

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Année 2019

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Thème :

**La modélisation du comportement thermomécanique d'un
panneau raidi**
-Application au procédé de soudage et de traitements thermiques

Domaine : Sciences et Technique

Spécialité :

GENIE CIVIL

OPTION :

CHARPENTE METALLIQUE

Par

Noms, Prénoms des Etudiants (es)

LABIDI WALID

BOUAITA WAIL

DIRECTRICE DU MEMOIRE : KOUIDER NADIA, MAA, GENIE CIVIL, U B M ANNABA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : HADIDANE.YAZID

MC, GENIE CIVIL, U B M ANNABA

EXAMINATRICE : OTMANI. NADIA

MC, GENIE CIVIL, U B M ANNABA

Remerciements

Au nom de Dieu dont le nom ouvre tout parcours et sans lui rien ne sera accomplie.

Que Dieu bénisse notre travail

Je tiens en premier lieu à remercier le comité d'examen de mon mémoire de Master.

Monsieur **Hadidane.Y**, qui nous a fait l'honneur de présider le jury, ainsi qu'à l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Mes sincères remerciements, ma reconnaissance et ma gratitude extrême s'adressent à Madame **Kouider.Nadia**, ma Directrice de mémoire. Merci pour nous avoir fait confiance. Merci aussi pour votre disponibilité. Votre dynamisme, votre motivation sans limites. Bravo pour tout ce que vous avez fait pour nous.

Nous remercions très vivement madame **Otmani.N**, membres de jury Merci de bien vouloir examiner notre document.

Que notre accomplissement nous portera Gloire et fierté

DEDICACE

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qui j'aime jusqu'à les frontières de l'imagination ; **Ma chère Maman, mon cher Papa**, sans eux, je n'aurais pas abouti à ce stade d'étude, que Dieu puisse m'aider à les honorer, les servir et les combler.

A toute ma famille :

Mes sœurs : **Ikram** et **Nihel**.

Mes chers **oncles** ainsi que mes **tantes**.

A mon encadreur **Mme. KOUIDER NADIA**.

A mon binôme « **BOUAITA WAIL** », A qui je souhaite tout le bonheur, ainsi qu'à sa famille.

A tous mes chers amis : **Diabi Bakou ; Benlamri Aimen ; Foual Diya ; Bentaieb Amine; Guedaoura Badri ; Belaid Yassine ; Merzougi Okba ; Rouabah Soufiene ; Boussaha Med ; Kaddouri Amine ; Bousnane Khalil ; Raheb Amine**.

Les Cousin(e)s : **Fares Amir ; Fetouhi Nihed ; Labidi ilyes**

A une personne très chère : **H.Kiiky**

A Tous mes enseignants de département de Génie Civil.

A tous mes collègues de ma promotion.

A ma deuxième Famille : **OKLM%**.

DEDICACE

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qui j'aime jusqu'à les frontières de l'imagination ; **Ma chère Maman, mon cher Papa**, sans eux, je n'aurais pas abouti à ce stade d'étude, que Dieu puisse m'aider à les honorer, les servir et les combler.

A toute ma famille :

Mon cher frère : **Hazem**.

Mes chers **oncles** ainsi que mes **tantes**.

Mes chers cousin et cousine

A mon encadreur **Mme. KOUIDER NADIA**.

A mon binôme « **LABIDI WALID** », A qui je souhaite tout le bonheur, ainsi qu'à sa famille.

A tous mes chers amis : **Fougheli Marouane ; Belhamzaoui Khaled ; Laouar Imed ; Drici Messaoud; Ayed Merdaci Islem ;** les jumeaux : **Boulebtatech**

A une personne très chère : **Hadji Malek Nour El Houda**

A Tous mes enseignants de département de Génie Civil.

A tous mes collègues de ma promotion.

A ma deuxième Famille : « **Les Indépendants De Bône** »

Résumé :

Les futures industries pour les structures métalliques seront de plus en plus intéressées par les aspects de renforcement. Or, la liaison des éléments de renforts exige l'utilisation d'un moyen d'assemblage, dont divers procédés peuvent être utilisés tels que le boulonnage, le rivetage, le collage, le soudage, etc. Le procédé de soudage présente une modélisation numérique très complexe, car il implique des couplages entre des phénomènes mécaniques, thermiques et métallurgiques qui conduisent à la création des contraintes et des déformations résiduelles irrégulièrement distribuées au niveau de la section soudée.

Ce travail de recherche vise à la prédiction de domaine de réparation et de renforcement des plaques métalliques munies de raidisseurs. Avec l'estimation des contraintes et distorsions résiduelles générées par une opération de soudage. Commencant par une simulation tridimensionnelle thermo-mécanique est réalisée par le logiciel ABAQUS 6.14.

Afin de calibrer les résultats numériques, un calcul analytique est fait en prenant compte l'effet de la température due à l'opération de soudage.

MOTS CLES : Contraintes résiduelles, soudage, modélisation, ABAQUS, élément finie.

1.6.4	Soudage à l'arc électrique	24
1.6.4.a	Soudage a l'électrode enrobée	24
1.6.4.b	Soudage MIG (METAL INERT GAS)	24
1.6.4.c	Soudage MAG (METAL ACTIVE GAS)	24
1.6.4.d	Soudage TIG (TUNGSTEN INERT GAS)	25
1.7	Mode de soudure	28
1.7.1	Soudure d'angle	28
1.7.2	Soudure en entaille	29
1.7.3	Soudure en bout	29
1.7.4	Soudure en bouchon	30
1.8	Préparation des bords des pièces à souder	31
1.8.1	Type de chanfrein	31
1.8.2	Dimensionnement des chanfreins	32
1.8.3	Gorge d'un cordon de soudure	33
1.9	Les contraintes résiduelles	34
1.9.1	Introduction	34
1.9.2	Définition des contraintes résiduelles	35
1.9.3	Déformations et contraintes induites par le soudage	35
1.9.3.a	Contraintes résiduelles directes	36
1.9.3.b	Contraintes résiduelles indirectes ou de brigade	36
1.9.3.c	contraintes parasites (extérieures a l'opération de soudage)	36
1.9.3.d	contraintes résiduelles directes longitudinales dans les assemblages bout à bout	36
1.9.4	Influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé	37
1.10	Risques dus aux contraintes résiduelles.	37
1.10.1	Structures soumises au flambement (ou flambage)	37
1.10.2	Structures soumises au risque de rupture fragile	37

Chapitre II

Aspect réglementaire

2	voilement	40
2.1	Introduction du voilement	41

2.2	Théorie linéaire du voilement élastique	42
2.2.1	Contrainte critique de voilement élastique	42
2.2.2	Coefficient de voilement	44
2.2.3	Influence du nombre de cloques de voilement	45
2.2.4	Influence des conditions de bord	46
2.2.5	Influence du type de sollicitation	47
2.2.6	Plaques munies de raidisseurs	50
2.2.6.a	Fonction d'un raidisseur	50
2.2.6.b	Position optimale et rigidité nécessaire d'un raidisseur	51
2.7	Définition du modèle	56
2.8	Vérification de voilement selon l'eurocode3	56
2.9	Introduction de la soudure	61
2.10	Résistance des soudures	61
2.10.1	Soudure d'angle	61
2.10.2	Epaisseur d'un cordon de soudure d'angle	62
2.10.3	Types de joint de soudure	62
2.11	La vérification de la soudure selon l'eurocode3	64

Chapitre III

Partie Numérique

3.1	Introduction	66
3.2	Objectif	67
3.3	Les phénomènes physiques impliqués lors de l'opération de soudage	67
3.4	définition de logiciel de calcul par éléments finis" ABAQUS 6.14-1	68
3.4.1	Description du logiciel	68
3.4.2	Chaque élément peut être caractérisé selon différents critères	79
3.4.3	Domaines physiques	79
3.4.4	Problèmes	79
3.4.5	Catégories d'éléments	79
3.5	Les étapes de modélisation des éléments sous ABAQUS 6.14	70
3.6	Organigramme séquentiel de la modélisation sous Abaqus :	71

3.7	Définition des modèles	72
3.7.1	Mode d'analyse	72
3.7.2	Présentation des plaques étudiées	73
3.7.3	Dimensionnements des raidisseurs	75
3.7.4	Type de soudure	75
3.7.5	Type de chargement et conditions aux limites	78
3.7.6	Analyse de la convergence des incréments de temps (STEP)	78
3.7.7	Maillage (Mesh)	79
3.8	Analyse mécanique des plaques raidies	80
3.9	Définition du comportement non linéaire	80
3.9.1	Comportement non linéaire des plaques assemblées	81
3.10	Etude mécanique de la plaque non raidie	82
3.11	Etude thermique des plaques raidies	83
3.11.a	Contraintes résiduelles transversales	83
3.11.b	Contraintes résiduelles longitudinales	84
3.11.c	Déplacements transversaux	85
3.11.d	Déplacements longitudinaux	86
3.11.e	Déformations transversales et longitudinales	86
3.12	Température	87
3.12.a	Evaluation de la température dans le nœud 36	87
3.13	La simulation numérique de l'assemblage soudé sous ABAQUS	89
3.14	Hypothèses d'interaction thermo- mécanique de soudage	89
3.15	Etude comparative	90
3.16	Etude comparative entre le comportement mécanique et thermo-mécanique	94
3.16.a	Analyse mécanique	94
3.16.b	Analyse thermo-mécanique	95
3.17	Etude thermique	96

Liste des tableaux :

N°.Titre	Pages
1.1 Caractéristiques mécaniques des aciers pour boulons	13
1.2 Caractéristique et symbole des boulons	15
1.3 Symboles pour les soudures	21
1.4 Procédés de soudage à l'arc: équivalence des termes Français, Allemand, Anglais	25
1.5 Différent mode de chanfrein	33
2.1 Valeurs minimales du coefficient de voilement k pour différents types De sollicitations et de conditions de bord	51
2.2 Valeurs de la rigidité relative nécessaire X_s ,néc pour différents cas	56
2.3 Facteur de corrélation pour les soudures d'angle	64
3.1 Les propriétés géométriques et physiques des plaques pour analyse mécanique	82
3.2 Propriétés mécaniques et thermiques pour l'analyse de la température	83

Liste des figures :

N°.Titre	Pages
1.1. Loi de comportement ($\sigma - \varepsilon$) de l'acier	6
1.2. Section soumise à un effort de traction	7
1.3. Section soumise a un effort de compression.	7
1.4. Différents type de rivets	12
1.5. Pose d'un rivet	12
1.6. Boulon ordinaire en charpente métallique	14
1.7. Boulon à haute résistance (HR)	15
1.8.Exemple d'assemblage boulonné.	15
1.9. Transformateur de THOMSON pour le soudage électrique par résistance	17
1.10. Assemblage soudé	18
1.11. L'opération de soudage	19
1.12. les inconvénients de l'opération de soudage	20
1.13. Les effets engendrés lors de processus de soudure	20
1.14. Soudage électrique par résistance par points	22

1.15. Matériel de soudage au gaz	22
1.16. Coupe transversale d'un joint soudé	23
1.17. Présentation schématique des procédés MIG / MAG	25
1.18. Soudage en TIG	26
1.19. Organigramme des procédés de soudage les plus répandus	27
1.20. Principe de la soudure d'angle	28
1.21. Soudure en entaille	29
1.22. les modes de Soudage en bout	30
1.23. Soudure en bouchon	30
1.24. Chanfreins des bords pour les soudures bout à bout	31
1.25. Chanfreins des bords d'assemblage en T	31
1.26. Chanfreins des soudures d'angle	31
1.27. Chanfreins des bords pour les soudures bout à bout	33
1.28. Chanfreins des bords pour les soudures bout à bout	34
1.29. Déformation angulaires et contrainte résiduelles longitudinales provenons du soudage	36
2.1. Voilement d'une plaque	41
2.2. Valeurs du coefficient de voilement k	45
2.3. Représentation symbolique des conditions de bord	46
2.4. Influence des conditions de bord	47
2.5. Valeurs du coefficient de voilement k en fonction du type de sollicitation	49
2.6. Influence d'un raidisseur sur le mode de voilement	51
2.7. Position optimale des raidisseurs sur une plaque en fonction du type de sollicitation	52
2.8. Variation du coefficient de voilement en fonction de la rigidité relative d'un raidisseur	53
2.9. Rigidité relative nécessaire d'un raidisseur pour qu'il constitue un appui fixe	54
2.10.a. Présentation du panneau non raidi	56
2.10.b. Présentation des panneaux munie des raidisseurs	56
2.11. L'épaisseur utile ou gorge "a"	61
2.12. Exemples de soudures complètement pénétrées	62
2.13. Représentation d'un cordon de soudure	63
3.1. Phénomène en jeu lors de l'opération de soudage	67
3.2. Description schématique du modèle thermomécanique	68
3.3. Les catégories d'éléments dans le logiciel ABAQUS	69
3.4. Organigramme séquentiel de la modélisation thermomécanique sous ABAQUS	71
3.5. Plaque métallique sans raidisseur	73

3.6. Plaques métalliques renforcées	73
3.7. Plaque non raidie sous ABAQUS 6.14	73
3.8. Plaque raidie avec un seul raidisseur sous ABAQUS 6.14	74
3.9. Plaque raidie avec deux raidisseurs sous ABAQUS 6.14	74
3.10. Plaque raidie avec trois raidisseurs sous ABAQUS 6.14	74
3.11. Dimensionnement du raidisseur sous ABAQUS 6.14	75
3.12. L'épaisseur utile ou gorge "a"	75
3.13. Sens de cordon de soudure	76
3.14. Transfert de la source de chaleur lors de l'opération de soudure sous ABAQUS 6.14	77
3.15. Mode de chargement et conditions d'appuis sous ABAQUS 6.14	78
3.16. Les incréments de temps lors de l'opération de soudage	79
3.17. Maillage de la plaque munie d'un raidisseur sous ABAQUS 6.14	79
3.18. Maillage de la plaque munie de deux raidisseurs sous ABAQUS 6.14	79
3.19. Maillage de la plaque munie de trois raidisseurs sous ABAQUS 6.14	80
3.20. La non linéarité	81
3.21. Etat de déplacements U2 le long de la plaque non renforcée	82
3.22. Etat de déplacements U2 le long de la plaque non renforcée	83
3.23. Etat de contraintes résiduelles transversales dans la plaque raidie	84
3.24. Etat de contraintes résiduelles longitudinales de la plaque raidie	85
3.25. Etat de déplacements résiduels transversaux dans la plaque raidie	85
3.26. Etat de déplacements résiduels longitudinaux dans la plaque raidie	86
3.27. Etat de déformations résiduelles de la plaque raidie	87
3.28. Les résultats de la simulation du point situés dans la ligne de fusion	88
3.29. Les résultats de simulation par éléments finis en des points situés à des distances différentes de la ligne de fusion de la soudure, 3 mm, 16mm, 32mm respectivement	88
3.30. Etat de déformation de la plaque renforcée par un seul raidisseur	90
3.31. Etat de déformation de la plaque renforcée par deux raidisseurs	91
3.32. Etat de déformation de la plaque renforcée par trois raidisseurs	91
3.33. Etat de contrainte de la plaque renforcée d'un raidisseur	92
3.34. Etat de contrainte σ_{xx} de la plaque renforcée par deux raidisseurs	93
3.35. Etat de contrainte de la plaque renforcée de deux raidisseurs	94

3.36. État de déplacement des plaques raidies lors de l'opération de soudage	94
3.37. Etat de déplacements thermo-mécanique en cours de soudure des plaques renforcée pendant $t=25s$	95
3.38. Etat de déplacements thermo-mécanique au refroidissement des plaques renforcée pendant $t=85s$	96
3.39. Etat de contraintes thermiques des plaques renforcées	97
3.40. Etat de contraintes thermiques des plaques renforcées	97
3.41. Etat de déplacement thermiques des plaques renforcées	98

- **Notation**

- ❖ F_{UB} : La résistance à la traction de boulon.
- ❖ d_0 : Diamètre du trou d'un boulon.
- ❖ d : Diamètre de boulon.
- ❖ ρ : Coefficient du poisson
- ❖ **ZF** : La zone fondue
- ❖ **ZAT** : La zone affectée thermiquement.
- ❖ **MIG** : Métal Inert Gas
- ❖ **MAG** : Métal Active Gas
- ❖ **TIG** : Tungsten Inert Gas
- ❖ **A** : L'angle de chanfrein pour assemblage bout à bout.
- ❖ **t** : Épaisseur de la plaque.
- ❖ **A%** : L'allongement.
- ❖ **E** : Module de Young.
- ❖ F_y : Module d'élasticité.
- ❖ ρ : Densité.
- ❖ **S11** : Contrainte sur xx.
- ❖ **S22** : Contrainte sur yy.
- ❖ **S33** : Contrainte sur zz.
- ❖ **E11** : Déformation sur xx.
- ❖ **E22** : Déformation sur yy.
- ❖ **E33** : Déformation sur zz.
- ❖ **U1** : Déplacement sur xx.
- ❖ **U2** : Déplacement sur yy.
- ❖ **U3** : Déplacement sur zz.
- ❖ α : Coefficient de dilatation.
- ❖ **K** : Conductivité thermique.
- ❖ **Cp** : Chaleur spécifique.

Introduction générale

Depuis les années 70, le secteur de la construction est de plus en plus concerné par des aspects de renforcement, réutilisation et modernisation de vieux bâtiments, qui peuvent avoir été endommagés, par exemple, par l'action atmosphérique ou un tremblement de terre ou qui doivent être modifiés en fonction du changement d'utilisation, du remplacement de composants non structurels tels que les utilités ou afin de supporter des installations additionnelles. Idéalement, la possibilité de remise en état devrait être considérée en veillant à la flexibilité et l'adaptabilité de la forme structurelle utilisée.

Les ouvrages sont donc soumis à un vieillissement sous l'effet du temps, qui résulte de l'endommagement mécanique, chimique et thermique. Cet endommagement peut avoir des conséquences importantes, et conduire à la ruine de la structure avec toutes les retombées, c'est cela le besoin de renforcer est nécessaire.

Le renforcement par augmentation de section nécessite généralement des liaisons de type soudage, plusieurs techniques ont été développées concernant le mode de liaison par soudage. Le soudage est une opération qui consiste à joindre deux parties d'un même matériau avec un cordon de soudure constitué d'un métal d'apport, ce dernier sert de liant et assure la continuité mécanique entre les deux pièces à assembler. Dans le cas de l'utilisation d'un métal d'apport, ce composé doit avoir des propriétés au moins égales et une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler.

Les constructeurs de structures mécano-soudées sont régulièrement confrontés au problème du développement de contraintes internes dites résiduelles et de distorsions introduites pendant le processus de soudure et de refroidissement qui est particulièrement délicat à résoudre empiriquement.

L'étude des procédés de soudage apparaît actuellement comme un domaine de recherche à la fois ouvert et complexe car il demande de mettre en commun des connaissances issues de domaines distincts de la physique et de la mécanique. Ainsi, la description d'un des procédés le plus couramment utilisé, le soudage à l'arc, met en jeu des phénomènes physiques aussi variés que l'étude des plasmas, des interactions magnétiques et hydrodynamiques, la description et la quantification des transferts de chaleur, les modifications microstructurales des matériaux soudés, l'apparition de contraintes résiduelles, etc.

Objectif du travail :

L'objectif de ce travail est :

- Donner les définitions générales des différents modes d'assemblage dans les structures en charpente métallique et surtout l'assemblage soudé.
- Évaluer l'effet de l'assemblage soudé sur les pièces à assembler.
- Estimation des contraintes et des déformations résiduelles due à l'opération de soudage.
- Étudier un problème d'instabilité élastique qui est le voilement toute en basant sur les instructions de l'Eurocode.
- L'utilisation des techniques de renforcement des plaques métalliques

Organisation du mémoire :

Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre :

L'étude bibliographique réalisée tout au long de ce travail est exposée dans ce chapitre. Elle a été rédigée dans la perspective de répondre à plusieurs questions inhérentes à ce travail de mémoire : une description générale du procédé de soudage avec une présentation de l'influence de moyen d'assemblage (soudage) sur les éléments à assemblés, malgré ces nombreux avantages, il y a certaines limites à ce processus dans leurs utilisations. Les défauts de soudage influencent sur les propriétés souhaitées de l'assemblage. Les cycles thermiques provoquant par la source de chaleur affectent de manière significative des paramètres de contraintes résiduelles, déformations, microstructure de l'acier,

Dans le deuxième chapitre :

Englobe des aspects réglementaires analytiques proposés par les normes de l'EUROCODE3 pour les modèles étudiés de point de vue problème d'instabilité élastique (voilement) et vérification de soudage.

Dans le troisième chapitre :

Une modélisation numérique approfondie du procédé de soudage sur le plan thermique que sur plan mécanique des plaques métalliques raidies sous le logiciel ABAQUS 6.14, ces plaques raidies sont sollicitées par une charge surfacique uniformément répartie, L'histoire thermique et les modifications microstructurales provoquées par le soudage engendrent des contraintes et des déformations résiduelles et qu'on a maîtriser. Cette modélisation sera calibrée par un calcul analytique basé sur les formules de **l'EUROCODE**.

La conclusion générale clôture ce manuscrit de mémoire en synthétisant les principaux résultats de l'influence des différents paramètres sur le comportement thermo mécanique des éléments métalliques renforcée par soudage.

Des perspectives de recherche sont aussi présentées pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes pour les travaux futurs.

Chapitre 01

Partie bibliographique



1. GENERALITES SUR L'ACIER

1.1. INTRODUCTION :

L'utilisation de l'acier dans la construction remonte à la fin du XIXe siècle, bien que les métaux ferreux soient connus depuis environ quarante siècles. Auparavant on employait la fonte qui peut se mouler facilement mais se révèle cassante et impossible à forger. Il faut donc l'assembler à l'aide de boulons, de vis ou de clavettes. On est progressivement passé, à partir des années 1840, de l'usage de la fonte à celui du fer puddlé, la fonte étant affinée industriellement pour obtenir du fer pur, plus souple et plus facile à laminier, à percer et à forger. Le principe des rivets posés à chaud a permis de disposer d'un mode d'assemblage universel et facile à mettre en œuvre.

C'est une cinquantaine d'années plus tard que l'acier a pu être produit de façon industrielle et s'imposer ainsi à partir des années 1890 comme le matériau de la construction métallique, avec des caractéristiques physiques bien supérieures au fer grâce à la présence de traces bien dosées de carbone et d'autres éléments chimiques. L'assemblage s'est d'abord fait avec des rivets, puis, à partir des années 1930, par la soudure ou le boulonnage. La sidérurgie n'a cessé de perfectionner les qualités de ses aciers [1].

1.1.1. Définition de l'acier :

L'acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et présentant une teneur en carbone inférieure à 2 %. Il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier. Si l'on ajoute plus de 0,5 % d'éléments d'alliage à l'acier, on parle d'acier allié. Si la proportion d'éléments d'alliage est inférieure à ce chiffre, on parle d'acier non allié.

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

- a. 1ère 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).
- b. 2ème phase : il est procédé à 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 ne possède plus qu'un faible

pourcentage de carbone. Une autre technique d'élaboration par arc électrique se développe actuellement [3].

1.1.2. Aciers de construction métallique :

Les constructions requièrent toujours une certaine rigidité et une certaine résistance, si bien que les aciers de construction doivent toujours avoir une résistance minimale. D'un autre côté, ces aciers à résistance supérieure sont moins déformables. La résistance s'obtient par l'ajout d'éléments d'alliage. Les principaux durcissant sont par ordre d'importance le carbone, le manganèse, le silicium, etc. Plus il y a d'éléments d'alliage, plus le matériau est dur. Les éléments d'alliage ont également une grande incidence sur la compatibilité de l'acier avec le soudage et la galvanisation, si bien que l'on ne peut ajouter indéfiniment des éléments d'alliage.

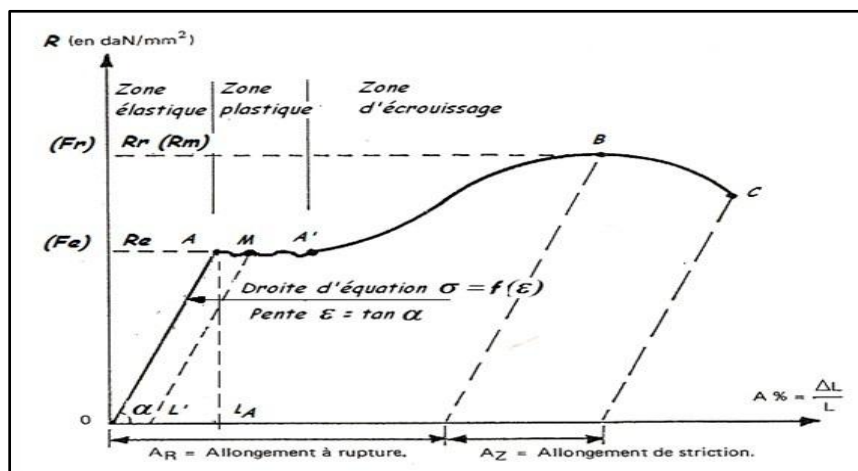


Fig.1.1. Loi de comportement ($\sigma - \varepsilon$) de l'acier

D'après la figure 1.1 ont distingué :

a) Domaine de déformation élastique : la déformation est réversible et proportionnelle à la charge.

b) Domaine de déformation plastique : la déformation est irréversible.

Fe : La limite d'élasticité d'un acier est la contrainte (charge unitaire) délimitant les domaines élastiques et plastiques.

Fr : La résistance à la traction représente la contrainte maximum admissible par un acier. Au-delà, il y a rupture.

$A\%$: L'allongement représente la déformation relative maximale admissible d'un acier avant rupture.

1.1.3. L'acier a la traction :

Un composant est dit tendu ou en traction pure lorsque ses extrémités sont soumises à des efforts qui imposent un allongement uniforme à toutes les fibres du composant. Le composant est tendu si la résultante des efforts s'exerçant sur une section quelconque se réduit à un effort normal appliqué au centre de gravité G de la section et dirigé de la section vers l'extérieur de l'élément. L'axe de l'effort normal est confondu avec la fibre moyenne de l'élément. Comme montre la figure 1.2.

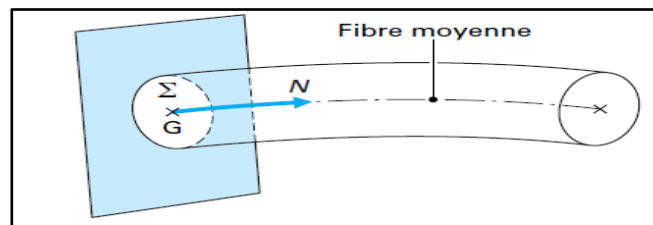


Fig.1.2. Section soumise à un effort de traction

1.1.4. L'acier a la compression :

Un composant est dit comprimé ou en compression pure lorsque ses extrémités sont soumises à des efforts qui imposent un rétrécissement uniforme à toutes ses fibres. Dans une section quelconque, la résultante des efforts se réduit à un effort normal appliqué au centre de gravité de la section et dirigé vers l'intérieur de l'élément. Comme montre la figure 1.3.

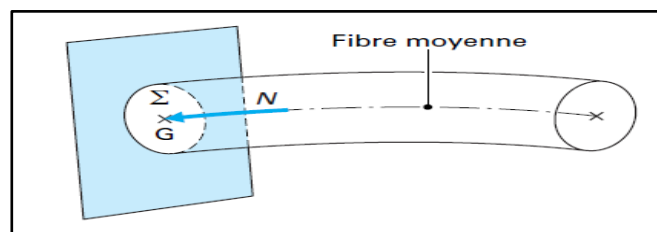


Fig.1.3. Section soumise a un effort de compression.

1.2. LES AVANTAGES DE L'ACIER :

- L'acier est léger mais très robuste. Les fondations nécessaires sont moins lourdes, le transport et le montage sur chantier sont plus aisés.
- L'acier bénéficie d'une flexibilité considérable dans ses applications. Les plans des bâtiments sur mesure peuvent être modifiés selon les besoins.
- L'acier est disponible dans une grande variété de produits laminés à chaud ou à froid, plats ou profilés.
- Les composants sont produits en usine pour garantir exactitude et qualité. La coordination et
- l'avancement du chantier est plus facile à contrôler.
- Il est uniquement nécessaire d'assembler les éléments.
- La construction en acier est rapide. Il n'y a pratiquement que des travaux à sec
- Les charges sismiques sont intégrées dans le calcul du bâtiment.
- Le contrôle de qualité et l'assurance qualité donneront une garantie supplémentaire d'emploi
- Réhabilitation et renforcement des structures.
- L'acier est un matériau qui se marie bien avec son environnement.
- Offre au concepteur une liberté de forme, une souplesse d'intervention, qui va lui permettre de s'adapter au mieux aux contraintes du site.
- Adaptation à tous les types de sites :
Utilisé en élément de façade ou d'enveloppe, l'acier apporte à l'architecte un éventail de textures, de géométries et de coloris, qui vont l'aider à répondre aux contraintes environnementales les plus aiguës, du site le plus contemporain au centre-ville classé monument historique, en passant par la pleine campagne.

Les constructions en acier sont constituées des différents types d'éléments structuraux qui doivent être chacun et de manière appropriée. La raison qui suit, qui nécessite le raccordement des pièces avec l'élément de base, et le besoin de renforcer, exige l'utilisation des moyens d'assemblage soit par rivetage, boulonnage, soudage, et cette dernière qui est technologiquement le plus rigide, économique et d'autre manière très commode, c'est pour cela on va étudier le cas d'assemblage par un modèle actuelle .

➤ Assemblages



1.3. LES ASSEMBLAGES :

L'assemblage est un procédé artistique qui consiste à assembler différents objets trouvés dans le cadre d'une composition en trois dimensions, exprimant et renouvelant le sens artistique de ces objets.

L'origine du mot (dans son sens artistique) date du début des années 1950, l'exposition "The Art of Assemblage" (l'art de l'assemblage) se décrit à partir de commissaire William C Seize, comme étant réalisés à partir des matériaux naturels ou manufacturés, des objets, entiers ou non, qu'on ne pourrait considérer comme des matériaux d'art.

Les assemblages jouent un rôle important dans le dimensionnement des structures. Ils influencent de manière significative la performance de celles-ci, ainsi que leur coût.

Une variété de moyens d'assemblage est disponible dans le cadre des sections formées à froid ; la plupart sont spécifiques des éléments à parois minces, bien que les éléments de fixation (connecteurs) utilisés dans les sections laminées à chaud puissent aussi être utilisés, pourvu que les différences de comportement soient prises en compte.

Les principaux buts :

- a. De fournir un aperçu des méthodes d'assemblage les plus fréquentes,
- b. D'illustrer les prescriptions structurales et non structurales,
- c. De présenter les critères et les méthodes de dimensionnement.

1.3.1. Rôle d'un assemblage :

Ils jouent un rôle très important, on peut les définir comme organes de liaison qui permettent de réunir et de solidariser plusieurs éléments entre eux, on assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les éléments assemblés, sans générer d'efforts parasites.

1.3.2. Principe des assemblages :

L'assemblage sert à réunir ensemble deux ou plusieurs pièces en assurant la bonne transmission des efforts sans entrer dans les calculs de vérification de la résistance des assemblages, le respect de quelques règles simples et le choix de bonne disposition des résultats satisfaits.

1.3.3. Principes Essentiels :

- L'assemblage le plus simple est à la fois le plus économique et le plus efficace.
- Respecter la convergence des axes de barre.
- Respecter pour la réalisation de l'ensemble des hypothèses de calcul (articulation, encastrement).
- N'utiliser des renforts qu'exceptionnellement
- Assurer l'étanchéité de l'assemblage de rétention d'eau est probable ou prévoir des possibilités d'évacuation
- Réduire le plus possible l'assemblage d'éléments de charpente sur le chantier (difficultés de mise en œuvre, intempéries)
- Il est recommandé d'exécuter en atelier le plus d'éléments de charpente finis en tenant compte toutefois des impératifs de transport et de mise en œuvre.

1.4. LES MODES D'ASSEMBLAGES :

Les différentes formes d'assemblages mentionnés sont généralement réalisées par les principaux modes d'assemblages suivants :

1.4.1. Le Rivetage :

Les rivets ont été le premier moyen d'assemblage utilisé en construction métallique. Actuellement, l'emploi des rivets est limité et on leur préfère, dans la plupart des pays industrialisés, les boulons et la soudure. On les rencontre donc essentiellement dans des structures anciennes, datant du début de ce siècle. Leur diamètre varie généralement de 10 à 28mm.

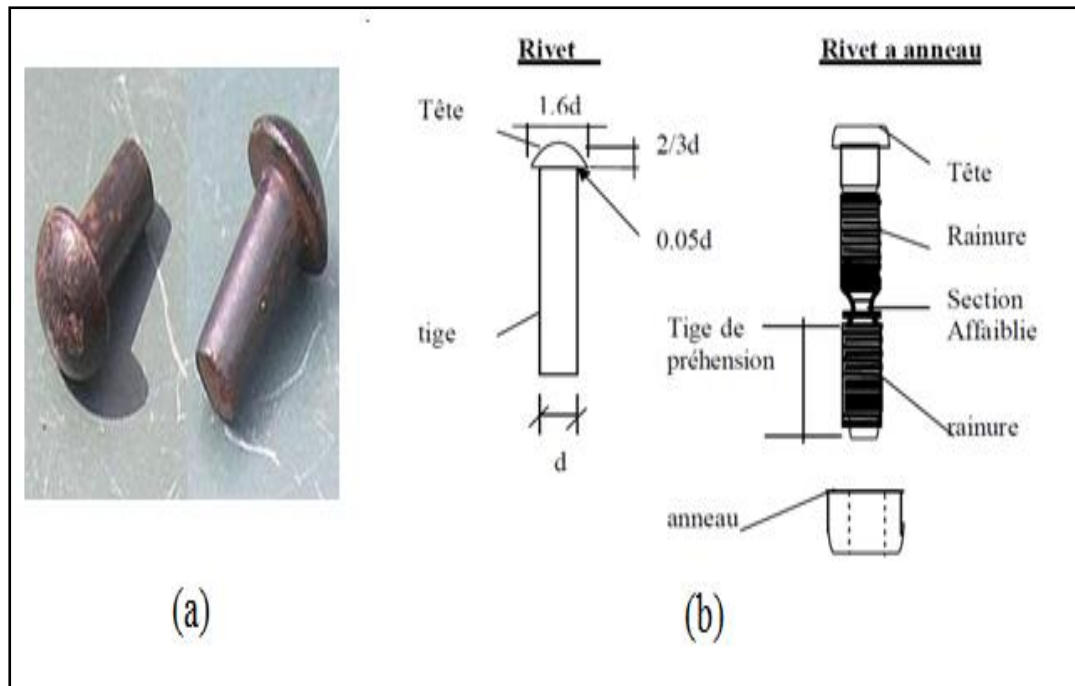


Fig.1.4. Différents type de rivets

(a) Rivets standards, (b) rivet à anneau

1.4.2. Rivets à anneau:

Les rivets à anneau (rivelons) sont des éléments de connexion mécanique qui tiennent à la fois du rivet (dans la mesure où il a une même forme de tête et qu'il introduit une force de précontrainte) et du boulon (car une partie de sa tige est rainurée).

Leurs principales caractéristiques est la tige se compose de deux parties rainurées (et non pas filetées), séparées par une portion de tige dont la section est affaiblie. L'acier des rivets à anneau est un acier à haute résistance.

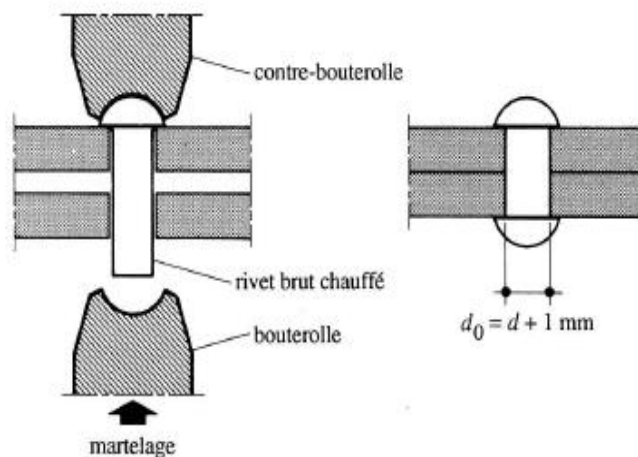


Fig.1.5. Pose d'un rivet

1.4.3. Le Boulonnage :

Les caractéristiques des différents types d'aciers utilisés pour les boulons tableau 1.1 présente les valeurs de la limite d'élasticité f_{yB} et de la résistance à la traction f_{uB} des quatre classes de qualité d'acier utilisées pour les boulons.

Boulons	Classe De qualité	f_{yB} (N / mm ²)	f_{uB} (N / mm ²)
De charpente	4.6	240	400
	5.6	300	500
A haute résistance	8.8	640	800
	10.9	900	1000

Tableau 1.1. Caractéristiques mécaniques des aciers pour boulons

Ce tableau montre également que l'on distingue deux types de boulons, qui se différencient par leurs caractéristiques mécaniques plus ou moins élevées :

Les boulons de charpente métallique (aciers 4.6 et 5.6).

Les boulons à haute résistance (aciers 8.8 et 10.9).

Les boulons de charpente métallique s'emploient couramment pour réaliser les assemblages faiblement sollicités des halles et des bâtiments. Les boulons à haute résistance s'utilisent en général pour les assemblages de ponts, ainsi que pour les assemblages fortement sollicités ou soumis à des effets dynamiques. Seuls les boulons à haute résistance peuvent être précontraints, L'eurocode 3 ajoute les classes de qualité 4.8, 5.8 et 6.8 à celles données dans le tableau et utilise la notion de boulon ordinaire à la place de boulon de charpente

1.4.4. Remarque :

Quel que soit le type de boulons, le jeu normal entre la tige du boulon et le trou des pièces assembler est fixé à 2mm pour les diamètres de boulons inférieurs ou égaux à 24mm, et à 3mm pour les diamètres de boulons égaux ou supérieurs à 27mm. Le diamètre d_0 du trou vaut donc

$$d_0 = d + 2\text{mm pour } d \leq 24\text{mm.} \quad (1.1)$$

$$d_0 = d + 3\text{mm pour } d \geq 27\text{mm.} \quad (1.2)$$

L'eurocode 3 propose les mêmes diamètres de trous, sauf pour les diamètres de boulons

$d = 14\text{mm}$, pour lesquels :

$$d_0 = d + 1\text{mm} \quad \text{avec } d = 14\text{ mm} \quad (1.3)$$

Dans certains cas, un jeu plus petit peut être exigé. On parle de boulons ajustés lorsque le jeu est de 0.3 mm seulement. L'emploi de boulons ajustés offre l'avantage de créer des assemblages avec un mouvement relatif possible très petit, donc des structures très peu déformables. Cependant, la réalisation des trous doit être précise, ce qui augmente sensiblement le coût de ce type d'assemblage. On n'utilisera de ce fait les boulons ajustés qu'en cas de nécessité absolue.

La figure 1.6 montre les différentes parties composant un boulon de charpente et un boulon à haute résistance. Ces derniers se distinguent des boulons de charpente métallique par l'inscription de la classe de qualité de l'acier du boulon sur leur tête et leurs rondelles. Il faut toujours prévoir une rondelle sous partie qui sera tournée lors de mise en place du boulon (en général l'écrou, parfois la tête, souvent les deux). Pour placer des boulons dans les ailes des profilés

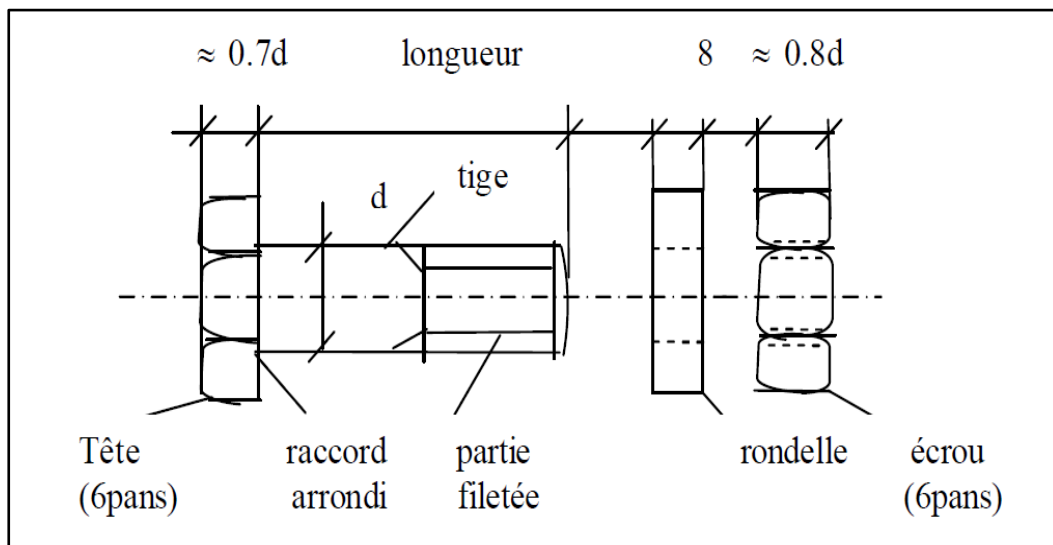


Fig.1.6.Boulon ordinaire en charpente métallique

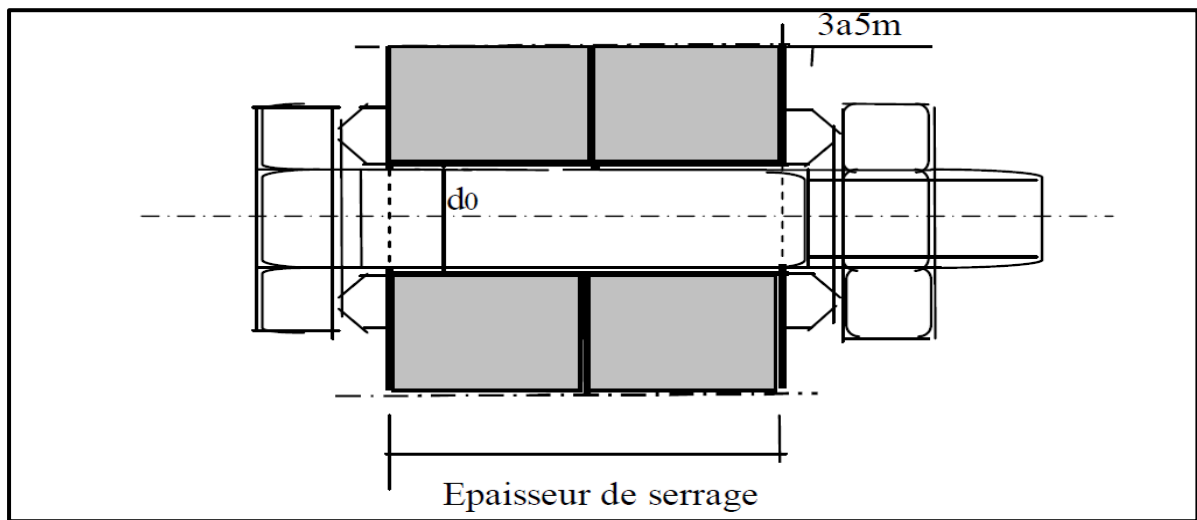


Fig.1.7. Boulon à haute résistance (HR)

	M12	M16	M20	M24	M27
Diamètre de la tige d (mm)	12	16	20	24	27
Diamètre du trou d_0 (mm)	14	18	22	26	30
Section de la tige A (mm^2)	113	201	314	452	573
Section résistante A_s (mm^2)	84	157	245	353	459
Symbole boulon de charpente					
Symbole HR non précontrainte					
Symbole HR précontrainte					

Tableau 1.2. Caractéristique et symbole des boulons

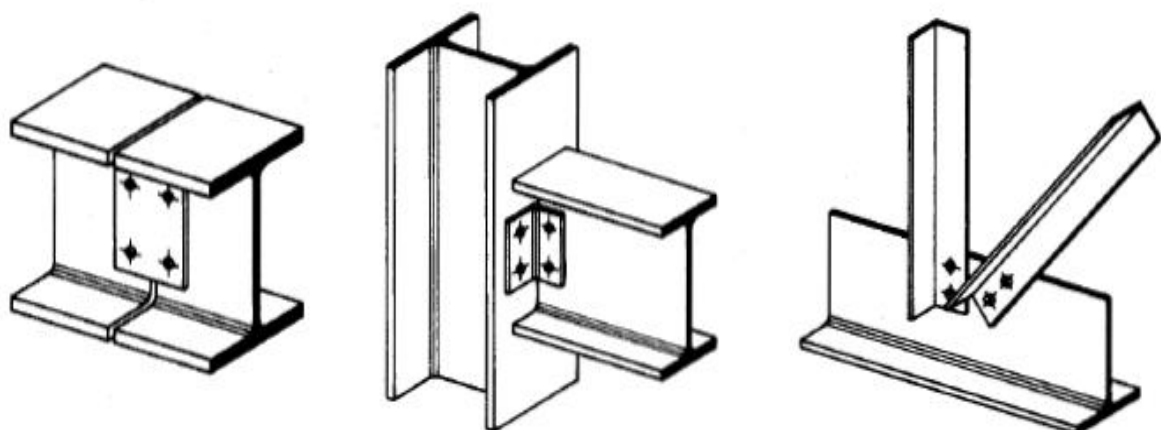


Fig.1.8 Exemple d'assemblage boulonné

➤ Soudures



1.4.5. La soudure :

1.4.5.a. Histoire du soudage :

Pendant des millénaires, l'assemblage des métaux s'est fait par forgeage. La rupture est venue à la fin du XIXe siècle, lorsqu'il est devenu possible d'obtenir des températures de flammes suffisantes en mélangeant des gaz comme l'oxygène et l'acétylène désormais stockables en toute sécurité et que sont apparus des procédés de soudage, comme le soudage par résistance (figure 1.7) et le soudage à l'arc, utilisant l'électricité comme source d'énergie. Avec ces procédés, la montée en température provoquée par une source thermique intense était bien plus rapide que la dissipation à l'intérieur de la pièce à souder. Le bain de métal en fusion obtenu se solidifiait en refroidissant pour constituer le joint unissant les deux pièces à souder. Le soudage à l'arc, le soudage par résistance et le soudage sous protection gazeuse ont tous été inventés avant la Première Guerre mondiale.

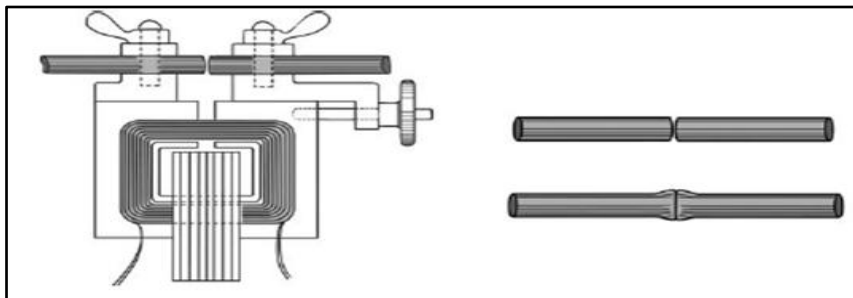


Fig.1.9. Transformateur de THOMSON pour le soudage électrique par résistance.

En 1881, Auguste de Meritens mettait au point un appareil qui permettait d'exploiter la chaleur de l'arc électrique formé entre deux électrodes au carbone pour souder des plaques de plomb pour accumulateurs. Brodant sur ce brevet français, le Russe Nicolay Bernardos et le Polonais Stanislas Olszewski ont placé l'électrode au carbone dans une poignée isolée. Ils ont fait breveter leur idée en 1887. Ce brevet marque, en principe, la percée du soudage à l'électricité.

Le succès de ce développement a incité d'autres inventeurs à l'améliorer. En 1912, peu avant qu'éclate la Première Guerre mondiale, l'Anglais Strohmenger a fait breveter aux Etats-Unis une électrode à enrobage plus épais. Les deux guerres mondiales ont accéléré le développement des électrodes enrobées.

Dès 1920, le premier bateau à coque entièrement soudée était construit en Angleterre: le Fulagar.

La production d'électrodes enrobées n'était pas facile et réclamait beaucoup de main-d'œuvre. Au début, chaque électrode était fabriquée à la main. Des baguettes de fer étaient plongées dans une pâte et mises à sécher sous un râtelier. Si l'électrode suspendue à la verticale se déformait un peu en séchant et n'était plus ronde, il fallait lui redonner sa rondeur à l'aide de papier de verre. Mais tout est devenu nettement plus simple en 1927, quand la fabrication a pu se faire par extrusion.

1.5. DEFINITION DE L'OPERATION DE SOUDAGE :

Le soudage est une opération consistant à assembler deux éléments métalliques, par fusion et ré-solidification. En d'autres termes, il s'agit d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un produit d'apport permettant un meilleur lien entre les pièces. Dans le cas de l'utilisation d'un métal d'apport, ce composé doit avoir des propriétés au moins égales et une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler.



Fig.1.10. Assemblage soudé.



Fig.1.11. L'opération de soudage.

Ce type d'assemblage a des avantages et des inconvénients :

1.5.1. Avantages de l'opération de soudage :

- Continuité de la matière (assemblage monolithe) assure une bonne transmission des sollicitations.
- Etanchéité.
- Procédé simple et rapide, (dispense des pièces secondaires, goussets...etc)
- Une bonne productivité.
- Moins encombrant et plus esthétique que le boulonnage ou le rivetage.

1.5. 2. Inconvénients de l'opération de soudage :

- Déformation de retrait des soudures.
- Contraintes résiduelles de soudure qui compliquent l'état de contrainte de l'assemblage (rupture par fatigue).
- Plus onéreux (main-d'œuvre qualifiée, matériel spécifique, contrôle des soudures).

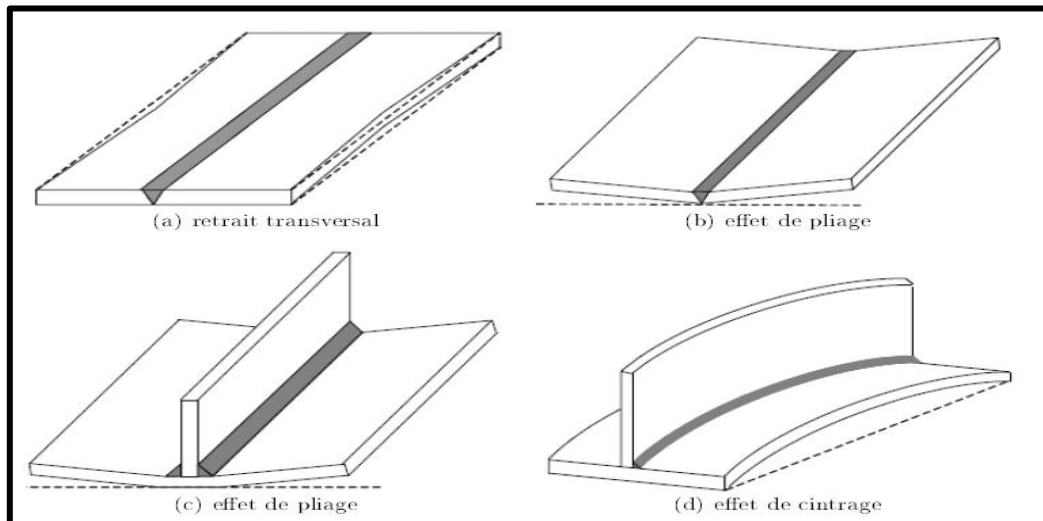
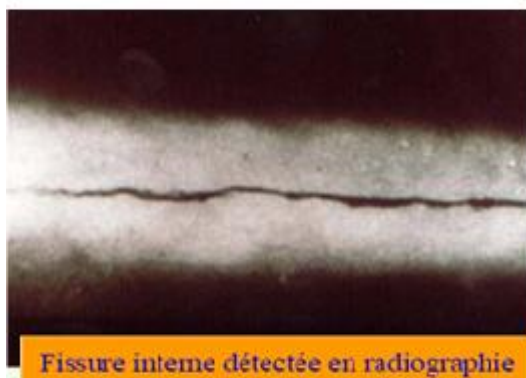


Fig.1.12. les inconvénients de l'opération de soudage.

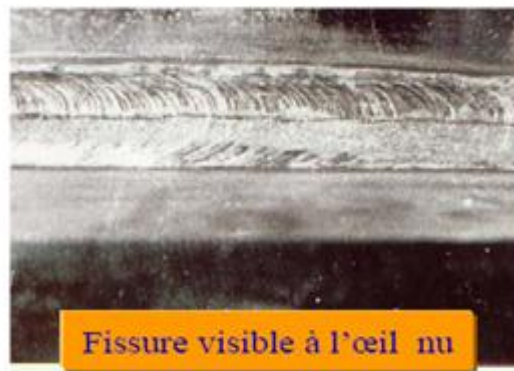
- **Problème de fissuration après le processus de soudure :**

Les fissures sont des déchirures qui apparaissent au cours du refroidissement sous l'effet de contraintes. ce sont des défauts plans. Les fissures peuvent avoir des orientations différentes (longitudinales, transversales, ramifiées).

- i. Fissure à chaud : ségrégation inter granulaire
- ii. à froid : Les fissures à froid sont dues à l'action simultanée de 04 facteurs :
 1. Présence d'hydrogène.
 2. Refroidissement trop rapide.
 3. Niveau de contrainte élevé (ce situe dans la zone effectuée thermiquement).
 4. Fragilisation par l'hydrogène.



Fissure interne détectée en radiographie



Fissure visible à l'œil nu

Fig.1.13. Les effets engendrés lors de processus de soudure.

1.5. 3.Type de soudure :**1.5. 3.a. La soudure autogène :**

Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder

1.5. 3.b. La soudure hétérogène :

Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder

Symbole		Exemple
Soudure non meulée)	<)
Soudure meulée à ras	⊥	⊥
Reprise à l'envers	((<)
Soudure au montage	^	<^
Cordon d'angle	Δ	^a Δ
Double cordon d'angle	△	^a △
Cordon d'angle tout autour d'une pièce	⌒	^a ⌒

Tab.1.3.Symboles pour les soudures

1.6. DIFFERENTS METHODES DE SOUDAGE :**1.6.1 .Soudage par résistance :**

Les premières machines de soudage par résistance ont servi au soudage bout à bout. Le premier transformateur de soudage a été inventé aux États-Unis en 1886 par Elihu Thomson, qui fit breveter le procédé l'année suivante. Son transformateur fournissait environ 2 000 A à 2 volts en circuit ouvert, au début du XXe siècle, Thomson continua à perfectionner le soudage par points, le soudage par projection et le soudage bout à bout par étincelage. Le soudage par points devint par la suite le procédé le plus répandu. On l'utilise aujourd'hui dans l'industrie automobile et dans bien d'autres applications de soudage de tôles. La figure 05 illustre le principe : deux électrodes en cuivre appliquent une pression sur deux plaques en recouvrement et un courant de forte intensité unit les plaques par fusion. Le premier robot de soudage par résistance par points a été livré par unimation à General Motors en 1964.

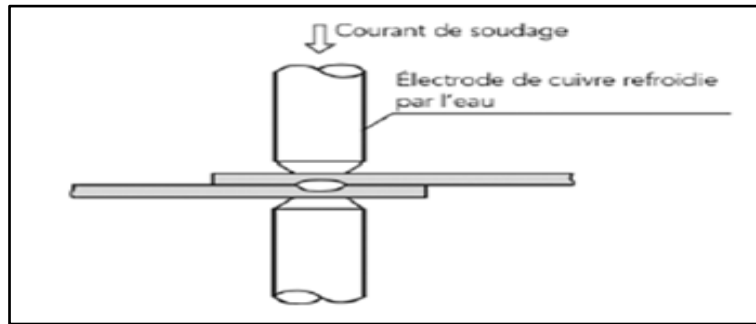


Fig.1.14. Soudage électrique par résistance par points.

1.6.2. Soudage au gaz :

Le soudage au gaz ou oxyacétylénique est apparu en France à la fin du xixe siècle. Edmond Fouché et Charles Picard ont fabriqué la première torche de soudage vers 1900. Le mélange d'acétylène et d'oxygène permettait d'obtenir une température de 3 100 °C, soit bien plus que les autres hydrocarbures gazeux. La torche est vite devenue l'outil essentiel pour le soudage et la découpe de l'acier.

L'acétylène avait été découvert bien plus tôt en Angleterre où Edmund Davis s'aperçut que la décomposition du carbure par l'eau produisait un gaz inflammable. En brûlant, ce gaz fournissait un important éclairage et l'acétylène devint très vite une source d'éclairage.

Fréquemment, le gaz explosait à l'occasion de son transport ou de son utilisation, mais on s'aperçut que l'acétone pouvait en dissoudre des quantités importantes, surtout sous pression. Le Chatelier découvrit le moyen de stocker l'acétylène en sécurité en utilisant de l'acétone et une pierre poreuse dans un récipient cylindrique (figure 06). En modifiant la composition du contenu poreux, le Suédois Gustav Dahlen de AGA, réussit à éliminer tout risque.

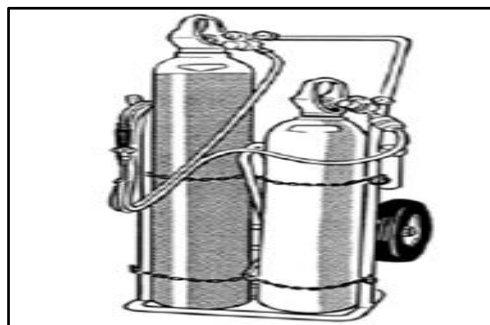


Fig.1.15. Matériel de soudage au gaz.

1.6.3. Le soudage a l'arc :

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder.

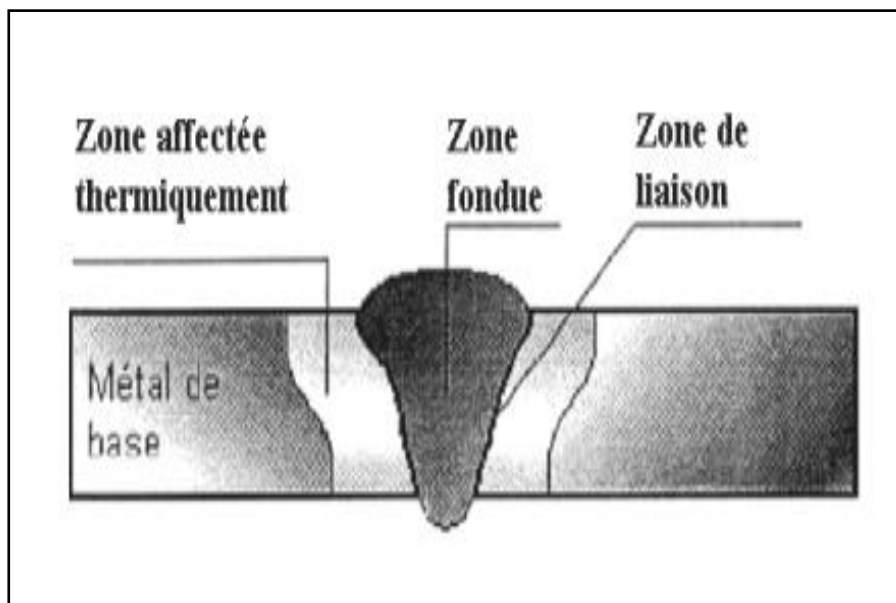
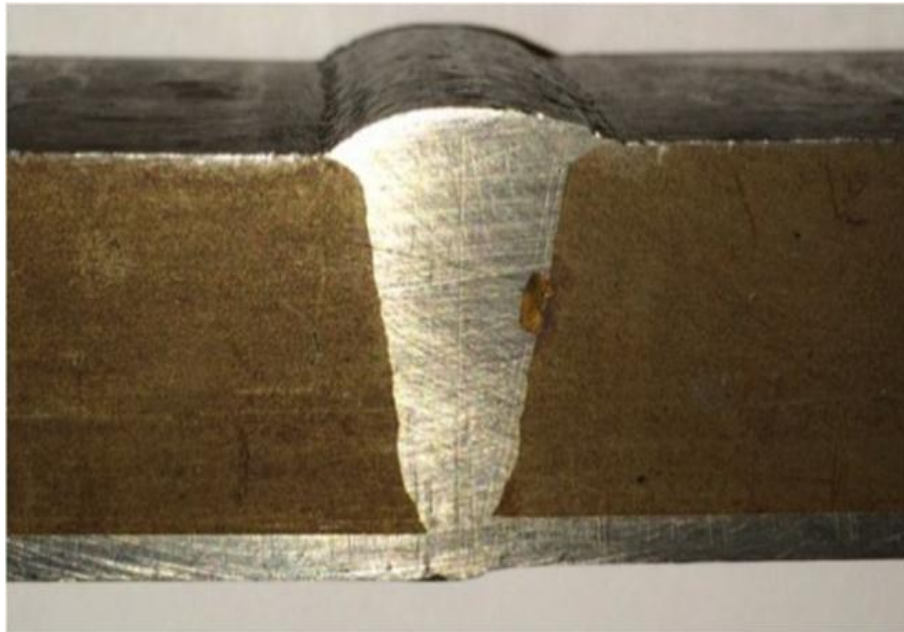


Fig.1.16. Coupe transversale d'un joint soudée.

- **La zone fondue :** (nommée ZF) zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification dépend du cycle de refroidissement. On peut distinguer, au sein de cette zone, des gradients de concentration (ségrégation). Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que la variation de dureté.
- **Le zone affectée thermiquement :** (nommée ZAT) zone se trouvant en bordure de la zone fondue de largeur variable ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion le chauffage la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de structure métallurgique
- **La zone de liaison :** cette zone située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.
- **Le métal de base :** au-delà de la zone affectée thermiquement l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée.

1.6.4. Soudage à l'arc électrique :

1.6.4.a. Soudage à l'électrode enrobée :

L'électrode, dirigée manuellement est fusible et fournit le métal d'apport. L'enrobage assure un rôle protecteur et son épaisseur permet de jouer sur la forme du cordon, concave ou convexe.

1.6.4. b. Soudage MIG (Metal Inert Gas) :

Encore appelé semi-auto, il est très adapté à la petite industrie : facile d'emploi ; arc visible ; pas de laitier ; grande vitesse de soudage ; temps de formation réduit. Il utilise une électrode fusible (fil se déroulant automatiquement) travaillant en atmosphère inerte (gaz protecteur : argon, argon + hélium, etc.) afin de protéger le bain de fusion.

1.6.4. c. Soudage MAG (Metal Active Gas) :

Variante du MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO₂ et d'argon adaptée au soudage des aciers de construction au carbone.

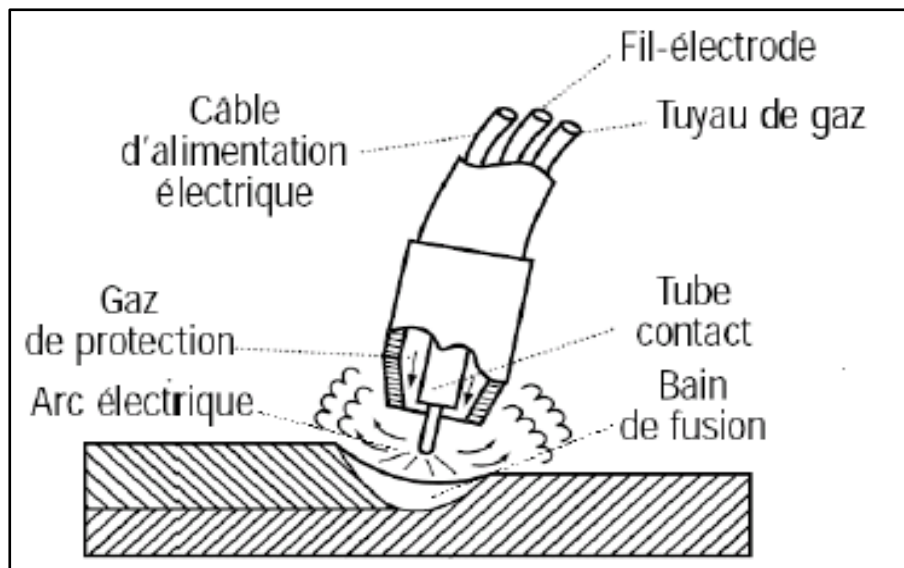


Fig.1.17. Présentation schématique des procédés MIG / MAG

Français	Allemand	Anglais
<ul style="list-style-type: none"> • Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée • Soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil-électrode fusible (MIG) • Soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil-électrode fusible (MAG) • Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène (TIG) • Soudage à l'arc sous flux en poudre avec fil-électrode 	<ul style="list-style-type: none"> • Lichtbogenhandschweissen mit Schutzelektroden • Metall-Inertgasschweissen (MIG) • Metall-Aktivgasschweissen (MAG) • Wolfram-Inertgasschweissen (WIG) • Unterpulverschweissen mit Drahtelektroden 	<ul style="list-style-type: none"> • Metal arc welding with covered electrodes • Metal-arc inert gas welding (MIG-welding) • Metal-arc active gas welding (MAG-welding) • Tungsten inert-gas arc welding (TIG) • Submerged arc welding with wire electrode

Tab.1.4. Procédés de soudage à l'arc : équivalence des termes Français, Allemand, Anglais.

1.6.4.d. Soudage TIG (TUNGSTEN INERT GAS) :

Variante des précédents, plus productive et utilisant une électrode réfractaire ou non fusible en tungstène. Le métal d'apport est amené manuellement (baguette) ou automatiquement (fil déroulé).

Il convient bien aux faibles épaisseurs (0.20 à 3 mm) et peut aussi s'utiliser sans métal d'apport et remplacer le soudage par points (voir soudage par résistance).

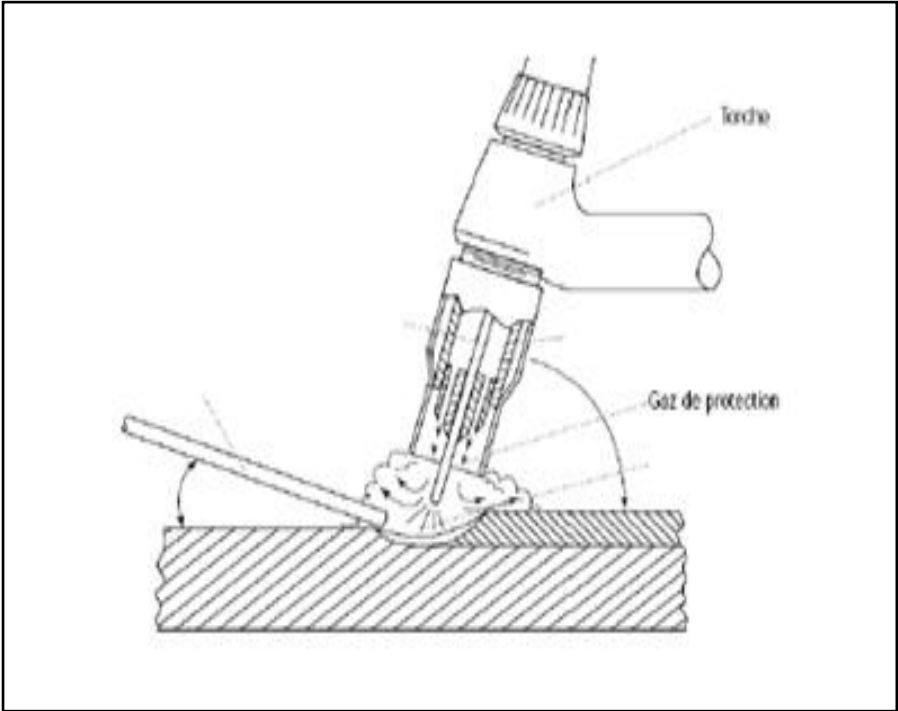


Fig.1.18. Soudage en TIG.

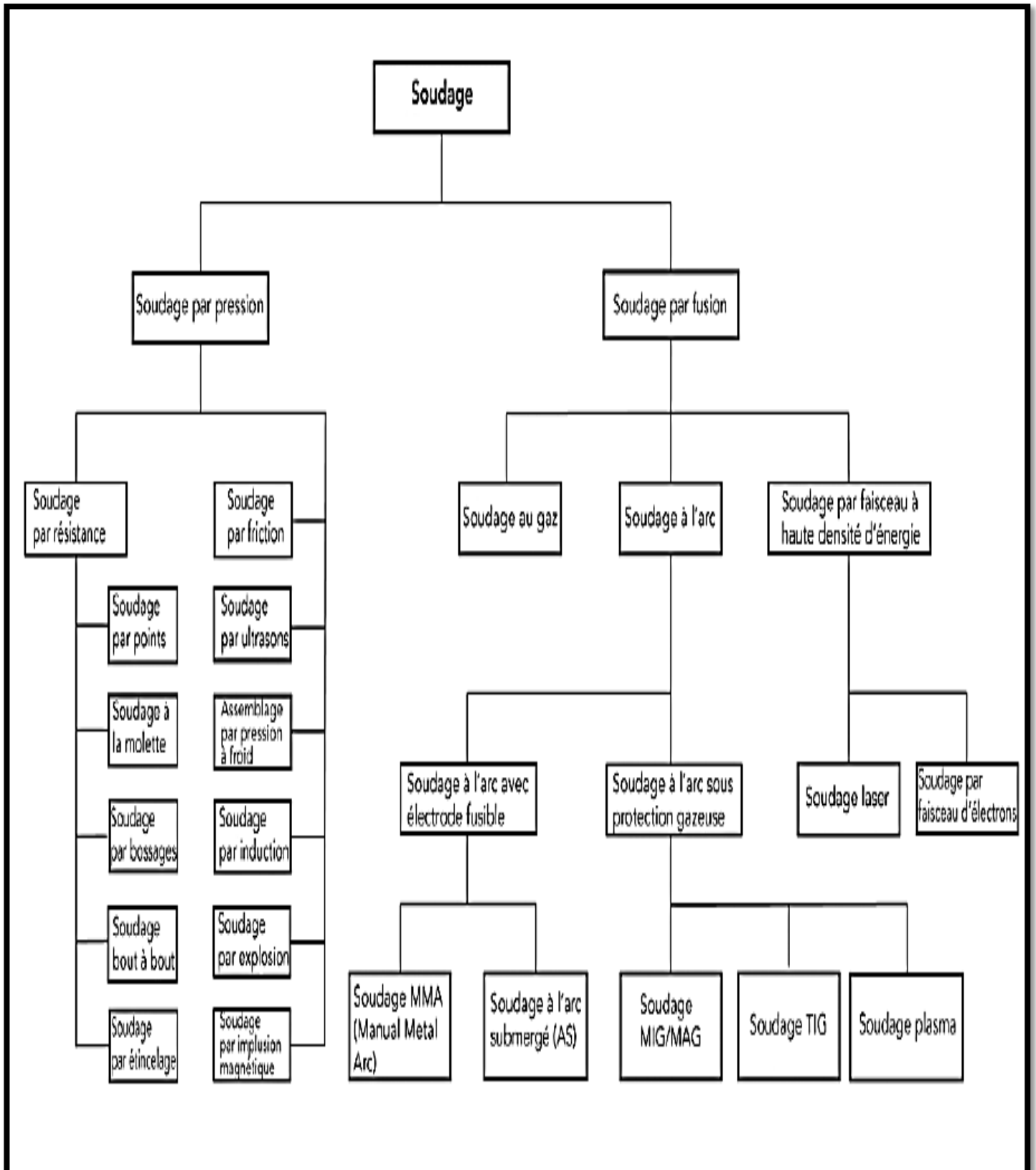


Fig1.19.Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.

1.7. MODE DE SOUDURE :

On distingue

- Soudure d'angle.
- soudure en entaille.
- Soudure en bout.
- soudure en bouchon.

1.7.1. Soudure d'angle :

Une soudure d'angle est une soudure dont la section transversale est approximativement triangulaire et qui est déposée à la surface des plats assemblés. Aucune préparation des bords n'est requise. Les soudures d'angle sont donc généralement moins onéreuses que les soudures en bout. Selon la position relative des pièces à assembler, trois types de disposition des soudures d'angle peuvent être envisagés :

- Assemblage à recouvrement dans lequel les pièces à souder se trouvent dans des plans parallèles.
- Assemblage cruciforme ou en T dans lequel les pièces à souder sont plus ou moins perpendiculaires l'une par rapport à l'autre.
- Assemblage d'angle dans lequel les pièces sont plus ou moins perpendiculaires l'une par rapport à l'autre. Afin d'améliorer la résistance et la rigidité de l'assemblage, des soudures en bout sont généralement.

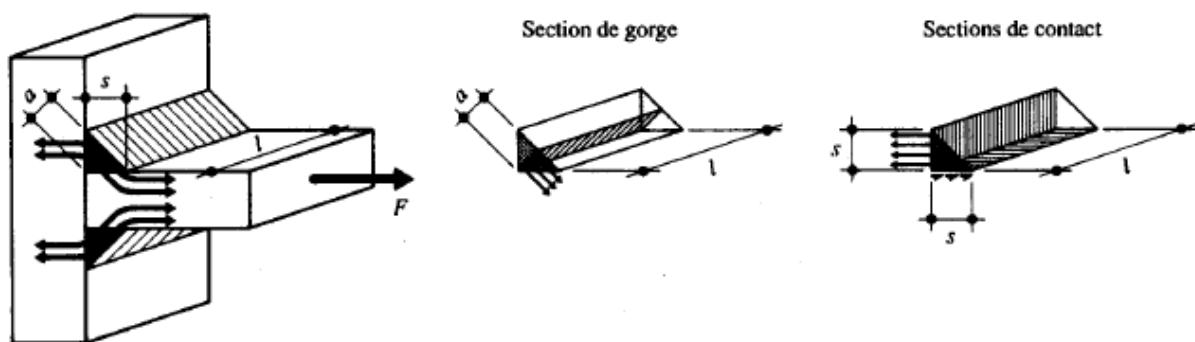


Fig.1.20. Principe de la soudure d'angle.

1.7.2. Soudure en entaille :

Les soudures en entaille, constituées de soudure d'angles réalisées dans des trous circulaires ou allongés, ne peuvent être utilisées que pour transmettre des efforts de cisaillement pour éviter le voilement ou la séparation de parties qui se recouvrent, il faut que le diamètre du trou doit être inférieur à 4 fois l'épaisseur de l'élément perforé.

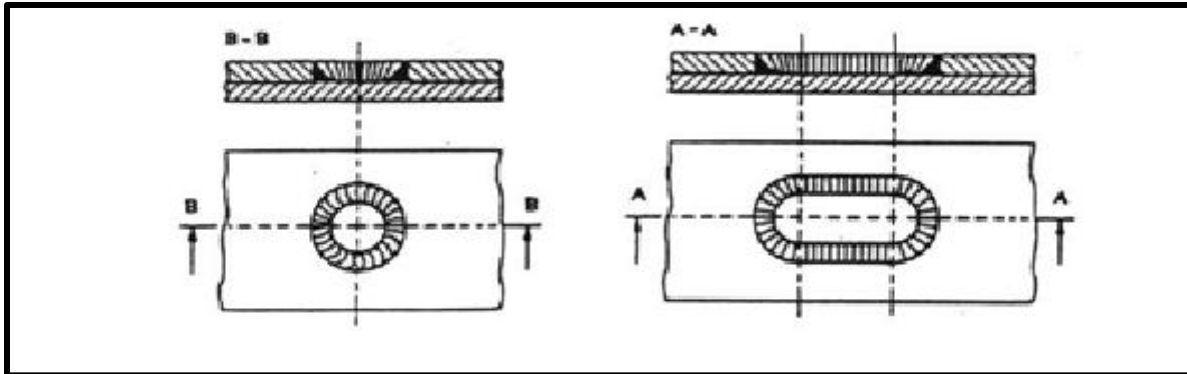


Fig.1.21.Soudure en entaille

1.7.3. Soudures en bout :

Une soudure en bout est réalisée sur l'épaisseur des plats aboutés dans un assemblage bout-à-bout ou en T. En règle générale, les bords des plats doivent être préparés avant soudage. Dans certains cas, lorsque l'épaisseur des plats est inférieure à 5 mm.

Si la procédure de soudage est correctement suivie, le métal d'apport des soudures en bout peut être assimilé au métal de base. Pour la détermination de la résistance de l'assemblage, le calcul est donc fondé sur l'aire de la section de gorge, c'est-à-dire de la zone de pénétration.

Il y a deux types de soudures en bout à savoir :

- **Soudures en bout à pénétration complète :**

Dans le cas d'une soudure en bout à pénétration complète, aucun calcul n'est nécessaire dans la mesure où la résistance du métal d'apport est au moins équivalente à celle du matériau de base de l'élément assemblé, On peut simplement considérer que la soudure en bout se substitue au matériau de base.

○ **Soudures en bout à pénétration partielle :**

Dans le cas d'une soudure en bout à pénétration partielle, la dimension de gorge à considérer est la profondeur de pénétration, légèrement réduite. Un assemblage en T réalisé à l'aide d'une soudure en bout à pénétration partielle, à laquelle viennent se superposer des soudures d'angle, peut être considéré au même titre qu'une soudure en bout à pénétration complète si la dimension totale de gorge est supérieure à l'épaisseur du matériau à assembler et si l'écartement entre les soudures satisfait certaines conditions .

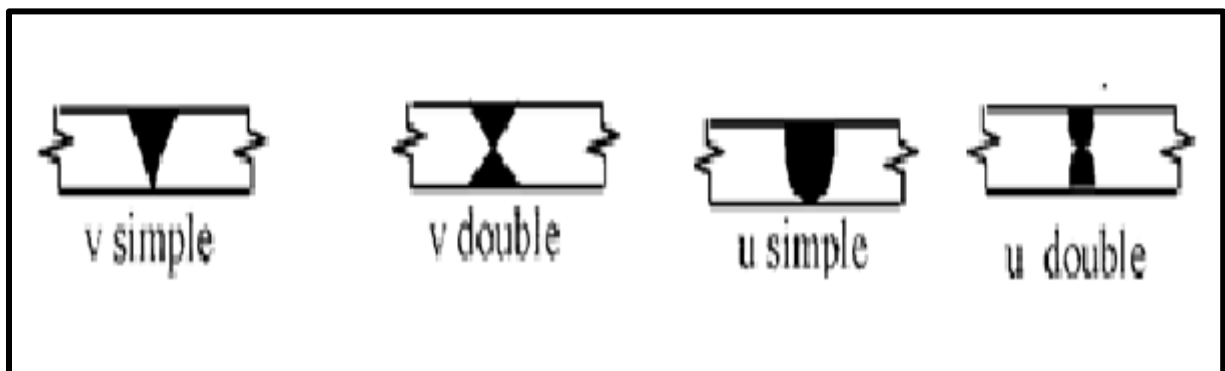


Fig.1.22. les modes de Soudage en bout

1.7.4. Soudures en bouchon :

Les soudures en bouchon sont réalisées dans des trous circulaire ou oblongs comme le montre la figure1.23 ce genre de soudure on le réalise que pour transmettre que un effort de cisaillement.

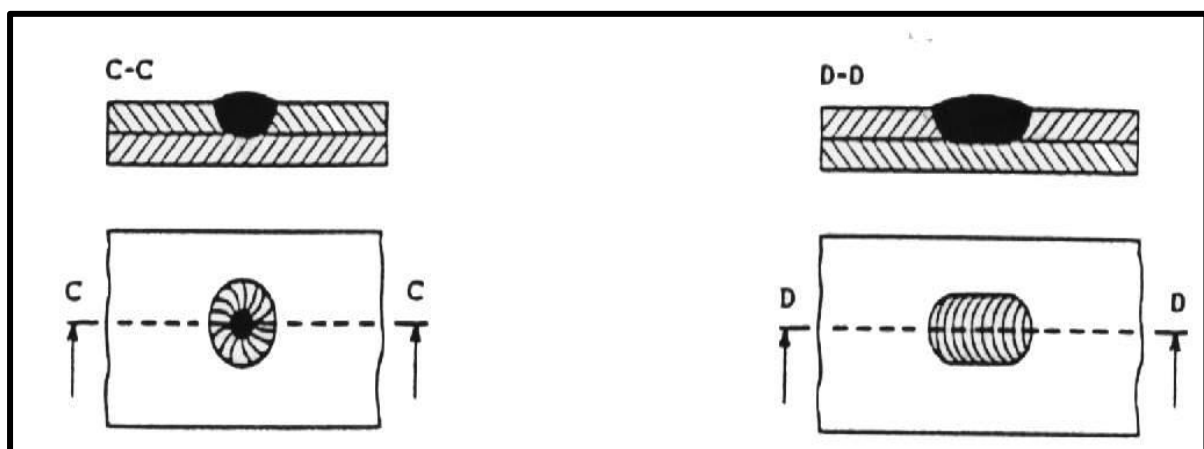


Fig.1.23. Soudure en bouchon.

1.8. PREPARATION DES BORDS DES PIECES A SOUDER :

Cette opération consiste à diminuer l'épaisseur au bord des pièces à souder pour faciliter la pénétration de la soudure. Cette opération s'appelle **chanfrein**.

1.8.1. Type de chanfreins :

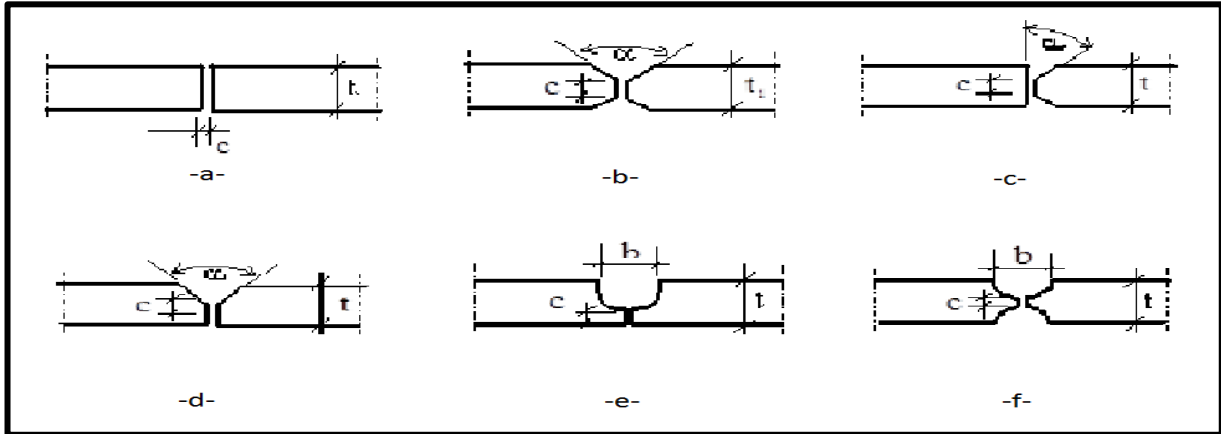


Fig.1.24. Chanfreins des bords pour les soudures bout à bout.

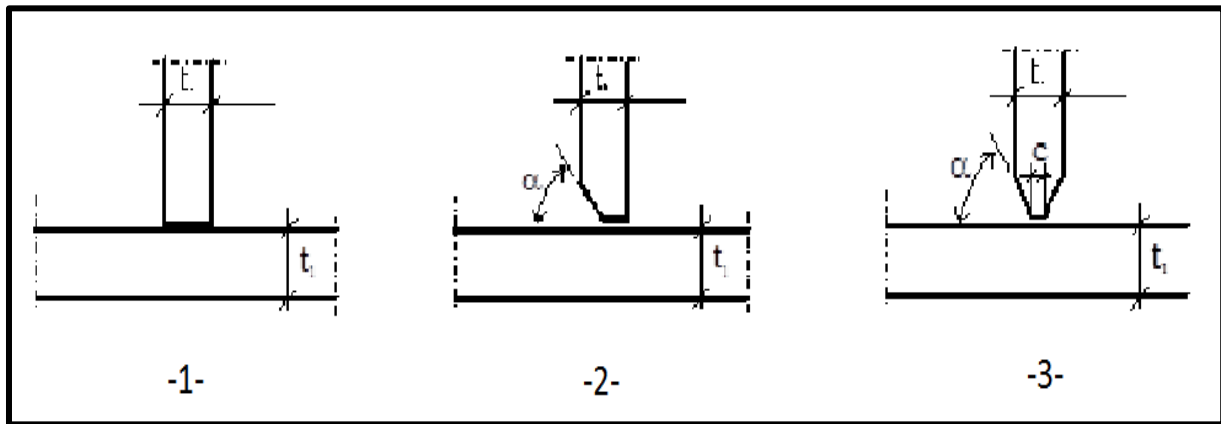


Fig.1.25. Chanfreins des bords d'assemblage en T.

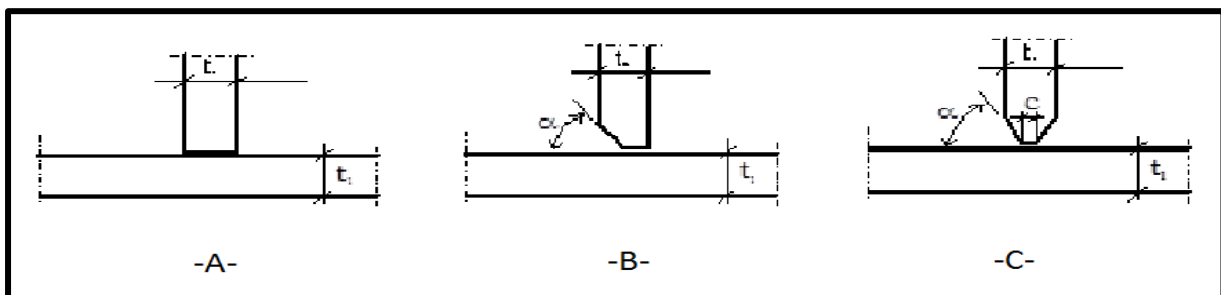
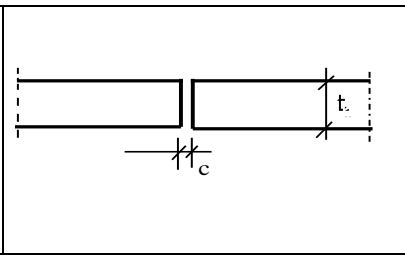
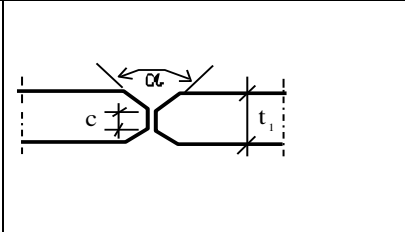
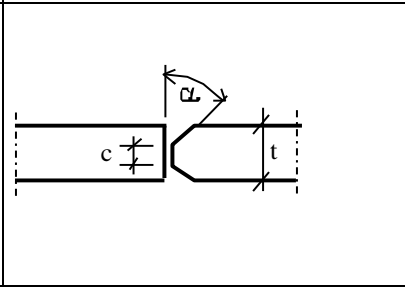
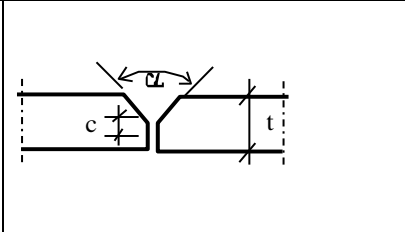
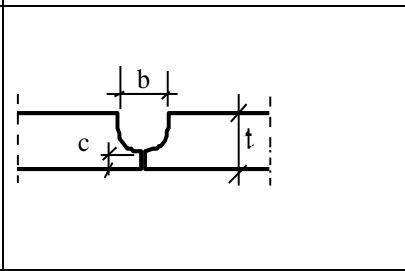
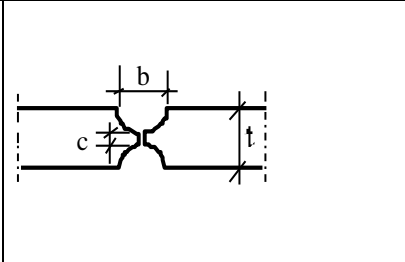
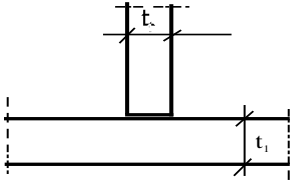
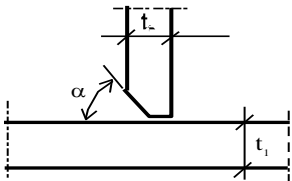
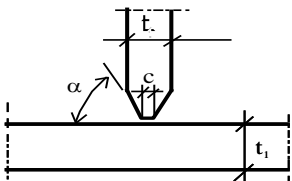


Fig.1.26. Chanfreins des soudures d'angle.

1.8.2. Dimensionnement des chanfreins :

Mode de chanfrein	Valeurs	Observation
<p>Sans</p> 	<p>$t < 6\text{mm}$ $c = 1 \div 3\text{mm}$</p>	
<p>En X</p> 	<p>$t = 12 \div 40\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm} ; t / 5)$ $\alpha = 60^\circ$</p>	<p>Symétrie donc élimine les phénomènes de déformation ou de contraintes internes</p>
<p>En K</p> 	<p>$t = 12 \div 40\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $\alpha = 50^\circ$</p>	
<p>En V</p> 	<p>$t \leq 15\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $\alpha = 60^\circ$</p>	<p>Permet de souder sans tourner les pièces, mais il y a un inconvénient.</p>
<p>En U</p> 	<p>$t = 10 \div 15\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm} ; t / 5)$ $b = t / 2$</p>	<p>Lors du refroidissement il y a des déformations angulaires</p>
<p>En double U</p> 	<p>$t = 10 \div 15\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm} ; t / 5)$</p>	<p>Symétrie donc élimine les phénomènes de déformation ou de contraintes internes</p>

* Chanfreins des bords d'assemblage en -T-

Mode de chanfrein		Valeurs
Sans		$t_2 \leq 12\text{mm}$
En V		$t_2 \leq 25\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm} ; t_2 / 5)$ $\alpha = 50^\circ$
En K		$t_2 > 25\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm} ; t_2 / 5)$ $\alpha = 60^\circ$

Tab1.5. Différent mode de chanfrein.

1.8.3. Gorge d'un cordon de soudure.

C'est la distance de la racine (région de la première passe, la plus éloignée du soudeur) à la surface extérieure, abstraction faite des surépaisseurs. Elle est notée a :

Si la pénétration est contrôlée, on peut en tenir compte. Par contre, en cas de défaut d'accostage, la gorge est réduite par rapport à celle mesurée effectivement.

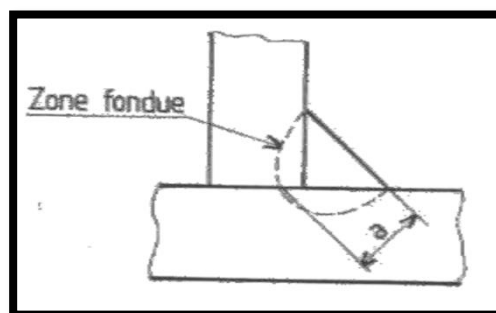


Fig.1.27. Chanfreins des bords pour les soudures bout à bout.

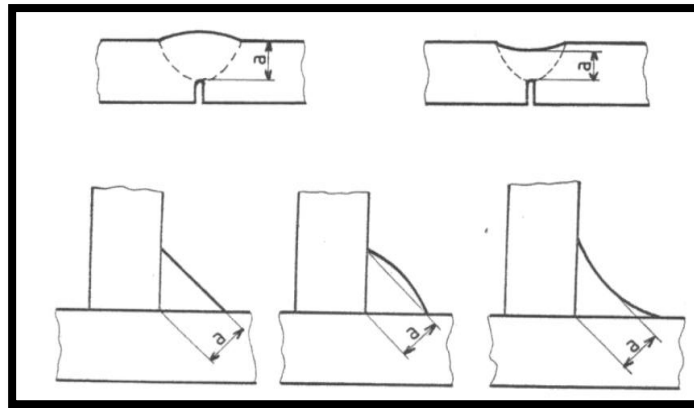


Fig.1.28.Chanfreins des bords pour les soudures bout à bout.

1.9. LES CONTRAINTES RESIDUELLES :

1.9.1. Introduction :

Les contraintes résiduelles peuvent affecter de manière significative les propriétés mécaniques des matériaux et des composantes structurales, notamment la durée de vie en fatigue, la distorsion, la stabilité dimensionnelle, résistance à la corrosion, et la rupture fragile. Ces effets s'accompagnent souvent avec des dépenses considérables en termes de réparations et de maintenance de pièces, d'équipements et de structures. Pour cette raison, l'analyse des contraintes résiduelles s'avère une étape obligatoire pour la conception de pièces et éléments structuraux ainsi que l'estimation de leur fiabilité dans les conditions réelles de service.

Bien que certains progrès ont été réalisés dans le développement de techniques pour bien gérer les contraintes résiduelles, des efforts considérables sont encore nécessaires pour développer des méthodes efficaces et fiables pour mesurer et analyser les contraintes résiduelles ainsi que des technologies capables de redistribuer de manière optimale et bénéfique les contraintes résiduelles.

Dans une construction soudée, les déformations et les contraintes sont dues à la localisation de l'opération de soudage et au fait que celle-ci s'effectue de proche en proche.

Le gradient élevé de température, la diminution des propriétés élastiques du matériau quand la Température s'élève font que des déformations plastiques et des contraintes naissent et s'établissent dans les pièces. Les déformations nécessitent un rattrapage long et donc coûteux des pièces; les contraintes, plus insidieuses, se développent à la fin du refroidissement et hypothèquent la bonne tenue au service de la construction.

Lorsque les pièces sont libres de se déformés en cours de soudage, les déformations de retrait sont maximales et les contraintes résiduelles de traction et de compression pratiquement nulles.

Si au contraire, les déformations de retrait sont contrariées par un bridage, elles seront nulles ou très faibles, mais il en résulte d'importantes contraintes résiduelles. D'autre part, l'assemblage soudé est le siège de déformations plastiques, car l'augmentation de la température entraîne une diminution de la limite d'élasticité.

1.9.2. Définition des contraintes résiduelles :

Les contraintes résiduelles peuvent être définies comme étant des tensions et compressions qui existent dans le matériau suite à un procédé de fabrication et /ou de transformation sans application de forces externes ou des gradients thermique.

L'importance des contraintes résiduelles dépend de l'amplitude, le sens et la direction par rapport à la contrainte appliquée; aussi des propriétés du matériau et sa stabilité par rapport aux variations temps-température dans les procédés de restauration survenant lors de contraintes cyclique.

Il est très important de connaître l'ampleur et la répartition des contraintes résiduelles depuis le comportement mécanique du matériau sont affectées quand ils sont présents. La contrainte résiduelle peut être considérée comme une contrainte moyenne superposée qui modifie localement la charge globale.

En outre, son introduction peut modifier la réponse des matériaux au chargement. Indépendamment de leur nature, de grandes contraintes résiduelles peuvent causer une instabilité dimensionnelle par des phénomènes comme le fluage, la fatigue et la fissuration par corrosion sous tension.

1.9.3. Déformations et contraintes induites par le soudage :

Les déformations de retrait n'étant pratiquement jamais libre, il existe dans tous les assemblages soudés des contraintes résiduelles soit de traction ou de compression, dont l'importance peut avoir des conséquences néfastes pour la sécurité d'un assemblage soudé. On peut distinguer quatre types de contraintes :

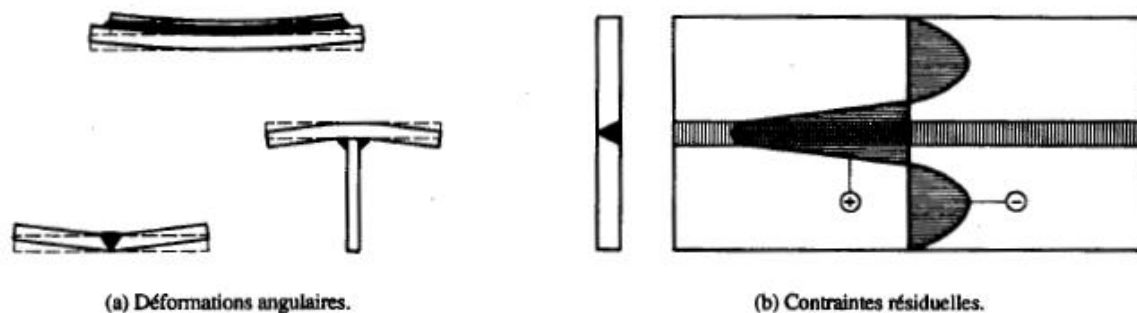


Fig.1.29.Déformation angulaires et contrainte résiduelles longitudinales provenons du soudage

1.9.3.a. Contraintes résiduelles directes :

Elles sont dues aux déformations de retrait empêchées dans le joint soudé, ces contraintes n'affectent que la zone au voisinage immédiat du cordon de soudure. Il est impossible de les éviter ; elles résultent de la répartition non uniforme du flux thermique dans l'assemblage soudé.

1.9.3.b. Contraintes résiduelles indirectes, ou de bridage :

Elles sont dues au bridage de l'ensemble soudé, qui s'oppose aux dilatations et aux retraits. Ces contraintes affectent l'étendue de chaque élément de l'ensemble de manière uniforme.

1.9.3.c. Contraintes parasites (Extérieures a l'opération de soudage) :

Ce sont celles qui s'exercent sur le joint soudé pendant l'opération de soudage par exemple, masse de l'ensemble en porte à faux pendant le soudage. On peut les réduire considérablement, sinon les annuler, en adoptant des dispositions en conséquence.

1.9.3.d. Contraintes résiduelles directes longitudinales dans les assemblages bout a bout :

Dans le cas des soudures bout à bout on peut considérer que la valeur des contraintes longitudinales (σ_L) atteint la limite d'élasticité du matériau dans une zone égale environ à 6 fois celle du métal fondu.

Pendant le soudage, le métal de base qui se trouve dans la zone du cordon de soudure est portées à haute température, et sa dilatation est entravée par les zones où le métal est pratiquement froid; les fibres longitudinales sont refoulées à chaud et exercent, après refroidissement, une traction sur le métal de base.

Après soudage le joint se trouve tendu dans le sens longitudinal, ainsi dans le cordon de soudure et dans ses abords.

1.9.4. INFLUENCE DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN ENSEMBLE SOUDE :

Les contraintes résiduelles s'auto-équilibrent et l'on admet généralement qu'elles n'ont pas d'influences défavorable sur le comportement statique de l'ensemble, à condition qu'une quantité suffisante de métal déposé assure une résistance convenable (sans fissure, ni amorce de rupture). Il existera toujours à coté de contraintes résiduelles de même signe que la charge de service, d'autres contraintes résiduelles de signes opposé et qui agiront dans le sens favorable. Lorsque de légères déformations plastiques se produisent sous l'effet des charges de service dans les zones les plus sollicitées, les contraintes résiduelles tendent à disparaître.

1.10. RISQUES DUS AUX CONTRAINTES RESIDUELLES :

1.10.1. Structures soumises au flambement (ou flambage) :

Les contraintes résiduelles, et surtout les déformations entraînent une diminution des charges admissibles sur les éléments soumis au flambement, les coefficients de flambement sont plus importants pour les ensembles soudés que pour les laminés ; les contraintes résiduelles peuvent donc réduire la valeur de la charge admissible, et se combiner avec les contraintes de service et, le cas échéant, avec des contraintes parasites dues à l'exécution ou au montage de l'ensemble.

1.10.2. Structures soumises au risque de rupture fragile :

Lorsqu'un élément d'une structure est soumis à des contraintes multidirectionnelles de traction, il ne peut se déformer plastiquement. Dans ce cas, si la rupture se produit elle a lieu brutalement par décohésion (rupture fragile). Parmi les facteurs qui rendent un acier sensible au risque de rupture fragile on note entre autre le niveau des contraintes de traction auxquelles est soumis le métal. Les contraintes résiduelles du soudage, qui sont très souvent multidirectionnelles viennent s'additionner aux contraintes de service qui peuvent conduire à une rupture fragile. Il est donc très important, à chaque fois que cela est possible de diminuer

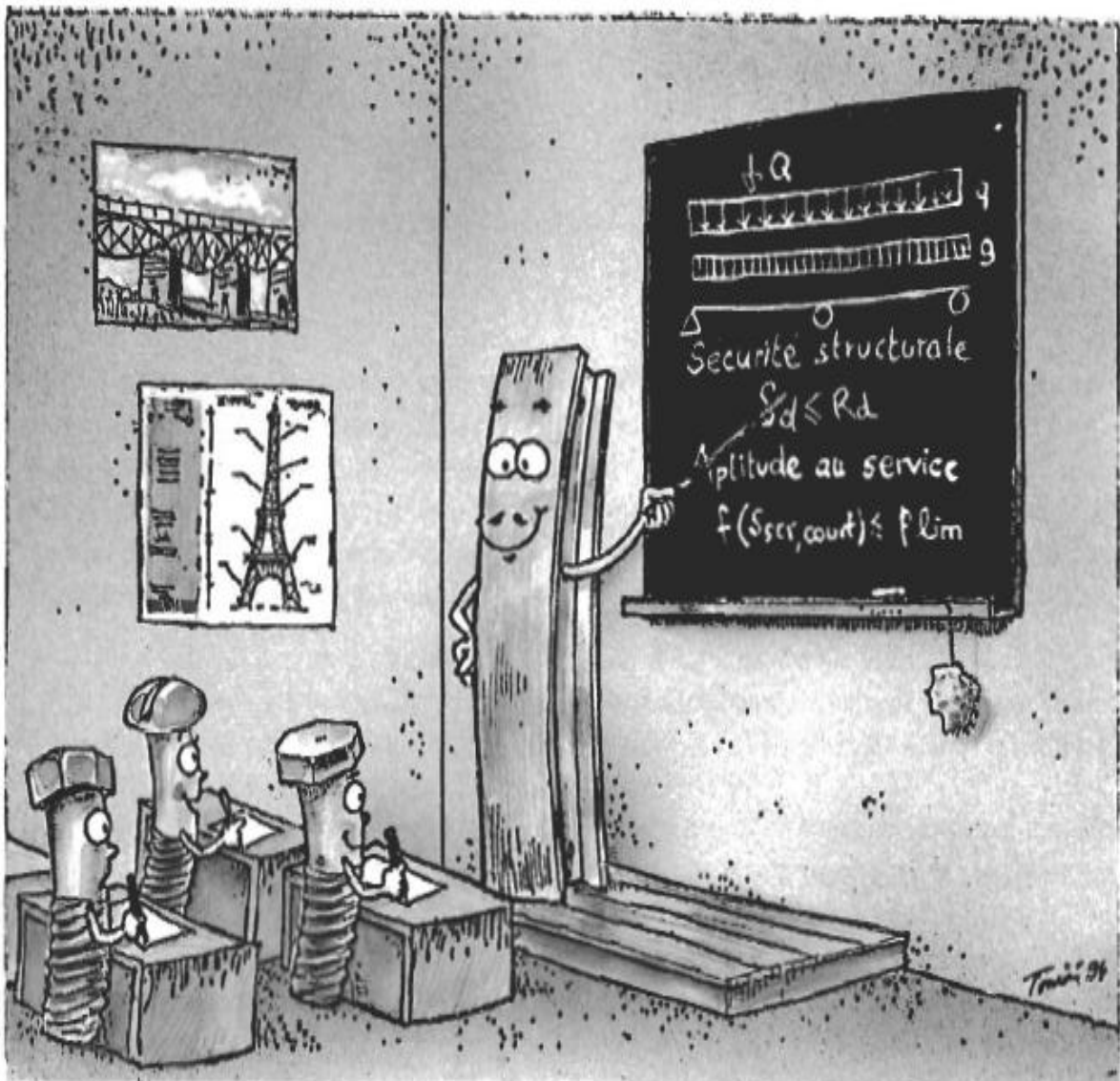
au maximum l'importance des contraintes résiduelles, Surtout si le joint soudé doit travailler à la fatigue.

Conclusion :

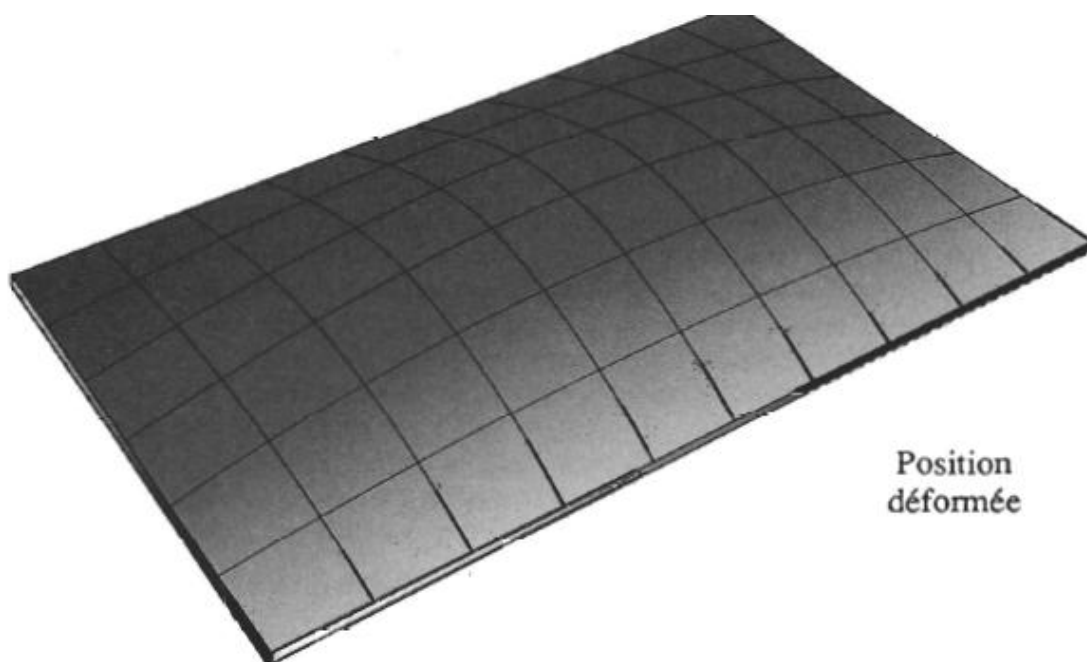
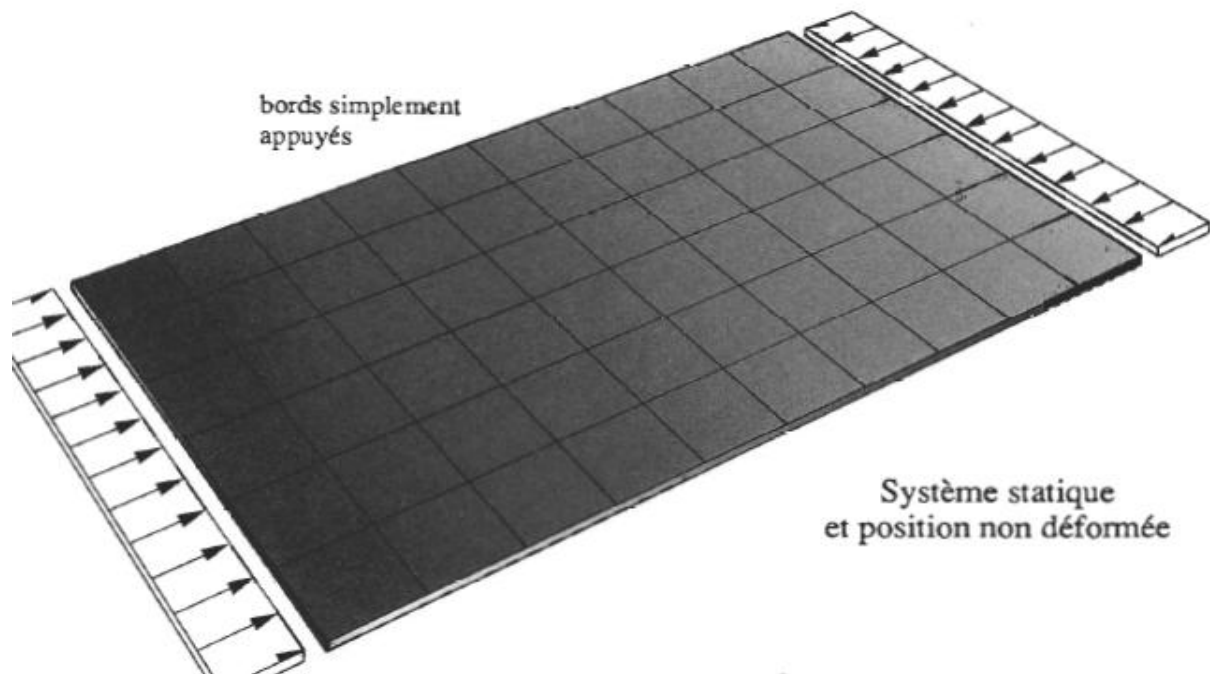
L'assemblage soudé joue un rôle très important pour la liaison des éléments entre eux. Mais l'inconvénient c'est l'effet des contraintes résiduelles obtenues lors de l'opération de soudage et après refroidissement.

Chapitre 02

Aspect réglementaire



✚ Voilement



2.1. Introduction du voilement :

Le voilement est le phénomène d'instabilité des plaques minces sollicitées dans leur plan. Considérons, par exemple, la plaque rectangulaire de la figure 2.1(a), parfaitement plane, articulée sur ses quatre bords et comprimée dans la direction de l'axe x . Si, pour une contrainte σ faible, on impose à la plaque une déformation ω hors du plan, elle va revenir à sa position initiale après suppression de la cause ayant engendré la déformation. Pour une certaine contrainte $\sigma_x = \sigma_{crB}$ plus élevée, la plaque va rester dans sa position déformée et former une cloque fig. 2.1(b); elle est donc en équilibre indifférent (ou métastable) et on dit qu'elle a voilé.

La contrainte σ_{crB} pour laquelle le voilement se produit est appelée contrainte critique de voilement élastique (l'indice B provient de l'allemand Beulen).

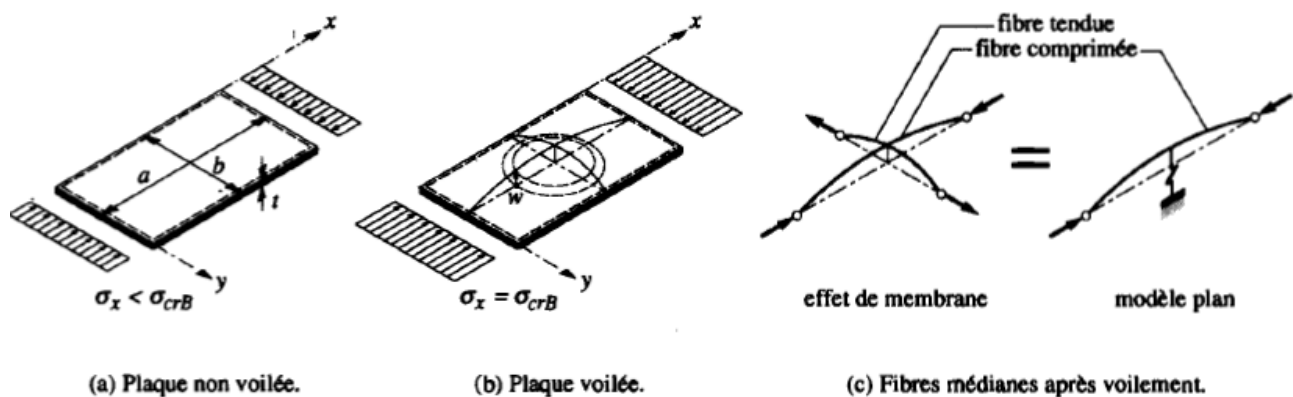


Fig. 2.1 Voilement d'une plaque.

Cependant, contrairement au flambage et au déversement d'une barre, le voilement élastique ne correspond pas à la ruine de la plaque. En effet, si l'on continue de charger la plaque déjà voilée, elle va pouvoir résister d'avantage, au contraire d'une barre isolée, pour laquelle le flambage signifie la ruine. Cette différence de comportement s'explique par le fait qu'une barre qui flambe n'est pas retenue dans sa déformation, alors qu'un effet de membrane intervient dans une plaque.

Dans l'exemple de la figure 2.1(b), seule la partie médiane de la plaque, disposée dans la direction la sollicitation, «flambe» lorsque la contrainte critique est atteinte. Ensuite, si l'on dépasse cette contrainte, les fibres comprimées sont retenues par les fibres perpendiculaires qui, elles, sont tendues (fig. 2.1(c)). Dans un modèle plan, tout se passe comme si des ressorts empochaient les fibres comprimées de se déformer librement. Il est évident que l'effet de membrane ne peut se développer que si les fibres tendues ont la possibilité de s'ancrer à leurs extrémités. Cela implique que la plaque doit appuyée sur au moins un bord parallèle aux sollicitations.

Le but de ce chapitre est d'examiner le phénomène d'instabilité qu'est le voilement des plaques comprimées, en mettant en évidence les principaux paramètres qui régissent ce phénomène. Pour atteindre ce but, le chapitre est structuré ainsi:

2.2 Théorie linéaire du voilement élastique :

2.2.1 Contrainte critique de voilement élastique :

Soit la plaque rectangulaire, articulée sur ses deux bords, de la figure 2.1. En considérant le voilement comme un phénomène d'instabilité par bifurcation de l'équilibre, on peut calculer la valeur de contrainte critique de voilement élastique σ_{crB} en se basant sur les hypothèses suivantes:

- la plaque est initialement parfaitement plane,
- les déformations hors du plan lors du voilement sont faibles,
- la plaque est sollicitée par des charges agissant dans son plan moyen,
- le matériau est infiniment élastique linéaire.

En considérant l'état d'équilibre de la plaque déformée (équilibre indifférent), on peut écrire l'équation différentielle suivante, selon [2.1]:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{Nx}{D} \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (2.1)$$

w : Déformation de la plaque, perpendiculairement à son plan

N_x : Effort normal par unité de longueur ($N_x = \sigma_x t$), $\left(D = \frac{t^3}{12(1-\gamma^2)}\right)$

D : rigidité de la plaque pour une largeur b unitaire

T : épaisseur de la plaque

γ : Coefficient de contraction latérale (Poisson)

En supposant que la plaque se déforme selon une surface de forme sinusoïdale représentée par l'équation

$$W = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_{mn} \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \quad (2.2)$$

m : nombre de demi-ondes (cloques) dans le sens x

n : nombre de demi-ondes (cloques) dans le sens y

On peut calculer la charge critique de voilement élastique N_{crB} en substituant la valeur de ω (2.2) dans (2.1). En tenant compte des conditions de bord de la plaque, on obtient par intégration le résultat suivant:

$$N_x = \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \frac{\pi^2 a^2 D}{m^2} \quad (2.3)$$

La valeur N_{crB} cherchée correspond au minimum de la fonction de N_x donnée par (2.3). Celui-ci est obtenu pour une valeur $n = 1$, ce qui veut dire qu'il n'y aura qu'une seule demi-onde (ou une seule cloque) dans le sens y , mais qu'il peut y en avoir plusieurs dans le sens x .

En remplaçant la rigidité de la plaque D par sa valeur et en posant $\alpha = a/b$, on obtient

$$N_{crB} = \left(\frac{m}{a} + \frac{a}{m} \right)^2 \frac{\pi^2 E t}{12(1-\gamma^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (2.4)$$

D'où l'on tire la contrainte critique de voilement élastique :

$$\sigma_{crB} = \frac{N_{crB}}{t} \left(\frac{m}{a} + \frac{a}{m} \right)^2 \frac{\pi^2 E t}{12(1-\gamma^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (2.5)$$

En définissant le coefficient de voilement k par :

$$K = \left(\frac{m}{a} + \frac{a}{m} \right)^2 \quad (2.6)$$

Et la contrainte de référence d'Euler σ_E par la relation suivante, qui ne dépend pas de la limite d'élasticité du matériau mais de la géométrie (élancement t/b) de la plaque,

En général:
$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t}{12(1-\gamma^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (2.7a)$$

Pour l'acier:
$$\sigma_E [N/mm^2] = 190\,000 \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (2.7b)$$

La contrainte critique de voilement élastique donnée par (2.5) peut s'exprimer ainsi:

$$\sigma_{crB} = k \sigma_E \quad (2.8)$$

2.2.2 Coefficient de voilement :

Comme le montre (2.8), la contrainte critique de voilement élastique σ_{crB} est directement proportionnelle au coefficient de voilement k . Il est donc nécessaire d'examiner soigneusement les paramètres qui ont une influence sur sa valeur.

2.2.3. Influence du nombre de cloques de voilement :

Dans l'exemple de la figure 2.1, on a un voilement en une seule demi-onde (une cloque, $m = 1$). Coefficient de voilement donné par (2.6) s'exprime alors ainsi:

$$K = \left(\frac{1}{a} + \frac{a}{1}\right)^2 \tag{2.9}$$

La figure 2.3(a) montre que cette expression représente une courbe qui passe par une valeur minimale $K_{min} = 4.0$, obtenue en posant $dk/d\alpha = 0$, d'où $\alpha = 1$. Si le voilement se produit en deux den ondes ($m = 2$), on a:

$$K = \left(\frac{2}{a} + \frac{a}{2}\right)^2 \tag{2.10}$$

Et l'on obtient la courbe de la figure 2.3(b) qui donne en posant $dk/d\alpha = 0$, $K_{min} = 4.0$ pour $\alpha = 2$. La courbe correspondant au voilement en m demi-ondes se déduit de la courbe fondamentale ($m = 1$), multipliant toutes les abscisses α par m , sans changer les ordonnées (affinité horizontale). L'ensemble ces courbes est représentées à la figure 2.3(c).

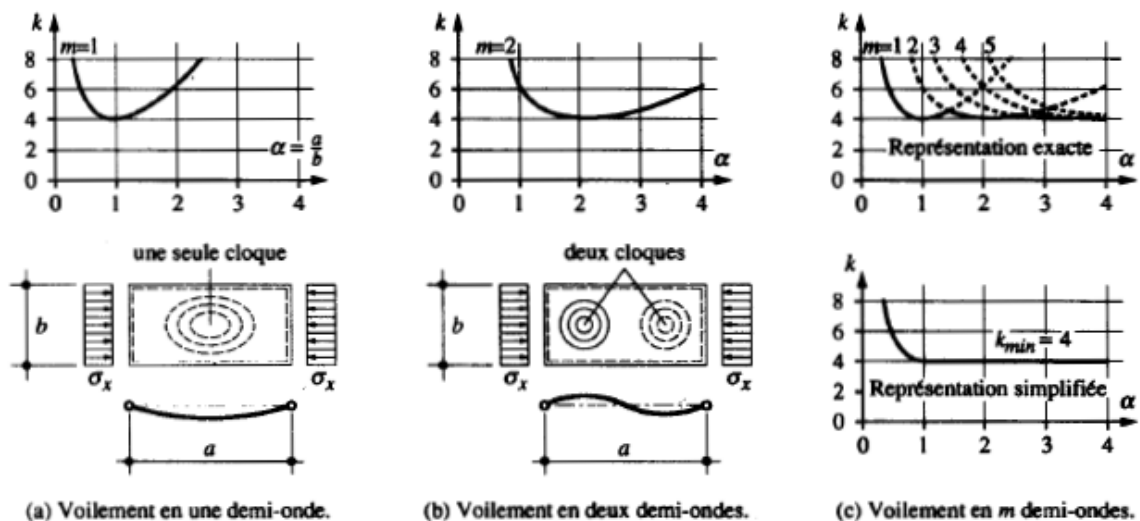


Fig. 2.2 Valeurs du coefficient de voilement k .

On peut dès lors déterminer la contrainte critique de voilement élastique pour une plaque dont le rapport $\alpha = a/b$ est connu. En effet, le voilement va se produire pour la plus petite valeur possible de contrainte critique de voilement élastique σ_{crB} et par conséquent du coefficient de voilement k . On constate que pour $\alpha \geq 1$, la valeur de k ne varie pas sensiblement. On peut donc adopter la représentation simplifiée et conservatrice de la figure 2.3(c), où l'on remplace les courbes festonnées par une droite horizontale d'ordonnée $K_{min} = 4.0$.

Le cas de la plaque articulée sur ses quatre bords et simplement comprimée peut être considéré comme le cas fondamental de voilement. Il est possible d'établir les courbes $k = f(\alpha)$ pour d'autres cas de sollicitations (contraintes normales variant le long du bord, contraintes agissant dans deux directions, cisaillement, etc.) et pour d'autres conditions de bord (bord libre, encastré), en intégrant l'équation différentielle relative à chaque cas. Les tables de Klöppel [2.2] [2.3] contiennent un grand nombre de cas rencontrés dans la pratique.

2.2.4. Influence des conditions de bord :

Le cas de la plaque rectangulaire articulée sur ses quatre bords ne constitue qu'un cas particulier d'éléments pouvant être sensibles au phénomène du voilement. La figure 2.4 montre les autres conditions de bord possibles, ainsi que leur représentation symbolique. Le type de condition de bord à introduire dans le calcul dépend du comportement réel du bord de la plaque, qui est influencé par sa liaison avec les éléments adjacents. Pratiquement, les plaques ne sont jamais parfaitement articulées ou encastrées, étant donné qu'elles constituent en général les parois d'éléments de construction tels que par exemple ceux illustrés à la figure 2.2. On admet souvent, par mesure de simplification, que ces éléments plans sont articulés sur leurs bords, ce qui est une hypothèse conservatrice.

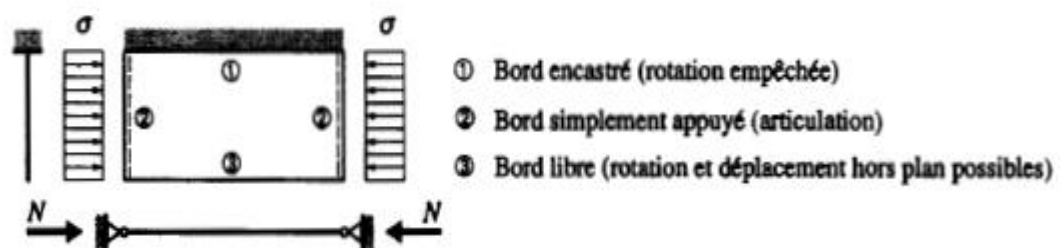


Fig. 2.3 Représentation symbolique des conditions de bord.

Les coefficients de voilement de plaques comprimées dans une direction, dont les bords parallèles à la direction de la sollicitation sont une fois simplement appuyés et une autre fois

encastrés, sont comparés à la figure 2.5(a). Cela met en évidence que plus une plaque est tenue rigidement sur ses bords, plus résiste au voilement (elle a un coefficient de voilement plus élevé). Il est possible de faire l'analogie à une barre comprimée encastrée à ses deux extrémités, dont la charge critique de flambage est plus élevée que celle de la même barre mais articulée.

Le cas d'une section en caisson simplement comprimée est illustré à la figure 2.5(b). Le diagramme montre la variation du coefficient de voilement k des âmes en fonction des dimensions relatives parois du caisson [2.4].

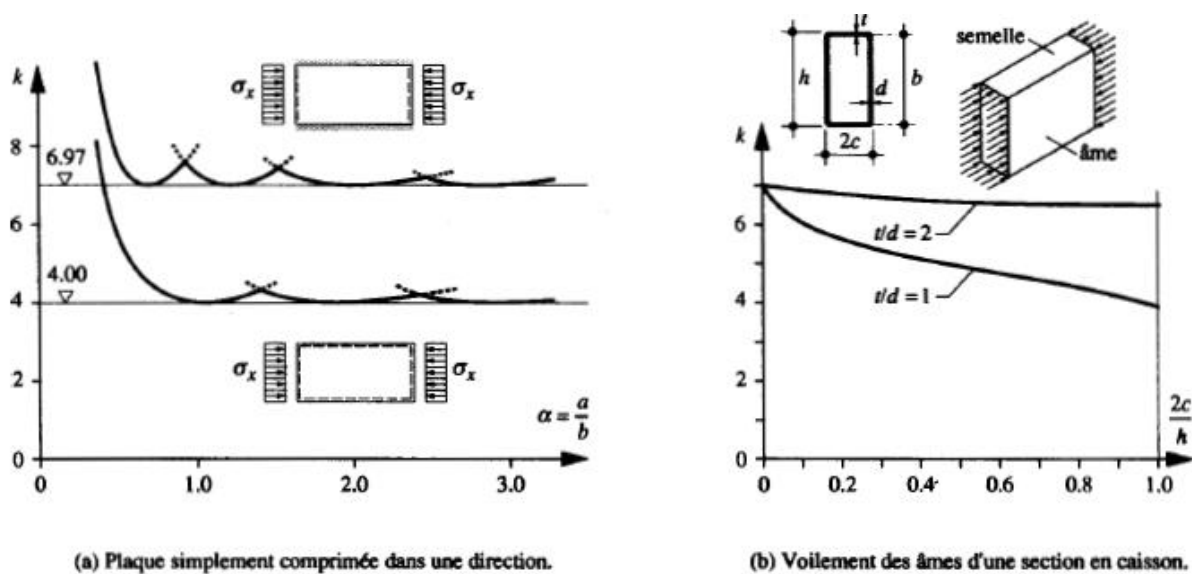


Fig. 2.4 Influence des conditions de bord.

2.2.5. Influence du type de sollicitation :

Le cas de sollicitation le plus général est le cas de la plaque soumise à des forces extérieures provoquant des contraintes normales σ_x et σ_y ainsi que des contraintes de cisaillement τ . Nous n'aborderons ici que le cas des plaques sollicitées dans une seule direction, en examinant successivement l'effet des contraintes normales, des contraintes de cisaillement et des sollicitations composées.

- Contraintes normales :

Les contraintes normales dans une plaque peuvent être dues à de la traction, à de la compression ou à de la flexion. Pour les plaques soumises à des contraintes de traction, il n'y a pas de problème d'instabilité. Mais dès qu'une partie de la plaque est comprimée, il y a un

danger de voilement. Ce danger s'accroît au fur et à mesure que la zone comprimée augmente, ce qui se traduit par une diminution du coefficient de voilement.

La figure 2.6(a) montre la variation du coefficient de voilement k d'une plaque articulée sur quatre bords pour les cas suivants:

- compression pure (courbe (1) identique à celle de la figure 2.5(a)), où l'on a $K_{min} = 4.00$,
- flexion pure (courbe (2), pour laquelle on a $K_{min} = 23.90$).

La courbe (3) de la figure 2.6(b) montre quant à elle la variation du coefficient de voilement k en fonction du rapport Ψ des contraintes extrêmes dans le cas de la flexion composée. On y retrouve les valeurs de $k = 4.0$ et 23.9 correspondant respectivement à la compression pure et à la flexion pure.

- Contraintes de cisaillement :

Pour une plaque cisailée, l'état déformé de la plaque permet de voir qu'il se forme une bielle comprimée et une bielle tendue (fig. 2.6(a)). Le voilement peut alors être assimilé au «flambage» de la

bielle comprimée hors du plan de la plaque, la bielle tendue contribuant à l'effet de membrane. Le coefficient de voilement pour ce cas de sollicitation est donné à la figure 2.6(a) par la courbe (4).

- Sollicitations composées :

Pour les plaques soumises simultanément à des contraintes normales et à des contraintes de cisaillement, il existe des relations d'interaction approchées, basées sur le critère de plastification Von Mises, permettant de tenir compte de la combinaison de ces efforts. Ces relations aboutissent au calcul d'une contrainte fictive appelée contrainte critique de comparaison σ_{gcr} [2.4] [2.5] [2.6]. Relation (2.11), tirée de [2.5], exprime la valeur de σ_{gcr} pour une plaque soumise à des contraintes normales σ_x variant le long du bord, et à des contraintes de cisaillement τ :

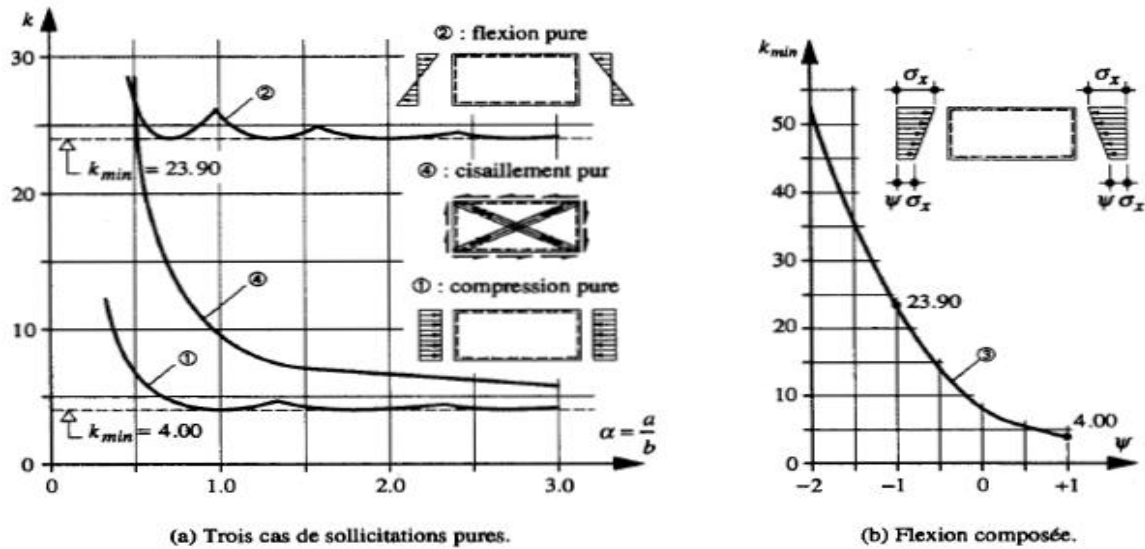


Fig. 2.5 Valeurs du coefficient de voilement k en fonction du type de sollicitation.

$$\sigma_{gcr} = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau^2}}{\frac{1+\varphi}{4} + \frac{\sigma_x}{\sigma_{x,crB} + \sqrt{\left(\frac{3-\varphi}{4} \frac{\sigma_x}{\sigma_{x,crB}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2}} \quad (2.11)$$

ω : rapport entre la plus petite et la plus grande contrainte (avec leurs signes) le long du bord de largeur b

σ_x : contrainte de compression maximale (fig. 2.6(b))

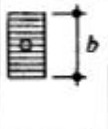





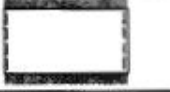





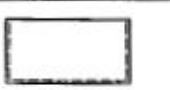
$\sigma_{x,crB}$: contrainte critique de voilement élastique de la plaque soumise uniquement aux contraintes normales

τ_{cr} : contrainte tangentielle critique de la plaque soumise uniquement au cisaillement

$$(\tau_{cr} = k \sigma E)$$

Le tableau 2.1 résume les valeurs minimales du coefficient de voilement k pour quelques cas courants, en considérant différents types de sollicitations et de conditions de bord. Les cellules vides de ce tableau correspondent à des situations qui n'ont pas été étudiées de façon particulière.

Tableau 2.1 Valeurs minimales du coefficient de voilement k pour différents types de sollicitations et de conditions de bord.

Conditions de bord	Contraintes normales					Contraintes de cisaillement (formules approchées)
						
	4.00	5.32	7.81	13.40	23.9	$\alpha \geq 1 : k = 5.34 + (4.00/\alpha^2)$ $\alpha \leq 1 : k = 4.00 + (5.34/\alpha^2)$
	6.97	9.27	13.54	24.5	39.52	$\alpha \geq 1 : k = 9.00 + (3.30/\alpha^2)$ $\alpha \leq 1 : k = 7.00 + (5.30/\alpha^2)$
	5.41		11.73		39.52	$\alpha \geq 1 : k = 7.50 + (4.00/\alpha^2)$ $\alpha \leq 1 : k = 6.50 + (5.00/\alpha^2)$
	5.41		9.54		23.94	
	1.28		5.91			
	1.28		1.608		2.134	
	0.426		1.702			
	0.426		0.567		0.851	

2.2.6. Plaques munies de raidisseurs :

2.2.6. a. Fonction d'un raidisseur :

Nous avons vu, lors de l'étude des phénomènes de flambage et de déversement, que l'on peut augmenter considérablement la résistance ultime d'une barre fléchie ou comprimée en disposant appuis intermédiaires. De même, dans le cas d'une plaque comprimée, une augmentation de la charge critique de voilement est possible en créant des appuis linéaires au moyen de raidisseurs. La plaque est alors subdivisée en plusieurs panneaux (fig. 2.8).

La charge critique d'une plaque raidie est fonction de la position du raidisseur et de sa rigidité. Raidisseur est très souple, il est entraîné par la plaque dans sa déformation; il constitue dans ce cas un appui élastique. S'il possède, au contraire, une certaine rigidité (que nous allons définir plus loin), il crée un appui fixe. La figure 2.8 illustre l'exemple d'une plaque articulée sur ses quatre bords, simplement comprimée dans une direction et munie d'un raidisseur longitudinal.

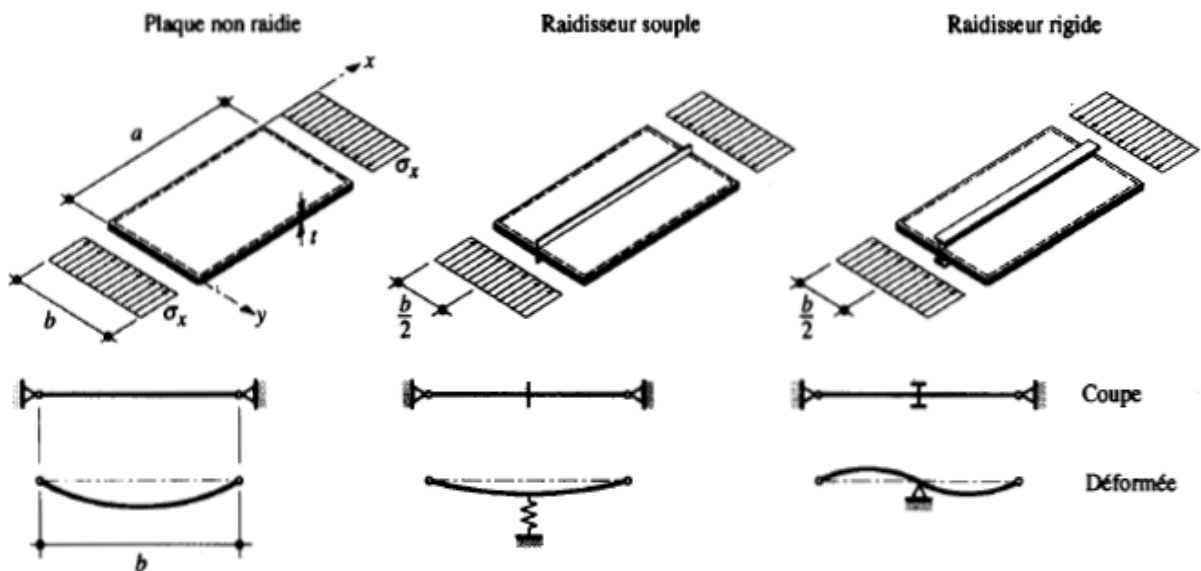


Fig. 2.6 Influence d'un raidisseur sur le mode de voilement.

2.2.6.b. Position optimale et rigidité nécessaire d'un raidisseur :

Pour que l'efficacité du raidisseur soit maximale, celui-ci doit être placé au droit du sommet de la cloque de la plaque non raidie, afin de créer une nouvelle ligne nodale de la déformée de la plaque (ligne où la déformation de la plaque hors de son plan est nulle). Le voilement est ainsi forcé de se faire en d demi-ondes. Pour une plaque articulée simplement comprimée (fig. 2.6), le raidisseur doit donc être placé à une distance $b/2$ du bord de la plaque. Si l'on considère le voilement en trois demi-ondes, on doit disposer deux raidisseurs positionnés au tiers de la largeur b . La figure 2.7 montre la position optimale des raidisseurs pour trois cas de sollicitation d'une plaque simplement appuyée sur ses quatre bords.

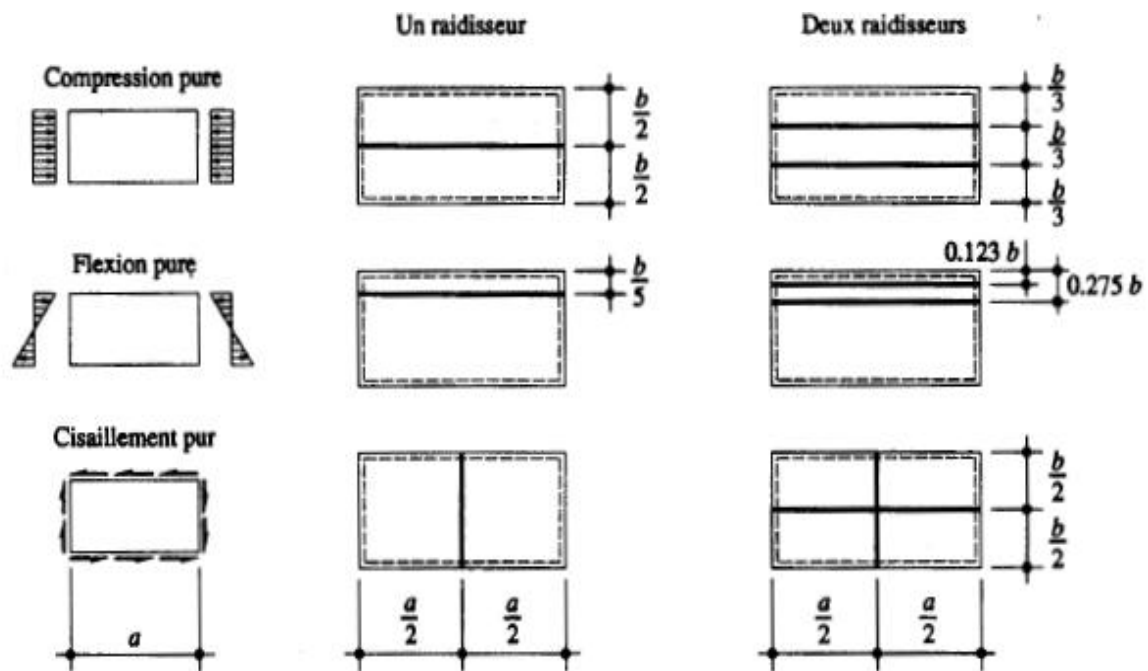


Fig. 2.7 Position optimale des raidisseurs sur une plaque en fonction du type de sollicitation.

Afin de créer un appui linéaire, un raidisseur doit posséder une certaine rigidité. En supposant que les raidisseurs sont disposés symétriquement par rapport au plan de la plaque (ils sont de ce fait soumis à une compression centrée et à un moment de flexion dû à la déformation hors du plan de la plaque), rigidité peut être calculée en ajoutant dans l'équation différentielle (2.1) des termes tenant compte l'effet du raidisseur [2.7]. L'intégration de cette nouvelle équation différentielle permet alors, en te compte des conditions aux limites (déformation hors du plan nulle sur les bords et au droit du raidisseur d'obtenir la valeur de la rigidité nécessaire du raidisseur pour créer un appui linéaire.

En définissant la rigidité relative χ_s d'un raidisseur comme étant le rapport des rigidités du raidis et de la plaque (l'indice s provient de l'allemand Steife et de l'anglais Stiffener)

En général:
$$\chi_s = \frac{E I_s}{D b} \quad (2.12a)$$

Pour l'acier:
$$\chi_s = \frac{10.92 I_s}{b t^3} \quad (2.12b)$$

I_s : inertie du raidisseur par rapport au plan moyen de la plaque

On peut déterminer la variation du coefficient de voilement k en fonction de la rigidité relative, (fig. 2.8). Le raidisseur représente un appui fixe pour la plaque lorsque sa rigidité relative est égale ou supérieure à la rigidité relative nécessaire $X_{s,néc}$:

$$X_s \geq X_{s,néc} \quad (2.13)$$

$X_{s,néc}$: rigidité relative nécessaire d'un raidisseur pour qu'il constitue un appui fixe

Pour toutes les valeurs où la condition (2.13) n'est pas satisfaite ($X_s < X_{s,néc}$), le raidisseur ne crée appui élastique, voire même aucun appui.

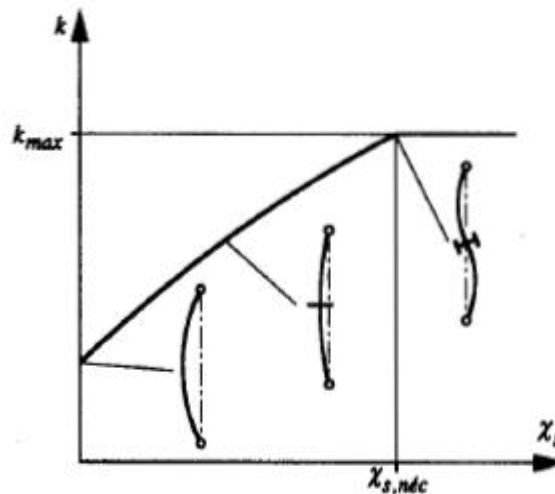


Fig. 2.8 Variation du coefficient de voilement en fonction de la rigidité relative d'un raidisseur.

Précisons encore, comme le montre la figure 2.9 que la rigidité relative nécessaire $X_{s,néc}$ est encore en fonction du rapport $\alpha = a/b$, ainsi que de l'aire relative ϕ_s du raidisseur, définie comme étant le rapport des aires du raidisseur et de la plaque:

$$\delta_s = \frac{A_s}{b t} \quad (2.14)$$

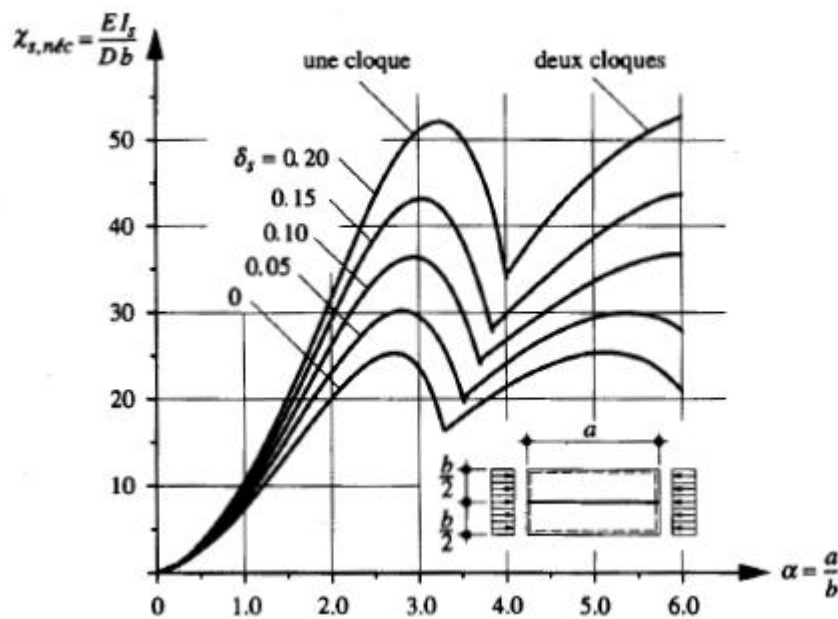


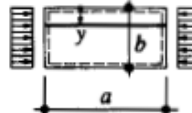
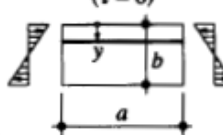
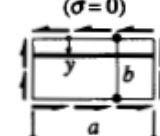
Fig. 2.9 Rigidité relative nécessaire d'un raidisseur pour qu'il constitue un appui fixe.

La valeur de $X_{s,néc}$ obtenue en considérant un raidisseur disposé au droit d'une ligne nodale (voilement en deux demi-ondes) est appelée rigidité relative nécessaire de première espèce. Si raidisseur n'est pas situé dans cette position optimale (par exemple à $b/4$ au lieu de $b/2$ pour une p1a sollicitée en compression), il doit posséder une rigidité théoriquement infinie pour rester absolument rectiligne. Dans un tel cas, la valeur de $X_{s,néc}$, définissant la limite entre le voilement en une demi-onde et deux demi-ondes, est appelée rigidité relative nécessaire de deuxième espèce.

De nombreux cas pratiques sont traités dans les tables de Klppel et Scheer [2.2] [2.3]. Nous donnons au tableau 2.1 quelques valeurs de $X_{s,néc}$ pour des plaques comportant un ou deux raidisseurs longitudinaux sans rigidité torsionnelle. Concernant la notation utilisée dans ce tableau 2.2, il est nécessaire de préciser que :

- La rigidité relative nécessaire $X_{c,néc}$ représente celle d'un seul raidisseur,
- L'aire relative φ_s représente également celle d'un seul raidisseur, placé symétriquement par rapport à la plaque (un seul raidisseur peut être constitué de deux fers plats, deux cornières, etc.),
- La distance y correspond à la position du ou des raidisseurs par rapport au bord supérieur de plaque.

Tableau 2.2 Valeurs de la rigidité relative nécessaire $X_{s,néc}$ pour différents cas.

	y	$\alpha = \frac{a}{b}$	Rigidité relative nécessaire $X_{s,néc}$
<p>Compression pure ($\tau = 0$)</p> 	$\frac{b}{2}$	$\alpha \leq \sqrt{8(1+2\delta_s)} - 1$	$-\frac{1}{2}\alpha^4 + [8(1+2\delta_s) - 1]\alpha^2 + \delta_s + \frac{1}{2}$
		$\alpha \geq \sqrt{8(1+2\delta_s)} - 1$	$\frac{1}{2}[8(1+2\delta_s) - 1]^2 + \delta_s + \frac{1}{2}$
	$\frac{b}{3}$ et $\frac{2b}{3}$	$\alpha \leq \sqrt{18(1+3\delta_s)} - 1$	$-\frac{1}{3}\alpha^4 + \frac{2}{3}[18(1+3\delta_s) - 1]\alpha^2 + \delta_s + \frac{1}{3}$
		$\alpha \geq \sqrt{18(1+3\delta_s)} - 1$	$\frac{1}{3}[18(1+3\delta_s) - 1]^2 + \delta_s + \frac{1}{3}$
<p>Flexion pure ($\tau = 0$)</p> 	$\frac{b}{2}$	$\alpha \geq 0.5$	1.5
	$\frac{b}{3}$	$0.5 \leq \alpha \leq \sqrt{1.6 + 8\delta_s}$	$-1.1\alpha^4 + (3.5 + 17.6\delta_s)\alpha^2 + 0.7$
		$\alpha \geq \sqrt{1.6 + 8\delta_s}$	$3.4 + 27.7\delta_s + 70.4\delta_s^2$
	$\frac{b}{4}$	$0.5 \leq \alpha \leq \sqrt{3.06 + 17.4\delta_s}$	$-1.21\alpha^4 + (7.41 + 42\delta_s)\alpha^2 + 1$
		$\alpha \geq \sqrt{3.06 + 17.4\delta_s}$	$12.3 + 130\delta_s + 370\delta_s^2$
	$\frac{b}{5}$	$0.5 \leq \alpha \leq \sqrt{5.14 + 25.2\delta_s}$	$-1.54\alpha^4 + (15.82 + 77.6\delta_s)\alpha^2 + 3.55$
		$\alpha \geq \sqrt{5.14 + 25.2\delta_s}$	$43.4 + 381\delta_s + 1080\delta_s^2$
	$\frac{b}{3}$ et $\frac{2b}{3}$	$\alpha \geq 0.7$	$(3.33 + 16.67\delta_s)(\alpha - 0.1)$ mais $X_{s,néc} \leq 26\delta_s + 3$
	$\frac{b}{4}$ et $\frac{b}{2}$	$\alpha \geq 0.5$	$(7 + 50\delta_s + 27\delta_s^2)\alpha - (1.6 + 14.5\delta_s + 13.5\delta_s^2)$ mais $X_{s,néc} \leq 8 + 70\delta_s + 200\delta_s^2$
	<p>Cisaillement pur ($\sigma = 0$)</p> 	$\frac{b}{2}$	$0.7 \leq \alpha \leq 1.1$
$1.1 \leq \alpha \leq 3.5$			$18(4.1 - \alpha)(\alpha - 2.1)^3 + 108(\alpha - 2.1) + 220$
$\frac{b}{3}$		$0.7 \leq \alpha \leq 1.6$	$(10 - 2.38\alpha)\alpha^4$
		$1.6 \leq \alpha \leq 3.0$	$90.6 - [35 / (\alpha - 0.9)]$
$\frac{b}{4}$		$0.5 \leq \alpha \leq 1.5$	$4.16\alpha^4 + 5(\alpha - 1)(\alpha - 0.7)$
		$1.5 \leq \alpha \leq 4.0$	$40 - [5.1 / (\alpha - 1.2)]$
$\frac{b}{5}$		$0.5 \leq \alpha \leq 1.3$	$19.5(\alpha - 0.5)^3 + 0.5$
		$1.3 \leq \alpha \leq 2.5$	$35 - 17(2.5 - \alpha)^2$
		$2.5 \leq \alpha \leq 4.0$	$370 - 41(3.5 - \alpha)^3$
$\frac{b}{3}$ et $\frac{2b}{3}$		$0.5 \leq \alpha \leq 1.0$	$50\alpha^3 + 10\alpha$
		$1.0 \leq \alpha \leq 2.2$	$\frac{1}{3}(550\alpha - 370)$
		$2.2 \leq \alpha \leq 3.5$	$370 - 41(3.5 - \alpha)^3$
$\frac{b}{4}$ et $\frac{b}{2}$	$0.7 \leq \alpha \leq 2.5$	$34.4\alpha - 19$	
	$2.5 \leq \alpha \leq 4.0$	$66\alpha - 98$	

2.7. DEFINITION DES MODELES :

Le phénomène d'instabilité le voilement touche les plaques minces sollicitées dans leur plan. Considérons, une plaque métallique parfaitement plane de dimensions (Les cotés $a = b = 800\text{mm}$, épaisseurs $t = 5\text{mm}$), bi-articulée sur (ses deux bords), sollicité par une charge surfacique de flexion uniformément répartie $q = 0.01\text{N} \cdot \text{mm}^2$. La nuance des aciers utilisés est S235.

Afin d'éliminer ce problème, L'EUROCODE a proposé des techniques de renforcement par des raidisseurs. Pour assuré la continuité mécanique entre les parties à assembler l'assemblage par soudage à été choisi. L'assemblage est réalisé par soudure de type ordinaire mono passe. La vitesse de soudage, l'apport de chaleur de soudage et la direction de soudage sont pris en compte dans la **recherche**.

Les modèles étudiés sont comme suit :

- Plaque métallique non renforcée.
- Plaque métallique munie d'un seul raidisseur.
- Plaque métallique munies de deux raidisseurs.
- Plaque métallique munies de trois raidisseurs.

2.8. Vérification de voilement selon l'eurocode3 :

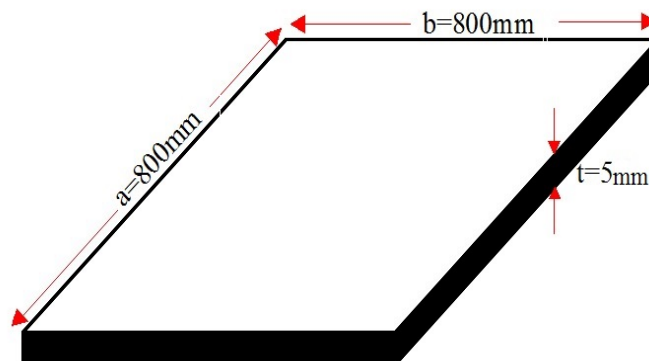


Fig. 2.10.a. Présentation du panneau non raidi.

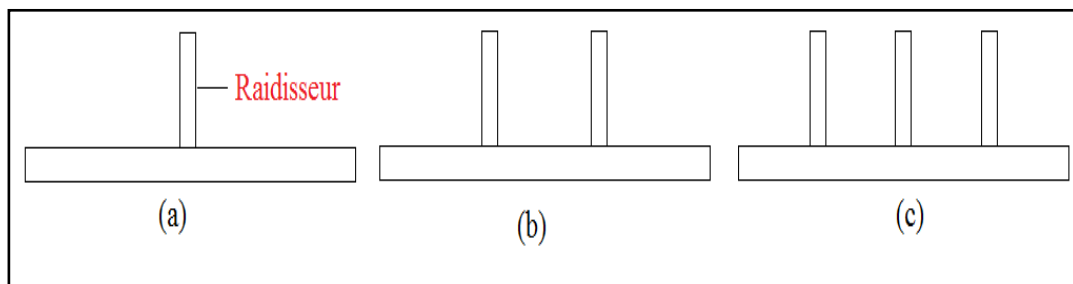


Fig. 2.10.b. Présentation des panneaux munie des raidisseurs.

1^{er} cas Plaque non raidie (voilement en une seule demi-onde selon y):

Avec $b = 800\text{mm}$, $a = 800\text{mm}$, $t = 5\text{mm}$

Contrainte critique de voilement :

La contrainte de référence selon Euler vaut, selon (2.7b):

$$\sigma_E = 190000 \times \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 190000 \times \left(\frac{5}{800}\right)^2 = 7.42 \text{ N/mm}^2$$

Pour une plaque articulée sur ses quatre bords et sollicitée en flexion pure, le coefficient de voilement vaut $k = 23.9$ (fig. 2.2). La contrainte critique de voilement élastique vaut ainsi (2.8):

$$\sigma_{crB} = k \times \sigma_E = 23.9 \times 7.42 \text{ N/mm}^2 = 177.38 \text{ N/mm}^2$$

2^{ème} cas : Plaque raidie avec un raidisseur rigide (voilement en deux demi-ondes selon y):

De façon analogue au cas de la plaque non raidie, on obtient, avec $b = 400 \text{ mm}$ et $k = 23.9$:

Contrainte critique de voilement :

$$\sigma_E = 190000 \times \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 190000 \times \left(\frac{5}{400}\right)^2 = 29.69 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{crB} = k \times \sigma_E = 23.9 \times 29.69 \text{ N/mm}^2 = 709.53 \text{ N/mm}^2$$

✚ Comparaison entre les deux plaques : avec / sans raidisseurs : Selon la rigidité du raidisseur on aura :

$$177.38 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{crB} \leq 709.53 \text{ N/mm}^2$$

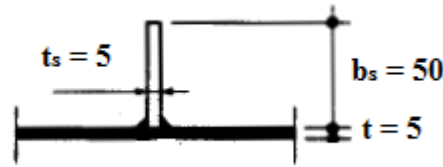
Cet exemple montre que le fait de créer un appui linéaire au moyen d'un raidisseur permet, suivant sa rigidité, de quadrupler la valeur de la contrainte critique de voilement élastique.

Rigidité nécessaire d'un raidisseur :

Soit la plaque, articulée sur ses quatre bords et sollicitée dans une direction à la flexion pure. Les dimensions de la plaque sont $a = 800 \text{ mm}$, $b = 800 \text{ mm}$ et $t = 5 \text{ mm}$,

Elle comporte un raidisseur longitudinal, symétrique par rapport au plan de la plaque

Détail du raidisseur :



L'inertie du raidisseur par rapport à son plan moyen vaut:

$$I_s = t [(b_s + t)^3 - t^3] \ / \ 12 = 5 \text{ mm} \times [(50 \text{ mm} + 5 \text{ mm})^3 - (5 \text{ mm})^3] \ / \ 12 = 6.93 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

La rigidité relative du raidisseur vaut ainsi,

Selon (2.12b):

$$X_s = \frac{10.92 I_s}{b \times t^3} = \frac{10.92 \times 6.93 \times 10^4 \text{ mm}^4}{800 \times 5^3} = 7.57$$

L'aire relative du raidisseur (2.14) permet de déterminer, à l'aide du tableau 2.13 (ou de la figure 2.12),

La rigidité relative nécessaire:

$$\delta_s = \frac{A_s}{b t} = \frac{50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}}{800 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}} = 0.062$$

$$\alpha = a \ / \ b = 800 \text{ mm} \ / \ 800 \text{ mm} = 1$$

$$\alpha = 1 \geq 0.5 \quad \text{donc selon le (tab 2.13) on obtient : } X_{s,nec} = 1.5$$

La relation (2.13) permet de s'assurer que le raidisseur est suffisamment rigide pour constituer un appui fixe selon la théorie linéaire du voilement élastique:

$$X_s = 7.57 > X_{s,nec} = 1.5$$

3^{ème} cas : Plaque raidie avec deux raidisseurs rigides (voilement en trois demi-ondes selon y):

De façon analogue au cas de la plaque non raidie, on obtient, avec $b=266.666$ mm et $k = 23.9$:

Contrainte critique de voilement :

$$\sigma_E = 190000 \times \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 190000 \times \left(\frac{5}{266.666}\right)^2 = 66.80 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{crB} = k \times \sigma_E = 23.9 \times 66.80 \text{ N/mm}^2 = 1596.52 \text{ N/mm}^2$$

✚ Comparaison entre les deux plaques : avec deux raidisseurs / sans raidisseur : Selon la rigidité du raidisseur on aura :

$$709.53 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{crB} \leq 1596.52 \text{ N/mm}^2$$

La valeur de la contrainte critique de voilement élastique de la plaque avec deux raidisseur c'est doubler par rapport a c'elle avec un seul raidisseur.

Rigidité nécessaire d'un raidisseur :

Soit la plaque, articulée sur ses quatre bords et sollicitée dans une direction à la flexion pure. Les dimensions de la plaque sont $a = 800$ mm, $b = 800$ mm et $t = 5$ mm,

Elle comporte deux raidisseurs longitudinaux, symétrique par rapport au plan de la plaque

L'inertie du raidisseur par rapport à son plan moyen vaut:

$$I_s = t [(bs + t)^3 - t^3] \ / \ 12 = 5 \text{ mm} \times [(50 \text{ mm} + 5 \text{ mm})^3 - (5 \text{ mm})^3] \ / \ 12 = 6.93 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

La rigidité relative du raidisseur vaut ainsi,

Selon (2.12b): pour deux raidisseurs :

$$X_s = \frac{10.92 I_s}{b \times t^3} \times 2 = \frac{10.92 \times 6.93 \times 10^4 \text{ mm}^4}{800 \times 5^3} \times 2 = 15.14$$

L'aire relative du raidisseur (2.14) permet de déterminer, à l'aide du tableau 2.13 (ou de la figure 2.12),

La rigidité relative nécessaire:

Pour deux raidisseurs vaut :

$$\delta_s = \frac{A_s}{b t} \times 2 = \frac{50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}}{800 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}} \times 2 = 0.124$$

$$\alpha = a \setminus b = 800 \text{ mm} \setminus 800 \text{ mm} = 1$$

$$\alpha = 1 \text{ ----) } \sqrt{1.6 + \delta_s 8} = \sqrt{1.6 + 0.124 \times 8} = 1.61$$

$$0.5 \leq \alpha = 1 \leq \sqrt{1.6 + \delta_s 8} = 1.61$$

Donc selon le (tab 2.13) on obtient :

$$X_{s,nec} = -1.1 \times \alpha^4 + (3.5 + 17.6 \times \delta_s) \alpha^2 + 0.7 = 5.28 \times 2 = 10.56$$

La relation (2.13) permet de s'assurer que le raidisseur est suffisamment rigide pour constituer un appui fixe selon la théorie linéaire du voilement élastique:

$$X_s = 15.14 > X_{s,nec} = 10.56$$

4^{ème} cas : Plaque raidie avec trois raidisseurs rigides (voilement en quatre demi-ondes selon y):

Comme la vérification correspondante d'une plaque renforcée avec deux (02) raidisseurs a vérifié donc la plaque vérifie avec trois (03) raidisseurs.

❖ Soudure

2.9. Introduction de la soudure :

L'opération de soudage consiste à assembler deux éléments métalliques, par fusion et re-solidification. En d'autres termes, il s'agit d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un produit d'apport permettant un meilleur lien entre les pièces.

Dans le cas de l'utilisation d'un métal d'apport, ce composé doit avoir des propriétés au moins égales et une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler.

Différents types d'assemblage peuvent être rencontrés en fonction des contraintes appliquées à la structure réalisée, de la nature et des dimensions de l'élément à assembler.

2.10. RESISTANCE DES SOUDURES :**2.10.1 SOUDURE D'ANGLE :**

La soudure d'angle est présentée dans la figure 2.14 et les différents types de joint sont présentés dans la figure 2.15 avec :

a: L'épaisseur utile ou gorge "a" d'une soudure d'angle sera prise égale à la hauteur du plus grand triangle pouvant être inscrit entre les faces de fusion et la surface du cordon mesurée perpendiculairement à son côté extérieur.

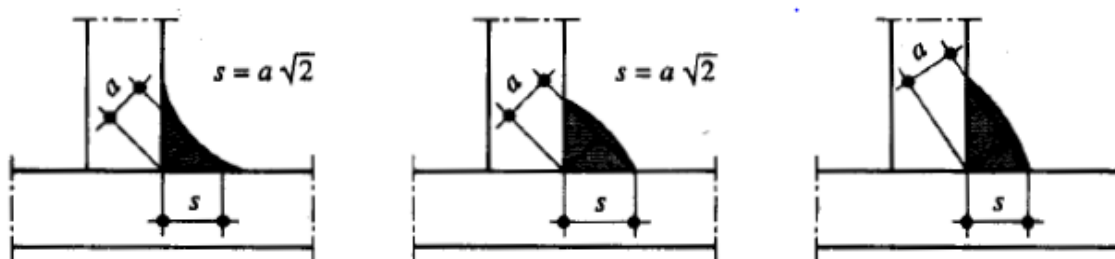


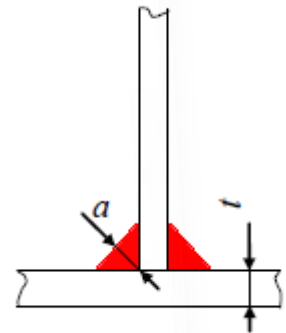
Fig.2.11. L'épaisseur utile ou gorge "a"

l: longueur utile d'un cordon de soudure et égale à sa longueur réelle diminuée de la longueur des cratères d'extrémité lorsque aucune disposition n'est prise pour les éliminer.

2.10.2. EPAISEUR D'UN CORDON DE SOUDURE D'ANGLE :

Le tableau ci-contre donne une bonne corrélation entre l'épaisseur « *a* » d'un cordon d'angle et l'épaisseur « *t* » de la plus faible des pièces à assembler :

<i>t</i> (mm)	4	6	7	8	10	12	14	16	18
<i>a</i> (mm)	3	4	5	6	7	8	10	11	13



2.10.3 TYPES DE JOINT DE SOUDURE :

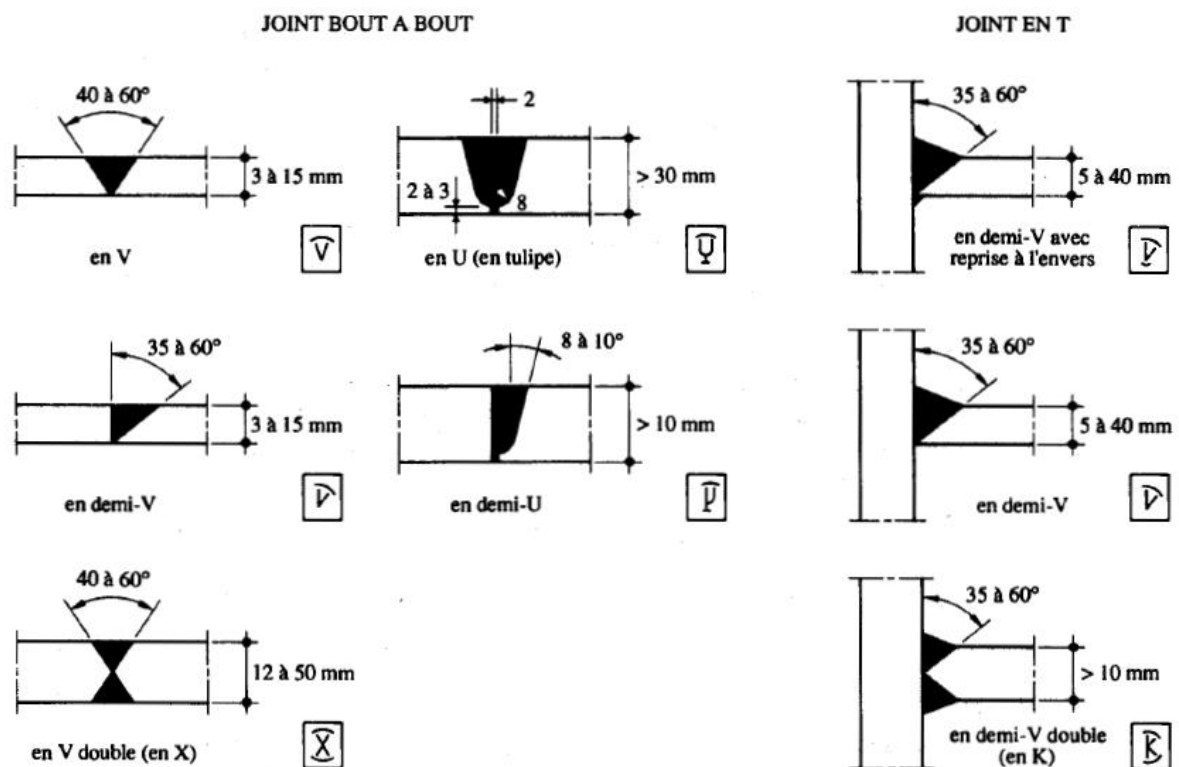


Fig. 2.12 Exemples de soudures complètement pénétrées.

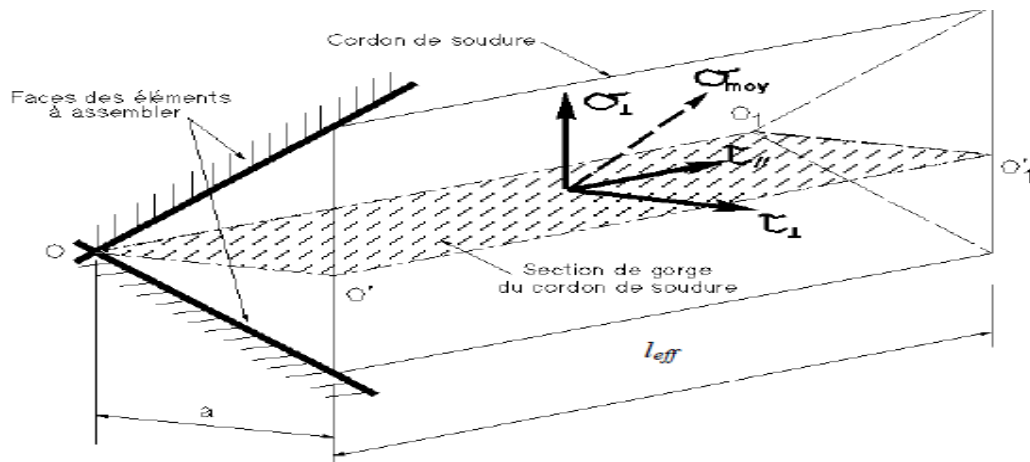


Fig.2.13. Représentation d'un cordon de soudure

Les formules de vérification sont:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \quad \text{et} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} \quad (2.15)$$

Avec

- σ_{\perp} : Composante perpendiculaire à la section.
- τ_{\perp} : Composante dans le plan de la section perpendiculaire à l'axe longitudinal du cordon.
- $\tau_{//}$: Composante dans le plan de la section parallèle à l'axe longitudinal du cordon.
- f_u : Résistance nominale ultime à la traction de la pièce assemblée la plus faible

β_w : facteur de corrélation qui dépend de l'acier utilisé donné par le tableau suivant :

Nuance	β_w	Nuance	β_w	Nuance	β_w	Nuance	β_w
S 235....	$\beta_w = 0.8$	S 275....	$\beta_w = 0.85$	S 355....	$\beta_w = 0.9$	S 420....	$\beta_w = 1.0$

Tab 2.3. Facteur de corrélation pour les soudures d'angle.

γ_{Mw} : Coefficients partiels de sécurité ils varient en fonction des caractéristiques des aciers

- $\gamma_{Mw} = 1,25$ pour l'acier de limite élastique S235

- $\gamma_{Mw} = 1,30$ pour les aciers de limite élastique S275
- $\gamma_{Mw} = 1,35$ pour les aciers de limite élastique S355
- L'indice w signifie soudure (**welding** en anglais)

On peut calculer la résistance de calcul par unité de longueur d'une soudure d'angle à l'aide de la formule simplifiée suivante :

$$F_{w.Rd} = \frac{a \cdot f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}}$$

2.11. La vérification de la soudure selon l'eurocode3 :

$$a \cdot \Sigma l \leq (\beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot N \cdot \sqrt{2}) / F_U$$

On tire
$$N_{SD} \leq (a \cdot \Sigma l \cdot F_U) / (\gamma_{Mw} \cdot \beta_w \cdot \sqrt{2})$$

Avec :

- $\beta_w = 0,8$ pour l'acier S235
- $\gamma_{Mw} = 1,25$ pour l'acier de limite élastique S235
- $F_U = 360\text{MPa}$.
- $\Sigma l = 2 \times 800\text{mm} = 1600\text{mm}$
- $t = 5\text{mm}$ se qui inclut $a = 4\text{mm}$.

Vérification de la plaque a la traction selon l'eurocode3 :

$$\triangleright N_{Sd} \leq N_{PLRD}$$

L'effort N_{Sd} est obtenu à partir de la modélisation numérique présenté dans le chapitre suivant :

$$N_{PLRD} = (A \cdot F_Y) / \gamma_{M0} = (4000 \times 235) / 1.1 = 854545,45 \text{ N} = 854,54 \text{ KN}$$

Avec:

- $A =$ la section de la plaque ($5 \times 800 = 4000 \text{ mm}^2$)
- $F_Y = 235\text{MPa}$

- $\gamma_{M0}=1.1$

$$N_{SD} = 802.22 \text{ KN} \geq N_{PLRD} = 854, 54 \text{ KN}$$

Donc on prend l'effort $N_{PLRD} = 854, 54 \text{ KN}$.

Chapitre 03

Etude numérique

3. 1.INTRODUCTION

Le voilement est le phénomène d'instabilité des plaques minces sollicitées par compression, flexion et cisaillement dans leur plan.

Une structure de panneau renforcé est l'un des types de structure les plus couramment utilisés en mer, aéronautique et astronautique, ingénierie, et autres domaines.

Pendant le processus de renforcement, le raccordement des éléments par soudage est la technique la plus utilisée, mais le soudage crée des températures très élevées auxquelles les propriétés du matériau sont grandement affectées avec l'apparition des contraintes résiduelles. La géométrie de la forme et des plaques, le type de plaques, le type de la vitesse de soudage, la vitesse de refroidissement de l'ensemble influent sur l'amplitude et la distribution des contraintes résiduelles [Nagaraja, 1962].

Pour les industries, où le facteur sûreté est un facteur primordial et où les outils numériques sont incontournables pour le dimensionnement de leurs structures, devenu de plus en plus complexes, un besoin de fiabilité et d'estimation de confiance est de plus en plus présent, dans les esprits des industriels, vis-à-vis des résultats numériques donnés par les codes d'éléments finis.

Ce chapitre présente une approche d'une étude ou une expertise dans le domaine de la simulation numérique du soudage (SNS). La SNS vise à prédire les contraintes et déformations dans les joints soudés. La simulation numérique par la méthode des éléments finis est devenue un outil particulièrement intéressant pour prédire contraintes et distorsions résiduelles résultant du soudage. Notre modélisation est en utilisant le logiciel ABAQUS.6.14 des plaques métalliques avant et après renforcement (des raidisseurs). Les modèles étudiés sont sollicités par une charge surfacique uniformément répartie, l'effet de moyen d'assemblage est pris en considération (soudage).

3.2. OBJECTIF :

- Etudier l'aspect de renforcement des plaques engendré par le problème d'instabilité élastique qui est voilement.
- Trouver l'influence des assemblages soudés sur les pièces à assemblées.
- La simulation numérique par la Méthode des Eléments Finis est devenue un outil particulièrement intéressant pour prédire contraintes et distorsions résiduelles résultant du soudage.
- La simulation numérique des assemblages soudés peut aider à l'évaluation des champs de contraintes et de distorsions.
- La connaissance de ces distorsions permettra de mettre en œuvre des solutions de conception des outillages afin d'obtenir la bonne géométrie des panneaux (courbures de l'outillage, séquences de soudage, pré-cambrage de la pièce). Par ailleurs, une évaluation des contraintes résiduelles par la simulation numérique est également envisagée en vue de sa prise en compte pour le dimensionnement en fatigue des pièces.

3.3. Les phénomènes physiques impliqués lors de l'opération de soudage :

L'opération de soudage fait intervenir plusieurs phénomènes (Figure 3.1) : physique de l'ordre thermique (chauffage et refroidissement du matériau), de la métallurgie (solidification et des phases du matériau), de la mécanique des fluides des fluides (fusion du matériau) et de la mécanique des solides (fatigue, torsion, fissures, et l'apparition de contraintes et déformations résiduelles) [Makhlouf, 2008] ; [Aissani, 2012].

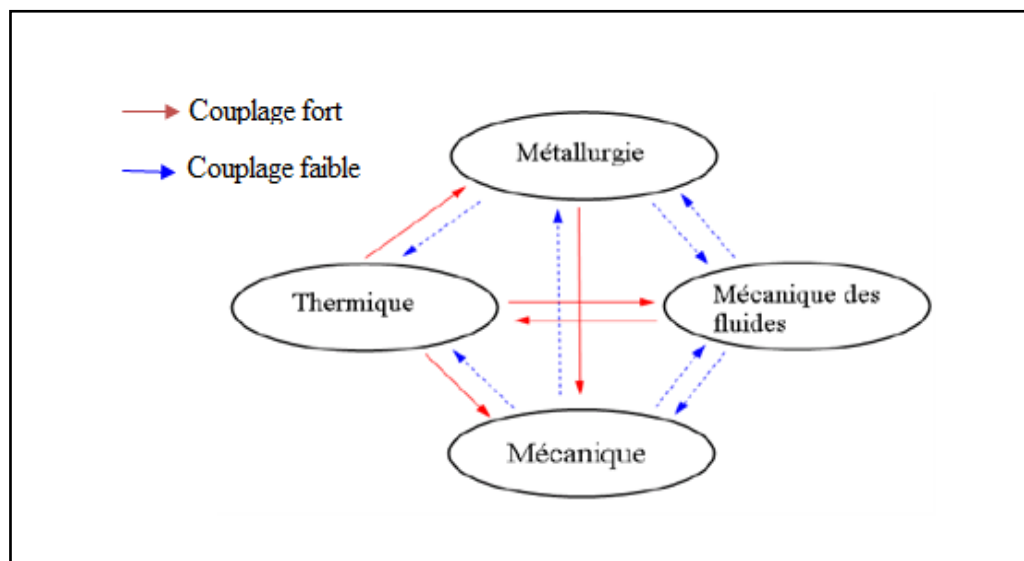


Figure 3.1. Fig.3.1. Les phénomènes entre en jeu lors de l'opération de soudage.

Lors de la liaison des éléments entre eux par soudure, on est obligé de traiter trois phénomènes thermique, métallurgique et mécanique, pour notre expérience on s'intéresse à l'interaction thermo-mécanique.

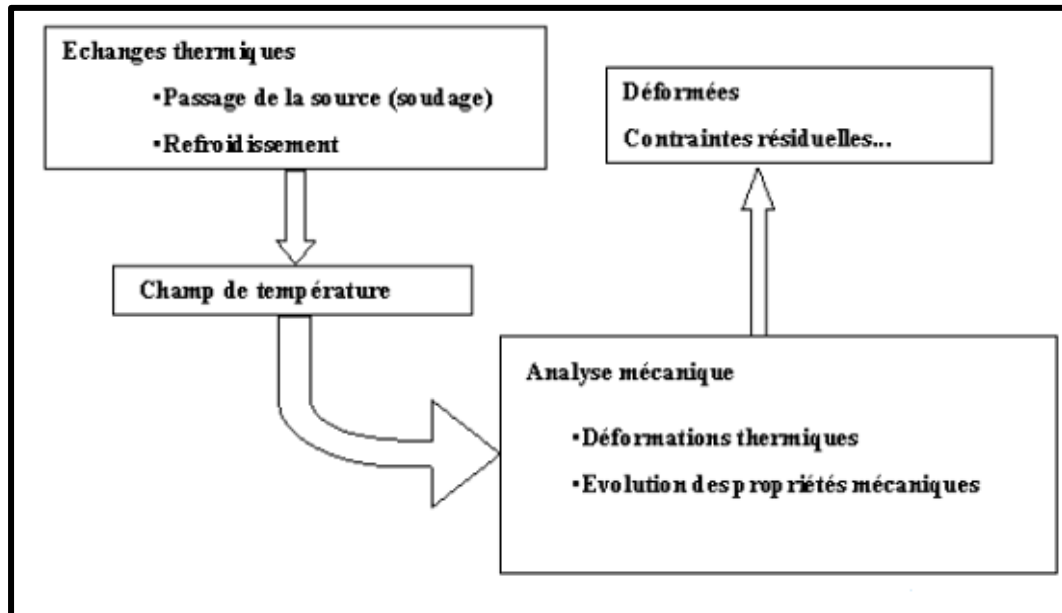


Fig.3.2. Description schématique du modèle thermomécanique.

3.4. DEFINITION DE LOGICIEL DE CALCUL PAR ELEMENTS FINIS ABAQUS

6.14 :

Pour la simulation numérique des modèles, on a choisi le code par élément finie ABAQUS 6.14.

Le logiciel ABAQUS est un code de calcul basant sur la méthode des éléments finis créé en 1978, il se compose de trois produits sont :

- 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.

3.4.1. Description du logiciel :

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

Part, property; Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job, Visualisation, Sketch.

Parmi les méthodes d'analyse dynamique on trouve notamment ABAQUS standard et explicite. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications. Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont

écrits intégralement avec les langages **C++**, **Fortran** pour les parties calcul et **Python** pour les scripts et les paramétrisations. La grande variété d'éléments dans la librairie d'éléments d'ABAQUS (495 éléments pour la V6.3) offre une importante flexibilité de modélisation géométrique et de comportement structural.

3.4.2. Chaque élément peut être caractérisé selon différents critères :

- Famille
- Nombre de Nœuds
- Degrés de liberté
- Formulation
- Intégration numérique

3.4.3. Domaines physiques :

- Mécanique
- Thermique
- Électrique
- Problèmes couplés

3.4.4. Problèmes :

- Statique et dynamique
- Linéaires et non linéaires

3.4.5. Catégories d'éléments :

On différencie dans ABAQUS diverses familles :

- Éléments continus
- Éléments structuraux
- Éléments dits spéciaux dans une même famille, il existe différentes formes d'éléments.

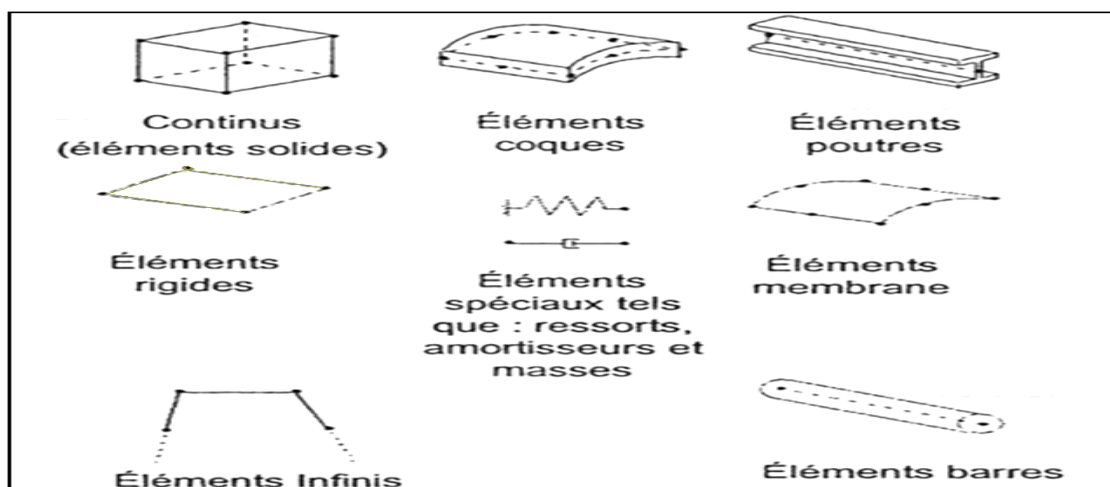


Fig.3.3. Les catégories d'éléments dans le logiciel ABAQUS.

Le principal avantage du code de calcul ABAQUS réside dans le fait qu'il soit « généraliste ». Il permet notamment de résoudre, de façon efficace et robuste, une large gamme de problèmes en statique ou en dynamique, allant de simples problèmes linéaires jusqu'à des problèmes beaucoup plus complexes et fortement non-linéaires. Les phénomènes physiques pouvant être simulés sont nombreux et il est possible de prendre en compte certaines de leurs Interactions, telles que les interactions thermomécaniques, thermoélectriques ou encore fluide structures.


Pour cela, ABAQUS met à disposition de l'utilisateur une importante gamme de modèles de matériaux et d'éléments pouvant être combinés de façon adéquate, ainsi que diverses méthodes pour modéliser les conditions initiales et aux limites du problème.

3.5. Les étapes de modélisation des éléments sous ABAQUS 6.14 :

➤ Géométrie :

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


➤ Définition des propriétés du modèle :

Le modèle appliqué est défini au niveau du module **Property** . Du fait qu'on a réduit une ou deux dimensions du modèle, on doit définir les caractéristiques de la structure dans les dimensions éliminées : épaisseur pour une coque, profil de la section pour une poutre.

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

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

➤ Maillage :

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

3.6. Organigramme séquentiel de la modélisation sous Abaqus :

Le matériau acier est modélisé comme thermo-élastique-plastique avec durcissement par contrainte isotrope, qui est supposée dépendre de la température, y compris le module d'Young, la limite d'élasticité, le durcissement, et coefficient de dilatation thermique. Le tableau 2 montre la dépendance des propriétés des matériaux par rapport à la température. Le module d'Young et la limite d'élasticité sont faibles et finis à des températures élevées afin d'éviter des difficultés avec la convergence numérique.

L'étape de définition de matériau contient toutes les propriétés thermiques et structurales du ou des matériaux. Un tableau des températures est d'abord initialisé. Les propriétés sont ensuite évaluées à ces températures afin de déterminer le comportement du matériau, tel que l'exemple présenté sur le graphique 8. Lors de la simulation, le logiciel effectue une interpolation linéaire entre deux points pour obtenir la valeur de la propriété à une température donnée.

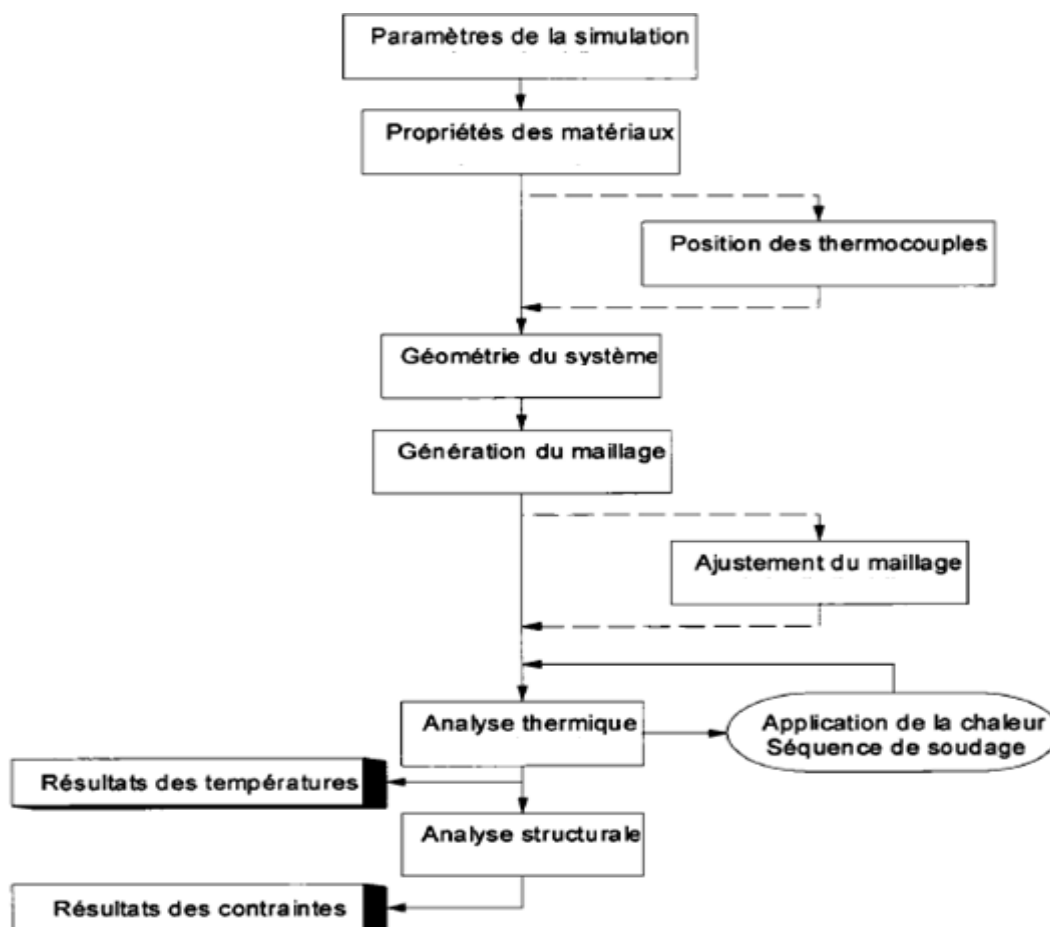


Figure III.4. Organigramme séquentiel de la modélisation thermomécanique sous ABAQUS

3.7. DEFINITION DES MODELES :

Le phénomène d'instabilité le voilement touche les plaques minces sollicitées dans leur plan. Considérons, une plaque métallique parfaitement plane de dimensions (Les cotés $a = b = 800\text{mm}$, épaisseurs $t = 5\text{mm}$), bi-articulée sur (ses deux bords), sollicité par une charge surfacique de flexion uniformément répartie $q = 0.01\text{N} \cdot \text{mm}^2$. La nuance des aciers utilisés est S235.

Afin d'éliminer ce problème, L'EUROCODE a proposé des techniques de renforcement par des raidisseurs. Pour assuré la continuité mécanique entre les parties à assembler l'assemblage par soudage à été choisi. L'assemblage est réalisé par soudure de type ordinaire mono passe. La vitesse de soudage, l'apport de chaleur de soudage et la direction de soudage sont pris en compte dans la **recherche**.

Les modèles étudiés sont comme suit :

- Plaque métallique non renforcée.
- Plaque métallique munie d'un seul raidisseur,
- Plaque métallique munies de deux raidisseurs
- Plaque métallique munies de trois raidisseurs

3.7.1. Mode d'analyse :

Un modèle thermique est construit avec le logiciel EF ABAQUS. La source de chaleur est définie soit par un sous-programme utilisateur DFLUX décrivant le passage d'une source de type cône tronqué avec distribution gaussienne de la chaleur ou par interpolation des amplitudes qui défini la source de chaleur.

- 1- Analyse thermique : l'étude de l'influence de la température de soudage sur les éléments à assemblés.
- 2- Analyse mécanique non linéaire: l'étude de l'influence de la charge uniformément répartie sur les pièces renforcées et non renforcés.
- 3- Analyse thermo- mécanique : un couplage entre les deux types d'analyses (thermique et mécanique).

3.7.2. PRESENTATION DES PLAQUES ETUDIES :

MODELE 01 : PLAQUE NON RENFORCE

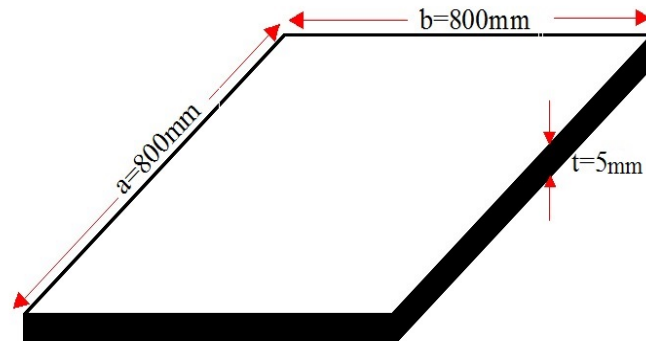


Fig.3.5. Plaque métallique sans raidisseur.

MODELE 02 : PLAQUES RAIDIES

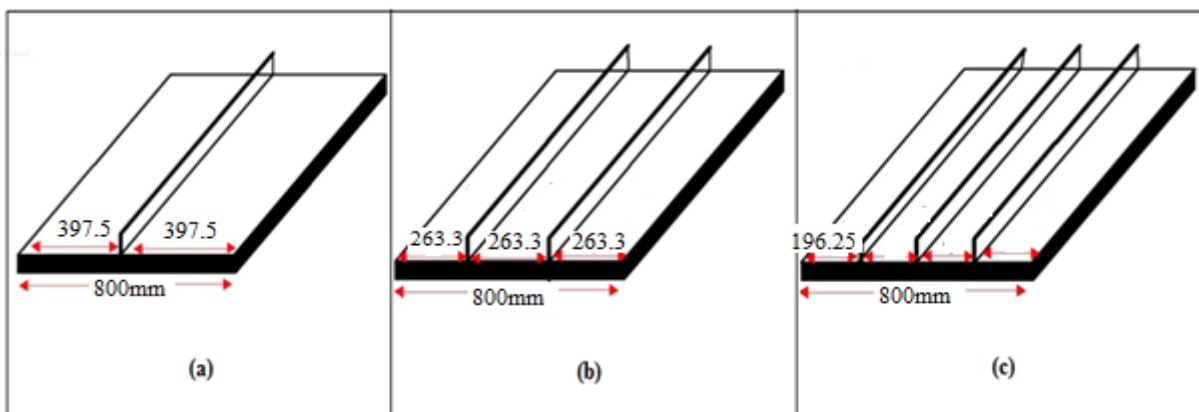


Fig.3.6. Plaques métalliques renforcées

(a) : Un seul raidisseur, (b) Deux raidisseurs, (c) : Trois raidisseurs

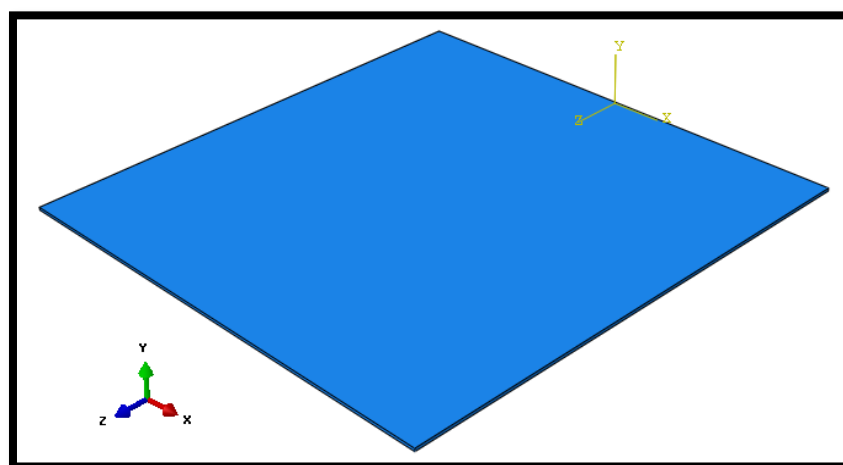


Fig.3.7. Plaque non raidie sous ABAQUS 6.14.

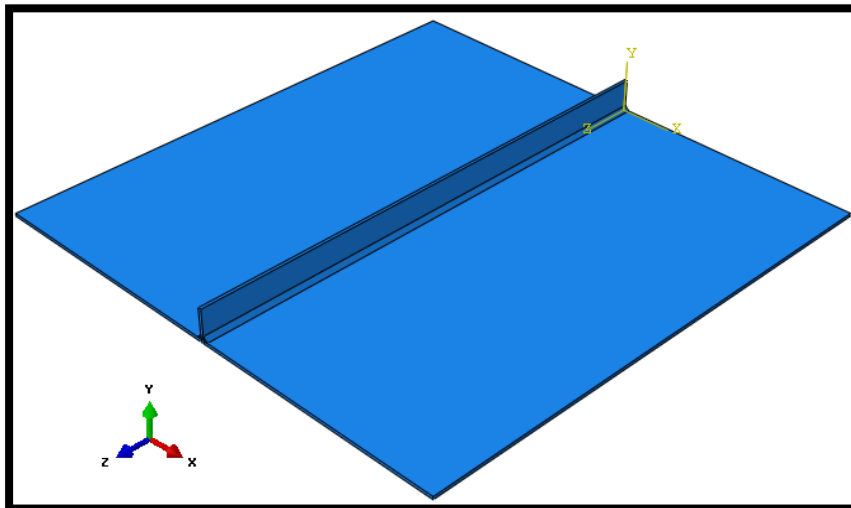


Fig.3.8. Plaque raidie avec un seul raidisseur sous ABAQUS 6.14.

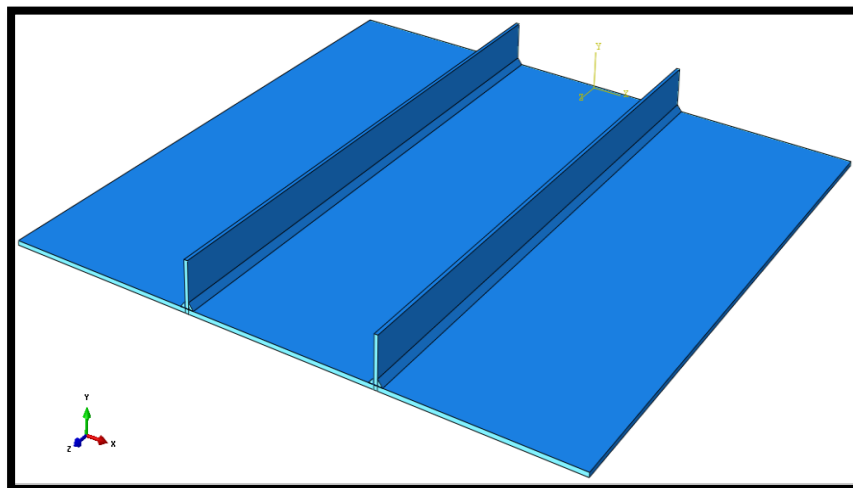


Fig.3.9. Plaque raidie avec deux raidisseurs sous ABAQUS 6.14.

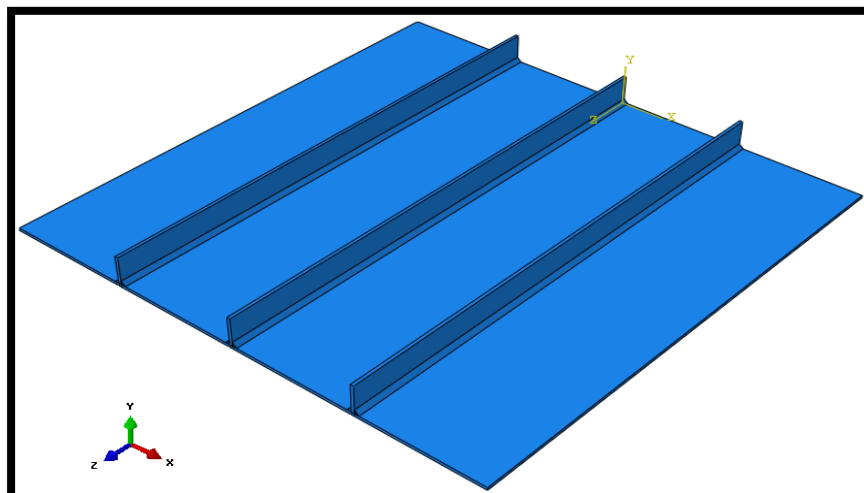


Fig.3.10. Plaque raidie avec trois raidisseurs sous ABAQUS 6.14.

3.7.3. Dimensionnements des raidisseurs :

Les raidisseurs sont de dimensions de $L : 800 \text{ mm}$, $b : 50 \text{ mm}$, $t : 5 \text{ mm}$

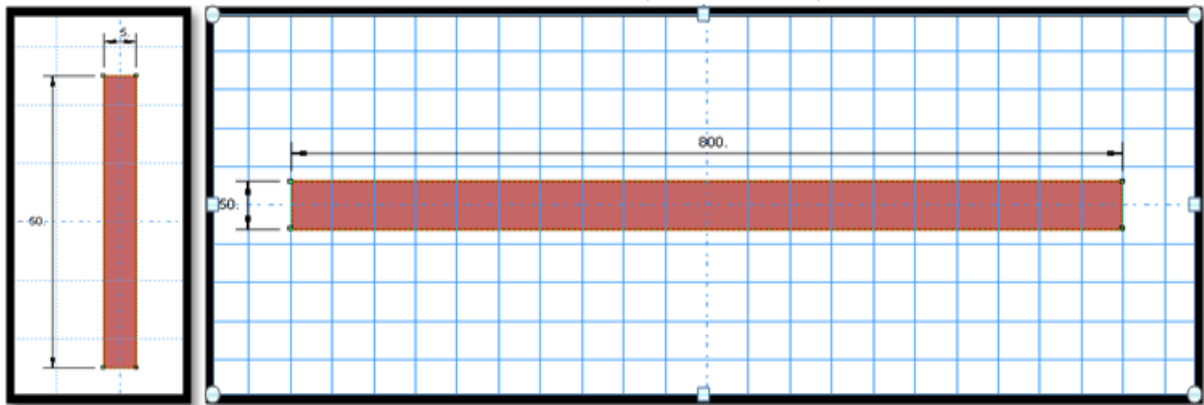


Fig.3.11. Dimensionnement du raidisseur sous ABAQUS 6.14.

3.7.4. Type de soudure :

La soudure d'angle est présentée dans la figure 3.12 avec :

a: L'épaisseur utile ou gorge "a" d'une soudure d'angle sera prise égale à la hauteur du plus grand triangle pouvant être inscrit entre les faces de fusion et la surface du cordon mesurée perpendiculairement à son côté extérieur.

l: longueur utile d'un cordon de soudure et égale à sa longueur réelle diminuée de la longueur des cratères d'extrémité lorsque aucune disposition n'est prise pour les éliminer.

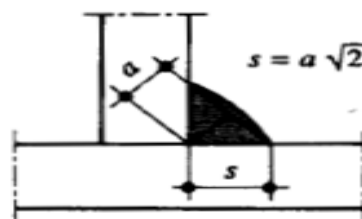


Fig.3.12 L'épaisseur utile ou gorge "a".

$t = 5 \text{ mm}$ se qui inclut : **$a = 4 \text{ mm}$**

Le présent travail vise à développer la simulation par les éléments finis (**élastique-plastique thermique**) et à étudier l'influence de soudage sur l'état des contraintes résiduelles et la déformation des panneaux raidis. L'élément solide tridimensionnel est utilisé pour améliorer la précision de la modélisation et du calcul. Paramètres importants de conception et de fabrication.

Les paramètres de soudage sont indiqués dans le tableau 3.1.

Chaque raidisseur et la plaque inférieure de la structure contiennent deux filets de soudure longitudinaux. Les filets de soudure sont présentés dans la figure 3.13 de gauche à droite. Les cordons de soudure de chaque raidisseur sont soudés simultanément dans la même direction pendant le soudage.

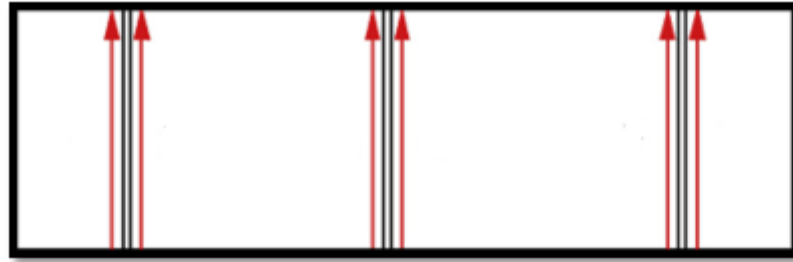


Fig.3.13. Sens de cordon de soudure

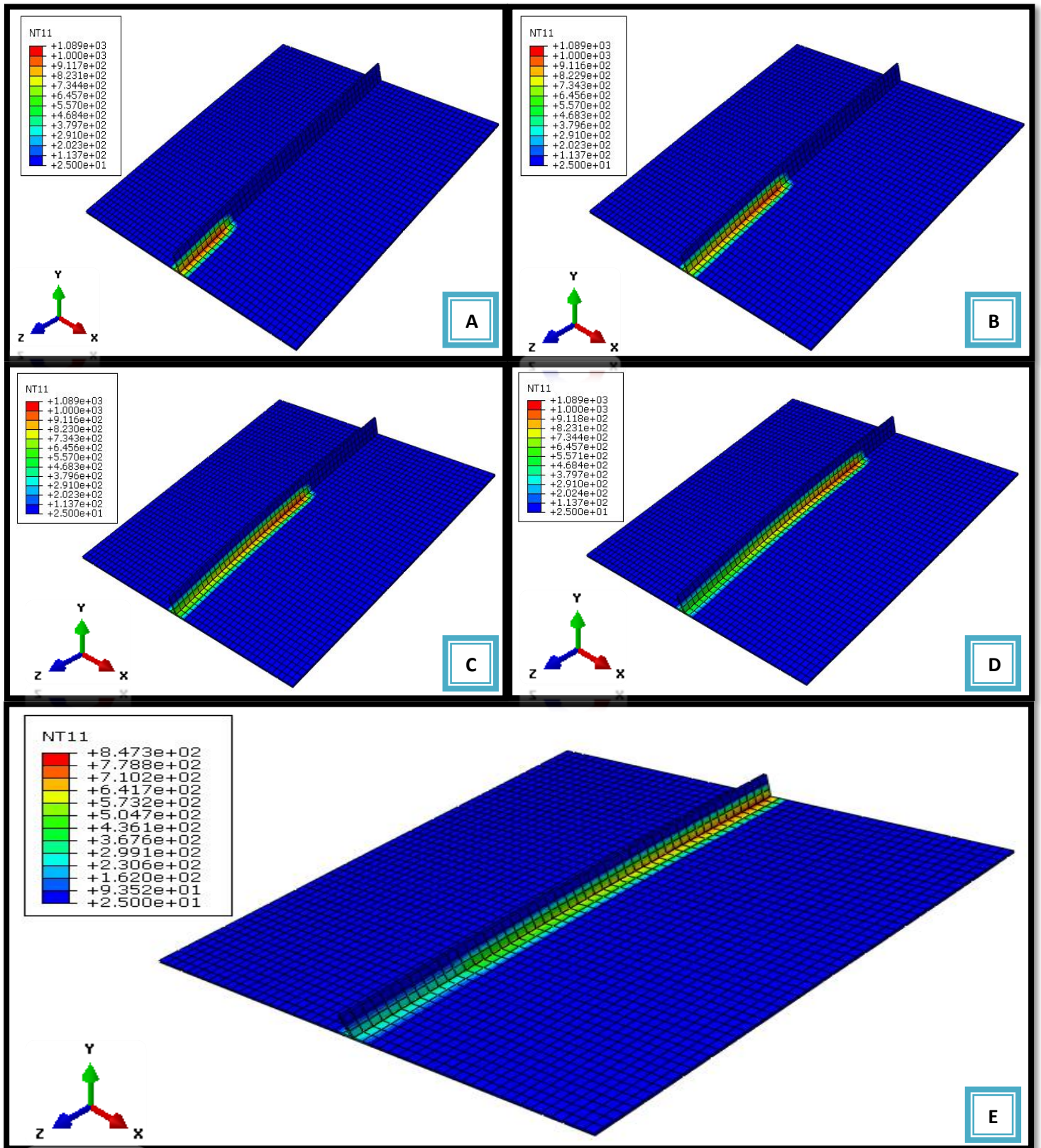


Fig.3.14. Transfert de la source de chaleur lors de l'opération de soudure sous ABAQUS 6.14.

Les gradients thermiques localisés qui sont mis en jeu lors du soudage engendrent inévitablement des dilatations locales qui ont pour conséquence l'apparition de champs de déformations et de contraintes non uniformes dans le matériau, qui subsistent après retour à température ambiante.

3.7.5. Type de chargement et conditions aux limites :

Les conditions aux limites appliquées se traduisent par une articulation sur ses deux bords de tous les nœuds appartenant aux plaques d'extrémité donc $U_X = U_Y = U_Z = 0$, $\theta_X = \theta_Y = \theta_Z \neq 0$ le chargement est uniformément répartie de flexion d'intensité $q = 0.01 \text{ N/mm}^2$ comme présenté dans la figure 3.15.

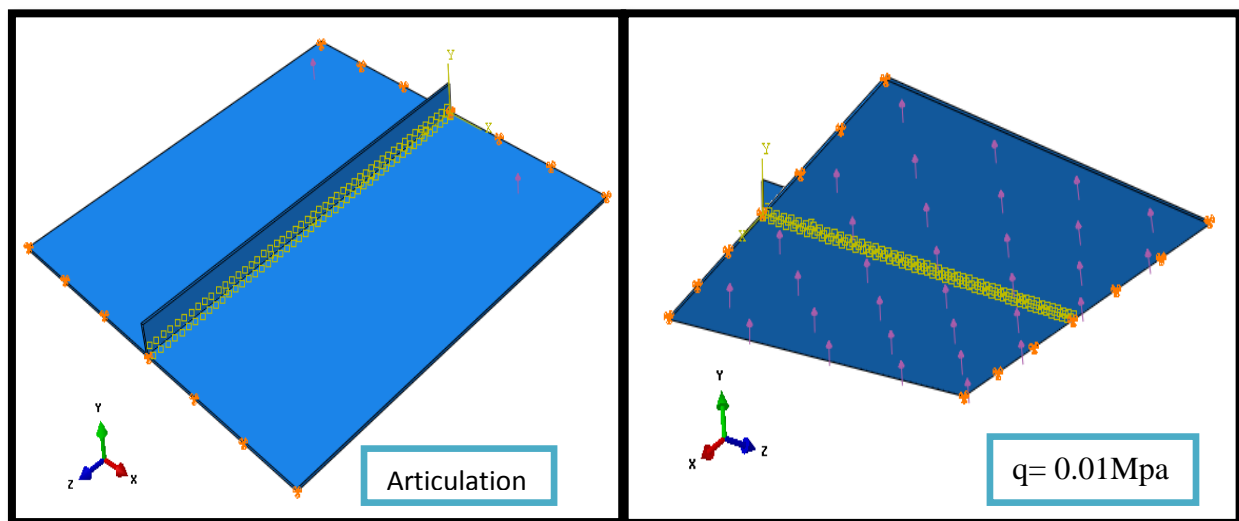


Fig.3.15. Mode de chargement et conditions d'appuis sous ABAQUS 6.14.

3.7.6. Analyse de la convergence des incréments de temps (STEP) :

Deux incréments de temps différents sont utilisés pour les simulations thermique et structurale de l'opération de soudage (soudage et refroidissement). la procédure de soudage implique des gradients thermiques très élevés, un incrément de temps constant et très court est utilisé. Pendant le refroidissement, plus la température diminue. L'incrément de temps utilisé augmente graduellement afin de réduire le temps requis pour la simulation tout en conservant un incrément de temps assez court au début du refroidissement (Figure 3.16).

L'analyse de transfert de chaleur pour obtenir l'historique des températures. La formulation considère les contributions du champ des températures transitoires comme ainsi que des propriétés thermo-physiques dépendantes de la température. [Attarha et al, 2011]

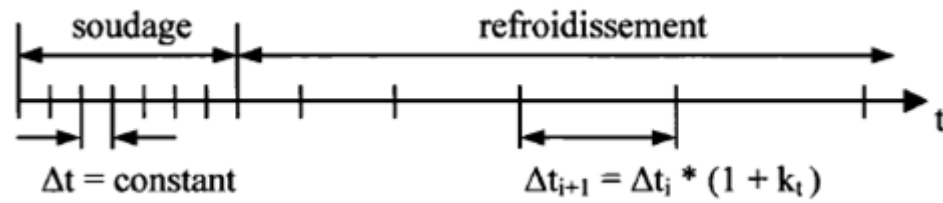


Figure3.16. Les incréments de temps lors de l'opération de soudage.

3.7.7. Maillage (Mesh) :

On a adopté un maillage triangulaire pour tous les modèles traités C3D8T: Une brique à 8 nœuds. Thermiquement couplée, déplacement et température.

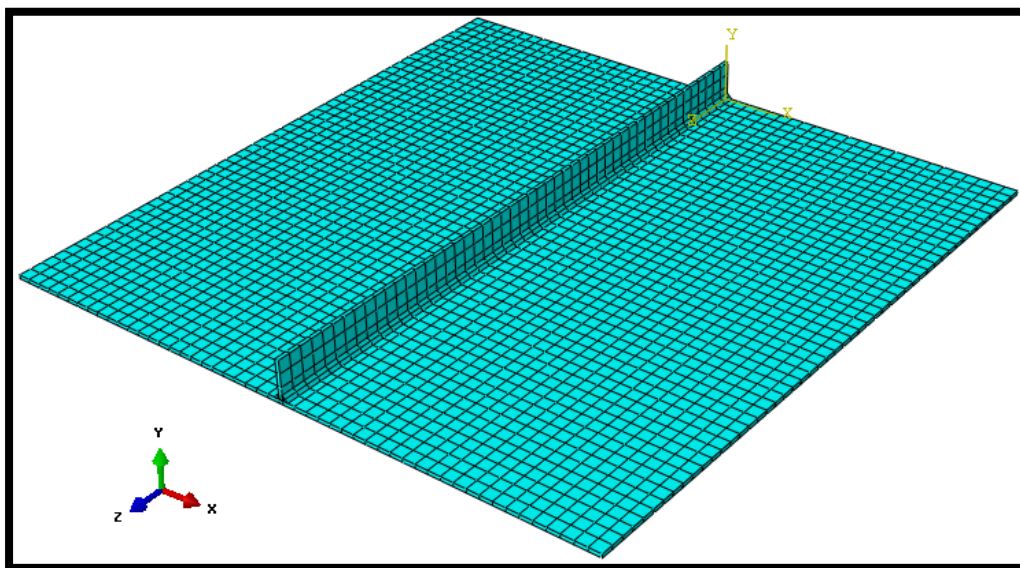


Fig.3.17. Maillage de la plaque munie d'un raidisseur sous ABAQUS 6.14.

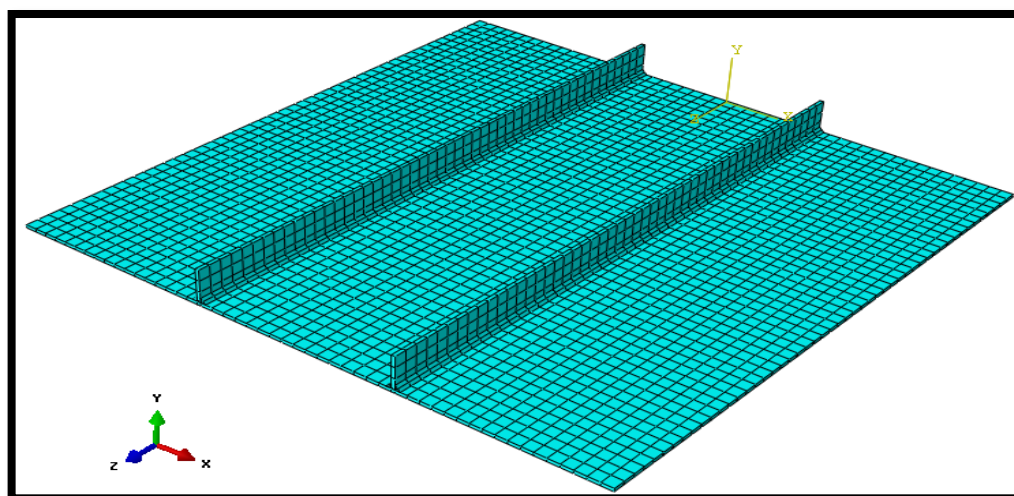


Fig.3.18. Maillage de la plaque munie de deux raidisseurs sous ABAQUS 6.14.

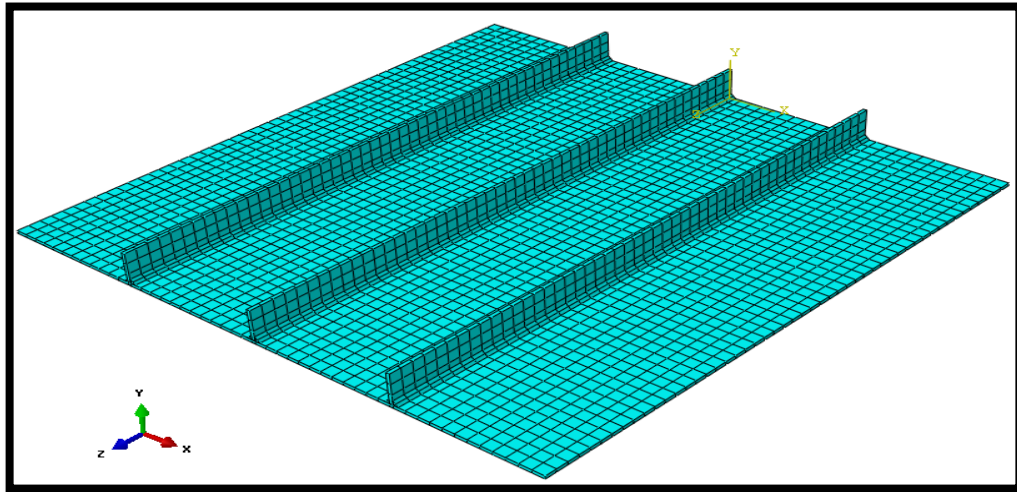


Fig.3.19. Maillage de la plaque munie de trois raidisseurs sous ABAQUS 6.14.

3.8. ANALYSE MECANIQUE DES PLAQUES RAIDIES :

La modélisation numérique des plaques assemblées avec des raidisseurs sous ABAQUS 6.14, on va traiter mécaniquement :

- La modélisation numérique non linéaire des plaques munies de raidisseurs assemblées avec deux cordons de soudure continue sous ABAQUS 6.14.

3.9. DEFINITION DE COMPORTEMENT NON LINEAIRE :

L'analyse de contrainte non linéaire permet de calculer les contraintes et les déformations des produits dans des conditions matérielles et de chargement normales.

L'analyse non linéaire constitue une approche plus complexe, mais elle aboutit à une solution plus précise que l'analyse linéaire, au cas où les hypothèses de base d'une analyse linéaire ne sont pas respectées. Si les hypothèses d'analyse linéaire sont respectées, les résultats d'une analyse linéaire et d'une analyse non linéaire seront les mêmes.

D'une manière générale les trois causes essentielles du comportement non linéaire sont :

La non linéarité matérielles : les lois de comportement des matériaux sont non linéaires ; par exemple, la plasticité de l'acier introduit une non linéarité matérielle

La non linéarité géométrique : les déplacements et /ou déformations sont suffisamment importants pour que la configuration initiale ne puisse plus être utilisée valablement pour exprimer l'équilibre et compatibilité ; par exemple, l'instabilité ne peut être exprimée sans tenir compte de la configuration déformé.

La non linéarité des conditions aux limites (de contact) : qui se manifeste lorsque les conditions aux limites changent au cours du mouvement (processus de formage à froid, assemblage boulonnés, etc.)

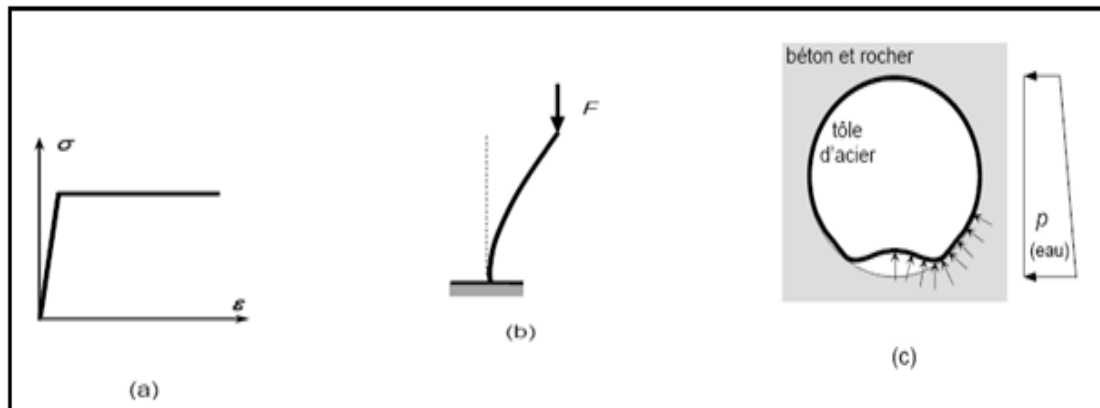


Fig.3.20.: La non linéarité

a- matériel (acier), b- géométrique (flambement), c- des conditions aux limites (anneau confiné : pression suiveuse, contact / décollement).

3.9.1. COMPORTEMENT NON LINEAIRE DES PLAQUE ASSEMBLEES :

Tableau.3.1. : Présentation des propriétés géométriques et physiques des plaques à assembler pour l'analyse mécanique.

Eléments	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Densité (kg/m ³)	Module de Young E(MPA)	Coef de poisson	Limite d'élasticités (Mpa)
Plaques	800	800	5	7850	210000	0.3	235
Raidisseurs	800	50	5	7850	210000	0.3	235

Tableau.3.2. : Présentation des propriétés géométriques et physiques des modèles pour l'analyse thermique et thermo- mécanique.

Température	Module de Young	Contraintes	Coefficient d'expansion thermique	Conductivité	Chaleur spécifique
°C	$\times 2.1^{e}11\text{Pa}$	$\times 2.5^{e}-8\text{m}/^{\circ}\text{C}$	$\times 1.2^{e}-5\text{m}/^{\circ}\text{C}$	$\times 40\text{W}/\text{m}^2\text{C}$	$\times 500\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$
0	1	1	1	1	1
300	0.8	0.85	0.9	0.9	0.85
500	0.5	0.7	0.8	0.8	0.75
800	0.1	0.1	0.9	0.7	0.6
1000	0.001	0.001	1.3	2	3
3000	0.001	0.001	1.3	2	3

3.10. ETUDE MECANIQUE DE LA PLAQUE NON RAIDIE :

Le comportement de la plaque non renforcée a été étudié pour la représentation du déplacement sous l'influence de la variation de la charge répartie qui est appliquée dans la direction(y), cette augmentation de la charge a engendrer des déplacements importants surtout dans le plan d'application de la charge (le déplacement de 450 mm pour une charge de $0.01 \text{ N}/\text{mm}^2$) et le déplacement évolue encore par l'augmentation de la charge concentrée (358.02 mm pour une charge de $0.001 \text{ N}/\text{mm}^2$). En effet, la figure 3.21 montre les quartes courbes qui présentent la variation de la courbure pour chaque étape de chargement. Un voilement très remarquable de la plaque. La version ENV des Eurocodes, fournit une annexe qui donne quelques orientations relatives aux raidisseurs ainsi que des règles de dimensionnement.

Pour éviter ces grands déplacements le renforcement de la plaque est nécessaire.

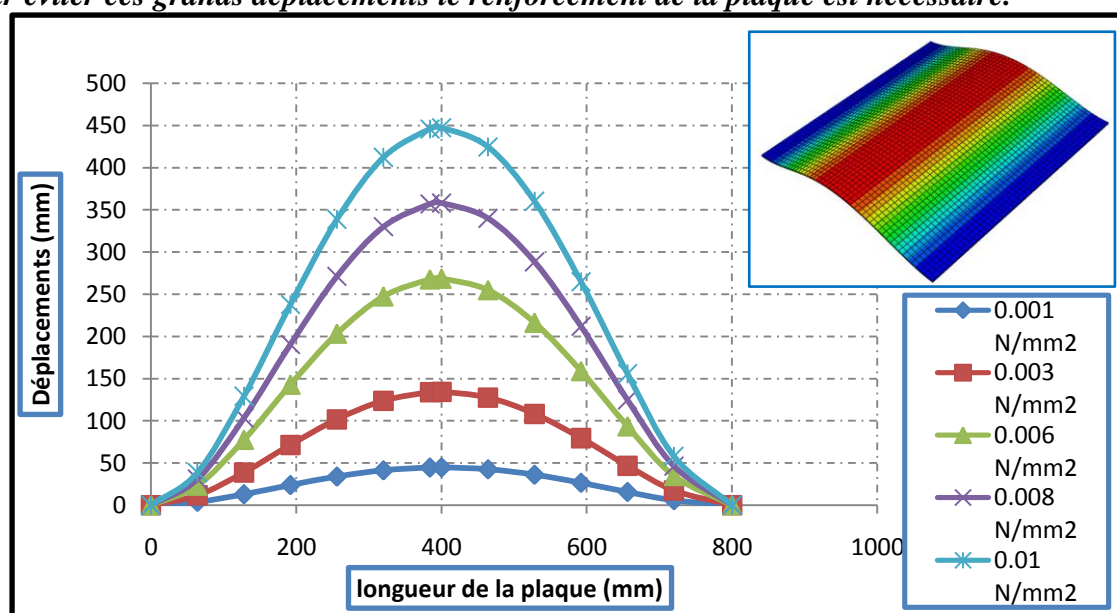


Fig.3.21. Etat de déplacements U2 le long de la plaque non renforcée.

La figure 3.22 représente l'état de déplacement sous l'effet de l'augmentation de la charge dans la direction parallèle aux extrémités de la plaque, on a remarqué un déplacement constant le long de la plaque qui évolue par l'augmentation de la charge (le déplacement de 450 mm pour une charge de 0.01 N/mm^2).

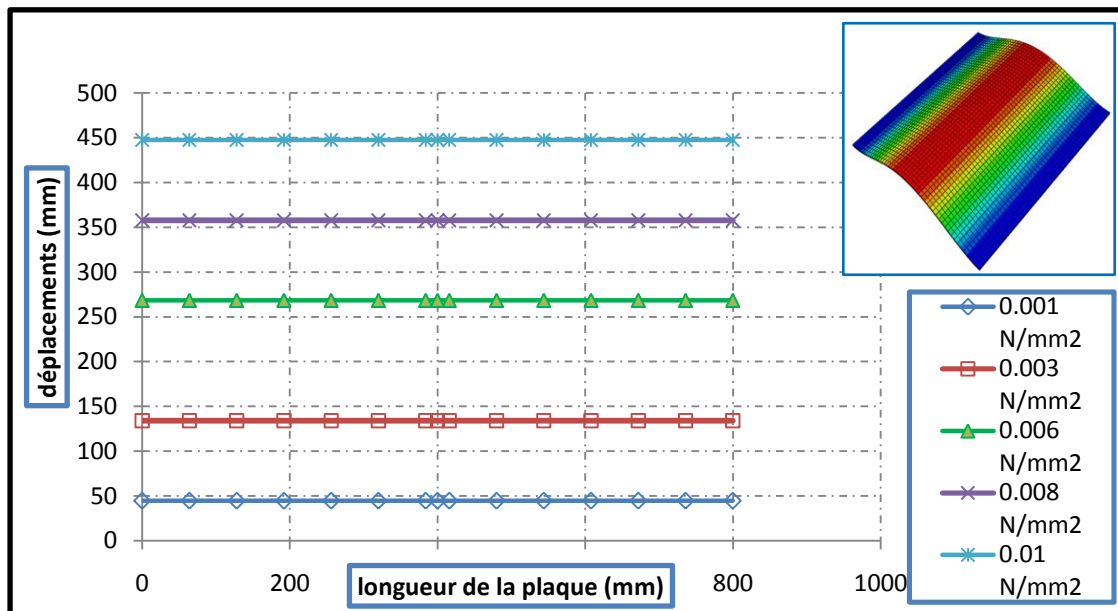


Fig.3.22.Etat de déplacements U2 le long de la plaque non renforcée.

3.11. ETUDE THERMIQUE DES PLAQUE RAIDIES :

3.11.a. Contraintes résiduelles transversales :

Lors d'une opération de soudage d'une structure métallique, les incompatibilités de déformations engendrées par la dilatation thermique localisée, et les modifications de microstructure du matériau, engendrent des pressions dans le matériau, qui subsistent à température ambiante. Ces champs de pressions internes auto-équilibrés sont appelés champs de contraintes résiduelles.

Les contraintes résiduelles transversales les plus défavorables sont symétriques par rapport au cordon de soudure. En effet la contrainte maximale transversale se trouve dans la zone du cordon de soudure pour les trois modèles raidis (un seule raidisseur, deux raidisseurs et trois raidisseurs), et qui atteint la valeur de 180 Mpa (77% de la contrainte $f_y = 235 \text{ Mpa}$). D'autre part, les champs de contraintes résiduelles auto-équilibrés qui subsistent après soudage dans le composant peuvent contribuer à diminuer la durée de vie de la pièce renforcée. (fig.3.23)

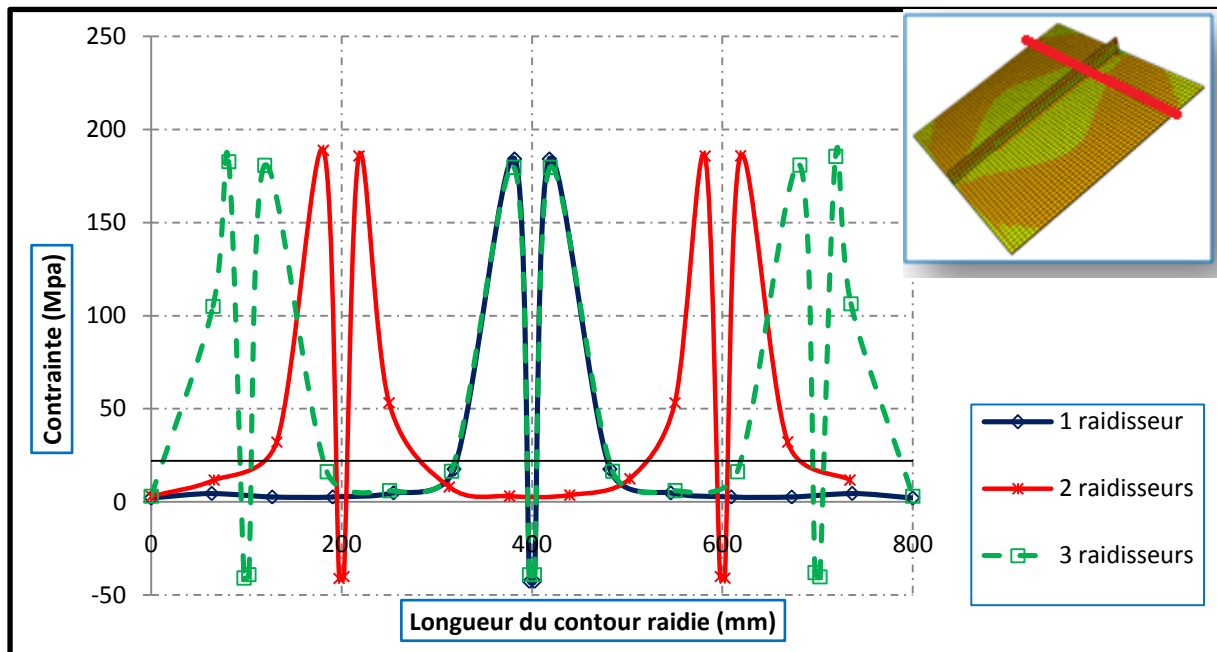


Fig.3.23. Etat de contraintes résiduelles transversales dans la plaque raidie.

3.11.b. Contraintes résiduelles longitudinales :

Les contraintes résiduelles longitudinales les plus défavorables sont moins importantes que celles transversales, les contraintes maximales se trouvent dans la zone du cordon de soudure pour les 3 trois modèles et qui atteint une valeur de 61 Mpa (26 % de la contrainte $f_y = 235$ Mpa)

On a remarqué aussi des un état de contrainte dans les extrémités des plaques raidie et qui se traduit par des distorsions. Le modèle renforcée avec trois raidisseurs à présenté des distorsions plus importante par rapport aux autres modèles. Ces distorsions ainsi induites par le procédé peuvent poser des problèmes de tolérances dimensionnelles. (fig.3.24)

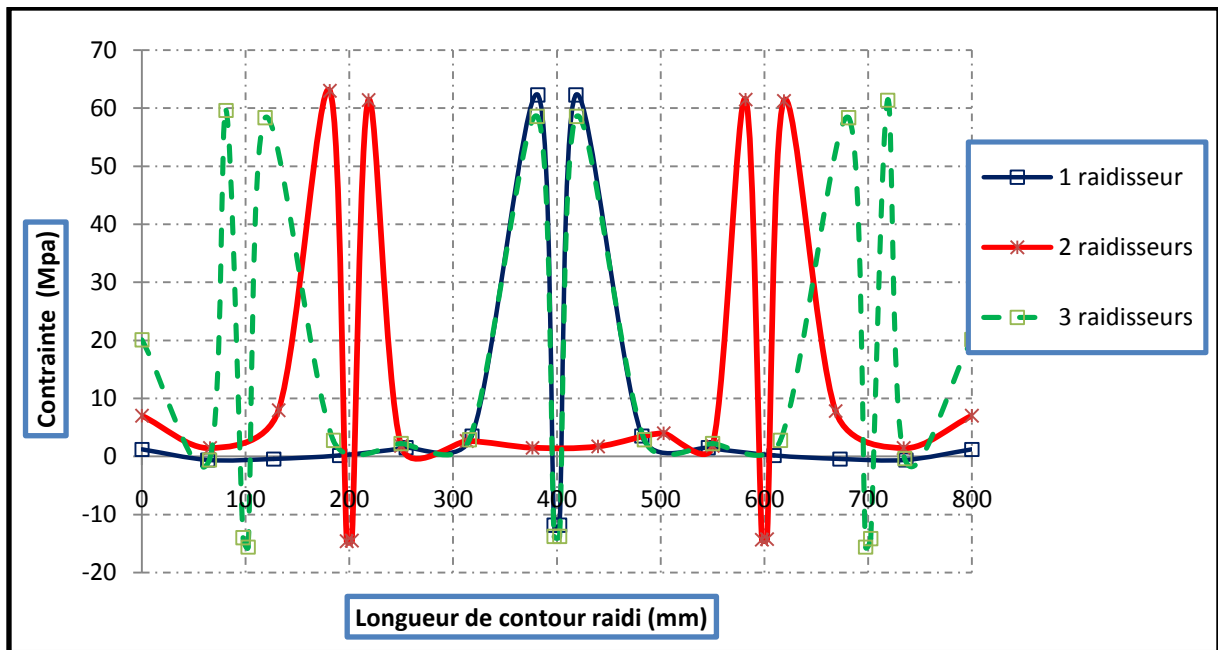


Fig.3.24. Etat de contrainte résiduelle longitudinale de la plaque raidie

3.11.c. Déplacements transversaux :

Pour l'analyse thermique, les modèles ont présenté un état de déplacement maximal au niveau des extrémités, dues à la concertation de la source de chaleur. Le modèle renforcée avec trois raidisseurs à présenté l'état de déplacement le plus grand. (fig.3.25)

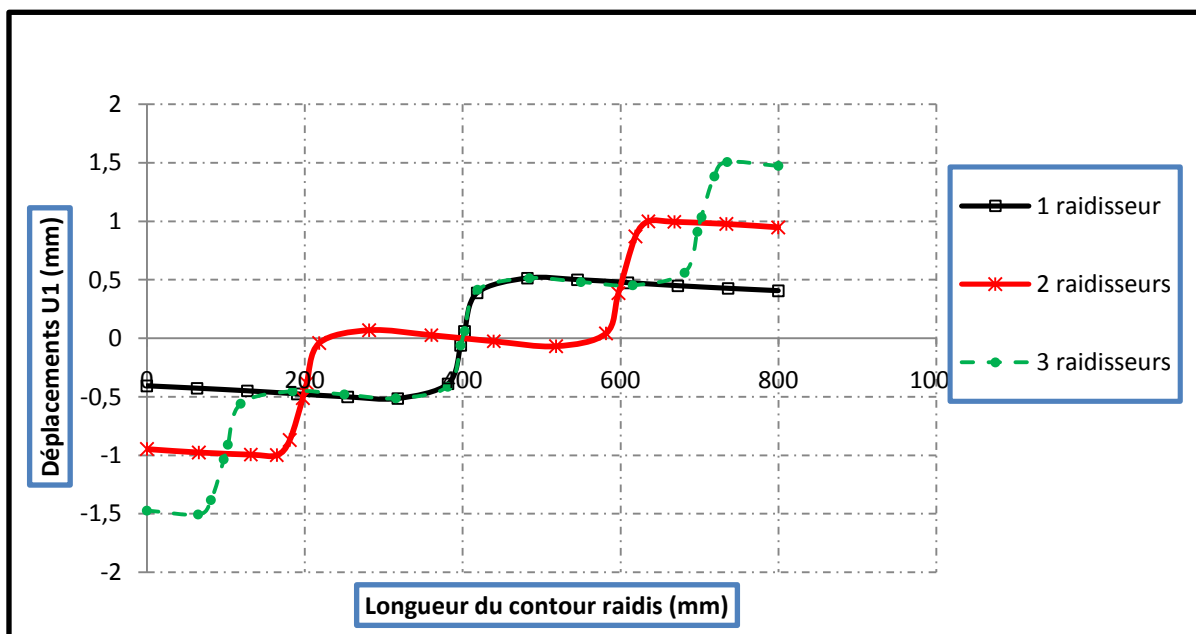


Fig.3.25. Etat de déplacements résiduels transversaux dans la plaque raidie

3.11.d. Déplacements longitudinaux :

Le modèle des plaques renforcée par un raidisseur a présenté de grande déplacement dans le milieu de la plaque (au niveau de cordon de soudure) $U_{max} = 5.65$ mm et qui se diminue on s'éloignant du cordon.

Le modèle de plaque renforcée par deux raidisseurs a présenté dans la zone de deux cordons de soudure $U_{max} = 4.90$ mm qui se diminue de 31% dans les extrémités de la plaque.

Le modèle de plaque renforcée par trois raidisseurs a montré un déplacement presque constant sur toute la longueur de la plaque $U_{max} = 5.51$ mm. (Fig.3.26)

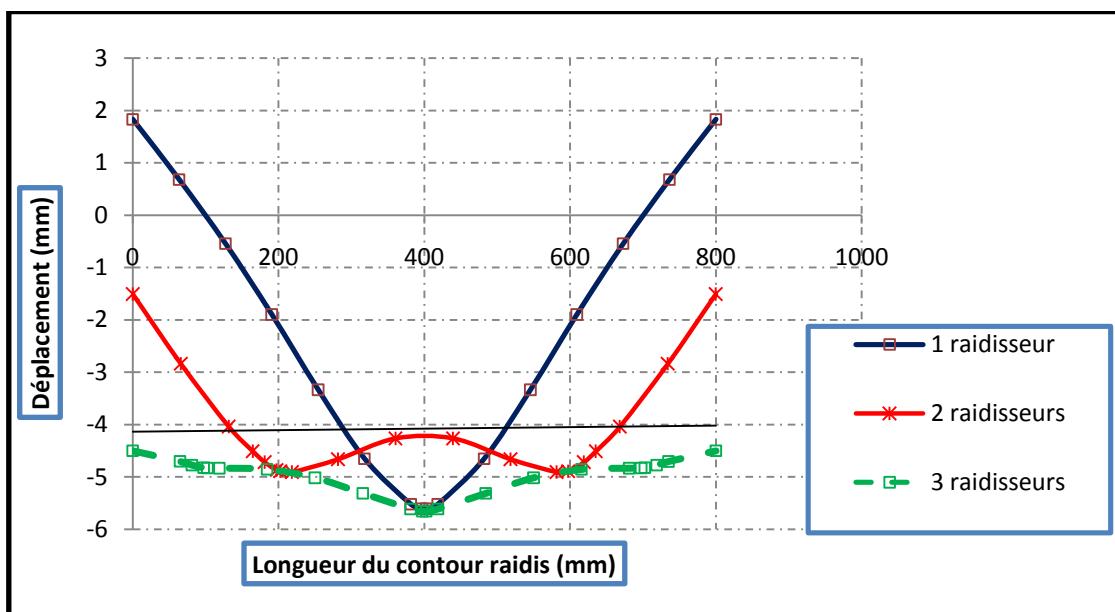


Fig.3.26. Etat de déplacements résiduels longitudinaux dans la plaque raidie

3.11.e. Déformations transversales et longitudinales:

On à observé un état de déformation transversale et longitudinale presque similaire, les grandes déformations se localise dans la zone de soudage et qui atteint une valeur presque 0.025.

Les déformations longitudinales jouet un rôle très important pour la création des distorsions car les incohérences de déformations causées par des dilatations thermiques localisées lors de soudage et les changements dans les propriétés du matériau génèrent des pressions dans le matériau.

Les déformations transversales sont presque nulles au niveau des extrémités des plaques raidies (un raidisseur, deux raidisseurs et trois raidisseurs).

En effet, soumis à une forte élévation de la température, le matériau subit des transformations de phases à l'état solide, ce qui occasionne une incompatibilité des déformations à une échelle localisée ainsi que de forts gradients de contraintes. (fig.3.27)

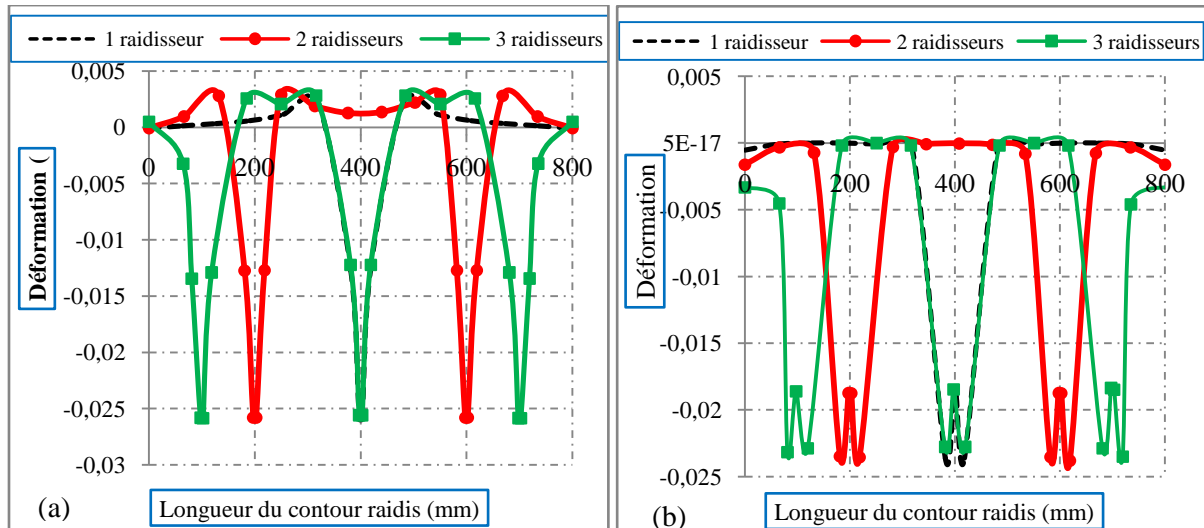


Fig.3.27.Etat de déformations résiduelles de la plaque raidie

(a) Déformations transversales ; (b) Déformations longitudinales

3.12. Température :

3.12.a. Evaluation de la température dans le nœud 36 :

L'analyse de transfert de chaleur pour obtenir l'historique des températures. La formulation considère les contributions du champ des températures transitoires comme ainsi que des propriétés thermo-physiques dépendantes de la température.

Pour les simulations thermique et structurale de l'opération de soudage, deux incréments de temps différents sont utilisés (Soudage $t=25s$ et $t=60s$ refroidissement).la procédure de soudage implique des gradients thermiques très élevés atteint presque $1100^{\circ}C$. Pendant le refroidissement, plus la température diminue (inférieure à $1100^{\circ}C$), (fig.3.28).

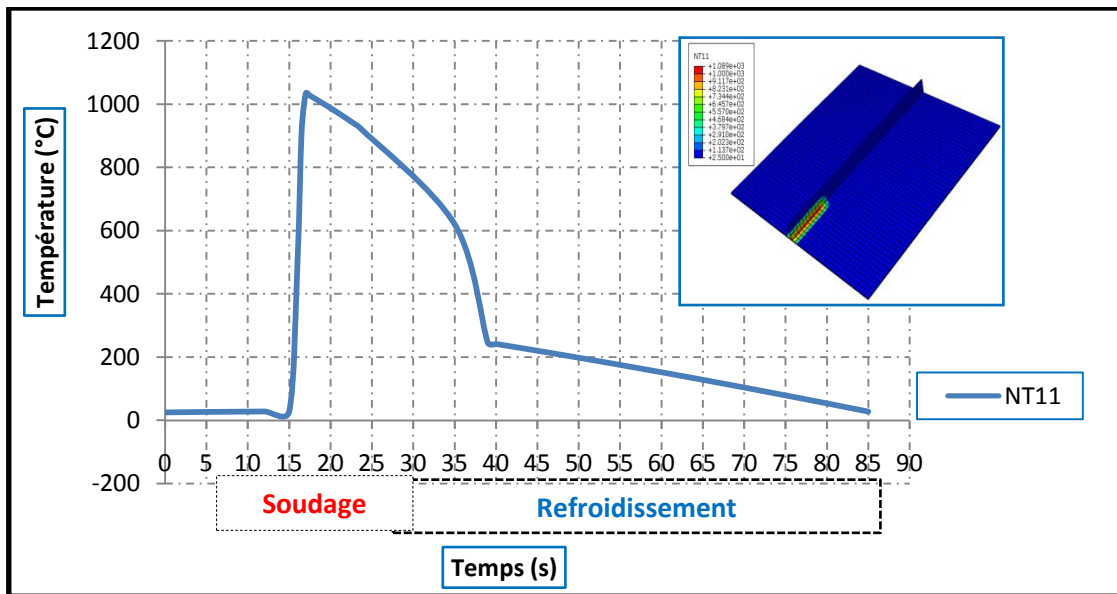


Fig.3.28.Les résultats de la simulation du point situés dans la ligne de fusion.

La répartition de la température dans l'ensemble des pièces soudées à différentes distances de la ligne de fusion de la soudure sont illustrés. La température maximale au point avec une distance de 3mm de la ligne de fusion est d'environ 1100°C. Il est important de noter que la diminution de la température en fonction de la distance a une tendance non linéaire. La raison est associée au chauffage local de la torche de soudage et la variation non linéaire des propriétés thermiques du matériau avec la température. (fig.3.29).

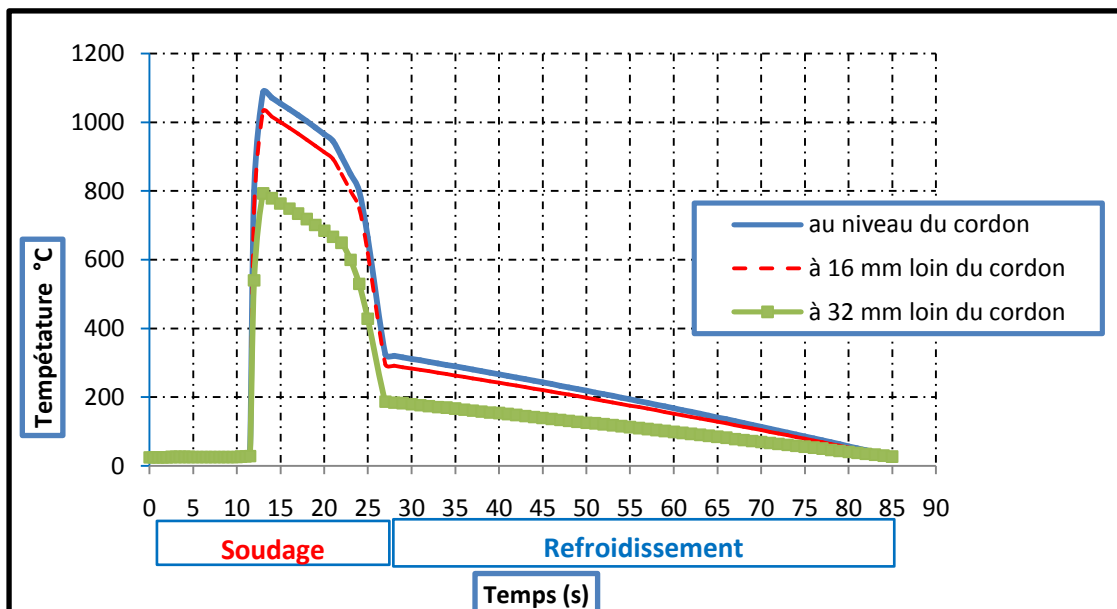


Fig.3.29.Les résultats de simulation par éléments finis en des points situés à des distances différentes de la ligne de fusion de la soudure,3 mm,16mm,32mm respectivement.

3.13. La simulation numérique de l'assemblage soudée sous ABAQUS :

Il est donc très difficile d'identifier le modèle numérique nécessaire à la mise en données d'une simulation numérique d'assemblage.

Or Il existe de nombreux procédés d'assemblage et parmi ces derniers, on a le soudage qui est le moyen le simple et le plus utilisé. L'intégration du collage en simulation numérique est encore assez rare. Elle nécessite la un maillage très fin (surconsommation d'éléments finis en plus la caractérisation de la loi de comportement du matériau utilisé (isotrope ou anisotrope)). La simulation en thermo-mécanique est très compliquée. Nous présentons ci-dessous la simulation numérique d'assemblages soudés et sertis avant de faire un point sur les techniques de simplification d'assemblage.

La fiabilité du modèle thermomécanique dépend très fortement des champs de température introduits dans le calcul mécanique. Nous avons vu précédemment que dans le cadre de cette mémoire, nous n'intégrons pas directement les phénomènes physiques impliqués dans le procédé de soudage à l'arc mais nous considérons une source thermique équivalente.

3.14. Hypothèses d'interaction thermo- mécanique de soudage :

Nous présentons un modèle de comportement pour lequel, le comportement mécanique de chaque phase dans le mélange est élastoplastique avec écrouissage cinématique linéaire. Nous supposons que l'état du matériau peut être décrit à l'aide des variables suivantes : la déformation totale (ϵ), la température (T), la déformation plastique locale de la phase i ($\epsilon_{p i}$), la variable d'écrouissage cinématique de la phase i (α_i) et la variable métallurgique (z_i : proportion volumique de la phase i). En supposant un découplage entre la déformation élastique et la déformation plastique,

$$d\epsilon^{th-m} = d\epsilon^{el} + d\epsilon^p + d\epsilon^{th} + d\epsilon^{vp} + d\epsilon^{pt} \quad (3.1)$$

Avec :

$d\epsilon^{el}$: Les déformations élastiques

$d\epsilon$: Les déformations thermiques résiduelles dues à la soudure

$d\epsilon$: Les déformations plastiques de transformations

$d\epsilon^{vp}$: Les déformations viscoplastiques

- Pour notre étude les transformations métallurgiques ne seront pas prises considération donc la déformation totale de chaque phase peut s'écrire :

$$d\epsilon^{tl} = d\epsilon^{el} + d\epsilon^p + d\epsilon^{th} \quad (3.2)$$

3.15. ETUDE COMPARATIVE

➤ Plaque munie d'un seul raidisseur :

La figure 3.30 représente l'état de déformation de la plaque munis d'un raidisseur ,la déformation maximale est au milieu de plaque c.à.d dans la zone de cordon de soudure.Les trois modes d'analyse suivent la même allure, mais on a remarqué une concordance très rapproché entre les résultats thermo-mécanique et le calcul analytique avec une différence minimale de 13%. Donc le calcul mécanique ne représente pas l'état de déformation réel lors d'un assemblage soudé.

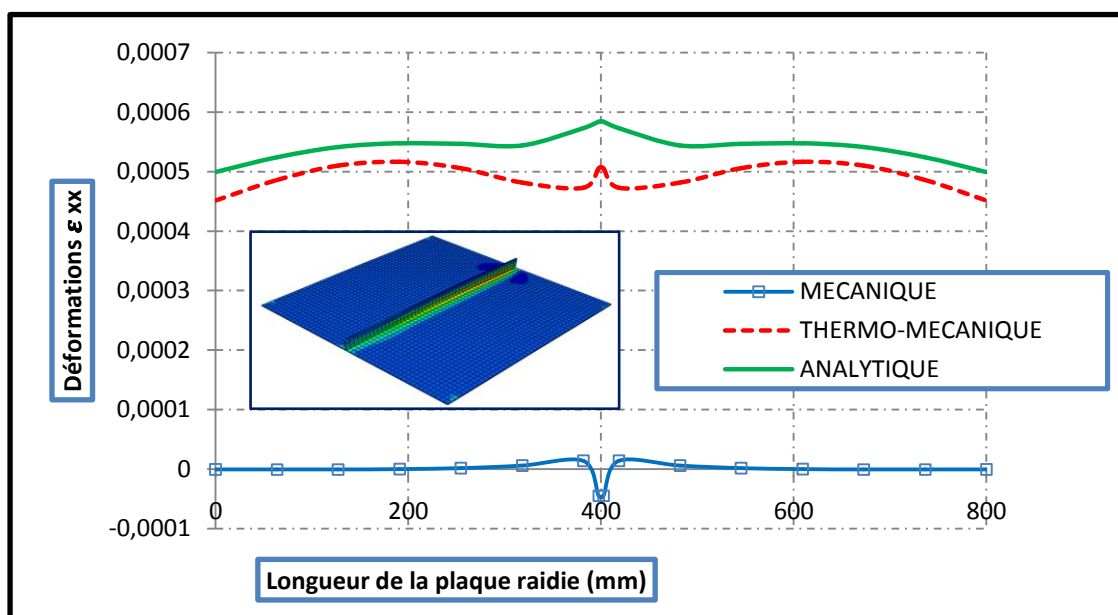


Fig.3.30.Etat de déformation de la plaque renforcée par un seul raidisseur

➤ Plaque munie de deux raidisseurs :

Pour le cas de renforcement de la plaque avec deux raidisseurs, l'état de déformation pour les trois modes d'analyses suivent la même allure avec une différence qui ne dépasse pas les 31%, on constate que la déformation maximale est dans la zone des cordons de soudure.

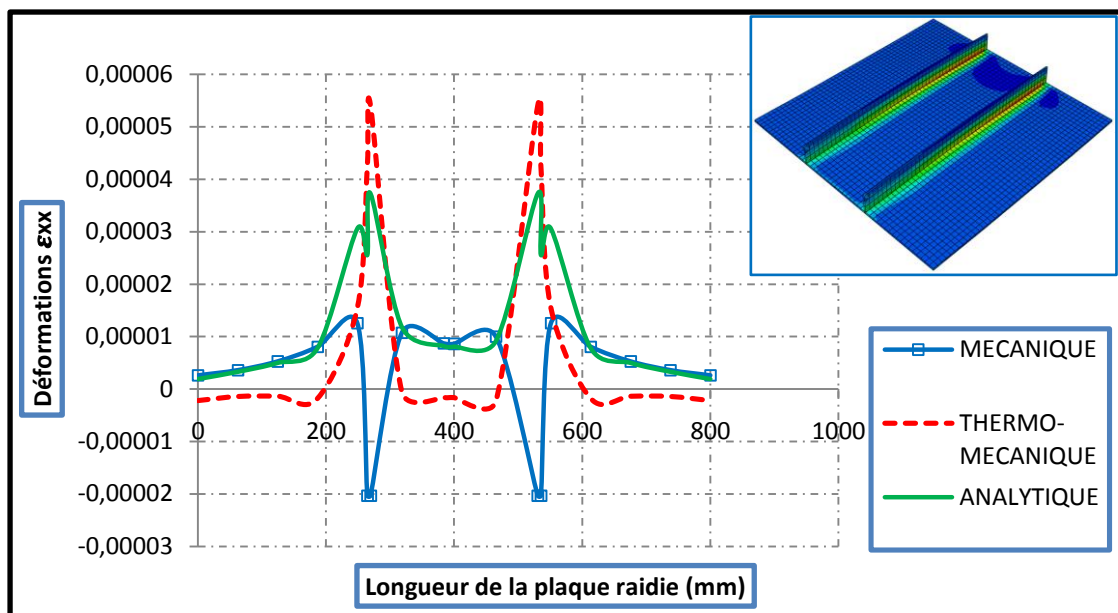


Fig.3.31. Etat de déformation de la plaque renforcée par deux raidisseurs.

➤ **Plaque munie de trois raidisseurs :**

La figure 3.32 représente l'état de déformation de la plaque munis de trois raidisseurs, la déformation maximale est dans la zone d'assemblage des cordons de soudure.

Les trois modes d'analyse suivent la même allure, mais on a remarqué une concordance très rapproché entre les résultats thermo-mécanique et le calcul analytique avec une différence entre (5-36)%. Donc le calcul mécanique ne représente pas l'état de déformation réel lors d'un assemblage soudé.

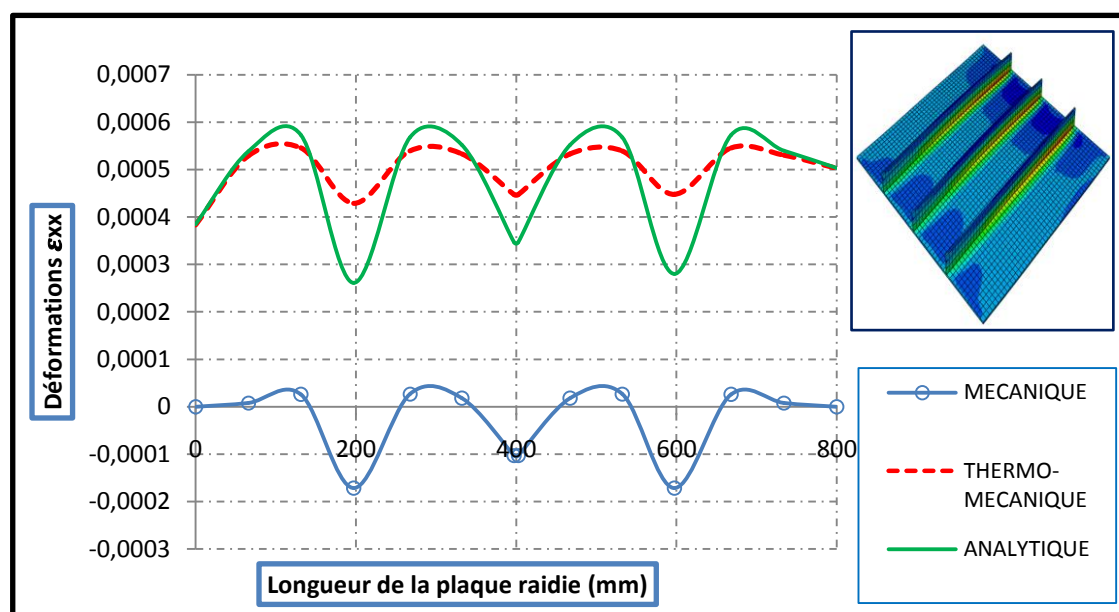


Fig.3.32. Etat de déformation de la plaque renforcée par trois raidisseurs.

➤ **Plaque munie d'un raidisseur :**

De point de vue contraint, L'état mécanique est déterminé à partir de la loi de comportement et des chargements appliqués à la structure (chargement mécanique). Les deux courbes mécanique et thermo-mécanique suivent la même allure avec une concentration des contraintes au milieu de la plaque (zone de raidissage et des cordons de soudage). La différence et de 68% entre les deux modes (σ mécanique = 3.58Mpa et σ thermo- mécanique = 11.35 Mpa) est dues probablement à la concentration du champ de température lors de soudage. (fig.3.33).

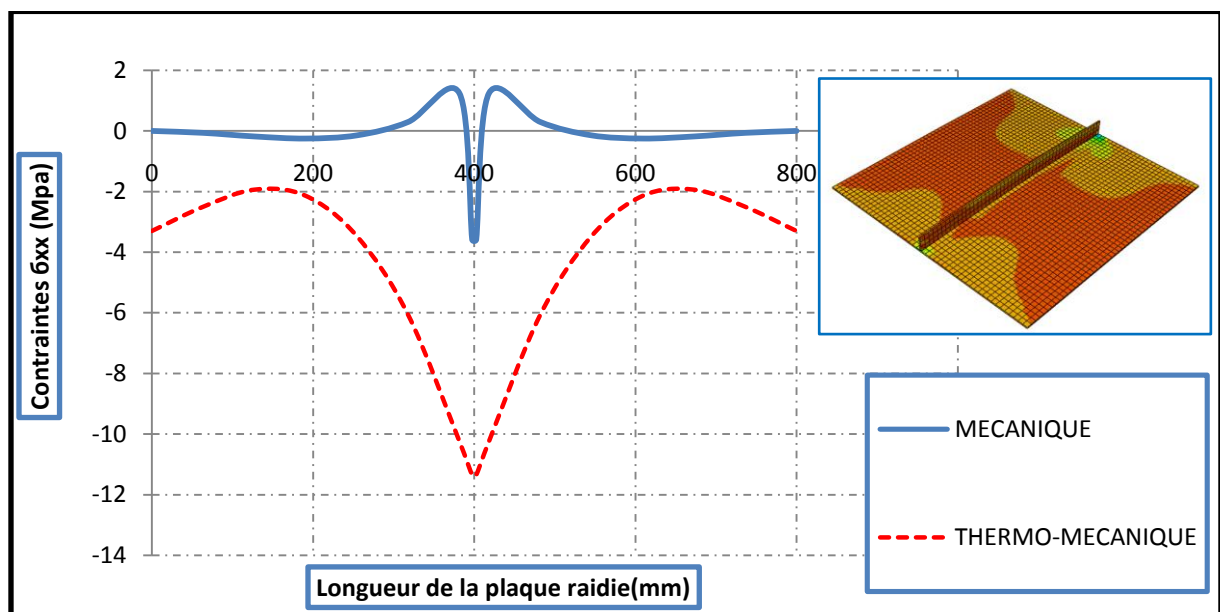


Fig.3.33. Etat de contrainte de la plaque renforcée d'un raidisseur.

➤ **Plaque munie de deux raidisseurs :**

Les deux courbes mécanique et thermo- mécanique ont une bonne concordance avec une concentration des contraintes dans la zone de raidissage et des cordons de soudage. La différence entre les deux modes est de 21% au niveau de raidissage.

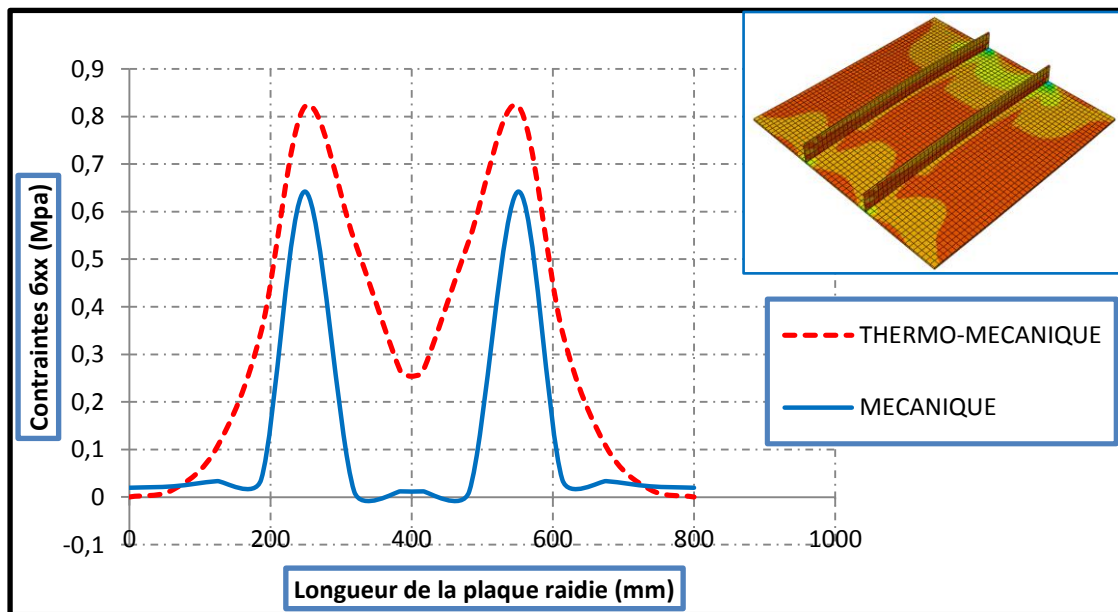


Fig.3.34. Etat de contrainte σ_{xx} de la plaque renforcée par deux raidisseurs.

➤ **Plaque munie de trois raidisseurs :**

Pour la plaque munie de trois raidisseurs, les deux courbes mécanique et thermo-mécanique suivent la même démarche avec une concentration des contraintes à la zone de raidissage et des cordons de soudage. La différence est entre 27 % à 60 % entre les deux modes qui sont dus sûrement aux champs de température soudage (l'effet de fusion de métal et de refroidissement).

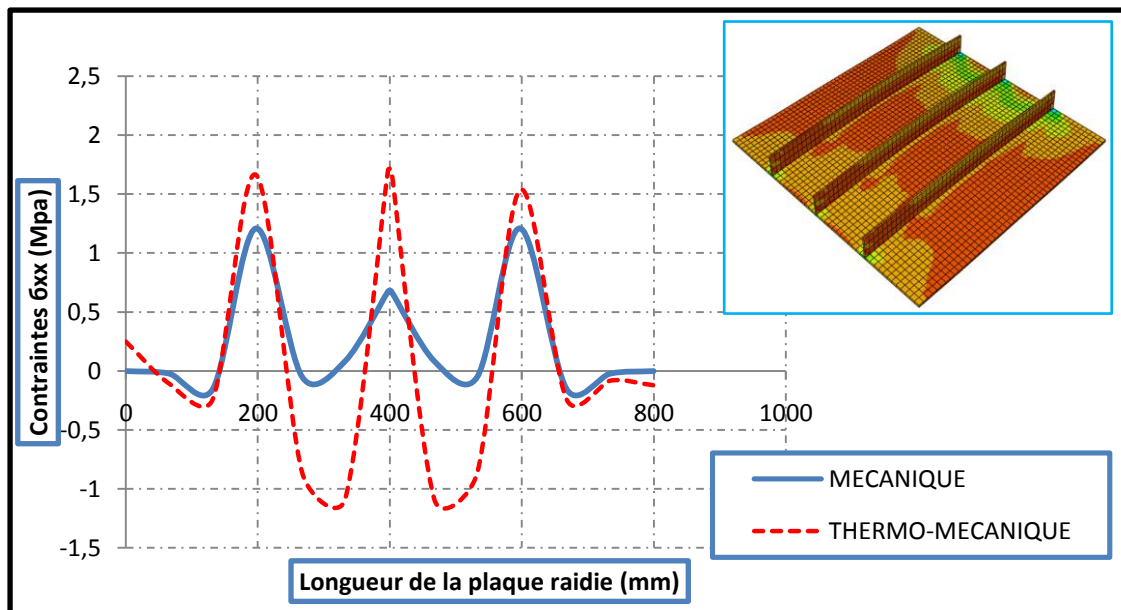


Fig.3.35. État de contrainte de la plaque renforcée de deux raidisseurs.

3.16. Etude comparative entre le comportement mécanique et thermo-mécanique :

3.16.a. Analyse mécanique :

➤ Plaque munie d'un seul raidisseur :

On a remarqué une diminution significative du déplacement au milieu et dans la zone de raidissage pour les trois modèles par contre au niveau des appuis:

- Une réduction de déplacement de l'ordre de 88% pour la plaque renforcé par un raidisseur
- Une réduction de déplacement de l'ordre de 95% pour la plaque renforcé par deux raidisseurs
- Une réduction de déplacement de l'ordre de 97% pour la plaque renforcé par trois raidisseurs

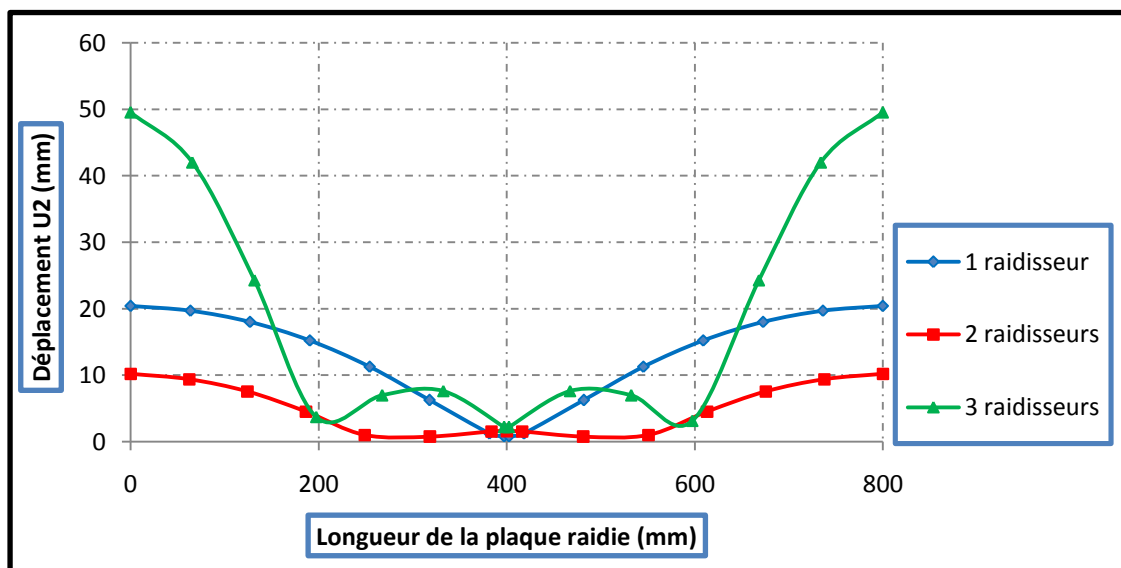


Fig.3.36. État de déplacement des plaques raidies lors de l'opération de soudage.

3.16.b. Analyse thermo-mécanique :

L'analyse thermo-mécanique démontrent le renforcement des plaques métalliques sous chargement et qui a confirmé qu'au niveau de la zone centrale à l'instant $t=25s$, la plaque munie de trois raidisseurs a présenté les grands $U_{max} = 13.67mm$, alors l'effet thermique important produit par la fusion des parties à assembler, crée dans la structure des zones à risques.

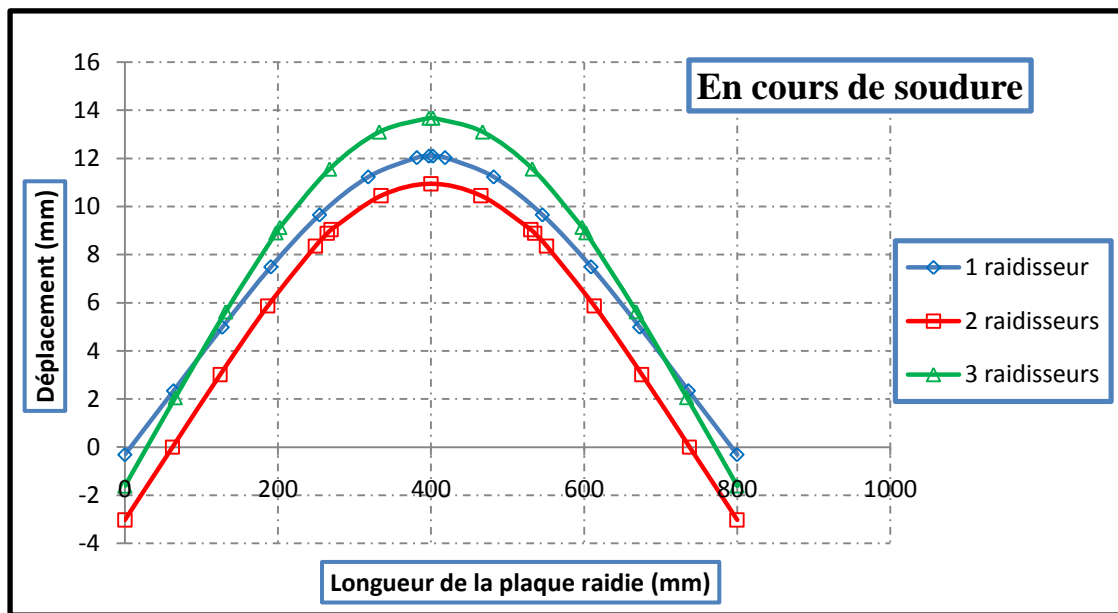


Fig.3.37. Etat de déplacements thermo-mécaniques en cours de soudure des plaques renforcées pendant $t=25s$.

L'analyse thermo-mécanique se résume par le cumul de deux analyses : états avant renforcement (constitution + chargement), états après renforcement.

Au stade du refroidissement, le comportement thermo-mécanique a un effet favorable de point de vue déplacement et cela manifeste par la réduction significative des déplacements par rapport à la simulation mécanique de l'ordre de :

- Une réduction de déplacement de l'ordre de 91% pour la plaque renforcée par un raidisseur.
- Une réduction de déplacement de l'ordre de 99 % pour la plaque renforcée par deux raidisseurs et pour la plaque renforcée par trois raidisseurs.

Aux extrémités :

- Une réduction de déplacement de l'ordre de 75% pour la plaque renforcée par un raidisseur
- Une réduction de déplacement de l'ordre de 96 % pour la plaque renforcée par deux raidisseurs et pour la plaque renforcée par trois raidisseurs.

-Une réduction de déplacement de l'ordre de 90 % pour la plaque renforcé par trois raidisseurs.

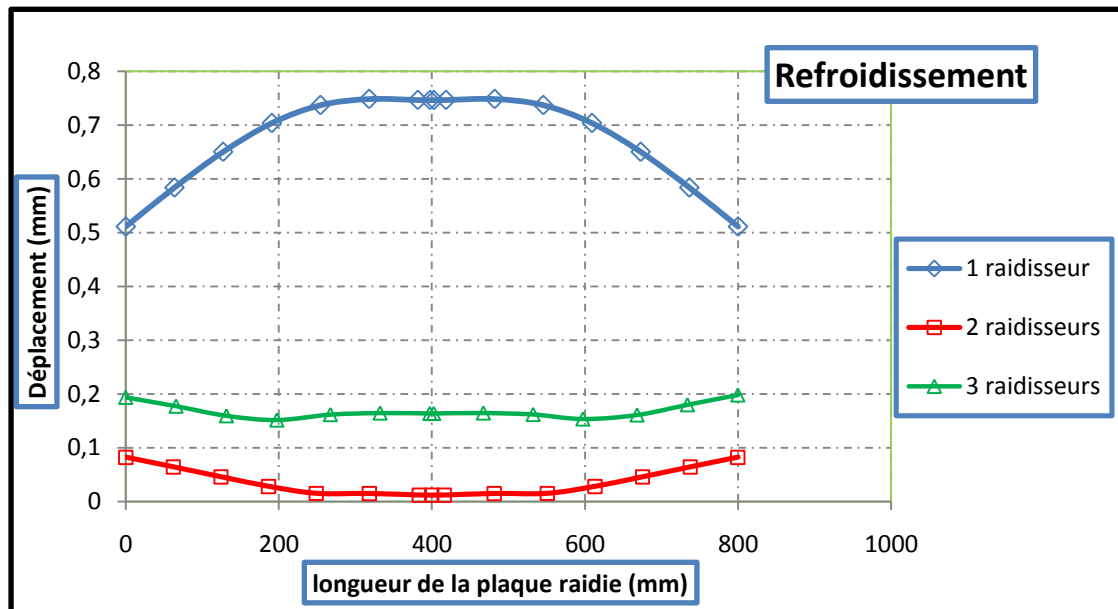


Fig.3.38. Etat de déplacements thermo-mécanique au refroidissement des plaques renforcée pendant t=85s.

3.17. ETUDE THERMIQUE :

➤ CONTRAINTES σ_x :

Par rapport au point de milieu de la plaque renforcée et en fonction de passage de la source de chaleur à travers les cordons de soudures, on a remarque une concentration des contraintes pour les modèles avec un et trois raidisseurs (présence des cordons). La zone de 640mm est la plus défavorable.

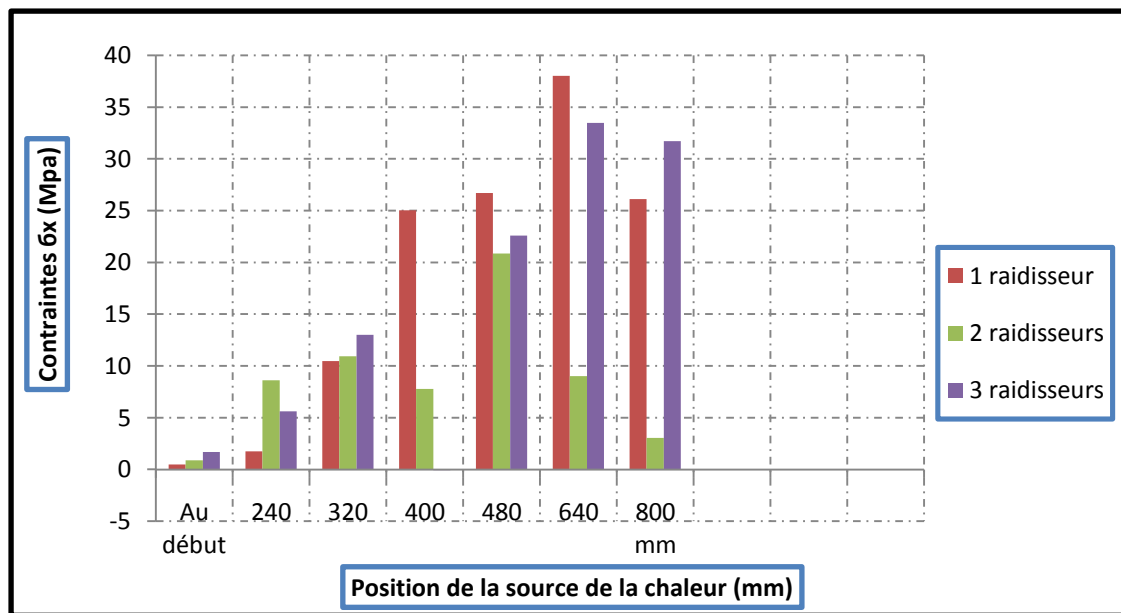


Fig.3.39. Etat de contraintes thermiques des plaques renforcées.

➤ **CONTRAINTES σ_y :**

Idem, on à remarque une concentration des contraintes pour les modèles avec un et trois raidisseurs (présence des cordons).la zone de 480mm et 640mm ont donné presque les mêmes contraintes.

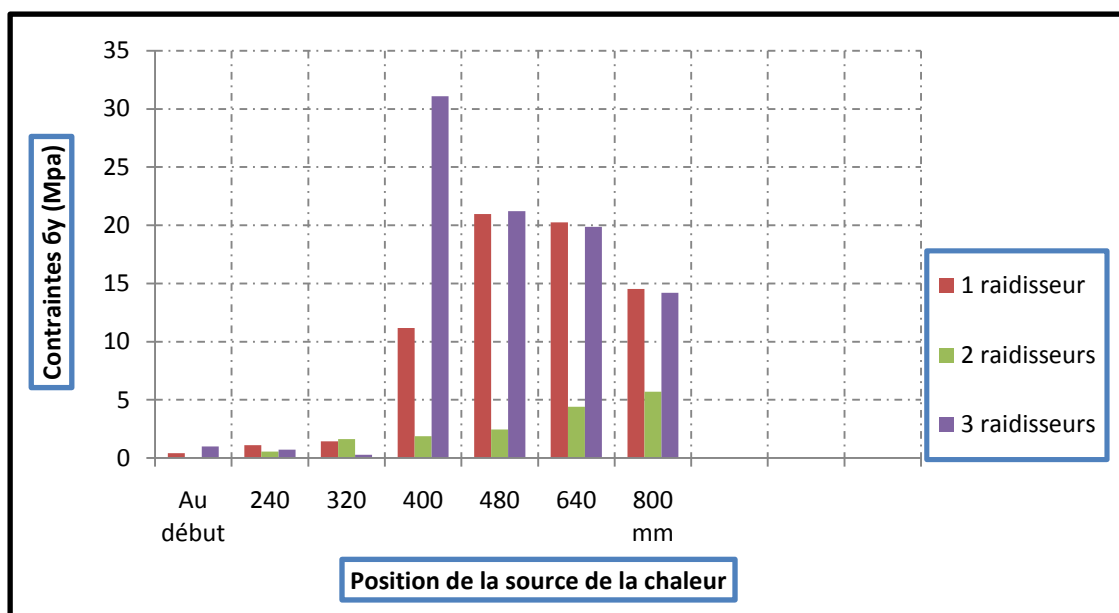


Fig.3.40. Etat de contraintes thermiques des plaques renforcées.

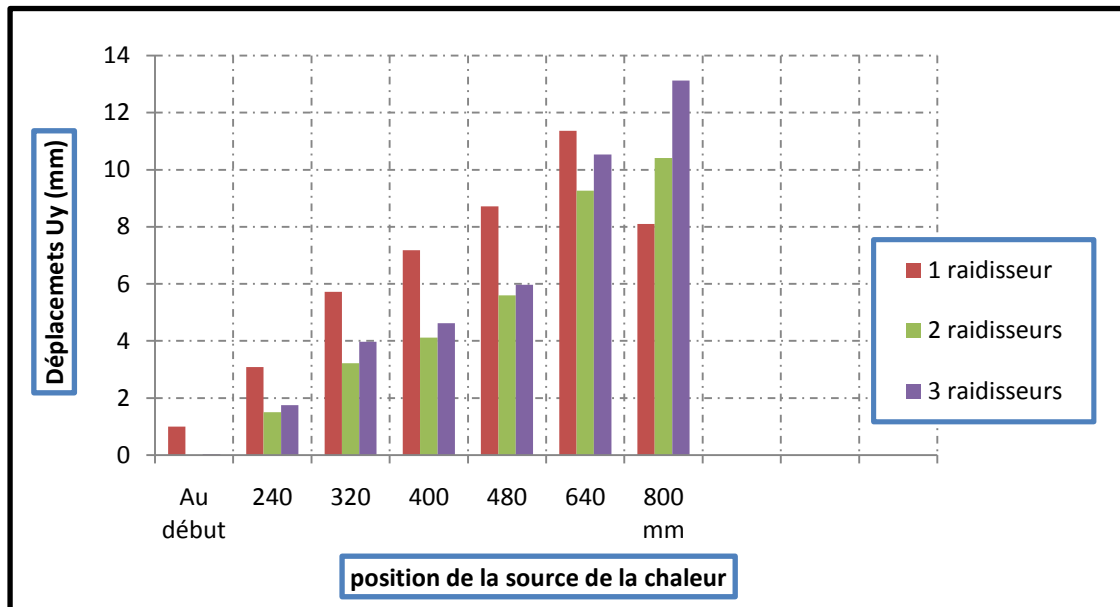
➤ **DEPLACEMENTS U_y :**

Fig.3.41. Etat de déplacements thermiques des plaques renforcées.

Les grands déplacements est lorsque la source de chaleur est à 800mm dans la zone d'extrémité.la plaque munie de trois raidisseurs à présenté de grand déplacement $U=13.20\text{mm}$.

Conclusions

- La plaque non renforcée a présenté de grands déplacements sous l'effet de la charge répartie qui est appliquée dans la direction (y), (le déplacement est de 450 mm pour une charge de 0.01 N/mm^2) et qui s'évolue encore par l'augmentation de la charge concentrée.

- Les procédés de soudage font partie des moyens d'assemblage les plus utilisés dans la fabrication de structures métalliques. L'histoire thermique et les modifications microstructurales provoquées par le soudage engendrent des contraintes et des déformations résiduelles qu'il est important de maîtriser.

-L'analyse thermique nous a permis de quantifier l'état de contraintes résiduelles transversales les plus défavorables qui sont symétriques par rapport au cordon de soudure de l'ordre de 77% de la contrainte $f_y = 235 \text{ Mpa}$.

- Les contraintes résiduelles longitudinales maximales se trouvent dans la zone du cordon de soudure pour les 3 trois modèles et qui atteignent une valeur de 61 Mpa (26 % de la contrainte $f_y = 235 \text{ Mpa}$)

- L'état de contrainte dans les extrémités des plaques raidies se traduit par des distorsions. Le modèle renforcé avec trois raidisseurs à présenter des distorsions plus importantes par rapport aux autres modèles.

- On a observé un état de déformation transversale et longitudinale presque similaire, les grandes déformations se localisent dans la zone de soudage et qui atteint une valeur presque 0.025.

- L'analyse de transfert de chaleur pour obtenir l'historique des températures. Deux incréments de temps différents sont utilisés (Soudage $t=25\text{s}$ et $t=60\text{s}$ refroidissement). L'opération de soudage implique des gradients thermiques très élevés atteignent presque 1100°C . Pendant le refroidissement, la température diminue (inférieure à 800°C)

- Une concordance très rapprochée entre les résultats thermo-mécanique et le calcul analytique avec une différence minimale de 13% ,31%,36% pour les plaques raidies avec un, deux et trois raidisseurs respectivement.

Donc le calcul mécanique ne représente pas l'état de déformation réel lors d'un assemblage soudé.

-De point de vue contrainte l'état de contrainte thermo-mécanique est le plus défavorable par rapport à la simulation mécanique.

- Mécaniquement, une diminution significative du déplacement au milieu de la plaque et dans la zone de raidissage pour les trois modèles par contre au niveau des appuis: une réduction de

déplacement de l'ordre de 88%,95% et 97% pour les plaques raidie avec un, deux et trois raidisseurs respectivement.

- L'analyse thermo -mécanique se résume par le cumul de deux analyses : états avant renforcement (constitution + chargement), états après renforcement.

Au stade du refroidissement, le comportement thermo -mécanique à un effet favorable de point de vue déplacement et cela manifeste par la réduction significative des déplacements par rapport à la simulation mécanique de l'ordre de : 75%,96 %,90% pour les plaques raidies avec un, deux et trois raidisseurs respectivement.

- La simulation numérique d'une opération de soudage, nous a permis de trouver l'état de contraintes, des déformations et des déplacements en fonction du passage de la source de chaleur dans le panneau raidi.

Recommandations pour des futurs travaux :

- Une étude expérimentale afin de vérifier et calibrer les résultats de simulation numérique obtenus par le logiciel de l'élément finis ABAQUS 6.14.
- Mesure de la température expérimentalement lors de l'opération de soudage.
- Etude des autres types d'interactions dus à l'opération de soudage qui prend en considération l'effet de la transformation métallurgique c.-à-d. l'étude de l'action de la fusion du métal d'apport sur les surfaces renforcées.
- L'utilisation d'autres modes de soudure (laser, plasma.....)

Référence bibliographique :

- [1] Marc L, Bertrand L « Collection Mémentos acier : Concevoir et construire en acier » Arcelor, 2005, p 6.
- [2] J MOREL.2002 Calcul des structures métalliques selon l’Eurocode 3.
- [3] Site internet
http://ds.arcelormittal.com/repo/poutrelles_rails_tubes_parachevement_negoce/aciers_construction_presentation.pdf » aciers de construction métallique
- [4] Vercellino .F « Composants métalliques tendus et comprimés » 2015,p 2-14 .
- [5] Philippe. A « Sculpture d’usage/Usage de la sculpture »jan 2012, p 3.
- [6] Takouachet .M « caractérisation des assemblages structuraux en construction métallique selon l'ec3 » 2008.
- [7] Manfred.A , Hirt R «Construction métallique», Traite De Génie Civil De L'école polytechnique Fédérale Volume 10 , 1994.
- [8] Klas W, « Procédés de soudage », 2012.
- [9] Jean-Pierre P , « Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc» ,2008
- [10] D. BUI, "Le cisaillement dans les plaques et les coques : modélisation et calcul", Note HI-71/7784, 1992.
- [11] Bertrand C « Influence de la structure métallurgique des soudures en acier inoxydable austénitique sur le contrôle non destructif par ultrasons » ,2000.
- [12] Bouissa Y « Techniques de mesures de contraintes résiduelles » 2014.
- [13] Zaoui M « Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudées, cas des soudures épaisses » 2009