

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : Génie civil

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Génie civil

Spécialité : Constructions métalliques et mixtes

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Étude numérique des poutres en C assemblées dos à dos en acier formé à froid avec différents types de raidisseurs d'âme.

Présenté par : *FENNI Malak*

RIGHI Anes

Encadrant : *KOUIDER Nadia* MCA Université Badji Mokhtar-Annaba

Jury de Soutenance :

| | | | |
|----------------|------|----------------------|-----------|
| HADIDANE Yazid | MC.A | Badji Mokhtar Annaba | Président |
| KOUIDER Nadia | MC.A | Badji Mokhtar Annaba | Encadrant |
| LOUETRI Latifa | MC.B | Badji Mokhtar Annaba | Examineur |

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce travail, nous profitons de l'occasion pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études. Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements pour nos respectueux, Madame KOUIDER NADIA, d'avoir accepté de nous encadrer pour notre projet de fin d'études, ainsi que pour leur soutien, leurs remarques pertinentes et leur encouragement. Avec un grand remerciement à mademoiselle HERATH OULFA

Nous remercions aussi le président de jury Monsieur HADDIDANE Ainsi que l'examineur Madame LOUETRI d'avoir accepté de lire et d'examiner ce modeste travail et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de ce projet.

Veillez trouver ici le témoignage de notre respect le plus profond. Nos remerciements vont aussi à tous nos professeurs, enseignants et les camarades de génie civil en particulier ma promotion de la construction métallique et toutes les personnes qui m'ont soutenu jusqu'au bout, et qui n'ont pas cessé de nous donner des conseils très importants en signe de reconnaissance

Dédicace

FENNI Malak

Du profond de mon Cœur, je dédie ce travail a tous ceux qui me sont chers

A mes chers parents :

*Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer
le climat*

*Affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne
pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments
envers eux. Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils
seront toujours fiers de moi.*

*A mes frères : Ahmed, Yassine, Raïd Mohamed Bachir Et toute la famille
FENNI. A mon Ami et mon Binôme Anes.*

A ma petite sœur : Rabab

Tous mes amis, particulièrement : Safaa L, Malak G,

A tous les membres de ma promotion.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

Dédicace

RIGHI Anes

Du profond de mon Cœur, je dédie ce travail a tous ceux qui me sont chers

A ma chère maman :

*Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer
le climat*

A mon cher père que dieu lui fasse miséricorde

A mon Ami et mon Binôme Malak.

A ma sœur : Lamais

Tous mes amis

A tous les membres de ma promotion.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

Résumé

Vu la tendance actuelle de construire de plus en plus résistant et de plus en plus léger, les profilés formés à froid et surtout ceux à parois minces commencent à s'imposer sur le marché de la construction métallique. Ces types de profilés présentent des caractéristiques très intéressantes les rendant compétitifs, à savoir leur légèreté, la facilité de leur montage, l'exactitude des dimensions obtenues et la grande variété des formes réalisées.

Cette mémoire traite une étude numérique de la performance des poutres seules de forme C sollicitées à la flexion trois points sous le logiciel ABAQUS avec ou sans raidisseurs intermédiaires au niveau d'âme (raidisseurs linéaires, triangulaires, carré et trapézoïdaux). D'autres modèles de poutres ont été construites en assemblant deux sections de forme C dos à dos en acier formé à froid et assemblés par deux rangées de rivets. Les modèles d'éléments finis (EF) ont été utilisés et leurs résultats ont été validés à l'aide des résultats analytiques, on a remarqué une très bonne corrélation entre les résultats. Les modèles ont bien prédit les performances des poutres composées dos à dos avec ou sans raidisseurs d'âme, la poutre avec un raidisseur triangulaire avait la capacité la plus élevée par rapport aux autres modèles (raidisseurs linéaires, carré et trapézoïdaux).

Liste des notations :

Bi, Ci, Si : 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 ;

fyb : La limite d'élasticité de base ;

fu : La résistance à la traction ;

E : Module d'élasticité ;

ρ : Masse volumique ;

ν : coefficient de poisson ;

bi/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 :

Abr : Section brute ;

Ag : L'aire de section transversale brute ;

Ag, sh : la valeur de Ag pour une section transversale avec angles vifs ;

δ : La fléché de la poutre ;

Zb1 : Position de l'axe neutre comprimés ;

$\sigma_{com,Ed}$: La contrainte

fyd : La limite d'élasticité moyenne augmentée ;

ψ : Le rapport de contrainte supérieure sur la contrainte inférieure ;

k_{σ} : Coefficient de voilement ;

λ : L'élancement réduit ;

bgff : Largeur efficace ;

hc : La position de l'axe neutre ;

Aff : Section efficace ;

Zc : Position de l'axe neutre tendue ;

Ieff,y : Moment inertie efficace ;

Weff, y,c : Module de résistance section efficace ;

fyb : 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

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| CHAPITRE 1 :RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE | 3 |
| I.1 GENERALITE SUR LE MATERIAU ACIER: | 4 |
| I.2 COMPOSITION CHIMIQUE DES ACIERS : | 4 |
| I.3 ESSAIS DE CONTROLE DES ACIERS: | 5 |
| I.3.1 Les essais destructifs : | 5 |
| I.3.2 Les essais non destructifs : | 8 |
| I.4 PLASTICITÉ DE L’ACIER : RÉSERVE DE SÉCURITÉ | 8 |
| I.4.1 Comportement de l'acier..... | 9 |
| I.5 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE L’ACIER : | 10 |
| I.5.1 Principaux avantages : | 10 |
| I.5.2 Principaux inconvénients : | 11 |
| I.6 CLASSIFICATION DES PROFILES EN ACIER: | 11 |
| I.7. PRESENTATION DES ELEMENTS EN ACIER FORMES A FROID: | 11 |
| I.8. PROCEDES ET TECHNIQUES APPLIQUEES DANS LE FORMAGE ET LAMINAGE A FROID: | 12 |
| I.8.1 Emboutissage à froid des barres d’acier : | 12 |
| I.8.2. Laminage à froid : | 13 |
| I.9 LAMINOIRS A FROID (LAMINOIRS A BANDES LF): | 14 |
| I.9.1 Type de laminoir : | 14 |
| I.10 Fabrication et domaine d’application des profilés formés froid: | 15 |
| I.10.1 Les technologies de fabrication : | 15 |
| I.10.2 Domaine d’application : | 17 |
| I.11 TYPES DES SECTIONS EN ACIER FORMEES A FROID: | 18 |
| I.12 LES CARACTERISTIQUES PARTICULIERES DES SECTIONS EN ACIER FORMEES A FROID: | 21 |
| I.12.1 Effet de formatage à froid sur le comportement de l’acier: | 22 |
| I.13 MODES D’INSTABILITE DES PROFILES FORMES A FROID ET A PAROIS MINCES : | 24 |
| I.13.1 L’instabilité locale : | 25 |
| I.13.2 L’instabilité globale..... | 26 |
| I.13.3 Instabilité distorsionnelle..... | 26 |
| I.13.4. Exemple réel de flexion en quatre points d’un profilé formé à froid de forme superoméga: | 30 |
| I.14. ANALYSE ET METHODE DE CALCUL SELON EC 3 PARIE 1.3 [13] | 32 |
| I.14.1 Coefficient de sécurité: | 32 |
| I.14.2 PROPORTIONS GEOMETRIQUES: | 32 |
| I.15 Avantages et Inconvénient des profilés formés à froid et à parois minces : | 33 |

| | |
|---|----|
| Conclusion : | 33 |
| II- ANALYSE ET METHODE DE CALCUL SELON EC3 PARIE 1.3. | 35 |
| II-1. Introduction | 35 |
| II-1.1. Base de calcul : | 35 |
| II-1.2. Coefficient de sécurité : | 35 |
| II -1.3. Caractéristiques des matériaux | 35 |
| II -2. Section Efficace : | 37 |
| II -2.1. Concept De Largeur Efficace : | 37 |
| II.2.2. Validité du concept des largeurs efficaces : | 38 |
| II.3. Caractéristiques des sections | 38 |
| II.3.1 Limite d'élasticité moyenne augmentée..... | 40 |
| II.3.2 Proportions géométriques..... | 40 |
| II.4. Instabilité Locale | 42 |
| II.4.1. Parois non raidies | 42 |
| II.4.2. Parois munis de raidisseurs de bords et intermédiaire | 44 |
| II.4.3. Parois munies de raidisseur de bord : | 45 |
| 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 : | 48 |
| II.5.5. Compression et flexion combinée : | 48 |
| II.5.6. Effort tranchant : | 48 |
| II.6. Assemblages par déformation (rivetage) : | 48 |
| II.6.1. Introduction : | 48 |
| II.6.2. Principe du rivetage : | 48 |
| II.6.3. Section, longueur du rivet et diamètre de perçage : | 49 |
| II.6.5. Rivets usuels : | 50 |
| II.6.6. Montage des rivets à froid ($d < 10$ mm) : | 51 |
| II.6.7. Disposition des rivets : | 51 |
| II.6.8. Types de ruptures dans les assemblages rivetés : | 52 |
| II.6.9. Hypothèses sur le calcul des rivets : | 52 |
| II.7 Exemple D'analyse Des Poutres Selon Ec3 : | 53 |
| II.7.1. Introduction : | 53 |
| II.7.2. Travaux expérimentaux : | 53 |
| II.7.3. Détermination des caractéristiques des sections : | 56 |

| | |
|--|----|
| II.7.4 Propriétés de la section efficace des semelles et des bords comprimés : | 57 |
| Conclusion : | 65 |
| III- ANALYSE NUMERIQUE DES POUTRES EN PAF SOUS ABAQUES : | 69 |
| III-1. Introduction. | 69 |
| III-2. Définition de logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS. | 69 |
| III-2.1. Caractéristiques de logiciel ABAQUS : | 69 |
| III-2.3. Type d'analyse : | 70 |
| III-2.4. Problèmes : | 70 |
| III-2.5. Les éléments utilisés par ABAQUS [22] : | 70 |
| III-2.6. Système d'unités dans le code de calcul ABAQUS : | 71 |
| III-2.7. Réalisation d'une simulation numérique : | 72 |
| III-2.8. Modélisation par ABAQUS : | 73 |
| III-3. Etude numérique des poutres formés à froid sous ABAQUS | 75 |
| III-3.1. Les étapes de modélisation des éléments sous ABAQUS | 75 |
| 1) Géométrie ( Parts) : | 75 |
| 2) Le module « PROPERTY ». | 78 |
| 3) Le module « ASSEMBLY ». | 80 |
| 4) Le module « STEP ». | 81 |
| 5) Le module « INTERACTION ». | 81 |
| 6) Le module « LOAD ». | 83 |
| 7) Le module « MESH ». | 84 |
| 8) Le module « JOB ». | 84 |
| 9) Module « VISUALIZATION ». | 85 |
| III-4. Comparaison numérique entre les profilés. | 93 |
| Conclusion | 96 |

Liste des Figures

CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|--|----|
| Figure I .1: Essai de traction..... | 5 |
| Figure I .2: Essai de Brinell..... | 6 |
| Figure I .3: Essai de Rockwell..... | 6 |
| Figure I .4: essai de Vickers | 6 |
| Figure I .5: Schéma de principe de l'essai de choc | 7 |
| Figure I .6: L'essai et appareil de la fatigue | 7 |
| Figure I .7: L'essai et appareil de fluage | 8 |
| Figure I .8: Adaptation plastique pour les différents types d'acier | 9 |
| Figure I .9: Loi de comportement simplifié de l'acier..... | 10 |
| Figure I .10: Machine de formage à froid..... | 12 |
| Figure I .11: Procédé de profilage | 16 |
| Figure I .12: Presse plieuse industrielle (Procédé de pliage)..... | 16 |
| Figure I .13: Bâtiment | 17 |
| Figure I .14: Rideaux de coffrage..... | 17 |
| Figure I .15: Panneaux photovoltaïques | 17 |
| Figure I .16: Ferroviaire | 18 |
| Figure I .17: Profilés spéciaux..... | 18 |
| Figure I .18: Profilés fermés reconstitués..... | 19 |
| Figure I .19: Profilés ouverts simples..... | 19 |
| Figure I .20: Différents types de profilés..... | 19 |
| Figure I .21: Plaques nervurées et plateaux..... | 20 |
| Figure I . 22: Exemples des tôles ondulées pour les toitures, revêtements muraux et planchers | 20 |
| Figure I .23: Différents types de raidisse [1]..... | 21 |
| Figure I .24: Contraintes résiduelles de flexion dans une section en acier formée à froid avec bord tombé | 22 |
| Figure I .25: Courbe contrainte-déformation de l'acier avant et après mise en forme. | 23 |
| Figure I .26: Courbe de comportement de l'acier [10]..... | 23 |
| Figure I .27: Charges critiques et Formes déformés caractéristiques d'une section en C | 25 |
| Figure I .28: Instabilité locale d'une section en C uniformément comprimée | 25 |
| Figure I .29: Instabilités globales d'une section en C uniformément comprimée | 26 |
| Figure I .30: Instabilité distorsionnelle d'une section en C uniformément comprimée | 27 |
| Figure I .31: Modes d'instabilité d'une section en C soumise à un effort axial (Dubina, 2002). [12]..... | 28 |
| Figure I .32: Profilé formé à froid de forme super-oméga | 30 |

| | |
|--|----|
| Figure I .33: Essai de flexion quatre points de la poutre super-oméga. | 30 |
| Figure I .34: Courbe charge -flèches à 1/4 de la poutre super-oméga..... | 31 |
| Figure I .35: voilement locale de la poutre super-oméga | 31 |

CHAPITRE II : ASPECTS REGLEMENTAIRE

| | |
|---|----|
| Figure II.1: Concept de largeur efficace (Eurocode3)..... | 38 |
| Figure II.2: Section transversale efficace d'un profile en forme C | 38 |
| Figure II.3: Point médian d'un arrondi ou de pli | 39 |
| Figure II.4: Largeur de référence des parois | 39 |
| Figure II.5: Largeur de référence des parois adjacentes des raidisseurs | 39 |
| Figure II.6: raidisseur intermédiaire | 44 |
| Figure II.7: Raidisseur de bord..... | 45 |
| Figure II.8: Section transversale efficace en compression. | 47 |
| Figure II.9: Section transversale efficace en résistance en moment fléchissant..... | 47 |
| Figure II.10: Principe du rivetage | 48 |
| Figure II.11: un assemblage par rivetage | 49 |
| Figure II. 12: La longueur du rivet..... | 50 |
| Figure II.13: effet flamber de façonnage de revêt..... | 50 |
| Figure II. 14: disposition des revêts | 51 |
| Figure II.15: type de rivetage | 52 |
| Figure II.16: Présentation des modèles assemblés face à face avec de différents forme de raidisseurs d'âme | 55 |
| Figure II.17: La disposition des revêt et l'emplacement des plaques de raidissement le long de la poutre | 55 |
| Figure II.18: Caractéristiques géométriques de la section type C | 56 |
| Figure II.19: Propriétés de la section efficace..... | 63 |
| Figure II.20: Section efficace du profilé type C..... | 64 |
| Figure II.21: Poutre soumis à la flexion trois points | 65 |

CHAPITRE III : ETUDE NUMERIQUE DES POUTRES EN PAF SOUS ABAQUS

| | |
|--|----|
| Figure III.1: Quelques éléments parmi les plus utilisés | 71 |
| Figure III.2: Organisation d'ABAQUS | 72 |
| Figure III.3: les Modules d' ABAQUS | 73 |
| Figure III.4: Principe de calcul sous le logiciel ABAQUS..... | 74 |
| Figure III.5: La géométrie des éléments constituant les modèles (les poutres, le revêt, la plaque rigide) | 76 |
| Figure III.6: Disposition des boulons sur la poutre assemblée en doubles C..... | 77 |
| Figure III. 7: Vues tridimensionnelles des poutres étudiées sous ABAQUS | 77 |
| Figure III.8: revêt et plaque rigide en 3D sur ABAQUS..... | 78 |
| Figure III. 9: Les propriétés intégrées dans la modélisation des poutres. | 79 |
| Figure III.10: section avec les propriétés sous ABAQUS..... | 79 |
| Figure III.11: Deux section assemblée par revêt sous ABAQUS selon les plan (XYZ) et (TZ) et (YZ)..... | 80 |
| Figure III.12: Step de la poutre C en ABAQUS | 81 |
| Figure III.13: Interaction de la poutre C en ABAQUS | 82 |
| Figure III.14: Chargement de la poutre C sous ABAQUS (déplacement imposée)..... | 83 |
| Figure III.15: Chargement et conditions aux limites de la poutre C sous ABAQUS..... | 83 |
| Figure III.16: Maillage des éléments : poutres, le revêt et la plaque rigide | 84 |
| Figure III.17: Lancement des analyses des modèles sous ABAQUS..... | 85 |
| Figure III.18: Iso valeurs de la poutre PSR sous ABAQUS | 85 |
| Figure III.19: Iso valeurs de la poutre PRT sous ABAQUS | 86 |
| Figure III. 20: Iso valeurs de la poutre PRC sous ABAQUS | 86 |
| Figure III.21: Iso valeurs de la poutre PRTra sous ABAQUS | 86 |
| Figure III.23: Courbe comparative de l'état charge- déplacement U_x des poutres seules | 87 |
| Figure III.24: Courbe comparative de l'état charge- déplacement U_y des poutres seules | 88 |
| Figure III.25: Iso valeurs de l'état de contrainte Von Mises de la poutre PSR sous ABAQUS | 89 |
| Figure III.26: Iso valeurs de l'état de contrainte Von Mises de la poutre PRT sous ABAQUS | 89 |
| Figure III.27: Iso valeurs de l'état de contrainte Von Mises de la poutre PRC sous ABAQUS | 90 |
| Figure III.28: Iso valeur de l'état de contrainte de Von Mises des poutres avec raidisseur trapèze | 90 |
| Figure III.29: Iso valeurs de la magnitude de la poutre PSR sous ABAQUS | 91 |
| Figure III.30: Iso valeurs de la magnitude de la poutre PRT sous ABAQUS..... | 91 |
| Figure III.31: Iso valeurs de la magnitude de la poutre PRC sous ABAQUS..... | 92 |
| Figure III.32: Iso valeurs de la magnitude de la poutre PRTra sous ABAQUS..... | 92 |
| Figure III.33: Etude comparatif de l'état charge déplacement U_x des poutres composées avec différents forme de raidisseurs d'âmes..... | 93 |

| | |
|---|----|
| Figure III.34: Etude comparatif de l'état contrainte- déformation ϵ_y des poutres composées avec différents forme de raidisseurs d'âmes | 94 |
| Figure III. 35: Etude comparatif de l'état charge déplacement U_y des poutres composées avec différents forme de raidisseurs d'âmes..... | 94 |
| Figure III. 36: Validation des résultats numériques et analytiques des modèles étudiés | 95 |

Liste des tableaux

CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|---|----|
| Tableau I.1: Influence du procédé de fabrication sur les forces de base des profilés formés à froid..... | 21 |
| Tableau I.2: Type d'amplitude des contraintes résiduelles dans les sections en acier | 22 |
| 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. [10]..... | 29 |
| Tableau I.4: Propriétés géométriques et mécaniques de poutres en acier. | 30 |

CHAPITRE II : ASPECTS REGLEMENTAIRE

| | |
|---|----|
| Tableau II.1 : Valeurs de la limite d'élasticité f_{yb} et la résistance à la traction f_u | 36 |
| Tableau II.2: Rapports largeur épaisseur maximum | 41 |
| Tableau II.3: Modélisation des parois d'une section transversale | 41 |
| Tableau II.4: Parois comprimées sur deux appuis..... | 43 |
| Tableau II.5: Parois comprimées en console..... | 44 |

CHAPITRE III : ETUDE NUMERIQUE DES POUTRES EN PAF SOUS ABAQUS

| | |
|---|----|
| Tableau III.1: Système d'unités pour la programmation | 71 |
| Tableau III.2: Les caractéristiques mécaniques intégrées sous ABAQUS | 78 |

Introduction générale

La recherche en matière de profilés formés à froid n'a cessé d'évoluer en particulier dans le domaine des constructions, cette expansion remarquable de l'utilisation des profils formés à froid, par rapport aux profils réalisés par laminage à chaud, est à associer aux nombreux avantages qu'ils possèdent par rapport à ces derniers, leur mode de fabrication, par profilage ou par pliage, permet la réalisation d'une très grande variété de formes, soit de sections, soit de tôles profilées.

A travers ces procédés on vise plusieurs objectifs à savoir la facilité de produire des formes complexes et une parfaite adéquation de la forme du profilé à sa fonction, leurs manipulations tout aussi faciles qu'elle permet bien des avantages et en particulier l'économie dans leur consommation. D'autre 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 formage telles que le perçage, la grugeage et la mise en peinture et la possibilité de fabrication à partir de feuillards déjà galvanisés, ce qui peut dispenser, en partie, des traitements spéciaux de la surface du profil afin de le protéger contre la corrosion, spécialement dans le cas des tôles minces.

Ces sections formées à froid sont plus fines que les sections laminées à chaud : selon les exigences du processus de fabrication, l'épaisseur des tôles CFS ne dépasse pas 6mm. Par conséquent, ces sections sont vulnérables au flambage global, à la flexion, à la torsion de la flexion, à la distorsion et au flambage local. En outre, bien que les profilés présentent les avantages de la flexibilité et de la facilité de fabrication, leur rigidité à la torsion est relativement faible. Pour pallier ces derniers inconvénients plusieurs méthodes de calcul sont généralement privilégiées, la méthode la plus connue est la méthode de la largeur efficace en appliquant le code de calcul Eurocode 3. [1]

Afin de surmonter le problème de la faible rigidité à la torsion, les sections formées à froid construites peuvent être composées de deux sections symétriques. Les sections fermées et ouvertes peuvent être formées en assemblant deux sections en C à l'aide des rivets, de soudures et de boulons.

Notre objectif est l'étude des performances des poutres composées assemblées par des rivets sollicités par la flexion trois points.

- Présenter de manière générale la méthode réglementaire de dimensionnement des structures en profilés formés à froid suivant le code le plus utilisé l'Eurocode (le code européen).
- L'amélioration de la capacité de flexion des sections formées à froids en double C en introduisant des raidisseurs d'âme et des bords tombés de largeur considérable pour renforcer l'aile contre le voilement local.

Pour ce faire, notre mémoire sera subdivisé en trois chapitres traitants chacun un point spécifique tel que nous allons l'exposer comme suit :

Le premier chapitre représente une recherche bibliographique consacrée sur une large présentation les profilés formés à froid en passant par leurs modes de fabrication et en décrivant leurs diverses formes, les avantages ainsi que leurs problèmes d'instabilités.

Le deuxième chapitre est un aspect réglementaire basant sur la norme Eurocode 3 avec la détermination des caractéristiques géométriques et mécaniques de la section d'étude et du matériau utilisé. L'élaboration des codes de calcul comme l'Eurocode 3 qui a dédié la partie 1-3 pour les profilés formés à froid par une méthode dite ; méthode de la largeur efficace contenant des calculs itératifs pour la détermination des caractéristiques efficaces qui rend la méthode plus ou moins compliquée dans le but d'étudier les performances des poutres composées de double C avec différents types de raidisseurs d'âme. Les poutres sont sollicitées à la flexion simple trois points.

Le troisième chapitre :

Dans cette partie une analyse numérique est présentée en utilisant le logiciel ABAQUS. Le modèle choisi est une poutre en acier formé à froid de 1m de longueur, construite à partir de double C avec de différents types de raidisseurs d'âmes (triangulaire, carré, et trapézoïdale) et assemblés par deux rangées de rivets. Ces poutres sont soumises à la flexion 3 points. Différents résultats numériques ont été obtenus pour être confrontés avec ceux obtenus. D'après le calcul analytique inspiré de la norme Eurocode 3.

Enfin, le travail est clôturé par une conclusion générale résumant les résultats importants obtenus et quelques recommandations et des perspectives concernant la suite des travaux dans ce domaine.

***CHAPITRE 1 : RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE***

I .1 GENERALITE SUR LE MATERIAU ACIER:

L'acier est un matériau constitué essentiellement de fer et d'un peu de carbone, qui sont extraits de matières premières naturelles tirées du sous-sol (mines de fer et de charbon). Le carbone n'intervient ; dans la composition, que pour une très faible part (généralement inférieure à 1%).

Outre le fer et le carbone, l'acier peut comporter d'autres éléments qui leur sont associés :

- Soit involontairement : phosphore, soufre... qui sont des impuretés et qui altèrent les propriétés des aciers,
- Soit volontairement : ce sont notamment le silicium, le manganèse, le nickel, le chrome, le tungstène, le vanadium, etc..., qui ont pour propriété d'améliorer les caractéristiques mécaniques des aciers (résistance à la rupture, dureté, limite d'élasticité, ductilité, résilience, soudabilité...). On parle, dans ces cas, d'acier alliés.

L'acier est généralement obtenu par une opération en 2 phases :

- 1^{re} phase : l'introduction et la combustion de minerai de fer, de coke et de castine dans un haut-fourneau permet l'obtention de la fonte (matériau à plus de 1.7 % de carbone) ;
- 2^{ème} phase : il est procédé à la conversion de la fonte liquide en acier, à une température de 1500°c environ ; sous insufflation d'oxygène. Cette opération s'effectue dans un convertisseur et a pour objet de décarburer la fonte. L'acier obtenu possède plus qu'un faible pourcentage de carbone. Une autre technique d'élaboration par arc électrique se développe actuellement. [1] (conception et calcul des structures métalliques selon L'EUROCODE 3)

I .2 COMPOSITION CHIMIQUE DES ACIERS:

Les aciers de construction contiennent de 0,1 à 1% de carbone en fonction des propriétés recherchées et, selon les éléments d'addition tels que manganèse. Nickel. Chrome. Molybdène. Titane. Tungstène. (Augmentation des caractéristiques mécaniques). Cuivre (contre la corrosion). Silicium (désoxydation). Aluminium (affinage de grain) ...Ils contiennent également une faible proportion d'azote résiduel. Du soufre et du phosphore En fonction de ses composants lors de la mise en nuance et des traitements thermiques subis par les alliages lors de leur élaboration, l'acier aura des propriétés mécaniques et technologiques variables. D'une manière générale, on peut dire qu'en augmentant la teneur en carbone ou la teneur en élément

d'alliages. On augmente les caractéristiques de résistance des aciers, mais on nuit à leur soudabilité (par effet de trempe plus au moins actif en fonction des produits) [2]

I .3 ESSAIS DE CONTROLE DES ACIERS:

Les essais normalisés de contrôle des aciers sont de deux types :

I.3.1 Les essais destructifs :

Qui renseignement sur les qualités mécaniques des aciers se sont :

a) *L'essai de traction :*

L'essai de traction permet d'obtenir les principales propriétés mécaniques de l'acier nécessaires aux calculs de dimensionnement. Cet essai consiste en une mesure continue de la déformation d'une éprouvette en fonction de la contrainte de traction appliquée à celle-ci.

La courbe obtenue permet d'identifier trois phases principales (Figure I .1) :

- Une phase initiale où l'on observe un comportement élastique (proportionnalité entre la contrainte et la déformation). Durant cette phase la déformation est réversible ;
- Une phase d'accélération de la déformation correspondant à une plastification du matériau (déformation permanente) ;
- Une phase de rupture où l'on constate une diminution soudaine de la contrainte (striction de l'éprouvette) pendant que la déformation se poursuit.

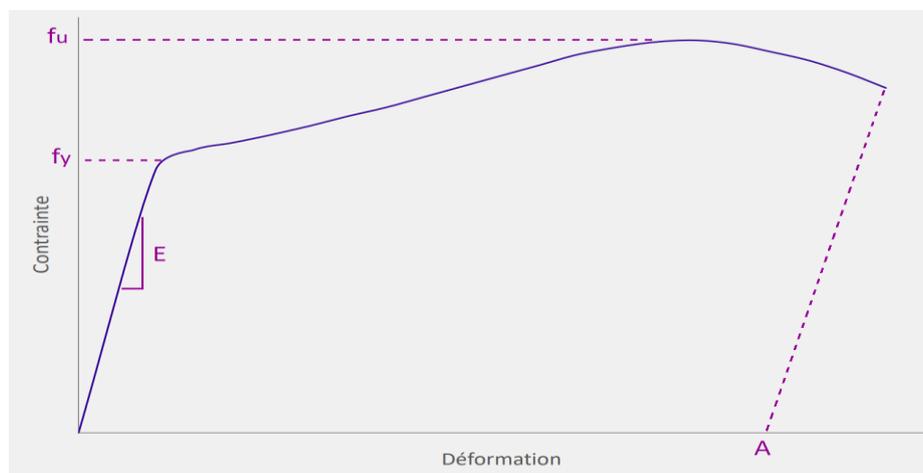


Figure I .1: Essai de traction

Les propriétés mécaniques suivantes peuvent être déduites des résultats de l'essai de traction :

- Le module d'élasticité longitudinale (module de Young) E : pente de la droite dans la phase élastique ;
- La limite d'élasticité f_y : contrainte obtenue au niveau de la rupture de pente à la fin de la phase élastique (palier plastique) ;

- La limite de rupture F_u (notée F_T pour l'acier de béton armé) : contrainte maximale obtenue lors de l'essai ;
- L'allongement à la rupture A : déformation permanente obtenue à la suite de l'essai. [3]

b) L'essai de dureté :

Elle s'exprime comme une résistance à l'enfoncement. En effet, à l'aide d'une bille, d'un cône ou d'une pyramide appliquée sur l'acier avec une force déterminée on peut calculer la dureté de l'acier, mais aussi mettre en évidence plusieurs propriétés de l'acier, comme sa résistance à la déformation, ou encore la capacité de durcissement par déformation (écrouissage). La bille est composée d'acier dur ou de carbure de tungstène (essai Brinell) (Figure I .2). Le cône (essai Rockwell) (Figure I .3) ou la pyramide (essai Vickers) sont en diamant (Figure I .4) [4]

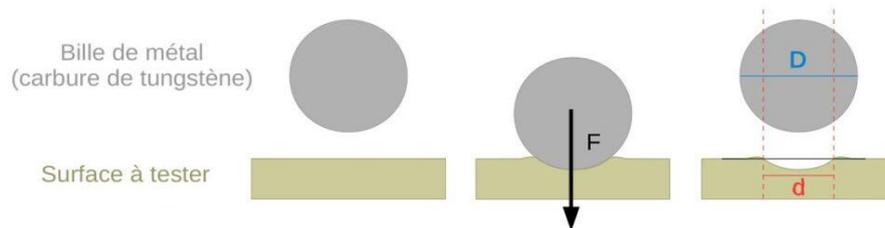


Figure I .2: Essai de Brinell

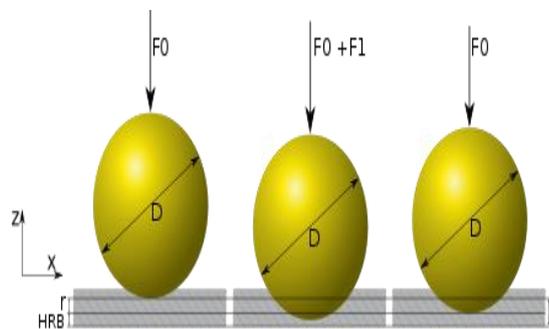


Figure I .3: Essai de Rockwell

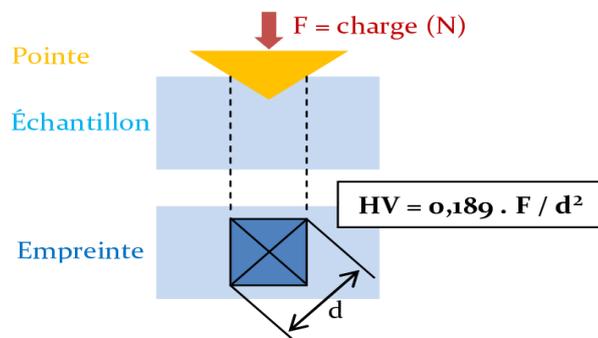


Figure I .4: essai de Vickers

c) L'essai de 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 .5). [4]

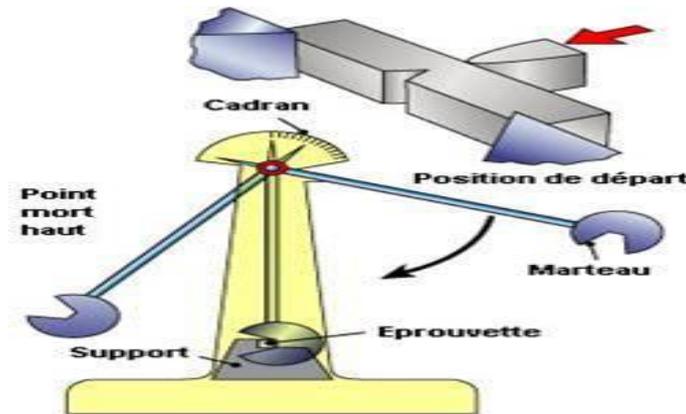


Figure I .5: Schéma de principe de l'essai de choc

e) L'essai de fatigue (d'endurance) :

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 .6). [4]

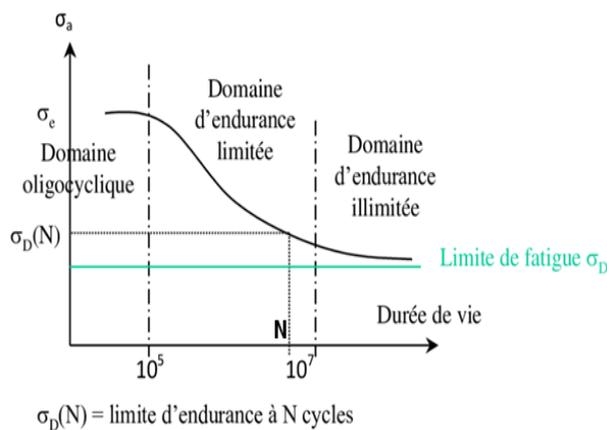


Figure I .6: L'essai et appareil de la fatigue

f) L'essai de fluage :

Ils permettent de déterminer les propriétés d'un acier à une température élevée, comme la déformation en fonction du temps et le temps de rupture sous une charge déterminée (Figure I .7). [4]

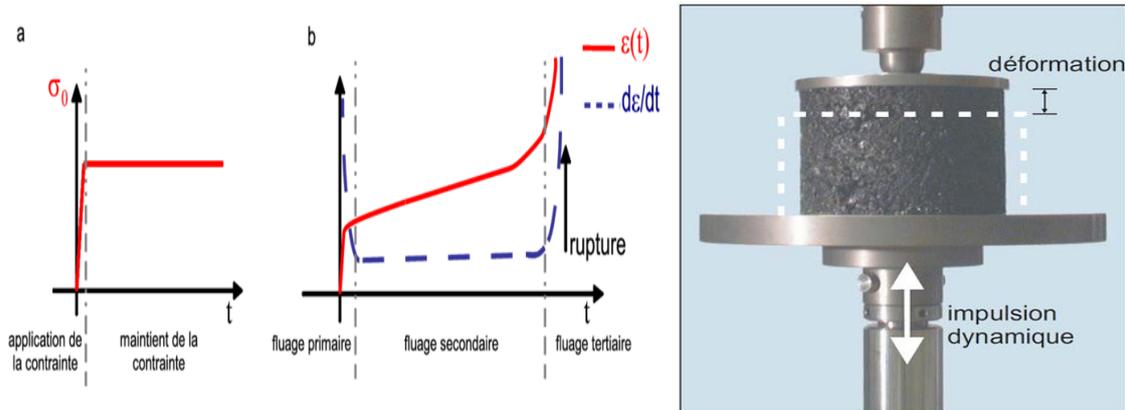


Figure I.7: L'essai et appareil de fluage

I.3.2 Les essais non destructifs :

Qui renseignent sur la composition et la structure des aciers. Ces sont :

a) La macrographie :

C'est-à-dire l'examen visuel d'une surface polie traitée à l'acide

b) La micrographie :

C'est-à-dire l'examen visuel au microscope des cristaux, qui permet déterminer notamment la teneur en carbone,

c) La radiographie :

Par rayons X (en laboratoire) ou rayons gamma (sur chantier), permet de déceler les défauts, cavités ou fissures internes des pièces, notamment des soudures, [1]

I.4 PLASTICITÉ DE L'ACIER : RÉSERVE DE SÉCURITÉ

Le palier de ductilité (la plasticité) est particulièrement important en construction métallique, car il représente une réserve de sécurité. En effet, il peut arriver que localement, dans une structure, des pièces soient sollicitées au-delà de celle limite élastique. Elles disposent dans ce cas, du palier AA' pour se décharger dans des zones avoisinantes. On dit qu'il y a une adaptation plastique.

Plus la teneur en carbone des aciers augmente, plus f_y augmente, plus le palier de ductilité se réduit plus l'allongement de rupture diminue.

La sécurité est donc inversement proportionnelle au taux de carbone. C'est pourquoi seuls les aciers doux (à faible taux de carbone) sont autorisés en construction métallique.

Le taux moyen de carbone étant de 0,2%.

Cette notion de plasticité/sécurité est très importante. En effet, lorsqu'une pièce est excessivement sollicitée, au-delà de la limite d'élasticité f_y si elle est constituée en acier dur ou en fonte, elle va périr par rupture brutale, sans présenter au préalable de signe ou de

déformation prémonitoire. En revanche, une pièce en acier doux va présenter de grandes déformations, qui vont prévenir du danger latent.

En outre, la zone sur contrainte va, en se plastifiant, se déformer et se dérober, ce qui va provoquer le report des contraintes excessives sur des zones ou des pièces voisines non saturées.

Les structures métalliques ont donc, grâce à la ductilité de l'acier, la possibilité d'équilibrer les zones de contraintes, par ce qu'il est convenu d'appeler l'adaptation plastique.

Alors que les règles CM 66 ne tenaient que sommairement compte de cette possibilité pour les pièces fléchies (par l'introduction d'un coefficient d'adaptation plastique ψ), l'Eurocode, au contraire est établi sur la base de comportement élasto-plastique de l'acier(Figure I .8).

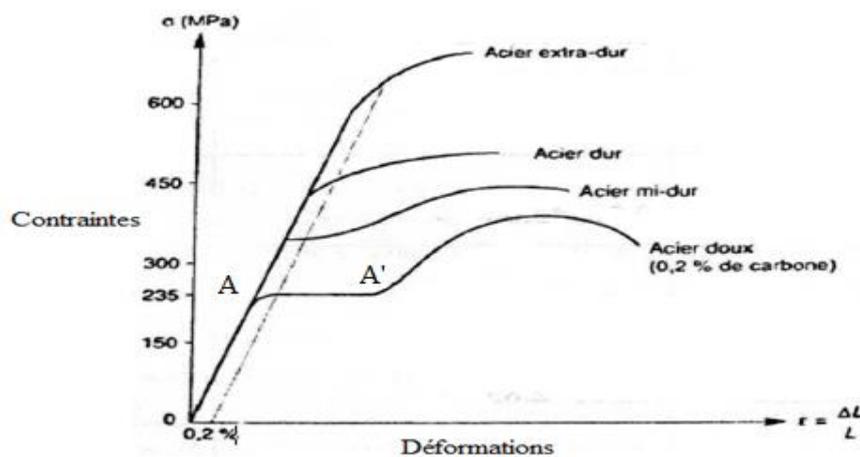


Figure I .8: Adaptation plastique pour les différents types d'acier

I.4.1 Comportement de l'acier

Le comportement réel de l'acier en traction est modélisé par un comportement élasto-plastique parfait qui simplifie les calculs et place le projeteur en sécurité (figure I.16).

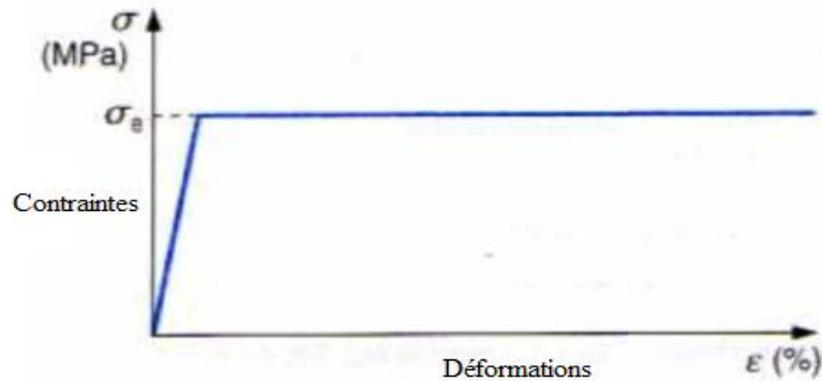


Figure I.9: Loi de comportement simplifiée de l'acier

Pour les aciers de construction couverts par la présente partie d'Eurocode, il y a lieu de prendre les propriétés de matériau à adopter dans les calculs égales aux valeurs suivantes :

- Module d'élasticité longitudinale $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
- Module de cisaillement $G = E/2(1+\nu) = 81000\text{ N/mm}^2$
- Coefficient de Poisson en phase élastique $\nu = 0,3$
- Coefficient de dilatation thermique linéaire $\alpha = 12 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}$ (Pour $T \leq 100\text{ }^\circ\text{C}$) [3]

I.5 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE L'ACIER:

Par rapport aux structures en béton armé ou précontraint, les structures métalliques présentent de nombreux avantages, et certains convenaient.

I.5.1 Principaux avantages :

- Industrialisation totale : il est possible de préfabriquer intégralement des bâtiments en atelier, avec une grande précision et une grande rapidité (à partir des lamines). Le montage sur site, par boulonnage, est d'une grande simplicité ;
- Transport aisé, en raison du poids peu élevé, qui permet de transporter loin, en particulier à l'exportation ;
- Résistance mécanique :
 - . La grande résistance de l'acier à la traction permet de franchir de grandes portées
 - . La possibilité d'adaptation plastique offre une grande sécurité
 - . La tenue aux séismes est bonne, du fait de la ductilité de l'acier, qui résiste grâce à la formation de rotules plastiques et grâce au fait que la résistance en traction de l'acier est équivalente à sa résistance en compression, ce qui lui permet de reprendre des in conversions de moments imprévus ;
- Modification : les transformations, adaptation, surélévation ultérieures d'un ouvrage sont aisément réalisables ;

- Possibilités architecturales beaucoup plus étendues que le béton.

I.5.2 Principaux inconvénients :

- Résistance en compression moindre que le béton ;
- Susceptibilité aux phénomènes d'instabilités élastique raison de la minceur des profils ;
- Mauvaise tenue au feu, exigeant des mesures de protection onéreuses ;
- Nécessite d'entretien régulier des revêtements protecteur contre la corrosion pour assurer la pérennité de l'ouvrage. [9]

I.6 CLASSIFICATION DES PROFILES EN ACIER :

Avec le développement de la construction métallique, les profilés utilisés peuvent être classés en trois catégories principales :

I.6.1 Les profilés laminés à chaud : apparu au temps de naissance de la construction métallique, constituent les gammes traditionnelles de profilés. Ils sont assemblés entre eux par boulonnage ou soudage et joue un rôle important dans la construction métallique à cause de leur grande capacité portante.

I.6.2 Les profilés reconstitués de plaques par rivetage : boulonnage ou soudage permettent de produire de très grandes sections et ces éléments peuvent résister à des efforts beaucoup plus importants.

I.6.3 Les profilés formés à froid : par pliage ou par profilage à partir de tôles, quoi que récemment apparus, occupent déjà une large place en construction métallique. Les formes abondantes et minces leur permettent de participer à plusieurs états de complexes des profilés à paroi sollicitations. La construction mixte, dont les composantes sont des éléments formés à froids, permet d'élargir leurs domaines d'application. Les tôles de base sont des bandes d'acier ré-laminées à froid ou de larges bandes laminées à chaud. Elles sont recouvertes d'une couche de protection anticorrosion (peinture, film plastique, électro-zingage,) [7]

I.7. PRESENTATION DES ELEMENTS EN ACIER FORMES A FROID :

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 à profilage.

b) Presse plieuse

Figure I .10: Machine de formage à froid

I.7.1 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.8. PROCÉDES ET TECHNIQUES APPLIQUÉES DANS LE FORMAGE ET LAMINAGE A FROID :

I.8.1 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 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.8.2. Laminage à froid :

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 débobines issues des laminoirs à chaud.

En effet, l'écrouissage local (déformation plastique) augmente la zone de déformation élastique, la limite d'élasticité est repoussée, mais la résistance à la rupture est constante (ils agissent d'une propriété interne du matériau). Le laminage à froid est généralement réservé aux produits plats (tôles d'acier). 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 lamée 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.9 LAMINOIRS A FROID (LAMINOIRS A 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 Ludres pendant l'emboutissage). Le matériau est soumis à un léger laminage skin-pas effectué généralement sur un laminoir skin-pas 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 skin roll alternative (passe d'ébauchage jusqu'à 7 % de déformation). Les tendances techniques et les développements réalisés dans la production de bandes laminées à froid, motivés par les demandes croissantes du marché et la concurrence de matériaux alternatifs, ont pour objectif l'amélioration du rendement et de la production dessines 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.

I.9.1 Type de laminoir :

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)

Laminoir à fils

- Fils industriels (cuivre par exemple)
- Laminoirs à rouleaux coniques : pour le formage des roues pour le chemin de fer. I [10]

I.10 Fabrication et domaine d'application des profilés formés froid :

Les principaux avantages des éléments à parois minces sont la possibilité qu'on ait de leur donner des formes très variées, ainsi que leur facilité de fabrication et de montage. Le matériau de base est de l'acier de construction courant, possédant souvent une limite d'élasticité f_y plus élevée due au laminage à de petites épaisseurs, et présenté sous forme débobines (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 revêtus (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 matrice, pour la fabrication des tôles profilées formés 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.10.1 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 .11: 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)

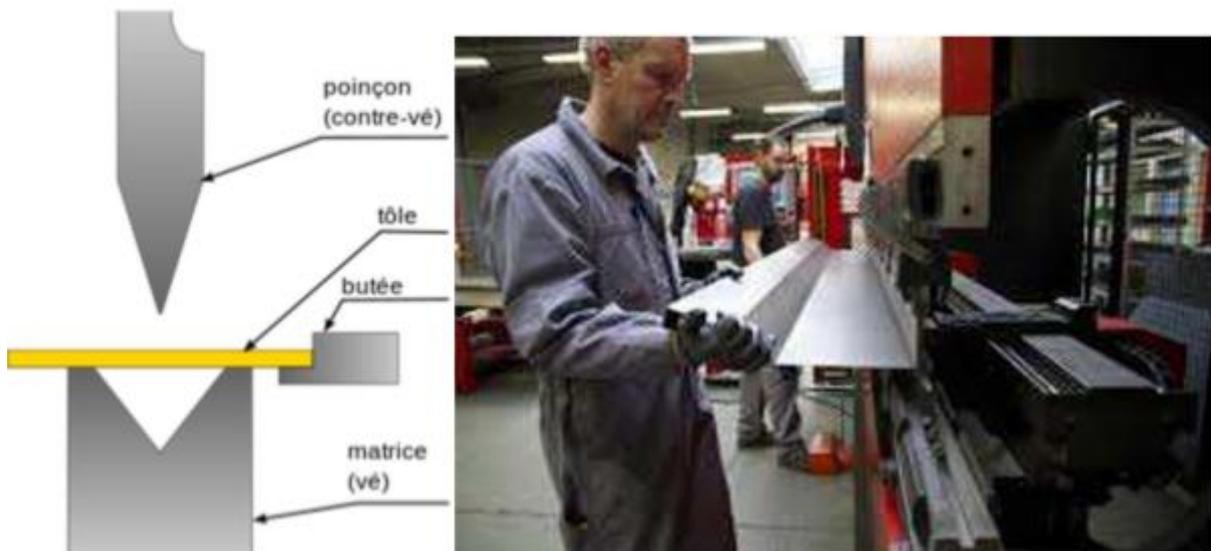


Figure I .12: Presse plieuse industrielle (Procédé de pliage)

I.10.2 Domaine d'application :

Des applications plus précises techniquement :

a) Bâtiment :

Système de structures intérieur /extérieur, plancher pour échafaudage, profils Z poinçonnés pour construction métallique)



Figure I .13: Bâtiment

b) Travaux publics et génie civil :

(Plateformes métallique, glissières de sécurité, Rideaux de coffrage,)



Figure I .14: Rideaux de coffrage

c) Environnement et développement durable :

Supports ou structure pour panneaux photovoltaïques



Figure I .15: Panneaux photovoltaïques

d) Ferroviaire :

Profilés pour TGV, métros, rames diverses

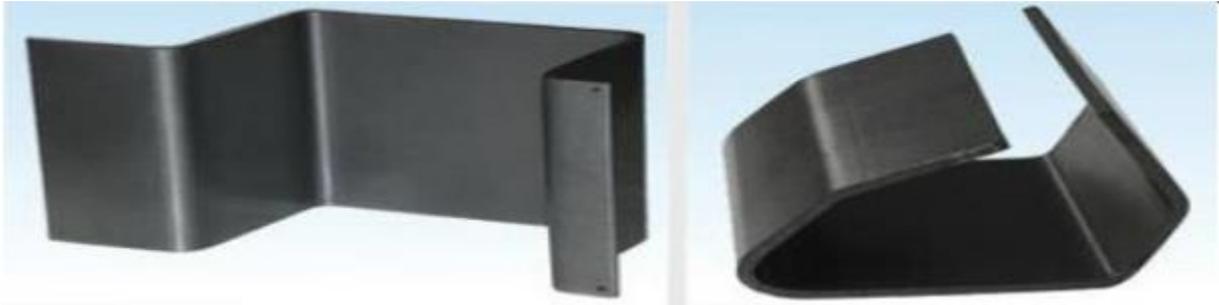


Figure I .16: Ferroviaire

[11]

e) Automobiles et poids lourds :

Profilés spéciaux sur plans en aciers galvanisé ou pré laqué, protection latérales pour poids Lourds

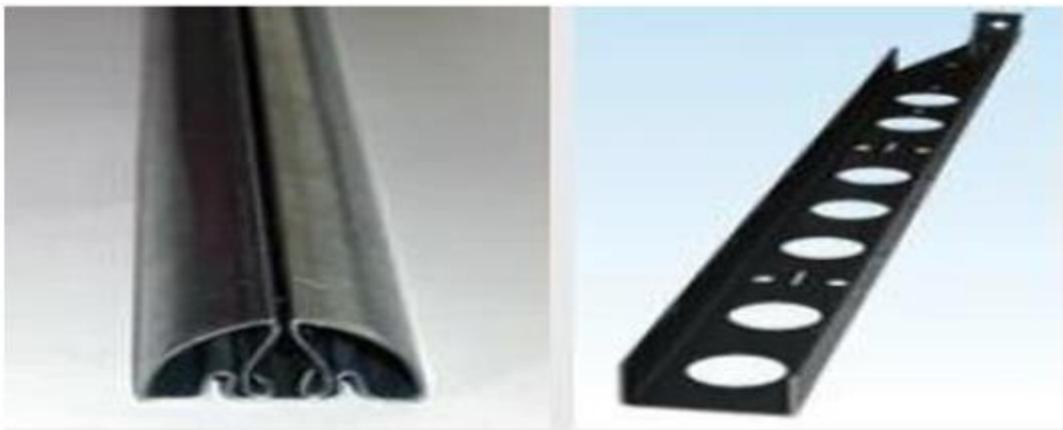


Figure I .17: Profilés spéciaux

[7]

I.11 TYPES DES SECTIONS EN ACIER FORMEES A FROID :

Les éléments formés à froid et les tôles profilées sont des produits en acier fabriqués à partir de bobines ou bien de bandes plates laminées à chaud ou à froid, enrobées ou non. Les éléments structuraux formés à froid peuvent être classés en deux grandes catégories :

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

Les éléments structuraux individuels (éléments barre) obtenus à partir de ce qu'on appelle les "produits longs", et ils incluent :

a) Profilés fermés reconstitués

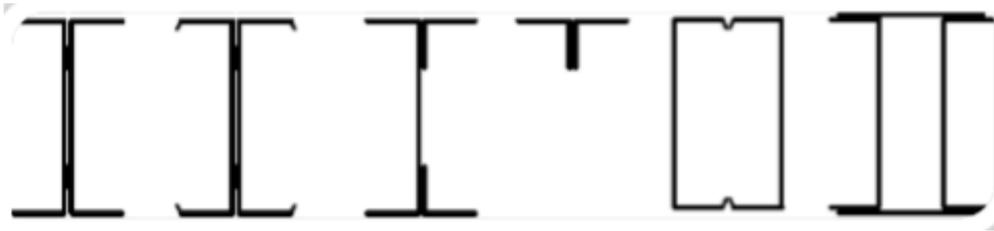


Figure I .18: Profilés fermés reconstitués

b) Profilés ouverts simples



Figure I .19: Profilés ouverts simples

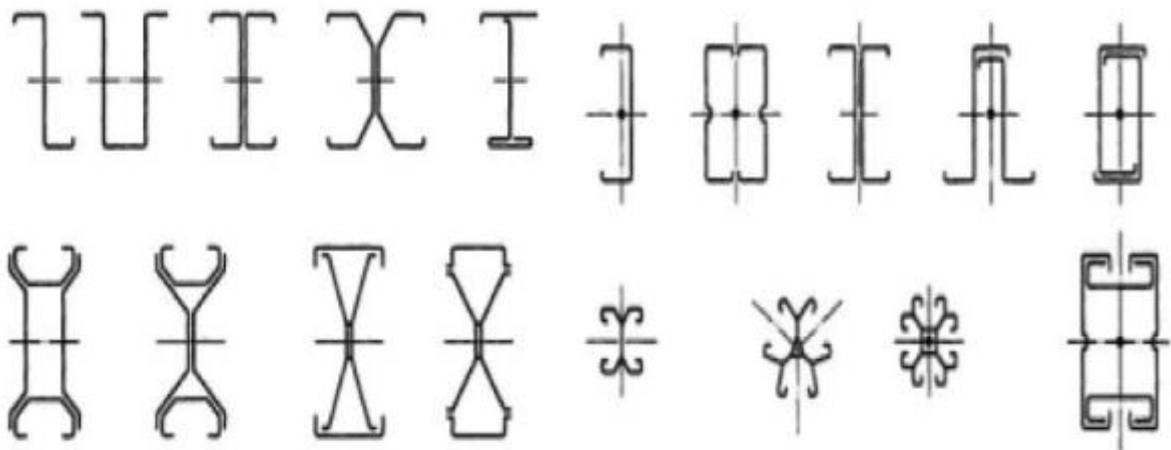


Figure I .20: Différents types de profilés

c) **Les panneaux et les plateformes** sont faits à partir de tôles profilées et de plateaux linéaires. Comme représenté sur la figure 1.9. La profondeur des panneaux s'étend habituellement de 20 à 200 millimètres, alors que l'épaisseur varie de 0.4 à 1.5 millimètres.

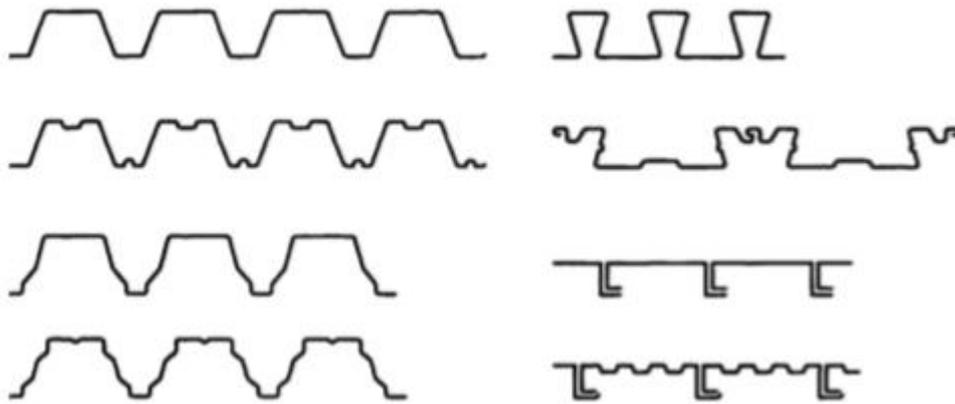


Figure I.21: Plaques nervurées et plateaux

Les Tôles pour les toitures Tôles de revêtement mural Tôles pour les planchers
 (T=0.45-1.0mm) (t=0.45-0.7mm) (t=0.6-1.5mm)

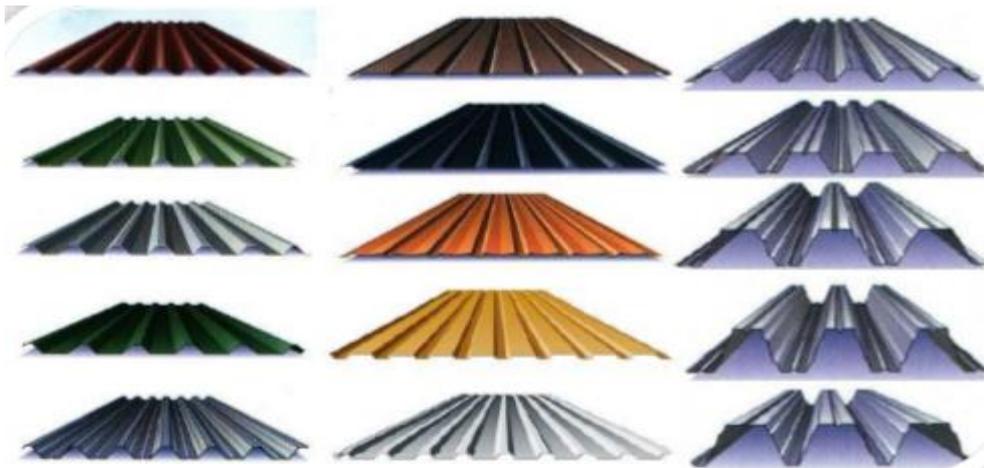


Figure I.22: Exemples des tôles ondulées pour les toitures, revêtements muraux et planchers

e) Les raidisseurs :

Afin d'augmenter la rigidité des sections transversales et des tôles, des bords et des raidisseurs intermédiaires en acier formé à froid sont utilisés (figure1.10)

e-1) Raidisseurs de bord à pli simple et raidisseurs de bord à double plis



e-2) Raidisseurs intermédiaires de semelles et d'âmes

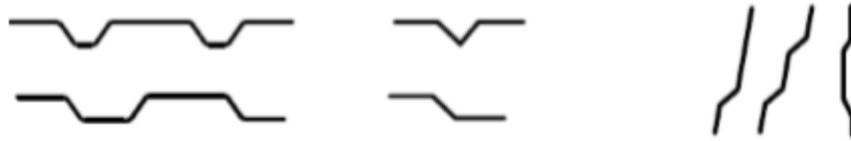


Figure I .23: Différents types de raidisse [1]

I.12 LES CARACTERISTIQUES PARTICULIERES DES SECTIONS EN ACIER FORMEES A 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: Influence du procédé de fabrication sur les forces de base des profilés formés à froid

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

L'augmentation de la limite d'élasticité est due à l'écrouissage et dépend du type d'acier utilisé pour le laminage à froid. Au contraire, l'augmentation de la résistance à la rupture est liée au vieillissement, qui est accompagné par une diminution de la ductilité et dépend des propriétés métallurgiques du matériau. Dans le cas de sections en acier formées à froid les contraintes résiduelles sont essentiellement de type flexion, comme le montre la figure 1.24, 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 .24: Contraintes résiduelles de flexion dans une section en acier formée à froid avec bord tombé

D'autre part, le laminage à froid produit différentes contraintes résiduelles dans la section par rapport à la presse plieuse, comme le montre le tableau 1.2, la force de coupe peut être différente dans le cas où le flambement et la déformation élastique interagissent (Ronald, 1988).

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

| Méthode de formage | Formage à froid | |
|--|------------------|---------------|
| | Laminage à galet | Presseplieuse |
| Contraintes résiduelles de la membrane | Faible | Faible |
| Contraintes résiduelles de flexion | Elevé | Faible |

I.12.1 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.25). Dès 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.

Dès 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.

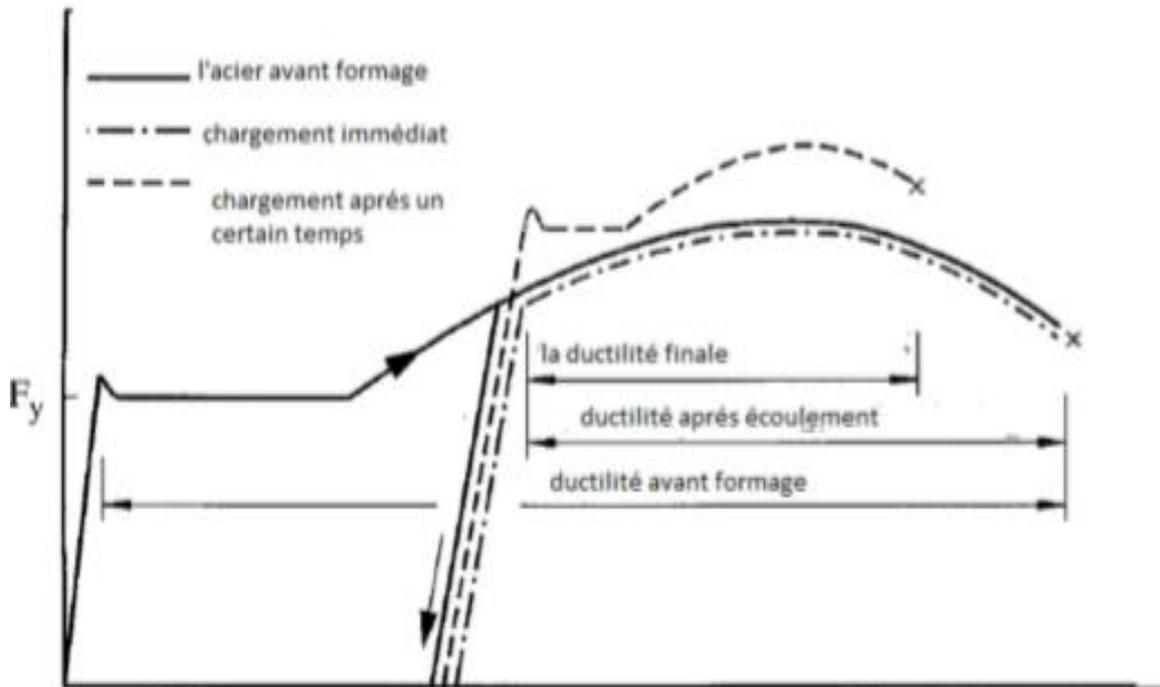


Figure I .25: Courbe contrainte-déformation de l'acier avant et après mise en forme.

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 .26).

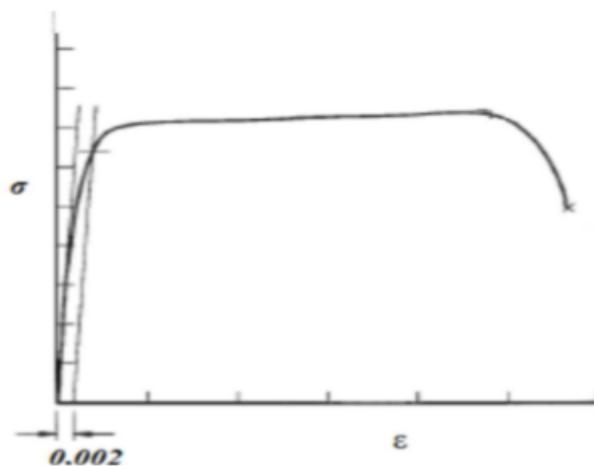


Figure I .26: Courbe de comportement de l'acier [10]

I.13 MODES D'INSTABILITE DES PROFILES FORMES A FROID ET A PAROIS MINCES :

D'une manière générale, trois classes de modes de flambement, appelés aussi modes de base, sont distinguées dans l'étude du comportement de flambement des éléments à parois minces : le mode global, le mode distorsionnel, et le mode local. Ils sont généralement définis sur la base des déformations transversales dans le plan. Cependant, ce n'est pas la configuration de déformation qui fait la distinction importante, mais plutôt le comportement post-critique. Généralement, le flambement global n'a pas de réserve postcritique, alors que le mode local (voilement de plaque) en possède une importante. Le mode de flambement distorsionnel possède également une réserve post-critique, mais beaucoup moins importante que celle du voilement. L'existence, ou l'absence de la réserve postcritique influence fortement la capacité portante de l'élément de structure. Il est donc important de pouvoir identifier correctement le mode de flambement qui entre en jeu, car les effets favorables de la réserve post-critique en dépendent. Cela donne lieu à différentes procédures de dimensionnement. L'adoption de la bonne procédure permet également un dimensionnement optimisé. Dans ce qui suit, les trois types d'instabilité de base tels que définis dans les règlements européens [CEN, "Eurocode 3, EN 1993-1-3, General rules, Supplementary Rules for Cold-formed Members and Sheeting," 2006] et américaines [AISI, "North American Specification (NAS) for the Design of Cold-formed Steel Structural Members (AISI-S100)," 2007] sont présentés. La définition de ces modes de base, ou modes purs d'instabilité repose essentiellement sur la forme déformée de la section transversale ainsi que sur la longueur de demi-onde associée à une instabilité [AISI, "North American Specification (NAS) for the Design of Cold-formed Steel Structural Members (AISI-S100)," 2007]. Les critères présentés permettent l'identification visuelle des différents modes d'instabilité des éléments structuraux soumis à des contraintes longitudinales (Figure I.27).

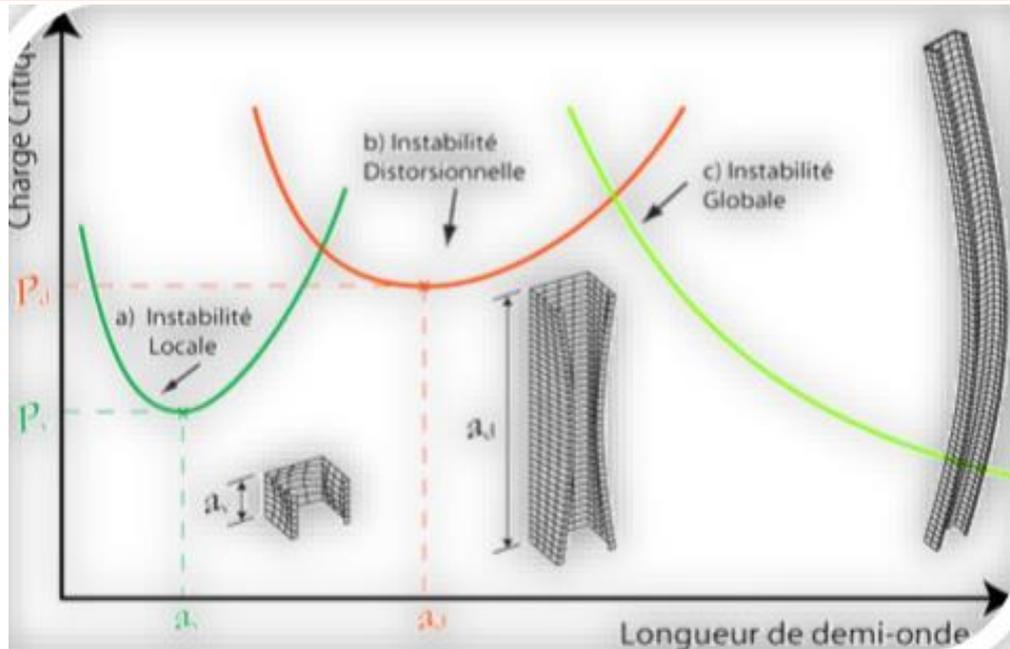


Figure I.27: Charges critiques et Formes déformés caractéristiques d'une section en C

I.13.1 L'instabilité locale :

Dans une instabilité locale, les parois planes d'un élément de structure se déforment d'une manière significative. La déformation de la section transversale est caractérisée par des rotations, sans aucune translation, au niveau des lignes d'intersection entre les éléments plans (Figure I.28). Ce mode d'instabilité est également caractérisé par le développement des ondulations sinusoïdales. La longueur de demi-onde de ces ondulations est plus petite que la plus grande dimension caractéristique de la section transversale. Ainsi, toutes les instabilités harmoniques dont les longueurs de demi-onde sont inférieures à la plus grande dimension caractéristique sont des instabilités locales ou de voilements.

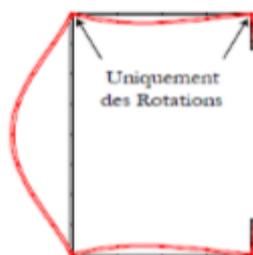


Figure I.28: Instabilité locale d'une section en C uniformément comprimée

I.13.2 L'instabilité globale

Dans une instabilité globale, la forme de la section transversale de l'élément de structure ne subit aucun changement. La section transversale se déplace en mode rigide, soit par une translation et/ou une rotation (Figure I .29). C'est une instabilité non périodique, c'est-à-dire qu'elle couvre toute la longueur du poteau ou de la poutre. Les modes globaux se produisent, donc, avec une seule demi-onde et la longueur de cette dernière est égale à la longueur effective de flambement. Il est à noter que la charge critique du flambement décroît lorsque la longueur augmente. L'instabilité prend la forme d'une instabilité par flexion (flambement d'Euler), par torsion ou par flexion/torsion pour le cas des poteaux, et la forme d'un déversement pour le cas des poutres fléchies.

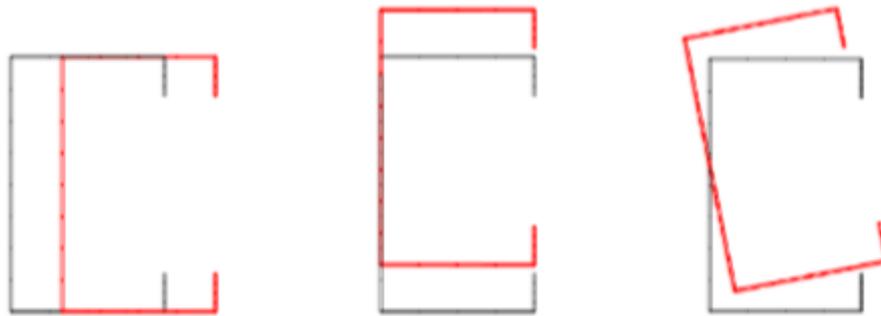


Figure I .29: Instabilités globales d'une section en C uniformément comprimée

I.13.3 Instabilité distorsionnelle

D'une manière générale, une instabilité distorsionnelle induit des déplacements et des rotations au niveau des lignes d'intersection entre les parois planes formant la section. Plus, précisément, une instabilité distorsionnelle est caractérisée par la déformation d'une partie de la section transversale avec un déplacement en mode rigide de l'autre partie. Comme exemple illustratif, les ensembles semelle – raidisseur de la section en C présentée dans la Figure I.30 se sont déplacés sans se déformer alors que l'âme a subi des déformations de type voilement.

Cette instabilité, comme le voilement, est une instabilité harmonique. Elle se produit en développant des ondulations dans le sens longitudinal. Typiquement, la longueur de la demi-onde est égale à plusieurs fois la dimension caractéristique de la section. Seulement, contrairement à l'instabilité locale, elle dépend fortement de la géométrie de la section ainsi que du type de chargement. D'autre part, il est important de souligner que le raidissage des parois planes peut limiter la rotation de la jonction âme/semelle dans la zone comprimée et donc retarder l'instabilité distorsionnelle. Aussi, les sections en C et en Z comprimées (ou fléchies)

exhibent souvent ce mode de base alors que pour d'autres sections l'instabilité distorsionnelle peut ne pas se produire, par exemple le cas des sections en U, I et L.

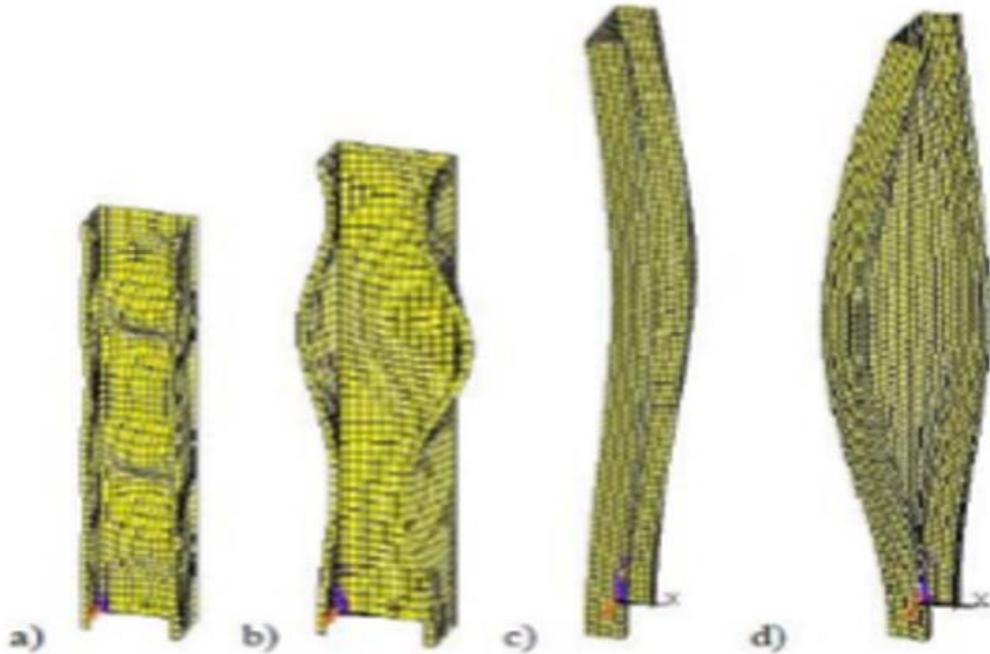


Figure I .30: Instabilité distorsionnelle d'une section en C uniformément comprimée

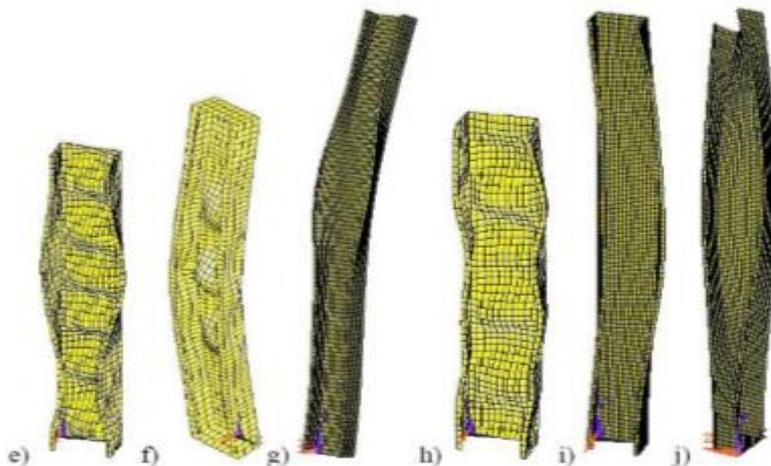
Les profils formés à froid soumis à des efforts de compression (ou de flexion) peuvent subir, au moins, trois types d'instabilité élastique de base : une instabilité locale, une instabilité globale ou une instabilité distorsionnelle. Cette classification vient du fait que chaque instabilité présente une réserve post-critique et une sensibilité aux imperfections particulières. De ce fait, il est indispensable de les identifier correctement afin de les utiliser dans la procédure de dimensionnement, notamment dans « la méthode de résistance directe » que nous présentons plus loin dans ce chapitre. Il y a lieu également de noter qu'une instabilité distorsionnelle possède une réserve post-critique plus faible que celle du voilement, alors qu'elle est beaucoup plus sensible aux imperfections que le mode local. L'instabilité distorsionnelle peut contrôler la rupture même dans les cas où la charge critique distorsionnelle est plus grande que la charge critique de voilement.

D'autre part, les définitions des modes purs d'instabilité données ci-dessus ne correspondent pas toujours à l'usage. À titre d'exemple, les longueurs de demi-ondes du « voilement » des sections en U (ou en L) peuvent être supérieures à la dimension caractéristique de la section. Il est possible aussi que le voilement se produise avec des longueurs de demi-ondes très petites par rapport à la dimension caractéristique de la section. Ceci peut arriver dans le cas où l'élément est soumis à une flexion (la partie comprimée de la section est petite devant la partie tractée) ou en présence de raidisseurs intermédiaires. D'autre part, les modes global et distorsionnel peuvent interagir entre eux à certaines longueurs, ce qui complique l'identification des instabilités Eulériennes.

D'une manière générale, les trois instabilités de base peuvent interagir entre elles à certaines longueurs. Cela complique l'identification des instabilités dans des analyses type MEF. La Figure I-31 présente certains modes purs ou en interaction d'une section en C comprimé. La section transversale, les conditions aux limites, le chargement ainsi que les états de raidissage compliquent l'identification des modes d'instabilité obtenus par les analyses numériques.



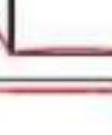
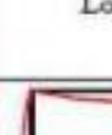
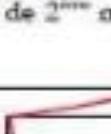
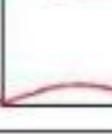
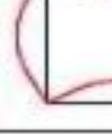
Modes purs: a) local (L), b) distorsionnel (D), c) flexional (F), flexional- distorsionnel (FT)



Modes couplés (avec interaction) : (e) local + distorsionnel, (f) flexional+ local, (g) local+ flexional- distorsionnel, (h) flexional+distorsionnel, (i) flexional+ distorsionnel, (j) flexional + flexional- distorsionnel

Figure I .31: Modes d'instabilité d'une section en C soumise à un effort axial (Dubina, 2002). [12]

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. [10]

| 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 |  |  |  |

I.13.4. Exemple réel de flexion en quatre points d'un profilé formé à froid de forme superoméga :

Le modèle numérique est une poutre de type super-oméga métallique 160x1.5 de 4 m de portée (Figure I .32). En acier S280, sur deux appuis sollicités par une charge de flexion en quatre points. Les caractéristiques géométriques et mécaniques sont présentées dans le tableau 1-4 :

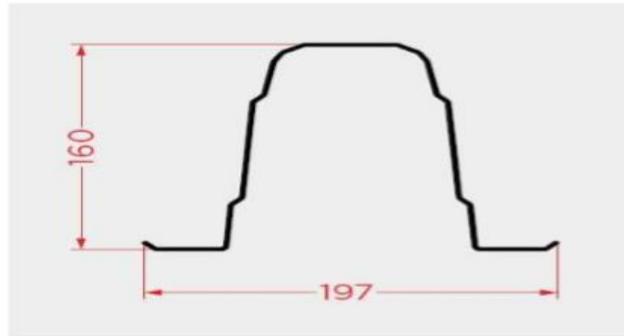


Figure I .32: Profilé formé à froid de forme super-oméga

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

| 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 |



Figure I .33: Essai de flexion quatre points de la poutre super-oméga.

Les flèches calculées au 1/4 de la poutre (points2) (Figure I .34), matérialisant les positions respectives des comparateurs placés lors de l'essai expérimental sont comparées. Les résultats obtenus sont présentées ci-dessous :

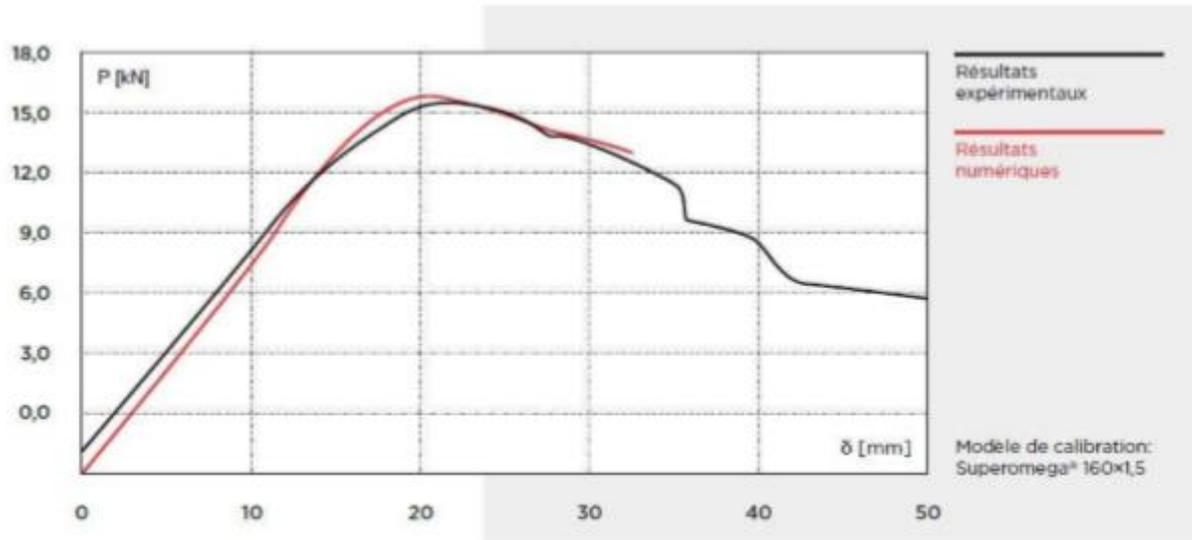


Figure I .34: Courbe charge -flèches à 1/4 de la poutre super-oméga

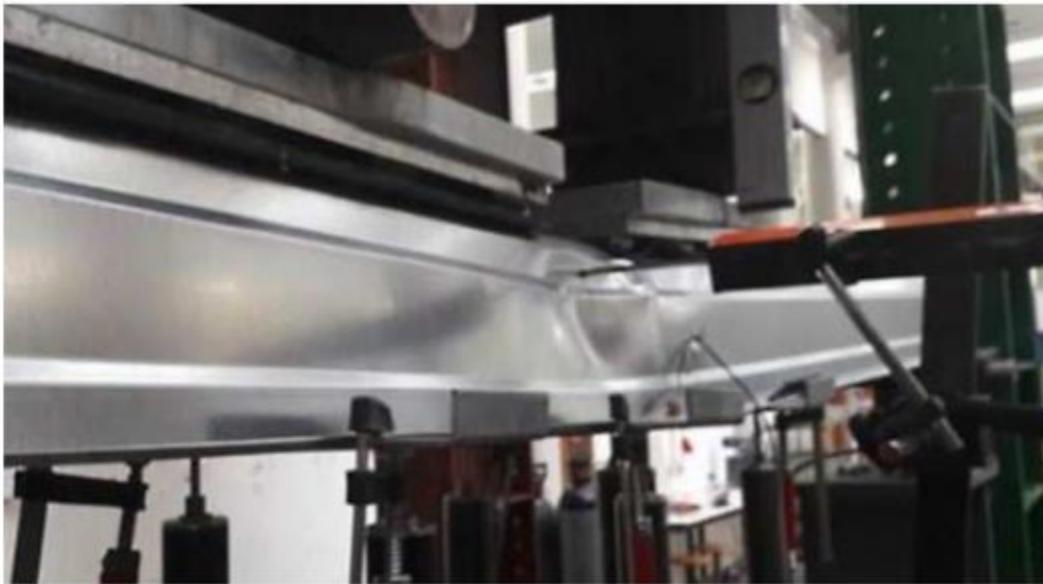


Figure I .35: voilement locale de la poutre super-oméga

Le phénomène d'instabilité locale de la section a été intégré à l'analyse par la détermination des propriétés efficaces de la section sous flexion selon l'axe de la plus grande inertie (positive et négative). Le résultat de ces expériences est de déterminer la section efficace, en pratique, est la réduction de la quantité d'acier est nécessaire pour les mêmes performances structurelles.

La polyvalence du Super omega 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 ;
- Structures pour étages intermédiaires ;
- Supports pour systèmes de panneaux photovoltaïques. [10]

I.14. ANALYSE ET METHODE DE CALCUL SELON EC 3 PARTIE 1.3 [13]

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.

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.

I.14.1 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.14.2 PROPORTIONS GEOMETRIQUES :

Soit l'épaisseur t des parois, la largeur b de la section et la longueur l d'un profilé. Lorsque les proportions satisfont les relations :

$$\frac{b}{t} \leq 10 \quad ; \quad \frac{l}{b} \leq 10$$

Selon VLASOV, le profil considéré peut être classé comme barre à parois minces quel que soit la forme de sa section. Il est évident que ces limites inférieures couvrent de larges types de profilés (formés à froid ou non). Cependant, il faut ajouter des limites supérieures pour les rapports largeur épaisseur des parois minces afin d'empêcher des déformations exagérées de celles-ci. Ces limites supérieures sont toujours liées aux profilés formés à froid. Elles sont données dans les divers codes et supposées représenter le champ pour lequel les expériences sont suffisantes.

I.15 Avantages et Inconvénient des profilés formés à froid et à parois minces :

Les profilés minces présentent des avantages très intéressants pour la construction. A titre d'exemples, on peut citer :

- Facilité de fabrication et de production en grande masse.
- Facilité de réalisation de section en toute forme géométrique.
- Grande résistance et grande rigidité.
- Légèreté du fait de la faible épaisseur.
- La durabilité des profilés grâce à leur protection anti corrosion qui est facilement appliquée avant la fabrication du profilé.
- Facilité du recyclage.
- Facilité de transport, de levage du fait de leur légèreté car ça demanderait des moyens de levage moins puissant.
- Rapidité et facilité de mise en place aussi du fait de leur légèreté.

En plus des avantages, ces types de profilés présentent certains inconvénients dont ceux dus aux défauts classiques de la charpente métallique comme la résistance au feu, les instabilités. Aussi, dû à leur légèreté et à la minceur de leurs éléments, on ne peut pas vraiment réaliser de très grandes structure.

Conclusion :

Les techniques de formage à froid permettent une variété quasi infinie de la forme des sections des éléments. Il est dès lors possible d'influencer la capacité d'un élément, en termes de résistance, de rigidité et de mode de ruine, par exemple en introduisant, à la fabrication, des raidisseurs intermédiaires dans la section ou par l'utilisation de rapports adéquats largeur épaisseur des parois de la section. Le mode de fabrication des profilés minces leur confère des particularités qui seront très avantageuses dans leur utilisation dans la construction en prenant en considération leurs instabilités qui sont de type local, global ou bien la combinaison des deux rendant le problème de l'étude de ces types de profilés plus complexes et difficiles à maîtriser. Plusieurs méthodes existent actuellement pour l'analyse et la compréhension du comportement des profilés minces formés à froid et dans un souci de pratique.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter le calcul des caractéristiques des sections formées à froid de types poutres selon l'Eurocode 3 partie 1-3 par méthode de la largeur efficace contenant des calculs itératifs pour la détermination des caractéristiques efficaces.

**CHAPITRE II : ASPECTS
REGLEMENTAIRE**

II- ANALYSE ET METHODE DE CALCUL SELON EC3 PARIE 1.3.

II-1. Introduction

Le comportement de poutres en double C en acier formé à froid a été étudié numériquement et analytiquement. Chaque poutre a été construite en assemblant deux sections de forme C des bord tombée avec ou sans raidisseurs d'âme dans la partie central les poutres : ((**PSR**)une poutre sans raidisseur d'âme , (**PRT**) une poutre avec un raidisseur d'âme triangulaire ; (**PRC**) une poutre avec des raidisseurs d'âme carrée , (**PRTD**) une poutre avec des raidisseurs trapézoïdaux.). L'assemblage des doubles C est effectué par des rivets. Les modèles prédisaient bien la performance des poutres construites formé froid avec ou sans raidisseurs à âme.

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-1.1. Base de calcul :

Les sections transversales peuvent être classifiées suivant leur capacité d'atteindre leur état limite. Cette classification est influencée par la capacité des sections à se plastifier et l'influence des instabilités.

II-1.2. 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 $\gamma_{MSer} = 1,0$

II -1.3. Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques et les nuances des aciers utilisés dans la formation des profilés formés à froid et à chaud recommandées par l'Eurocode sont synthétisées dans le tableau (II.1) suivant :

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

| Type d'acier | Norme | Nuance | N/m ² | N/mm ² |
|--|-----------|---------|------------------|-------------------|
| Tôle en acier de Construction laminée à chaud | EN10025 | S235 | 235 | 360 |
| | | S275 | 275 | 430 |
| | | S355 | 355 | 510 |
| Tôles en acier déconstruction haute limite d'élasticité laminées à chaud | EN10113-2 | S275N | 275 | 370 |
| | | S355N | 355 | 470 |
| | | S420N | 420 | 520 |
| | | S460N | 460 | 550 |
| | EN10113-3 | S275M | 275 | 360 |
| | | S355M | 355 | 450 |
| | | S420M | 420 | 500 |
| | | S460M | 460 | 530 |
| Tôles en acier de construction Laminée à froid | ISO4997 | CR220 | 220 | 300 |
| | | CR250 | 250 | 330 |
| | | CR320 | 320 | 400 |
| Tôles en acier de construction galvanisées à chaud en continu | EN10147 | FeE220G | 220 | 300 |
| | | FeE250G | 250 | 330 |
| | | Fe280G | 280 | 360 |
| | | FeE320G | 320 | 390 |
| | | FeE350G | 350 | 420 |

| | | | | |
|--|-----------|--------|-----|-----|
| Aciers à haute limite d'élasticité Pour formage à froid | EN10149-2 | S315MC | 315 | 390 |
| | | S355MC | 355 | 430 |
| | | S420MC | 420 | 480 |
| | | S460MC | 460 | 520 |
| | | S500MC | 500 | 550 |
| | | S550MC | 550 | 600 |
| | EN10149-3 | S260MC | 260 | 370 |
| | | S315MC | 315 | 430 |
| | | S355MC | 355 | 470 |
| | | S420MC | 420 | 530 |

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 :

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 formées à froid.

II -2.1. Concept De Largeur Efficace :

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 .

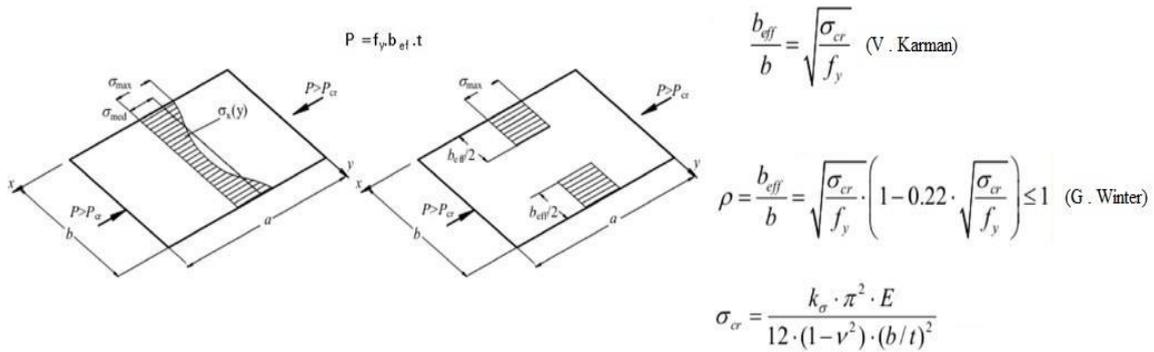


Figure II.1: Concept de largeur efficace (Eurocode3)

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.

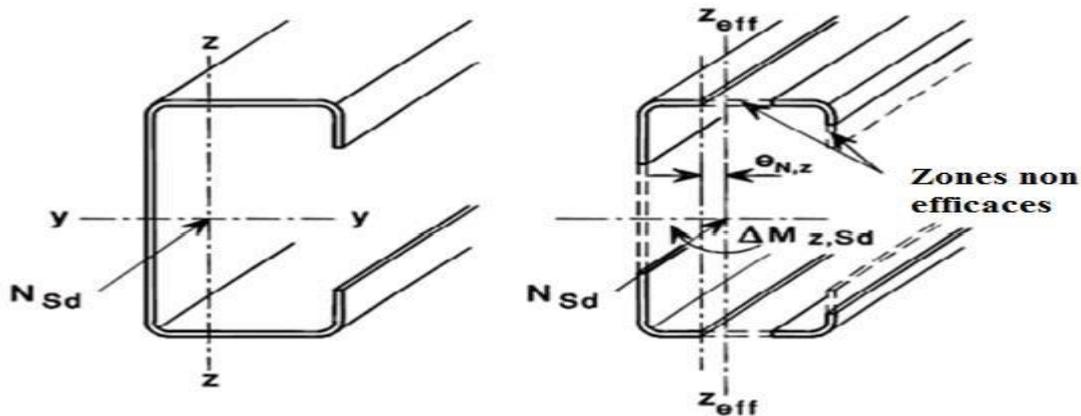


Figure II.2: Section transversale efficace d'un profile en forme C

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).

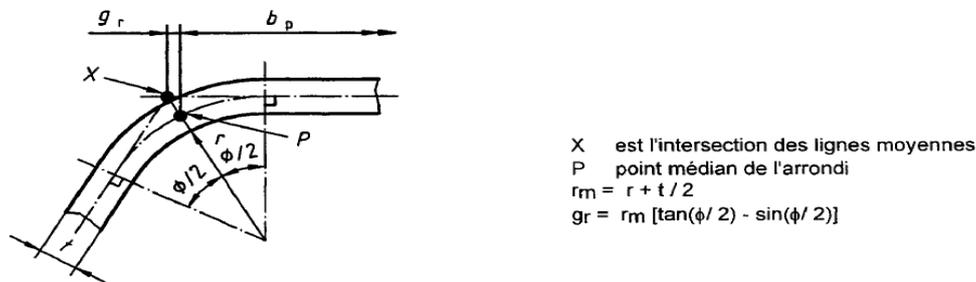


Figure II.3: Point médian d'un arrondi ou de pli

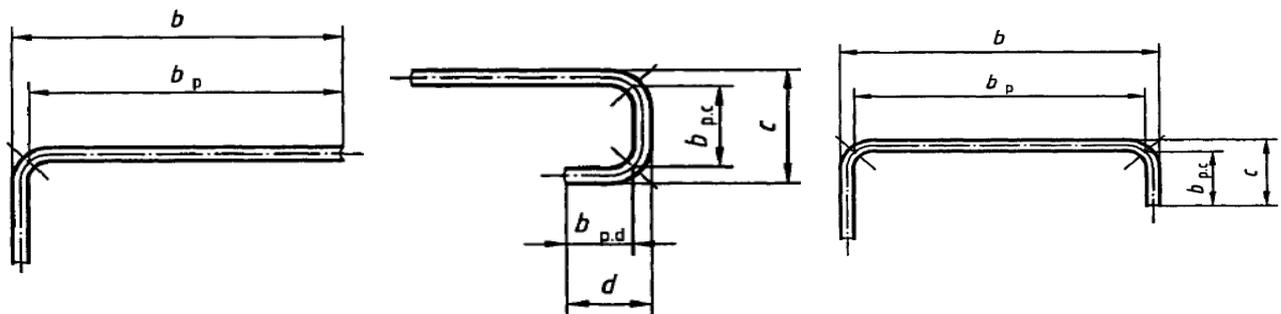


Figure II.4: Largeur de référence des parois

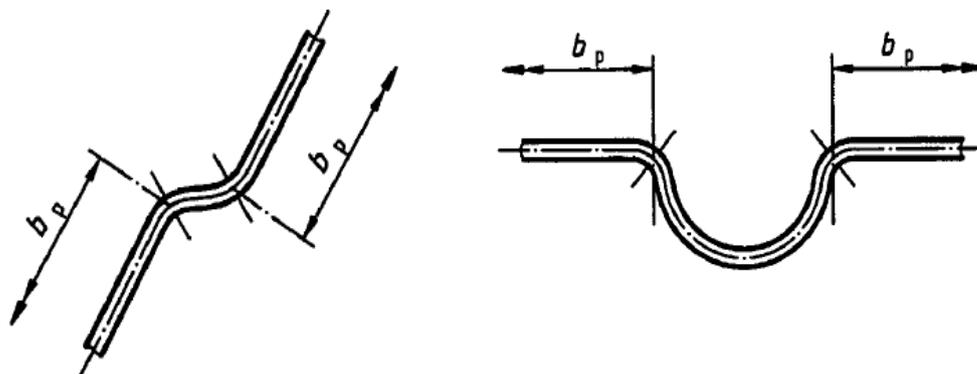


Figure II.5: Largeur de référence des parois adjacentes des raidisseurs

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 :

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

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 t_{cor} 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 $0,5mm \leq t \leq 4,0 mm$

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

II.3.2 Proportions géométriques

Le tableau suivant (II.2) présente les valeurs maximales des proportions géométriques des sections que doivent respecter les profilés.

Tableau II.2: Rapports largeur épaisseur maximum

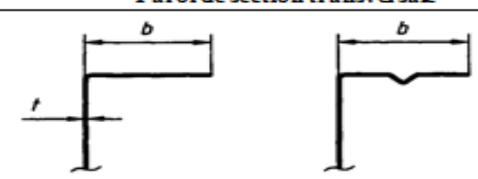
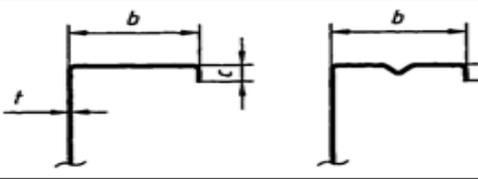
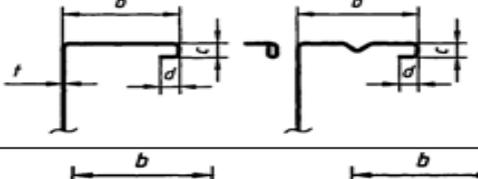
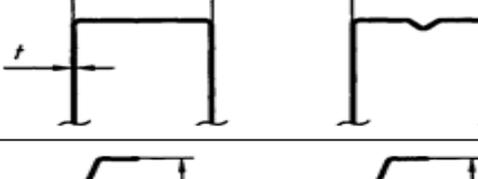
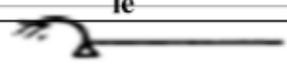
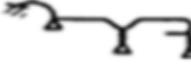
| Pari de section transversale | | Valeur maximale |
|---|--|--|
|  | | $b/t \leq 50$ |
|  | | $b/t \leq 60$ |
|  | | $b/t \leq 90$ |
|  | | $b/t \leq 500$ |
|  | | $45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$ |

Tableau II.3: Modélisation des parois d'une section transversale

| Type de paroi | modèle | Type de paroi | modèle |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

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 :

beff = ρb_p si $\sigma_{com, Ed} = f_{yb}/\gamma_{M1}$ Le facteur de réduction sera obtenu comme suit :

On calcule :

$$\lambda p = 1.052 \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{EK}}$$

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

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

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

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

Utiliser les expressions (1) et (2) mais remplacer l'élanement λp par l'élanement réduit λp_{red} .

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

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

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

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

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}

Tableau II.4: Parois comprimées sur deux appuis

| 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+ ψ) | 7,81 | 7,81- 6,29 ψ +9,78 ψ^2 | 23,9 | 5,98(1- ψ) 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.5: Parois comprimées en console

| Distribution des contraintes (compression positive) | | Largeur efficace b_{eff} | | | |
|--|------|---|------|--------------------------------|------|
| | | $1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = pc$ | | | |
| | | $\psi < 0:$ $b_{eff} = pb_1 - pc / (1 - \psi)$ | | | |
| $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ | 1 | 0 | -1 | $1 \geq \psi \geq -1$ | |
| Coef. de voilement k_x | 0,43 | 0,57 | 0,85 | $0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$ | |
| | | $1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = pc$ | | | |
| | | $\psi < 0:$ $b_{eff} = pb_1 - pc / (1 - \psi)$ | | | |
| $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ | 1 | $1 > \psi > 0$ | 0 | $0 > \psi > -1$ | -1 |
| Coefficient de Voilement k_x | 0,43 | $\frac{0,578}{\psi + 0,34}$ | 1,70 | $1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$ | 23,8 |

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

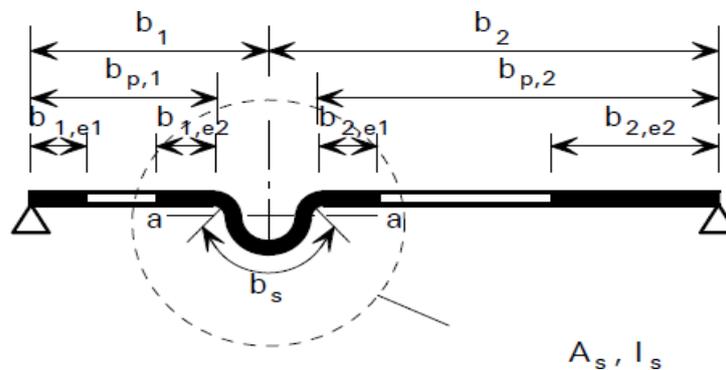


Figure II.6: raidisseur intermédiaire

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 raidisseur de 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.

S'il y a présence de raidisseurs dans la section on doit suivre la procédure itérative suivante pour déterminer les largeurs efficaces (figure 2.II).

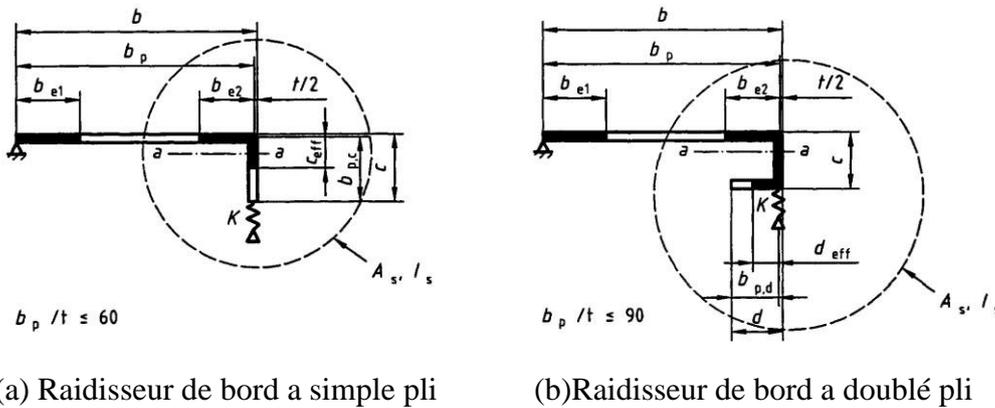


Figure II.7: Raidisseur de bord

S'il y a présence de raidisseurs dans la section on doit suivre la procédure itérative suivante pour déterminer les largeurs efficaces (figure II).

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 :

$$K = 0.5 \quad b_{p,c}/b_p \leq 0.35$$

$$K = 0.83^3 \sqrt{\frac{b_{p,c}}{b_p} \times 0.35^2} \quad 0.35 < b_{p,c}/b_p \leq 0.5$$

$$C_{eff} = \rho b_{p,c} \text{ Pour un raidisseur de bord à simple pli (figure II.)}$$

$$C_{eff} = \rho b_{p,c} \text{ et } d_{eff} = \rho b_{p,d} \text{ Pour un raidisseur de bord à double pli (figure II.)}$$

$$A_s = t(b_{e2} + C_{eff} + d_{eff}) \text{ Pour un raidisseur de bord}$$

$A_s = t(b_{1,e2} + b_{2,e1} + b_s)$ 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 :

$$\chi_d = 1,0 \quad \text{si } \lambda_d \leq 0.65$$

$$\chi_d = 1.47 - 0.723 \lambda_d \quad \text{si } 0.65 < \lambda_d < 1.38$$

$$\chi_d = 0.66 / \lambda_d \quad \text{si } 1.38 \leq \lambda_d$$

Étape 3 : on répète l'étape 1 en calculant la largeur efficace avec la contrainte de compression réduite $\sigma_{cr,s} = \chi_d f_y b / \gamma M_1$ avec χ_d de l'itération précédente jusqu'à :

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

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 $N_{t,rd}$

$$N_{t,rd} = f_y a A_g / \gamma M_0 \quad \text{mais} \quad N_{t,rd} \leq F_{t,rd}$$

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_{cr}

$$\text{Si } A_{eff} < A_g N_{c,rd} = f_y b A_{eff} / \gamma M_1$$

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

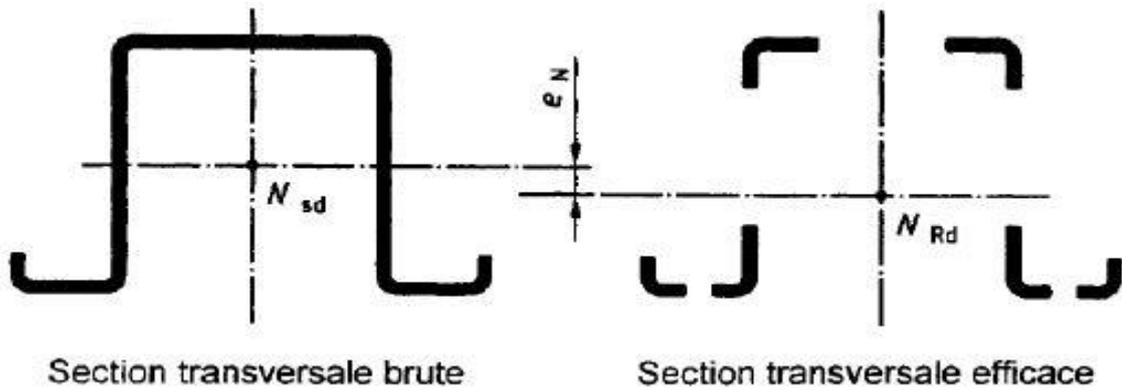


Figure II.8: Section transversale efficace en compression.

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 $M_{c,rd}$.

$$\text{Si } W_{eff} < W_{el} \quad M_{c,rd} = f_y W_{eff} / \gamma_{M1}$$

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

f_y Est la limite élastique telle que définie dans tableau 2.1

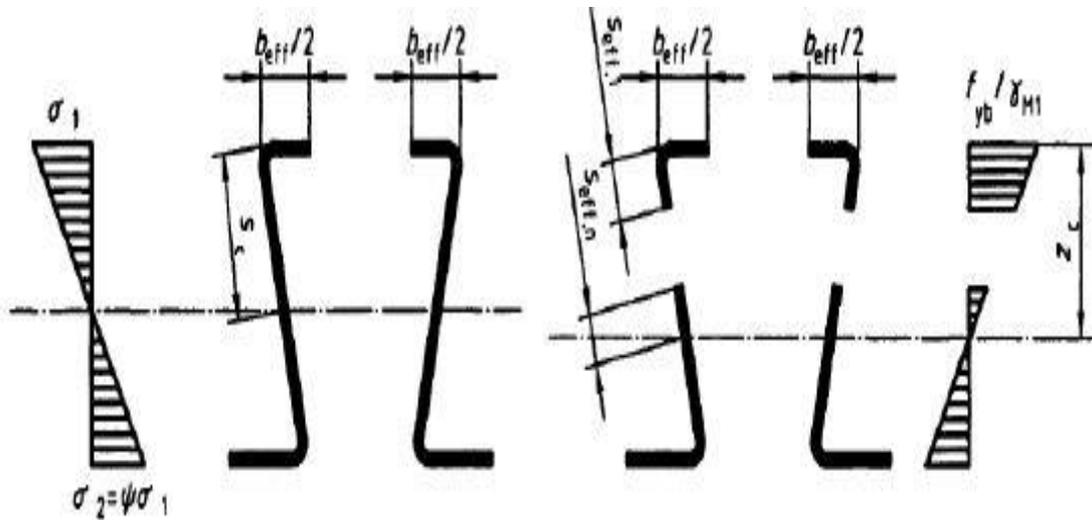


Figure II.9: Section transversale efficace en résistance en moment fléchissant

II.5.4. Traction et flexion combinées :

Les sections transversales soumise à une combinaison de traction axiale Nsd et de moments fléchissant My, sd et Mz, sd .

Si $W_{eff,y,ten} \geq W_{eff,y,com}$ ou $W_{eff,z,ten} \geq W_{eff,z,com}$ (ou $W_{eff,y,com}$ et $W_{eff,z,com}$ 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 Nsd et de moments fléchissant My, sd et Mz, sd .

II.5.6. Effort tranchant :

La résistance de l'âme à l'effort tranchant Vw, Rd doit être prise égale à la plus petite valeur entre la résistance au voilement de cisaillement $Vb, Rdet$ la résistance plastique au cisaillement Vpl, Rd . Il convient de vérifier la résistance plastique au cisaillement Vpl, Rd dans le cas d'une âme dépourvue de raidisseur longitudinaux.

II.6. Assemblages par déformation (rivetage) :

II.6.1. Introduction :

Les rivets sont des éléments de fixation permanent, ils sont largement utilisés dans les avions, les équipements de transport, dans la construction de bâtiments, les chaudières, les ponts, les navires, l'automobile, l'électroménager, l'électronique etc.... Les rivets ont remplacé les éléments filetés car ils sont beaucoup moins chers que les boulons. Les rivets peuvent également servir d'arbres de pivot (comme dans les meubles de jardin pliants), de contacts électriques, de butées etc....

II.6.2. Principe du rivetage :

Le rivet est constitué d'une tige cylindrique (fût) qui se termine, à une extrémité, par une tête. La forme variable de la tête donne son nom au rivet. Après la mise en place, l'autre extrémité du rivet est refoulée, ce qui forme la « rivure ».

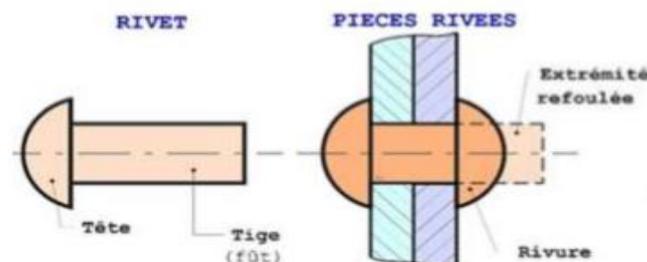


Figure II.10: Principe du rivetage

Afin de réaliser un assemblage par rivetage, il faut d'abord percer des trous (soit par perçage, soit par poinçonnage, soit par poinçonnage et alésage) dont le diamètre est légèrement supérieur au diamètre du fût. Viennent ensuite la mise en place des rivets et la bouterolle, pour façonner la rivure.

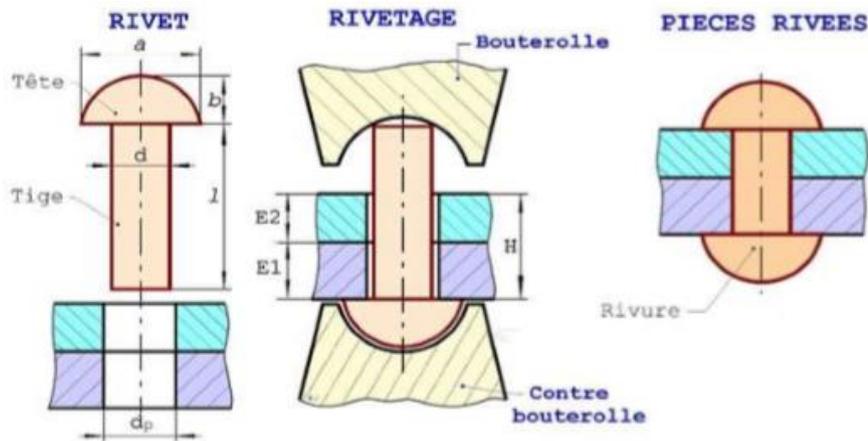


Figure II.11: un assemblage par rivetage

II.6.3. Section, longueur du rivet et diamètre de perçage :

Dans la pratique, pour déterminer le diamètre d (en millimètre) du rivet en fonction de l'épaisseur (en millimètre) des tôles. On utilise la formule suivante :

$$d = \frac{45 \cdot H}{(15 + H)}$$

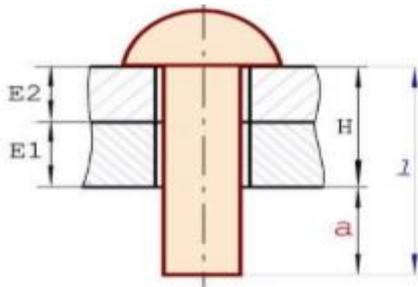
C'est une bonne règle de bonne pratique

Le diamètre de perçage :

Le trou d_p doit être supérieur au diamètre d du rivet, pour faciliter la pose.

| Matériaux | Diamètre de perçage | Diamètre de rivet |
|------------------|----------------------------------|------------------------|
| Métaux semi durs | $d_p \approx d + 1 \text{ mm}$ | $d \geq 10 \text{ mm}$ |
| Métaux ductile | $d_p \approx d + 0.1 \text{ mm}$ | $d \leq 10 \text{ mm}$ |
| | $d_p \approx d + 0.2 \text{ mm}$ | $d > 10 \text{ mm}$ |

La longueur du rivet :



$$I \approx \sum E + a \quad \text{avec } a = (0.7 \text{ à } 1.3) \cdot d$$

Figure II. 12: La longueur du rivet

Lorsque le modelage du rivet est parfait, le trou est entièrement rempli. Cependant, cette condition ne peut être vérifiée que si le rivet n'est pas trop long. Un rivet trop long peut en effet flamber lors de façonnage, ce qui rend le remplissage impossible. C'est pourquoi il convient de respecter la condition :

$$\sum E \leq 4 \cdot d$$

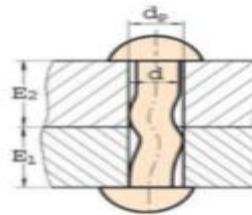


Figure II.13: effet flamber de façonnage de revêt

II.6.5. Rivets usuels :

| | |
|-----------------------|---------------------------------------|
| <i>Rivure ronde</i> | $I \approx 1,1 \cdot H + 1,5 \cdot d$ |
| <i>Rivure fraisée</i> | $I \approx 1,1 \cdot H + 0,6 \cdot d$ |
| <i>Pose à chaud</i> | $d_p \approx 1,1 \cdot d$ |
| <i>Pose à froid</i> | $d_p \approx 1,05 \cdot d$ |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|---|-----|-----|---|---|----|----|----|----|----|----|---|-----|-----|---|---|-----|-----|---|---|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|--------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|
| <p>Rivets à tête ronde Symbole : R NF E 27-153</p> | <table border="1"> <tr> <td>d</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td> </tr> <tr> <td>a</td><td>3,5</td><td>5,5</td><td>7</td><td>9</td><td>11</td><td>14</td><td>17</td><td>21</td><td>24</td><td>28</td> </tr> <tr> <td>b</td><td>1,5</td><td>2,5</td><td>3</td><td>4</td><td>4,5</td><td>5,5</td><td>7</td><td>8</td><td>10</td><td>11</td> </tr> <tr> <td>c</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>28</td><td>30</td><td>34</td> </tr> <tr> <td colspan="11">Longueur de la tige "l"</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>20</td><td>25</td> </tr> <tr> <td>30</td><td>32</td><td>35</td><td>38</td><td>40</td><td>45</td><td>50</td><td>55</td><td>60</td><td>65</td><td>70</td> </tr> <tr> <td>75</td><td>80</td><td>85</td><td>90</td><td>100</td><td>110</td><td>120</td><td>130</td><td>140</td><td>-</td><td>-</td> </tr> </table> | d | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | a | 3,5 | 5,5 | 7 | 9 | 11 | 14 | 17 | 21 | 24 | 28 | b | 1,5 | 2,5 | 3 | 4 | 4,5 | 5,5 | 7 | 8 | 10 | 11 | c | - | - | - | - | - | - | - | 28 | 30 | 34 | Longueur de la tige "l" | | | | | | | | | | | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 20 | 25 | 30 | 32 | 35 | 38 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | - | - |
| d | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| a | 3,5 | 5,5 | 7 | 9 | 11 | 14 | 17 | 21 | 24 | 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| b | 1,5 | 2,5 | 3 | 4 | 4,5 | 5,5 | 7 | 8 | 10 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| c | - | - | - | - | - | - | - | 28 | 30 | 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Longueur de la tige "l" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 20 | 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 32 | 35 | 38 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 75 | 80 | 85 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Rivets à tête fraisée Symbole : F/90 NF E 27-154</p> | <p>Rivets à tête Cylindrique plate Symbole : C NF E 27-151</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

II.6.6. Montage des rivets à froid ($d < 10$ mm) :

Le rivet est monté par écrasement du matériau qui forme des obstacles (tête du rivet et la rivure). L'assemblage obtenu est un assemblage par obstacle.

II.6.7. Disposition des rivets :

Il y a deux types de disposition des rivets : rivures courantes (rivures en chaîne) et rivures étanches (rivures en quinconce) comme il est indiqué dans la figure ci-dessous. Le pas, appelé aussi écartement, d'une rivure de force est plus grand que celui d'une rivure d'étanchéité.

Disposition en chaîne :

Dans laquelle les rivets sont ordonnés et alignés avec un espacement respecté

Disposition en quinconce :

Dans ce cas, il y a une disposition des rivets par alternance dans chaque colonne, et parfois on trouve qu'il n'y a aucun ordre de placement des rivets, c.-à-d. ils sont répartis d'une façon aléatoire

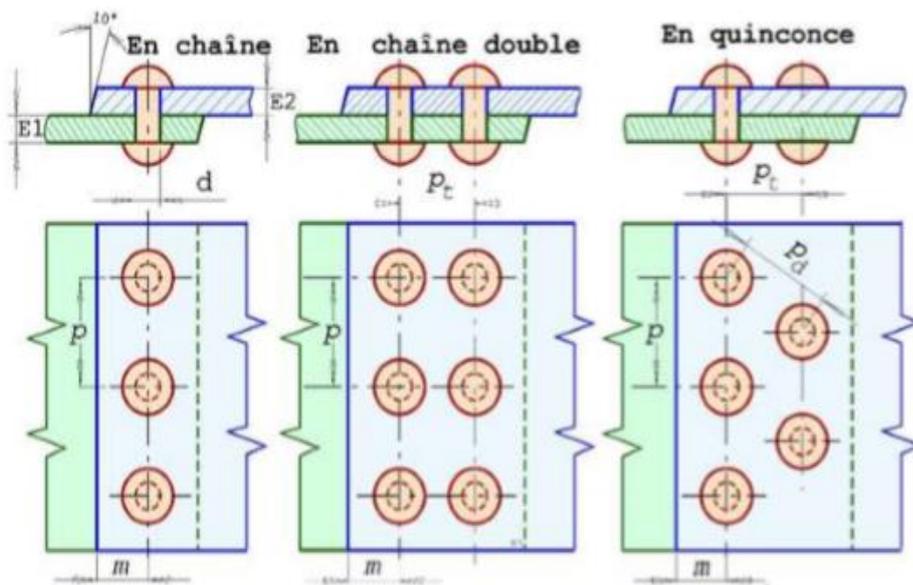


Figure II. 14: disposition des rivets

| | |
|--|---------------|
| <i>Le pas (p) du rivet est défini comme la distance entre le centre d'un rivet et le centre du rivet adjacent dans la même rangée</i> | $P = 3. d$ |
| <i>Marge (m) est la distance entre le bord de la plaque et l'axe des rivets de la rangée la plus proche</i> | $M = 1,5. d$ |
| <i>Pas transversal (Pt), également appelé pas arrière ou pas de rangée, est la distance entre deux rangée consécutives de rivets dans la même plaque</i> | $Pt = 0,8. d$ |
| | $Pt = 0,6. d$ |
| <i>Pas diagonal (Pd) est la distance entre le centre d'un rivet et le centre du rivet adjacent situé dans la rangée adjacente</i> | / |

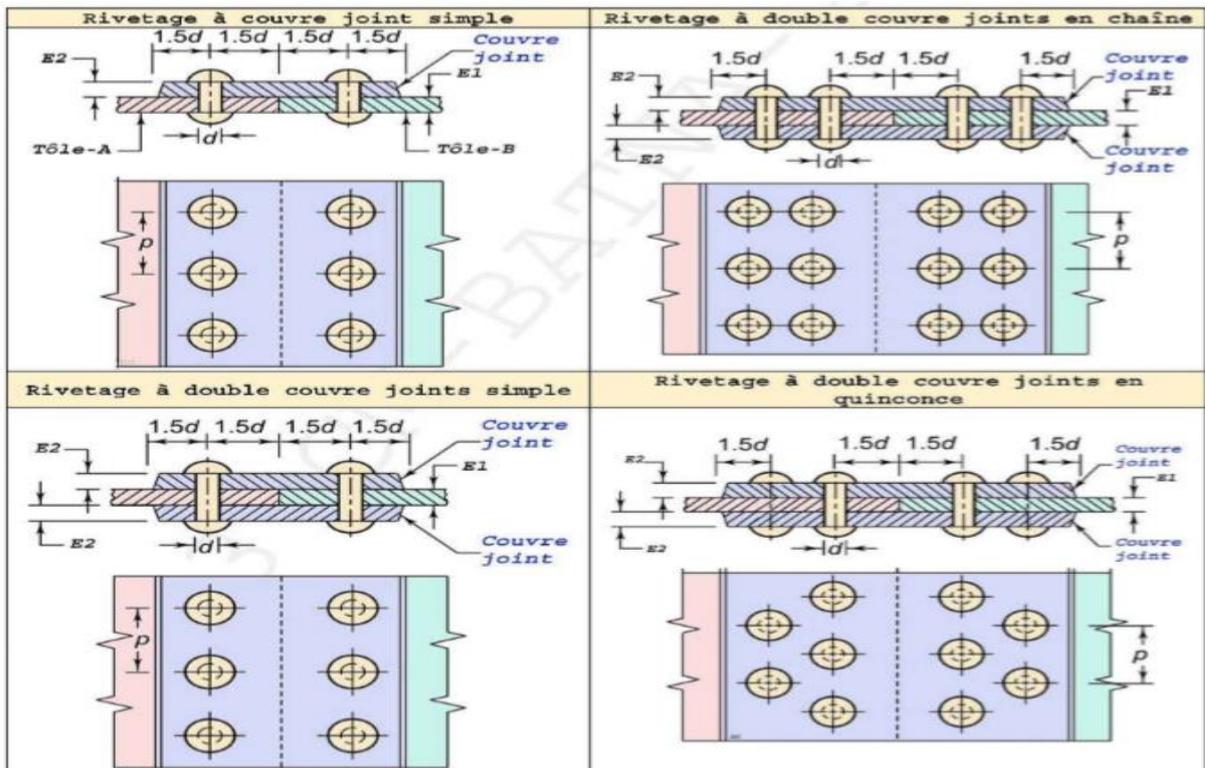


Figure II.15: type de rivetage

II.6.8. Types de ruptures dans les assemblages rivetés :

Les types de rupture dans les assemblages rivetés sont illustrés à la figure ci-dessus, la défaillance du joint riveté peut se produire des manières suivantes :

- (a) - Cisaillement du rivet ;
- (b) - Rupture de la plaque entre deux rivets consécutifs,
- (c) - Ecrasement de la plaque ;
- (d) - Cisaillement de la plaque dans la zone de marge ;
- (e) - Déchirure de la plaque dans la zone de marge.

II.6.9. Hypothèses sur le calcul des rivets :

Jeu radial nul entre le rivet et son perçage ;

Pression de contact radial uniforme entre perçage-rivet. Les têtes des rivets sont rarement sollicitées à la traction. Dans la plupart des cas, le rivet est soumis au simple cisaillement. Nous allons présenter trois cas de ruptures

II.7 Exemple D'analyse Des Poutres Selon Ec3 :

II.7.1. Introduction :

Les profilés en acier formé à froid ont été utilisés dans de nombreuses applications d'ingénierie dans le monde entier en raison de leur poids propre minimal, de leurs performances structurelles en altitude et de leurs excellentes caractéristiques pendant le processus de fabrication et les étapes de construction. Ces sections sont généralement fabriquées par pressage des freins ou laminage à froid à partir de tôles d'acier lisses pour obtenir la tôle sous n'importe quelle forme requise telle que Z, chapeau, canal (C) et autres sections ouvertes simples. Ces sections sont les suivantes : Ces profilés sont normalement plus minces que les profilés laminés à chaud : selon les exigences du procédé de fabrication, l'épaisseur des feuilles formé à froid ne dépasse pas 6 mm. Par conséquent, ces sections sont vulnérables au flambage global, flexion, de torsion et local, et à leurs interactions sous les forces de compression ; De tels comportements ne sont pas observés dans les sections laminées à chaud. De mieux que les profilés formés à froid présentent les avantages de la flexibilité et de la facilité de fabrication, ils ont une rigidité tensionnelle relativement faible. Lorsqu'une plus grande capacité de rigidité flexionnelle, axiale ou locale est nécessaire, par exemple autour des ouvertures dans les jambages, les collecteurs, les cordes de paroi de cisaillement, plusieurs sections sont assemblées pour façonner une section formée à froid construite. Pour surmonter le défi de la faible rigidité en torsion, les sections formées à froid construites peuvent être transformées en deux sections symétriques

II.7.2. Travaux expérimentaux :

Quatre poutres formé à froid d'une longueur de 1000 mm ont été fabriquées en usine et testées jusqu'à ce que leur comportement en flexion soit totalement insuffisant. Chaque poutre a été façonnée en assemblant deux sections ouvertes simples avec des revêt auto taraudeuses dans le sens longitudinal de la poutre. L'espacement nominal entre les revêt était de 158.33mm, et un espacement plus petit de 25 mm a été prévu sur les bords des poutres pour empêcher tout glissement gênant entre les sections. Les deux sections ouvertes simples ont été reliées par deux rangées de vis sur la bande pour façonner les sections dos à dos. La longueur nominale et le diamètre des revêt étaient respectivement de 3 et 7.5 mm. Les échantillons ont été pressés au frein à partir d'une feuille forme à froid d'épaisseur 1,5 mm et de longueur totale de 240 mm. La largeur de la bride était de 50 mm et raidisseur de bord de longueur 10mm et l'âme était fabriquée avec divers raidisseurs (raidisseurs inclinés discontinus ; raidisseurs linéaires triangulaires, trapézoïdaux et discontinus) avec la même longueur totale que celle de l'âme, soit 120 mm.

Model 1 : *PSR*, une poutre sans raidisseur d'âme ;

Model 2 : *PRT*, une poutre avec un raidisseur d'âme triangulaire ;

Model 3 : *PRC*, une poutre avec des raidisseurs d'âme carrée,

Model 4 : *PRTD*, une poutre avec des raidisseurs trapézoïdaux.

Dans les poutres, il y a trois plaques de raidissement d'épaisseur 6 mm et de largeur 50 mm ont été soudées sur les deux côtés des âmes et une plaque de transfert de charge ont été

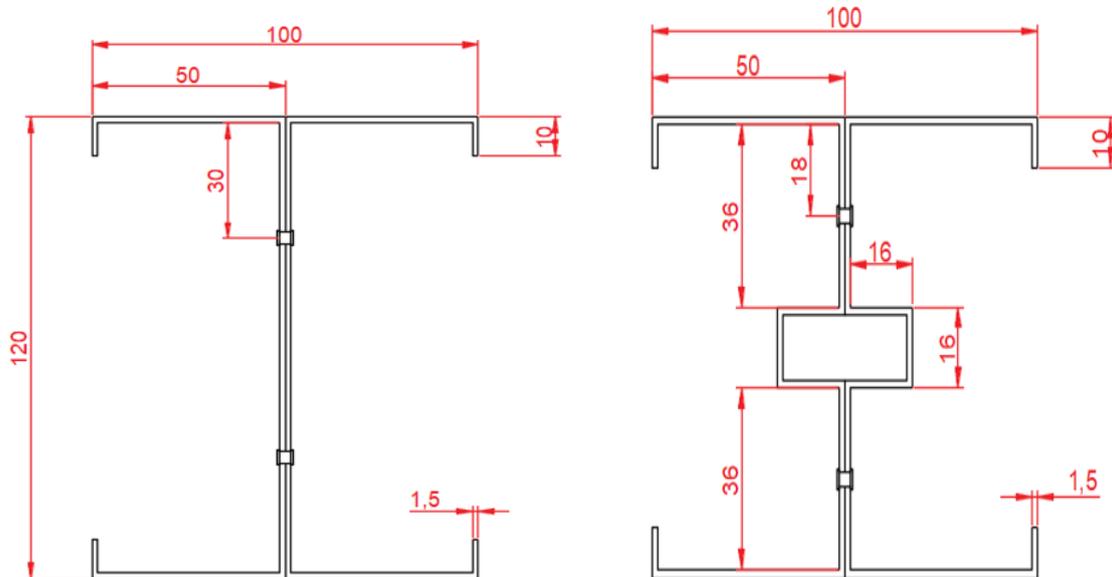
boulonnées sur les brides. Les revêt ont été fixées par des boulons au moment d'assembler des plaques de raidissement en acier ou des plaques de transfert de charge pour l'échantillon. La Fig. II8 montre les dimensions de la section transversale mesurées, le type de raidisseurs et l'emplacement des vis le long de la section transversale. Les emplacements des plaques et des vis de transfert de charge et de raidissement le long de la poutre

Sont représentés à la Fig. II7. Pour inspecter les propriétés du matériau, des essais de coupons de traction ont été effectués ; Les coupons ont été pris des toiles dans le sens longitudinal. Leurs résultats peuvent être résumés comme suit :

Limite d'élasticité, F_y , 250 MPa ;

Le module initial de Young, E , 201 GPa ;

La résistance ultime à la traction, r_u , 250 MPa ;



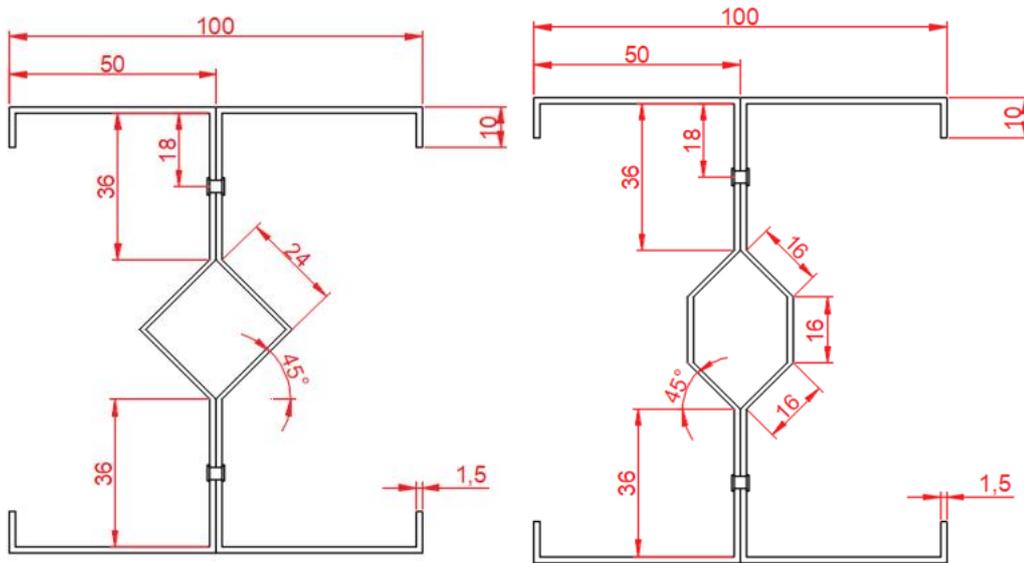


Figure II.16: Présentation des modèles assemblés face à face avec de différents forme de raidisseurs d'âme

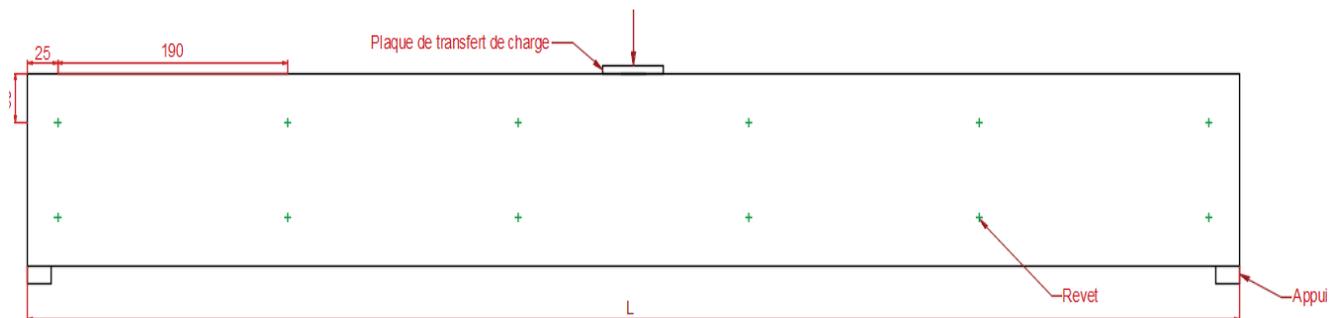


Figure II.17: La disposition des revêt et l'emplacement des plaques de raidissement le long de la poutre

Les donné du profilé en C :

Données

Les dimensions de la section transversale et les propriétés du matériau sont les suivantes :

Hauteur totale $h = 120 \text{ mm}$

Largueur totale de la semelle supérieure $b1 = 50 \text{ mm}$

Largueur totale de la semelle inférieure $b2 = 50 \text{ mm}$

Largueur totale du bord tombé $c = 10 \text{ mm}$

Epaisseur nominale $tnom = 2 \text{ mm}$

Epaisseur nominale de métal nu $t = 1,5 \text{ mm}$

Limite d'élasticité de base $fyb = 250 \text{ MPa}$

Module d'élasticité $E = 210000 \text{ MPa}$

Coefficient de Poisson $\nu = 0,3$

Coefficient partiel $\gamma_{m0} = 1,0$

Les dimensions de la ligne moyenne de la section sont les suivantes :

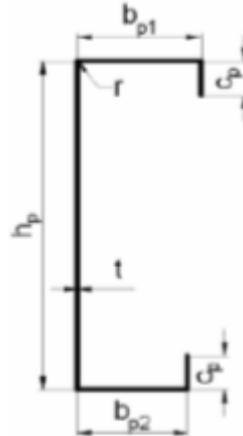


Figure II.18: Caractéristiques géométriques de la section type C

II.7.3. 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 : $hp = h - t_{nom} = 120 - 2 = 118 \text{ mm}$

Largeur de la semelle comprimée : $bp1 = b1 - t_{nom} = 50 - 2 = 48 \text{ mm}$

Largeur de la semelle tendue : $bp2 = b2 - t_{nom} = 50 - 2 = 48 \text{ mm}$

Largeur du bord : $cp = c - t_{nom}/2 = 9 \text{ mm}$

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**)

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 |
| $b/t \leq 60 \Rightarrow$ | $50/1.5 = 33.33 < 60$ | Vérifiée |
| $h/t \leq 500 \Rightarrow$ | $120/1.5 = 80 < 500$ | Vérifiée |
| $c/t \leq 50 \Rightarrow$ | $10/1.5 = 6.66 < 50$ | 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 :

$$45o \leq \alpha \leq 135o \Rightarrow 45o \leq 90o \leq 135o \quad \text{Vérfiée}$$

$$0.1 \leq c/b \leq 0.3 \Rightarrow 10/50 = 0.2 \quad \text{Vérfiée}$$

L'influence des arrondis est négligée si :

$$r/t \leq 5 \Rightarrow 2/1.5 = 1.33 < 5 \quad \text{Vérfiée}$$

$$r/bp \leq 0.1 \Rightarrow 2/48 = 0.041 < 0.1 \quad \text{Vérfiée}$$

Propriétés de la section brute :

$$Ab = t \times [2bp \times 2Cp \times hp]$$

$$Ab = 1.5 \times [(2 \times 48) + (2 \times 9) + (118)] = 348 \text{ mm}^2$$

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

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

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

$$Z = 1.5 \times \left[\frac{\left(9 \times \left(118 - \frac{9}{2} \right) \right) + \left(\frac{118^2}{2} \right) + (48 \times 118) + \left(\frac{9^2}{2} \right)}{348} \right]$$

$$Z = 59 \text{ mm}$$

II.7.4 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 phases :

Premier phase : 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 ($\sigma_{com, Ed} = fyb/\gamma M0$).

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

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{250}} = 0.96$$

L'élancement réduit :

$$\lambda_{bp1} = \frac{\frac{b_{p1}}{t}}{28.4 * \varepsilon * \sqrt{k}} = \frac{\frac{48}{1.5}}{28.4 * 0.96 * \sqrt{4}} = 0.586$$

$$p_1 = \frac{\lambda_{bp1} - 0,055(3 + \psi)}{\lambda_{bp1}} = \frac{0.586 - 0,055(3 + 4)}{0.586^2} = 0.585 < 1$$

Largeur efficace est :

$$b_{eff1} = p_1 * b_{p1} = 0.585 * 48 = 28.08mm$$

$$b_{e1} = 0.5 * b_{eff1} = 14.04mm$$

Pour la semelle inférieure :

$$\lambda_{bp2} = \frac{\frac{b_{p2}}{t}}{28.4 * \varepsilon * \sqrt{k}} = \frac{\frac{48}{1.5}}{28.4 * 0.96 * \sqrt{4}} = 0.586$$

$$p_2 = \frac{\lambda_{bp2} - 0,055(3 + \psi)}{\lambda_{bp2}} = \frac{0.586 - 0,055(3 + 4)}{0.586^2} = 0.586 < 1$$

Largeur efficace est :

$$b_{eff2} = p_2 * b_{p2} = 0.586 * 48 = 28.08mm$$

$$b_{e2} = 0.5 * b_{eff2} = 14.04mm$$

Largeur efficace des bords tombé :

➤ **Pour les bords tombés supérieur :**

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

Le coefficient de flambement est

$$\text{si } \frac{c_p}{b_p} \leq 0.35 \quad k_{\sigma} = 0.5$$

$$\text{si } 0.35 \leq b_{p,c} / b_p < 0,6 \quad k_{\sigma} = 0,5 + 0,83\sqrt{(b_{p,c}/b_p - 0,35)^2}$$

$$\frac{C_p}{b_p} = \frac{9}{48} = 0.18 < 0.35 \rightarrow \quad k_{\sigma} = 0.5$$

L'élancement réduit :

$$\lambda_{pc} = \frac{\frac{c_p}{t}}{28.4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{9}{1.5}}{28.4 * 0.96 * \sqrt{0.5}} = 0.31$$

Le coefficient de réduction de la largeur est :

$$\bar{\lambda}_p, c_1 < 0,748 \quad \text{donc } \rho_1 = 1$$

$$C_{eff1} = \rho \times C_p = 1 \times 9 = 9 \text{ mm}$$

Aire efficace des raidisseurs du bord

$$A_{s1} = 2(t(be1 + c_{eff}))$$

$$A_{s1} = 2(1.5(14.04 + 9))$$

$$A_{s1} = 69.12 \text{ mm}^2$$

➤ **Pour le bord tombé inférieur :**

Le coefficient de flambement est :

$$\text{si } \frac{c_p}{b_p} \leq 0.35 \quad k_\sigma = 0.5$$

$$\text{si } 0.35 \leq b_{p,c} / b_p < 0,6 \quad k_\sigma = 0,5 + 0,83\sqrt{(b_{p,c}/b_p - 0,35)^2}$$

$$\frac{C_p}{b_p} = \frac{9}{48} = 0.18 < 0.35 \rightarrow \quad k_\sigma = 0.5$$

L'élancement réduit :

$$\lambda_{pc} = \frac{\frac{c_{p2}}{t}}{28.4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{9}{1.5}}{28.4 * 0.96 * \sqrt{0.5}} = 0.31$$

Le coefficient de réduction de la largeur est : $\lambda_{pc} < 0,748$ donc $\rho_1 = 1$

$$C_{eff2} = \rho \times c_p = 1 \times 9 = 9 \text{ mm}$$

Aire efficace des raidisseurs du bord :

$$A_{s2} = 2(t(be2 + c_{eff}))$$

$$A_{s1} = 2(1.5(14.04 + 9))$$

$$A_{s2} = 69.12 \text{ mm}^2$$

Deuxième phase :

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 :

$$\sigma_{cr,s} = (2\sqrt{KEI_s})/A_s$$

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 :

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

Avec :

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

$$b_1 = b_p - \frac{b_{e1} * t * \frac{b_{e1}}{2}}{(b_{e1} + c_{eff}) * t} = 48 - \frac{14.04 * 1.5 * \frac{14.04}{2}}{(14.04 + 9) * 1.5} = 43.72mm$$

$$b_1 = 43.72 \text{ mm}$$

$$Kf = \frac{As_2}{As_1} = \frac{69.12}{69.12} = 1$$

Le moment d'inertie efficace :

$$I_{s1} = \frac{b_{e12} \times t^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 \times t}{12} + b_{e12} \times t \left[\frac{c_{eff}^2}{2(b_{e12} + c_{eff})} \right]^2 + c_{eff} \times t \left[\frac{c_{eff}}{2} - \left[\frac{c_{eff}^2}{2(b_{e12} + c_{eff})} \right]^2 \right]^2$$

$$I_{s1} = \frac{14.04 \times 1.5^3}{12} + \frac{9^3 \times 1.5}{12} + 14.04 \times 1.5 \left[\frac{9^2}{2(14.04+9)} \right]^2 + 9 \times 1.5 \left[\frac{9}{2} - \left[\frac{9^2}{2(14.04+9)} \right]^2 \right]^2$$

$$I_{s1} = 179.02 \text{ mm}^4$$

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

Donc la rigidité du support élastique est :

$$K_1 = \frac{2.1 \times 10^5 \times 1.5^3}{4(1-0.3^2)} \times \frac{1}{48 \times 118 + 50^3 + 0.5 \times 50 \times 50 \times 118 \times 0}$$

$$K1 = 1.49$$

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

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{k E I_s}}{A_s} = \frac{2\sqrt{1.49 \times 2.1 \times 10^5 \times 179.02}}{69.12} = 216.56 \text{ MPa}$$

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

Pour le raidisseur du bord supérieur :

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{F_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{250}{216.56}} = 1.07$$

Le coefficient de réduction sera :

$$\begin{aligned} \text{Si } \bar{\lambda}_d \leq 0.65 & \quad \chi d = 0.1 \\ \text{Si } 0.65 < \bar{\lambda}_d < 1.38 & \quad \chi d = 1.47 - (0.723 \times \bar{\lambda}_d) = \\ \text{Si } \bar{\lambda}_d \geq 1.38 & \quad \chi d = \frac{0.66}{\bar{\lambda}_d} \end{aligned}$$

Donc

$$\begin{aligned} \chi d &= 1.47 - (0.723 \times \bar{\lambda}_d) \\ \chi d &= 1.47 - (0.723 \times 1.07) = 0.69 \end{aligned}$$

Troisième phase :

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 :

$$\sigma_{com,d,i} = \frac{3 f_{yb}}{\gamma m_0} \quad \text{Et} \quad \lambda_{p,red} = \lambda_p \sqrt{\chi d}$$

Pour le raidisseur du bord inférieur :

L'élancement réduit :

➤ Pour la semelle supérieure :

$$\lambda_{p,red1} = \lambda_p \sqrt{\chi d} = 0.58 \sqrt{0.69} = 0.481$$

$$p1 = \frac{\lambda_{p,red1} - 0.055(3+\psi)}{\lambda_{p,red1}^2} = \frac{0.481 - 0.055(3+4)}{0.481^2} = 0.414 < 1$$

Largeur efficace est :

$$b_{eff1} = p_{bp} \times b_p = 0.414 \times 48 = 19.87$$

$$b_{e1} = 0.5 \times b_{eff} = 9.93$$

Pour semelle inférieur :

$$\lambda_{p,red1} = \lambda_p \sqrt{\chi d} = 0.58 \sqrt{0.69} = 0.481$$

$$p2 = \frac{\lambda_{p,red1} - 0.055(3+\psi)}{\lambda_{p,red1}^2} = \frac{0.446 - 0.055(3+4)}{0.446^2} = 0.414 < 1$$

Largeur efficace est :

$$b_{eff2} = p_{bp} \times b_p = 0.414 \times 48 = 19.87$$

$$b_{e2} = 0.5 \times b_{eff} = 9.93$$

Pour le bord tombé supérieur :

L'élanement réduit :

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \sqrt{\chi d} = 0.31 \sqrt{0.69} = 0.25$$

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

$$C_{eff} = p \times C_p = 1 \times 9 = 9 \text{ mm}$$

Aire efficace des raidisseurs des bords supérieurs :

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

$$A_{s1} = 1.5(14.04 + 9)$$

$$A_{s1} = 34.56 \text{ mm}^2$$

Pour le bord tombé inférieur :

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \sqrt{\chi d} = 0.31 \sqrt{0.69} = 0.25$$

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

$$C_{eff} = p \times C_p = 1 \times 9 = 9 \text{ mm}$$

Aire efficace des raidisseurs des bords inférieurs :

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

$$A_{s2} = 1.5(14.04 + 9)$$

$$A_s = 34.56 \text{ mm}^2$$

Propriétés de la section efficace de l'âme

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

$$hc = \left[\frac{\left(cp \times \left(hp - \frac{cp}{2} \right) \right) + \left(\frac{hp^2}{2} \right) + (bp2 \times hp) + 2 \left(c_{eff}^2 \times \frac{xd}{2} \right)}{cp + bp + be + hp + 2 \left(be + c_{eff} \right) \times xd} \right]$$

$$h_c = 65.099 \text{ mm}$$

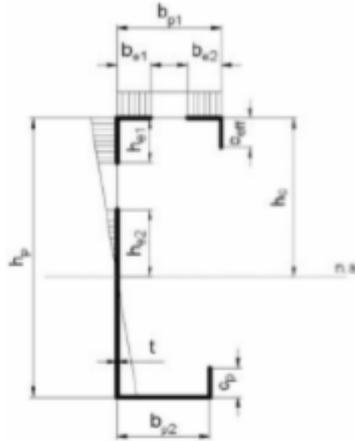


Figure II.19: Propriétés de la section efficace

$$\Psi = (h_c - h_p)/h_c = (65.09 - 118)/(65.09)$$

$$\Psi = -0.81$$

Le coefficient de flambement :

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

$$k\sigma = 7,81 - 6,29(-0.81) + 9,78 (-0.81)^2$$

$$k\sigma = 19.32$$

$$\lambda_{bp} = (h_p/t)/(28.4 \times \epsilon \times \sqrt{k\sigma}) = (118/1.5)/(28.4 \times 0.96 \times \sqrt{19.32}) = 0.65 < 0.673$$

Donc :

$$p = 1$$

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

$$heff = p \times h_c = 1 \times 118 = 118$$

A proximité de la semelle comprimée :

$$he1 = 0.4 \times heff = 0.4 \times 118 = 47.2 \text{ mm}$$

A proximité de l'axe neutre :

$$he2 = 0.6 \times heff = 0.6 \times 118 = 70.8 \text{ mm}$$

La largeur efficace de l'âme est :

A proximité de la semelle comprimée :

$$h1 = he1 = 47.2 \text{ mm}$$

A proximité de la semelle tendue :

$$h2 = h_p - (h_c - he2) = 118 - (65.09 - 70.8) = 123.7 \text{ mm}$$

Aire de la section transversale efficace :

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

$$A_{eff} = 1.5 \times [9 + 48 + 47.2 + 125.9 + 9.93 + 2(9.93 + 9) \times 0.69]$$

$$A_{eff} = 399.23 \text{ mm}^2$$



Figure II.20: Section efficace du profilé type C.

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

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

$$Z_c = 37.48 \text{ mm}$$

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

$$Z_t = h_p - z_c = 118 - 37.48 = 80.52 \text{ mm}$$

Moment d'inertie :

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

$$\left(c_p t \left(z_t - \frac{c_p}{2} \right)^2 \right) + \left(b_{p2} t z_t^2 \right) + \left(h_2 t \left(z_t - \frac{h_2}{2} \right)^2 \right) + \left(h_1 t \left(z_c - \frac{h_1}{2} \right)^2 \right) + b_{e1} t z_c^2 +$$

$$\left(b_{e2} t (\chi d) z_c^2 \right) + c_{eff} (\chi d t) \left(z_c + \frac{c_{eff}}{2} \right)^2$$

$$I_{eff} = 41.7654 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Module de résistance de la section efficace :

par rapport à la semelle comprimée :

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

$$W_{eff y,c} = \frac{417564}{37.48} = 11140.98 \text{ mm}^3$$

Par rapport à la semelle tendue :

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

$$W_{eff,y,t} = \frac{417564}{80.53} = 5185.19 \text{ mm}^3$$

Vérification de la résistance à la flexion :

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

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

$$M_{c,Rd} = \frac{11140 \times 10^{-9} \times 250 \times 10^3}{1} = 2.78 \text{ KN.m}$$

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

Pour un porté de 1 m

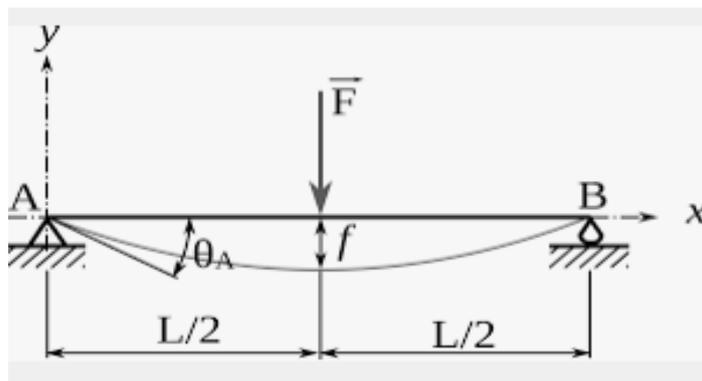


Figure II.21: Poutre soumise à la flexion trois points

POUR la poutre assemblée en double sans raidisseur d'âme $P = 34,35 \text{ kN}$

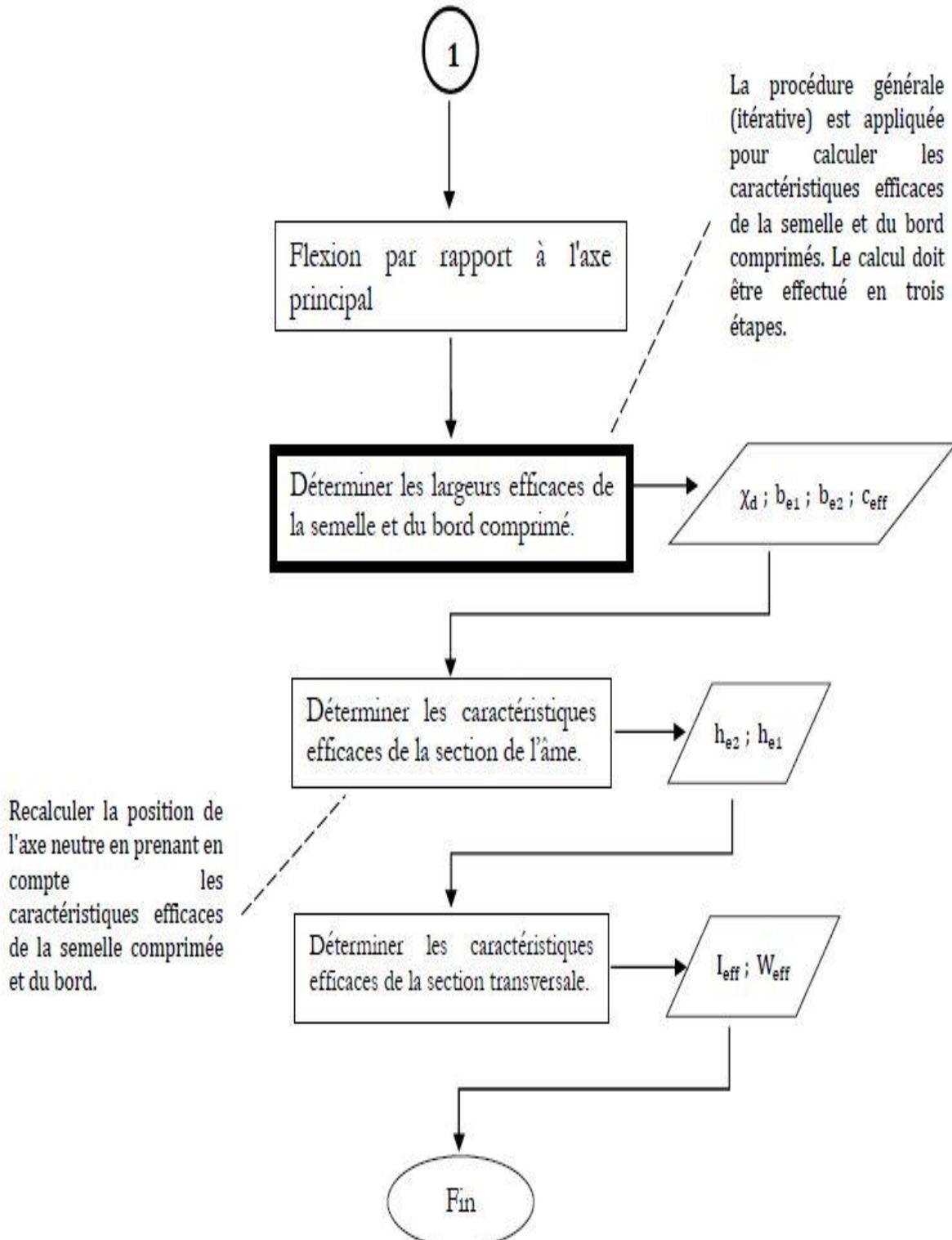
$$M_{Ed} = \frac{p \times L}{4} = M_{c,Rd} = M_{o,Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$P = \frac{4 \times W_{eff} \times f_y}{\gamma_{M1} \times L} = 34,35 \text{ kN.m}$$

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.



**CHAPITRE III : ETUDE
NUMERIQUE DES POUTRES EN
PAF SOUS ABAQUS**

III- ANALYSE NUMERIQUE DES POUTRES EN PAF SOUS ABAQUES:

III-1. Introduction

La méthode des éléments finis est une technique d'analyse numérique permettant d'obtenir des solutions approximatives à une grande variété de problèmes d'ingénierie. Le concept de base de l'analyse par éléments finis est le suivant : une structure est divisée en un nombre fini d'éléments ayant des dimensions finies et en réduisant la structure ayant des degrés de liberté infinis à des degrés de liberté finis.

Il ne fait aucun doute que les tests physiques à grande échelle permettent de mieux comprendre le comportement des éléments d'une structure, mais ces derniers sont coûteux et longs, et il est également très difficile d'effectuer des études paramétriques approfondies par des expériences, ce qui encourage l'utilisation et le développement de la modélisation numérique dans les recherches d'ingénierie.

D'un point de vue technique, les résultats obtenus grâce à ABAQUS sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations et de toutes les grandeurs physiques nécessaires à la conception d'un modèle.

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est avant tout un logiciel de modélisation de problèmes très variés en mécanique. Simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures, Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants des problèmes linéaires et problèmes non linéaires

III-2. Définition de logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS

L'ABAQUS est un code de calcul utilisant la méthode des éléments finis (MEF). Selon la méthode de résolution, ABAQUS compose de trois produits :

- ABAQUS/Standard : résolution par un algorithme statique implicite.
- ABAQUS/Explicit : résolution par un algorithme dynamique explicite.
- ABAQUS/CAE : constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

III-2.1. Caractéristiques de logiciel ABAQUS :

Description succincte des possibilités d'ABAQUS.

- Analyses.
- Éléments.
- Linéarités.

III-2.3. Type d'analyse :

Domaines physiques :

- Mécanique.
- Thermique.
- Electrique (Pièze et thermique).
- Problèmes couplés.
- Une bibliothèque de matériaux de pointe, y compris l'habituel élastique et solides plastique, élastique ; modèles pour les mousses, le béton, les sols, les géo synthétiques.

III-2.4. Problèmes :

- Statique et dynamique.
- Linéaires et non linéaires.
- Dynamique des corps rigides.

III-2.5. Les éléments utilisés par ABAQUS [22] :

On distingue différentes grandes classes d'éléments :

- Les éléments unidimensionnels (1D) : barre ; poutre, rectiligne ou courbe
- Les éléments bidimensionnels (2D) : élasticité plane (contrainte ou déformation plane), plaques en flexion, coques courbes de forme triangulaire ou rectangulaire.
- Les éléments tridimensionnels (3D) : de forme tétraédrique, hexaédrique...etc.
- Les éléments axisymétriques : (pour les pièces présentant une symétrie de révolution au niveau de la géométrie et du chargement).
- Les autres éléments : ressorts, amortisseurs, rigides.

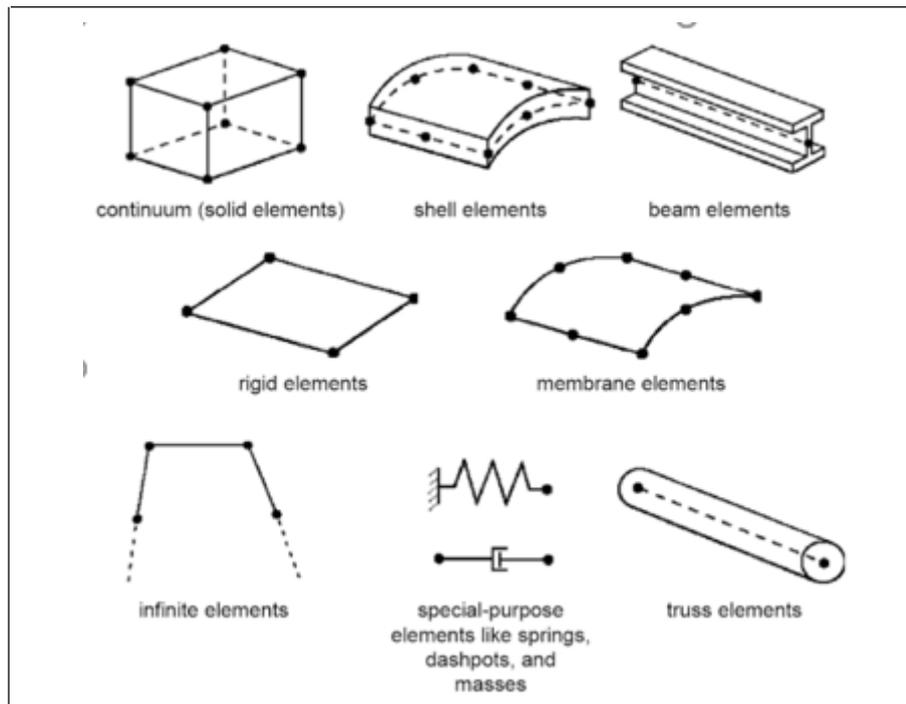


Figure III.1: Quelques éléments parmi les plus utilisés

III-2.6. Système d'unités dans le code de calcul ABAQUS :

Comme dans beaucoup de logiciels, il n'y a pas de système d'unités fixé. C'est à l'utilisateur de définir son propre système (tableau III.1)

Tableau III.1: Système d'unités pour la programmation

| MASSE | LONGUEUR | TEMPS | FORCE | PRESSION | ENERGIE |
|--------------|-----------|-----------|------------|-----------------|--------------|
| <i>M</i> | <i>L</i> | <i>T</i> | MLT^{-2} | $ML^{-1}T^{-2}$ | ML^2T^{-2} |
| <i>kg</i> | <i>m</i> | <i>S</i> | <i>N</i> | <i>Pa</i> | <i>J</i> |
| <i>g</i> | <i>mm</i> | <i>ms</i> | <i>N</i> | <i>MPa</i> | <i>mJ</i> |
| <i>Tonne</i> | <i>mm</i> | <i>S</i> | <i>N</i> | <i>MPa</i> | <i>mJ</i> |

Le tableau présente les différentes unités pour la résolution d'un problème mécanique avec le code ABAQUS. 1.3. Organisation de l'interface ABAQUS CAE (complète ABAQUS environnement) Il est important de savoir que le module CAE figure (III.2) que vous allez utiliser pour créer votre jeu de données est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la mise en données de problèmes relativement classiques. Donc pas toutes les commandes utilisables dans ABAQUS et fait souvent le choix de paramètres par défaut.

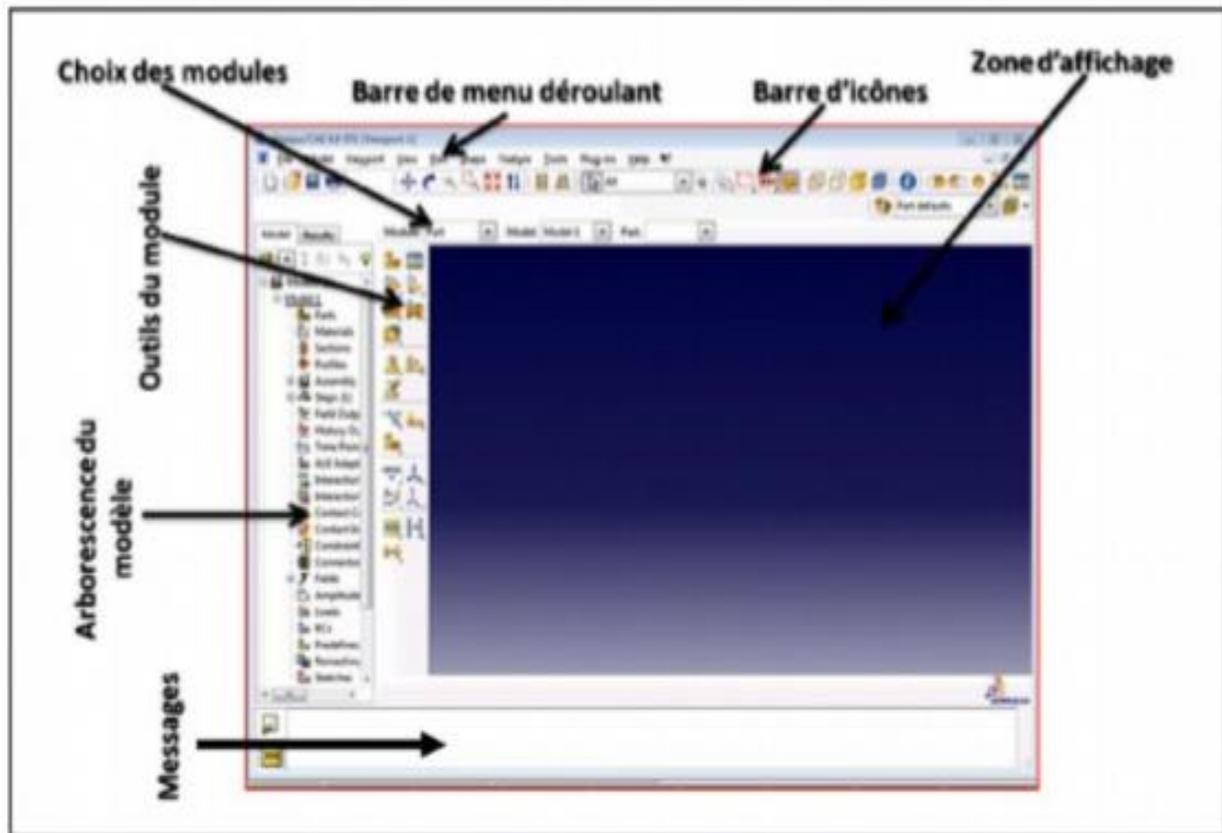


Figure III.2: Organisation d'ABAQUS

III-2.7. Réalisation d'une simulation numérique :

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les Modules :

- Part
- Property
- Assembly
- Step
- Interaction
- Load
- Mesh
- Job (pour lancer le calcul)

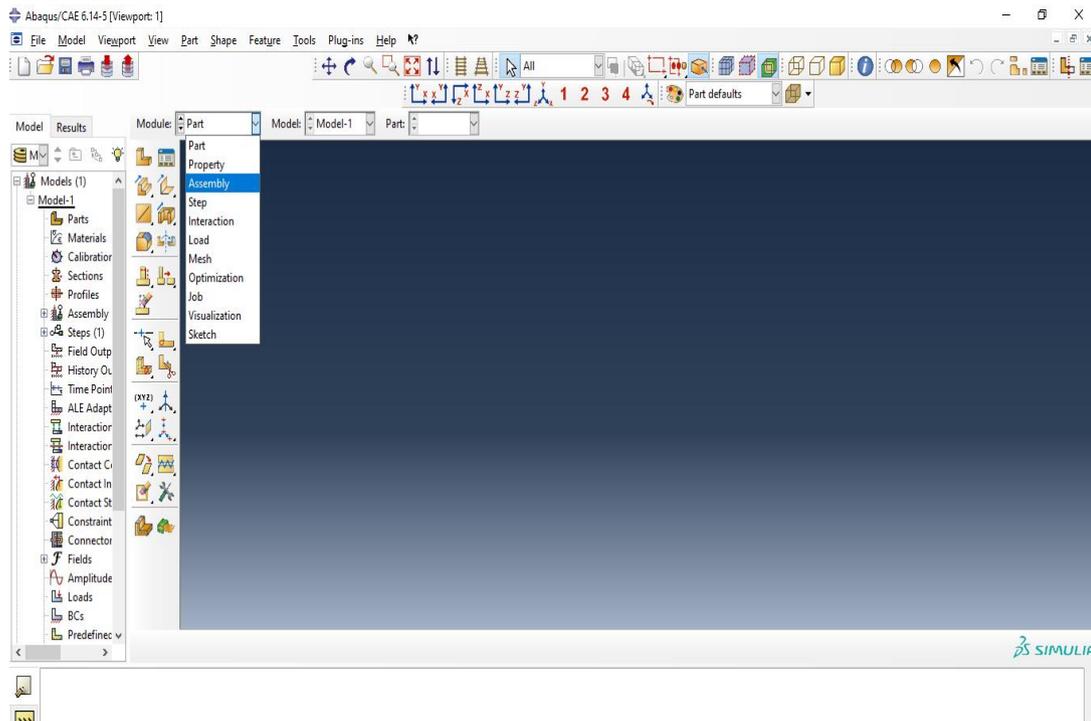


Figure III.3: les Modules d' ABAQUS

III-2.8. Modélisation par ABAQUS :

Dans le but de modéliser correctement par la méthode des éléments finis une plaque stratifiée, il est nécessaire de bien définir les caractéristiques de la modélisation à réaliser. En effet, il est préférable d'assurer du choix de l'élément et du type d'analyse par éléments finis.

Tout d'abord, le manuel d'utilisation d'ABAQUS propose pour modéliser les plaques minces l'utilisation de l'élément S4R (élément coque de 4 nœuds avec intégration réduite), car sa Validité pour modéliser les plaques isotrope ou composite minces est assurée

III-2.9. Principe de calcul sous le logiciel ABAQUS.6.1

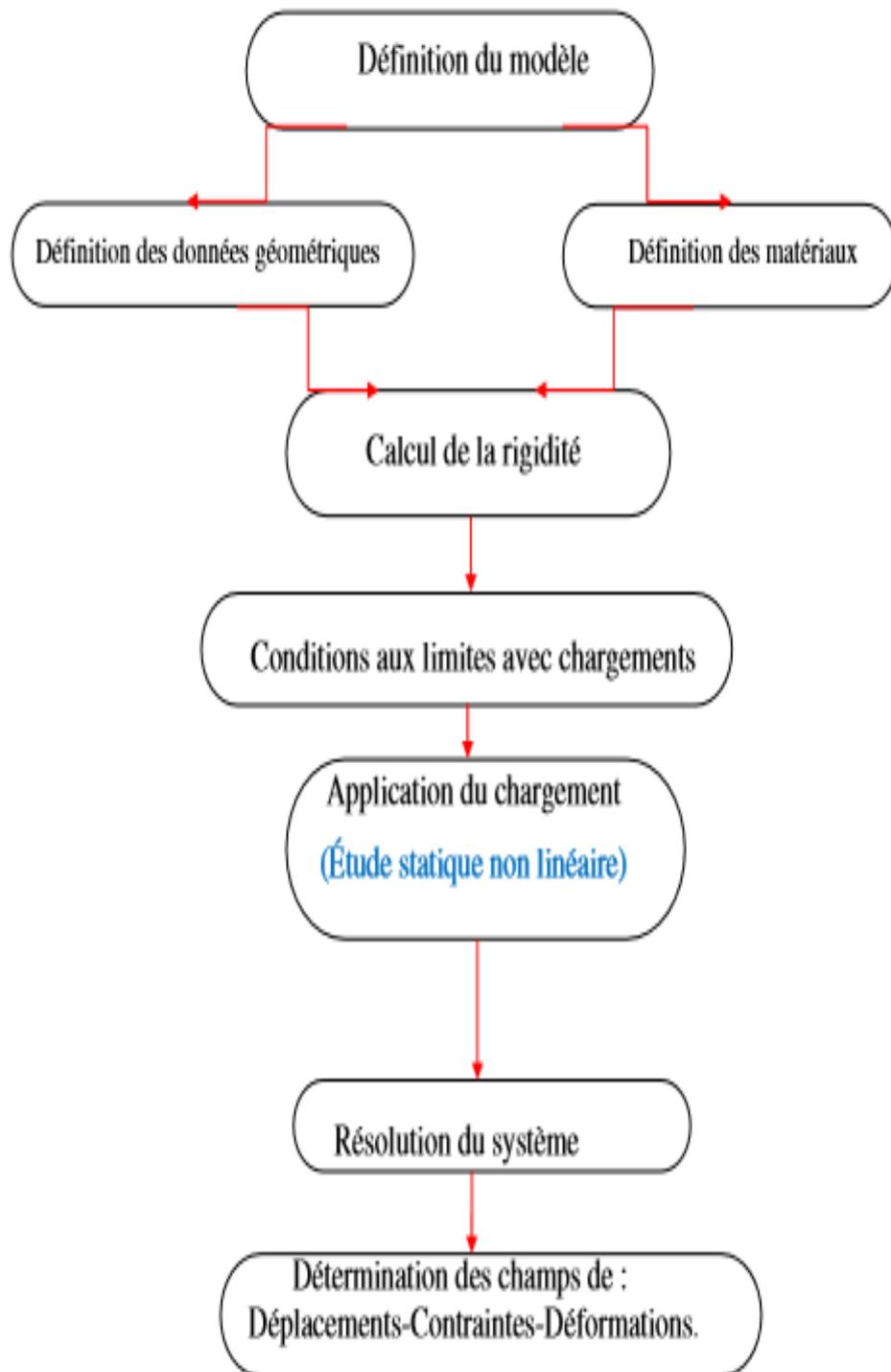


Figure III.4: Principe de calcul sous le logiciel ABAQUS.

III-3. Etude numérique des poutres formés à froid sous ABAQUS

Huit poutres en acier formé à froid de 1000 mm de long ont été traitées pour examiner leur comportement en flexion. Chaque poutre a été façonnée en assemblant deux sections ouvertes simples de force C avec des rivets dans la direction longitudinale de la poutre. L'espacement nominal entre les vis était de 190 mm, et un espacement plus petit de 50 mm a été prévu sur les bords des poutres. Les deux sections ouvertes simples ont été reliées par deux rangées de rivets sur l'âme pour former les sections dos à dos. La longueur et le diamètre nominaux des rivets étaient respectivement de 3 et 7.5 mm. Les poutres ont été façonnées à partir d'une feuille de PAF d'une épaisseur de 1,5 mm et d'une hauteur totale de 220 mm. Différents forme d'âme telles que raidisseur triangulaire, trapézoïdal et carré.

L'objectif principal en génie civil est de créer des éléments métalliques plus résistants et plus économiques. Cela a conduit de trouver de nouvelles formes de sections, des méthodes de calcul (basées sur l'Eurocode 03) et des techniques d'assemblage. Notre travail de recherche est porté sur des poutres en simple C et en double C dos à dos d'une longueur de 1m en acier formé à froid S250 de différentes type de raidisseur(**PSR**)une poutre sans raidisseur d'âme, (**PRT**) une poutre avec un raidisseur d'âme de forme triangulaire ; (**PRC**) une poutre avec des raidisseurs d'âme carrée, (**PRTra**) une poutre avec des raidisseurs trapézoïdaux.

Modèle 1 : **PSR**, une poutre sans raidisseur d'âme,

Modèle 2 : **PRT**, une poutre avec un raidisseur d'âme triangulaire,

Modèle 3 : **PRC**, une poutre avec un raidisseur d'âme carrée,

Modèle 4 : **PRTra**, une poutre avec un raidisseur d'âme trapézoïdale.

Ces formes de raidisseurs ont été conçues pour voir l'influence des raidisseurs sur la capacité portante des poutres fléchies avec la réduction des instabilités remarquées.

Le chargement appliqué est un déplacement imposé qui peut atteindre une valeur de 120 mm

III-3.1. Les étapes de modélisation des éléments sous ABAQUS

1) Géométrie ( Parts) :

Les modélisations des poutres sous 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 solide.

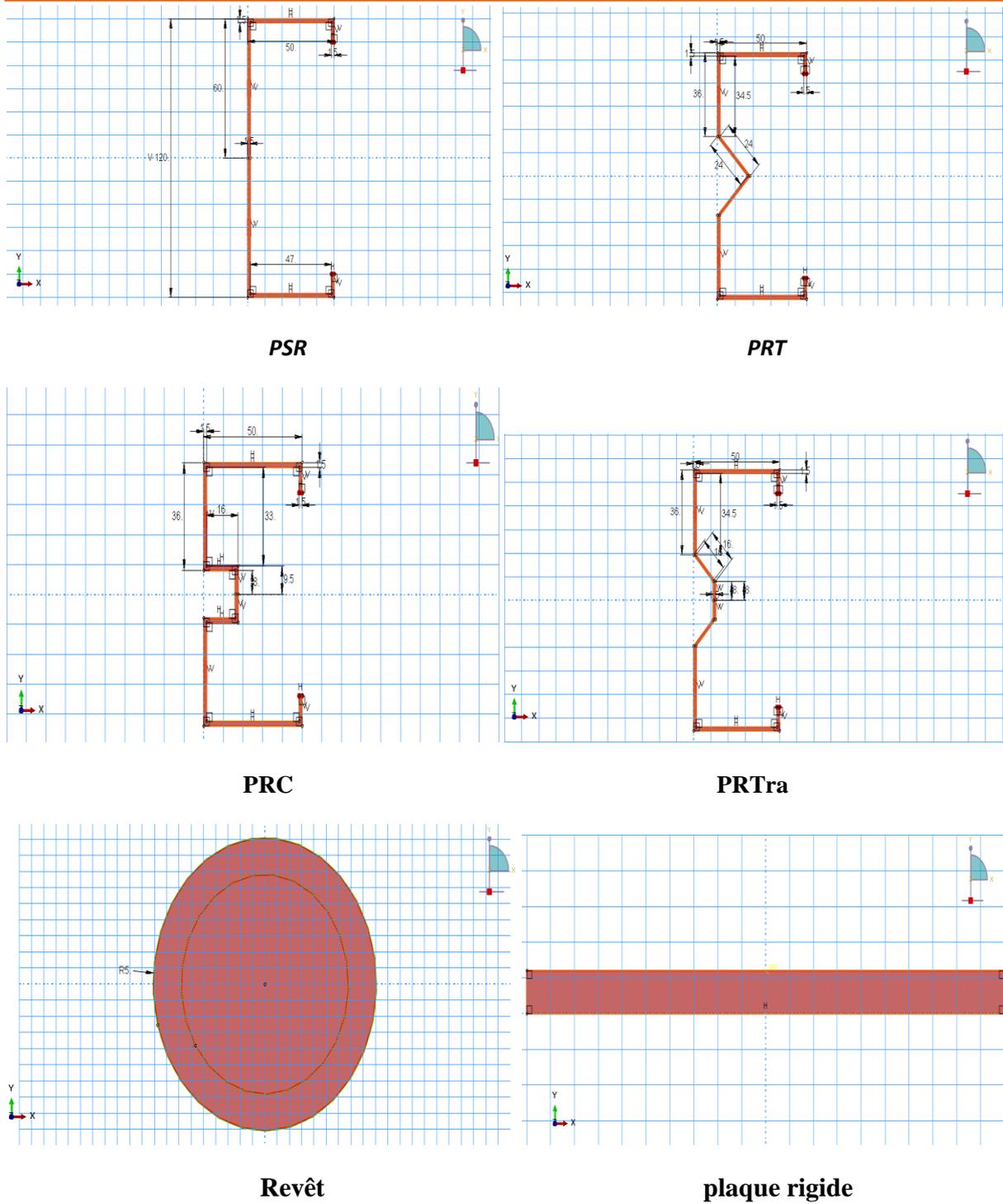


Figure III.5: La géométrie des éléments constituant les modèles (les poutres, le revêt, la plaque rigide)

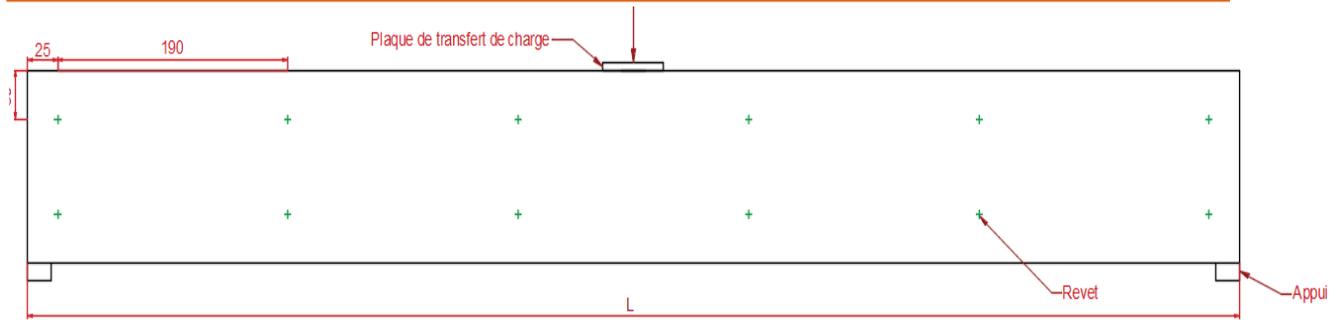
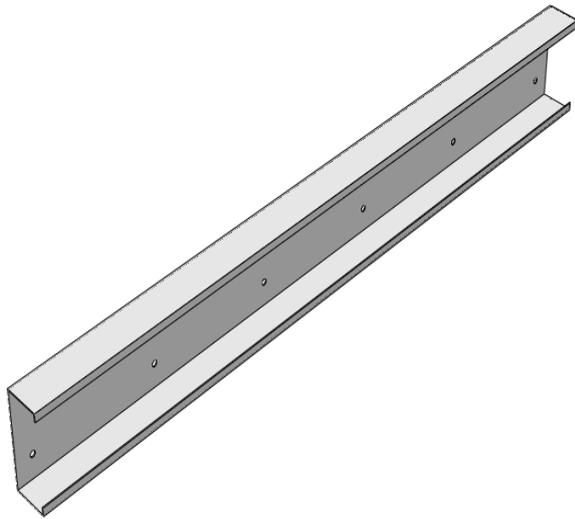
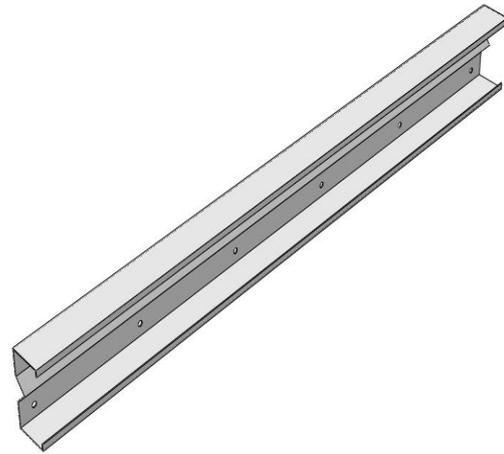


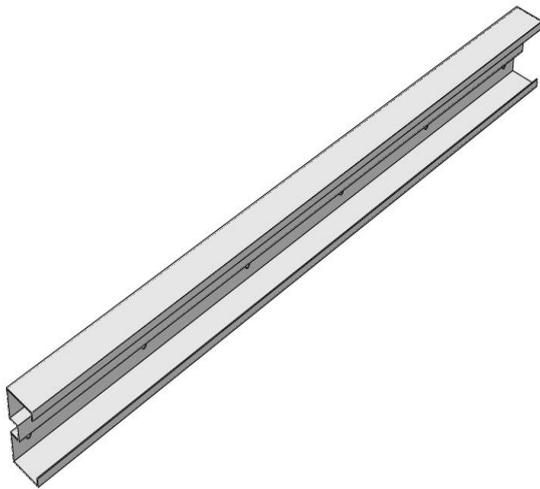
Figure III.6: Disposition des boulons sur la poutre assemblée en doubles C.



Poutre sans raidisseur



Poutre avec un raidisseur triangulaire



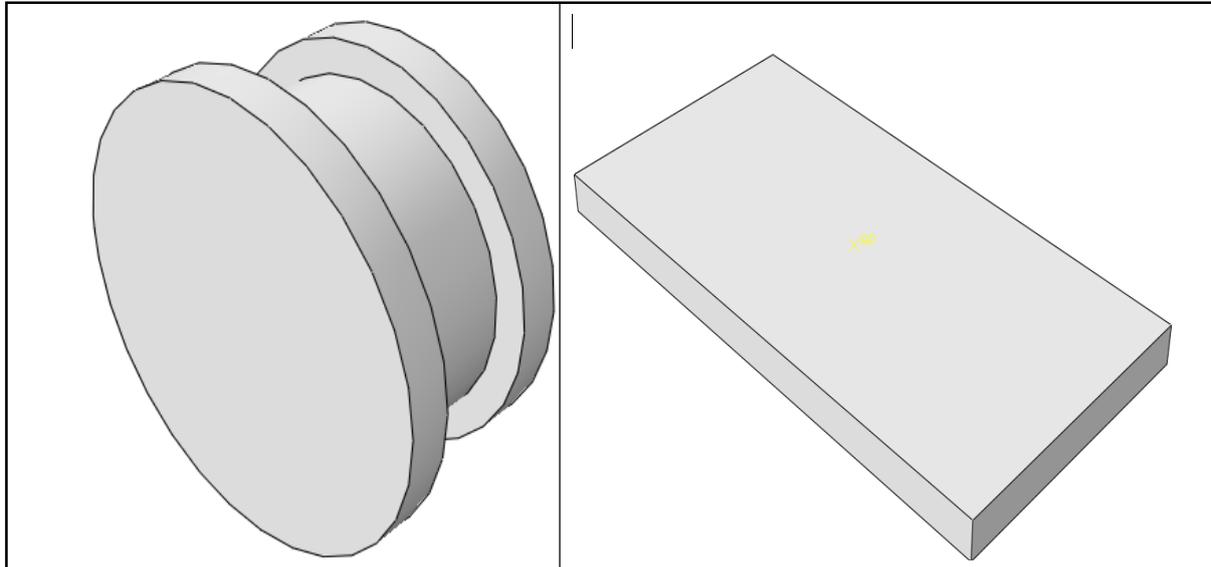
Poutre avec raidisseur carré



Poutre avec un raidisseur trapézoïdal

Figure III. 7: Vues tridimensionnelles des poutres étudiées sous ABAQUS

Les poutres composées sont construites par des sections en double C en acier formées à froid et assemblées par deux rangés de revêt. La sollicitation retenue est la flexion trois points, l'ajout de la plaque rigide est nécessaire pour la transmission de la charge qui est appliquée au milieu de semelle supérieure.



Revêt

Plaque rigide

Figure III.8: revêt et plaque rigide en 3D sur ABAQUS

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.2

Tableau III.2: Les caractéristiques mécaniques intégrées sous ABAQUS

| L'ELEMENT | POIDS VOLUMIQUE $\gamma(kg/m^3)$ | MODULE DE YONG (MPA) | COEFFICIENT DE POISSENT ν | LIMITE ELASTIQUE FY(MPA) |
|-----------|----------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Acier | 7850 | 210000 | 0.3 | 250 |

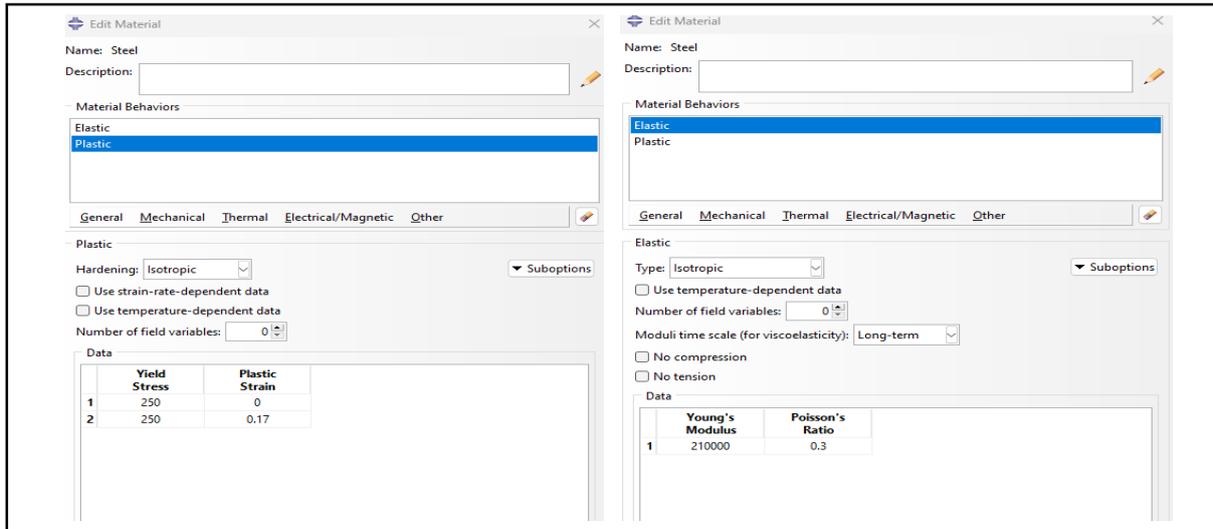


Figure III. 9: Les propriétés intégrées dans la modélisation des poutres.

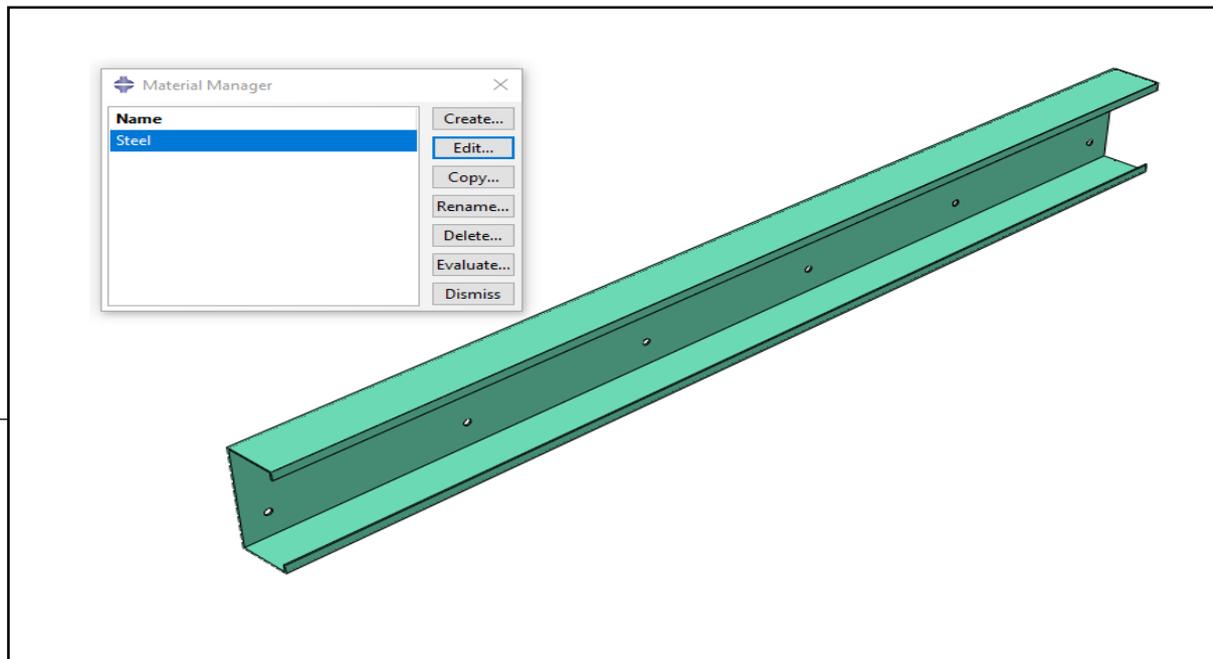


Figure III.10: section avec les propriétés sous ABAQUS.

3) Le module « ASSEMBLY ».

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère coordonnées global.

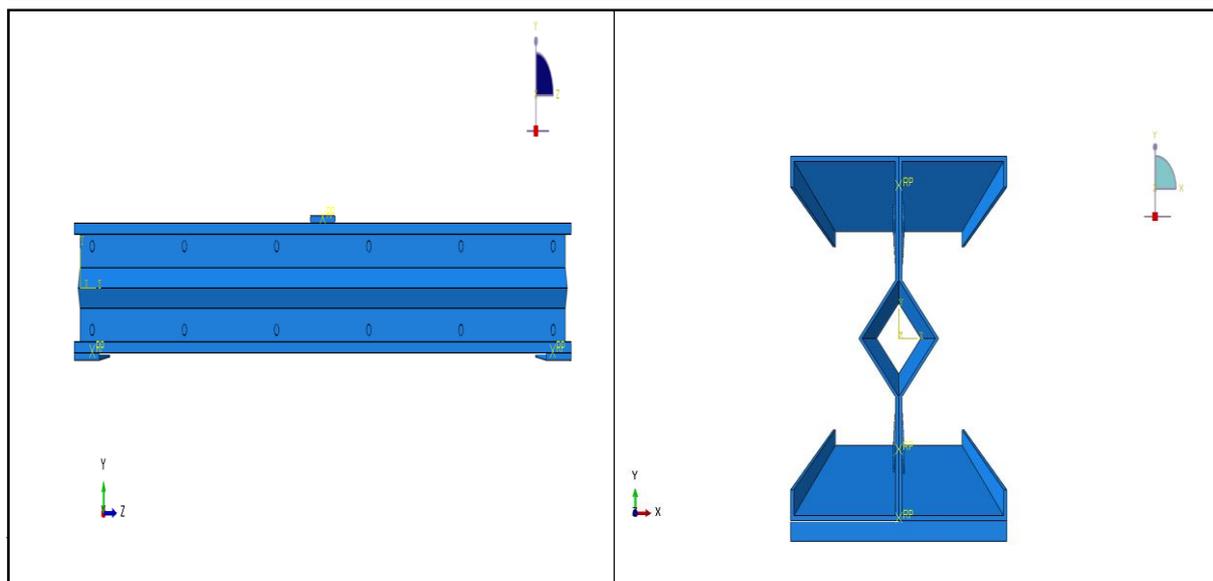
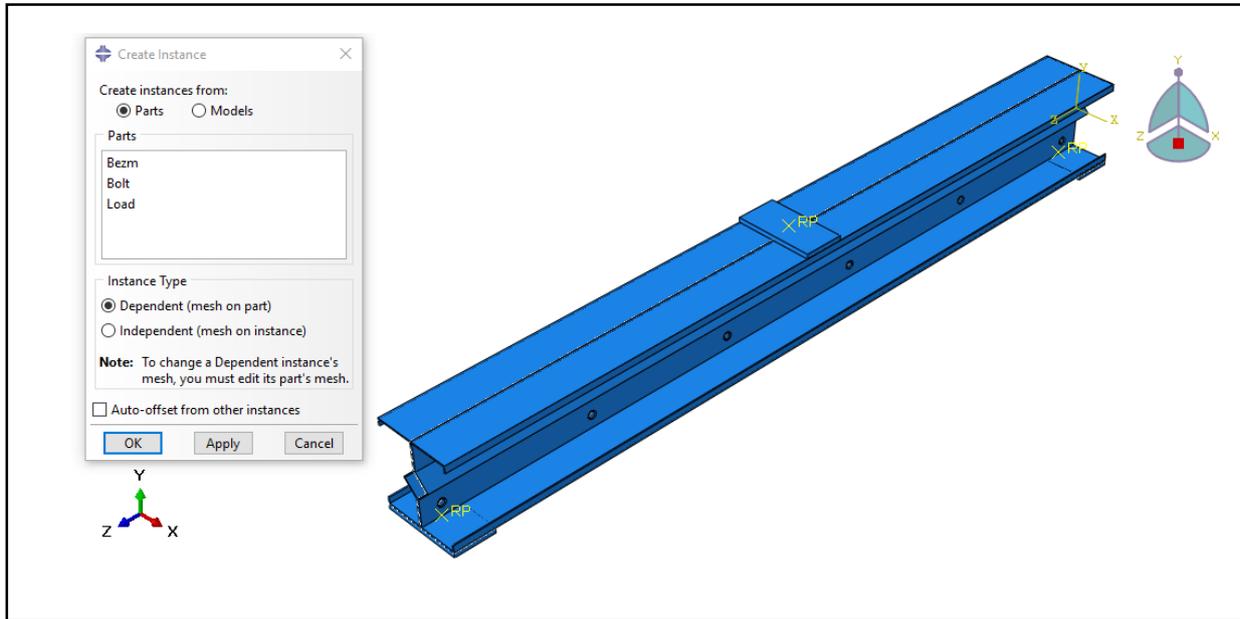


Figure III.11: Deux section assemblée par revêt sous ABAQUS selon les plan (XYZ) et (TZ) et (YZ)

4) Le module « STEP ».

Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu' à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés

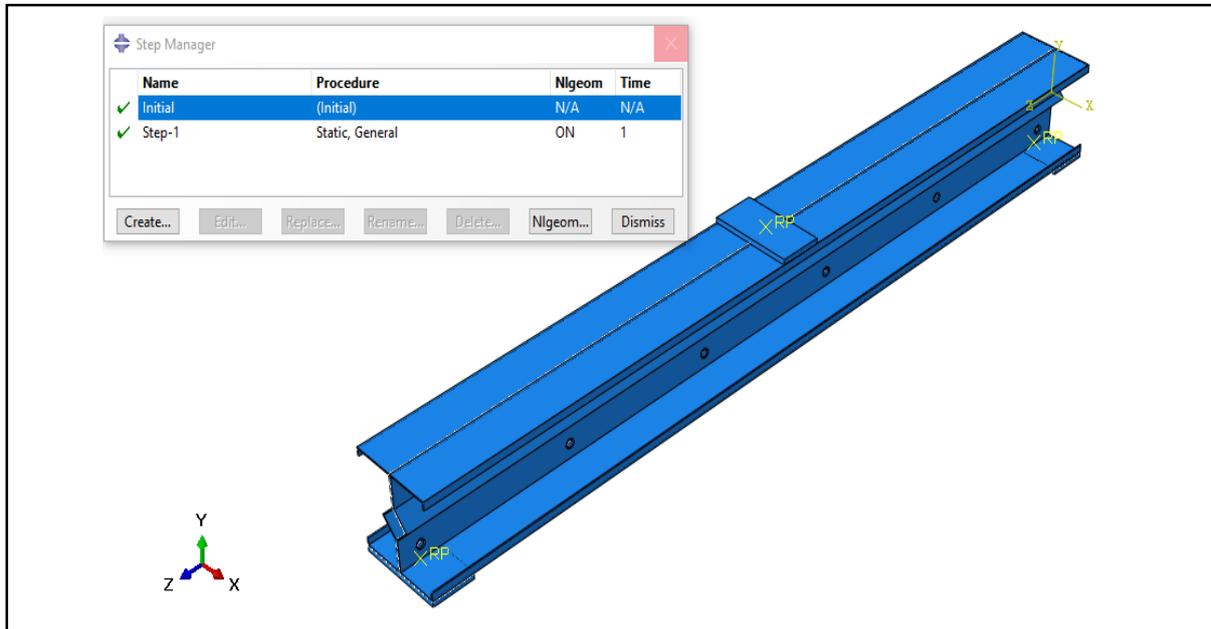
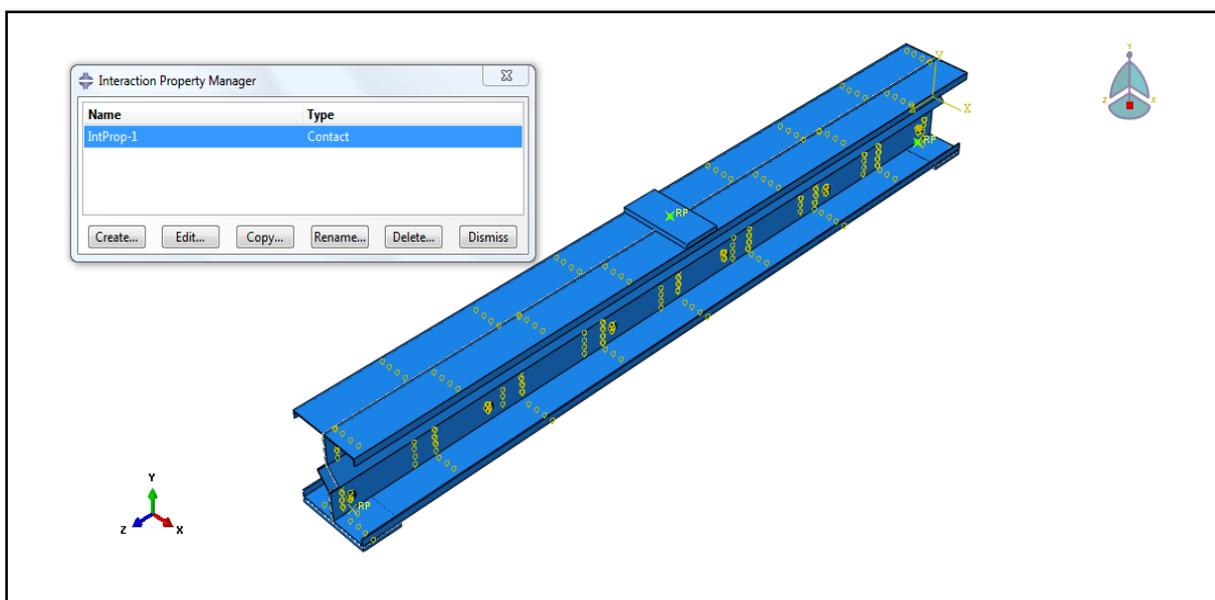


Figure III.12: Step de la poutre C en ABAQUS

5) Le module « INTERACTION ».

Grace ce module, il est possible de spécifier toutes l'interaction entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécanique thermique ou autres.il faut savoir qu'ABAQUS ne prend on compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante



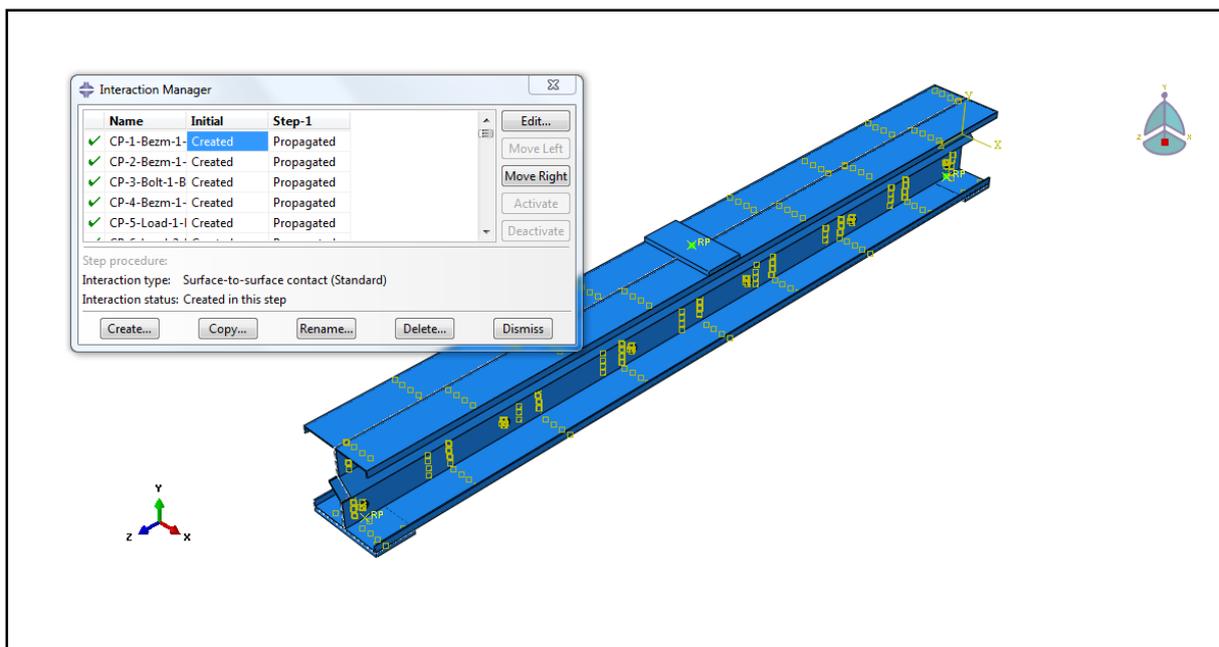
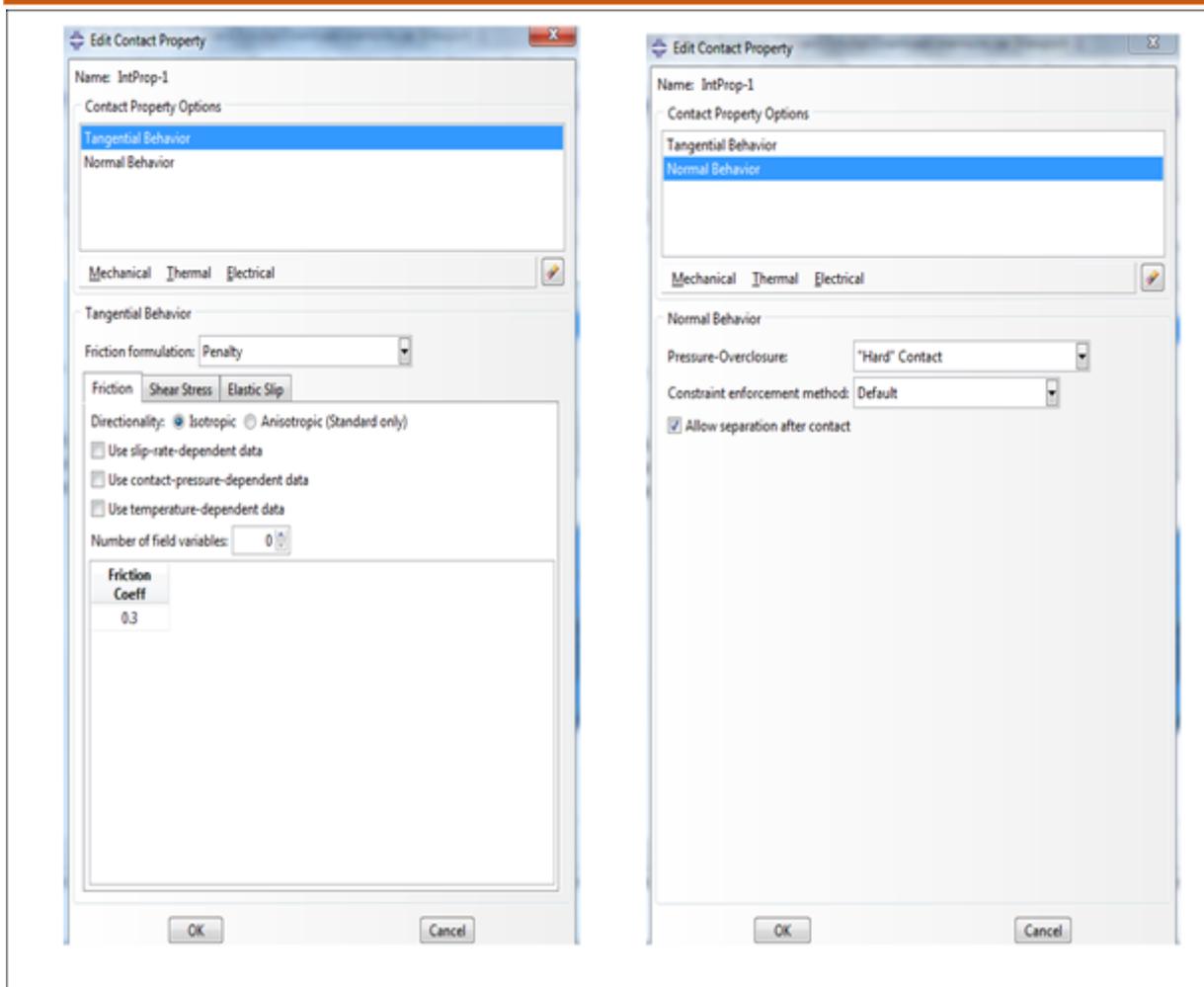


Figure III.13: Interaction de la poutre C en ABAQUS

6) Le module « LOAD ».

Le module load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. il faut savoir que les chargements et les conditions aux limites sont dépendants de steps .

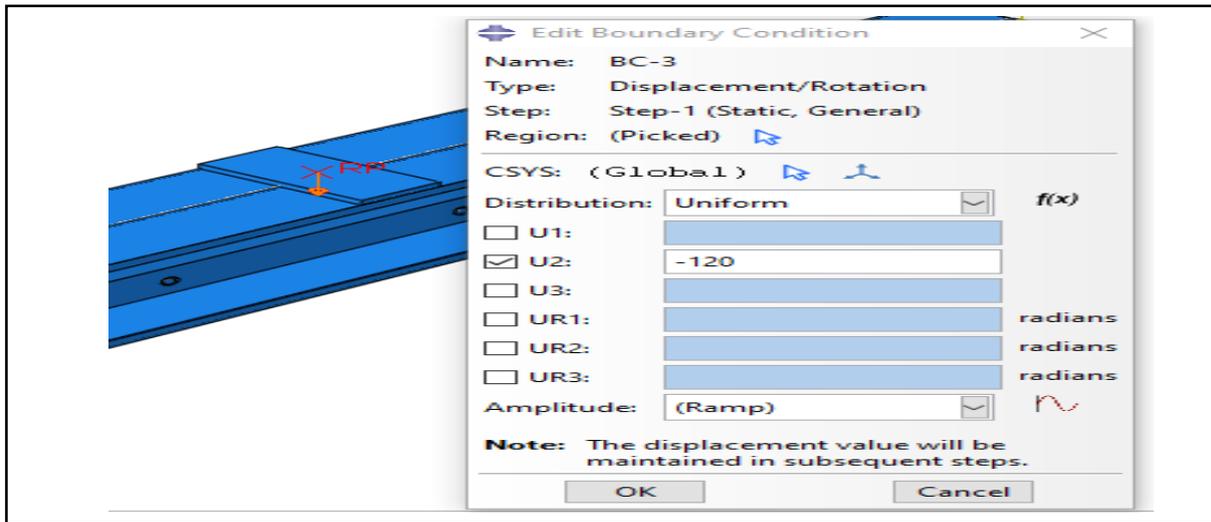


Figure III.14: Chargement de la poutre C sous ABAQUS (déplacement imposée)

Les quatre poutres (PSR), (PRT), (PRC), (PRTra) 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 ($U_x=U_y=R_x=0$),

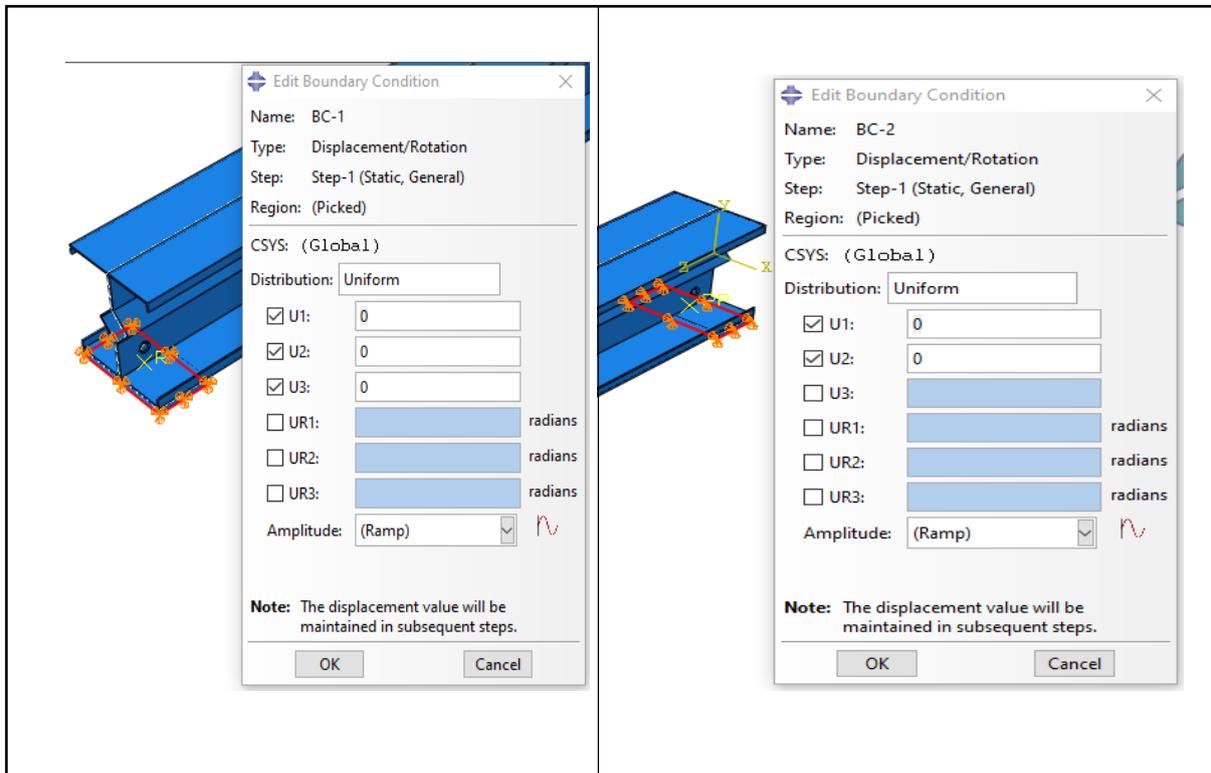


Figure III.15: Chargement et conditions aux limites de la poutre C sous ABAQUS

7) 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.

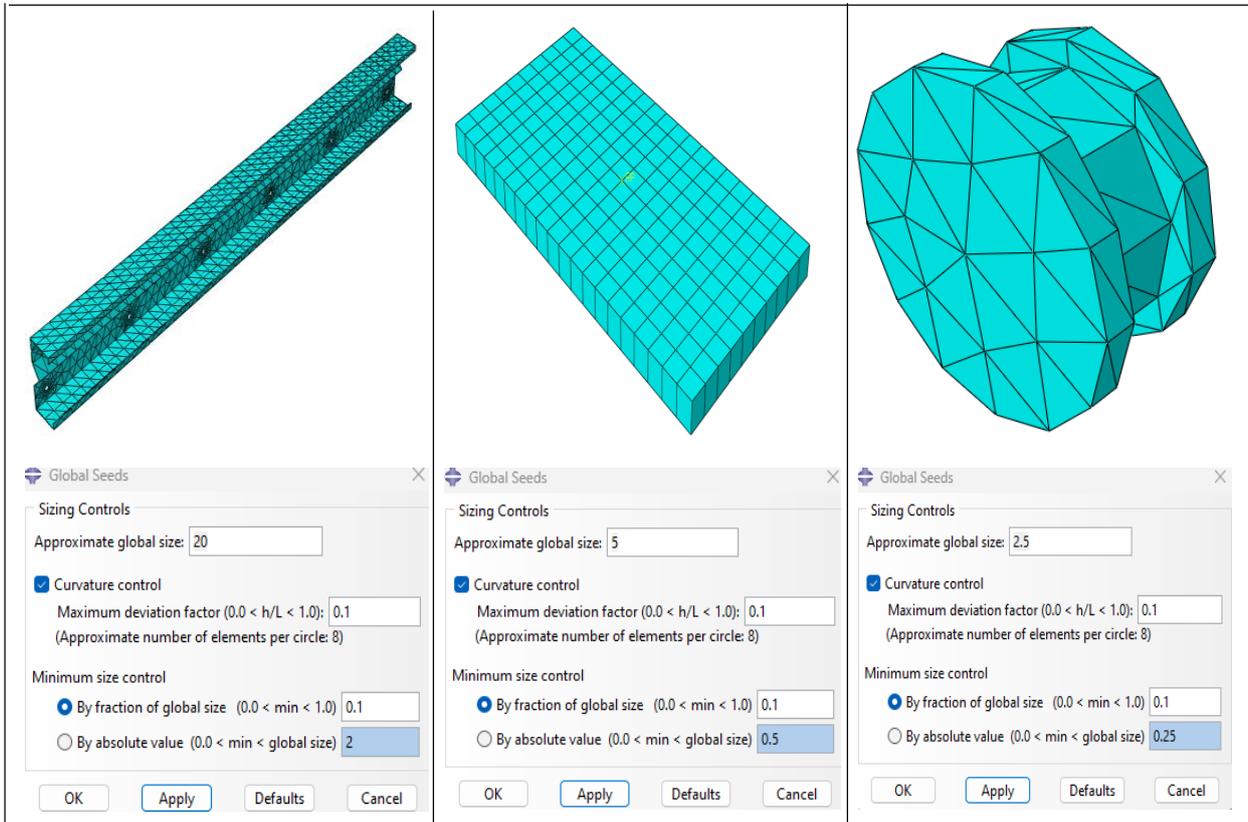
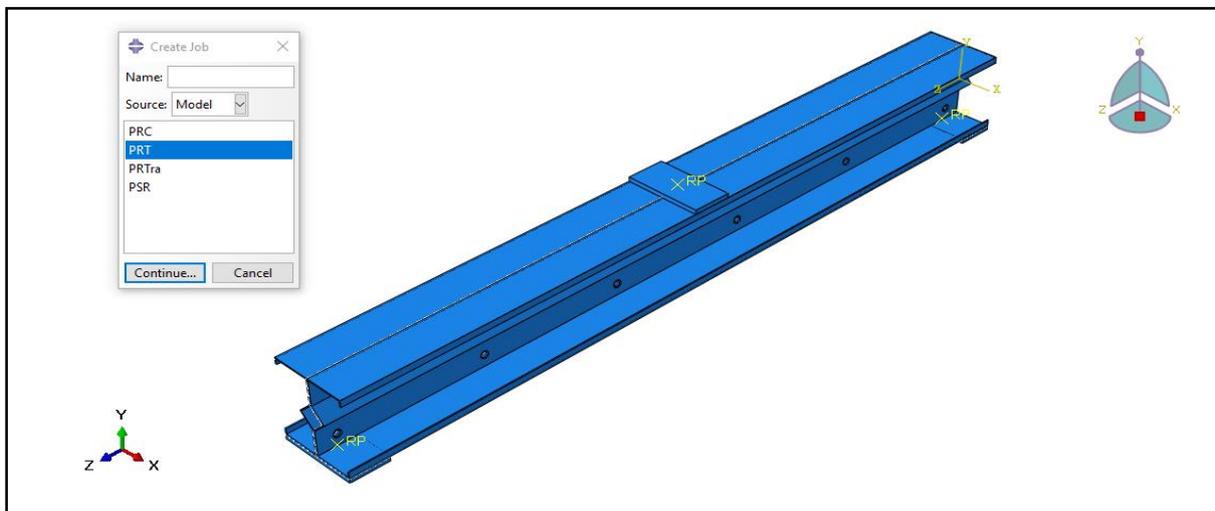


Figure III.16: Maillage des éléments : poutres, le revêt et la plaque rigide

8) 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.



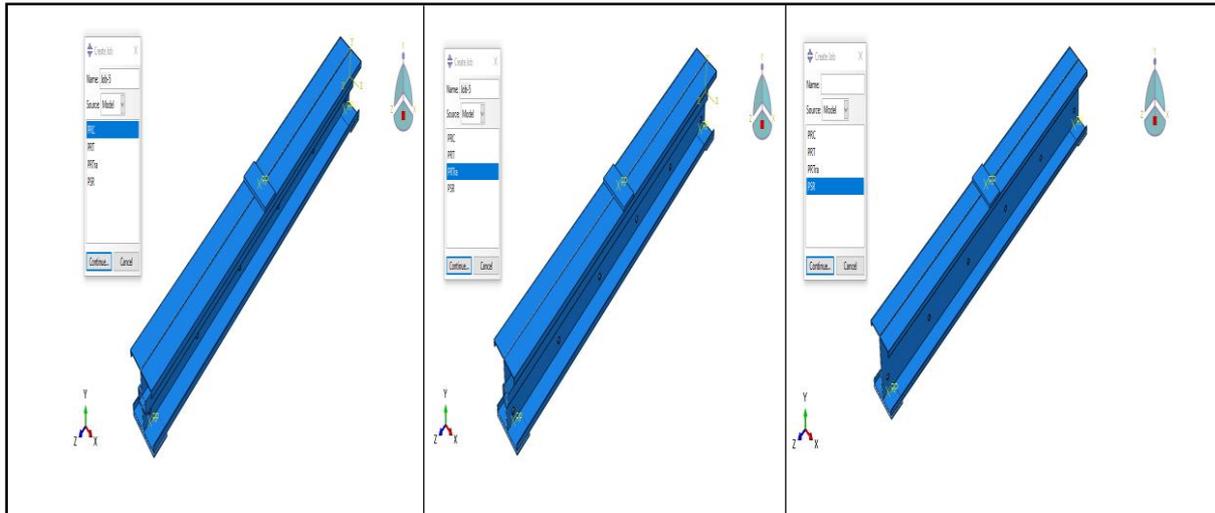


Figure III.17: Lancement des analyses des modèles sous ABAQUS

9) Module « VISUALIZATION ».

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

RESULTATS ET INTERPRETATION

a) POUTRES SEULES AVEC DIFFERENTS RAISSEURS D'AME

La figure III.8 montre les modes de défaillance des poutres seules avec et sans raidisseur d'âme ; on observe une instabilité très remarquable. Puisque 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 mode d'instabilité est le mode d'instabilité flexionnel- distortionnel qui va affecter une partie des coins et des raidisseurs qui vont engendrer un déplacement transversal

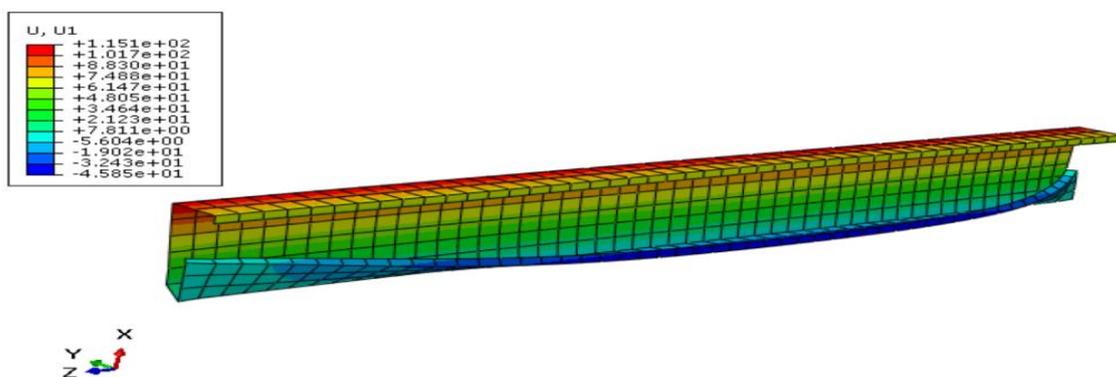


Figure III.18: Iso valeurs de la poutre PSR sous ABAQUS

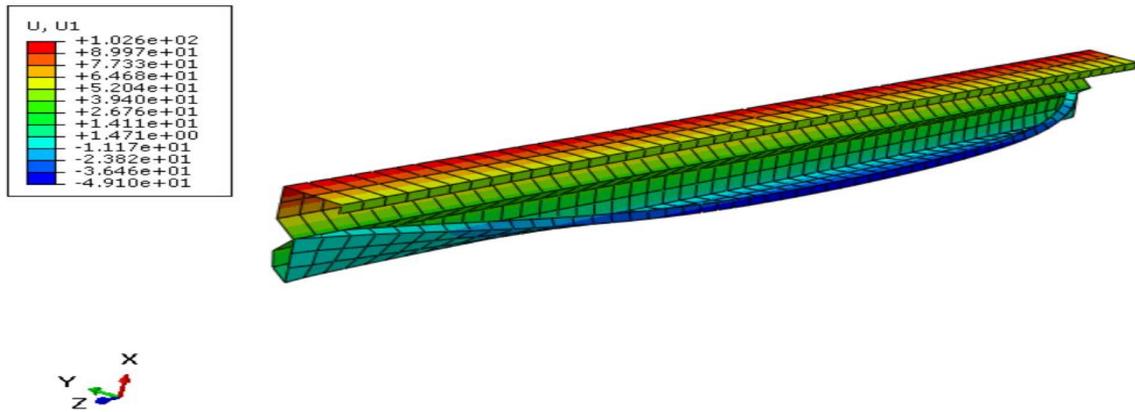


Figure III.19: Iso valeurs de la poutre PRT sous ABAQUS

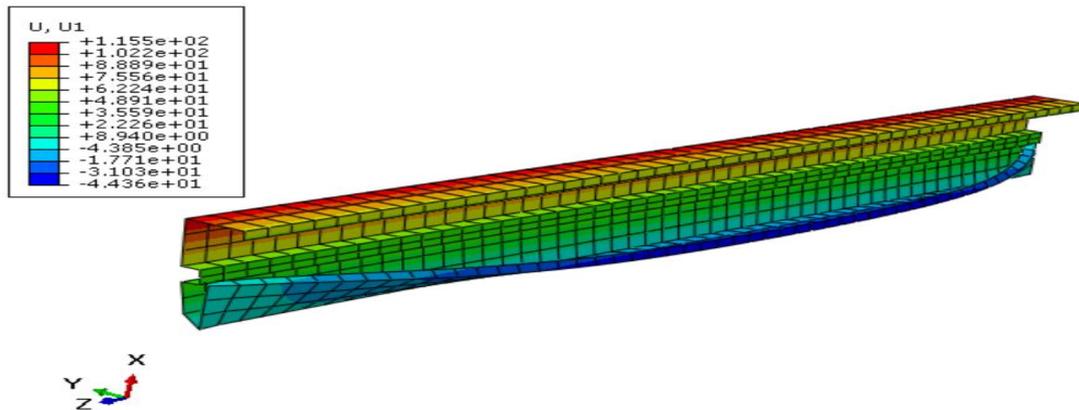


Figure III. 20: Iso valeurs de la poutre PRC sous ABAQUS

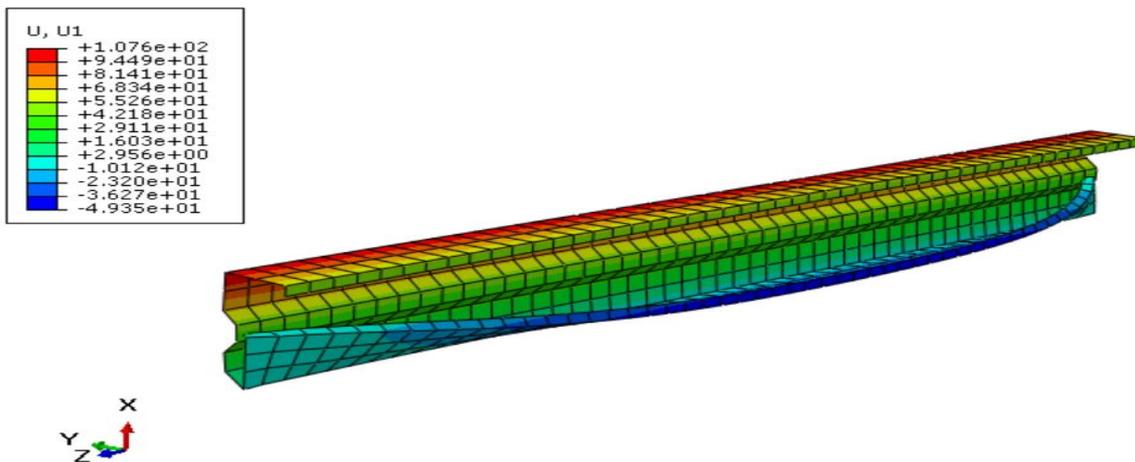
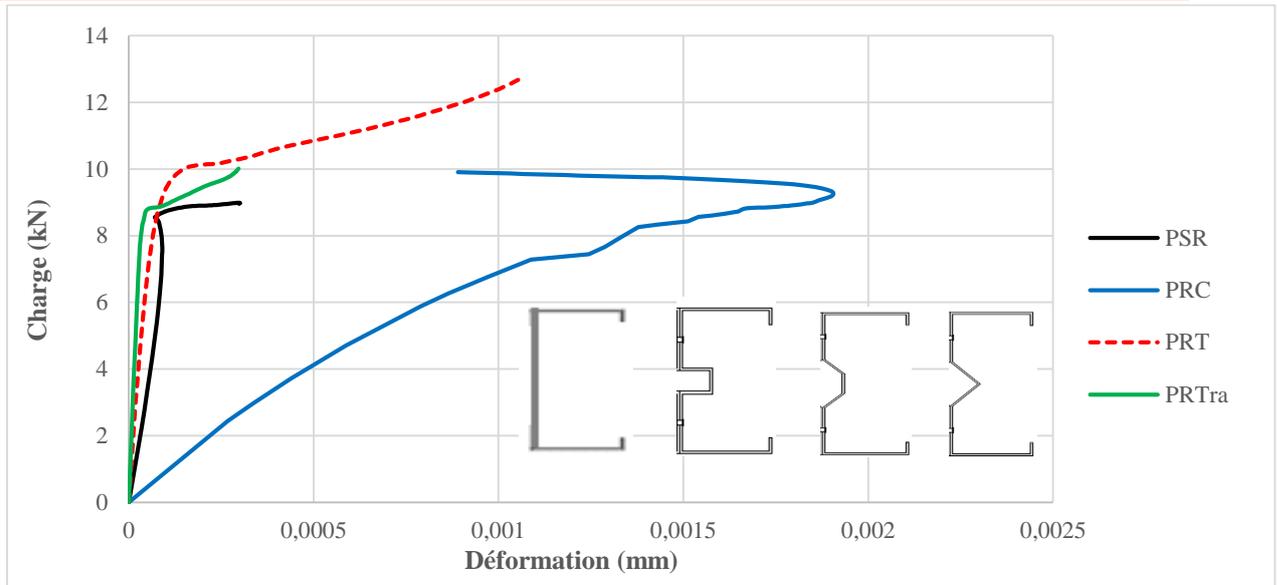


Figure III.21: Iso valeurs de la poutre PRTra sous ABAQUS



En mesurant l'état charge déplacement latérale U_x à mi- portée des poutres seules, on remarque que toutes les poutres ont subi au problème d'instabilité qui se montre clairement dans les valeurs de déplacement latéral qui atteint une valeur de 94 mm ; on outre la poutre avec un raidisseur d'âme triangulaire à présenter une augmentation de la charge critique d'ordre 19 % par rapport au modèle de la poutre sans raidisseur.

Les deux modèles de poutre sans raidisseur d'âme et avec un raidisseur carré ont le même comportement ; les courbes sont presque confondues.

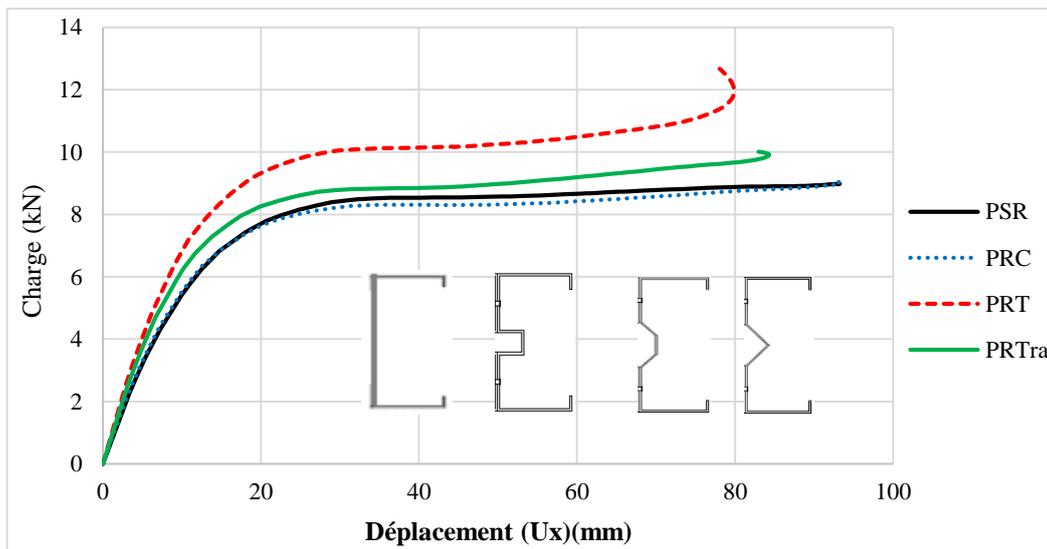


Figure III.22: Courbe comparative de l'état charge- déplacement U_x des poutres seules

D'après la figure III.24 et au milieu des poutres étudiées ont remarqué des petites déformations jusqu'à une charge de 8kN au-delà de cette charge des grands déplacements sont remarqués. Les deux modèles PSR et PRC sont presque confondus.

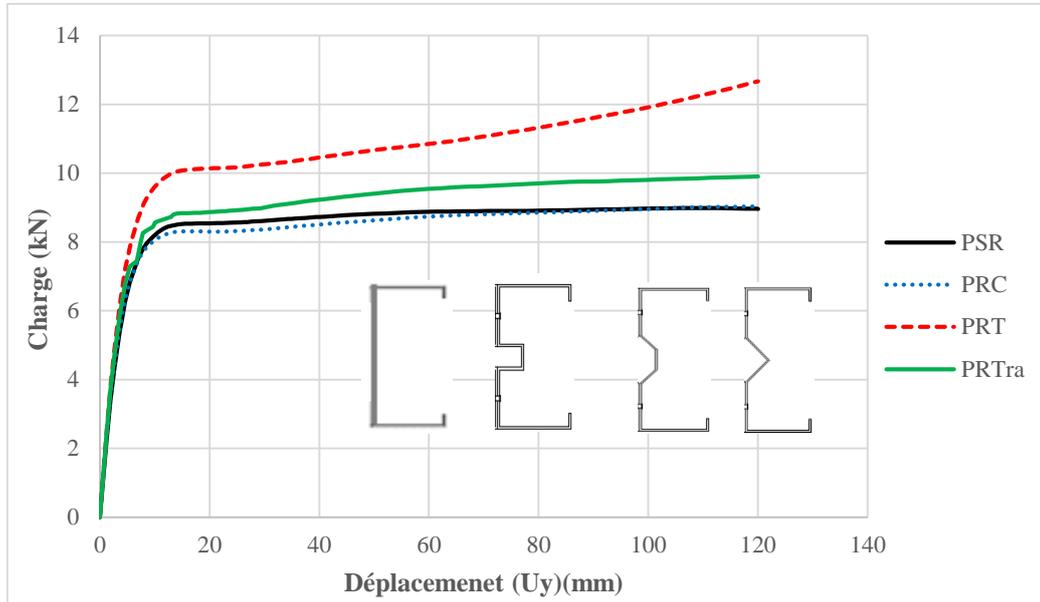


Figure III.23: Courbe comparative de l'état charge- déplacement Uy des poutres seules

b) POUTRES COMPOSEES AVEC DIFFERENTS RAISSEURS D'AME

Les figures suivantes montrent les modes de ruines des poutres étudiées, on remarque la stabilisation des poutres assemblées dos à dos avec élimination de mode d'instabilité distortionnel, on outre un voilement local est observé au niveau de la plaque rigide plus un état flexionnel est observé.

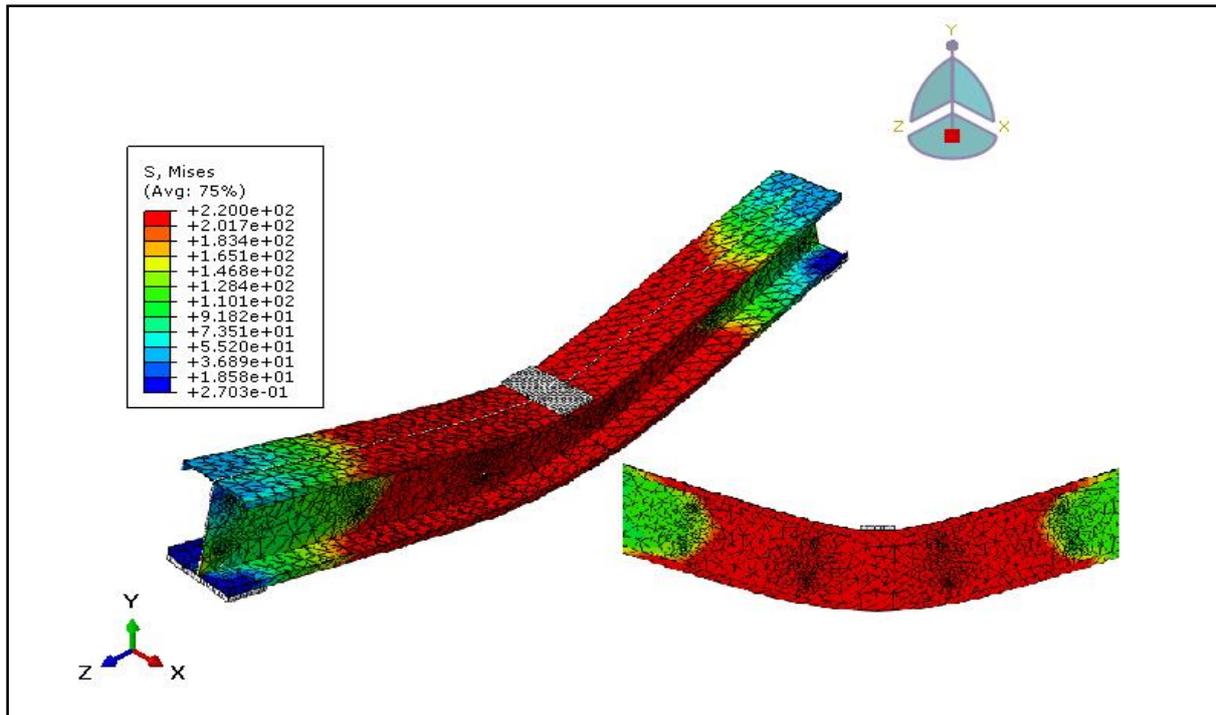


Figure III.24: Iso valeurs de l'état de contrainte Von Mises de la poutre PSR sous ABAQUS

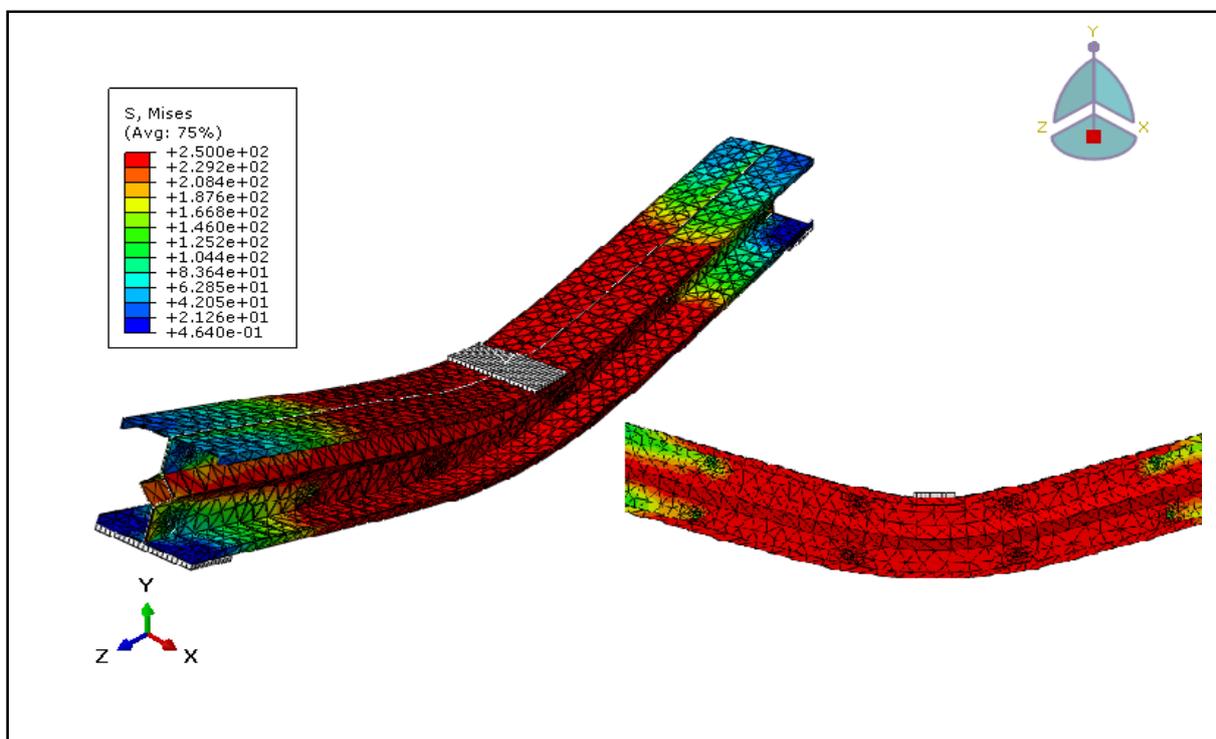


Figure III.25: Iso valeurs de l'état de contrainte Von Mises de la poutre PRT sous ABAQUS

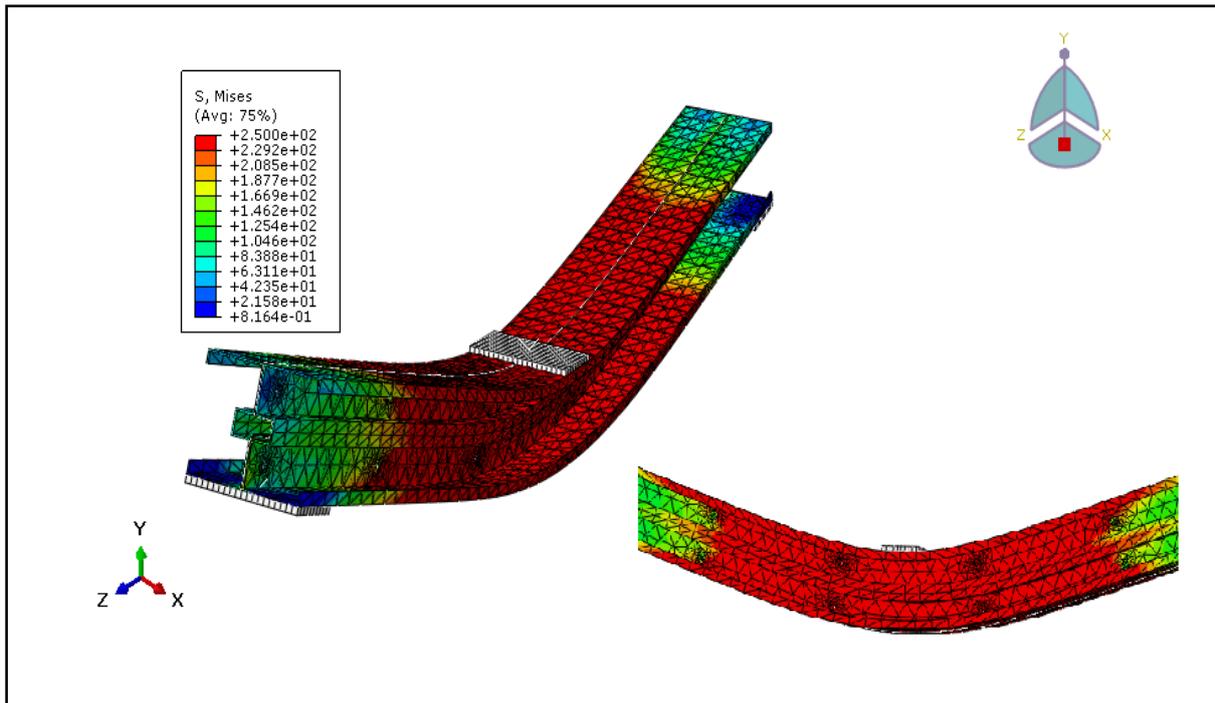


Figure III.26: Iso valeurs de l'état de contrainte Von Mises de la poutre PRC sous ABAQUS

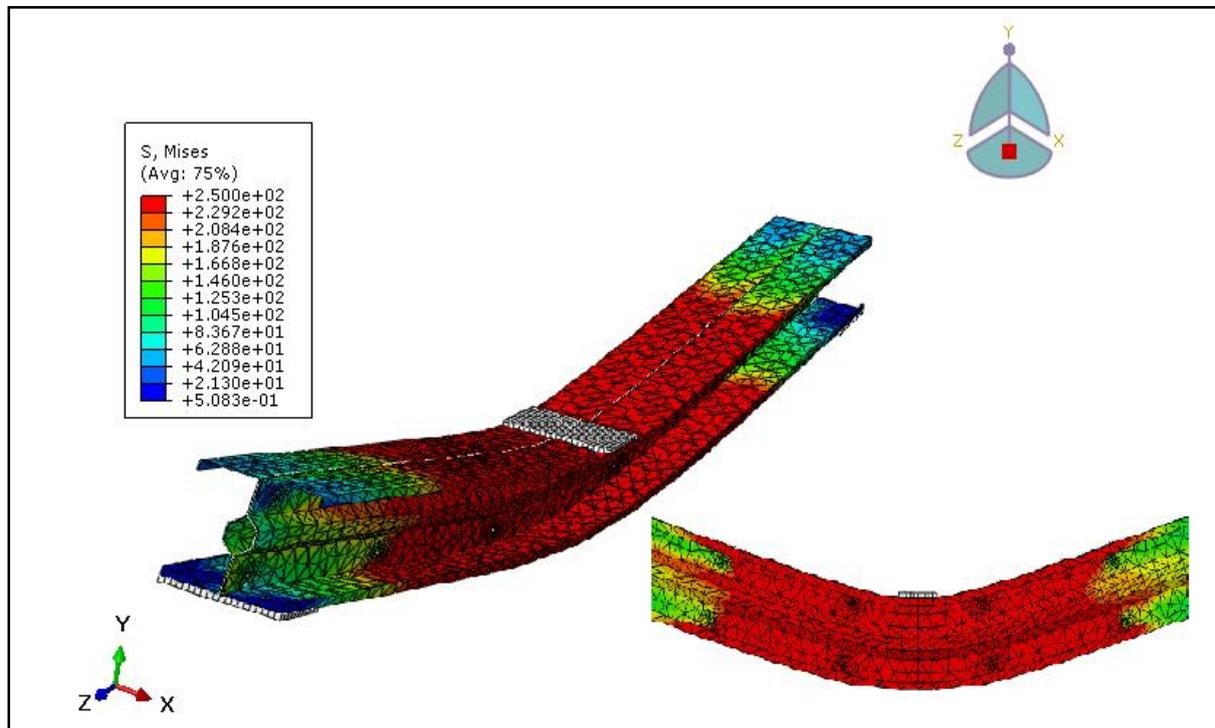


Figure III.27: Iso valeur de l'état de contrainte de Von Mises des poutres avec raidisseur trapèze

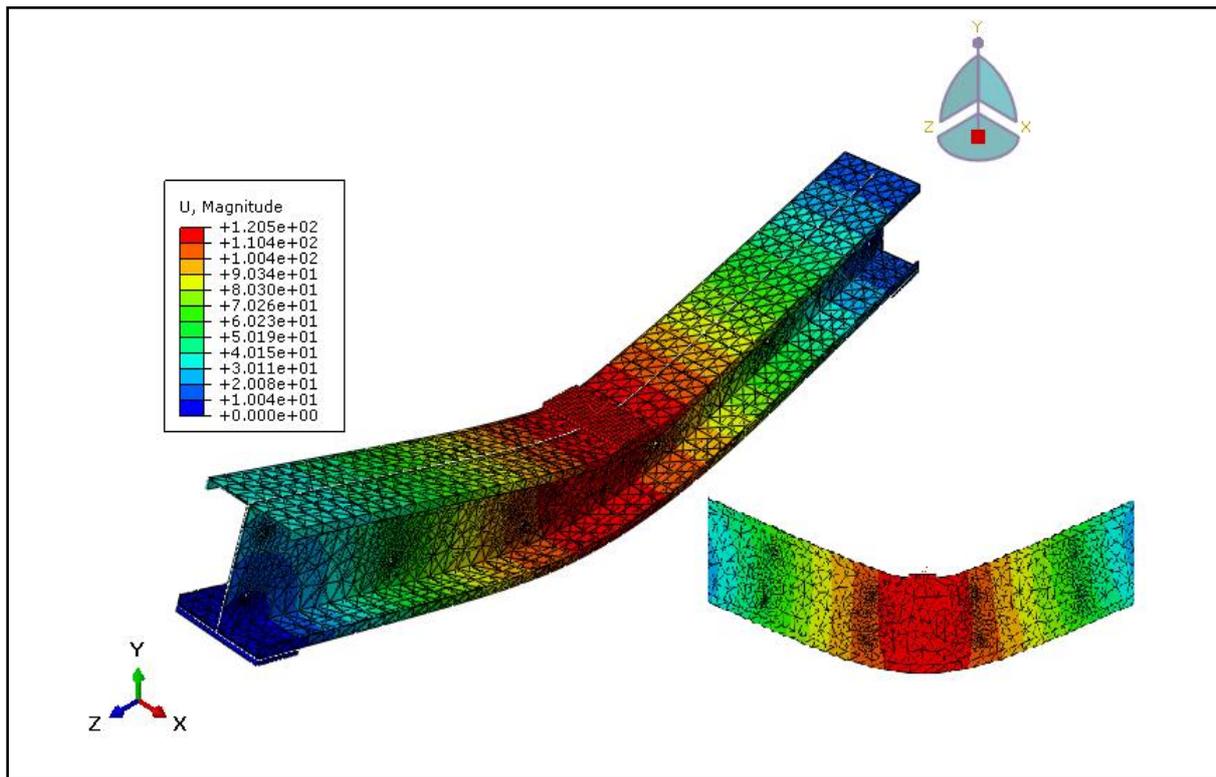


Figure III.28: Iso valeurs de la magnitude de la poutre PSR sous ABAQUS

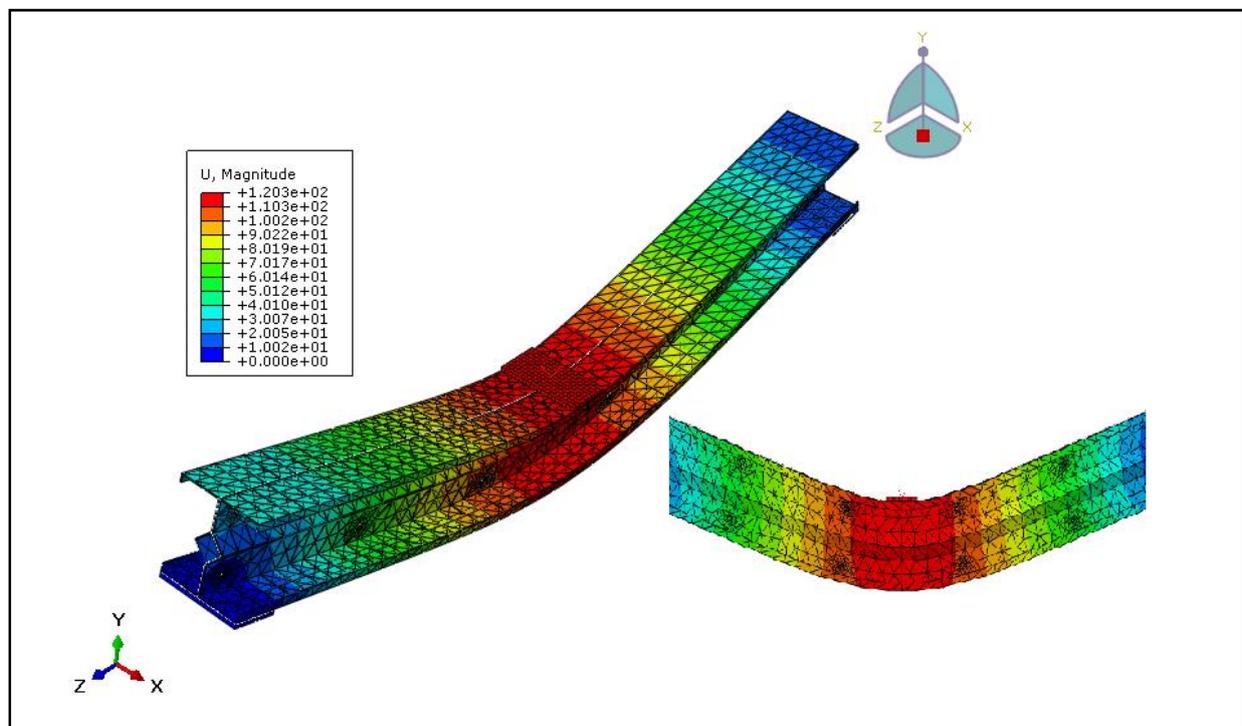


Figure III.29: Iso valeurs de la magnitude de la poutre PRT sous ABAQUS

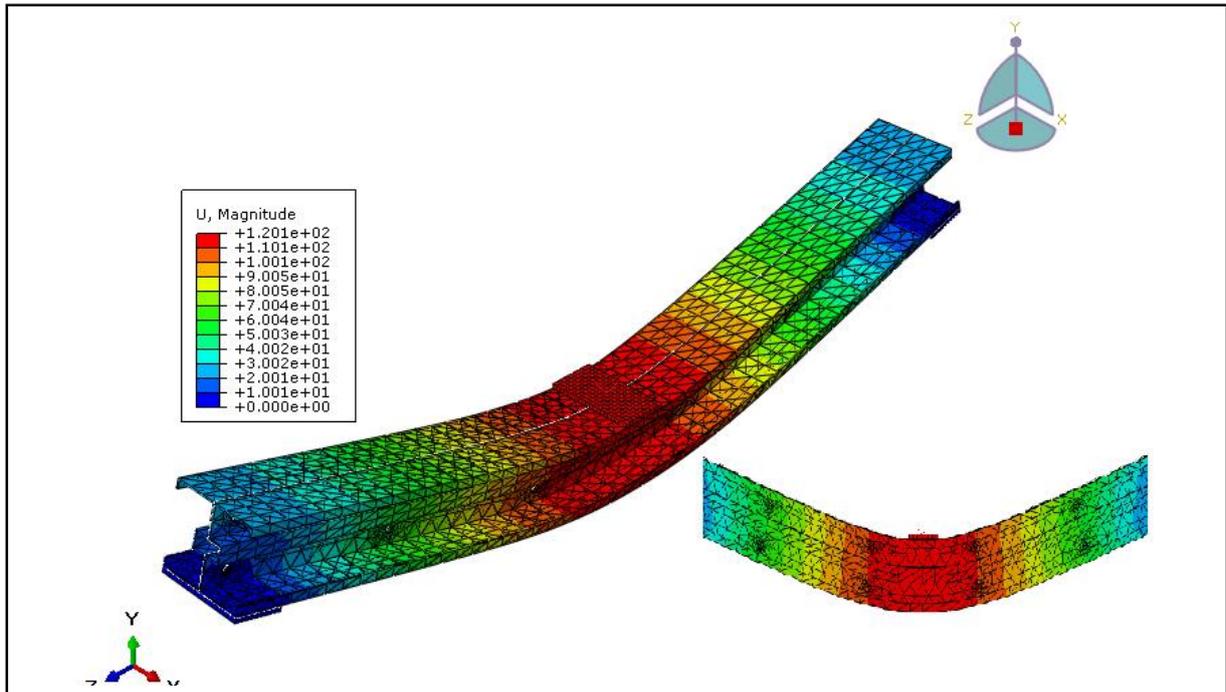


Figure III.30: Iso valeurs de la magnitude de la poutre PRC sous ABAQUS

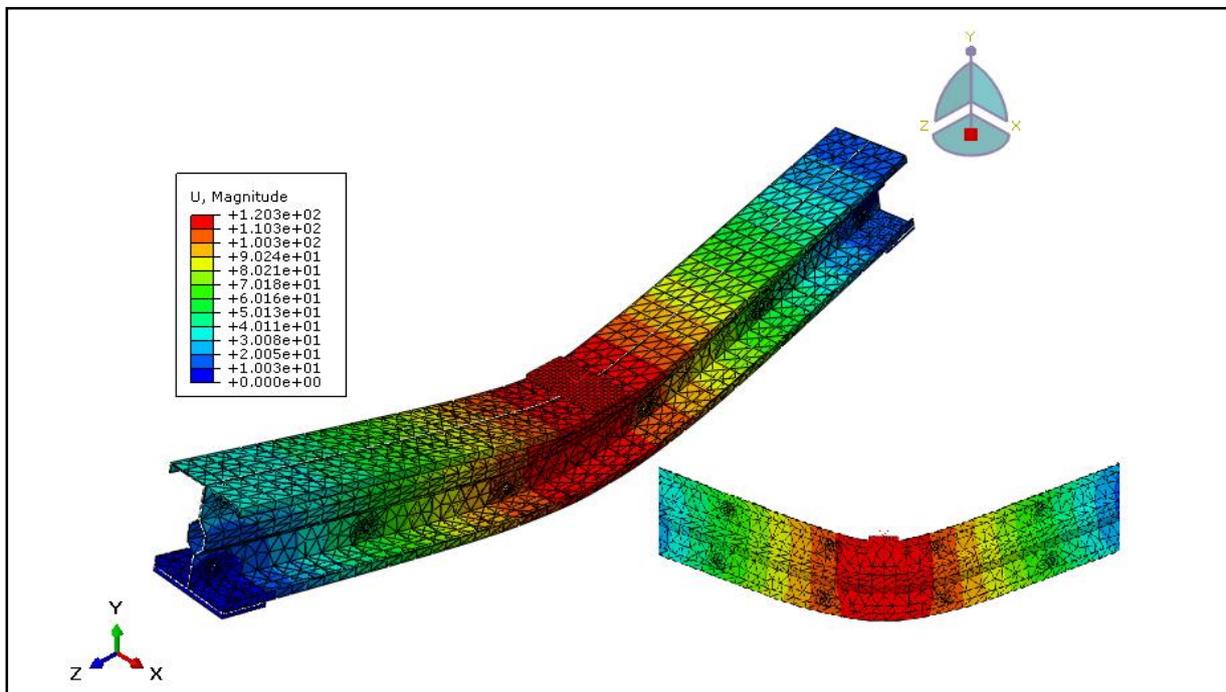


Figure III.31: Iso valeurs de la magnitude de la poutre PRTra sous ABAQUS

III-4. Comparaison numérique entre les profilés

Une diminution de déplacement latéral U_x des poutres renforcées surtout pour les modèles PSR et PRC, une élimination totale de mode d'instabilité distortionnel avec une augmentation de la charge de ruine d'ordre 12% par rapport au modèle renforcée (PSR).

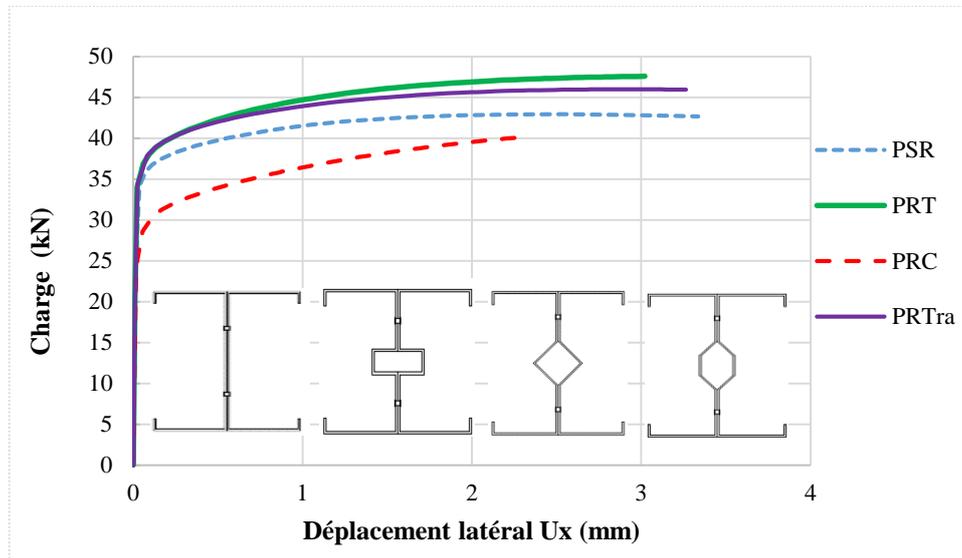


Figure III.32: Etude comparatif de l'état charge déplacement U_x des poutres composées avec différents forme de raidisseurs d'âmes

En décrivant la loi de comportement des quatre poutres composées en double C dos à dos, les quatre modèles ont un comportement non linéaire. Au début du chargement les poutres ont présenté un comportement élastique dont les déformations sont proportionnelles aux efforts appliqués, une plastification du matériau est obtenue pour des valeurs supérieures pour atteindre une valeur maximale de 0,032. La plasticité se traduit par la dissipation de l'énergie au cours de la déformation, l'énergie mécanique est transformée et conduisant à l'irréversibilité du comportement du matériau, ce mécanisme traduit également la ductilité du matériau qui permet aux métaux de subir des allongements significatifs avant de rompre.

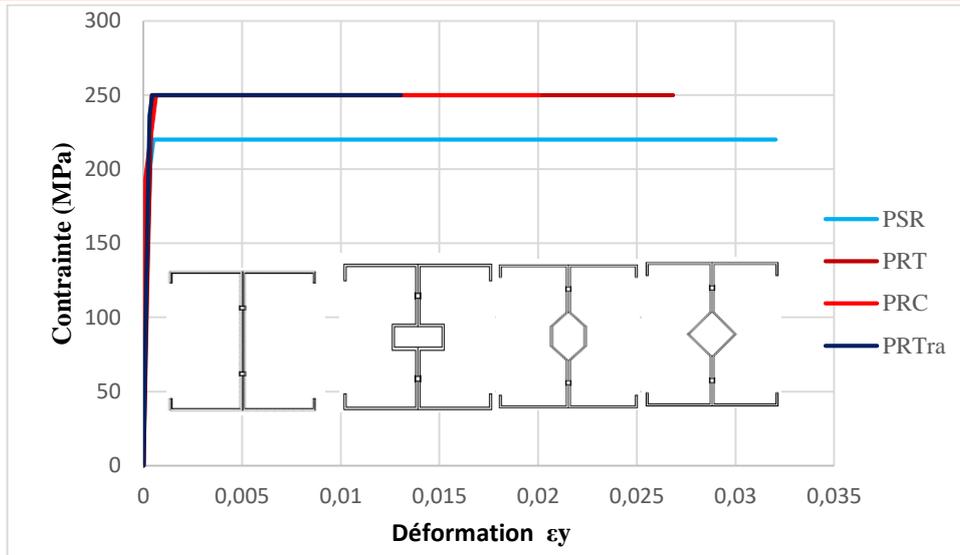


Figure III.33: Etude comparatif de l'état contrainte- déformation ϵ_y des poutres composées avec différents forme de raidisseurs d'âmes

De point de vue déplacement, dans l'intervalle de (0 à 25kN) les courbes sont confondues, par contre au-delà de cette charge une divergence très remarquable de la poutre assemblée avec un raidisseur carré. Les autres modèles se divergent pour des charges plus grandes telles que :

PSR(34,35kN), PRT(39,73kN), PRTra(39,57kN).

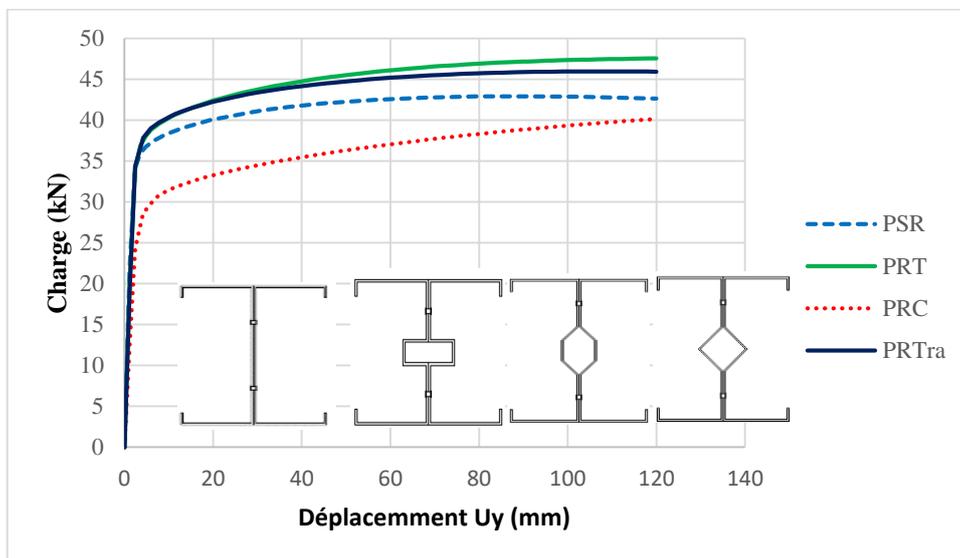


Figure III. 34: Etude comparatif de l'état charge déplacement U_y des poutres composées avec différents forme de raidisseurs d'âmes

D'après la figure III.36, on remarque une très bonne corrélation entre les résultats numériques donnés par ABAQUS et analytique inspirées d'après EUROCODE 3 la validation des résultats numériques. Les modèles trapézoïdal et triangulaire ont montré une capacité portante très élevée par rapport aux autres modèles avec élimination de mode d'instabilité distortionnel.

Une augmentation de 75% de la capacité de la poutre avec un raidisseur triangulaire par rapport à la poutre seule avec une chute brutale de déplacement latéral.

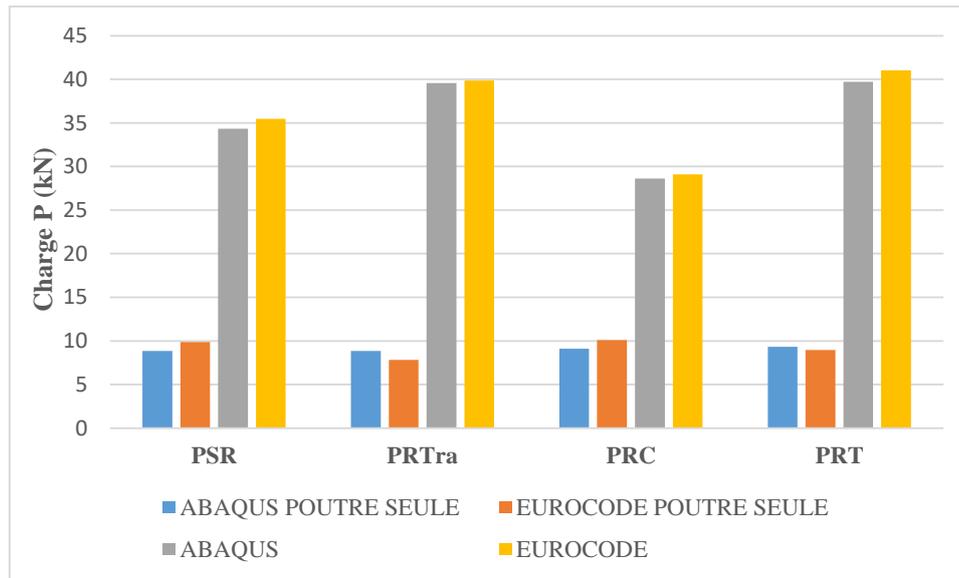


Figure III.35: Validation des résultats numériques et analytiques des modèles étudiés

Conclusion

Beaucoup de problèmes demeurent sans solution dans le domaine du comportement de la modélisation informatique et du design des profilés formés à froids. Quelques sujets ont pu être étudiés et en plus avoir des résultats prometteurs. Les profilés formés à froids constituent un sujet de recherche important suite à leur utilisation croissante en construction et à la tendance permanente vers une meilleure optimisation de poids et de rigidité. Suite à une application d'une charge compressive, ces profilés peuvent subir trois types d'instabilité locale (L), distorsionnelle (D), globale (G)

- Les résultats numériques ont montré qu'il n'y avait aucun dommage aux niveaux des assemblages.

- La poutre seule avec un raidisseur d'âme triangulaire à présenter une augmentation de la charge critique d'ordre 19% par rapport au modèle de la poutre sans raidisseur.

- Pour évaluer cette charge critique des méthodes numériques sont proposées : la MEF, L'EUROCODE restent un outil très fiable pour identifier les modes d'instabilité des profilés formés à froids.

- Notez que lors de l'ajout des raidisseurs le déplacement latéral il diminue

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 flexion quatre points et élargir les études à d'autres formes d'instabilité. -la comparaison de la section avec d'autres configurations tel que la configuration face à face en profilé formé à froid.