspects réglementaire

II-1. Analyse et méthode de calcul selon EC3 partie 1.3.

II-1.1. Introduction

Les poutres sont peut-être les plus fondamentales de tous les composants structuraux. Une variété de formes de profilés et de types de poutres peut être utilisée selon l'importance du chargement et de la portée.

Les poutres en acier peuvent souvent être dimensionnées simplement sur la base de la résistance aux moments fléchissant (en s'assurant que le moment de résistance de calcul de la section transversale choisie est supérieur au moment maximum appliqué) et de la rigidité, c'est-à-dire en vérifiant que la poutre ne présente pas une flèche susceptible d'affecter les considérations de bon fonctionnement en service. Les poutres empêchées de se déplacer latéralement sont dites "maintenues latéralement", et ne sont pas affectées par le flambement hors du plan (déversement).

En outre, les profils fléchissent selon leur axe faible ne peuvent présenter une ruine par déversement et il est peu probable que les profils offrant des rigidités.

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-1.2. 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.

II-1.3. Coefficient de sécurité :

Pour la vérification à l'état limite ultime, les coefficients partiels γ_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
 $\gamma_{M2} = 1,25$
- A l'état limite de service on prend le coefficient
 $\gamma_{MSer} = 1,0$

I-1.4. 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.1) suivant :

Type d'acier	Norme	Nuance	N/m ²	N/mm ²
Tôle en acier de construction laminée à chaud	EN10025	S2	235	360
		35	275	430
		S2	355	510
		75		
		S3		
Tôle en acier de construction à haute limite d'élasticité laminée à chaud	EN10113 -2	S275N	275	370
		S355N	355	470
		S420	420	520
		ONS	460	550
		N		
EN10113 -3	S275M	275	360	
	S355	355	450	
	5MS	420	500	
	420			
	M			
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	220	300
		E220G		
		FeE250G	250	330
		Fe E	280	360
		280GFe	320	390
E320G				
Fe	350	420		
E350G				
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
	S550MC	550	600	
	EN10149 -3	S260MC	260	370
		S315MC	315	430
		S355MC	355	470
		S420MC	420	530

Tableau II.1 : Valeurs de la limite d'élasticité f_y et la résistance à la traction f_u

Les coefficients caractéristiques de l'acier :

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

II-2. SECTION EFFICACE UN FROFILE FORME A FROID :

Le premier travail à effectuer lorsque l'on veut analyser le comportement d'un élément formé à froid et estimer sa capacité portante, c'est d'évaluer les largeurs efficaces des parois comprimées de la section de l'élément. Ceci doit par ailleurs se faire sur la base d'une distribution adéquate des contraintes dans la section en question. Puis il faut calculer les propriétés géométriques de la section efficace, en prenant en compte le déplacement de l'axe neutre lié à la redéfinition de la section en parties efficaces. Ensuite, on applique les mêmes principes et règles de bases de calcul des sections à parois épaisses (sections laminées à chaud) dans le dimensionnement et vérification des parois formés à froid.

II-2.1. CONCEPT DE LARGEUR EFFICACE POUR UN FROFILE FORME A FROID :

Si l'on considère une plaque simplement supportée sur ses bords et soumise à la compression dans une direction, il est clair que dans le stade poste-critique, les contraintes se concentrent le long des bords. On peut alors déterminer la capacité de cette plaque sur la base d'une distribution uniforme de contrainte, mais limitée à une largeur réduite, appelée efficace, b_{eff} qui dépend de la contrainte critique élastique de voilement de la plaque, σ_{cr} et de la limite d'élasticité du matériau f_y .

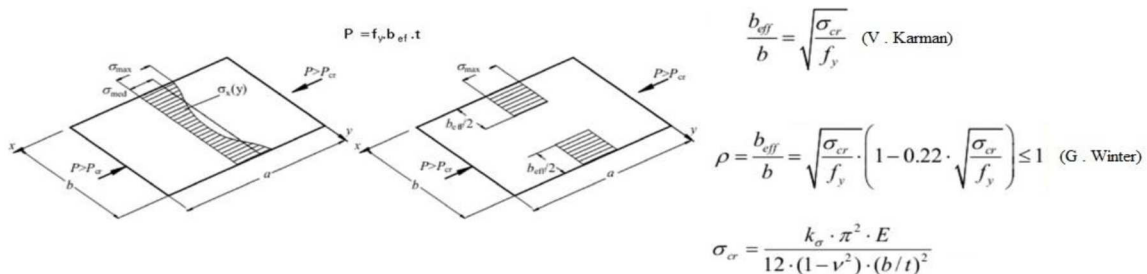


Figure II-1 : Concept de largeur efficace (Eurocode3)

II-2.2. Validité du concept des largeurs efficaces:

Des comparaisons entre des résultats d'essais et les charges de ruine obtenues analytiquement pour des sections en C, ainsi que pour d'autres sections, ont confirmé la validité de ce modèle de calcul. L'avantage du concept des largeurs efficaces c'est qu'il permet l'emploi de méthodes de calcul relativement simples. Il permet aussi de visualiser l'effet de la géométrie de la section sur la capacité portante de l'élément considéré.

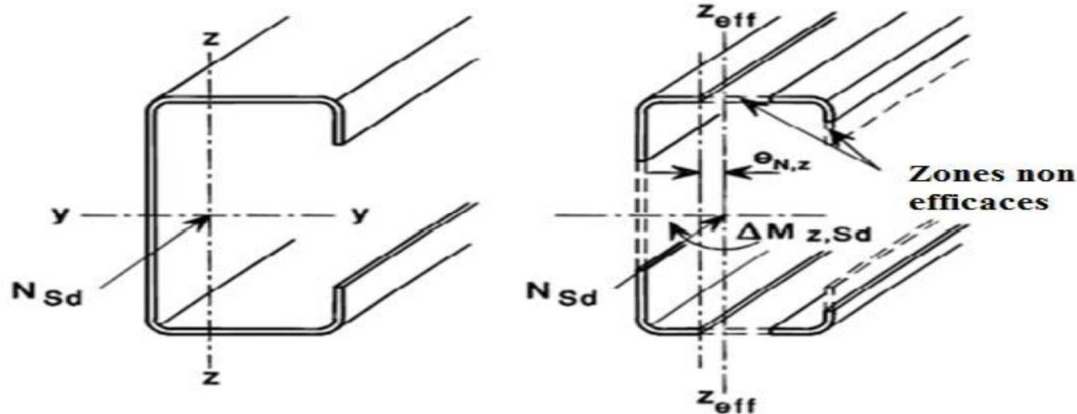


Figure II-2 : Section transversale efficace d'un profile en forme C

II-3. 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.

Les effets du voilement local doivent être pris en compte par l'utilisation de sections transversale efficaces, voir l'Eurocode partie 1-3.

➤ Section transversale brute :

Les caractéristiques de la section transversale brute doivent être déterminées en utilisant les dimensions nominales spécifiées. Dans le calcul des caractéristiques de la section transversale brute, il n'est pas nécessaire de déduire les trous de fixation, mais il faut tenir compte des ouvertures de grandes dimensions. Les plaques servant seulement pour l'éclissage ou comme traverses de liaison ne doivent pas être prise en compte.

➤ Air nette :

L'aire nette de la section transversale d'une barre, ou d'une paroi d'une section transversale, doit être prise égale à son aire brute diminuée de l'aire de la totalité des trous de fixations et autres ouvertures.

➤ **Influence des arrondis :**

Dans les sections transversales comportant des arrondis, les largeurs de référence des parois b_p doivent être mesurées à partir des points médians des parois d'angle adjacent.

Ces caractéristiques sont déterminées à partir de la géométrie réelle des sections (figures II.3, II.4 et II.5).

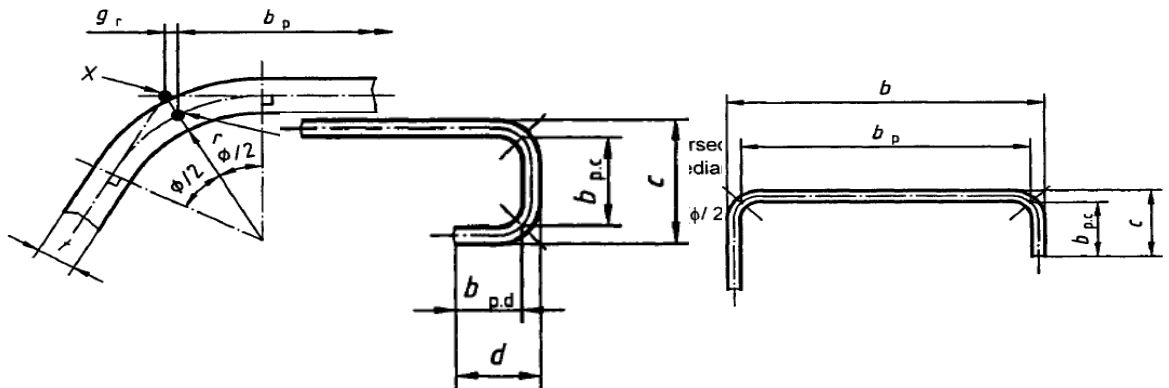


Figure II-3 : Point médian d'un arrondi ou de pli

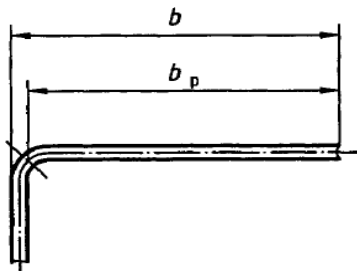


Figure II-4 : Largeur de référence des parois

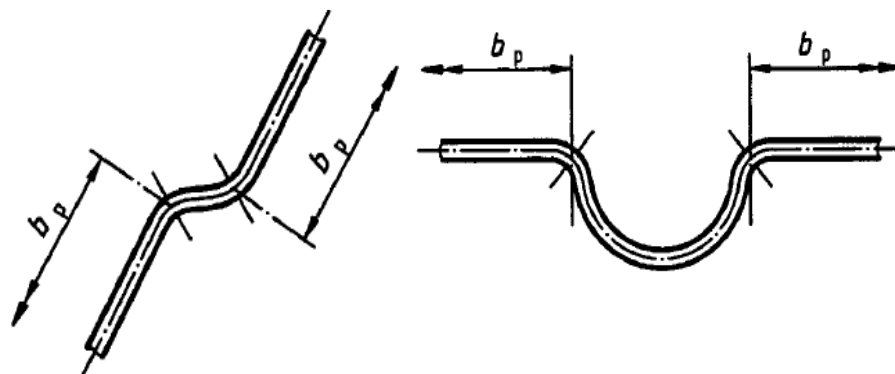


Figure II-5 : Largeur de référence des parois adjacentes des raidisseurs

bp : largeur de la paroi sans les coins
 b : largeur totale de la paroi
 c : largeur totale du raidisseur

II-3.1.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 :

$$f_{ya} = f_{yb} + \frac{(f_u - f_{yb})knt^2}{A_g} \quad \text{avec} \quad f_{ya} \leq \frac{f_u + f_{yb}}{2}$$

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 tcor 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-3.2.Proportions géométriquesLe tableau suivant (II.2) 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-2 : Rapports largeur épaisseur maximum

Type de paroi	modèle	Type de paroi	modèle

Tableau II-3 : 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 2.2

II-4. Instabilité Locale

Les effets de voilement local sont pris en compte pour déterminer la résistance et de la rigidité des profilés et plaque formés à froid. Ce phénomène est souvent analysé en utilisant la méthode simple dite de « la largeur effective ». voir (II.3)

II-4.1. Parois non raidies

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

$$b_{eff} = \rho b_p \quad \text{si } \sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M1} \quad \text{le facteur de réduction sera obtenu comme suit :}$$

$$\text{On calcule :} \quad \lambda_p \cong 1,052 \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{EK}}$$

$$\rho = 1 \quad \text{si } \lambda_p \leq 0,673 \quad (1)$$

$$\rho = (1 - 0,22/\lambda_p) / \lambda_p \quad \text{si } \lambda_p > 0,673 \quad (2)$$

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 λ_p par l'élancement réduit $\lambda_{p,red}$.

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

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

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

$$\rho = \frac{(1-0.22/\lambda_{p,red})}{\lambda_{p,red}} + 0.81 \frac{\lambda_p - \lambda_{p,red}}{\lambda_p - 0.6} \quad \text{si } \lambda_p > 0.673 \quad (2)$$

Après avoir calculé ρ et d'après le tableau 2.4 et 2.5 on obtient b_{eff} de la quelle 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	$5.98(1 - \psi)^2$	
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.4 : Parois comprimées sur deux appuis

Distribution des contraintes (compression positive)		Largeur efficace b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c - \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -1$	
Coef. de voilement k_c	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c - \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Coefficient de Voilement k_c	0,43	$\frac{0,578}{\psi + 0,34}$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

Tableau II-5 : Parois comprimées en console

II-4.2. Parois munis de raidisseurs de bords et intermédiaire

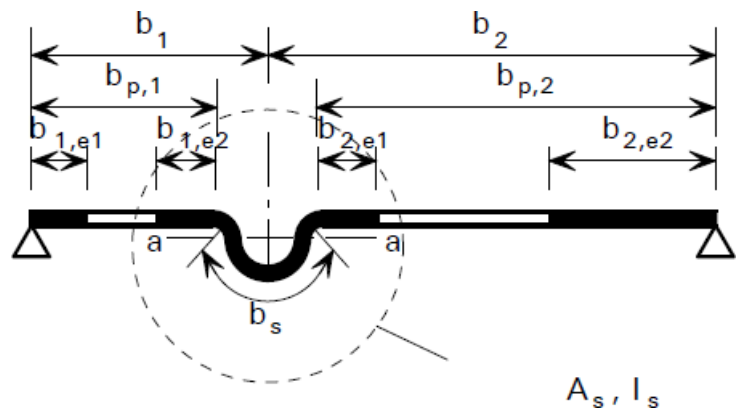


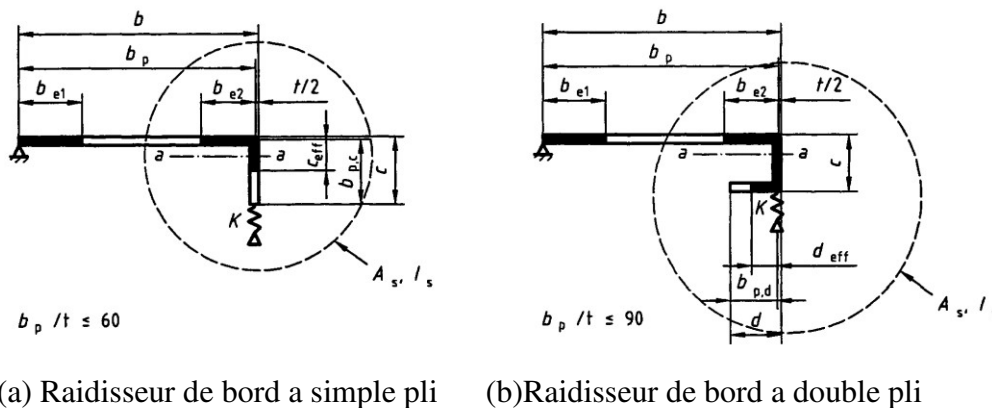
Figure II.6 : raidisseur intermédiaire

II-4.3. Parois munies de raidisseur de bord :

Un raidisseur de bord peut être à simple pli, ou à double pli comme illustré la figure 13. Un raidisseur de bord ne doit être pris en compte pour la détermination de la résistance des parois dont il fait partie, que si les conditions ci- après sont satisfaites :

- L'angle entre le raidisseur et la paroi n'est pas inférieur à 45° ni supérieur à 135° ;
- Le bord c n'est pas inférieur à $0.2 b_p$;
- Le rapport b_p/t n'est pas supérieur à 60 pour un raidisseur de bord à simple pli, ou à 90 pour un raidisseur de bord à double pli.

Si il ya présence de raidisseurs dans la section on doit suivre la procédure itérative suivante pour déterminer les largeurs efficaces (figure.II-7).



(a) Raidisseur de bord a simple pli (b)Raidisseur de bord a double pli

Figure II-7 : Raidisseur de bord.

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

étape 1 : calculer 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 :

$$K=0,5 \quad b_{p,c} / b_p \leq 0,35K = 0.5 +$$

$$0.83 \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0.35\right)^2} \quad 0,35 < b_{p,c} / b_p \leq 0.5$$

$c_{eff} = \rho b_{p,c}$ pour un raidisseur de bord à simple pli (figure II.7 (a))

$c_{eff} = \rho b_{p,c}$ et $d_{eff} = \rho b_{p,d}$ pour un raidisseur de bord à double pli (figure II.7(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 : utiliser cette section efficace initiale pour déterminer le facteur de réduction de flambement par distorsion.

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s}$$

$\sigma_{cr,s}$ 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)

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{F_y b}{\sigma_{cr,s}}}$$

Le facteur de réduction est donné par :

$\chi_d = 1,0$	si	$\lambda_d \leq 0,65$
$\chi_d = 1,47 - 0,723 \lambda_d$	si	$0,65 < \lambda_d < 1,38$
$\chi_d = 0,66 / \lambda_d$	si	$1,38 \leq \lambda_d$

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 χ_d de l'itération précédente jusqu'à :

$$\chi_d = \chi_{d(n-1)} \text{ avec } \chi_d \leq \chi_{d(n-1)}$$

Adopter une largeur efficace b_{e2} , C_{eff} et l'épaisseur réduite t_{red} correspondant à χ_d .

II-5. 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-5.1. Traction axiale :

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

$$N_{t,rd} = f_{ya} A_g / \gamma_{M0} \text{ mais } N_{t,rd} \leq F_{n,rd}$$

II-5.2.Compression axiale :

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

$$\begin{aligned} \text{Si } A_{eff} < A_g & \quad N_{c,rd} = f_{yb} A_{eff} / \gamma_{M1} \\ \text{Si } A_{eff} = A_g & \quad N_{c,rd} = f_{ya} A_g / \gamma_{M0} \end{aligned}$$

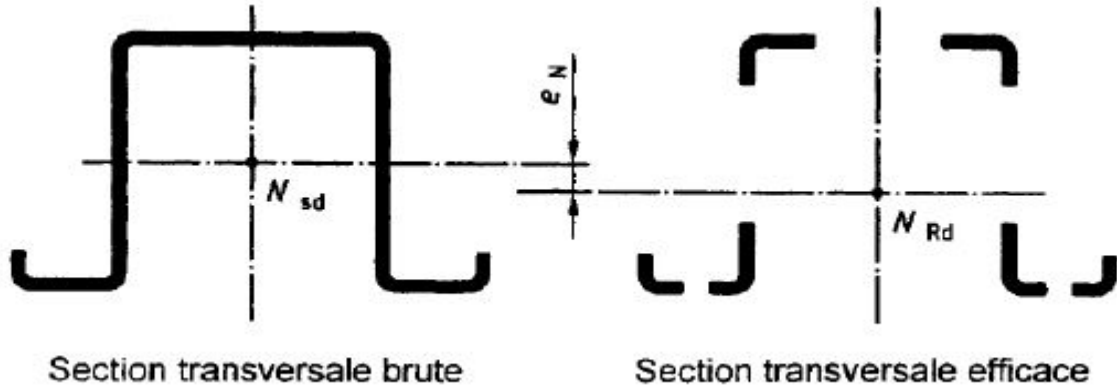


Figure-II.8 : Section transversale efficace en compression.

II-5.3. Moment fléchissant :

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

$$\begin{aligned} \text{Si } W_{eff} < W_{el} & \quad M_{c,rd} = f_y W_{eff} / \gamma_{M1} \\ \text{Si } W_{eff} = W_{el} & \quad M_{c,rd} = f_{ya} W_{el} / \gamma_{M0} \end{aligned}$$

f_y Est la limite élastique telle que définie dans tableau 2.1

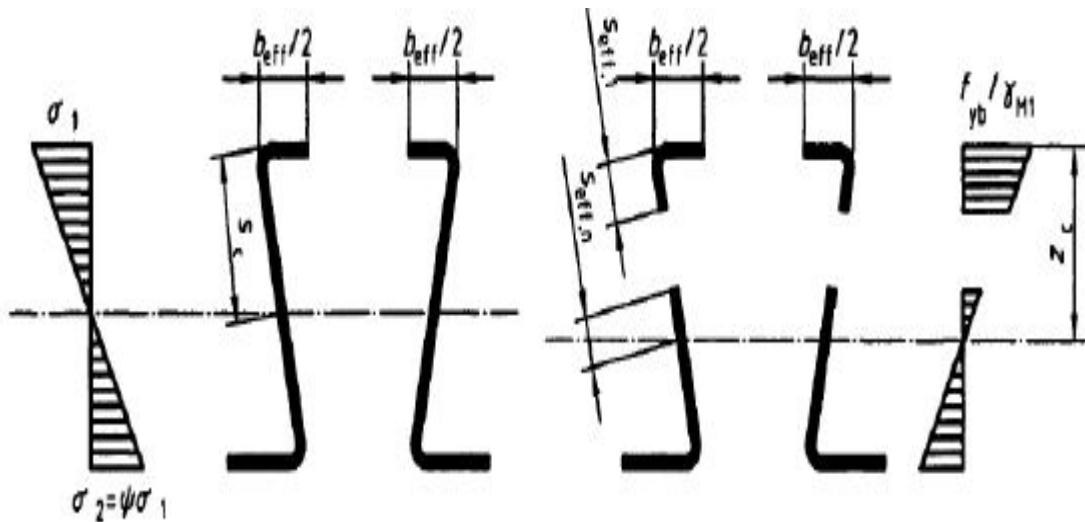


Figure II-9 :Section transversale efficace en résistance en moment fléchissant.

II-5.4. Traction et flexion combinées :

Les sections transversales soumises à une combinaison de traction axiale N_{sd} et de moments fléchissant $M_{y,sd}$ et $M_{z,sd}$.

Si $W_{eff,y,tension} \geq W_{eff,y,compression}$ ou $W_{eff,z,tension} \geq W_{eff,z,compression}$ (ou $W_{eff,y,compression}$ et $W_{eff,z,compression}$ représentent les modules élastiques de section efficace correspondant à la contrainte de compression maximale dans une section transversale efficace qui est soumise uniquement à un moment autour de l'axe approprié), le critère suivant doit également être satisfait.

II-5.5. Compression et flexion combinée :

Les sections transversales soumises à une combinaison de compression axiale N_{sd} et de moments fléchissant $M_{y,sd}$ et $M_{z,sd}$.

II-5.6. Effort tranchant :

La résistance de l'âme à l'effort tranchant $V_{w,Rd}$ doit être prise égale à la plus petite valeur entre la résistance au voilement de cisaillement $V_{b,Rd}$ et la résistance plastique au cisaillement $V_{pl,Rd}$. Il convient de vérifier la résistance plastique au cisaillement $V_{pl,Rd}$ dans le cas d'une âme dépourvue de raidisseur longitudinal.

II.6 Exemple d'analyse de la poutre forme C selon EC3 :

II.6.1.Introduction

Pour le but de notre projet de fin d'études, le choix de la section à étudier s'est porté sur une section en forme de « C » à bords tombés et « Ω » en profilé formée à froid.

Les poutres sont de 1m de portées et elles sont soumises à une charge statique au milieu qui varie en intensité (l'essai de flexion 3 points). Les poutres sont en acier de constructions laminées à froid (S220 selon la norme ISO4997)

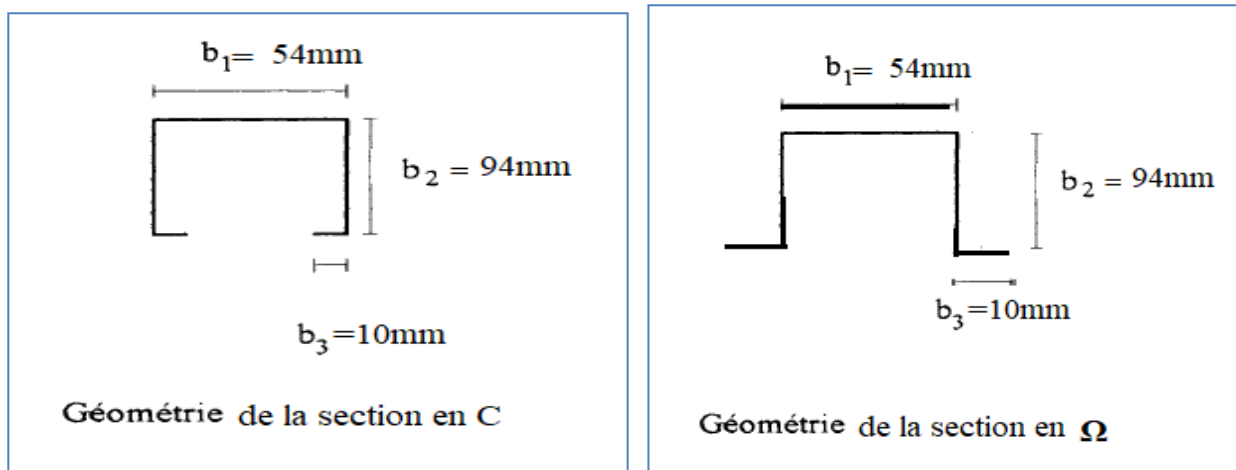


Figure II-10: Les sections transversales des poutres de forme (C) et (Ω)

Pour ce type de section, Nous présenterons à la fin de ce chapitre les organigrammes pour le calcul de ses caractéristiques efficaces et le moment résistant en flexion, Nous présenterons, dans ce qui suit, la procédure de calcul des propriétés de la section efficace, selon l'Eurocode, d'un profilé en ' C ' à bords tombés formé à froid montré par la figure II.10 dans les deux cas : la flexion .

II-6.2.Les donné de la poutre C :

<i>Lesdonnes de calcul</i>					
H	52	mm	γ	1	mm
b1	94	mm	E	$2.1.10^5$	MPa
b2	94	mm			
c	12	mm	Ψ	1	mm
t_{nom}	2	mm	x	7.81	mm
t	1.96	mm	v	0,3	

r	2	mm	Y	1	
f_{yb}	220	MPa	a	90	MPa
			L	1000	mm

Tableau II- 6 : Les données des profilés en C et Ω

II-6.3.Détermination des caractéristiques des sections:

Pour calculer les propriétés efficaces d'un profilé en « C » à bords tombés formé à froid, nous définissons d'abord les dimensions de la ligne médiane de la section, à partir des dimensions totales de la section transversale. Soit :

Hauteur de l'âme : $h_p = h - t_{nom} = 52 - 2 = 50 \text{ mm}$

Largeur de la semelle comprimée : $bp1 = b1 - t_{nom} = 94 - 2 = 92 \text{ mm}$

Largeur de la semelle tendue : $bp2 = b2 - t_{nom} = 94 - 2 = 92 \text{ mm}$

Largeur du bord : $cp = c - t_{nom}/2 = 12 - 2 \text{ mm}$

Avec : h, b1, b2 et c les dimensions totales de la section et t_{nom} est l'épaisseur nominale de la section (EN1993-1-3)

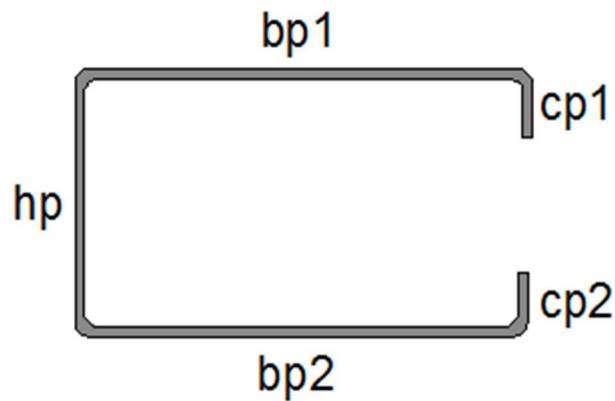


Figure II-11:Caractéristiques géométriques de la section type C

1/ Vérification des proportions géométriques:

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

$1.0 \text{ mm} < t_{nom} < 4.0 \text{ mm}$ $1.0 \text{ mm} < 2 < 4.0 \text{ mm}$ vérifiée

$$\frac{b}{t} \leq 60 \Rightarrow \frac{94}{1.96} = 47.95 < 60 \text{ vérifiée}$$

$$\frac{h}{t} \leq 500 \Rightarrow \frac{52}{1.96} = 26.53 < 500 \text{ vérifiée}$$

$$\frac{c}{t} \leq 50 \Rightarrow \frac{12}{1.96} = 6.12 < 50 \text{ vérifiée}$$

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:

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

$$0.1 \leq \frac{c}{b} \leq 0.3 \Rightarrow \frac{12}{94} = 0.12 \quad \text{Vérifiée}$$

L'influence des arrondis est négligée si:

$$\frac{r}{t} \leq 5 \Rightarrow \frac{2}{1.96} = 1.02 < 5 \quad \text{Vérifiée}$$

$$\frac{r}{bp} \leq 0.1 \Rightarrow \frac{2}{92} = 0.02 < 0.1 \quad \text{Vérifiée}$$

2/ Propriétés de la section brute:

$$A_b = t [(2bp) + (2Cp) + (h_p)]$$

$$A_b = 1.96 \times [(2 \times 92) + (2 \times 10) + (50)] = 497.84 \text{ mm}^2$$

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

Position de l'axe neutre vis-à-vis de la semelle comprimée :

$$Z = t \times \left[\frac{(Cp \times (hp - \frac{cp}{2})) + (\frac{hp^2}{2}) + (bp \times hp) + (\frac{cp^2}{2})}{A_b} \right] Z = 1.96 \times$$

$$\left[\frac{(10 \times (92 - \frac{10}{2})) + (\frac{92^2}{2}) + (50 \times 92) + (\frac{10}{2})}{497.84} \right]$$

$$Z = 20.84 \text{ mm}$$

II-6.4 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 du bord comprimé (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 ($\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma M0$).

1/ 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

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{220}} = 1.03$$

L'élancement réduit:

$$\lambda_{bp1} = \frac{\frac{b_{p1}}{t}}{28.4 \times \varepsilon \times \sqrt{K}} = \frac{\frac{92}{1.96}}{28.4 \times 1.03 \times \sqrt{4}} = 0.80 > 0.673$$

$$\rho_1 = \frac{\bar{\lambda}_{p,b1} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,b1}^2} = \frac{0.80 - 0,055(3 + 4)}{0.8^2} = 0.71 < 1$$

Largeur efficace est:

$$b_{eff1} = \rho_1 \times b_{p1} = 0.71 \times 92 = 65.32 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0.5 \times b_{eff1} = 32.66 \text{ mm}$$

Pour la semelle inférieure:

$$\Lambda_{bp2} = \frac{\frac{b_{p2}}{t}}{28.4 \times \varepsilon \times \sqrt{K}} = \frac{\frac{147}{2.8}}{28.4 \times 0.81 \times \sqrt{4}} = 0.8 > 0.635$$

$$\rho_2 = \frac{\bar{\lambda}_{p,b1} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,b1}^2} = \frac{0.8 - 0,055(3 + 4)}{0.8^2} = 0.71 > 1$$

Largeur efficace est:

$$b_{eff2} = \rho_2 \times b_{p2} = 0.71 \times 92 = 65.32 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0.5 \times b_{eff2} = 32.66 \text{ mm}$$

Largeur efficace des bords tombé:

➤ **Pour les bords tombé supérieur :**

$$C_{p1} = C_{p2}$$

Le coefficient de flambement est

$$\text{Si } \frac{C_p}{b_p} \leq 0.35 \quad K_G = 0.5$$

$$\text{Si } 0.6 \leq b_{p,c} / b_p < 0.35 \quad k_G = 0.5 + 0.83 \sqrt{(b_{p,c} / b_p - 0.35)}$$

$$\frac{C_p}{b_p} = \frac{10}{92} = 0.108 < 0.35 \rightarrow K_G = 0.5$$

L'élanement réduit :

$$\lambda_{bp} = \frac{\frac{C_p}{t}}{28.4 \times \varepsilon \times \sqrt{\quad}} = \frac{\frac{10}{1.96}}{28.4 \times 1.03 \times \sqrt{0.5}} = 0.24$$

Le coefficient de réduction de la largeur est : $\bar{\lambda}_{p,c1} < 0.748$ donc $\rho_1 = 1$

$$C_{eff1} = \rho \times c_p = 1 \times 10 = 10 \text{ mm}$$

Aire efficace des raidisseurs du bord

$$A_{s1} = 2(t (b_{e1} + C_{eff}))$$

$$A_{s1} = 2 (1.96 (32.66 + 10)) = 83.81 \text{ mm}^2$$

➤ **Pour le bord tombé inférieur :**

Le coefficient de flambement est :

$$\text{Si } \frac{C_p}{b_p} \leq 0.35 \quad K_G = 0.5$$

$$\text{Si } 0.6 \leq b_{p,c} / b_p < 0.35 \quad k_G = 0.5 + 0.83 \sqrt{(b_{p,c} / b_p - 0.35)}$$

$$\frac{C_p}{b_p} = \frac{10}{92} = 0.108 < 0.35 \rightarrow K_G = 0.5$$

L'élanement réduit :

$$\lambda_{bp} = \frac{\frac{C_p}{t}}{28.4 \times \varepsilon \times \sqrt{\quad}} =$$

$$\frac{10}{1.96} = 0.24$$

Le coefficient de réduction de la largeur est : $\bar{\lambda}_{p,c1} < 0,748$ donc $\rho_1 = 1$

$$c_{eff2} = \rho \times c_p = 1 \times 10 = 10 \text{ mm}$$

Aire efficace des raidisseurs du bord :

$$A_{s2} = 2(t (b_{e1} + c_{eff}))$$

$$A_{s2} = 2(1.96(32.66 + 10)) = 83.81 \text{ mm}^2$$

$$A_{s1} = A_{s2}$$

Deuxième étape:

Utilisation de la section transversale efficace initiale du raidisseur pour déterminer le coefficient de réduction, en tenant compte des effets du maintien élastique continu.

La contrainte critique de flambement élastique du raidisseur de bord est:

$$\sigma_{cr, s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s}$$

où :

K est la rigidité du support élastique par unité de longueur,

I_s est le moment d'inertie de la section efficace du raidisseur.

Pour le raidisseur du bord supérieur :

La rigidité du support élastique est :

$$k = \left(\frac{Et^2}{4(1 - \nu^2)} \frac{1}{bp^2 hp + b1^3 + 0.5 b1 b2 hp kf} \right)$$

avec:

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

$$b_1 = bp - \frac{b_{e1} \times t \times \frac{b_{e1}}{2}}{(b_{e1} + c_{eff}) \times t} = 92 - \frac{32.66 \times 1.96 \times \frac{32.66}{2}}{(32.66 + 10) \times 1.96} = 79.5 \text{ mm}$$

$$b_1 = 79.5 \text{ mm}$$

b_2 – distance entre la jonction âme-semelle et le centre de gravité de l'aire efficace du raidisseur (semelle inférieure)

$$b_2 = b_p - \frac{be_1 \times t \times \frac{be_1}{2}}{(be_1 + c_{eff}) \times t} = 92 - \frac{32.66 \times 1.96 \times \frac{32.66}{2}}{(32.66 + 10) \times 1.96} = 79.5 \text{ mm}$$

$$b_2 = 79.5 \text{ mm}$$

$$K_f = \frac{A_{s2}}{A_{s1}} = \frac{83.81}{83.81} = 1$$

Le moment d'inertie efficace:

$$I_{s1} = \frac{be_{12} \times t^3}{12} + \frac{C_{eff}^3 \times t}{12} + be_{12} \times t \left[\frac{C_{eff}^2}{2(be_{12} + C_{eff})} \right]^2 + C_{eff} \times t \left[\frac{C_{eff}}{2} - \left[\frac{C_{eff}^2}{2(be_{12} + C_{eff})} \right] \right]^2$$

$$I_{s1} = \frac{32.66 \times 1.96^3}{12} + \frac{10^3 \times 1.96}{12} + 32.66 \times 1.96 \left[\frac{10^2}{2(32.66 + 10)} \right]^2 + 10 \times 1.96 \left[\frac{10}{2} - \left[\frac{10^2}{2(32.66 + 10)} \right] \right]^2 = 471.51 \text{ mm}^4$$

$$I_{s1} = 471.51 \text{ mm}^4$$

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

Donc la rigidité du support élastique est :

$$K_1 = \frac{2.1 \times 10^5 \times 1.96^3}{4(1 - 0.3^2)} \times \frac{1}{92 \times 50 + 79.5^3 + 0.5 \times 79.5 \times 79.5 \times 50 \times 0}$$

$$K_1 = 2.39$$

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

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} = \frac{2\sqrt{2.39 \times 2.1 \times 10^5 \times 471.51}}{83.81} = 116.08 \text{ MPa}$$

Coefficient de réduction de l'épaisseur γ_d pour le raidisseur de bord

Pour le raidisseur du bord supérieur :

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{Fy_b}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{355}{116.08}} = 1.37$$

Le coefficient de réduction sera :

$$\text{Si } \bar{\lambda}_d \leq 0.65 \quad \chi_d = 0.1$$

$$\text{Si } 0.65 < \bar{\lambda}_d < 1.38 \quad \chi_d = 1.47 - (0.723 \times \bar{\lambda}_d)$$

$$\text{Si } \bar{\lambda}_d \geq 1.38 \quad \chi_d = \frac{0.66}{\bar{\lambda}_d}$$

Donc

$$\chi_d = 1.47 - (0.723 \times \bar{\lambda}_d)$$

$$\chi_d = 1.47 - (0.723 \times 1.37) = 0.48$$

Troisième étape :

Etant donné que le coefficient de réduction pour le flambement du raidisseur est $\chi_d < 1$, on peut procéder par itérations pour en affiner la valeur. Les itérations sont exécutées sur la base des valeurs modifiées de ρ ; lesquelles sont obtenues en utilisant :

$$\sigma_{com,Ed,i} = \frac{3 f_{yb}}{\gamma m_0}$$

et

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \sqrt{\chi_d}$$

Pour le raidisseur du bord inférieur :

L'élanement réduit:

➤ Pour la semelle supérieur :

$$\lambda_{p,red1} = \lambda_p \sqrt{\chi_d} = 0.8 \sqrt{0.48} = 0.55$$

$$\rho_l = \frac{\lambda_{bp1} - 0.055(3 + \psi)}{\lambda_{bp1}^2} = \frac{\lambda_{bp1} - 0.055(3 + \psi)}{\lambda_{bp1}^2} = 0.56 < 1$$

Largeur efficace est:

$$b_{eff1} = \rho_{bp} \times b_p = 0.56 \times 92 = 51.52 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0.5 \times b_{eff} = 25.76 \text{ mm}$$

➤ Pour semelle inférieur :

$$\lambda_{p,red1} = \lambda_p \sqrt{\chi_d} = 0.8 \sqrt{0.48} = 0.55$$

$$\rho_l = \frac{\lambda b p_1 - 0.055(3 + \psi)}{\lambda b p_1^2} = \frac{\lambda b p_1 - 0.055(3 + \psi)}{\lambda b p_1^2} = 0.56 < 1$$

Largeur efficace est:

$$b_{\text{eff1}} = \rho_{b_p} \times b_p = 0.56 \times 92 = 51.52 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0.5 \times b_{\text{eff}} = 25.76 \text{ mm}$$

Pour le bord tombé supérieur:

L'élanement réduit:

$$\lambda_{p,\text{red}} = \lambda_p \sqrt{\chi_d} = 0.24 \sqrt{0.48} = 0.16$$

L'élanement réduit est trop petit donc aucune réduction ne sera faite ici $\rho = 1$

$$c_{\text{eff}} = \rho \times c_p = 1 \times 10 = 10 \text{ mm}$$

✓ **Aire efficace des raidisseurs des bord supérieur:**

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

$$A_{s1} = 1.96(25.76 + 10) = 67.58 \text{ mm}^2$$

Pour le bord tombé inférieur:

$$\lambda_{p,\text{red}} = \lambda_p \sqrt{\chi_d} = 0.24 \sqrt{0.48} = 0.16$$

L'élanement réduit est trop petit donc aucune réduction ne sera faite ici $\rho = 1$

$$c_{\text{eff}} = \rho \times c_p = 1 \times 10 = 10 \text{ mm}$$

✓ **Aire efficace des raidisseurs des bords inférieurs :**

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

$$A_{s2} = 1.96(25.76 + 10) = 67.58 \text{ mm}^2$$

Propriétés de la section efficace de l'âme

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

$$hc = \left[\frac{\left(cp \times \left(hp - \frac{cp}{2} \right) \right) + \left(\frac{hp^2}{2} \right) + (bp_2 \times hp) + 2 \left(c_{\text{eff}}^2 \times \frac{xd}{2} \right)}{cp + bp + be + hp + 2(be + c_{\text{eff}}) \times xd} \right]$$

$$hc = 30.82 \text{ mm}$$

$$\Psi = \frac{hc - hp}{hc} = \frac{30.82 - 50}{30.82}$$

$$\Psi = -0.62$$

Le coefficient de flambement :

$$k\sigma = 7,81 - 6,29\Psi + 9,78 \Psi^2$$

$$k\sigma = 7,81 - 6,29(-0.62) + 9,78 (-0.62)^2$$

$$k\sigma = 15.45$$

$$\lambda_{bp} = \frac{\frac{hp}{t}}{28.4 \times \varepsilon \times \sqrt{\quad}} = \frac{\frac{50}{1.96}}{28.4 \times 1.03 \times \sqrt{15.45}} = 0.22 < 0.673$$

donc

$$p = 1$$

La largeur efficace de la zone comprimée de l'âme est :

$$h_{eff} = p \times hc = 1 \times 30.82 = 30.82$$

A proximité de la semelle comprimée :

$$H_{e1} = 0.4 \times h_{eff} = 0.4 \times 30.82 = 12.32 \text{ mm}$$

A proximité de l'axe neutre :

$$h_{e2} = 0.6 \times h_{eff} = 0.6 \times 30.82 = 18.5 \text{ mm}$$

La largeur efficace de l'âme est :

A proximité de la semelle comprimée :

$$h_1 = h_{e1} = 12.32 \text{ mm}$$

A proximité de la semelle tendue :

$$h_2 = hp - (hc - h_{e2}) = 50 - (30.82 - 18.5) = 201.64 \text{ mm}$$

Aire de la section transversale efficace :

$$A_{eff} = t [cp + b_{p2} + h_1 + h_2 + b_{e1} + 2(b_{e2} + c_{eff})\chi d]$$

$$A_{eff} = 1.96 \times [10 + 50 + 12.32 + 37.68 + 24.84 + (24.84 + 10) \times 0.48]$$

$$A_{eff} = 297.06 \text{ mm}^2$$

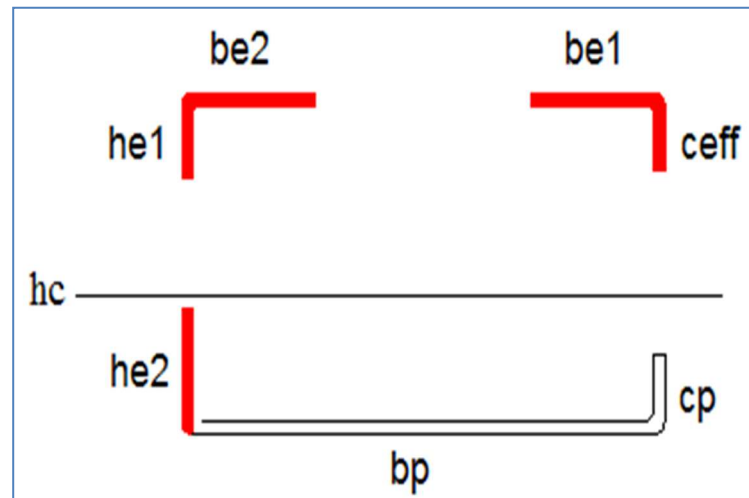


Figure II-12 : Section efficace du profilé type C.

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

$$Z_c = \left[\frac{t \left(C_p \times \left(h_p - \frac{c_p}{2} \right) \right) + b_{p2} \times h_p + h_p \left(h_p - \frac{h_2}{2} \right) + \frac{h_1^2}{2} + (c_{eff}^2 \times \frac{x_d}{2})}{A_{eff}} \right]$$

$$Z_c = 35.55 \text{ mm}$$

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

$$Z_t = h_p - z_c = 50 - 35.55 = 14.45 \text{ mm}$$

Moment d'inertie :

$$I_{eff} = \left(\frac{h_1^3 \times t}{12} \right) + \left(\frac{h_2^3 \times t}{12} \right) + \left(\frac{b_{p2} \times t^3}{12} \right) + \left(\frac{c_p^3 \times t}{12} \right) + \left(\frac{b_{e1} \times t^3}{12} \right) + \left(\frac{(t \times x_d)^3 \times b_{e2}}{12} \right) +$$

$$\times \left(\frac{C_{eff}^3 \times x_d \times t}{12} \right) + \left(c_p \times t \left(z_t - \frac{c_p}{2} \right)^2 \right) + \left(b_{p2} \times t \times z_t^2 \right) + \left(h_p \times t \left(z_t - \frac{h_2}{2} \right)^2 \right) +$$

$$\left(h_1 \times t \left(z_c - \frac{h_1}{2} \right)^2 \right) + b_{e1} \times t \times z_c^2 + \left(b_{e2} \times t \times x_d \times z_c^2 \right) + c_{eff} \times (x_d \times t) \times \left(z_c + \frac{c_{eff}}{2} \right)^2$$

$$I_{eff} = 17.0887 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Module de résistance de la section efficace :

par rapport à la semelle comprimée :

$$W_{eff_{y.c}} = \frac{I_{eff}}{Z_c}$$

$$W_{eff,y,c} = \frac{170887}{35.55} = 4807 \text{mm}^3$$

par rapport à la semelle tendue :

$$W_{eff,y,t} = \frac{I_{eff}}{Z_t}$$

$$W_{eff,y,t} = \frac{170887}{14.45} = 11826.13 \text{mm}^3$$

II-6.5 Vérification de la résistance à la flexion:

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

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,y} \times f_{yb}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{11826.13 \times 10^{-9} \times 220 \times 10^3}{1} = 2.6 \text{KN.m}$$

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

Pour un porté de 1 m

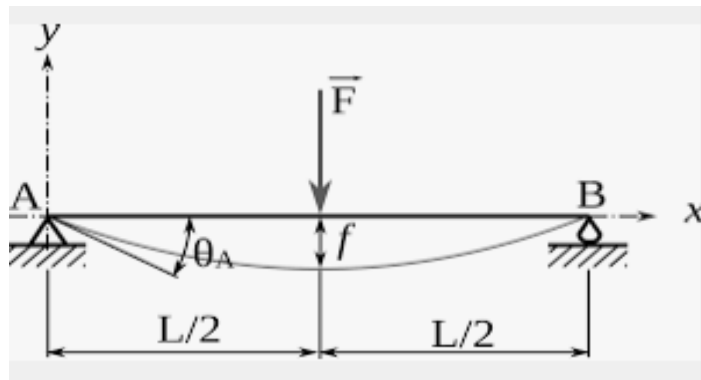


Figure II-13 :Poutre soumis à la flexion trois points

$$M_{Ed} = \frac{q \times L}{4}$$

$$M_{Ed} = \frac{10 \times 1}{4} = 2.5 \text{kN.m}$$

Vérification de la résistance à la flexion :

$$\frac{M_{ed}}{M_{crd}} = \frac{2.5}{2.6} = 0.96 < 1 \text{ vérifiée}$$

-Pour la vérification du modèle Ω les retombés sont dans la zone tendue, donc la vérification est toujours comme une section (C)

II-7.Conclusion :

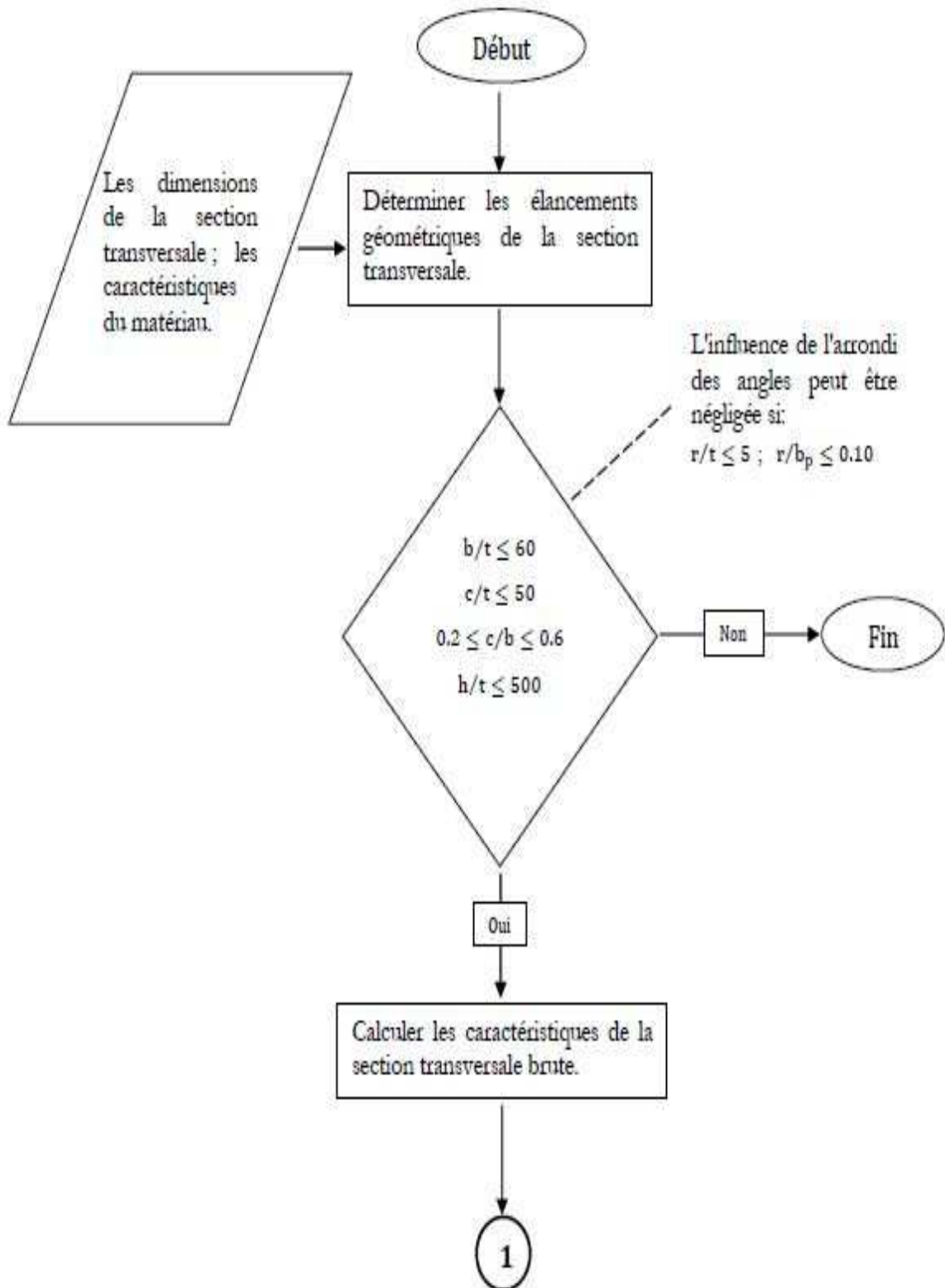
Pour comprendre le phénomène d'instabilité des éléments formés à froid, on a recours à des codes de calcul, le plus utilisé, à savoir le code européen (Eurocode), dans la philosophie de calcul de ce type de profilés repose sur le principe de la largeur efficace.

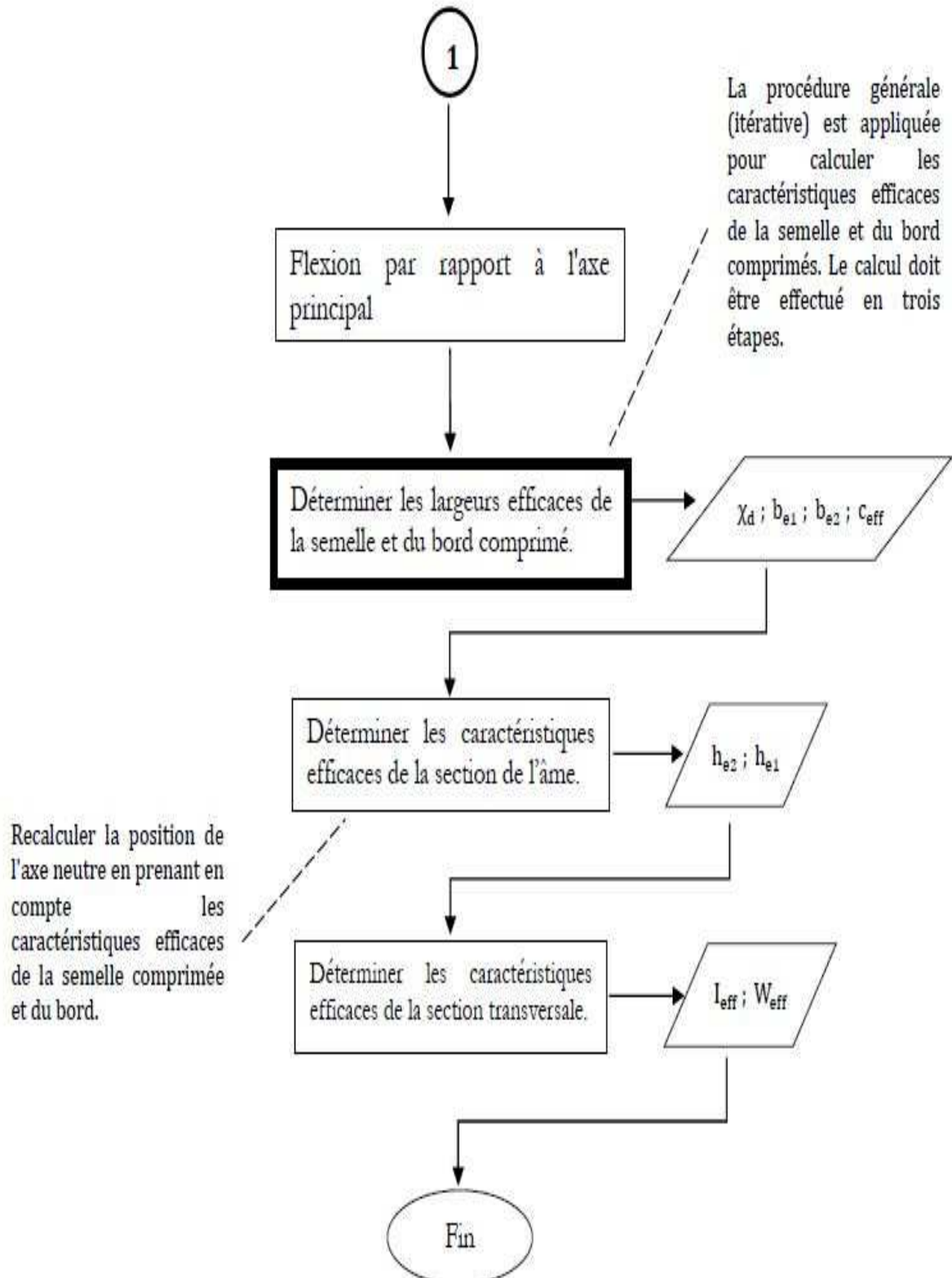
Ce principe constitue actuellement la base de la plupart des codes de calcul des profilés minces formés à froid.

Concernant l'Eurocode, la procédure de calcul des profilés laminés à chaud est utilisée pour les profilés formés à froid, sauf que ça nécessite la détermination de la section efficace, chose qui n'est pas simple. Pour la validation de la théorie une étude numérique s'avère nécessaires.

Organigramme de calcul des caractéristiques efficaces :

L'organigramme ci-dessous montre la méthode de calcul des propriétés de la section efficace suivant l'Eurocode d'un profilé en C à bords tombés formé à froid sollicité soit en flexion soit en compression.





CHAPITRE III :

Étude numérique des profilés formés à froids de type C et Ω sous ABAQUS

III-1.Introduction

Les éléments formés à froid sont couramment utilisés comme pannes dans les ossatures en charpentes métalliques, les bardages, les montants de mur, les solives à plancher, les ponts et dans l'industrie du bâtiment etc. Cette expansion remarquable de l'utilisation des profilés formés a froid, par rapport aux profilés réalisés par laminage a chaud, et à associer aux nombreux avantages qu'ils possèdent par rapport a ces derniers. Par exemple, leur mode de Fabrication (profilage ou par pliage), permet la conception d'une très grande variété de formes de profilées. Cette facilité de produire des formes complexes permet non seulement une parfaite adéquation de la forme du profil à sa fonction, mais aussi l'obtention de sections plus résistantes du point de vue structural qui sont, en même temps, plus légères avec une moindre consommation de matériau. Cette légèreté entraine aussi d'autres importants avantages comme les facilités de manutention, de transport et de montage, ce qui rend leur utilisation plus économique. Mis a part les avantages cités jusqu'ici, il y en a d'autres comme la possibilité d'effectuer diverses opérations secondaires en même temps que le fromage tel que le perçage, le grugeage et la mise en peinture et la possibilité de fabrication à partir de feuillards déjà galvanisé, ce qui peut dispenser, en partie, des traitements spéciaux de la surface du profil afin de le protéger centre la corrosion, spécialement dans le cas des tôles minces.

Tous ces avantages peuvent être considérés comme conduisant à des réductions de poids, par optimisation des produits aux égards à la fonction de résistance, aux exigences de la construction et à la performance en matière de capacité à ouvrir un espace. Sur le marché, différentes formes de ces produits sont disponibles, les sections "C", "Z" et " Ω " sont principalement utilisés pour des charges légères et moyennes. comme les systèmes de toiture. Aujourd'hui, les profilés en acier formés à froid trouvent de nombreuses applications dans différents types d'industries, divers types d'équipement, la construction de carrosseries de voitures et de véhicules automobiles, de wagons de chemin de fer, racks de stockage, produits routiers et construction de ponts.

La résolution analytique de problèmes mécaniques ne peut se faire que dans un nombre de cas limité, cependant les méthodes numériques basées sur la discrétisation de ses problèmes, présentent une alternative très efficace, souvent utilisées dans le domaine de la mécanique pour résoudre des problèmes complexes. La méthode des éléments finis est de toutes ses méthodes de discrétisation la plus utilisée car elle peut traiter des problèmes de géométrie

complexes, elle couvre de nombreux domaines de la physique. Les moyens informatiques actuels (puissance des calculateurs, outils de visualisation et de simulation) la rendent facile à la mise en œuvre. La méthode des éléments finis est la méthode la plus utilisée actuellement, son champ d'application ne cesse de s'élargir. Le succès de la méthode est que sa formulation utilise des procédés standards qui se répètent au cours de la résolution de problèmes de nature différente. Dans cette étude nous allons traiter analytiquement puis numériquement par des simulations utilisant le code de calcul commercial ABAQUS.

Dans notre étude Le programme d'éléments finis avec le logiciel ABAUS 6.14 est utilisé pour développer un modèle d'éléments finis, qui vise à simuler le comportement et la résistance des poutres en acier formé à froid des sections ouvertes du type C et Ω (chapeau).

III-1-2.Objectif :

Le but de notre projet est faire une comparaison entre deux genres de poutres (C et Ω) soumises à des différents chargements concentrés au milieu et voir leurs comportements sous différentes conditions

III-2-1.Présentation du modèle étudié

Une analyse numérique par éléments finis est effectuée sur des poutres en acier formé à froid de forme C et Ω (chapeau), elles sont de 1m de portées et soumises à une charge statique au milieu qui varie en intensité (l'essai de flexion 3 points). Les poutres sont en acier de constructions laminées à froid (S220 selon la norme ISO4997)

Les modèles traités sont :

Modèle 1 : Une poutre en C avec arrondies(Figure III-1)

Modèle 2 : Une poutre en C sans arrondies(Figure III-2)

Modèle 3 : Une poutre en Ω avec arrondies(Figure III-3)

Modèle 4 : Une poutre en Ω sans arrondies(Figure III-4)

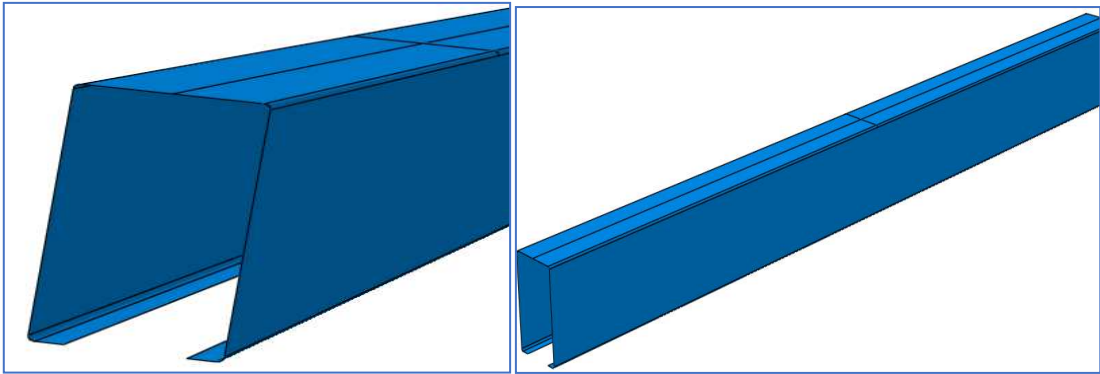


Figure III-1: Une poutre en C avec arrondies (Modèle 1)

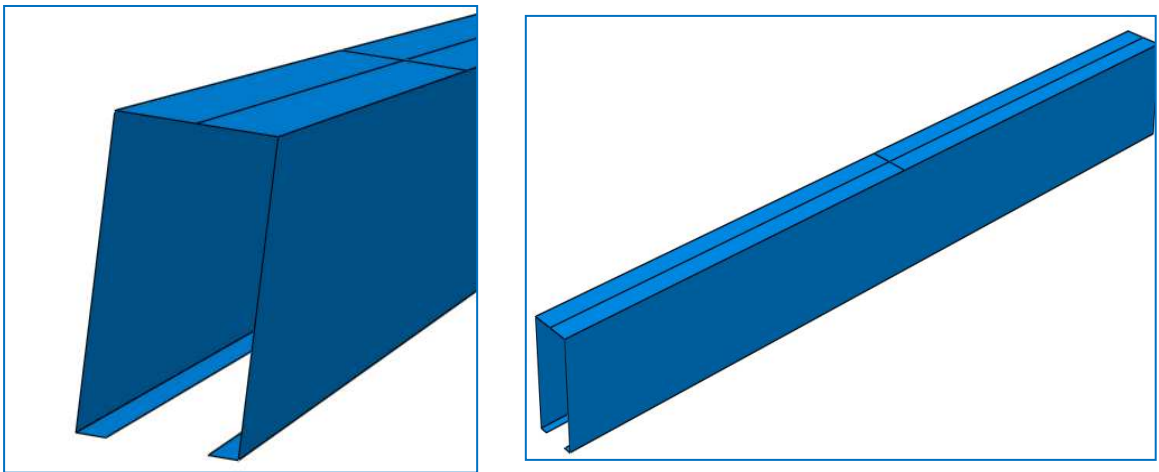


Figure III-2: Une poutre en C sans arrondies (Modèle 2)

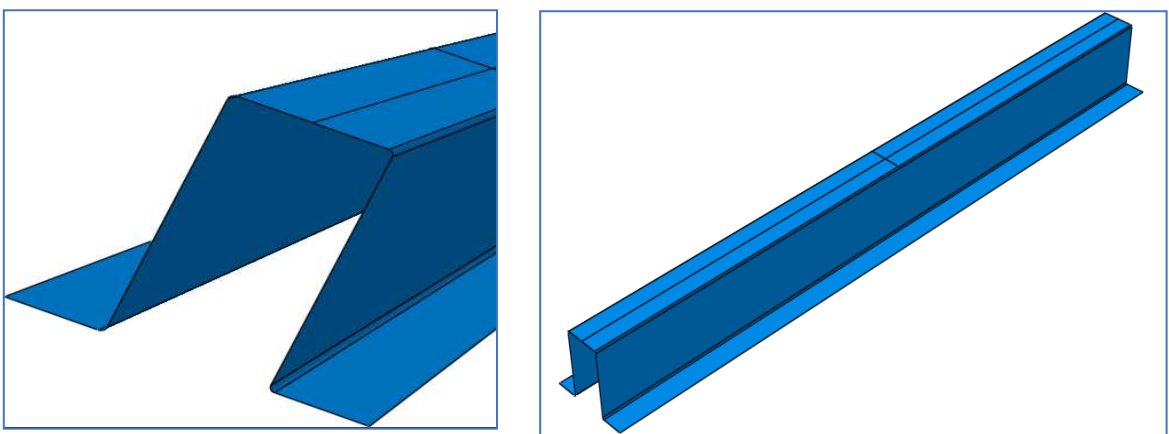


Figure III-3: Une poutre en Ω avec arrondies (Modèle 3)

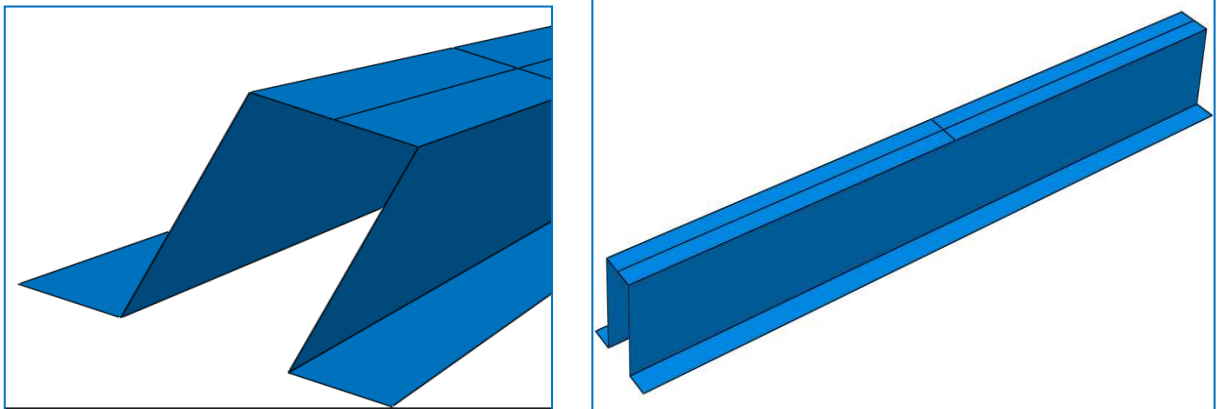


Figure III-4: Une poutre en Ω sans arrondies (Modèle 4)

III-2-2. Présentation de logiciel Abaqus :

Abaqus est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique créés 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/Explicite: 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 la non-linéarité matérielle on trouve quatre théories disponibles : Hyper - élasticité, Plasticité, Visco-Plasticité, Endommagement. Concernant la non-linéarité géométrique elle comporte : Grandes déformations, Grands déplacements, Grandes rotations, Instabilités (bifurcations, points limites).

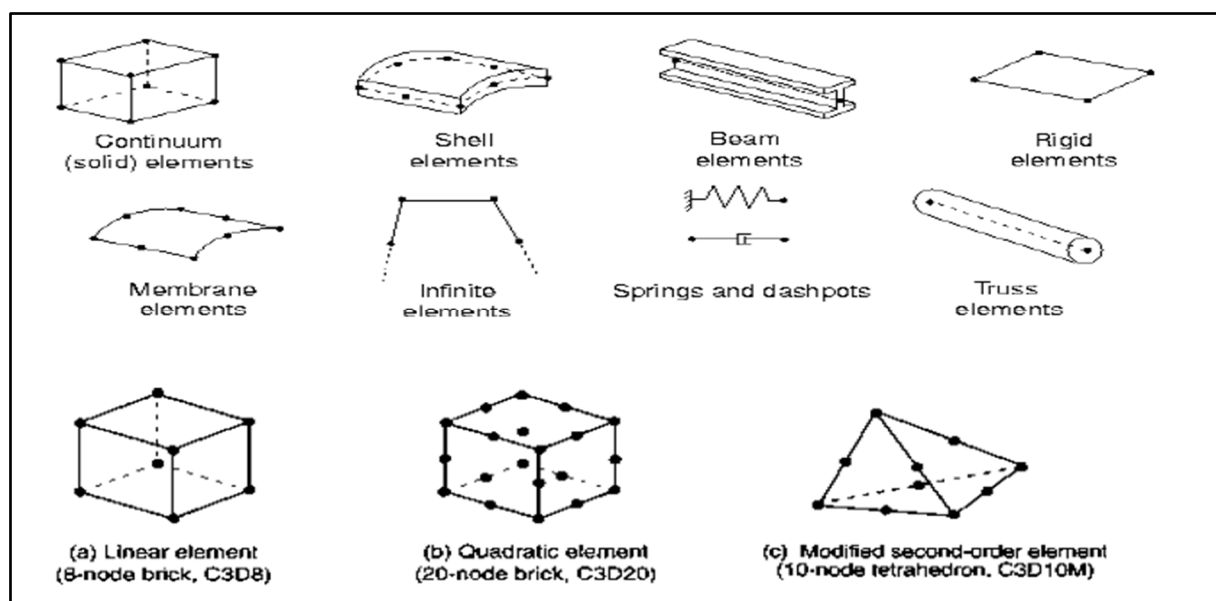


Figure III-5: Différents types d'élément de la bibliothèque d'Abaqus.


III-3. Modèle de conception de l'élément

III-3-1. 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.

Les modules

ABAQUS CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation. (Figure III-6)

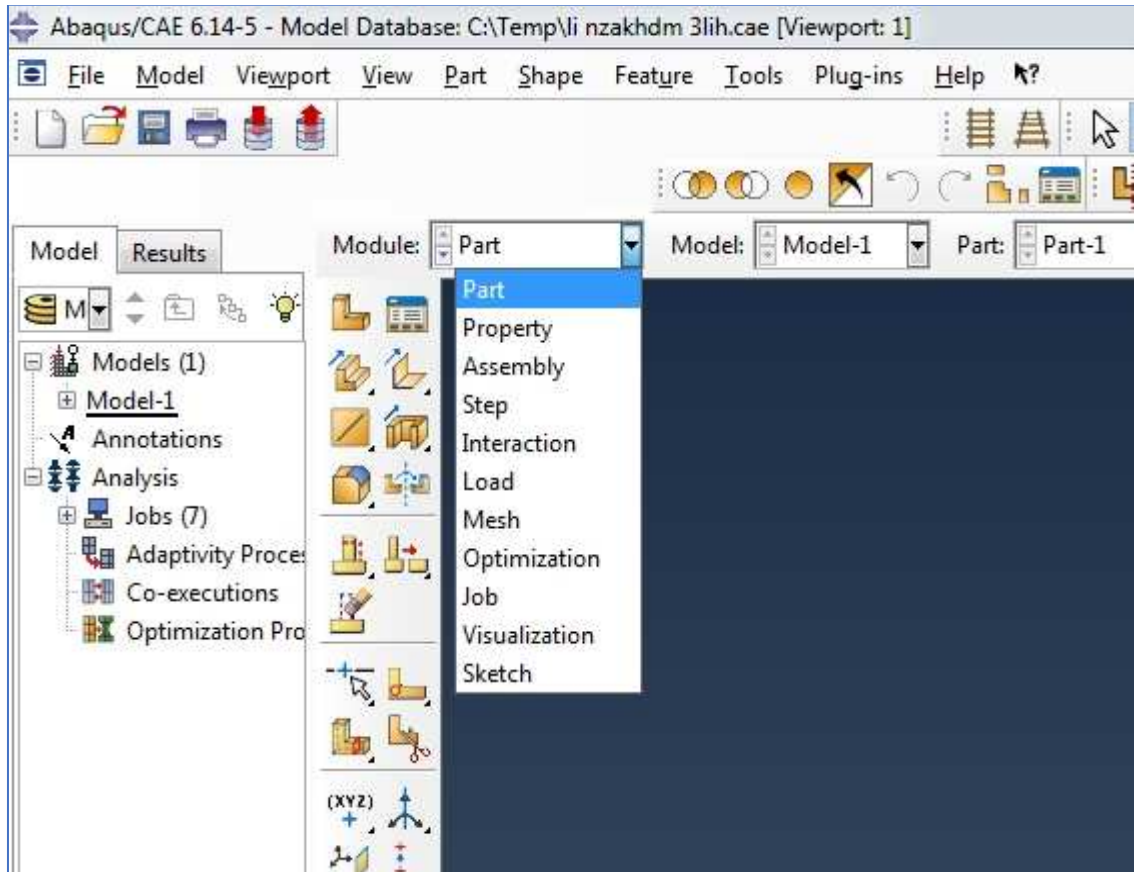


Figure III-6: Les modules intégrés dans le logiciel ABAQUS

Principe de calcul sous le logiciel ABAQUS.6.14

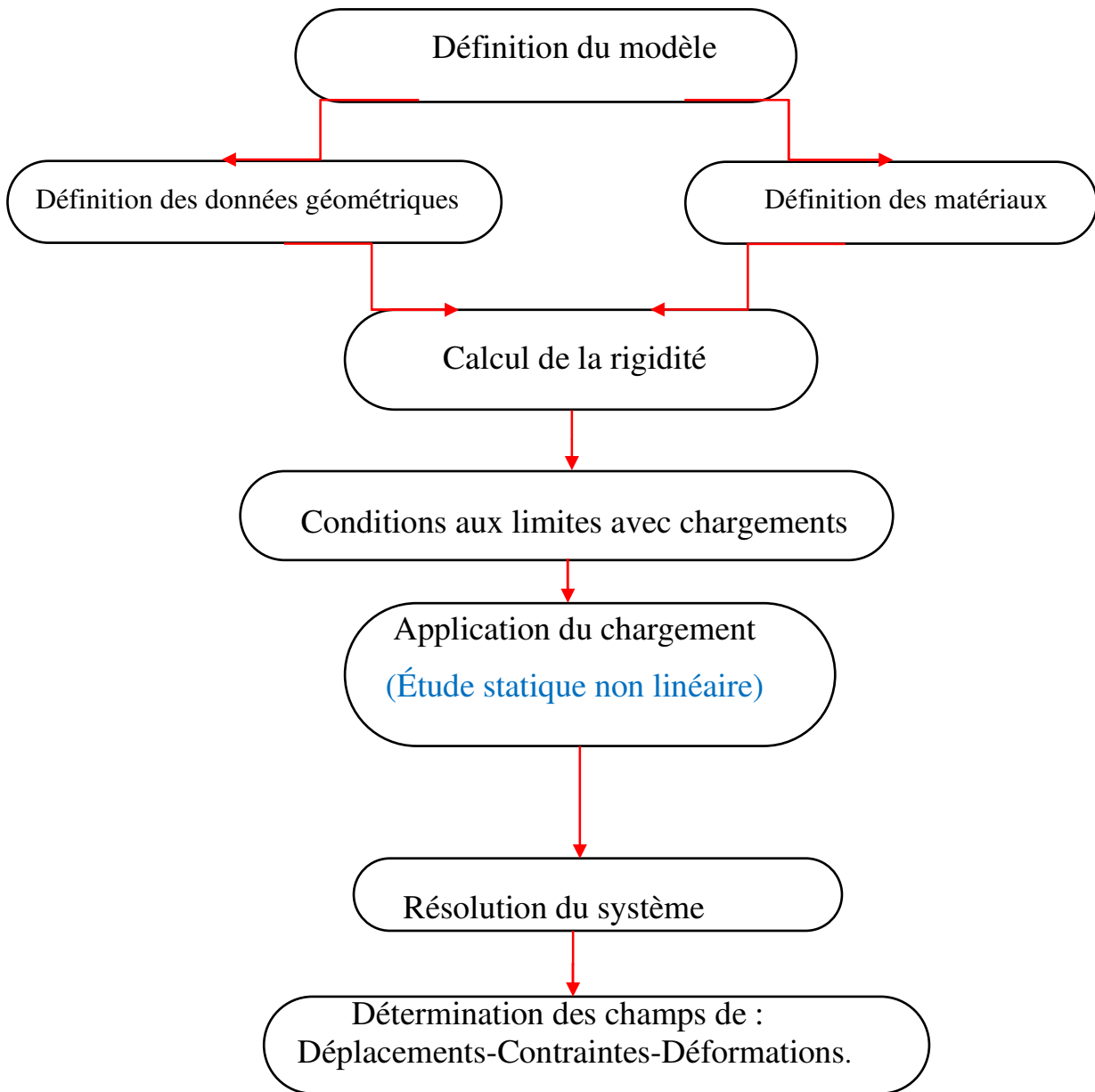


Figure III-7: Principe de calcul sous le logiciel ABAQUS.

III-4. Présentation des modèles étudiés

III-4-1. Modélisation des profilés de forme C et Ω

La figure III.8 représente des sections transversales des modèles C et Ω avec différentes dimensions utilisées dans la modélisation numérique sous Abaqus.

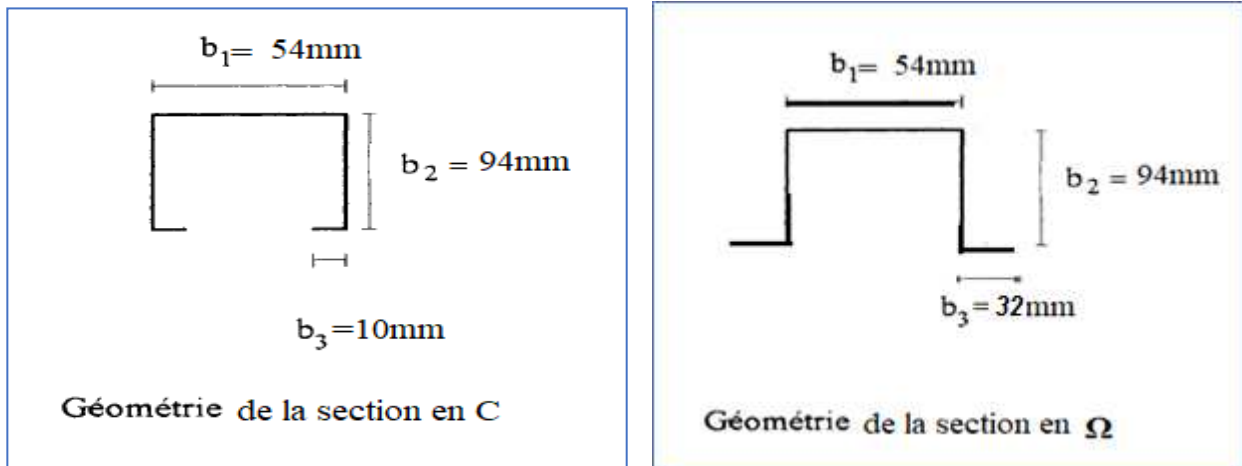


Figure III-8:Présentation des sections transversales des poutres de forme (C) et (Ω).

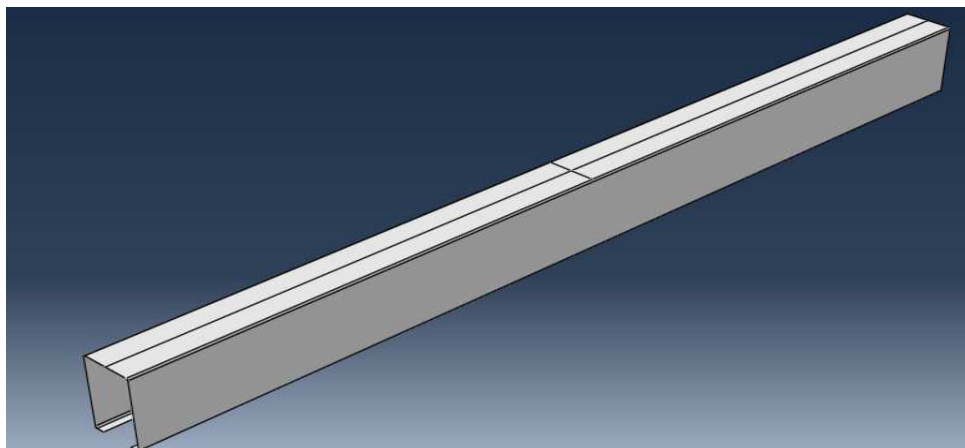


Figure III-9:La poutre (C) en 3D sous ABAQUS.

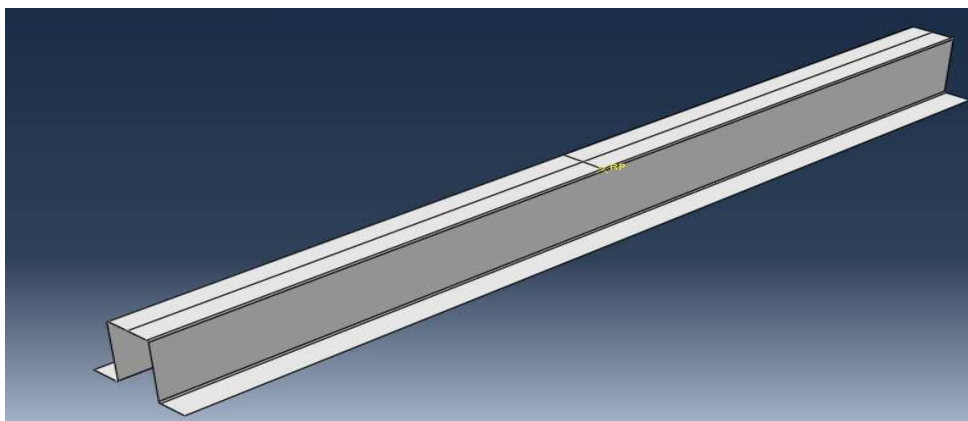


Figure III-10:La poutre (Ω) en 3D sous ABAQUS

Dans ce but, un spécimen de 1m de long et de 4mm d'épaisseur a été examiné. La section de type 'C' est obtenue à partir de la section en U en ajoutant à l'extrémité de la semelle une plaque supplémentaire de largeur.

Cette troisième plaque est destinée à augmenter la raideur de la semelle. La figure II.7 montre les différents modes de voilement d'une section en C selon le rapport de la largeur de la plaque 3 à la largeur de la plaque 1, b_3/b_1 .

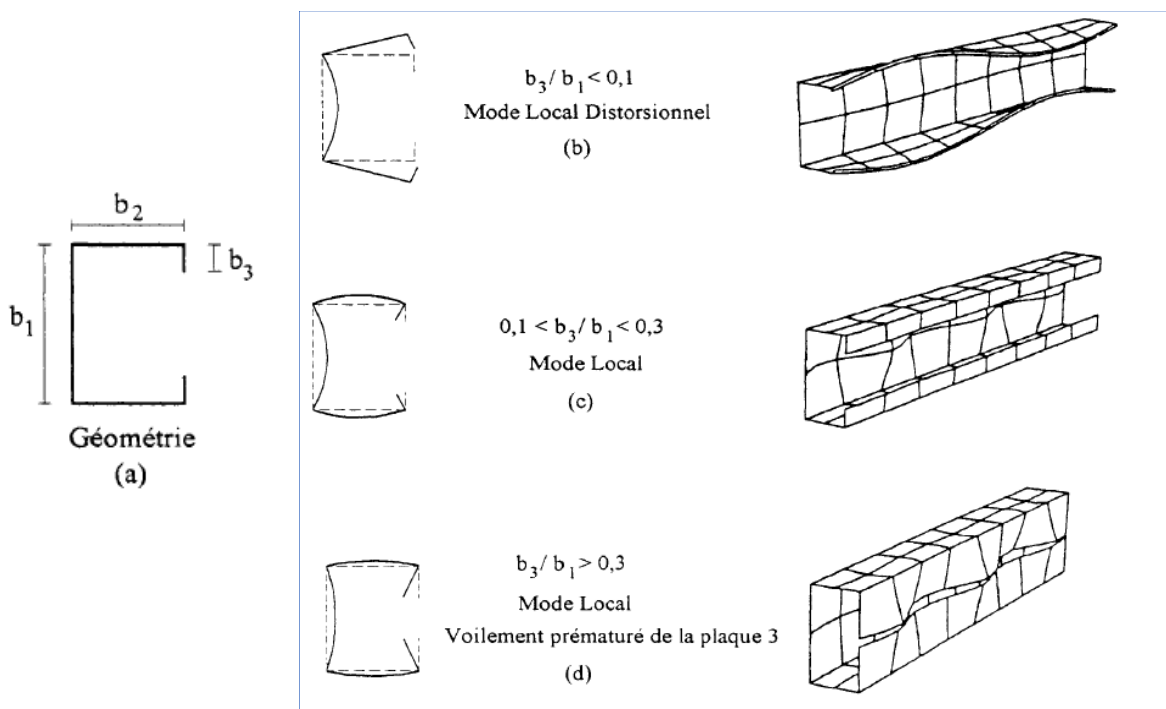


Figure III-11: La géométrie et les modes locaux de voilement d'une section en C.

III-4.2. Le module « PROPERTY ».

Le module Property permet de définir toutes les propriétés intégrées dans la modélisation. Pour notre étude les propriétés mécaniques sont identiques pour tous les modèles et ils sont présentés dans le tableau III.1

Tableau III.1. Les caractéristiques mécaniques intégrées sous ABAQUS

L'élément	Poids volumique $\gamma(\text{kg/m}^3)$	Module de Young E (MPa)	Coeff de poisson ν	Limite élastique f_y (MPa)
Acier	7850	210000	0.3	220

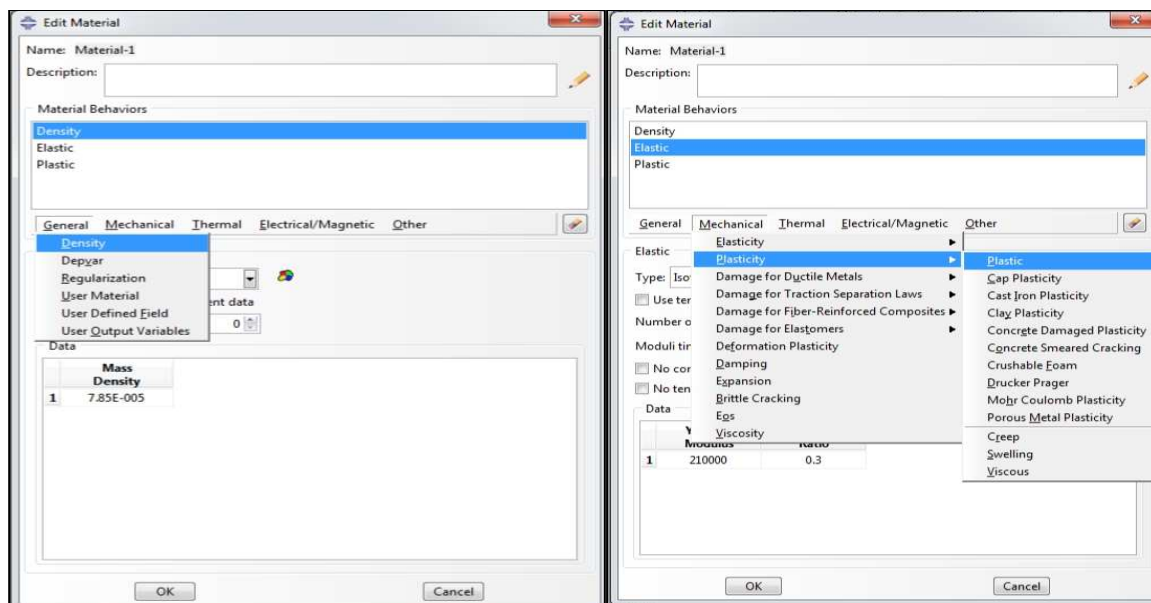


Figure III-12 : Les propriétés intégrées dans la modélisation des poutres.

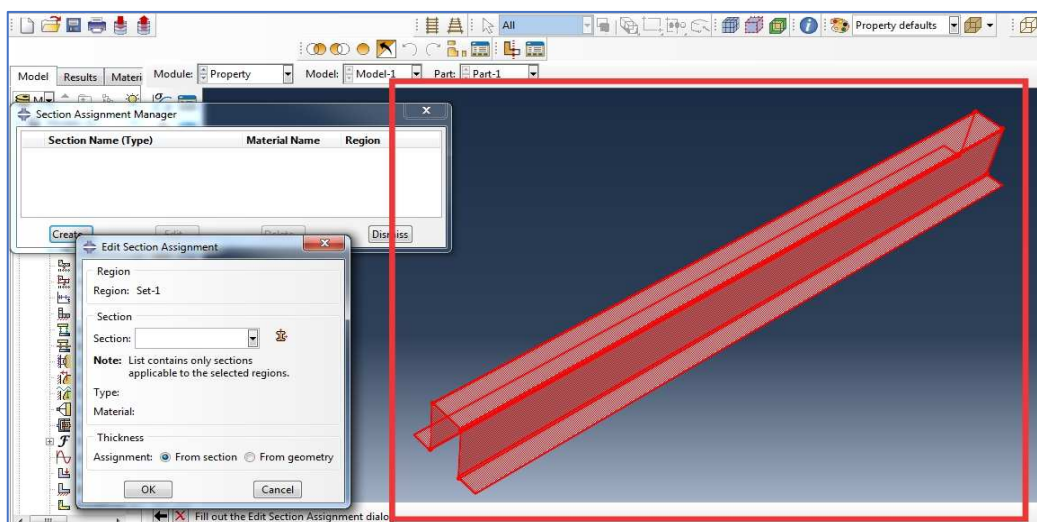


Figure III-13: Sélection de la section sous ABAQUS.

III-4.3. Le module « LOAD » .

Le module Load permet de spécifier le chargement plus les conditions aux limites (Conditions d'appuis). Les poutres sont sollicitées par une charge concentrée au milieu de la membrure supérieure et croissante en intensité à partir de la charge $P=1000$ N.

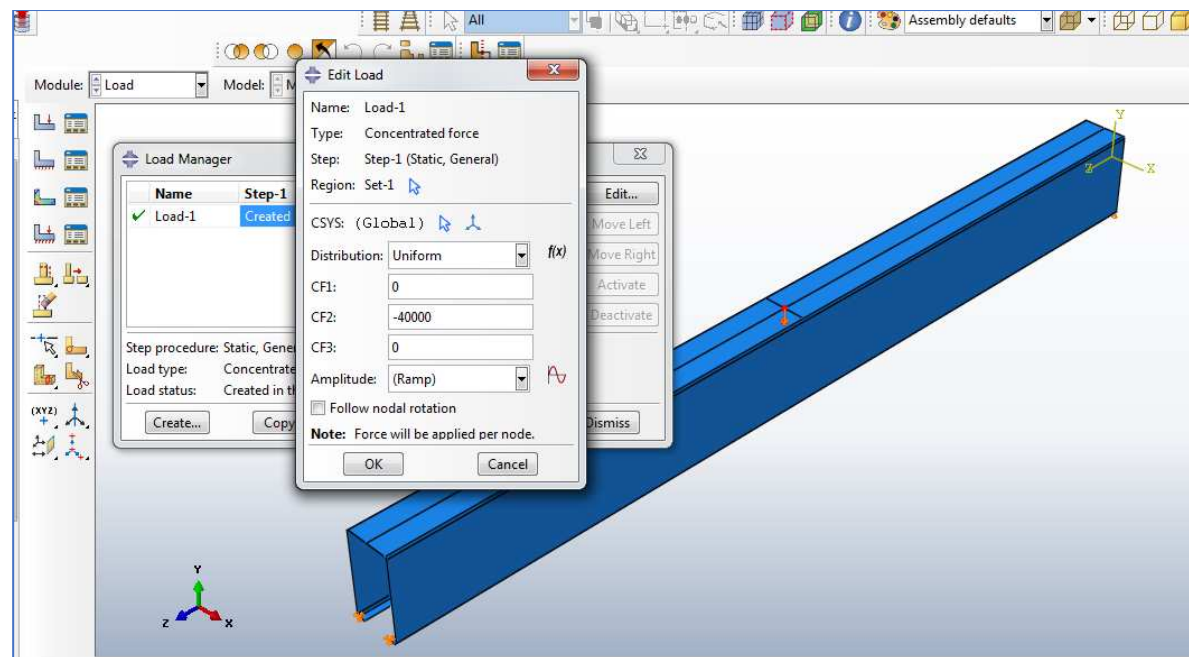


Figure III-24 : Chargement de la poutre C sous ABAQUS

Les deux poutres (C et Ω) sont simplement appuyé (système isostatique), 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 ($U_x=U_y=R_x=0$),

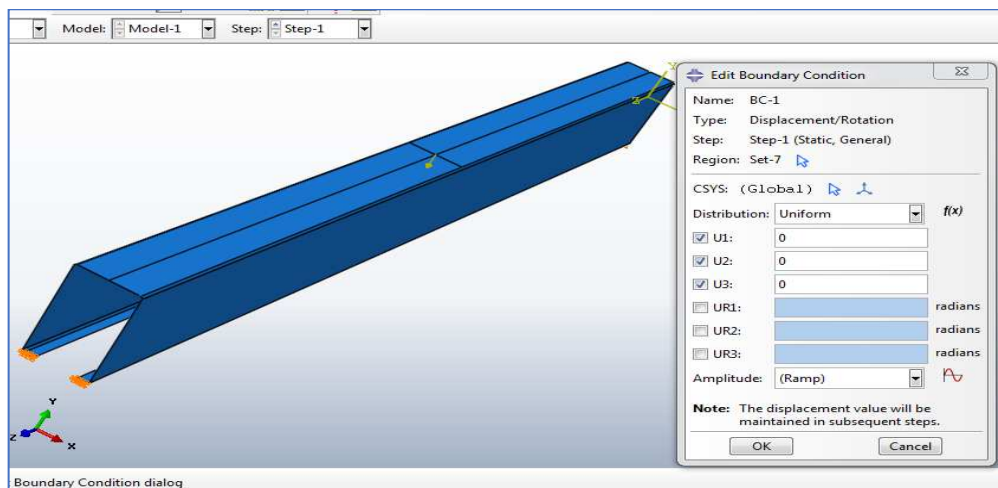


Figure III-13:Chargement et conditions aux limites de la poutre C sous ABAQUS

III-4.4. Le module « MESH » .

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini en se référant à la bibliothèque d'ABAQUS et selon une étude de cas proposé par celui-ci. Dans notre étude ; on fait appel à des éléments du type S4R : Une coque mince ou épaisse

doublement incurvée à 4 nœuds, intégration réduite avec déformation finie des membranes.
finies.

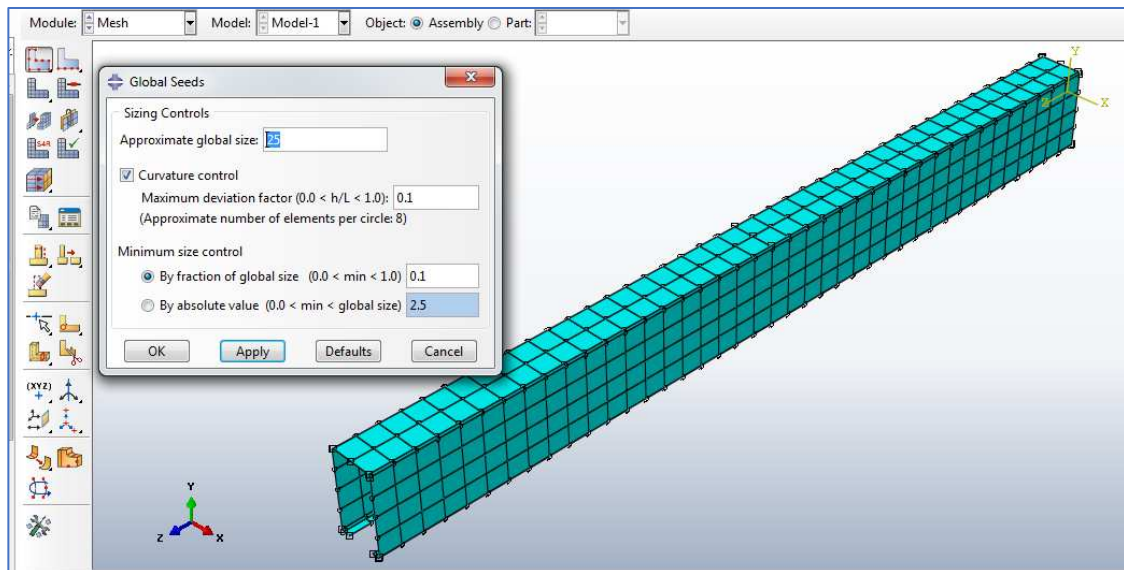


Figure III-14: Maillage des poutres avec différents âmes

III-4-5. Le module « JOB ».

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et donne toutes les résultats désirés.

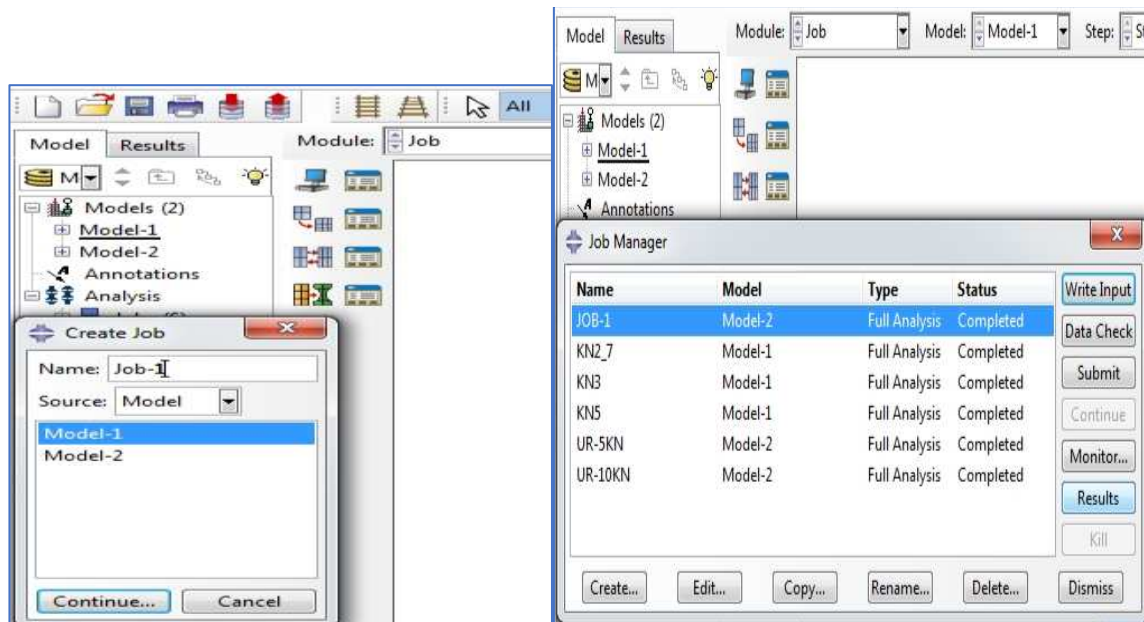


Figure III-15 : Lancement des analyses des modèles sous ABAQUS

III-4-6. Module visualization :

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats trouvés après traitement.

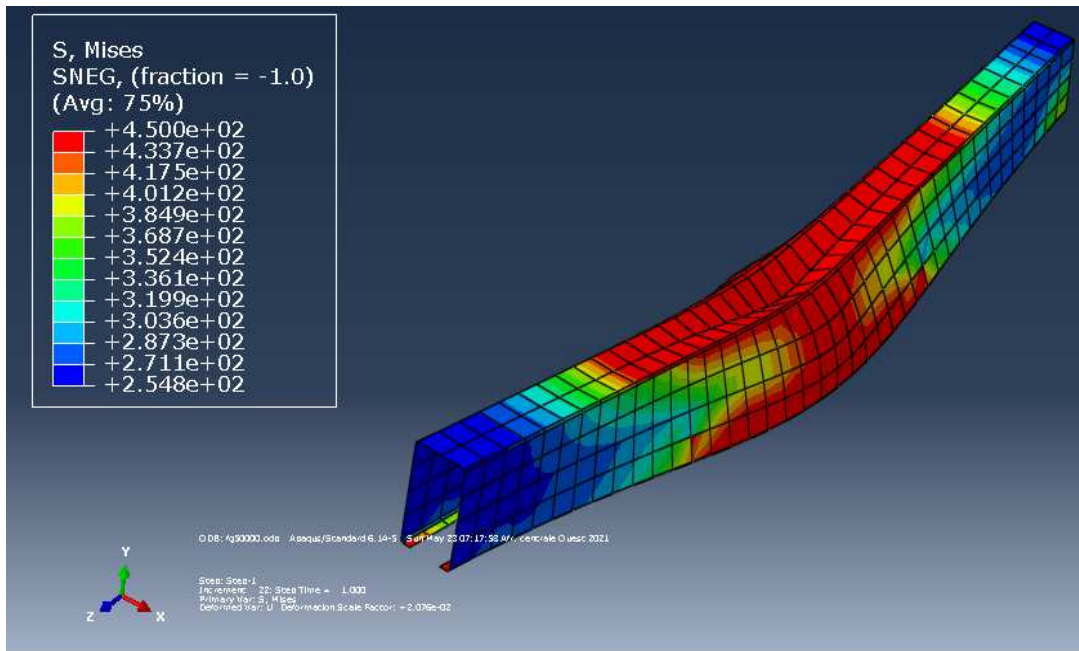


Figure III-16 : Iso valeur de l'état de contrainte de Von Mises de la poutre C sous ABAQUS.

La plaque 3 est suffisamment raide, le bord commun aux plaques 2 et 3 ne se déplace pas, caractérisant le mode voilement local illustré (Figure III.17)

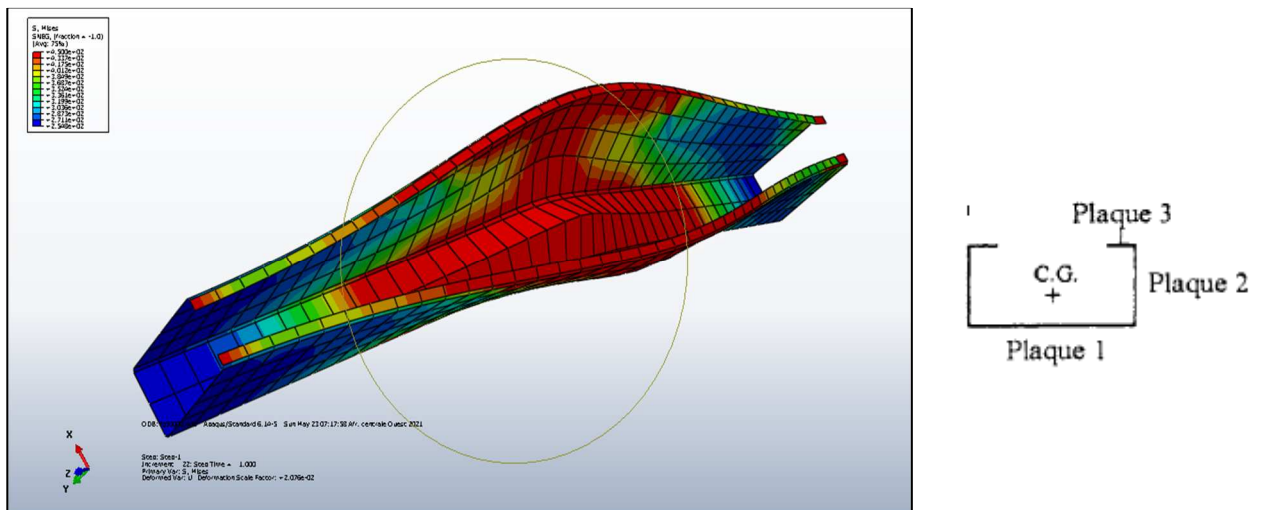


Figure III-17 : Etat de déformation la poutre C sous ABAQUS.

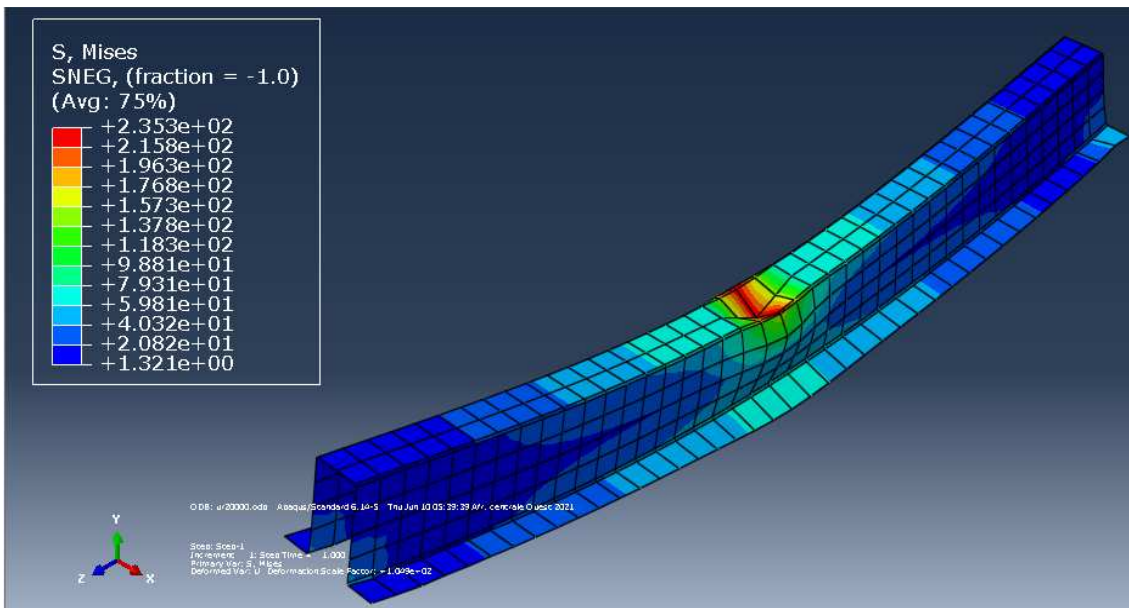


Figure III-18 : Iso valeur de l'état de contrainte de Von Mises de la poutre Ω sous ABAQUS

III-5. Comparaison numérique entre les profilés:

III-5.1 Comparaison numérique entre les profilés C et Ω :

Pour une épaisseur de 4mm et une charge concentrée de 20 kN et pour les modèles sans arrondis, on remarque une concentration des contraintes dans la zone d'application de la charge dont le profilé Ω à montrer un état moins important par rapport au modèle C. Les bords à l'extérieur ont augmenté la résistance profilée Ω avec une différence de 46% entre modèle C et Ω , (Figure III.19)

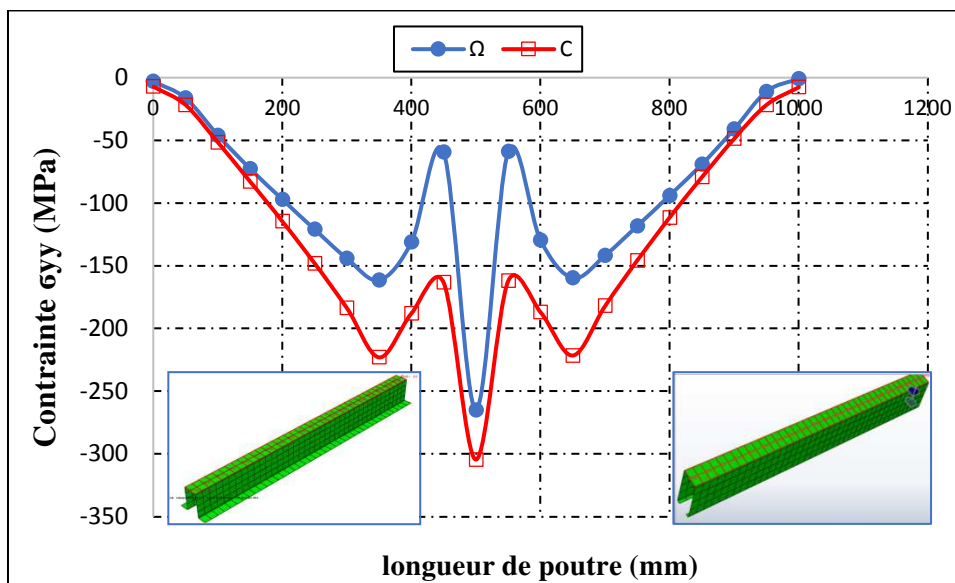


Figure III-39 : Etat de contrainte selon la longueur des poutres.

Pour une épaisseur de 4mm et une charge concentrée de 20 kN, un état de déformation important dans la zone centrale (zone d'application de la charge). Une diminution de 50% des déformations du modèle C par rapport au modèle Ω .(Figure III-20)

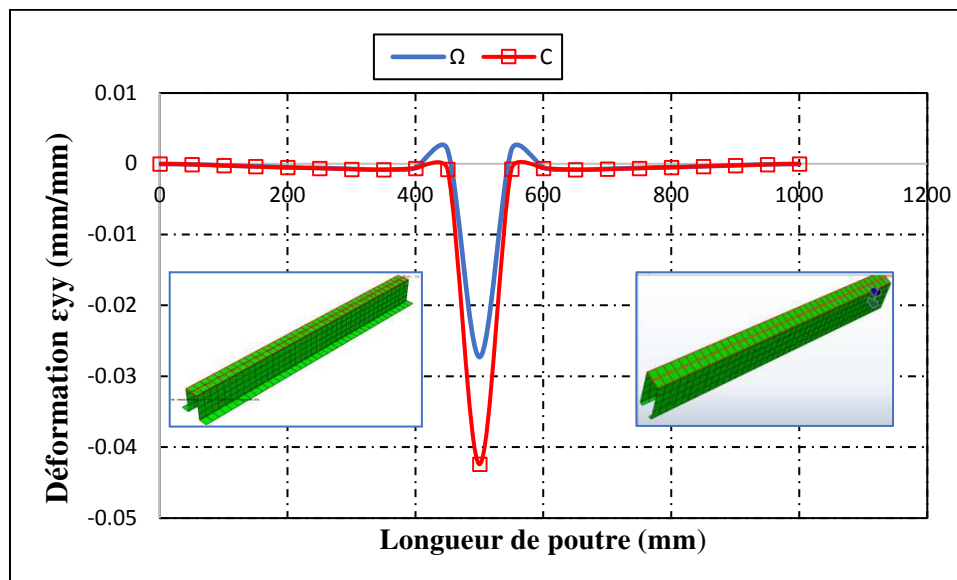


Figure III-4 : État de déformation ϵ_{yy} selon la portée des poutres étudiées.

Pour un chargement de 20 KN et pour les modèles sans arrondis, le modèle Ω à montrer un état de déplacement moins important par rapport au modèle C, une réduction de 41%. (Figure III.21)

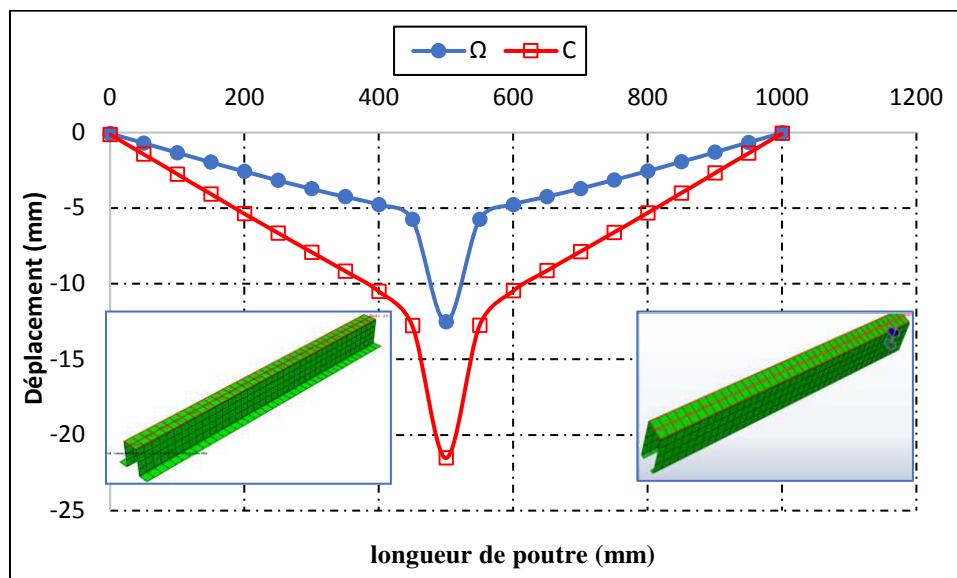


Figure III-5 : État de déplacement U_y de la poutre C sous ABAQUS

III-5-2. L'influence de rayon de courbure sur le comportement des poutres en C et Ω

a/ Pour le modèle C

Les arrondies dans les angles ont une grande influence sur le comportement des poutres en profilés formé à froid de type C. en traçant les courbes contraintes-déformation dans le point Central de la semelle supérieur et sous différents cas de chargement, comme illustre la figure III-22 on a remarqué que les deux modèles (C avec ou sans arrondi) ont montré un comportement élasto-plastique.

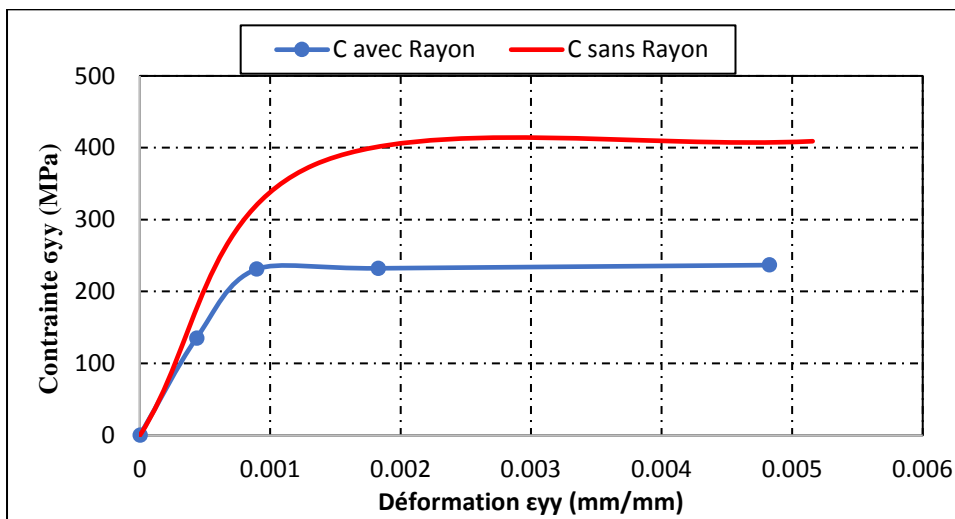


Figure III-22 : Etat de $(\sigma-\epsilon)$ de la poutre C avec et sans arrondies sous ABAQUS

De point de vue déplacement, dans l'intervalle de (0 à 10kN) les courbes du modèle avec et sans arrondies sont confondues, par contre au-delà de cette charge une divergence très remarquable. Pour une charge de 15kN une différence de 75% (entre modèles avec et sans arrondies).

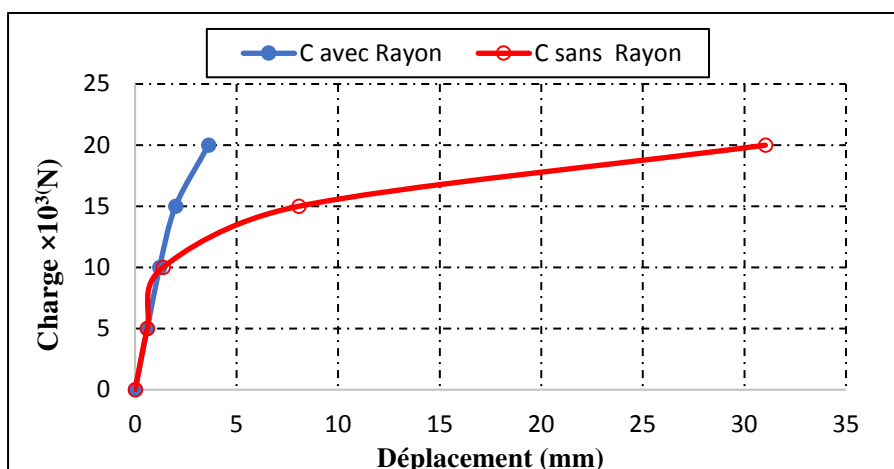


Figure III-23 : Etat de (charge-déplacement) de la poutre C avec et sans arrondies sous ABAQUS

b/ Pour le modèle Ω

La poutre avec arrondi a une marge de plasticité plus importante par rapport au modèle sans arrondies, avec une large augmentation de la limite d'élasticité.

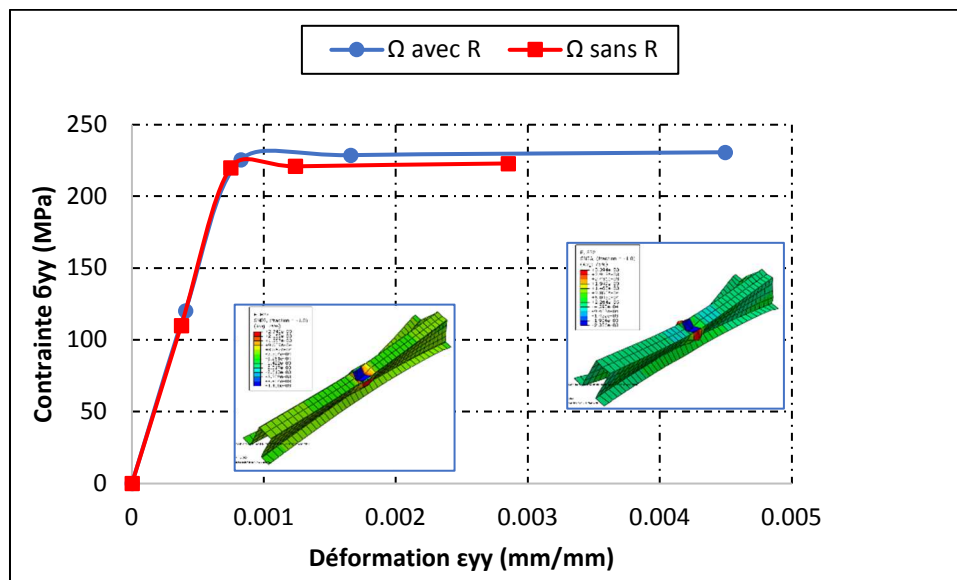


Figure III-24: État de $(\sigma-\epsilon)$ de la poutre Ω avec et sans arrondies sous ABAQUS

D'après ce graphique (Figure III.25), nous pouvons dire que la déflexion verticale de la section augmente profondément de 10 kN à 20 kN. Les arrondies ont une influence dans le modèle Ω , une différence de 22% entre modèles sans arrondies et avec arrondies.

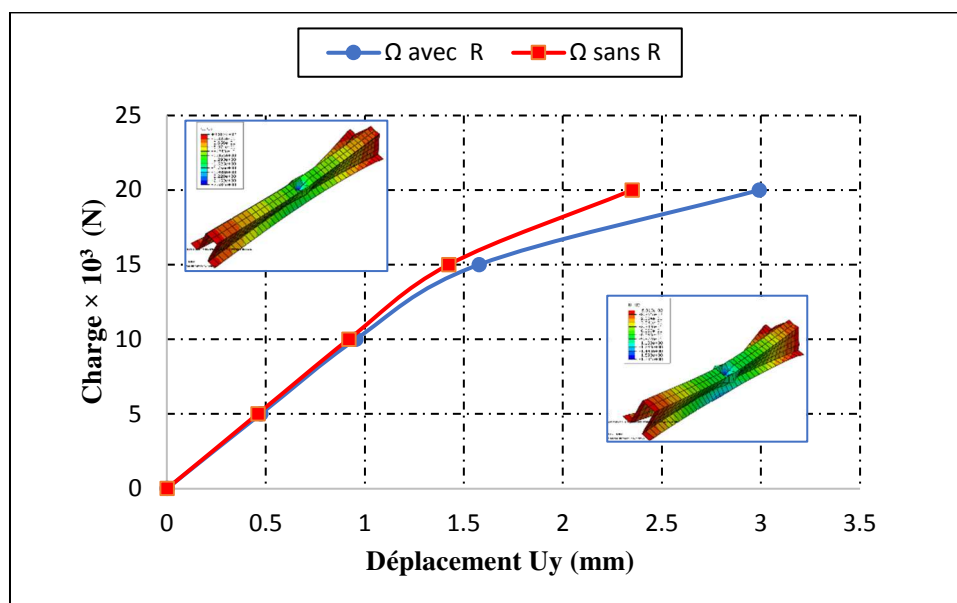


Figure III-25 : État de $(P-U_y)$ de la poutre Ω avec et sans arrondies sous ABAQUS

III-5-3. L'influence de la variation des épaisseurs dans les profilés C et Ω :

a/De point de vue contrainte :

Par l'augmentation de l'épaisseur on remarque une réduction de l'état de contrainte selon la longueur de la poutre. **A mi-travée, $ep=3mm$** une diminution de 31 % pour le modèle C et de 37 % pour Ω par rapport au modèle $ep=2mm$.

$ep=4mm$ une diminution de 45% pour le modèle C et de 47 % pour Ω par rapport au modèle $ep=2mm$.

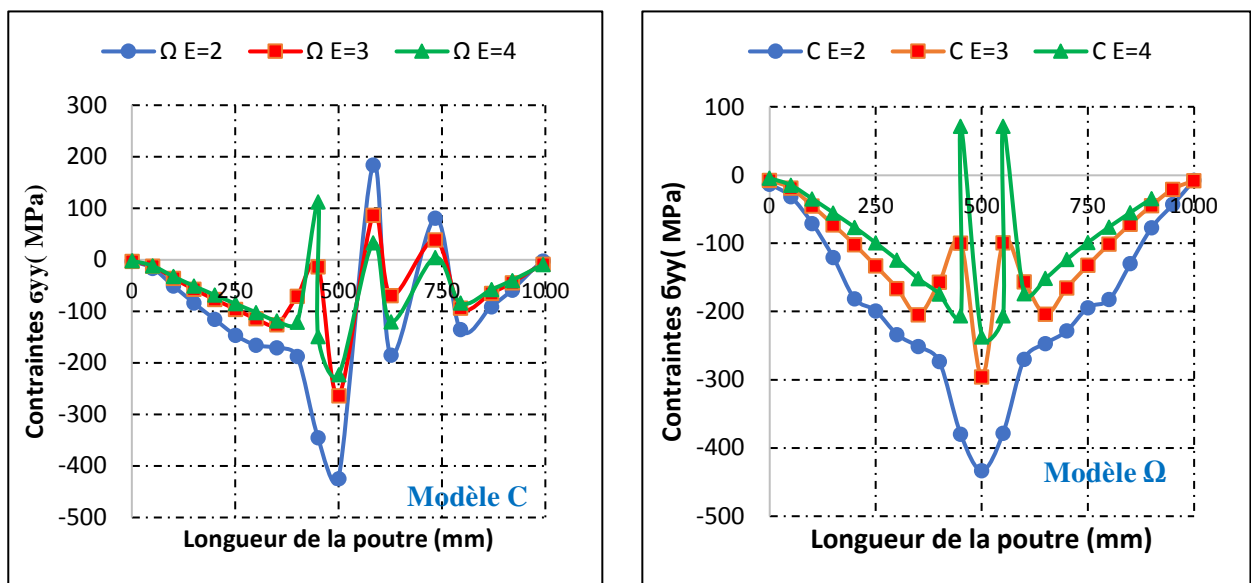


Figure III-26: État de contrainte selon la longueur des poutres avec la variation des épaisseurs dans les profilés C et Ω

b/De point de vue déplacement :

Pour une charge de 20 kN, on remarque que l'augmentation de l'épaisseur à une influence sur la diminution de l'état de déplacement selon la longueur de la poutre. **A mi-travée, $ep=3mm$** une diminution de 98 % pour le modèle C et Ω par rapport au modèle $ep=2mm$. Pour **$ep=4mm$** une diminution de 99 % pour le modèle C et Ω .

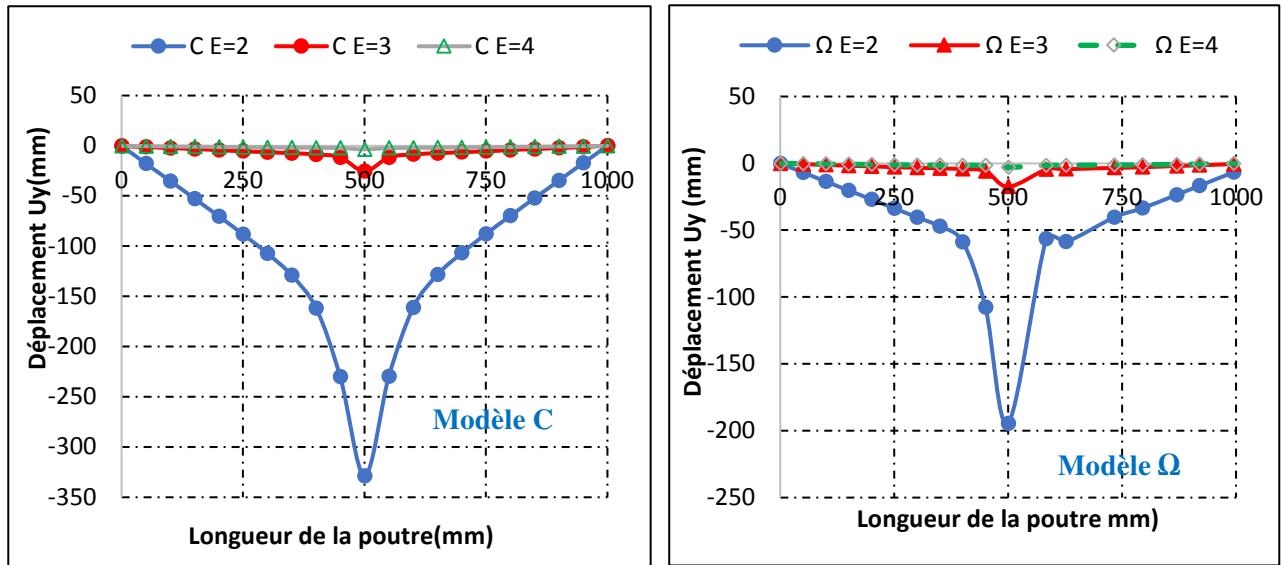


Figure III-27 : Etat de déplacement U_y selon la longueur des poutres avec la variation des épaisseurs dans les profilés C et Ω

Instabilité latérale

On remarque que la modèle C représente une instabilité latérale distorsionnel plus importante par rapport au modèle Ω , un déplacement important de 220 mm pour une charge de 50 kN. Cette distorsion comprend la rotation et la translation des lignes de pliage interne. Le modèle Ω représente un voilement locale.

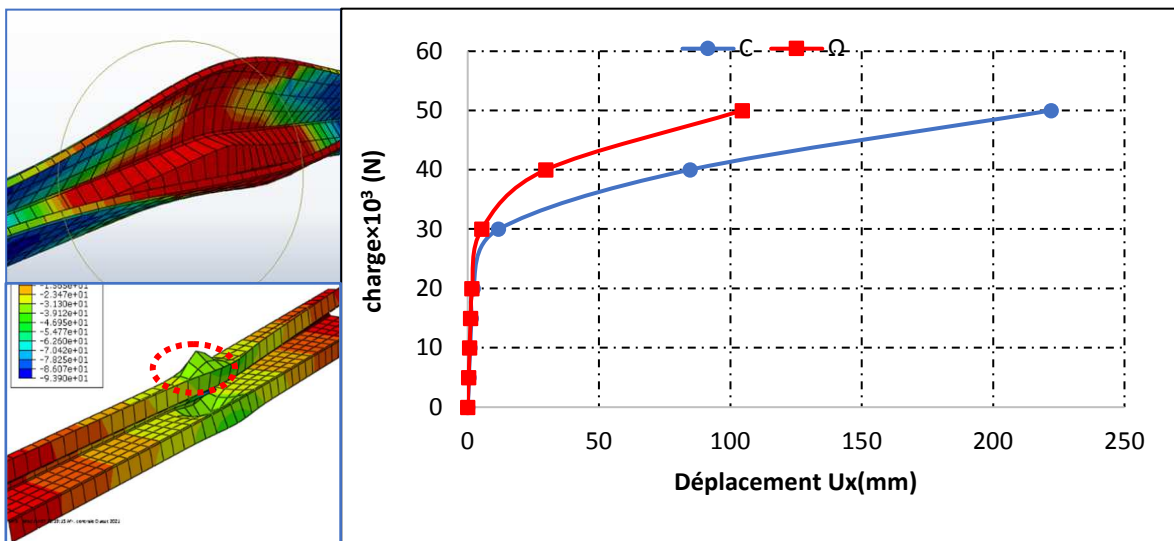


Figure III-28 : État déplacement latéral des modèles C et Ω .

III-5-4. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux :

Une étude expérimentale a été faite par les chercheurs Sivaranjani.S, Nalini.S et nnapurani.M l'année 2018, les spécimens sont de 1m de longueur et 4 mm d'épaisseur, deux sections "C" et " Ω " ont été testées et analysées pour la performance de résistance. L'essai retenu est l'essai de flexion monotone trois 03 points, les poutres ont été testées sous différents cycles de chargements et déchargements jusqu'à la ruine du spécimen. La mesure des flèches est prise au moyen des comparateurs placés au différents emplacement .



Figure III-29 : Présentation des modèles avant et après galvanisation.



Figure III-30 : Présentation du modèle C avant et après chargement.



Figure III-31 : Présentation du modèle Ω avant et après chargement.

On remarque une très bonne corrélation entre les modèles numériques et expérimentaux. Les résultats numériques et expérimentaux sont presque confondus avec un déplacement latéral de 12mm pour une charge de 30kN.

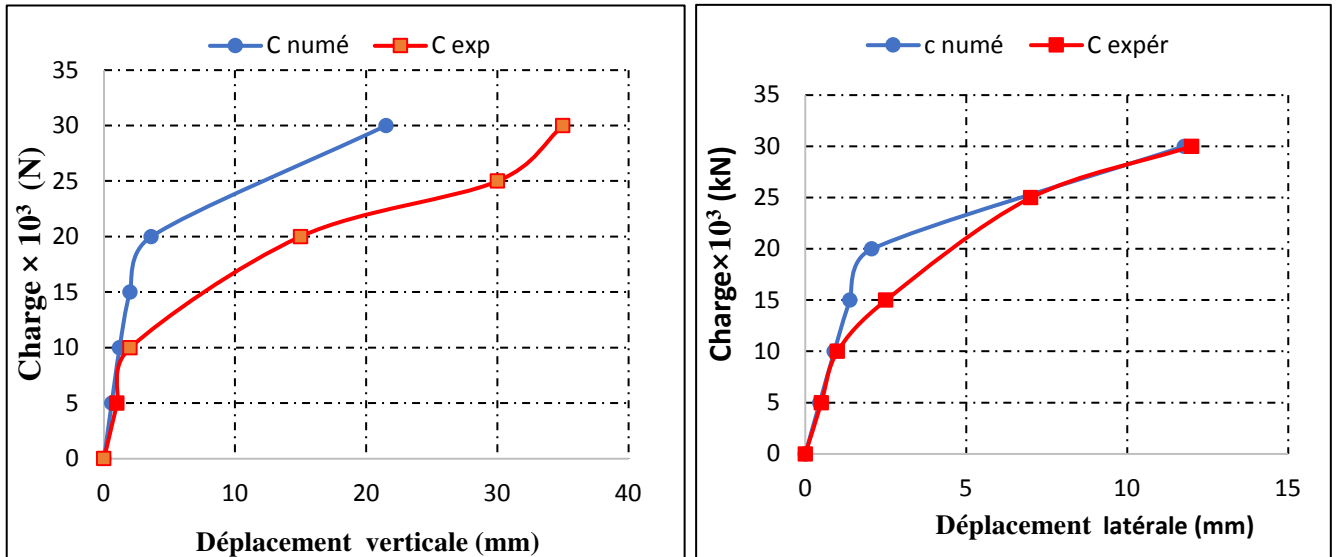


Figure III-32 : État de déplacement latéral et vertical du modèle C

On remarque une très bonne corrélation entre modèle numérique et expérimentale pour le modèle Ω dont une instabilité latérale moins importante par rapport au modèle C.

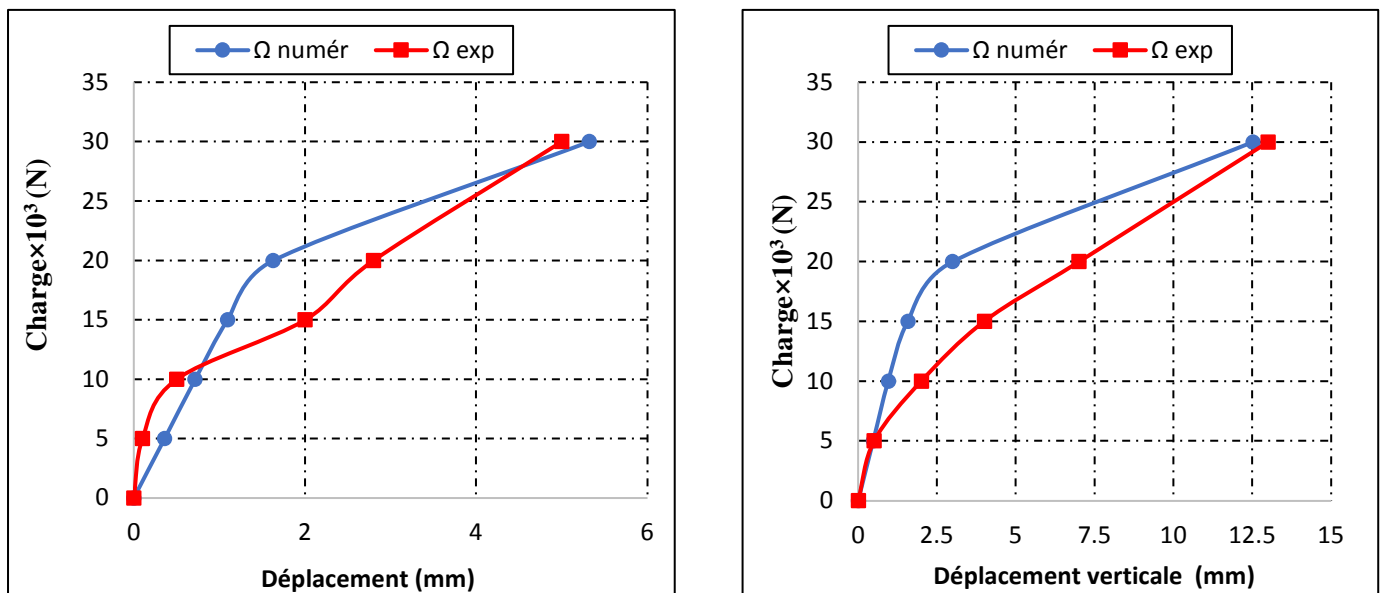


Figure III-33 : État de déplacement latéral et vertical du modèle Ω

III-6. Conclusion

La section en forme de chapeau (Ω) est plus stable par rapport à la section en forme (C).

Conclusion générale :

Ce travail nous a permis de conclure que :

- Il est clair que la section en forme de chapeau (Ω) est plus stable par rapport à la section en forme (C).
- Un état de déformation important dans la zone centrale (zone d'application de la charge), Une diminution de 50% des déformation du modèle C par rapport au modèle Ω .
- le modèle C représente une instabilité latérale plus importante par rapport au modèle Ω , un déplacement important de 220 mm pour une charge de 50 kN.
- L'augmentation de l'épaisseur diminue les états de contraintes, de déformations et des flèches.
- Les arrondies ont une influence sur le comportement des poutres en C et Ω .
- Le coût de fabrication de la section en chapeau (Ω) est plus élevé que celui de la section en (C). En dehors de cette considération de coût, la section en chapeau (Ω) est assez forte que la section (C).
- Une très bonne corrélation entre modèle numérique et expérimentale.les résultats (numériques et expérimentales) sont presque confondue.

RECOMMANDATIONS:

- 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.
- L'étude d'autres types de sollicitation tel que la compression et élargir les études à d'autres formes d'instabilité.
- la comparaison de la section avec d'autres sections ouvertes en profilé formé à froid tel que la section super oméga.

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] OUALID Hamza intitulé: Initiation a l'étude d'une structure simple de profilé formé à froid en utilisant l'EUROCODE et l'AISI ; Master 2 ; Aboubakr Belkaïd 2013 ; p97.
- [4] SAIDI Mourad & SERDOUN Abdenour intitulé : Dimensionnement d'un Elément de Structure en Acier Formé à Froid Soumis à la Flexion / la compression ; mémoire master 02 ; Aboubakr Belkaïd – Tlemcen ;2016 ; p 163.
- [5] Sivaranjani.S, Nalini.S and Annapurani.M ; FLEXURAL BEHAVIOUR OF COLD FORM STEEL SECTIONS SUBJECTED TO STATIC LOADING/ International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET); Volume 9, 3 March 2018, pp. 969–976,
- [6] Mahi Imene , Djafour Naoual et Djafour Mustapha ; Study of Local and Distortional Stability of Thin-Walled Structures; MATEC Web of Conferences 149, 01089 (2018) CMSS-2017.
- [7] [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